

مدل سازی قابلیت اطمینان در نانوربات‌های زیستی

راضیه فرازکیش

۱- دانشیار- گروه مهندسی کامپیوتر- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب- تهران- ایران
r.farazkish@srbiau.ac.ir

چکیده: نانورباتیک، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخه‌های فناوری نانو شامل طراحی، کنترل و برنامه‌نویسی ربات‌ها در مقیاس نانو می‌باشد. با کاربردی شدن بیونانوربات‌ها (نانوربات‌های زیستی)، دنیای علم پزشکی دگرگون خواهد شد. با به‌کارگیری این اجزای زیستی، نانوداروها می‌توانند وارد بدن شده و بخش‌های آسیب‌دیده را شناسایی و یا درمان کنند. علاوه بر آن، همان‌طور که می‌دانیم اشکالات و خطاها همه‌جا وجود داشته و می‌توانند روی سیستم‌ها تأثیر گذاشته و نتایج و اثرات نامطلوبی را در پی داشته باشند؛ بنابراین، نیازمند سیستم‌هایی هستیم که بتوانند این اشکال‌ها را تحمل کرده و هم‌چنان به عملکرد صحیح خود ادامه دهند؛ به‌چنین سیستم‌هایی، سیستم‌های تحمل‌پذیر اشکال می‌گویند. در این مقاله، به بررسی مشخصات تحمل‌پذیری اشکال در سیستم‌های بیونانورباتیک پرداخته و راه‌کارهایی برای برطرف کردن این اشکال‌ها با استفاده از مفهوم افزونگی و مدل‌سازی قابلیت اطمینان با روش مارکوف ارائه می‌نماییم. در نهایت نیز برای اولین بار نانوربات‌های زیستی قابل اطمینانی با روش افزونگی سه‌پیمانه‌ای ارائه می‌شود که در مقایسه با ساختارهای موجود استحکام بیشتری داشته و در مقابله با اشکال‌ها و خطاها تحمل‌پذیری اشکال بیشتری دارند.

واژه‌های کلیدی: نانوربات زیستی، ادوات نانو، مدل‌سازی قابلیت اطمینان، تحمل‌پذیری اشکال.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۴/۲۷

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۹/۱۶

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر راضیه فرازکیش

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - خیابان کریم خان زند، خیابان ایرانشهر شمالی، شماره ۲۲۳، ساختمان مرکزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب.

۱- مقدمه

نانوربات در زمینه پزشکی در دنیای علمی امروز، بسیاری از علوم دیگر به یاری علم پزشکی آمده‌اند تا با بالا بردن توانمندی تجهیزات پزشکی و درمانی، در افزایش سلامتی، طول عمر، تشخیص و درمان بیماری نقش موثری ایفا کنند. یکی از نکاتی که در درمان بیماری از اهمیت بالایی برخوردار است، سرعت و دقت بالا در تشخیص نوع بیماری است. از آنجا که پزشک نیاز به جواب آزمایش دارد تا به سرعت فرآیند درمان را آغاز کند، کوتاه بودن زمان شناسایی بیماری، بسیار مهم است.

یکی از پروژه‌های در حال انجام در همین زمینه، ساخت بیونانورباتی است که می‌تواند در مدت ۲۰ دقیقه وجود عفونت یا ویروس خاصی را در بدن شناسایی کند. هدف بعدی این پروژه، اصلاح نانوربات با استفاده از میکرو RNA است تا بتواند برای شناسایی بیماری‌هایی همچون سرطان و بیماری‌های قلبی مورد استفاده قرار بگیرد [۲۳].

علاوه بر این طرح، پروژه‌های متعددی در سراسر دنیا روی طراحی بیونانوربات با هدف شناسایی تومور و سرطان فعالیت دارند.

این نکته که پایش و کنترل سلامتی و بیماری موجودات زنده و انسان‌ها، با پیشرفت فناوری‌های مختلف، مؤثرتر و سریع‌تر از گذشته عمل می‌کند، امیدوار کننده است. کاهش خطاهای پزشکی و سرعت در تشخیص بیماری و اعمال درمان صحیح و سریع از مزایای استفاده از بیونانوربات است. موارد ذکر شده، تنها بخش کوچکی از تحقیقات در حال انجام در مراکز علمی دنیاست. ساخت بیوربات، در بخش درمان و پزشکی، با سرعت روزافزونی در حال رشد و پیشرفت است، اما برای رسیدن به بلوغ و تکامل، راه دشواری در پیش است که یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها قابلیت اطمینان بیونانوربات‌ها است که در بخش بعدی به آن می‌پردازیم.

