

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مخابرات سیستم

تحلیل انرژی سیستم‌های مخابرات مولکولی

نگارنده: عاطفه قراییان برده

استاد راهنما
دکتر محمد رضا جوان

دی ۱۳۹۵

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم که وجودم برایشان همه رنج بود و وجودشان

برایم همه مهر

و همسرم که نشانه‌ی لطف الهی در زندگی من است.

تقدیر و تشکر

از جناب آقای دکتر محمدرضا جوان که در طی این سال‌ها
صبورانه و دلسوزانه پیگیر و مشوق من بودند و
راهنمایی‌ها و حمایت‌های ایشان، همواره کارگشای
این‌جانب بوده، کمال سپاس‌گزاری و تشکر را دارم.

تعهد نامه

اینجانب عاطفه قرایبان برده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق – مخابرات دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه "تحلیل انرژی سیستم‌های مخابرات مولکولی"

تحت راهنمایی دکتر محمدرضا جوان متعهد می‌شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ ۹۵/۱۰/ ۲۹

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

چکیده:

در سال‌های اخیر با رشد فزاینده‌ی علم و فن‌آوری شاخه‌ی بسیار جدیدی از مخابرات به نام مخابرات مولکولی مطرح شده است. مخابرات مولکولی توسعه ساده‌ای از شبکه‌های سنتی رایج نیست بلکه این نوع مخابرات یک نمونه ارتباطی کاملاً جدید است که در آن بسیاری از فرآیندهای مخابراتی با تقلید سیستم‌های زیستی موجود در طبیعت طراحی شده‌اند. مخابرات مولکولی، یک زمینه میان‌رشته‌ای جدید شامل فناوری اطلاعات و ارتباطات، زیست‌فناوری و فناوری نانو است که در آن اطلاعات از طریق مولکول‌ها ارسال و دریافت می‌شوند. با توجه به تفاوت‌های فراوان میان مخابرات سنتی و مخابرات مولکولی بسیاری از جنبه‌های مخابراتی آن از قبیل انرژی، مسیریابی، نحوه‌ی کدگذاری، ارسال و دریافت اطلاعات، مباحث مربوط به نویز و امنیت در این نوع مخابرات به‌درستی مورد بررسی قرار نگرفته‌اند و هنوز جای کار زیادی مانده است.

برای برقراری ارتباط در سیستم‌های مخابرات مولکولی، از مولکول استفاده می‌شود. این سیستم‌ها در تمام مراحل، از تولید مولکول و پخش آن در محیط تا دریافت آن نیازمند مصرف انرژی هستند. از آنجایی که سیستم‌های نانو ابعاد کوچکی دارند، باتری این سیستم‌ها نمی‌تواند انرژی زیادی ذخیره کند بنابراین انتظار می‌رود فرستنده توانایی تولید و ذخیره انرژی را داشته باشد. بخشی از انرژی تولیدی فرستنده در فعالیت‌های معمول سیستم مصرف می‌شود و باقیمانده‌ی این انرژی ذخیره می‌شود. انرژی مصرفی در این سیستم‌ها نباید بیشتر از انرژی تولیدی آن‌ها باشد بنابراین بحث محدودیت انرژی در این سیستم‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است.

در این پایان نامه، برای کانال مبتنی بر انتشار که فاصله بین فرستنده و گیرنده در آن متغیر است ظرفیت را به دست آوردیم و با وجود محدودیت انرژی، سعی کردیم این ظرفیت را بیشینه کنیم. در نهایت با تخصیص توان مناسب به بازه‌ها و از بین بردن اثر حافظه در کانال توانستیم به ظرفیت بیشینه برسیم. نتایج نشان می‌دهد که برای ارسال موفق اطلاعات بهتر است که بیشتر توان صرف بازه‌هایی با

فاصله‌ی کمتر و شرایط مساعدتر شود.

کلمات کلیدی :

مخابرات مولکولی، نانوماشین، انرژی، ظرفیت، کانال مبتنی بر انتشار

فهرست مطالب

۱- مقدمه	۱
۱-۱- پیشگفتار	۲
۱-۲- اهداف پایان نامه	۱۰
۱-۳- مروری بر پایان نامه	۱۰
۲- مروری بر کارهای پیشین	۱۳
۲-۱- اجزای اصلی در یک سیستم مخابرات مولکولی	۱۴
۲-۱-۱- فرآیند انتشار	۱۵
۲-۱-۱-۲- مدولاسیونهای رایج در مخابرات مولکولی	۱۷
۲-۱-۲- فرآیند انتقال مولکول ها در کانال	۲۰
۲-۱-۲-۱- انتقال فعال	۲۱
۲-۱-۲-۲- انتقال غیرفعال	۲۲
۲-۱-۳- فرآیند پذیرش مولکول ها در گیرنده	۲۷
۲-۱-۳-۱- روش های آشکارسازی در گیرنده	۲۸
۲-۱-۳-۲- انواع گیرنده در مخابرات مولکولی	۳۰
۲-۲- مدل انرژی	۳۳
۲-۳- مروری بر کارهای مرتبط با پایان نامه	۳۶
۳- کارهای انجام شده در پایان نامه و نتایج شبیه سازی	۴۳
۳-۱- سیستم مدل و فرض های مربوط به مساله	۴۴
۳-۲- احتمال دریافت صحیح اطلاعات	۵۱
۳-۳- نتایج شبیه سازی	۵۷
۳-۳-۱- بررسی تاثیر توان ارسالی و سطح آستانه بر ظرفیت	۵۷
۳-۳-۲- بررسی تاثیر نوع مدولاسیون بر ظرفیت	۶۳

۴- نتیجه گیری و پیشنهادها ۶۷

۴-۱- نتیجه گیری ۶۸

۴-۲- پیشنهادها برای کارهای آتی ۶۹

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱- اجزای اصلی شبکه‌ی مخابرات مولکولی ۵
- شکل ۱-۲- اجزای اصلی یک سیستم مخابرات مولکولی شامل فرستنده، کانال و گیرنده ۱۴
- شکل ۲-۲- فرایند انتشار توسط فرستنده و پخش مولکول ها در محیط ۱۶
- شکل ۳-۲- تأثیر تداخل در مدولاسیون مبتنی بر غلظت مولکول ها، اگر بیت های ارسالی به ترتیب $\{1,1,0,1,0,1,1\}$ باشد، [۶۴] ۱۹
- شکل ۴-۲- تأثیر تداخل در مدولاسیون مبتنی بر مهندسی مولکول ها، اگر بیت های ارسالی به ترتیب $\{1,1,0,1,0,1,1\}$ ، [۶۴] ۲۰
- شکل ۵-۲- انتقال فعال : جابه جایی مولکول ها با استفاده از موتورهای مولکولی ۲۱
- شکل ۶-۲- انتقال غیرفعال: که در آن مولکول های پیام آزادانه در هر جهت حرکت میکنند ۲۳
- شکل ۷-۲- غلظت مولکول های پخش شده در محیط بر حسب زمان ۲۵
- شکل ۸-۲- غلظت مولکول ها بر حسب زمان به ازای فاصله های مختلف ۲۷
- شکل ۹-۲- فرآیند پذیرش مولکول ها ۲۸
- شکل ۱۰-۲- تعداد مولکول های رسیده به گیرنده بر حسب زمان برای گیرنده ی فعال و گیرنده ی غیرفعال ۳۳
- شکل ۱۱-۲- نحوه ی انتقال مولکول به محیط در کانال مبتنی بر انتشار [۶۹] ۳۶
- شکل ۱۲-۲- وضعیت های سیستم و گذر بین وضعیت ها [۷۲] ۳۸
- شکل ۱۳-۲- نمایش برداشت انرژی در شبکه های نانو از طریق رله [۸۹] ۴۱
- شکل ۱-۳- فرستنده، کانال و گیرنده در یک سیستم مخابرات مولکولی ۴۵

- شکل ۳-۲- این شکل الگوی رسیدن مولکول ها به گیرنده را نشان میدهد. ۴۹
- شکل ۳-۳- مدل کانال باینری در سیستم حافظه دار ۵۱
- شکل ۳-۴- مقایسه ظرفیت در دو حالتی که از دوره ارسال متوسط و دوره ارسال مناسب هربازه استفاده کرده ایم درحالیکه $n=60$ است ۵۸
- شکل ۳-۵- مقایسه ظرفیت به ازای تخصیص توان برابر و تخصیص توان بهینه ۶۱
- شکل ۳-۶- تاثیر n_0 بر ظرفیت کانال ۶۳
- شکل ۳-۷- مقایسه ظرفیت کانال در حالت استفاده از مدولاسیون Csk و Cmsk ۶۴

فهرست جدول ها

- جدول ۳-۱) دوره ارسال مناسب برای فاصله ها [۶۹] ۴۹
- جدول ۳-۲) تابع چگالی احتمالی شرطی ۵۵
- جدول ۳-۳) ظرفیت کانال به ازای n های متفاوت ۵۹
- جدول ۳-۴) پارامترهای مورد نیاز در مساله ۶۰

فصل اول

مقدمه

۱-۱ پیشگفتار

مخابرات بی‌سیم برای رساندن بشر به هدف امکان مبادله اطلاعات برای همه افراد در هر زمان و هر مکان به وجود آمد. نتیجه تلاش‌های مداوم چندین دهه گروه‌های تحقیقاتی مختلف در سراسر دنیا، برای ایجاد شبکه‌های اطلاعاتی بی‌سیم با نرخ داده بالاتر و قابلیت اطمینان بیشتر، به سیستم‌های مخابراتی قرن بیستم منجر شد که هنوز هم تحقیقات برای بهبود آن‌ها در قالب ترکیب روش‌های قبلی‌تر مانند ^۱CDMA، ^۲OFDM و ^۳MIMO ادامه دارد. در سال‌های اخیر، با رشد فزاینده‌ی علم و تکنولوژی و نزدیک شدن آن به قلمرو آرزوهای بشر، شاخه‌های متنوع بسیار جدیدتری به مسائل شبکه‌های بی‌سیم اضافه شده است. مسائلی که برای چالش‌های عمده در توسعه شبکه‌های بی‌سیم و خصوصاً حوزه شبکه‌های حسگر^۴ راه‌حلی با بنیان علمی کاملاً متفاوت عرضه می‌کند.

