

طراحی و کنترل سیستم‌های نانورباتیک

راضیه فرازکیش

گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

چکیده

یکی از مهم‌ترین شاخه‌های دانش نانوتکنولوژی که امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته، نانورباتیک است که این علم شامل طراحی، کنترل و برنامه‌نویسی ربات‌ها در مقیاس نانو می‌باشد. نانوربات‌ها ماشین‌های کوچکی هستند که برای انجام عملیاتی خاص و معمولاً تکرار شونده با دقت بسیار بالا طراحی می‌شوند. تکنولوژی نانورباتیک آن قدر سریع در حال پیشرفت است که به‌یقین به‌زودی زندگی انسان‌ها را به‌طور کلی دگرگون خواهد کرد. این تغییرات با استفاده از طراحی نانوربات‌های زیستی است که در بدن انسان قرار می‌گیرند و نقش محافظ و درمان‌گر را ایفا می‌کنند. این ریزماشین‌های هوشمند قادرند چندین نسخه از خودشان تهیه کنند و جایگزین بافت‌های فرسوده و آسیب‌دیده نمایند. این مقاله، به بررسی روش‌های جدیدی در طراحی و کنترل نانوربات‌های زیستی متشکل از المان‌های زیستی مانند پروتئین و DNA می‌پردازد که به‌طور گسترده در علوم پزشکی و درمانی به‌کار برده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: نانورباتیک، ادوات نانو، طراحی و کنترل، المان‌های زیستی.

ایمیل نویسنده مسئول: r.farazkish@srbiau.ac.ir

۱-مقدمه

از نظر فناوری نانو، ساخت و طراحی ماشین مکانیکی در مقیاس‌های نانو و میکرو علم نانورباتیک^۱ نامیده می‌شود. نانورباتیک علم جدیدی است که شامل طراحی، ساخت و برنامه‌نویسی نانوربات است [1]. دانش نانورباتیک بر سه حوزه متمرکز است:

۱. ساخت ربات‌های نانو مقیاس
 ۲. برنامه‌نویسی نانوربات‌ها
 ۳. جابه‌جایی ذرات نانومتری و اسمبل کردن ذرات
- نانوربات یک سیستم رباتیک کنترل‌شده در مقیاس نانو و مولکولی است. این ریزربات دارای ویژگی‌هایی همچون قابلیت استفاده در فضاهای کوچک با انعطاف‌پذیری بالا، قابلیت تابع‌پذیری بالا و سازگار در شرایط مختلف است.
- منبع تولید انرژی مورد نیاز نانوربات، شامل انرژی جنبشی- سیال (همچون خون)، پرتوهای الکترومغناطیسی، تغییرات دمایی که به‌واسطه کم و زیاد شدن نور ایجاد می‌شود و ایجاد تشعشعات مناسب است که در حال حاضر در محیط‌های مختلف زیستی قابل استفاده است.
- یکی از مهم‌ترین کاربردهای دانش نانورباتیک، علم پزشکی است. در شرایطی استفاده از نانوربات‌های زیستی ضروری به‌نظر می‌رسد که امکان دسترسی به عضو مورد نظر دشوار بوده و یا

امکان‌پذیر نباشد. برای طراحی یک نانوربات زیستی از مدل‌های طبیعی مثل ساختار رشته‌های DNA بهره می‌گیرند. از دیگر کاربردهای نانوربات‌ها، داروسازی هدفمند است. در حالت معمولی وقتی بدن بیمار دارو را به وسیله تزریق و یا خوردن دریافت می‌کند، دارو وارد رگ‌های خونی شده و به تمام قسمت‌های بدن انتقال می‌یابد. از معایب این نوع دارورسانی، به‌وجود آمدن عوارض جانبی و همچنین حداقل تأثیرگذاری بر عضو بیمار است. در دارو رسانی به‌وسیله نانوربات، ریزربات با استفاده از حسگرهای خود قسمت بیمار را شناسایی می‌کند و دارو را به آن تزریق می‌کند. مزیت این نوع دارورسانی این است که دارو فقط به عضو بیمار بدن می‌رسد و عوارض جانبی نیز از بین می‌رود. از دیگر مزایای آن مصرف کمتر دارو و سرعت بالای آن است.

بنابراین، باتوجه به اینکه این تکنولوژی پیشرفت قابل‌ملاحظه‌ای در علوم پزشکی و داروسازی دارد، طراحی و کنترل آن از اهمیت خاصی برخوردار خواهد بود.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، نانوربات‌ها، ریزماشین‌های هوشمندی هستند که بنا به نوع کاربرد آن دارای اجزای متفاوتی خواهد بود، اما اجزای اصلی نانوربات‌ها که در هر نانورباتی صرف‌نظر از نوع کاربرد آن وجود دارد، عبارتند از:

۱. نانوسنسورها که خود به سه دسته نانوسنسورهای اپتیکی، نانوسنسورهای مکانیکی و نانوسنسورهای الکترونیکی تقسیم می‌شوند.

انسان‌ها، حیوانات، گیاهان و ارگان‌های زنده، قارچ‌ها و سلول‌ها با استفاده از روش‌های مکانیکی است [10]. نانومکانیک بر مکانیک سیالات، فیزیک حالت جامد، مکانیک آماری، علم مواد و شیمی کوانتومی استوار است. در واقع، نانومکانیک شاخه‌ای از نانو فناوری است که با ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی سیستم‌های فیزیکی در مقیاس نانو همچون خواص جنبشی، کشسانی و حرارتی سر و کار دارد. مثال‌های معروف در این حوزه، بررسی خصوصیات نانومواد همچون کشش و خستگی در مقیاس نانو، سیستم‌های نانوالکترومکانیکی NEMS و نانوسیالات است [11].

مشکلات و تهدیدات در ساخت نانوربات

علیرغم تلاش‌های صورت گرفته، ساخت و طراحی نانوربات‌ها در زمینه‌های مختلف با مشکلات متعددی مواجه است. ارتباط بین بخش‌های مختلف در یک نانوربات، سخت و پیچیده است، به‌طور مثال نانوربات‌های الکتریکی به تداخل الکتریکی از منابع خارجی همچون میدان‌های الکتریکی و یا امواج رادیویی^۳، بمب‌های الکترومغناطیسی که با انفجار خود، پالس‌های بسیار بزرگی را در محیط منتشر می‌کنند^۴ و میدان‌های سرگردان از دیگر سیستم‌های الکتریکی، بسیار حساس هستند. علاوه بر موارد فوق، ساخت نانورباتی که بتواند با شرایط و اهداف مورد نظر، وارد بدن شود و عملکرد موثری داشته باشد برای محققان اهمیت بالایی دارد. همچنین بالا بودن میزان اثربخشی- این نانوسیستم‌ها از زمان حرکت به سمت منطقه مورد نظر و انجام مأموریت خود، از چالش‌های متخصصان این حوزه است. این موارد موجب شده، مرحله ساخت تا بهره‌برداری نانوربات و تجاری شدن آن، در مدت زمان طولانی به ثمر نرسند.