نانوربات در زیست‌فناوری

از آنجا که DNA قابلیت تغییر شکل دنیای محاسباتی را دارند، محققان زیستی در تلاش هستند که از این توانمندی در تشخیص و درمان بیماری استفاده کنند. اورینگامی DNA اولین قدم در ساخت نانوربات زیستی است که قادر است، عملیات منطقی خاصی را انجام دهد. هر اندازه که ربات‌های DNA بیشتری به بدن تزریق شود، عملیات پیچیده‌تری در بدن انسان قابل انجام است. یکی دیگر از پروژه‌های مهم در حال انجام، روش آرایش DNA در ساخت نانوساختارها است که از سال ۲۰۰۶ آغاز شده و تکنیک استانداردی برای بسیاری از آزمایشگاه‌ها در زمینه داروسازی و الکترونیک است. [۲۴].

موتورهای DNA سنتزی که تحت عنوان نانوراهرونده^{۱۱} شناخته می‌شود، یکی از موضوعات تحقیقاتی پراهمیتی است که عمری بالغ بر ۱۵ سال دارد. در یکی از پروژه‌هایی که با این هدف انجام شده‌است، محققان نانوموتور DNAی ساخته‌اند که برخلاف راه رفتن همانند نمونه‌های قبلی مشابه خود، می‌غلطد، این سیستم طراحی شده، هزار

امروزه فناوری‌های نوین مانند نانورباتیک و نانوالکترونیک، به دلیل گستردگی کاربردهایی که در حوزه‌های مختلف علمی هم‌چون پزشکی، زیست‌فناوری، مکانیک، الکترونیک، سیستم‌های فیزیکی و سیستم‌های ارتباطی دارد، مورد توجه بسیاری از دانشمندان و صنایع مختلف قرار گرفته‌است. در حال حاضر، کاربرد نانوربات‌های زیستی^۱ در زمینه پزشکی، سلامت و داروسازی بیش از سایر حوزه‌ها مورد توجه است و طی چند سال گذشته پیشرفت‌های زیادی داشته‌است. اما ساخت این ریزربات‌ها به دلیل پیچیدگی‌های بدن انسان به طوری که قادر به حرکت در میان سرخرگ‌ها و شریان‌های بدن و بررسی و شناسایی بیماری‌ها باشد، به تحقیقات بیشتری نیاز دارد [۱۰-۱].

علاوه بر آن، یکی از مهم‌ترین چالش‌های سیستم‌های بیونانورباتیک، تحمل‌پذیری اشکال^۲ است. منشأ اصلی اشکال و نقص در سیستم‌های کامپیوتری (شامل سخت‌افزار و نرم‌افزار)، مشخصات اشتباه، پیاده‌سازی اشتباه، دسترسی غیر مجاز و یا مشکلات حاشیه‌ای (مانند اعمال ورودی‌های نادرست) می‌باشد [۱۷-۱۱]. مهم‌ترین منشأ ایجاد اشکال در بیونانوربات‌ها، مشخصات اشتباه و یا پیاده‌سازی اشتباه است. برای مقابله با این اشکال‌ها دو گام اساسی مطرح می‌شود:

۱. شناسایی و پیدا کردن اشکال (شامل مراحل کشف اشکال^۳، مکان‌یابی اشکال^۴ و تشخیص نوع اشکال^۵).
۲. مقابله اتوماتیک و خودکار با اشکال (شامل جلوگیری از گسترش اشکال^۶ و ترمیم یا از بین بردن اشکال^۷).

روند فوق با استفاده از طراحی سیستم‌های تحمل‌پذیر اشکال انجام می‌شود. برای ایجاد یک سیستم تحمل‌پذیر اشکال از مفهوم افزونگی^۸ (اضافه کردن منابع جدید) استفاده می‌شود. این افزونگی می‌تواند به صورت سخت‌افزاری، نرم‌افزاری و اطلاعات باشد.