یکی از مهم‌ترین مسایل جدید در این زمینه، بحث طراحی معماری، تجهیزات و پروتکل‌های مخابراتی برای شبکه‌هایی با مقیاس بسیار کوچک است. در توسعه تجهیزات مخابراتی بسیار کوچک و حل مسایل مربوط به کارایی و قابلیت اطمینان آن‌ها، ناگزیر به حوزه نسبتاً جدید دیگری از فناوری به نام نانوفناوری قدم می‌گذاریم. نانوفناوری از طریق کنترل مواد در مقیاس نانومتر می‌تواند مواد، ساختارها، ابزار و سیستم‌هایی را در تمام اندازه‌ها بسازد. می‌دانیم که بسیاری از ویژگی‌های مواد (فیزیکی، شیمیایی، الکتریکی، مغناطیسی، نوری، مکانیکی و غیره) در حرکت از مقیاس‌های بزرگ‌تر به سوی نانو تغییر می‌کنند[۱].

به شاخه‌ای از علم مخابرات که به بررسی و حل چالش‌های شبکه‌های ریزمقیاس، با تجهیزاتی در

^۱ Code Division Multiple Access

^۲ Orthogonal Frequency Division Multiplexing

^۳ Multiple Input/Multiple Output

^۴ Sensor network

حدود نانو تا میکرومتر می‌پردازد، شبکه‌های نانویی می‌گوییم. شبکه‌های نانویی توسعه‌ی ساده‌ای از شبکه‌های مخابراتی کلاسیک نیستند. آن‌ها یک نمونه ارتباطی کاملاً جدید هستند که در آن‌ها بسیاری از فرآیندهای مخابراتی با تقلید از سیستم‌های زیستی موجود در طبیعت طراح شده‌اند. این شبکه‌ها مجموعه‌ای از نانو ماشین‌های^۱ متصل بهم هستند که از طریق هماهنگ کردن، انتشار و به اشتراک گذاشتن اطلاعات، قابلیت‌های ابزارهای الکترومکانیکی بسیار کوچکی را توسعه می‌دهند.

شبکه‌های نانویی می‌توانند به عنوان ستون فقرات برای توسعه سیستم‌های پیچیده‌تر مانند نانو روبات‌ها و ابزارهای محاسباتی مجتمع شده با نانو پردازشگرها، حافظه‌ها و زمان‌سنج‌های نانو استفاده شوند. به همین دلیل، باید با در نظر گرفتن محدودیت‌های فیزیکی و عملیاتی مقیاس‌های بسیار کوچک، بتوان روش‌هایی برای ارتباط یک نانو ماشین با سایر نانو ماشین‌ها یافت. در مجموع، برای ایجاد ارتباط داخلی نانو ماشین‌ها، باید واسطه‌های جدیدی طراحی شوند. برای ارتباط از طریق هزاران و حتی میلیون‌ها نانو ماشین توزیع شده، به فناوری‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری جدید و مقرون به صرفه نیازمندیم. برای این کار، اگر بخواهیم از روش‌های ارتباطی کلاسیک فعلی استفاده کنیم، با توجه به نیازمندی‌های شبکه‌های نانویی و محدودیت‌هایی از قبیل اندازه کوچک و محدودیت انرژی، به یک تحول اساسی در کلیه ساختارهای خود نیازمندیم و معماری‌های موجود، نرم‌افزارها و پروتکل‌های فعلی باید با توجه به الگوهای ارتباطی این شبکه جدید، از نو طراحی شوند و در مقابل، استفاده از مولکول‌ها به جای امواج صوتی و الکترومغناطیسی، برای کدگذاری و انتقال اطلاعات، باعث ایجاد یک الگوی ارتباطی جدید و تعریف ساختارهای جدید مانند فرستنده-گیرنده‌های مولکولی، مدل‌های کانال و پروتکل‌های جدیدی مختص شبکه‌های نانویی می‌شود.

از میان روش‌های متعددی که تاکنون برای ارتباط میان نانو ماشین‌ها ارایه شده است، مخابرات مولکولی [۸-۲] به دلیل تناسب بسیار زیاد با ابعاد و محیط مسئله، بهترین گزینه‌ی ممکن به شمار

^۱ Nanomachine

می‌رود. مخابرات مولکولی از مولکول‌ها برای کدگذاری اطلاعات استفاده می‌کند و ارسال آن‌ها را توسط سیستم‌های زیستی موجود در طبیعت انجام می‌دهد. در این نوع شبکه نیز با توجه به فاصله‌ی میان فرستنده و گیرنده، باید از روش‌های ارتباطی متفاوتی استفاده کرد که به‌طور عمده به سه دسته‌ی نزدیک‌برد^۱، متوسط‌برد^۲ و دوربرد^۳ تقسیم می‌شود [۹]، [۱۰].

برای حالت نزدیک برد، می‌توان از دو روش سیگنالینگ یونی [۱۱-۱۵] و موتورهای مولکولی [۲۱-۱۶] استفاده کرد. ما در این پایان‌نامه از روش ارتباطی نزدیک‌برد مبتنی بر سیگنالینگ یونی استفاده کرده‌ایم که در فصل سوم بیشتر توضیح خواهیم داد.

برای مخابرات مولکولی متوسط‌برد نیز دو روش وجود دارد. استفاده از باکتری تاژک‌دار و موتورهای کاتالیزستی که در هر دو روش اطلاعات بصورت رشته‌های DNA^۴ کدگذاری می‌شود و از طریق نانوموتور یا باکتری، از فرستنده به گیرنده می‌رسد [۷]. برای مخابرات مولکولی دوربرد نیز روش‌های متعددی وجود دارد، ازجمله برای مخابرات مولکولی بی‌سیم می‌توان از فرمون‌ها، هاگ‌ها و گرده‌افشانی استفاده کرد و برای حالت سیمی، روش‌های ارتباطی مبتنی بر نوری و مدارهای جریان مویرگی را به‌کار برد [۱]. معماری قابل تجسم برای این شبکه، از خوشه‌هایی از نانو ماشین‌ها تشکیل شده که با استفاده از مکانیسم‌های مخابرات نزدیک‌برد، در داخل خوشه ارتباط برقرار می‌کنند و برای ارتباط بین خوشه‌ها، از روش‌های متوسط‌برد و دوربرد استفاده می‌کنند.

در شکل ۱-۱ اجزای کلی شبکه‌ی مخابرات مولکولی آورده شده است. اجزای اصلی این شبکه به پنج دسته‌ی اصلی تقسیم می‌شود: فرستنده، گیرنده، پیام، حامل و محیط. فرستنده، وظیفه‌ی کد کردن و انتقال اطلاعات به محیط را برعهده دارد. گیرنده، وظیفه‌ی استخراج اطلاعات از محیط و کدگشایی آن را برعهده دارد. پیام‌ها در مخابرات مولکولی همان مولکول‌ها هستند که باید سه ویژگی اصلی را دارا

¹ Short-range (nm to μm)

² Medium-range (μm to mm)

³ Long-range (mm to m)

⁴ Deoxyribonucleic Acid

باشند:

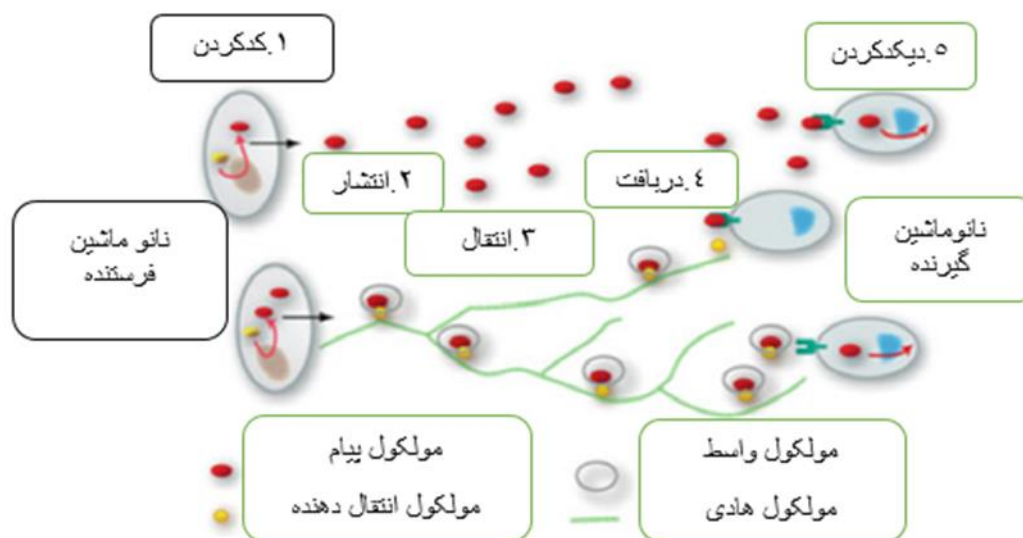
(۱) باید دارای ساختاری از پیش تعریف شده باشند که توسط گیرنده نیز به سادگی قابل تشخیص

باشند.

(۲) نباید در محیط با سایر مولکول‌ها وارد واکنش شوند.

(۳) نانوماشین گیرنده باید پس از دریافت بتواند به راحتی آن‌ها را از محیط حذف کند.

حامل‌ها در مخابرات مولکولی دو دسته‌اند: موتورهای مولکولی^۱ و یون‌های کلسیم^۲. محیط انتقال نیز در مخابرات مولکولی می‌تواند خیس باشد مانند بدن انسان و یا خشک باشد مانند سیستم کنترل کیفیت کارخانه‌ها.



شکل ۱-۱) اجزای اصلی شبکه‌ی مخابرات مولکولی

هر یک از این اجزا بر کل فرایند ارتباطی تأثیر می‌گذارند که این فرآیند ارتباطی شامل کدگذاری،

^۱ Molecular Motor

^۲ Calcium Ion

انتشار، انتقال، دریافت و کدگشایی می‌باشد.

کدگذاری اطلاعات : در مخابرات مولکولی، فرستنده اطلاعات را بر روی مولکول‌ها به گونه‌ای کدگذاری می‌کند که توسط گیرنده قابل دریافت باشد. کد کردن اطلاعات در حالت کلی در مخابرات مولکولی به سه شیوه انجام می‌شود:

(۱) **کد کردن مبتنی بر غلظت^۱ (Csk)** [۲۲-۲۷]: در این روش برای ارسال هرسمبل از غلظت

مشخصی از مولکول‌ها استفاده می‌شود.

(۲) **کد کردن مبتنی بر مولکول^۲ (Mosk)** [۲۶-۳۱]: در این روش از پارامترهای داخلی مولکول

مانند ساختار شیمیایی، موقعیت نسبی المان‌های مولکول، پلاریزاسیون و کدگذاری DNA برای کدگذاری اطلاعات استفاده می‌شود به این صورت که برای ارسال هرسمبل از یک نوع مولکول خاص استفاده می‌شود. گاهی نیز از ترکیب دو روش مبتنی بر غلظت و مبتنی بر مولکول برای کد کردن اطلاعات استفاده می‌شود [۳۲].