همچنین هزینه طراحی و ساخت نانوربات بسیار بالا بوده و عدم صرفه اقتصادی یکی از موانع جدی فعلی بر سر راه تجاری شدن است.

در کنار مشکلات موجود در سر راه ساخت نانوربات، نگرانی‌هایی نیز از سوی متخصصان حوزه‌های مرتبط با آن وجود دارد. یکی از دانشمندان موسسه فناوری ماساچوست (MIT) پیش‌بینی کرده‌است که دهه ۲۰۴۰ نانوربات‌هایی ساخته می‌شوند که می‌توانند از طریق خون وارد مغز شوند، بنا به پیش‌بینی این دانشمند، با ورود نانوربات به مغز، می‌توان اطلاعات موجود را دریافت کرده و داده‌های جدیدی را وارد آن کرد. به عبارت دیگر، این نانوربات‌ها قادر به هک کردن اطلاعات مغز خواهند بود. برطبق گفته وی، دهه‌های آینده، فناوری‌های زیست‌شناسی سنتزی^۵ با مواد سیلیسیم از جمله فناوری‌های مخرب هستند [12]. البته این نگرانی‌ها، توسط دانشمندان دیگری هم اعلام شده و برخی از متخصصان، ترس خود را نسبت به استفاده فزاینده از هوش مصنوعی و کنترل این نانو ابزارها ابراز کرده‌اند. بر این اساس،

۲. نانومحرک‌ها که این ماشین‌ها انرژی ذخیره شده الکتریکی را به حرکت مکانیکی تبدیل می‌کنند.
۳. نانومانپولی‌تور که سیستمی است که به کمک آن می‌توان ذرات نانومتريک را لمس، مشاهده و جابه‌جا کرد.

در این تحقیق سعی می‌شود تا حد امکان روش‌هایی برای طراحی اجزای فوق در ساختار نانوربات‌ها ارائه نمود که با به‌کارگیری آنها بتوان در دانش نانورباتیک، ریزربات‌هایی با کارایی بالاتر و پیچیدگی کمتر و انعطاف‌پذیری بیشتر در ابعاد نانو ارائه نمود.

۲- مروری بر سیستم‌های نانورباتیک

همان‌طور از دهه ۸۰ میلادی تاکنون، کوچک‌سازی از مهم‌ترین فعالیت‌ها در زمینه علوم کامپیوتری بوده‌است. طبق قانون مور، به‌طور متوسط هر ۱۸ تا ۲۰ ماه تعداد ترانزیستورهای که در یک تراشه قرار داده می‌شوند، ۲ برابر خواهد شد، یعنی در طراحی مدارات متراکم‌سازی صورت می‌گیرد. سرعت رشد تکنولوژی نیز هر بیست سال ۲ برابر خواهد شد. یکی از شاخه‌هایی که رشد تکنولوژی در آن بسیار چشم‌گیر است، دانش نانو و به‌ویژه نانورباتیک است که توسط بسیاری از پژوهشگران در سراسر دنیا درحال تحقیق و بررسی است [2-8].

در این مقاله، طبقه‌بندی نانوربات از دو منظر خودمختار و حشره‌ای^۲ مطرح می‌شود [9].

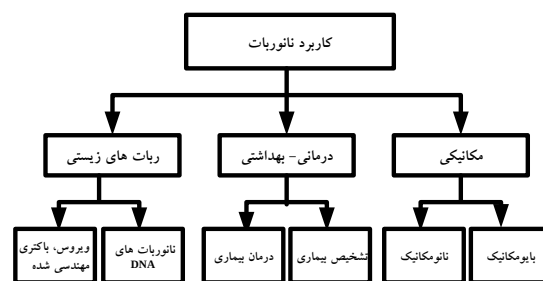
ربات خودمختار

در این دسته، هر کدام از نانوربات‌ها به‌طور جداگانه دارای یک نانوکامپیوتر هستند که نانوربات را کنترل می‌کند و موجب عملکرد مستقل آن می‌شود.

ربات حشره‌ای

این نوع ربات‌ها در یک ناوگان نانورباتیک قرار دارند و همگی توسط یک کامپیوتر مرکزی کنترل می‌شوند.

علاوه بر طبقه‌بندی فوق، نانوربات‌ها را می‌توان به‌طور کلی از نظر کاربردی مطابق آن‌چه در شکل ۱ مشاهده می‌شود، طبقه بندی کرد.



شکل ۱. کاربرد نانوربات از نظر کاربردی

برای تشریح کاربرد نانوربات در زمینه مکانیکی باید نانوربات‌ها را از دید مکانیکی به دو بخش بایومکانیک و نانومکانیک تقسیم‌بندی کرد. بایومکانیک، مطالعه ساختار و توابع سیستم‌های زیستی مانند

³ RF (Radio Frequency)

⁴ EMP (Electromagnetic Pulse)

⁵ Synthetic biology

² Insect

- پردازش اطلاعات و برنامه‌نویسی نانو.
- معماری واسط جهان میکرو به نانو: یک معماری که دسترسی سریع به نانوبات‌ها را کنترل کرده و نگهداری آنها را فراهم سازد.

نانوبات‌ها با چشم غیرمسلح قابل‌رویت نیستند، در نتیجه دستکاری و کار با آنها دشوار خواهد بود. تکنیک‌هایی مانند SEM^{۱۲} و AFM^{۱۳} برای ایجاد یک واسط قابل‌رویت و قابل لمس به کار گرفته می‌شود تا قادر به درک ساختار مولکولی این ادوات در مقیاس نانو شویم. تکنیک‌های واقعیت مجازی^{۱۴} نیز، در تحقیقات نانوتکنولوژی و بایوتکنولوژی به‌عنوان روشی برای افزایش دقت و درک بهتر به کار می‌روند [11].

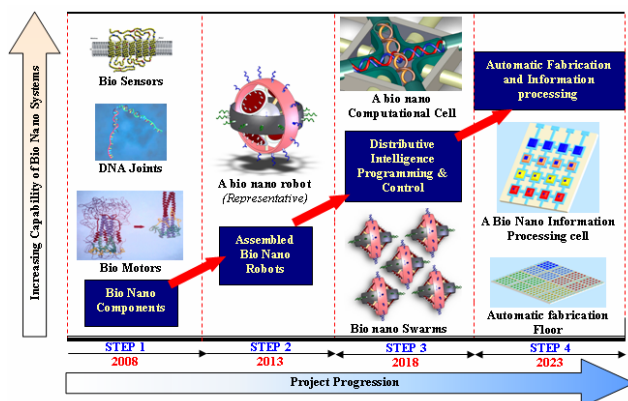
مهم‌ترین چالش گسترش نانوبات‌ها و نانوماشین‌ها، طراحی، کنترل و ساخت دشوار است که در این مقاله به آن می‌پردازیم.