برای طراحی بیونانوربات‌های تحمل‌پذیر اشکال، با توجه به ماهیت و ساختار آن‌ها، تکنیک‌های افزونگی سخت‌افزار ارائه شده و ارزیابی این سیستم‌ها نیز با مدل‌سازی قابلیت اطمینان^۹ (روش مارکوف^{۱۰}) انجام می‌شود [۲۰-۱۸].

۲- اصول و روش‌ها

۲-۱- بیونانوربات چیست؟

با استفاده از دانش نانوتکنولوژی می‌توان نانوربات‌های زیستی طراحی کرد که قادرند چندین نسخه از خودشان تهیه کنند و دقت بالایی در انجام عملیات خاص و تکرار شونده دارند. بیونانوربات‌ها دارای امکانات بالقوه‌ای هستند که با اجتماع و قرارگیری به صورت کلونی قادرند به طور موشکافانه و دقیق از سیستم مورد نظر حفاظت کنند. در واقع با ساختاری اتمی و یا مولکولی، در یک فرآیند شناخته‌شده قرار داده می‌شوند تا چرخه مورد نظر را کامل کنند. [۲۳-۲۱].

برابر سریع تر از همتایان خود است و عنوان سریع ترین نانوموتور زیستی جهان را به خود اختصاص داده است. [۲۴].

استفاده از نانوربات های زیستی مهندسی شده نیز در مراکز مختلفی در حال بررسی است. اما کلیه این روش ها در مرحله بررسی کلینیکی قرار دارند و برای رسیدن به بازار هدف، مستلزم مطالعات بیشتر است.

۲-۲- تحمل پذیری اشکال و ارزیابی قابلیت اطمینان

همان طور که پیش تر اشاره شد، اشکال ها همه جا وجود دارند و می توانند روی سیستم ها اثر گذاشته و نتایج نامطلوبی را در پی داشته باشند، بنابراین نیازمند سیستم هایی هستیم که این اشکالات را تحمل کند و به عملکرد صحیح خود ادامه دهد، به چنین سیستم هایی، سیستم های تحمل پذیر اشکال می گویند [۲۰-۱۲]. برای ایجاد سیستم تحمل پذیر اشکال از مفهوم افزونگی (اضافه کردن منابع جدید) و برای ارزیابی آن از مدل سازی قابلیت اطمینان استفاده می شود.

در فناوری نانو، طراحی سیستم هایی که در هنگام وقوع اشکالات آن قدر مستحکم اند که به درستی عمل کنند، بسیار مهم است. در نانوربات های زیستی، طبیعت مقیاس کوچک ربات، پتانسیل زیادی برای وقوع اشکال ها فراهم می کند و حتی اشکالات بسیار جزئی ساخت، منجر به جابه جایی های عظیمی می شود.

بیونانوربات ها باید برای عملکرد صحیح در مقیاس نانومتر بدون اشکال طراحی شوند، اما امروزه تکنولوژی قابل اطمینانی برای قرار گرفتن آن ها در شرایط مناسب با وجود اشکال ها موجود نیست. یک راه برای حل این مشکل، طراحی نانوربات هایی است که به اندازه کافی مستحکم هستند تا با وجود اشکالات کوچک و حتی بزرگ بتوانند به درستی عمل کنند.

یکی از مهم ترین تکنیک های طراحی سیستم های تحمل پذیر اشکال، افزونگی ساخت افزار است که با توجه به ماهیت نانوربات های زیستی در طراحی و ساخت بیونانوربات های تحمل پذیر اشکال به کار می رود. در این نوع افزونگی، تعدادی از سخت افزارها را به صورت افزونه در کنار هم قرار می دهیم تا سیستم تحمل پذیر اشکال شود. افزونگی سخت افزاری می تواند به صورت ایستا^{۱۲}، پویا^{۱۳} و یا ترکیبی^{۱۴} باشد. در افزونگی ایستا، ساختار سخت افزار ثابت است و نیازی به پیکربندی مجدد ندارد. در واقع در این نوع افزونگی، سیستم کاری ندارد که اشکال رخ می دهد یا نه، در هر صورت mask می کند. در افزونگی پویا، خطا کشف شده و سپس پیکربندی تغییر می کند. افزونگی ترکیبی، می تواند به صورت ایستا و یا پویا باشد.