(۳) **کد کردن مبتنی بر فرکانس^۳ (Fsk)** [۳۳]: در این روش برای ارسال هر سمبل یک دوره‌ی

ارسال مشخص در نظر گرفته می‌شود به عنوان مثال برای ارسال صفر در همان لحظه مولکول‌ها در محیط رها می‌شوند و برای ارسال یک، سیستم مدت زمان مشخص منتظر می‌ماند و سپس مولکول‌ها را در محیط رها می‌کند.

مقدار اطلاعاتی که فرستنده بر روی مولکول‌ها کد می‌کند به ساختار نانوماشین بستگی دارد. به

عنوان مثال اگر گیرنده قابلیت تشخیص ۸ وضعیت متمایز را داشته باشد فرستنده می‌تواند $\log_2 8 = 3$

بیت اطلاعات را بر روی مولکول‌های پیام کد کند. ما در این پایان‌نامه از روش مبتنی بر غلظت برای کد

^۱ Concentration Shift Keying

^۲ Molecular Shift Keying

^۳ Frequency Shift Keying

کردن اطلاعات استفاده کرده‌ایم.

انتشار: فرآیند انتشار باعث آزاد کردن مولکول‌های پیام در محیط می‌شود. فرستنده پیام را با رها کردن مولکول در محیط از طریق شکافت سلولی و یا متصل کردن آن‌ها به حامل‌های مولکولی درون محیط قرار می‌دهد. مولکول پیام معمولاً پروتیینی است که به دلیل داشتن میل ترکیبی بالا می‌تواند به گیرنده متصل شود. در متون شیمی میل ترکیبی عبارت است از گرایش اجزای نامتشابه به تشکیل ترکیبات شیمیایی باتوجه به ویژگی الکترونیکی آن‌ها. وقتی از حامل‌ها برای انتقال اطلاعات استفاده می‌کنیم نانوماشین فرستنده باید میل ترکیبی موتورهای مولکولی و مولکول‌های پیام را تضمین کند، اگر این میل ترکیبی وجود داشته باشد مولکول‌های پیام می‌توانند برای آغاز انتشار به موتورهای مولکولی متصل شوند. برای اطمینان از این میل ترکیبی می‌توان از روش کپسوله سازی اطلاعات توسط وزیکول^۱ استفاده کرد. وزیکول‌ها میل بالایی برای ترکیب با موتورهای مولکولی دارند و از آن‌ها به عنوان واسط استاندارد بین موتورهای مولکولی و مولکول‌های پیام متفاوت می‌توان استفاده کرد. بخاطر ابعاد کوچک اجزا در مخابرات مولکولی، انرژی و تعداد مولکول‌های پیام که در دسترس نانوماشین قرار می‌گیرد محدود است بنابراین نانوماشین فرستنده توانایی‌اش در برقراری ارتباط محدود است به همین دلیل ممکن است از چند نانوماشین فرستنده با یک نوع مولکول استفاده شود تا سطح سیگنال ارسالی افزایش یابد.

انتقال: از آنجایی که نانوماشین فرستنده و گیرنده در دو مکان مجزا قرار گرفته‌اند مولکول‌های پیام از فرستنده به گیرنده جابجا می‌شوند. این جابجایی ممکن است فعال^۲ [۳۴-۳۷] باشد و با مصرف انرژی همراه باشد و یا غیرفعال^۳ [۳۸-۴۸] باشد و بدون مصرف انرژی انجام پذیرد. در انتقال غیرفعال بسته به اینکه نانوماشین‌ها در مجاورت هم قرار دارند و یا جدا از هم هستند از دو روش دسترسی

^۱ Vesicle

^۲Active Transport

^۳ Passive Transport

مستقیم^۱ [۳۸-۴۲] و یا دسترسی غیرمستقیم^۲ [۴۲-۴۸] برای انتقال اطلاعات استفاده می‌شود. در روش دسترسی غیرمستقیم مولکول‌های پیام آزادانه در محیط حرکت می‌کنند، در این روش هرچه مولکول‌های پیام بزرگتر باشند و یا چسبندگی محیط بیشتر باشد حرکت مولکول‌های پیام کندتر خواهد بود به این روش انتشار مولکولی نیز می‌گویند. در انتقال فعال نیز مولکول‌های پیام از طریق ریل‌های مولکولی که فرستنده و گیرنده را به هم متصل کرده‌است منتقل می‌شوند. در انتقال فعال احتمال رسیدن مولکول‌ها به گیرنده افزایش می‌یابد و زمان رسیدن مولکول‌ها به گیرنده نیز کاهش می‌یابد اما از آنجایی که بحث ما در این پایان‌نامه بهینه‌سازی انرژی است ترجیحاً از روش انتقال غیرفعال استفاده می‌کنیم که در آن انرژی کمتری برای انتقال اطلاعات استفاده می‌شود.

دریافت: این بخش شامل فرآیندی است که طی آن مولکول‌های اطلاعات به نانوماشین گیرنده می‌رسند و به دلیل میل ترکیبی مولکول‌های پیام و گیرنده‌های مقصد اطلاعات دریافت می‌شود. برای اینکه گیرنده بتواند مولکول‌های متفاوتی را دریافت کند باید گیرنده‌های متفاوتی در سطح خود داشته باشد.

کدگذاری: پس از دریافت مولکول‌های پیام توسط گیرنده، بخش مهم و اساسی در گیرنده آشکارسازی اطلاعات است. براساس شرایط کانال روش‌های متعددی برای آشکارسازی اطلاعات مطرح شده است [۴۹-۵۲]. مهمترین روش‌هایی که برای آشکارسازی اطلاعات در روش انتشار وجود دارد روش آشکارسازی انرژی^۳ و آشکارسازی دامنه^۴ است [۵۲]. در روش آشکارسازی دامنه، گیرنده غلظت مولکول‌های دریافتی را با سطح آستانه مقایسه می‌کند و در روش آشکارسازی انرژی گیرنده انرژی سیگنال دریافتی را با سطح آستانه مقایسه می‌کند که در فصل دوم این روش‌ها را به تفصیل بیان خواهیم کرد.

^۱ Gap Junction

^۲ Diffusion

^۳ Amplitude Detection

^۴ Energy Detection

مزیت روش آشکارسازی انرژی نسبت به آشکارسازی دامنه این است که در این روش به تعداد مولکول و انرژی کمتری برای انتقال اطلاعات احتیاج است. ما در این پایان نامه از روش آشکارسازی انرژی استفاده کرده ایم.

تداخل: از جمله مشکلات اساسی در کانال مبتنی بر انتشار، بحث تداخل و نویز [۵۸-۵۳] است. در مخابرات مولکولی هر چیزی که بر روی سیگنال تغییر ایجاد کند به عنوان تداخل شناخته می شود. تداخل بین سمبلی^۱ (ISI) [۶۵-۵۸]، تداخل کانال همزمان^۲ (CCI) [۶۶]، [۶۷] از جمله تداخل های مهم در روش انتشار مولکولی هستند. تداخل بین سمبلی به این علت به وجود می آید که تمام مولکول های منتشر شده در محیط در همان دوره ی ارسال جاری به گیرنده نمی رسند و تعدادی از مولکول های سمبل جاری در دوره های ارسال بعد به گیرنده می رسند و باعث ایجاد تداخل در سیگنال می شوند. تداخل کانال همزمان نیز زمانی ایجاد می شود که دو کانال در یک محیط از یک نوع مولکول برای انتقال اطلاعات استفاده کنند در این حالت چون سمبل های ارسالی در محیط پخش می شوند ممکن است توسط کانال دیگر دریافت و باعث ایجاد تداخل در سیگنال آن کانال شود. ما در این پایان نامه، تداخل بین سمبلی را فقط در نظر گرفته ایم.

انرژی: سیستم های مخابرات مولکولی در تمام مراحل ارسال از تولید مولکول و انتقال آن در محیط تا دریافت آن نیازمند مصرف انرژی هستند. از آنجایی که سیستم های نانو ابعاد کوچکی دارند باتری در این سیستم ها نمی تواند انرژی زیادی ذخیره کند بنابراین انتظار می رود فرستنده توانایی تولید و ذخیره انرژی را داشته باشد. بخشی از این انرژی تولیدی توسط فرستنده، در فعالیت های معمول سیستم مصرف می شود و بقیه ی این انرژی ذخیره می شود. انرژی مصرفی در این سیستم ها نباید بیشتر از انرژی تولیدی در آن ها باشد بنابراین تحلیل انرژی [۷۶-۶۸] در این سیستم ها از اهمیت بالایی برخوردار است که ما

^۱ Intersymbol Interference

^۲ Co_Channel Interference

نیز در این پایان نامه به تحلیل انرژی در سیستم‌های مخابرات مولکولی می‌پردازیم.

۱-۲ اهداف پایان نامه

در این پایان نامه، علاوه بر معرفی کامل یک سیستم مخابرات مولکولی که متشکل از فرستنده، کانال و گیرنده می‌باشد، نحوه‌ی مصرف انرژی در خلال ارسال و دریافت مولکول را نیز به طور کامل بررسی کرده‌ایم. تاکنون پژوهش‌هایی در زمینه‌ی بهینه‌سازی انرژی در سیستم‌های مخابرات مولکولی انجام شده است که در تمام این کارها فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده ثابت در نظر گرفته شده است اگرچه این فرض مساله را ساده‌تر می‌کند اما در عمل مشاهده می‌کنیم به علت سیال بودن محیط، این فرض چندان هم درست نیست و فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده در طی ارسال‌های متوالی ثابت نمی‌ماند. بنابراین ما در این پایان نامه کانالی را در نظر گرفتیم که فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده در بازه‌های متوالی در آن تغییر می‌کند و از روش انتشارمولکولی در آن برای انتقال اطلاعات استفاده می‌شود سپس برای ارزیابی عملکرد این کانال با در نظر گرفتن تاثیر سمبل قبل بر سمبل جاری احتمال دریافت صحیح اطلاعات در چنین کانالی را بدست آوردیم. از آنجایی که بحث انرژی در سیستم‌های مخابرات مولکولی از اهمیت زیادی برخوردار است و همیشه مقدار انرژی در دسترس در این سیستم‌ها محدود است در این پایان نامه سعی کردیم با وجود محدودیت انرژی، ظرفیت کانال مورد نظر را بیشینه کنیم بنابراین یک مساله‌ی بهینه سازی برای ظرفیت مطرح می‌شود که با تخصیص توان مناسب به بازه های ارسال و انتخاب سطح آستانه‌ی مناسب و از بین بردن اثر تداخل، این ظرفیت بیشینه می‌شود.