۳- طراحی و کنترل نانوبات‌ها

طراحی سیستم‌های نانوباتیک

طراحی سیستم‌های نانوباتیک با علوم مختلف و گوناگونی مرتبط است. قوانین عملی برای نانوبات‌ها به نوع نانوذراتی که ما درون آنها به کار می‌بریم، بستگی دارد. باتوجه به گستردگی کاربرد نانوبات‌ها در علوم پزشکی و درمانی، در این پژوهش، به طراحی نانوبات‌های زیستی می‌پردازیم.

نکته‌ای که باید به آن دقت شود این است که نانوبات‌های زیستی متشکل از المان‌های زیستی مانند پروتئین و DNA است. در شکل ۲ روند این طراحی نشان داده شده است.



شکل ۲. روند طراحی نانوبات‌های زیستی

مراحل طراحی نانوبات‌های زیستی

مرحله ۱- المان‌های زیستی

گسترش المان‌های نانوزیستی از سیستم‌های زیستی، اولین مرحله از طراحی و گسترش یک نانوبات زیستی پیشرفته است که می‌تواند در کاربردهای آتی استفاده شود (شکل ۳). از آنجایی که ادوات و

یکی از محققان علوم کامپیوتر در هوش مصنوعی، این نانوفناوری را تا حد سلاح هسته‌ای، خطرناک توصیف کرده‌است که می‌تواند در مصارف نظامی مورد سوءاستفاده واقع شود. به‌طور مثال، از نانوبات‌ها می‌توان در زمینه تروریسم، شکنجه و صدمه زدن به سلامتی بشر در ابعاد مولکولی استفاده کرد.

علاوه بر آن، در بلند مدت موضوعاتی همچون مسائل امنیتی و تهدیدات ایجاد شده توسط هوش مصنوعی یا ربات‌های قاتل نیز مطرح است که بی‌عدالتی‌های بیشتر و مشکلات امنیتی سایبری^۶ و تجاوز به حریم خصوصی^۷ زندگی مردم را بیش از پیش تحت‌الشعاع قرار می‌دهد [12]. بنابراین، علاوه بر طراحی و ساخت نانوبات‌ها، کنترل کردن آن‌ها نیز از اهمیت بسیار زیادی برخوردار خواهد بود.

در کنار مسائل مطرح‌شده، باتوجه به علاقه‌مندی فراوان متخصصان صنعت در زمینه استفاده بیشتر از ربات‌ها و نانوبات‌ها و رشد سریع ماشین‌های هوشمند، پیش‌بینی می‌شود که در آینده از تعداد کارکنان انسانی کاسته شود و بیشتر از ربات‌ها و نانوبات‌ها در زمینه‌های مختلف پزشکی، کشاورزی، مصارف خانگی و نظامی استفاده شود. احتمال ۵۰ درصد وجود دارد که ماشین‌های با توان یادگیری سطح بالا تا سال ۲۰۵۰ به کار گرفته شوند و تا سال ۲۰۷۵ به ۷۰ درصد خواهد رسید. بر این اساس، مشاغل با درآمد بالا، چندین برابر بیشتر از مشاغل با درآمد پایین‌تر در معرض جایگزینی با ربات‌ها و نانوبات‌ها قرار دارند.

ساختار نانوبات

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، مهم‌ترین کاربرد نانوبات‌ها در زمینه پزشکی و زیست‌فناوری است که در این بخش به تحلیل نانوبات‌های زیستی^۸ می‌پردازیم. این شاخه از نانوباتیک به مطالعه طراحی، ساخت، برنامه‌نویسی و کنترل نانوبات‌ها می‌پردازد. نانوبات متشکل از هر ساختار فعال یا غیرفعال است که توانایی تحریک، دریافت، علامت‌دهی، پردازش اطلاعات، هوشمندی و رفتار جمعی را در مقیاس نانو داشته باشد [13]. این توانمندی‌ها می‌تواند به تنهایی یا به‌صورت ترکیبی توسط یک نانوبات به کار گرفته شود. بنابراین، همه نوع تحریک و دریافت یا پردازش اطلاعات می‌تواند وجود داشته باشد که نانوبات‌ها را قادر به فعل و انفعالات متقابل و تأثیر روی موضوع مورد نظر در مقیاس نانو می‌کند. برخی از مشخصاتی که در عملکرد یک نانوبات مطلوب است، عبارتند از:

- هوش جمعی^۹: عدم تمرکز و هوش توزیعی.
- رفتار مشارکتی^{۱۰}: رفتار تکاملی.
- خودسازندگی و تکرار^{۱۱}: انجام عملیات تکرارشونده و قابلیت نگهداری و تعمیر در مقیاس نانو.

⁶ Cyber security

⁷ Privacy

⁸ Biologically nanorobots

⁹ Swarm intelligence

¹⁰ Cooperative behavior

¹¹ Self-assembly and replication

¹² Scanning Electron Microscopy

¹³ Atomic Force Microscopy

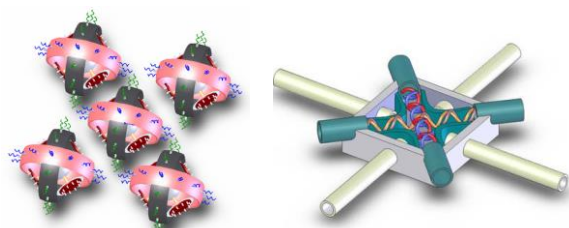
¹⁴ Virtual Reality (VR)

پیمانه‌ای^{۱۷} از نانوربات‌های زیستی را بیان می‌کند. سازمان‌دهی پیمانه‌ای، قوانین سلسله مراتبی و ساختار سه‌بعدی از ماژول‌های مختلف نانوربات‌های زیستی را تعریف می‌کند، مانند هسته درونی (مغز و منبع انرژی ربات)، واحد تحریک، واحد حسگر و واحد سیگنال‌دهی و پردازش اطلاعات.