یکی از مهم ترین اهداف و نیازمندی های سیستم های تحمل پذیر اشکال، قابلیت اطمینان است. قابلیت اطمینان یک سیستم، تابعی برحسب زمان است که با $R(t)$ نشان داده می شود. قابلیت اطمینان، احتمال شرطی این است که سیستم در بازه زمانی $[t_0, t]$ درست کار کند، به شرط این که در زمان شروع به کار (t_0) درست کار کرده باشد. به عبارت دیگر، قابلیت اطمینان احتمال آن است که سیستم در تمام بازه زمانی مورد نظر به طور صحیح کار کند. معمولاً t_0 برابر با

صفر در نظر گرفته می شود و این بازه زمانی می تواند بسیار طولانی باشد. عدم قابلیت اطمینان^{۱۵} یک سیستم نیز، تابعی برحسب زمان است که با $F(t)$ نشان داده می شود و احتمال شرطی آن است که سیستم در بازه زمانی $[t_0, t]$ از کار بیفتد، به شرط آن که در زمان t_0 درست کار کرده باشد. عدم قابلیت اطمینان معمولاً به عنوان احتمال خرابی سیستم در نظر گرفته می شود [۲۰].

درک تفاوت بین مفاهیم تحمل پذیری اشکال و قابلیت اطمینان بسیار مهم است. تحمل پذیری اشکال تکنیکی برای بهبود قابلیت اطمینان سیستم است، اما باید دقت داشت که الزاماً یک سیستم تحمل پذیر اشکال، قابلیت اطمینان بالایی ندارد. یک سیستم می تواند طوری طراحی شود که هر نوع خرابی سخت افزاری و یا خطای نرم افزاری را تحمل کند، در حالی که اگر احتمال وجود چنین مشکلاتی بالا باشد، باعث کاهش قابل توجه قابلیت اطمینان خواهد شد. در مقابل نیز یک سیستم با قابلیت اطمینان بالا می تواند تحمل پذیر اشکال نباشد. یک سیستم ساده می تواند با قطعات با کیفیت بالا طوری طراحی شود که احتمال خرابی سخت افزارها بسیار پایین باشد، اما اگر در این سیستم یک قطعه سخت افزاری دچار نقص شود، دیگر سیستم قادر نخواهد بود درست عمل کند. به عبارت دیگر، این سیستم قابلیت اطمینان بالایی دارد اما تحمل پذیر اشکال نیست.

به طور خلاصه می توان گفت، تحمل پذیری اشکال می تواند قابلیت اطمینان یک سیستم را با حفظ عملکرد صحیح آن در هنگام وقوع خرابی های سخت افزاری و یا خطاهای نرم افزاری بهبود بخشد.

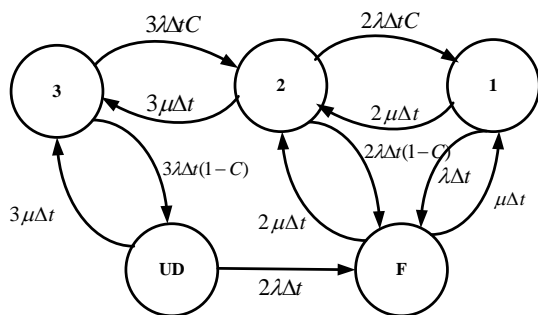
۳- ایده ها و نوآوری ها

۳-۱- طراحی بیونانوربات های تحمل پذیر اشکال

برای طراحی المان های زیستی و اسمبل کردن آن ها در بیونانوربات های تحمل پذیر اشکال از افزونگی سخت افزاری با تکنیک افزونگی سه پیمانه ای (TMR^{۱۶}) استفاده می شود (شکل (۱)). دلیل انتخاب این روش اولاً سادگی طراحی و دوماً توسعه پذیری آن است. مفهوم پایه در TMR به این صورت است که سه ماژول یکسان در کنار هم قرار گرفته و عملیات یکسان انجام می دهند و خروجی با استفاده از رأی گیری اکثریت به دست می آید. اگر یکی از ماژول ها اشکال داشته باشد، دو ماژول دیگر نتیجه اشکال ماژول سوم را پوشش داده و پس از رأی گیری اکثریت، خروجی صحیح به دست می آید.