۱-۳ مروری بر پایان نامه

در فصل دوم به مرور کارهای پیشین خواهیم پرداخت، کانال و گیرنده را در یک سیستم مخابرات مولکولی مدل و توابع ریاضی حاکم بر آن‌ها را یادآوری خواهیم کرد و پژوهش‌هایی که مرتبط با پایان نامه هستند را نیز بیشتر توضیح خواهیم داد. در فصل سوم نیز سیستم مدل مورد نظر و مساله‌ی مورد بحث در پایان نامه را بیان خواهیم کرد و تاثیر سطح آستانه، مدولاسیون و نحوه‌ی تخصیص توان بر ظرفیت

کانال را بررسی خواهیم کرد. در نهایت در فصل چهارم در رابطه با چالش‌های مخابرات مولکولی و زمینه‌هایی که امکان کار کردن در آن‌ها وجود دارد صحبت خواهیم کرد.

فصل دوم

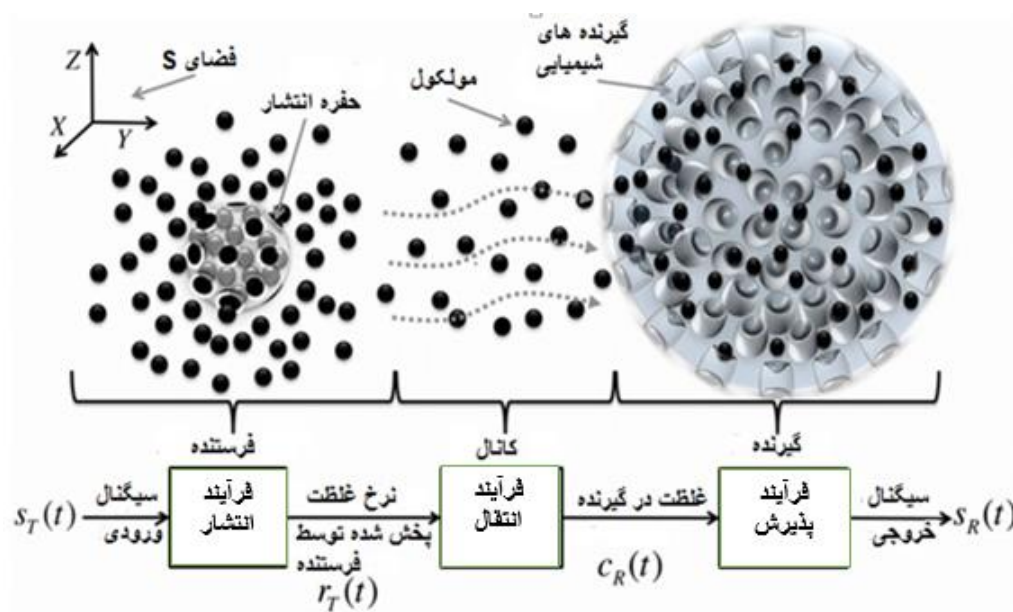
مروری بر

کارهای پیشین

در این فصل مروری خواهیم داشت به کارهایی که در زمینه مخابرات مولکولی انجام شده است و برای این منظور در چند بخش به توضیح کارهای پیشین می‌پردازیم. در بخش اول، شبکه‌ی مخابرات مولکولی و روش‌های ارسال و دریافت اطلاعات را به طور کامل بررسی می‌کنیم و معادلات حاکم بر پخش مولکول‌ها در کانال مبتنی بر انتشار را به دست می‌آوریم. در بخش دوم نحوه‌ی مصرف انرژی در کانال مبتنی بر انتشار را به طور کامل بررسی می‌کنیم و میزان انرژی مصرفی در این کانال‌ها را بدست می‌آوریم. در نهایت در بخش سوم بر کارهایی که به این پایان‌نامه نزدیک و مرتبط هستند تمرکز خواهیم داشت و به مرور آن‌ها خواهیم پرداخت.

۱-۲ اجزای اصلی در یک سیستم مخابرات مولکولی

همان‌طور که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است اجزای اصلی در یک سیستم مخابرات مولکولی را می‌توان به سه بخش کلی فرستنده (فرایند انتشار)، کانال (فرایند انتقال) و گیرنده (فرایند پذیرش) تقسیم کرد که در ادامه به‌طور جداگانه به توضیح هر کدام از این بخش‌ها خواهیم پرداخت.



شکل ۱-۲) اجزای اصلی یک سیستم مخابرات مولکولی شامل فرستنده، کانال و گیرنده

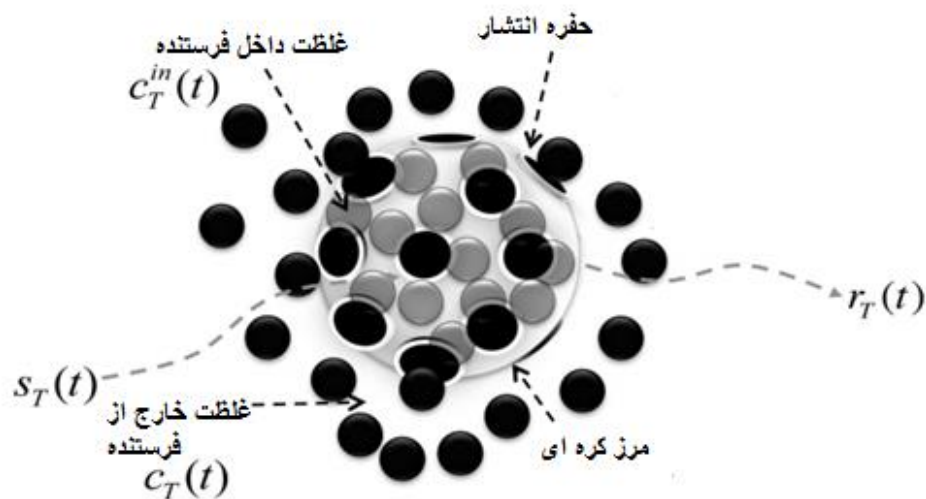
مولکول‌ها در فرستنده با توجه به سیگنال ورودی $S_T(t)$ مدوله می‌شوند و از طریق حفره‌هایی در فرستنده با نرخ $r_T(t)$ در محیط پخش می‌شوند. فرض شده است که محیط، سه بعدی و سیال است. منظور از سیال، روان بودن محیط است. مولکول‌ها در نزدیکی فرستنده، غلظت بیشتری دارند و در جهت شیب غلظت و بدون مصرف انرژی در تمام جهات پخش می‌شوند. مولکول‌ها به‌طور تصادفی و از غلظت بیشتر به غلظت کمتر به‌طرف گیرنده، در محیط پخش می‌شوند که این حرکت تصادفی مولکول‌ها را می‌توان به‌عنوان نویز هم در نظر گرفت. غلظتی که به گیرنده می‌رسد $C_R(t)$ نشان‌دهنده تعداد مولکول‌هایی است که به گیرنده می‌رسد که در بخش‌های بعدی این غلظت را برحسب شرایط محیط، فاصله فرستنده و گیرنده و زمان به دست خواهیم آورد.

مولکول‌های رسیده به گیرنده توسط گیرنده‌های شیمیایی که در سطح کراهی گیرنده قرار دارند واکنش انجام می‌دهند و گیرنده از طریق این واکنش تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده را می‌تواند حساب کند. در نتیجه گیرنده بر اساس تعداد مولکول‌های رسیده تصمیم می‌گیرد که فرستنده یک یا صفر ارسال کرده است.

۲-۱-۱ فرآیند انتشار

فرایند انتشار^۱ شامل مدوله کردن مولکول‌ها در فرستنده بر اساس سیگنال ورودی $S_T(t)$ و وارد کردن غلظتی از مولکول‌ها با نرخ $r_T(t)$ به کانال می‌باشد که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.

^۱ Emission Process



شکل ۲-۲) فرایند انتشار توسط فرستنده و پخش مولکول‌ها در محیط

سیگنال ورودی $S_T(t)$ می‌تواند یک پالس مستطیلی باشد که در معادله زیر نشان داده شده است.

$$S_T(t) = A \times \text{rec}\left(\frac{t - T_e/2}{T_e}\right) \quad (۱-۲)$$

که در آن A دامنه غلظت مولکول‌هایی است که توسط فرستنده در محیط منتشر می‌شوند و T_e مدت زمان انتشار مولکول‌ها است.

برای فرآیند انتشار فرض‌هایی در نظر گرفته شده است از جمله:

- فرستنده به صورت کره در نظر گرفته شده است که فضای مجاورت خود را به دو قسمت داخلی و بیرونی تبدیل می‌کند.
- ارتباط بین لایه داخلی و لایه بیرونی به وسیله‌ی حفره‌های انتشار برقرار می‌شود و مولکول‌ها از طریق این حفره‌ها در محیط منتشر می‌شوند.
- غلظت مولکول‌ها در لایه داخلی و در مقابل $C_T(t)$ غلظت مولکول‌ها در لایه بیرونی است.

- فرض شده است که فرستنده توانایی تبدیل غلظت درونی به غلظتی از مولکول‌ها با نرخ $r_T(t)$ را بر اساس سیگنال ورودی $S_T(t)$ دارد.

۱-۱-۱-۲ مدولاسیون‌های رایج در مخابرات مولکولی

در اکثر مقاله‌ها از دو نوع مدولاسیون برای کدگذاری اطلاعات استفاده شده است، هرچند که بعضی از مقاله‌ها از مدولاسیون‌هایی که ترکیب این دو نوع مدولاسیون است نیز استفاده کرده‌اند.

- **مدولاسیون مبتنی بر غلظت مولکول‌ها:** این نوع مدولاسیون شبیه مدولاسیون دامنه

^۱(ASK) در مخابرات کلاسیک است [۲۶]. مدولاسیون مبتنی بر غلظت (CSK) به این

صورت است که برای ارسال b بیت به 2^b سطح غلظت متفاوت از مولکول‌های پیام احتیاج

است. به عنوان مثال اگر در هر بار ارسال یک بیت بفرستیم و سمبل‌های ارسالی صفر و

یک باشند به ازای ارسال یک، غلظتی از مولکول‌ها و به ازای ارسال صفر غلظتی کمتر از

غلظت ارسال یک می‌فرستیم که اگر به ازای ارسال صفر هیچ غلظتی نفرستیم به آن

مدولاسیون On_Off_Keying می‌گویند. از آنجایی که تداخل در مدولاسیون

On_Off_Keying کمتر است در اکثر مقاله‌ها بیشتر این نوع مدولاسیون را در نظر

می‌گیرند. ما نیز در این پایان‌نامه از روش On_Off_Keying برای کدگذاری اطلاعات

استفاده کرده‌ایم.