از آغاز این مرحله یک کتابخانه المان‌های نانوزیستی گسترش داده خواهد شد که شامل طبقه‌بندی‌های مختلفی مانند تحریک، منبع انرژی، حسگر، سیگنال‌دهی و غیره خواهد بود. در آن‌جا، قادر به طراحی و گسترش نانو سیستم‌های زیستی خواهیم بود که مشخصات متحرک را ارتقا خواهد داد و قادر به حرکت به سمت مکان‌های مطلوب در مقیاس نانو می‌باشد. علاوه بر آن، برخی نانوربات‌های زیستی توانایی اسمبل کردن المان‌های زیستی و نوساختارهای مختلف از منابع طبیعی به مکان‌های ساخت و مناطق ذخیره‌سازی را خواهند داشت. درحالی‌که برخی دیگر فقط ساختارهای موجود را با تعمیر دیواره‌های آسیب‌دیده یا انجام اصلاحات مورد نیاز، تغییر می‌دهند. همچنین ربات‌هایی وجود خواهند داشت که نه تنها کار فیزیکی انجام می‌دهند، بلکه محیط اطراف را حس کرده و مطابق آن واکنش نشان می‌دهند. به عنوان مثال، سیستم‌هایی وجود خواهند داشت که کمبود اکسیژن را حس می‌کنند و سایر المان‌ها را برای تأمین اکسیژن شبیه‌سازی می‌کنند تا یک محیط پایدار ایجاد کنند.

مرحله ۳- هوش توزیعی، برنامه‌نویسی و کنترل

در این مرحله هریک از نانوربات‌های زیستی منفرد، باید با یکدیگر برای گسترش آتی مجموعه‌های مشابه و مختلف نانوربات‌ها همکاری کنند. این مرحله طراحی، پایه و اساس مفهوم اجتماع نانوزیستی^{۱۸} را مطرح می‌کند (شکل ۵).



شکل ۵. مرحله ۳، اجتماع نانوزیستی

هدف این مرحله کنترل و برنامه‌ریزی مجموعه‌های نانوزیستی است؛ طراحی گروه‌هایی از ربات‌های نانوزیستی که قادر به اجرای کارهای^{۱۹} پیچیده، محاسبات و تشریک مساعی در میان گروه‌ها هستند، مورد تمرکز خواهد بود. بنابراین، معماری‌های محاسباتی پایه باید گسترش داده شوند و قوانین نیز باید برای نانوربات‌های زیستی استنتاج شوند تا تصمیمات هوشمند در مقیاس نانو اتخاذ شود.

سیستم‌های مقصد شامل چنین عناصری خواهند بود، باید شناخت کاملی از رفتار و چگونگی کنترل آنها داشته باشیم. از یک المان ساده مانند رابط‌های ساختاری تا مفاهیم پیچیده‌تری مانند موتورها، هر المان باید به دقت مطالعه و بررسی شده و امکان تغییر آنها برای درک محدودیت‌های عملکردی هریک از آنها بررسی شود.

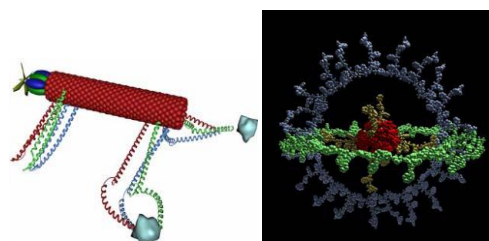


شکل ۳. المان‌های پایه زیستی برای استفاده در طراحی نانوربات‌های زیستی

DNA و نانولوله‌های کربنی^{۱۵} به شکل‌های مختلفی ساخته شده‌اند، به‌طوری‌که امکان ساخت ادوات جدیدتر و پیچیده‌تر وجود دارد. نانو ساختارها، کاندیدهای مناسبی برای مجتمع‌سازی و استقرار المان‌های نانوزیستی هستند. پروتئین‌هایی مانند rhodopsin و bacteriorhodopsin مثال‌هایی از چنین المان‌های نانوزیستی هستند. هر دو این پروتئین‌ها به‌طور طبیعی در سیستم‌های زیستی به عنوان سنسورهای نوری یافت می‌شوند. آنها اساساً به عنوان کلکتورهای خورشیدی برای جمع‌آوری انرژی وافر خورشید به کار می‌روند. این انرژی می‌تواند برای کاربردهای آبی نگه داشته شود و یا بلافاصله توسط المان‌های دیگر مصرف شود. این سنسورها، بخش اولیه از مجموعه نانوزیستی پیشنهادی را شکل می‌دهند که درون نانو ساختارها مجتمع‌سازی شده و طبق برنامه‌ریزی مورد نظر برای جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز در مقیاس نانو، فعال می‌شوند. ابزارها و تکنیک‌هایی در مدل‌سازی مولکولی و مهندسی پروتئینی برای طراحی این المان‌های مولکولی به کار می‌روند.

مرحله ۲- گردآوری (اسمبل کردن) نانوربات‌های زیستی

مرحله بعدی شامل اسمبل کردن المان‌های نانوزیستی پایدار به مجموعه‌های پیچیده است. برخی مثال‌های چنین مجموعه‌های پیچیده یا نانوربات‌های زیستی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. مرحله ۲، اسمبل کردن نانوربات‌های زیستی

در شکل ۴، یک نانوربات زیستی با پایه‌های آن که متشکل از پپتیدهای^{۱۶} مارپیچی و بدنه آن از نانولوله‌های کربنی است، نشان داده شده است. همچنین نمایش مفهومی سازمان‌دهی

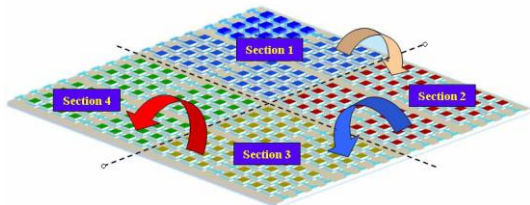
¹⁷ Modular organization

¹⁸ Bio-nano swarms

¹⁹ Task

¹⁵ Carbon nanotubes

¹⁶ Peptide



شکل ۷. مرحله ۴، نقشه ساخت خودکار نانوروبات‌ها

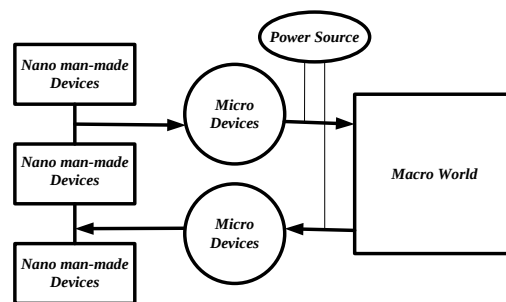
۴- فلسفه طراحی و معماری سیستم‌های نانوروباتیک زیستی (الف) سازمان‌دهی پیمانه‌ای

سازمان‌دهی پیمانه‌ای، قانون اساسی و سلسله مراتبی برای ساخت یک سیستم نانوروباتیک زیستی است. چنین ساختاری از طریق مجتمع‌سازی پایدار ادوات یا ماژول‌های زیستی ایجاد می‌شود که نانوروبات زیستی را تشکیل می‌دهند. به عنوان مثال، اگر هویت ABCD یک نانوروبات زیستی شامل برخی ویژگی‌های عملکردی (مطابق جدول ۱) را تعریف کند، آن‌گاه A، B، C و D ماژول‌های زیستی پایه آن هویت خواهند بود. ساختار پایه بر اساس تکنیک‌های مدل‌سازی مولکولی با تأکید بر قوانینی مانند حداقل‌سازی انرژی روی سطوح ترکیبی از ماژول‌های زیستی خواهد بود.