تحمیل کند. برای حذف ماژول دارای اشکال فقط کافی است از طریق سوئیچ مربوطه اتصال ماژول دارای اشکال را به واحد جمع کننده قطع کنیم تا این اشکال به خروجی سیستم منتقل نشود. احتمال تشخیص ماژول دارای اشکال توسط سیستم با پارامتر C نشان داده می شود. برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم پیشنهادی فرض می کنیم نرخ خرابی λ و نرخ تعمیر μ باشد.

مدل مارکوف برای سیستم بیونانورباتیک پیشنهادی شکل ۲ در شکل (۳) نشان داده شده است. فرض می شود سیستم در شرایط اولیه بدون اشکال، شروع به کار می کند (حالت ۳). در دو حالت سیستم از حالت ۳ خارج می شود: گذر به حالت ۲ در صورت خرابی یکی از ماژول ها و گذر به حالت UD در صورت خرابی هر یک از ماژول ها تشخیص داده نمی شود. گذر بین سایر حالت ها نیز به طور مشابه در نظر گرفته می شود.



شکل (۳): مدل مارکوف سیستم شکل ۲

روابط مورد نیاز برای مدل مارکوف سیستم پیشنهادی بر اساس سیستم TMR ارائه می شود. این روابط در ادامه (روابط (۱) تا (۵)) آورده شده است:

$$P'(t) = P(t) \cdot Q \quad (1)$$

$$Q = \begin{bmatrix} -3\lambda\Delta t & 3\lambda\Delta t C & 0 & 3\lambda\Delta t(1-C) & 0 \\ 3\mu\Delta t & -3\mu\Delta t - 2\lambda\Delta t & 2\lambda\Delta t C & 0 & 2\lambda\Delta t(1-C) \\ 0 & 2\mu\Delta t & -2\mu\Delta t - \lambda\Delta t & 0 & \lambda\Delta t \\ 3\mu\Delta t & 0 & 0 & -3\mu\Delta t - 2\lambda\Delta t & 2\lambda\Delta t \\ 0 & 2\mu\Delta t & \mu\Delta t & 0 & -3\mu\Delta t \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$P'(t) = [P'_3(t) \quad P'_2(t) \quad P'_1(t) \quad P'_{UD}(t) \quad P'_F(t)] \quad (3)$$

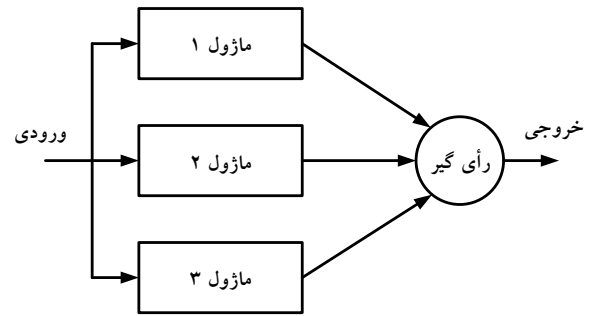
$$P(t) = [P_3(t) \quad P_2(t) \quad P_1(t) \quad P_{UD}(t) \quad P_F(t)] \quad (4)$$

$$P(0) = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (5)$$

برای سادگی انجام محاسبات از پارامتر Δt صرف نظر می کنیم، همچنین معادلات دیفرانسیل به دست آمده را از روش تبدیلات لاپلاس حل می کنیم. این معادلات به صورت روابط (۶) تا (۱۱) خواهد بود:

$$P'_3(t) = -3\lambda P_3(t) + 3\mu P_2(t) + 3\mu P_{UD}(t) \quad (6)$$

$$P'_2(t) = 3\lambda C P_3(t) - (3\mu + 2\lambda) P_2(t) + 2\mu P_1(t) + 2\mu P_F(t) \quad (7)$$



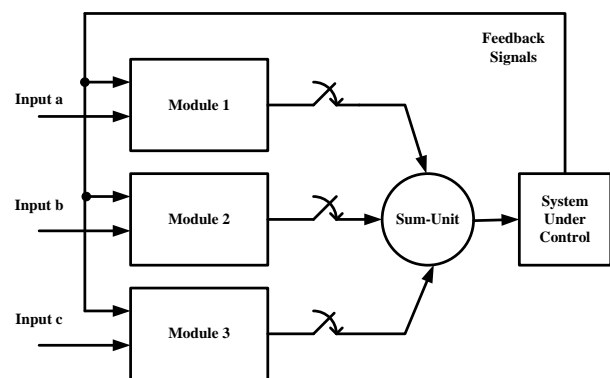
شکل (۱): طراحی المان های زیستی و اسمبل کردن آن ها با ساختار TMR