- **مدولاسیون مبتنی بر مهندسی مولکول‌ها:** مدولاسیون مبتنی بر مهندسی مولکول‌ها

(MoSK) شبیه مدولاسیون FSK در مخابرات کلاسیک است، به این ترتیب که برای ارسال

b بیت به 2^b نوع مولکول متفاوت نیاز داریم. به عنوان مثال اگر در هر بار ارسال یک بیت

بفرستیم و سمبل‌های ارسالی صفر و یک باشند برای ارسال اطلاعات در این سیستم دو

^۱ Amplitude Shift Keying

نوع مولکول احتیاج است، به این ترتیب که برای ارسال صفر از مولکول نوع A استفاده می‌کنیم و برای ارسال یک از مولکول نوع B، این مولکول‌ها می‌توانند در اندازه، شکل ظاهری یا قطبیت باهم تفاوت داشته باشند.

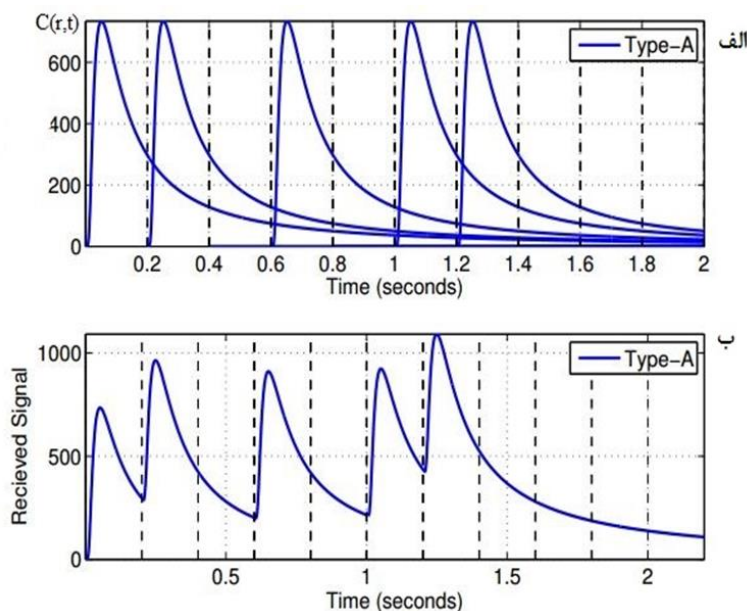
در مدولاسیون Mosk نسبت به CSK، چون اثر ناشی از سمبل‌های قبلی در گیرنده کمتر می‌شود تداخل کمتر است اما بخاطر پیچیدگی در فرستنده و گیرنده در مقایسه با CSK موجب شده که کمتر از این نوع مدولاسیون در مقالات استفاده کنند [۲۸]. به‌خصوص برای ارسال بیت‌های بیشتر این پیچیدگی بیشتر نمایان می‌شود.

در برخی مقالات نیز از ترکیب مدولاسیون مبتنی بر غلظت و مدولاسیون مبتنی بر مولکول برای کدگذاری اطلاعات استفاده می‌کنند. در این روش در هر بازه‌ی ارسال، اطلاعات براساس غلظت کد می‌شود اما در هر دو بازه‌ی متوالی از دو نوع مولکول برای کد کردن اطلاعات استفاده می‌شود. در روش M_{csk}^1 که ترکیب دو روش Csk و Mosk است پیچیدگی فرستنده و گیرنده مثل روش Csk کم است و تداخل بین سمبلی نیز مثل روش Mosk ناچیز است. تأکید می‌کنیم که ما در این پایان‌نامه از مدولاسیون مبتنی بر غلظت مولکول‌ها استفاده کرده‌ایم و در نهایت نیز برای خنثی کردن اثر تداخل از روش Mcsk بهره برده‌ایم.

در شکل ۲-۳ تأثیر تداخل بر روی سیگنال دریافتی توسط گیرنده در مدولاسیون مبتنی بر غلظت مولکول‌ها نشان داده شده است. بیت‌های ارسالی به ترتیب $\{1,1,0,1,0,1,1\}$ است. به ازای ارسال یک، فرستنده غلظتی از مولکول‌ها شامل M مولکول را می‌فرستد و به ازای ارسال صفر هیچی نمی‌فرستد. همان‌طور که معلوم است بر اثر تداخل تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده خیلی افزایش می‌یابد که ممکن است موجب خطا در گیرنده شود. شکل ۲-۳-الف غلظتی را که فرستنده می‌فرستد را نشان

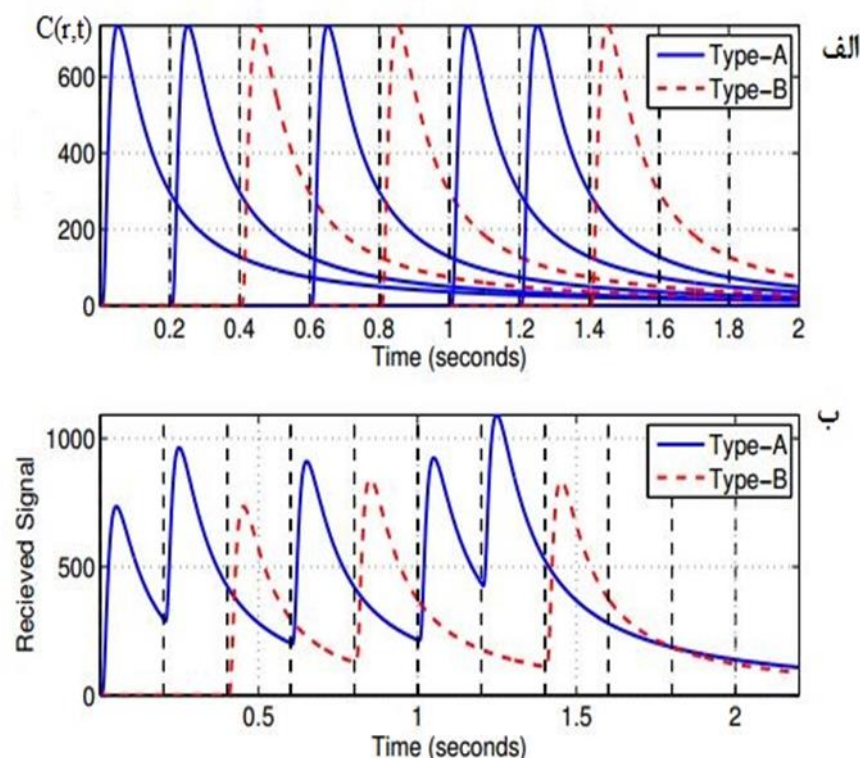
^۱ Molecular Concentration Shift Keying

می‌دهد و شکل ۲-۳-ب غلظتی که به گیرنده می‌رسد را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳) تأثیر تداخل در مدولاسیون مبتنی بر غلظت مولکول‌ها، اگر بیت‌های ارسالی به ترتیب $\{1,1,0,1,0,1,1\}$ باشد، [۶۴]

در شکل ۲-۴ تأثیر تداخل بر روی سیگنال دریافتی توسط گیرنده در مدولاسیون مبتنی بر مهندسی مولکول‌ها نشان داده شده است. به ازای ارسال یک، فرستنده مولکول‌های نوع A را می‌فرستد و به ازای ارسال صفر مولکول‌های نوع B را در محیط پخش می‌کند. در این نوع مدولاسیون چون مولکول‌های A و B بر روی همدیگر تداخل ایجاد نمی‌کنند، به‌طور کلی می‌توان گفت که تأثیر تداخل در این نوع مدولاسیون نسبت به مدولاسیون مبتنی بر غلظت مولکول‌ها کمتر است اما به دلیل پیچیدگی زیاد، بیشتر ترجیح داده می‌شود که از مدولاسیون مبتنی بر غلظت مولکول‌ها استفاده شود. شکل ۲-۴-الف غلظتی را که فرستنده می‌فرستد را نشان می‌دهد و شکل ۲-۴-ب غلظتی که به گیرنده می‌رسد را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴) تاثير تداخل در مدولاسيون مبتني بر مهندسي مولكول ها، اگر بيت هاي ارسالي به ترتيب

$$\{1,1,0,1,0,1,1\}, [64]$$

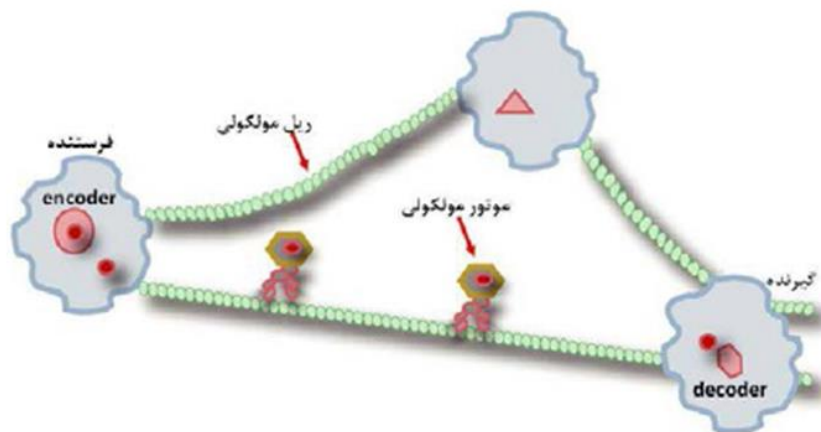
۲-۱-۲ فرآیند انتقال مولکول ها در کانال

در فرایند انتقال^۱، مولکول ها از فرستنده که در مبدأ مختصات قرار دارد در محیط پخش می شوند. محیط سه بعدی در نظر گرفته شده است و همچنین فرض شده است که محیط پخش یا همان کانال، سیال^۲ و یکنواخت است. غلظت مولکول های رسیده به گیرنده $C_R(t)$ در مختصات $[X_R, Y_R, Z_R]$ به عنوان خروجی فرآیند پخش در نظر می گیریم. در سلول، مواد مختلف به دو روش منتقل می شوند: انتقال فعال و انتقال غیرفعال. مولکول های کوچک مانند اکسیژن، اتانول و دی اکسید کربن می توانند به آسانی از غشای سلول عبور کنند. اگر غلظت این مولکول ها در فضای درون سلول تفاوت زیادی با بیرون داشته باشد، مولکول ها از غشاء عبور می کنند و به طرف مقابل می روند تا تفاوت غلظت ها کاهش پیدا کند. این فرآیند، همان انتقال غیرفعال است. دلیل این نام گذاری آن است که برای انجام آن، انرژی

^۱ Diffusion Process

^۲ Fluidic

صرف نمی‌شود. اما برای انتقال مولکول‌های بزرگ مانند پروتئین‌ها، پلی‌نوکلئوتیدها و پلی‌ساکاریدها باید از روش دیگری استفاده شود، انتقال این مولکول‌ها نیاز به انرژی دارد و انتقال فعال نامیده می‌شود. در نانوماشین‌ها نیز دو روش برای انتقال مولکول‌ها وجود دارد که به عنوان انتقال فعال و انتقال غیرفعال شناخته می‌شوند.