جدول ۱. معرفی ماتریس انطباق ماژول‌های زیستی

Functionality	Bio Nano Code	Capabilities Targeted
Energy Storage and Carrier	E	Ability to store energy from various sources
Mechanical	M	Ability to precisely move and orient at nano scale
Sensory	S	Sensing capabilities in various domains
Signaling	G	Ability to amplify the sensory data and communicate with bio systems
Information Storage	F	Ability to store information collected by the sensory elements
Swarm Behavior	W	Exhibit binding capabilities with similar bio-nano robots
Bio Nano Intelligence	I	Capabilities to making decisions and performing intelligent function
Replication	R	Replicate themselves when required

برای برقراری یک واسطه با دنیای ماکرو^{۲۰}، کامپیوترها و سخت‌افزارهای الکترونیکی باید به‌خوبی طراحی شوند. شکل ۶ معماری ارتباط الکترونیکی سرتاسری را نشان می‌دهد. از یک مکان مشخص، انسان‌ها باید قادر به کنترل، نظارت بر رفتار و عملکرد این گروه‌ها باشند. همچنین، توانایی‌های محاسباتی پایه برای گروه‌های درحال کار مورد نیاز است. یک نمونه سلول محاسباتی نانوزیستی که در نانوروبات‌های زیستی به کار می‌رود، در شکل ۵ نشان داده شده‌است. سلول محاسباتی پایه، در ابتدا برای ذخیره و بازیابی داده در مقیاس نانو طراحی خواهد شد؛ این ویژگی ما را قادر می‌سازد تا رفتار جمعی در ربات‌های نانوزیستی را برنامه‌ریزی کنیم. علاوه بر آن، با استفاده از این ادوات ذخیره‌سازی قادر به بازگرداندن داده‌های حساس از دنیای نانو به دنیای ماکرو خواهیم بود. این قابلیت برنامه‌نویسی، ماهیت هسته یک سیستم نانوروبات زیستی را شکل می‌دهد و در نتیجه، توانایی وافر آنها را فعال می‌سازد.


 شکل ۶. مسیر بازخورد^{۲۱} از دنیای ماکرو به دنیای نانو

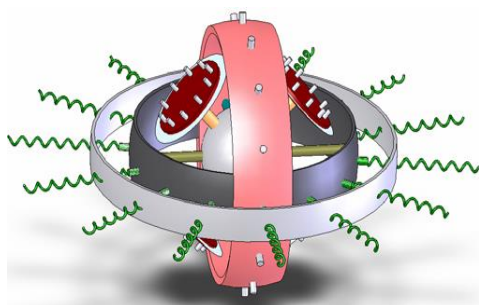
مرحله ۴- ساخت خودکار و ماشین‌های پردازش اطلاعات

برای انجام عملیات پیچیده مانند دریافت، علامت‌دهی و ذخیره‌سازی، اجتماعی از گروه‌های نانوروبات زیستی باید ایجاد شود. مرحله بعدی در طراحی نانوروباتیک، ظهور روش‌های ساخت اتوماتیک از چنین ربات‌های نانوزیستی در بافت زنده و بافت مصنوعی (آزمایشگاه) است (شکل ۷). توانایی پردازش اطلاعاتی که شامل یادگیری و قابلیت تصمیم‌گیری است، نکته کلیدی در این مرحله خواهد بود. این ویژگی گروه‌های زیستی را قادر به داشتن توانایی خودنموی^{۲۲} بر اساس محیط مقصد می‌سازد. این گروه‌ها می‌توانند برای جستجوی منابع انرژی فرعی برنامه‌ریزی شوند و توانایی انطباق با هر منبعی را داشته باشند. مدیریت انرژی، خودترمیمی و نمو، برخی از مشخصات این گروه‌ها می‌باشد.

²⁰ Macro world

²¹ Feedback path

²² Self-evolving



شکل ۹. سیستم STEM نانوزیستی پایه

۵- روش‌های آزمایشی و محاسباتی در طراحی سیستم‌های

نانورباتیک زیستی

۱. روش‌های محاسباتی

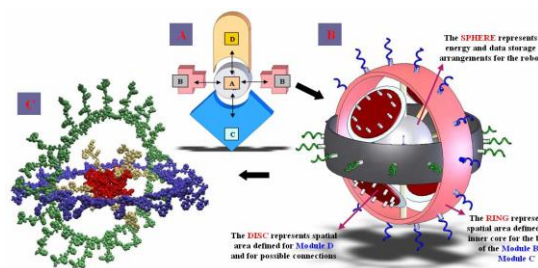
تکنیک‌های مدل‌سازی مولکولی به‌طور همگام با آزمایشات گسترده، پایه طراحی سیستم‌های نانوزیستی را شکل می‌دهند. همان‌طور که در نقشه اصلی طراحی ذکر شد، در ابتدا اجزای نانوزیستی مختلف طراحی شده و سپس عناصر عملیاتی در مجاورت یکدیگر قرار گرفته و قابل کنترل و برنامه‌ریزی خواهند بود. برخی از تکنیک‌های مدل‌سازی مولکولی که مورد تأیید هستند در ادامه آورده شده‌است:

(الف) روش‌های میدان نیروی تجربی (ماشین‌های مولکولی): در این روش، از حرکت الکترون‌ها صرف‌نظر شده و انرژی سیستم بر اساس موقعیت هسته در یک پیکربندی مولکولی به‌خصوص محاسبه می‌شود. همچنین در این روش از تقریب بورن-اوپنهایمر^{۲۴} استفاده می‌شود. مدل‌سازی اجزای نانوزیستی یا ترکیبات آنها به‌وسیله یکی از توابع انرژی انجام می‌شود.