با توجه به این که المان های زیستی به طور طبیعی و به فراوانی وجود داشته و بسیار کوچک هستند، بنابراین به کارگیری تکنیک افزونگی سخت افزاری ایستا (شکل (۱)) با صرف هزینه بسیار اندک باعث بهبود کارایی و تحمل پذیری اشکال نانوربات ها می شود. با افزایش تعداد این المان ها می توان تعداد اشکالات بیشتری را تحمل کرد که این تعداد بر اساس کاربرد مورد نظر تعیین می شود.

نکته قابل توجه در ساختار پیشنهادی طراحی واحد رای گیر است. برای طراحی این بخش فقط کافی است از ساختار یک گیت اکثریت^{۱۷} در ابعاد نانو یا همان گیت AND سه ورودی استفاده کنیم.

همان طور که پیش تر اشاره کردیم، روش پیشنهادی ما برای تحمل پذیری اشکال سیستم های نانورباتیک به کارگیری ساختار TMR با پوشش اشکال و قابلیت تعمیر مجدد است. برای ارزیابی این روش از مدل سازی مارکوف استفاده می کنیم. نتایج این بخش برای تکنیک NMR^{۱۸} و روش ترکیبی قابل تعمیر می باشد.

سیستم نانورباتیکی که پیشنهاد می کنیم دارای ۳ المان زیستی افزونه است که از تکنیک های تشخیص اشکال برای تشخیص خرابی سیستم استفاده می کند. مدل پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): ساختار پایه پیشنهادی مدل مارکوف برای سیستم های بیونانورباتیک

در این ساختار هر ۳ ماژول، خروجی خود را به واحد جمع کننده ارسال می کنند که فقط کافی است یکی از ماژول ها درست باشد تا خروجی صحیح به دست آید. به عبارت دیگر، این سیستم می تواند دو خرابی را

			زیستی با ساختار TMR
۲ اشکال	دارد	دارد	روش پیشنهادی

نتایج به دست آمده نشان دهنده این است که مدل پیشنهادی ما می تواند تعداد ۲ اشکال را تحمل کند، در حالی که در ساختار متداول با ۳ ماژول تنها یک اشکال تحمل می شود. بنابراین ساختار پیشنهادی می تواند در طراحی نانوربات های زیستی تحمل پذیر اشکال به طور بهینه به کار رود. هم چنین می توان به صورت مشابه با افزایش تعداد ماژول ها، اشکالات بیشتری را تحمل کرد.

۴- نتیجه گیری

در میان تکنولوژی های عصر حاضر، فناوری نانو علاقمندی بسیاری ایجاد کرده و انتظار می رود بسیار گسترده و فراگیر شود. تحقیقات بنیادی زیادی در راستای رشد و توسعه صنعت فعالیت های کارآفرینانه در این زمینه در سرتاسر دنیا در حال انجام می باشد. تکنولوژی بیونانورباتیک نیز به عنوان یکی از شاخه های فناوری نانو، به دلایل گوناگون از درمان بسیاری از بیماری های 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، طراحی و مشخصه سازی سیستم های نانورباتیک تحمل پذیر اشکال برای اولین بار انجام شده و مشخصات تحمل پذیری اشکال در سیستم های نانورباتیک زیستی با استفاده از مدل سازی مارکوف مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت و راه کارهایی برای برطرف کردن برخی از اشکالاتی که نانوربات ها با آن ها مواجه می شوند ارائه شد. در نهایت نیز توانستیم نانوربات هایی ارائه نماییم که در مقایسه با ساختارهای پیشین استحکام بیشتری داشته و در مقابله با اشکال ها و خطاها تحمل پذیری اشکال بیشتری دارند.

سپاسگزاری

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی "طراحی نانوربات های تحمل پذیر اشکال" و با حمایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب انجام پذیرفته است.