شکل ۵-۲) انتقال فعال : جابه جایی مولکول‌ها با استفاده از موتورهای مولکولی

انتقال فعال ۱-۲-۱-۲

منظور از انتقال فعال جابجایی مولکول‌ها یا یون‌ها با مصرف انرژی (برخلاف جهت غلظت یا فشار یا بار الکتریکی) است که انرژی موردنیاز برای این کار از واکنش‌های شیمیایی تأمین می‌شود و برای حمل مولکول‌ها از موتورهای مولکولی استفاده می‌شود. موتورهای مولکولی مانند کینزین، دینزین و میوزین، پروتئین‌هایی هستند که با استفاده از انرژی شیمیایی، حرکت ایجاد می‌کنند. این موتورهای پروتئینی، می‌توانند بسته‌های داده را به صورت مولکول از فرستنده به گیرنده منتقل کنند. در [۲۰]، [۷۷] به نحوه‌ی اتصال فیزیکی موتورهای مولکولی به نانو ماشین‌های فرستنده و گیرنده و چگونگی تولید نیرو برای انتشار مولکول‌ها پرداخته است.

همان‌طور که در شکل ۵-۲ نشان داده شده است، مولکول‌هایی که حاوی اطلاعات هستند از طریق موتورهای مولکولی و با مصرف انرژی که از واکنش‌های شیمیایی به دست می‌آید بر روی ریل‌های

مولکولی جابجا می‌شوند تا به گیرنده برسند.

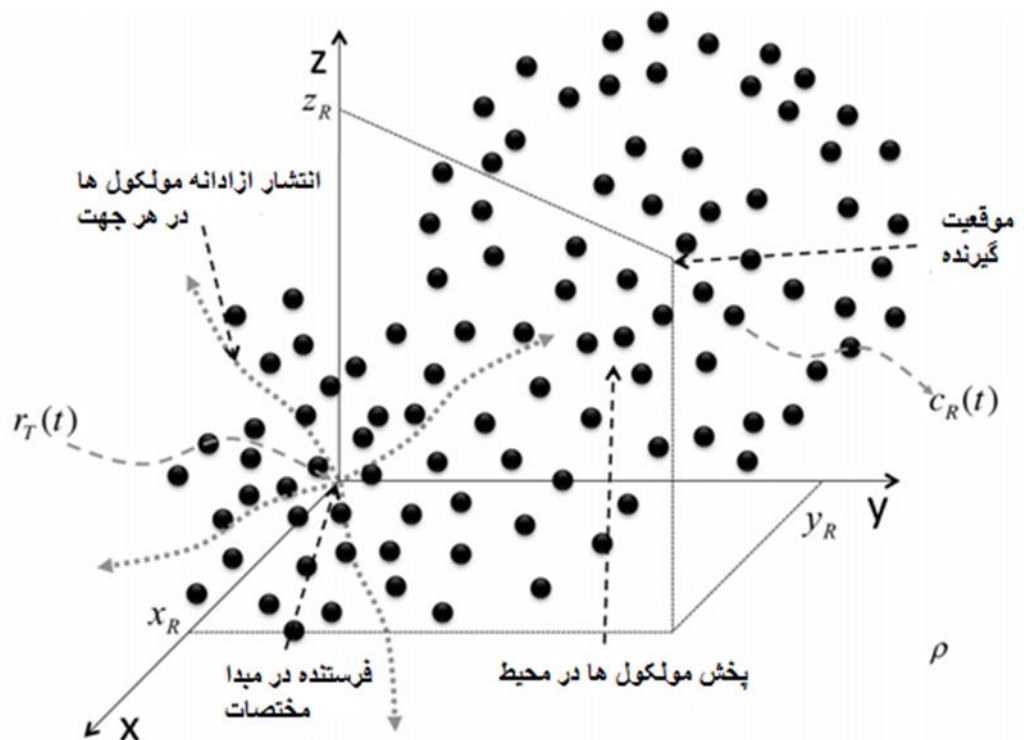
۲-۲-۱-۲ انتقال غیرفعال

در انتقال غیرفعال مولکول‌ها از فرستنده با حرکت تصادفی در محیط پخش می‌شوند. مولکول‌های پخش‌شده در محیط توسط فرستنده می‌توانند تحت عوامل مختلفی همچون نویز و تداخل قرار گیرند. تداخل یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که می‌تواند بر کارایی سیستم اثر گذاشته و احتمال خطا را به‌طور چشم‌گیری افزایش دهد. کانال در این شرایط، هم می‌تواند یکنواخت باشد یعنی محیط سیال ما ساکن باشد و شاری در آن وجود نداشته باشد، هم می‌تواند مانند رگ‌های انسان، محیط را دارای شار در نظر گرفت.

شکل ۲-۶ فرآیند پخش مولکول‌ها در کانال که از فرستنده به‌طور آزادانه و در هر جهتی به‌سوی گیرنده پخش می‌شوند را نشان می‌دهد. فرستنده در مبدأ مختصات و گیرنده در نقطه‌ای از فضا قرار دارد و همان‌طور که واضح است، از غلظت پخش‌شده در محیط فقط بخشی از مولکول‌ها به گیرنده می‌رسد و بقیه‌ی آن در جهت‌های دیگر در محیط پخش می‌شود. عوامل مختلفی در سرعت انتشار یک مولکول مؤثرند اولین عامل انرژی جنبشی است که میزان آن را درجه حرارت تعیین می‌کند. مولکول‌ها در سیستمی با درجه حرارت بالاتر انرژی بالاتری دارند و سریع‌تر حرکت می‌کنند و بنابراین سریع‌تر نیز انتشار می‌یابند. اندازه‌ی مولکول نیز بر روی سرعت انتشار آن اثر می‌گذارد. در دمای برابر مولکول‌های کوچک‌تر سریع‌تر حرکت می‌کنند زیرا حرکت مولکول بزرگ‌تر نیازمند انرژی بیشتری می‌باشد. سایر عوامل مانند بار ذره (مثبت یا منفی) و ماهیت ماده نیز مؤثر است.

منظور از انتقال غیرفعال این است که برای پخش مولکول‌ها به انرژی نیازی نیست و مولکول‌ها بدون مصرف انرژی از غلظت بالاتر به غلظت پایین‌تر در محیط پخش می‌شوند، در این روش نسبت به روش‌های دیگر مولکول‌ها بیشترین آزادی را دارند و هیچ محدودیتی در جهت و نحوه‌ی حرکت مولکول‌ها وجود ندارد. این روش اولین بار در [۷۸-۸۰] مورداستفاده قرار گرفت که در آن مولکول‌ها آزادانه و

به طور تصادفی بر اساس حرکت براونی^۱ فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده را طی می‌کنند. به عنوان مثال، تصور کنید شما قطره‌ای جوهر را در ظرف آبی وارد کنید در لحظه اول تمام مولکول‌های جوهر در مکان کوچکی قرار دارند و سپس در مسیرهای نامنظم و در جهت شیب غلظت و بدون مصرف انرژی و در خطوط مستقیمی حرکت می‌کنند و فقط زمانی مسیر خود را تغییر می‌دهند که با یکدیگر یا با مولکول‌های آب برخورد کنند و این حرکت نامنظم تا وقتی که به تعادل برسد ادامه خواهد داشت. تأکید می‌کنیم که ما در این پایان‌نامه پخش غیرفعال را در نظر گرفتیم و معادلات ریاضی استفاده شده نیز مبتنی بر این نوع پخش است.



شکل ۶-۲) انتقال غیرفعال: که در آن مولکول‌های پیام آزادانه در هر جهت حرکت می‌کنند

معادله‌های حاکم بر پخش مولکول‌ها : در این قسمت می‌خواهیم رابطه‌ی غلظت مولکول‌های پخش شده در محیط برحسب زمان، فاصله‌ی فرستنده و گیرنده و شرایط محیط به دست بیاوریم. برای

^۱ Brownian Motion

به دست آوردن این معادله‌ها فرض می‌کنیم که انتقال غیرفعال است و مولکول‌ها بدون مصرف انرژی از غلظت بالاتر به غلظت پایین‌تر پخش می‌شوند، این فرض در تمام پایان‌نامه برقرار است.

در فیزیک، از قانون دوم فیک^۱ برای توصیف تغییر غلظت مولکول‌ها نسبت به زمان هنگام فرآیند پخش استفاده می‌شود [۸۱]. طبق این قانون، غلظت مولکول‌های پخش‌شده در محیط در زمان t و در مکان $r = (x, y, z)$ که با $C(r, t)$ نشان می‌دهیم با معادله دیفرانسیل زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial C(r, t)}{\partial t} = D \nabla^2 C(r, t) \quad (2-2)$$

که در آن $\nabla^2 C(r, t)$ مشتق دوم یا همان گرادیان $C(r, t)$ در محیطی سه‌بعدی است. در اینجا D ضریب انتشار^۲ است که با معادله زیر بیان می‌شود [۸۲]:

$$D = \frac{K_B T}{6\pi\eta R_m} \quad (3-2)$$

که در آن k_B ثابت بولتزمن ($K_B = 1.38 \times 10^{-23}$)، T دما برحسب کلوین، η چسبناکی محیط و R_m شعاع مولکول‌های ارسالی است. همان‌طور که از رابطه‌ی (۳-۲) معلوم است ضریب انتشار به عوامل محیطی مانند دما، چسبناکی محیط و شعاع مولکول‌ها بستگی دارد. در همه مقالات D ثابت فرض شده است البته باید گفت که فرض درستی است، چون فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده در حد نانو است و غیرممکن است در این فاصله کوچک دما یا چسبناکی محیط تغییر کند، شعاع مولکول‌ها هم که ثابت است و تغییر نمی‌کند.