(ب) روش کمینه‌سازی^{۲۵} انرژی: انرژی پتانسیل وابسته به مختصات پیکربندی مولکولی مطرح می‌شود. در این روش، نقاط روی سطح فوقانی (سطح انرژی پتانسیل) برای محاسبه مقدار حداقل تابع محاسبه می‌شود. چنین هندسه‌ای که مطابق حداقل انرژی است، حالت‌های پایدار پیکربندی مولکولی را شکل می‌دهد. با این روش، ما می‌توانیم تغییر پیکربندی سیستم از یک حالت حداقل به حالت دیگری را تحلیل کنیم. روش‌هایی مانند نیوتن-رافسون^{۲۶} و گوسی-نیوتن^{۲۷} برای محاسبه مقادیر کمینه به‌کار می‌روند. این روش نقاط کمینه انرژی در مولکول را می‌یابد که برای سایر محاسبات پیچیده مانند دینامیک مولکولی یا شبیه‌سازی مونت-کارلو^{۲۸} به‌کار می‌رود. همچنین می‌تواند برای پیش‌بینی ویژگی‌های گوناگون سیستم مورد مطالعه نیز به‌کار رود.

(ج) روش‌های شبیه‌سازی دینامیک مولکولی: برای پیش‌بینی کارایی پویایی (محاسبه نیرو و انرژی) یک امان زیستی، دینامیک مولکولی (MD) به‌کار می‌رود. این روش، قانون حرکت نیوتن را در میان پیکربندی متوالی سیستم برای تخمین پویایی آن به‌کار می‌برد.

سازمان‌دهی پیمانه‌ای، همچنین توانایی‌هایی مانند سازمان‌دهی درون گروه‌ها را برای نانورباتیک زیستی فراهم می‌کند که این ویژگی برای کاربردهای گوناگون بسیار مطلوب است. شکل ۸ نمایش مفهومی از سازمان‌دهی پیمانه‌ای را نشان می‌دهد. قسمت C این شکل، یک سناریوی نسبتاً واقعی را نشان می‌دهد که همه ماژول‌ها در ترتیب فضایی ویژه بر اساس عملکرد و ساختار آنها تعریف شده‌اند؛ یک ماژول به‌خصوص می‌تواند شامل گروهی از ماژول‌ها باشد. مفهوم کد نانوزیستی برای توصیف اساسی عملکرد منحصر به فرد هر یک از ادوات نانوزیستی برحسب کدهای الفبایی اختراع شده‌است. هر کد نانوزیستی یک ماژول به‌خصوص را برای تعریف ساختار ربات نانوزیستی نشان می‌دهد. برای مثال، کد E-M-G یک نانوربات زیستی با قابلیت‌های ذخیره‌سازی انرژی، تحریک مکانیکی و علامت‌دهی در مقیاس نانو را توصیف می‌کند. چنین نمایی—در طبقه‌بندی عمومی و ریاضیات نظری نانوربات‌های زیستی و گروه‌های آنها مفید خواهد بود. جدول ۱ توانایی‌های پیشنهادی ماژول‌های زیستی را برای کاربردهای عمومی نشان می‌دهد.



شکل ۸. یک نانوربات با هویت ABCD

(ب) نمونه جهانی، سیستم STEM نانوزیستی

مفهوم ساختار پیمانه‌ای، شامل طراحی یک نمونه جهانی برای سیستم‌های نانوزیستی است که می‌تواند درون هر سیستم کدگذاری شده نانوزیستی ممکن برنامه‌ریزی شده و توسعه یابد. این مفهوم، سلول‌های ریشه نارس را که در وجود انسان یافت می‌شود تقلید می‌کند، که نوعی از سلول‌های اولیه انسان است که در بافت‌های به‌خصوصی که در جنین انسان موجود است، و در نهایت در همه سه تریلیون سلول موجود در بدن شخص بالغ رشد می‌کند. سیستم پایه نانوزیستی ما نیز در روشی مشابه عمل خواهد کرد. الگوی تصاعدي جهانی متشکل از برخی کدهای نانوزیستی پایه است که سیستم STEM نانوزیستی را توصیف می‌کند. این سیستم STEM به‌گونه‌ای طراحی خواهد شد که قادر به برنامه‌ریزی زمان رانش^{۲۳} برای هر ماژول زیستی مورد نیاز باشد. شکل ۹ چنین گونه‌ای از سیستم STEM نانوزیستی را نشان می‌دهد که کد نانوزیستی آن به‌صورت EIWR-M-S-FG است و قابلیت حساسیت را افزایش می‌دهد.

²⁴ Born-Oppenheimer approximation

²⁵ Minimization

²⁶ Newton-Raphson

²⁷ Quasi-Newton

²⁸ Monte Carlo Simulation

²³ Run-time

توسط شبیه‌سازی مونت-کارلو به کار می‌رود، روش مستحکمی برای انتخاب ساختار پایه رابط‌های نهایی است. الگوریتم ژنتیک نیز برای ایجاد چنین طراحی‌هایی به کار می‌رود.

۲. روش‌های آزمایشی

مرحله ۱ در روند طراحی ارائه‌شده نیاز به یک کتابخانه از اجزای زیستی دارد که بر اساس پتانسیل آنها برای طراحی و گسترش نانوربات‌ها توصیف می‌شود. تکنیک‌های مولکولی متفاوت می‌تواند برای ارزیابی کارایی و سودمندی اجزای زیستی به کار رود. برای گسترش یک نانوربات، به اطلاعاتی از قبیل ساختار اجزای زیستی که در آن به کار می‌رود، درجه تغییر تطابقی که هر عنصر-قادر به تحمل آن است و راهنمای محیطی که این تغییرات ساختاری را تحمل کند، نیازمندیم. بر اساس روش‌های محاسباتی که در بخش قبل توضیح داده شد، تکنیک‌های آزمایشی نیز برای به‌دست آوردن این اطلاعات به کار می‌رود.

الف) طیف‌سنجی رنگ‌تابی دورانی^{۳۳} (CD): طیف‌سنجی CD می‌تواند برای به‌دست آوردن ساختار درونی هر مولکول زیستی مانند پپتید به کار رود. در این تکنیک، اشعه ماورای بنفش قطبی‌شده برای کاوش توسعه شکل‌گیری ساختار ثانویه در راه‌حل‌ها به کار می‌رود. این تکنیک، یک روش اثبات‌شده برای تخمین ترکیب ساختاری از عناصر نانورباتیک درحین تغییر در موقعیت‌های محیطی را نشان می‌دهد.

ب) انتقال انرژی رزونانسی-فورستر^{۳۴} (FRET): روشی که برای افزایش کاوش توسعه تغییرات تطابقی به‌وسیله عناصر نانورباتیک به کار می‌رود، FRET است. برای به‌کارگیری این روش، اجزای نانورباتیک باید طوری مهندسی شوند که cystein در هر دو سر آنها باقی بماند. یک سر جزء زیستی به‌عنوان اهدا کننده^{۳۵} مولکول رنگ‌شده و سر دیگر به‌عنوان پذیرنده^{۳۶} مولکول رنگ‌شده برچسب‌گذاری می‌شود. نتیجه سیگنال FRET می‌تواند با لیزر پالایش شود، به‌طوری که تغییرات سیگنال به فاصله فضایی بین دو سر یک جز زیستی وابسته خواهد بود.