مراجع

- [۱] فرازکیش ر، "طراحی و کنترل سیستم های نانورباتیک"، مجله دنیای نانو، سال سیزدهم، شماره چهارم و نهم، ۱۳۹۶.
- [۲] حسومی الف، فرازکیش ر، "مشخصه سازی ادوات نانوالکترونیک تحمل پذیر اشکال چند ورودی چند خروجی با استفاده از آتاماتای سلولی کوانتومی"، مجله دنیای نانو، سال چهاردهم، شماره پنجاه و یک، ۱۳۹۷.

$$P_1'(t) = 2\lambda CP_2(t) - (2\mu + \lambda)P_1(t) + \mu P_F(t) \quad (8)$$

$$P_{UD}'(t) = 3\lambda(1-C)P_3(t) - (3\mu + 2\lambda)P_{UD}(t) \quad (9)$$

$$P_F'(t) = 2\lambda(1-C)P_2(t) - \lambda P_1(t) + 2\lambda P_{UD}(t) - 3\mu P_F(t) \quad (10)$$

$$P_3(t) + P_2(t) + P_1(t) + P_{UD}(t) + P_F(t) = 1 \quad (11)$$

اگر از تبدیلات لاپلاس استفاده کنیم، روابط (۱۲) تا (۱۷) به دست می آید:

$$P_3(S) = \frac{1}{S+3\lambda} + \frac{3\mu}{S+3\lambda} P_2(S) + \frac{3\mu}{S+3\lambda} P_{UD}(S) \quad (12)$$

$$P_2(S) = \frac{3\lambda C}{S+3\mu+2\lambda} P_3(S) + \frac{2\mu}{S+3\mu+2\lambda} P_1(S) + \frac{2\mu}{S+3\mu+2\lambda} P_F(S) \quad (13)$$

$$P_1(S) = \frac{2\lambda C}{S+2\mu+\lambda} P_2(S) + \frac{\mu}{S+3\mu+\lambda} P_F(S) \quad (14)$$

$$P_{UD}(S) = \frac{3\lambda(1-C)}{S+3\mu+2\lambda} P_3(S) \quad (15)$$

$$P_F(S) = \frac{2\lambda(1-C)}{S+3\mu} P_2(S) + \frac{\lambda}{S+3\mu} P_1(S) + \frac{2\lambda}{S+3\mu} P_{UD}(S) \quad (16)$$

$$P_3(S) + P_2(S) + P_1(S) + P_{UD}(S) + P_F(S) = 1 \quad (17)$$

با انجام تبدیل لاپلاس معکوس روی معادلات فوق، می توان قابلیت اطمینان را از روابط (۱۸) و (۱۹) محاسبه کرد. باید توجه داشت که تنها در حالت های ۱، ۲، ۳ و UD سیستم قابل اطمینان است.

$$R(t) = P_3(t) + P_2(t) + P_1(t) + P_{UD}(t) + P_F(t) \quad (18)$$

$$R(t) = A + Be^{-(3\mu+2\lambda)t} + De^{-(3\mu+\lambda)t} + Ee^{-(\mu+2\lambda/3)t} + Fe^{-\lambda t} \quad (19)$$

که در رابطه (۱۹) پارامترهای A، B، D، E، F مقادیر ثابت بر حسب C، λ و μ هستند.

۳-۲- ارزیابی و مقایسه

خلاصه مقایسه عملکرد نانوربات های زیستی ساده، نانوربات های زیستی با ساختار TMR و سیستم های نانورباتیک با ساختار TMR دارای پوشش اشکال و قابلیت تعمیر مجدد در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول (۱): مقایسه عملکرد سیستم های نانورباتیک از نظر میزان

تحمل پذیری اشکال

روش	قابلیت اطمینان	تحمل پذیری اشکال	تعداد اشکالات قابل تحمل
نانوربات های زیستی ساده	ندارد	ندارد	-
نانوربات های	دارد	دارد	۱ اشکال

- [22] Hosseini S., Mehrtash M., and Khamesee M.B., Design, Fabrication and control of a magnetic Capsule-robot for the human esophagus, *Microsystem Technologies*, 17 (5), 1145–1152, 2011.
- [23] Maier S. A., Local detection of electromagnetic energy transport below the diffraction limit in metal nanoparticle plasmon waveguides, *Nature Materials*, 2 (4), 229-232, 2003.
- [24] Pandya A., and Auner G., Robotics technology: a journey into the Future, *Urol Clin North Am.*, 31 (4), 793-800, 2004.