برای محاسبه‌ی غلظت مولکول‌ها طبق معادله‌ی دیفرانسیل (۲-۲) به شرایط اولیه زیر نیاز داریم:

$$C(r_T, t = 0) = M\delta(r_T) \quad (4-2)$$

^۱ Fick Second Law

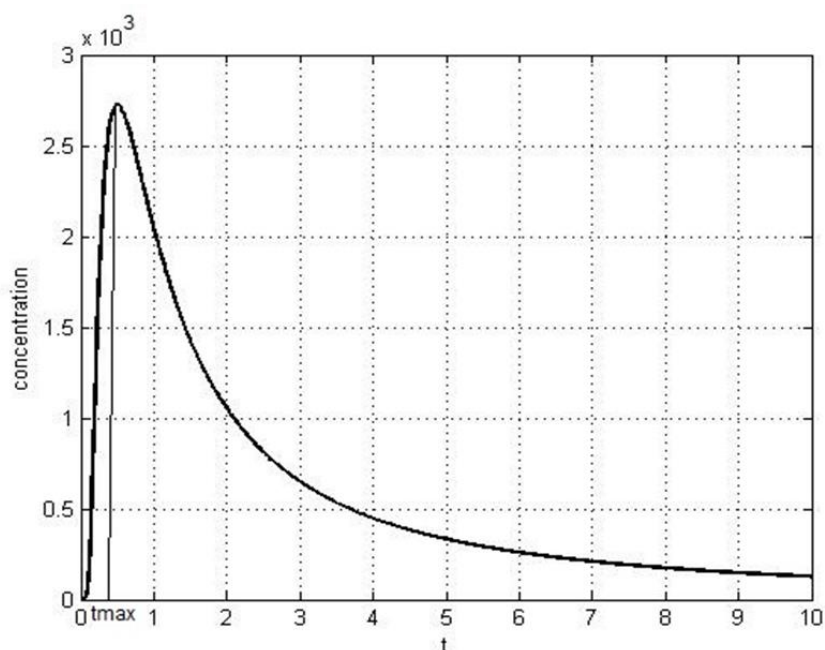
^۲ Diffusion Coefficient

رابطه‌ی بالا نشان‌دهنده‌ی این است که ضربه‌ای به تعداد M مولکول از فرستنده در محیط پخش می‌شود. $r_T = (x_T, y_T, z_T)$ موقعیت مکانی فرستنده و $\delta(\cdot)$ تابع ضربه است. بنابراین غلظت مولکول‌های پخش‌شده در محیط از طرف فرستنده برحسب زمان و فاصله گیرنده و فرستنده با توجه به رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C(r, t) = \frac{M}{\sqrt{(4\pi Dt)^3}} \exp\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right) \quad (5-2)$$

که در آن $r = |X_R - X_T|$ فاصله بین فرستنده و مرکز گیرنده، M تعداد مولکول‌هایی که فرستنده در محیط پخش می‌کند و D ضریب انتشار محیط می‌باشد.

در شکل ۷-۲ غلظت مولکول‌های پخش‌شده در محیط برحسب زمان رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنیم در زمان t_{max} غلظت مولکول‌ها بیشترین مقدار خود را دارد و بعد از این زمان به‌طور نمایی کاهش پیدا می‌کند. این نمودار به ازای $r = 300nm$ ، $M = 5000$ رسم شده است.



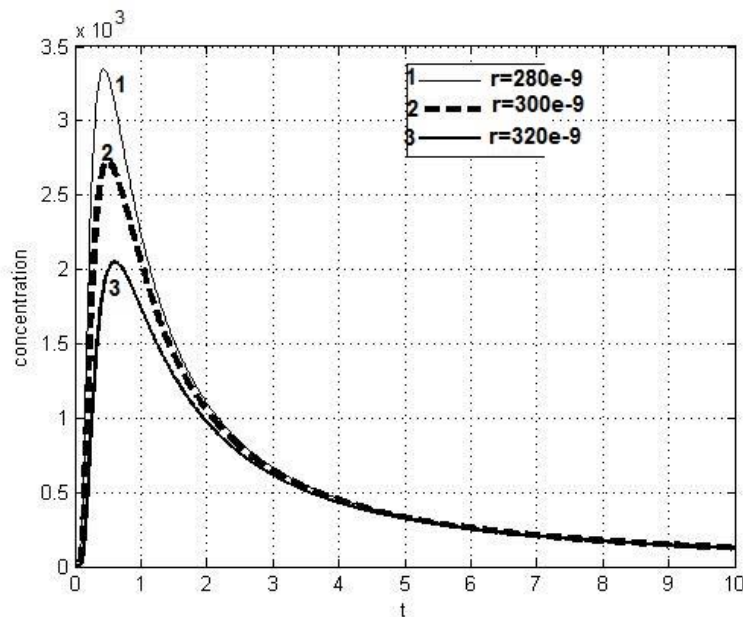
شکل ۷-۲) غلظت مولکول‌های پخش‌شده در محیط برحسب زمان

برای به دست آوردن t_{max} کافی است که از رابطه‌ی (۵-۲) نسبت به زمان مشتق بگیریم و برابر صفر قرار دهیم، در نتیجه خواهیم داشت:

$$t_{max} = \frac{r^2}{6D} \quad (۶-۲)$$

با توجه به رابطه (۵-۲) غلظت مولکول‌های پخش‌شده در محیط تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله، تعداد مولکول‌های ارسالی، ضریب انتشار و فاصله بین فرستنده و گیرنده قرار دارد که هر کدام از این عوامل به نحوی بر روی غلظت مولکول‌ها تأثیر می‌گذارد. در این پایان‌نامه ما فرض کردیم که ضریب انتشار ثابت است چون دما و چسبندگی محیط را ثابت در نظر گرفته‌ایم. در اکثر مقاله‌ها فرض کرده‌اند که فاصله بین فرستنده و گیرنده و همچنین تعداد مولکول‌هایی که فرستنده می‌فرستد نیز ثابت است، در حالی که تغییر بسیار کمی از این دو پارامتر می‌تواند خیلی بر غلظت مولکول‌ها تأثیر بگذارد.

شکل ۸-۲ غلظت مولکول‌ها را بر حسب زمان برای فاصله‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به رابطه‌ی (۵-۲) می‌توان گفت که هر چه فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده بیشتر شود غلظت مولکول‌های رسیده به گیرنده کمتر خواهد شد که کاملاً منطقی است. پس در صورتی که ما یک سیستم مخابرات مولکولی را برای فاصله ثابت طراحی کنیم با کوچک‌ترین تغییر در فاصله ممکن است کارایی سیستم به کلی از بین برود. فرض این که فاصله می‌تواند تغییر کند کاملاً منطقی است چون نانوماشین فرستنده و گیرنده در یک محیط سیال قرار دارند و هر لحظه ممکن است به علت وجود شار یا هر عامل دیگری فاصله تغییر کند. در این پایان‌نامه نیز ما یک الگوی مشخص برای تغییر فاصله در نظر گرفته‌ایم.



شکل ۸-۲) غلظت مولکول ها بر حسب زمان به ازای فاصله های مختلف

۳-۱-۲ فرایند پذیرش مولکول ها در گیرنده:

همان طور که در شکل ۹-۲ نشان داده شده است از طریق فرایند پذیرش^۱، مولکول های رسیده به گیرنده طی یک واکنش شیمیایی حس می شوند و گیرنده می تواند تشخیص دهد که چه تعداد مولکول به گیرنده رسیده است. در سطح گیرنده، گیرنده های شیمیایی قرار دارند که ابتدا مولکول های رسیده به گیرنده با ضریب K_+ به این گیرنده های شیمیایی می چسبند و بعد از انجام واکنش این گیرنده های شیمیایی مولکول ها را با ضریب K_- دوباره در محیط رها می کنند.

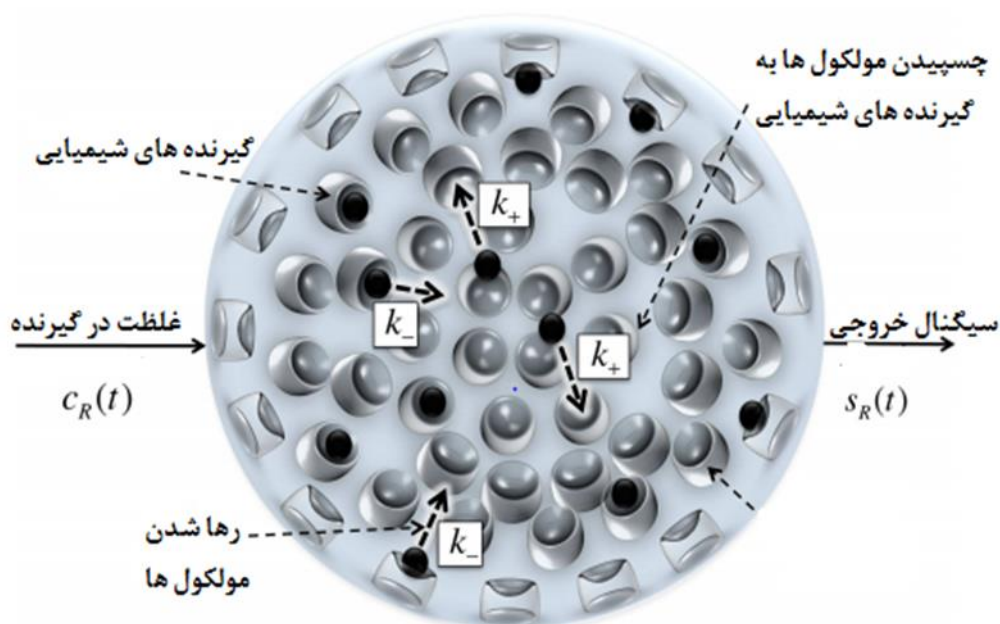
برای فرایند پذیرش، فرض هایی در نظر گرفته شده است از جمله:

- گیرنده به صورت کره در نظر گرفته شده است، همچنین فضای اطراف گیرنده که گیرنده در مرکز این فضا در نظر گرفته شده است نیز کره ای به شعاع ρ است.
- غلظت مولکول های قرار گرفته در فضای اطراف گیرنده یکنواخت در نظر گرفته شده است که در

^۱ Reception Process

[۸۳] اثبات شده است که این فرض درست است.

- فرض شده است که گیرنده‌های شیمیایی به‌طور یکنواخت در تمام سطح کره قرار دارند.
- مولکول‌ها با ضریب K_+ به گیرنده‌های شیمیایی می‌چسبند و با ضریب K_- دوباره در محیط رها می‌شوند.



شکل ۲-۹) فرایند پذیرش مولکول‌ها

۱-۳-۱-۲ روش‌های آشکارسازی در گیرنده

نانو ماشین گیرنده به علت ساختار ساده‌ای که دارد تا حد امکان سعی می‌شود که ساده طراحی شود. به طور کلی از دو نوع روش در بیشتر گیرنده‌ها برای آشکارسازی بیت‌های ارسالی استفاده می‌شود که در زیر به‌طور خلاصه توضیح خواهیم داد.