ج) رزونانس (تشدید) مغناطیسی هسته‌ای^{۳۷} (NMR): NMR برای تعیین ساختار سه‌بعدی دقیق اجزای نانورباتیک به کار می‌رود. اگرچه طیف‌سنجی CD می‌تواند برای تخمین تغییرات موجود در ترکیبات ساختاری اجزای زیستی به کار رود، اما پیکربندی سه‌بعدی دقیق را مشخص نمی‌کند. این اطلاعات می‌تواند توسط طیف‌سنجی NMR و برچسب‌گذاری جزء زیستی با اتم‌های فعال NMR به‌دست آید. به‌علاوه، برای تعیین ساختارهای پایانی اجزا، NMR می‌تواند برای درک جنبش‌شناسی تغییرات ترکیبی مولکول زیستی در زمان واقعی استفاده شود.

متغیر دیگر دینامیک مولکولی که در صنعت به کار گرفته می‌شود، شبیه‌سازی مونت-کارلو است که روند تصادفی برای ایجاد پیکربندی مورد نیاز یک سیستم را استفاده می‌کند. شبیه‌سازی‌ها بر اساس محاسبه انرژی آزادی که در حین گذر از یک حالت پیکربندی به حالت دیگر رها می‌شود، انجام می‌پذیرد. در MD، سهولت پیکربندی ویژه از یک مولکول زیستی به‌وسیله محدودیت‌های انرژی انجام می‌شود. بنابراین، گذر از یک حالت داده شده به دیگری باید حتماً مطلوب باشد، مگر این‌که نیروی جنبشی خارجی وجود داشته باشد که به مولکول برای غلبه بر محدودیت انرژی کمک کند. هنگامی که یک درشت‌مولکول^{۳۸} ترکیب خود را تغییر می‌دهد، عکس‌العمل متقابل اتم‌های تکی آن با یکدیگر یک سیستم نیروی بسیار پیچیده را شکل می‌دهد. در یک حالت خاص می‌توانیم عنوان کنیم که یک پپتید که بر اساس دنباله‌ای از اسیدهای آمینه خود می‌باشد، اجازه گذر میان دو حالت شناخته‌شده پروتیین با استفاده از دینامیک مولکولی هدف^{۳۹} (TMD) را می‌دهد. TMD برای مدل‌سازی تقریبی پردازش‌های پوشا مقیاس-زمانی طولانی و تغییر مکان‌های بزرگ مرتبط به کار می‌رود.

د) اتصال مولکولی و امتیازبندی توابع: روش اتصال مولکولی برای طراحی سیستم‌های نانورباتیک بسیار مهم است. این روش برای چسباندن دو مولکول به یکدیگر در فضای سه‌بعدی به کار می‌رود. روش اتصال مولکولی برای طراحی محاسباتی مجموعه‌های نانوزیستی استفاده می‌شود. الگوریتم‌هایی مانند اتصال^{۴۰}، ژنتیک و فاصله هندسه^{۴۱} مورد بررسی قرار می‌گیرند. بسیاری از شرکت‌های تولید دارو، الگوریتم‌های جستجوی ترکیبی منظم را برای اتصال به کار می‌برند، بنابراین، این الگوریتم‌ها کاندیدهای اولیه برای تحقیقات فعلی می‌باشند. الگوریتم اتصال، راه‌حل‌های زیادی را پیشنهاد می‌کند؛ بنابراین به امتیازبندی توابع برای تصفیه نتایج تولید شده نیازمندیم. امتیازبندی توابع از انرژی آزاد همبستگی مولکول‌ها استفاده می‌کند. انرژی آزاد همبستگی می‌تواند به‌عنوان یک معادله افزایشی-از اجزای متفاوتی نوشته شود که هم‌بخشی‌های متفاوتی از همبستگی را منعکس می‌کنند.

ه) اتصال اجزای نانوزیستی در یک مکان اتصال: به‌طور خاص دو روند برای طراحی رابط‌های اتصال اجزای نانوزیستی وجود دارد؛ یک روش پایگاه داده مولکولی را جستجو کرده و یک رابط را بر اساس پارامترهای هندسی انتخاب می‌کند. CAVEAT یک روال سنتی است که این روش را به کار می‌برد. روند دیگر برای طراحی یک رابط از جستجوی اتم به اتم حاصل می‌شود. پارامترهای هندسی که می‌توانند این رابط‌ها را شناسایی کنند، طراحی می‌شوند. یک روش خاص، الگوهای مولکولی، طراحی را برای تعیین یک رابط پایه در اتصال اجزای نانوزیستی به کار می‌برد. سهولت طراحی این رابط‌ها در دنیای واقعی، یکی از چالش‌هایی است که مدل‌های مولکولی با آن مواجه می‌شوند. مقیاس انرژی کمینه که

³³ Circular Dichroism

³⁴ Foster Resonance Energy Transfer

³⁵ Donor

³⁶ Acceptor

³⁷ Nuclear Magnetic Resonance

²⁹ Macromolecule

³⁰ Targeted Molecular Dynamics

³¹ Dock

³² Distance geometry

۲. مکانیزم کنترل خارجی

این نوع مکانیزم کنترلی، اثرات پویایی نانوربات را در محیط عملیاتی آن در هنگام انجام یک برنامه کاربردی به کار می‌برد. محققان به طور فعال در استفاده از MRI^{41} به عنوان یک مکانیزم کنترل خارجی برای هدایت ذرات نانو بررسی می‌کنند. یک سیستم MRI قادر به تولید میدان مغناطیسی متغیر است که می‌تواند نیرو را روی نانوربات در فضای سه بعدی به کار برد و حرکت و موقعیت آن را کنترل کند.

سایر احتمالاتی که بررسی می‌شوند در رده مکانیزم‌های کنترلی ترکیبی قرار می‌گیرند که هدف به وسیله یک سیستم هدایتی خارجی مکان‌یابی و ثابت شده، اما رفتار نانوربات به طور محلی در یک مکانیزم کنترلی داخلی تخمین زده می‌شود. در ادامه روند طراحی سیستم‌های نانورباتیک، استفاده از سنسورهای مقیاس نانو و گسترش آنها برای تخمین رفتار نانوربات‌ها نیز توسط دانشمندان در سراسر دنیا در حال تحقیق و بررسی است.