زیر نویس ها

¹Bio-nano robots

²Fault tolerance

³Fault detection

⁴Fault location

⁵Fault diagnosis

⁶Fault containment

⁷Fault recovery

⁸Redundancy

⁹Reliability modeling

¹⁰Markov method

¹¹Nano-walkers

¹²Static

¹³Dynamic

¹⁴Hybrid

¹⁵Unreliability

¹⁶Triple Modular Redundancy (TMR)

¹⁷Majority gate

¹⁸N Modular Redundancy (NMR)

- [۳] فرازکیش ر.، "طراحی و مشخصه‌سازی نانوربات‌های زیستی"، فصل-نامه عصر برق، سال پنجم، شماره نهم، ۱۳۹۷.
- [۴] اخوان حجازی م.، حریری م. ح.، گلردی ر.، "ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع شامل تولیدات پراکنده با معیار بی نظمی"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال پانزدهم، شماره سوم، ۱۳۹۷.
- [۵] نادری ع.، قدرتی م.، "ساختار جدید ترانزیستور اثر میدانی نانولوله کربنی با ناخالصی‌های سبک در کانال و دی‌الکترونیک دو قسمتی"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال پانزدهم، شماره دوم، ۱۳۹۷.
- [۶] پوراحمد م.، احمدی الف.، بارفروشی ت.، "مدل‌سازی اثر بارگذاری بر قابلیت اطمینان ترانسفورمر"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال چهاردهم، شماره یکم، ۱۳۹۶.
- [۷] عباس‌زاده ک.، صفار ف.، "مدلسازی عددی و تحلیل نیروهای الکترومغناطیسی ترانسفورماتور آوال و مقایسه آن با ترانسفورماتور سیلندری با استفاده از روش اجزای المان محدود"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال سیزدهم، شماره یکم، ۱۳۹۵.

- [8] Ummat A., Dubey A., Sharma G., and Mavroidis C. Nanorobotics, Bio-Nano-Robotics, Book chapter 2006.
- [9] Abhilash M., Nanorobots, International Journal of Pharma and Bio Sciences, (1): 105-115, 2010.
- [10] Kumar R., Baghel O, Kumar S. S., Kumar S. P., and Kumar B., Applications of Nanorobotics, International Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET), 2014.
- [11] Farazkish, R., Sayedsalehi, S., and Navi, K., Novel design for quantum dots cellular automata to obtain fault-tolerant majority gate, *Journal of Nanotechnology*, doi: 10.1155/943406, 2012.
- [12] Farazkish R., A New Quantum-Dot Cellular Automata Fault-Tolerant Five-Input Majority Gate, *Journal of Nanoparticle Research* 16:2259, 2014.
- [13] Farazkish R., and Khodaparast F., Design and characterization of a new fault-tolerant full-adder for quantum-dot cellular automata, *Microprocessors and Microsystems J.*, doi:10.1016/j.micpro.2015.04.004, 2015.
- [14] Farazkish R., A new quantum-dot cellular automata fault-tolerant full-adder, *J. Comput. Electr.* 14, 506–514, 2015.
- [15] Farazkish R., Fault-tolerant adder design in quantum-dot cellular automata, *Int. J. Nano Dimens.*, 8(1): 40-48, 2017.
- [16] Farazkish R. Novel efficient fault-tolerant full-adder for quantum-dot cellular Automata, *Int. J. Nano Dimens.*, 9(1): 58-67, 2018.
- [17] Farazkish R., Robust and reliable design of bio-nanorobotic systems, *Microsyst Technol* .., <https://doi.org/10.1007/s00542-018-4049-1>, 2018.
- [18] Fijany A., and Toomarian B. N., New Design for Quantum Dots Cellular Automata to Obtain Fault Tolerant Logic Gates, *Journal of nanoparticle Research*, 27-37, 2001.
- [19] Johnson B.W., Design & analysis of fault tolerant digital systems, Addison-Wesley Longman Publishing Co., ISBN: 0-201-07570-9, 1988.
- [20] Koren I., and Krishna C., Fault-Tolerant Systems, Elsevier publishing, eBook ISBN: 9780080492681, 2007.
- [21] Harel E., Fabrication of latex nanostructures by nanomanipulation and thermal processing, *Nanoletters*, 5 (12), 2624-2629, 2005.