۶- نتیجه‌گیری

در میان تکنولوژی‌های عصر حاضر، فناوری نانو علاقمندی بسیاری ایجاد کرده و انتظار می‌رود بسیار گسترده و فراگیر شود. تحقیقات بنیادی زیادی در راستای رشد و توسعه صنعت فعالیت‌های کارآفرینانه در این زمینه در سرتاسر دنیا در حال انجام می‌باشد. تکنولوژی نانورباتیک نیز به عنوان یکی از شاخه‌های فناوری نانو، به دلایل گوناگون از درمان بسیاری از بیماری‌های لاعلاج، افزایش طول عمر انسان، ارائه تسهیلات جنگی و غیره اهمیت زیادی داشته و امروزه بخش وسیعی از تحقیقات را به خود اختصاص داده است.

در این مقاله به طراحی و کنترل سیستم‌های نانورباتیک پرداختیم و روش‌های جدیدی را برای طراحی و کنترل نانوربات‌های زیستی ارائه نمودیم که این روش‌ها بر اساس عملکرد امان‌های زیستی مانند DNA و پروتئین در شرایط و محیط‌های عملیاتی مختلف صورت می‌گیرد.

۷- منابع

- [1] A. Ummat, A. Dubey, G. Sharma, and C. Mavroidis; Nanorobotics. Bio-Nano-Robotics, Book chapter (2006).
- [2] R. Farazkish, S. Sayedsalehi, and K. Navi; Novel design for quantum dots cellular automata to obtain fault-tolerant majority gate. Journal of Nanotechnology, doi: 10.1155/ 943406 (2012)
- [3] R. Farazkish; A New Quantum-Dot Cellular Automata Fault-Tolerant Five-Input Majority Gate. Journal of Nanoparticle Research 16:2259 (2014).
- [4] R. Farazkish, and F. Khodaparast; Design and characterization of a new fault-tolerant full-adder for

(د) انبرک نوری لیزری^{۳۸} (LBOT) و فلوئورسانس تک‌مولکولی: LBOT و فلوئورسانس تک‌مولکولی می‌تواند برای تعیین نیروهای به کار رفته در عناصر نانورباتیک و تغییر ساختاری که در حین پیدایش این نیروها، بعد از آشکارسازی محرک‌های مختلف رخ می‌دهد، به کار رود. LBOT می‌تواند نتایج نیرو و جابه‌جایی را با استفاده از روش sub-picoNewton و تقریب یک نانومتر فراموش کند. اندازه‌گیری‌های فلوئورسانس تک‌مولکولی، بر اساس روش FRET، می‌تواند اطلاعات مورد نیاز حالت ساختاری هر مولکول در هر نقطه از منحنی جابه‌جایی-نیرو را محاسبه کند. برای همبستگی اندازه‌گیری‌های نیرو با تغییرات ساختاری، ترکیب روش‌های LBOT و FRET مورد نیاز است. تاکنون به طراحی نانوربات‌ها پرداختیم، در ادامه کنترل سیستم‌های نانورباتیک را مورد تحلیل قرار می‌دهیم.

کنترل سیستم‌های نانورباتیک

کنترل سیستم‌های نانورباتیک به دو دسته طبقه‌بندی می‌شود:

۱. مکانیزم‌های کنترلی داخلی

۲. مکانیزم‌های کنترلی خارجی

سایر طبقه‌بندی‌ها از ترکیب مکانیزم‌های کنترلی داخلی و خارجی به دست می‌آیند.

۱. مکانیزم‌های کنترلی داخلی- فعال^{۳۹} و غیرفعال^{۴۰}

این نوع کنترل به مکانیزم احساس و انتخاب بیوشیمی مقید به مولکول‌های زیستی مختلف با عناصر گوناگون وابسته است. این یک روش سنتی است که برای طراحی مولکول‌های زیستی به کار می‌رود. استفاده از مشخصات مولکول‌های زیستی گوناگون و ترکیب کردن آنها با اطلاعات مولکول هدف که تحت تأثیر قرار می‌گیرد، از مکانیزم‌های کنترلی داخلی خواهد بود؛ اما این یک مکانیزم کنترلی غیرفعال است که در زمان اجرا، مولکول‌های زیستی نمی‌توانند رفتار خود را تغییر دهند. زمانی که برای نوع خاصی از فعل و انفعالات مولکولی برنامه‌ریزی می‌شوند، این مولکول‌ها به آن می‌چسبند. در اینجا، چگونگی بحث پایه در کنترل نانوربات‌هایی است که فرض می‌شود باید هوشمند باشند و بنابراین باید کنترل و برنامه‌ریزی شوند تا بتوانند در هر محیط پویایی مفید واقع شوند. چگونگی کنترل فعل و انفعالات نانوربات‌ها با استفاده از مکانیزم کنترلی داخلی بسیار دشوار خواهد بود. ما به یک مکانیزم کنترلی فعال برای طراحی نانوربات‌هایی نیاز داریم که می‌توانند رفتارشان را بر اساس موقعیتی که در آن قرار می‌گیرند، دقیقاً مشابه روشی که ربات‌های ماکرو به کار می‌برند، تغییر دهند. برای رسیدن به این هدف، کنترل داخلی، مفهوم کامپیوترهای مولکولی باید به کار گرفته شوند. لئونارد ادلمن، حدود یک دهه قبل، کامپیوترهای DNA را برای حل مشکلات محاسباتی با استفاده از مولکول‌های DNA مطرح کرد که می‌توان از آن استفاده کرد.

³⁸ Laser-Based Optical Tweezers

³⁹ Active

⁴⁰ Passive

⁴¹ Magnetic Resonance Imaging

quantum-dot cellular automata. *Microprocessors and Microsystems J.*, doi:10.1016/j.micpro.2015.04.004 (2015).

[5] R. Farazkish; A new quantum-dot cellular automata fault-tolerant full-adder. *J. Comput. Electr.* 14, 506–514 (2015).

[6] R. Farazkish; Fault-tolerant adder design in quantum-dot cellular automata. *Int. J. Nano Dimens.*, 8(1): 40-48 (2017).

[7] T. Eman; Low dimensional systems, nanorobots. CSIC (2011).

[8] M. Abhilash; Nanorobots. *International Journal of Pharma and Bio Sciences*, (1): 105-115, (2010).

[9] R. Kumar, O. Baghel, S. S. Kumar, S. P. Kumar, and B. Kumar; Applications of Nanorobotics. *International Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET)*, (2014).

[10] K. T. Mohamed, A. Ata, and B. M. Souhily; Dynamic analysis algorithm for a micro – robot for Surgical applications. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 7 (1), 17-28, (2011).

[11] B. Mokaberi, and A. G. Requicha; Towards Automatic Nanomanipulation: Drift Compensation in Scanning Probe Microscopes. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2004).

[12] Z. Dingju; Extendibility Scalability and Fault-Tolerance Methods for Cloud Robots Especially for Cloud Nanorobot. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 12, 6208-6219, (2015).

[13] B. Novakovic; Some Problems and Solutions in Nanorobot Control. *Annals & Proceedings of DAAAM*, (2011).