- **آشکارسازی بر اساس مقدار دامنه:** این نوع آشکارسازی ساده‌ترین نوع آشکارسازی است که در مخابرات کلاسیک هم از این روش استفاده می‌کنند. فرض می‌کنیم که مدولاسیون فرستنده On-Off- Keying باشد. در این روش گیرنده دارای یک مقدار آستانه (τ) است، اگر

تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده از مقدار آستانه بزرگ‌تر باشد، گیرنده تصمیم می‌گیرد که فرستنده یک ارسال کرده است و اگر تعداد مولکول‌ها کمتر از مقدار آستانه باشد گیرنده تصمیم می‌گیرد که صفر ارسال شده است. به دست آوردن بهترین مقدار آستانه برای گیرنده کار خیلی از مقاله‌ها را شامل می‌شود. اگر مقدار آستانه خیلی پایین باشد گیرنده اکثر بیت‌های ارسالی را یک تشخیص می‌دهد و اگر مقدار آستانه، بالا باشد اکثراً صفر تشخیص می‌دهد.

تغییر فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده می‌تواند مقدار آستانه‌ی بهینه را جابه‌جا کند به همین خاطر بعضی از مقاله‌ها به دنبال تخمین فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده هستند که گیرنده با توجه به فاصله‌ی تخمین زده بتواند مقدار آستانه‌ی خود را تنظیم کند. از جمله مشکلاتی که در مخابرات مولکولی وجود دارد نیز همین تغییر فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده است که این تغییر فاصله می‌تواند احتمال خطا را زیاد کند و کارایی سیستم را پایین بیاورد. در مخابرات کلاسیک با یک فیدبک ساده می‌توان از تغییر فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده اطلاع پیدا کرد و بدون کمترین تأخیری در به دست آوردن اطلاعات کارهای لازم را انجام داد. در [۸۴]، [۸۵] کارهایی برای به دست آوردن فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده با توجه به فیدبک انجام شده است، اما با توجه به کند بودن سیستم‌های مخابراتی که در ذات این نوع سیستم‌ها است، نمی‌توان در عمل از فیدبک استفاده کرد [۸۶]. در [۸۸-۸۶] از تخمین برای به دست آوردن فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده استفاده کرده‌اند و فیدبک را حذف کرده‌اند اما با توجه به سادگی نانوماشین‌های فرستنده و گیرنده نمی‌توان از آن‌ها انتظار داشت که عملیات پیچیده ریاضی را بتوانند انجام دهند بنابراین ما در این پایان نامه برای تغییر فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده یک الگوی مشخص در نظر گرفته‌ایم و سپس براساس آن آستانه‌ی بهینه برای بیشینه شدن ظرفیت را پیدا کرده‌ایم.

• آشکارسازی بر اساس انرژی: این نوع آشکارسازی هم بر اساس مقدار آستانه کار می‌کند با

این تفاوت که مقدار آستانه از نوع انرژی است یعنی گیرنده انرژی غلظت مولکول‌های رسیده به گیرنده را اندازه‌گیری می‌کند و با مقدار آستانه مقایسه می‌کند، اگر مقدار انرژی اندازه‌گیری

شده از مقدار آستانه بیشتر باشد گیرنده تصمیم می‌گیرد که یک ارسال شده است در غیر این صورت تصمیم می‌گیرد که صفر ارسال شده است [۵۲]. انرژی یک پالس از مولکول‌ها با توجه به رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E_P = \int_0^{T_B} C(r, t) dt \quad (۷-۲)$$

که در آن $C(r, t)$ غلظت مولکول‌های رسیده به گیرنده است و T_B فاصله زمانی یک پالس از مولکول‌ها است. مزیت استفاده از آشکارسازی بر اساس انرژی این است که به تعداد مولکول‌های کمتری نیاز داریم تا پیام خود را به گیرنده برسانیم. ما نیز در این پایان نامه از این روش برای آشکارسازی اطلاعات استفاده کرده ایم.

۲-۳-۱-۲ انواع گیرنده در مخابرات مولکولی

در مخابرات مولکولی گیرنده جدا از روش‌های آشکارسازی به دو نوع گیرنده غیرفعال^۱ و گیرنده فعال^۲ تقسیم می‌شود.

- **گیرنده غیرفعال:** در گیرنده غیرفعال مولکول‌های رسیده به گیرنده با ضریب K_+ به گیرنده‌های شیمیایی می‌چسبند و بعد از انجام واکنش، گیرنده‌های شیمیایی مولکول را با ضریب K_- در محیط دوباره رها می‌کنند یعنی مولکول‌ها همچنین در فضای اطراف گیرنده وجود دارند و احتمال دارد که دوباره به گیرنده‌های شیمیایی بچسبند. رابطه (۵-۲) که برای غلظت مولکول‌های پخش شده در محیط به دست آورده‌ایم برای گیرنده غیرفعال است در نتیجه تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده با توجه به رابطه‌ی زیر بدست خواهد آمد:

$$N_p(t) = V_R \times C(r, t) \quad (۲-۸-الف)$$

^۱ Passive Receiver

^۲ Active Receiver

$$N_p(t) = \frac{V_R \times M}{\sqrt{(4\pi Dt)^3}} \exp\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right) \quad (2-8\text{ب})$$

که در آن $N_p(t)$ نشان‌دهنده‌ی تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده در گیرنده غیرفعال است و $V_R = \frac{4}{3}\pi\rho^3$ حجم فضای اطراف گیرنده است که به صورت کره‌ای فرض شده است. $C(r,t)$ غلظت مولکول‌های پخش‌شده در محیط برحسب زمان و فاصله بین فرستنده و گیرنده را نشان می‌دهد که در رابطه (2-5) بدست آوردیم.

گیرنده فعال: در گیرنده فعال، مولکول‌ها پس از آن که به گیرنده چسبیدند، دوباره در محیط رهاشده و ناپدید می‌شوند و دوباره نمی‌توانند به گیرنده بچسبند. در این نوع گیرنده با توجه به قانون دوم فیک می‌توان تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده را بدست آورد اما تفاوت آن با گیرنده‌ی غیرفعال این است که در این حالت شرایط مرزی تغییر خواهد کرد. برای گیرنده غیرفعال شرایط مرزی برای حل قانون دوم فیک به صورت زیر است:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} C(r,t) = 0 \quad (2-9\text{الف})$$

$$\frac{\partial C(r,t)}{\partial r} = \omega C(r,t) \forall \rightarrow |r| = \rho \quad (2-9\text{ب})$$

که شرط اول نشان‌دهنده‌ی این است که وقتی فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده خیلی زیاد می‌شود، غلظت مولکول‌های رسیده به گیرنده به سمت صفر میل می‌کند و غلظتی به گیرنده نمی‌رسد. با توجه به شرط دوم و اینکه $\omega \rightarrow \infty$ می‌توان نوشت [۶۴]:

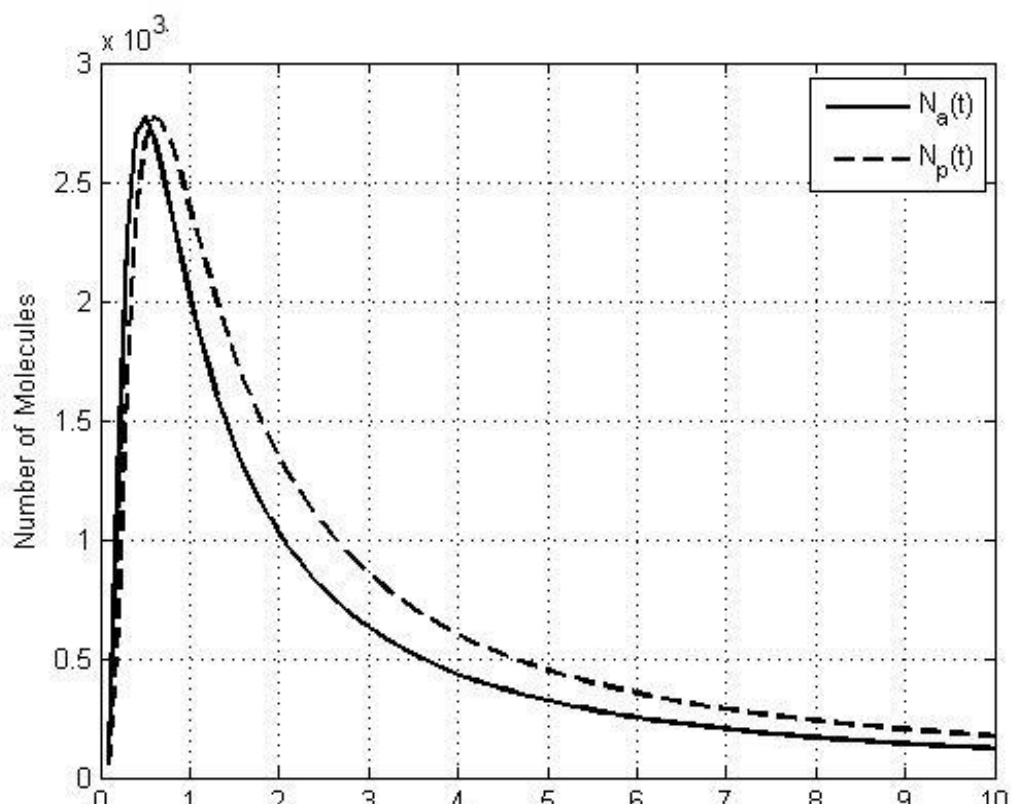
$$N_a(r,t) = \frac{M\rho}{r} \exp\left(\frac{r-\rho}{\sqrt{4Dt}}\right) \quad (2-10)$$

که $N_a(r,t)$ نشان‌دهنده‌ی تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده در فاصله r و زمان t در گیرنده فعال است. در این حالت برخلاف گیرنده غیرفعال، از حل معادله‌ی قانون دوم فیک مستقیماً تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده به دست می‌آید نه غلظت مولکول‌های پخش‌شده در محیط [۵۲]. r

نشان‌دهنده‌ی فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده و M تعداد مولکول‌هایی است که فرستنده در محیط پخش می‌کند.

شکل ۲-۱۰ تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده برای گیرنده فعال و گیرنده غیرفعال را نشان

می‌دهد. این شبیه‌سازی‌ها به ازای $r = 300nm$, $M = 5000$, $\rho = 45nm$ و $D = 4.3 \times 10^{-10}$ رسم شده‌اند. همان‌طور که می‌بینیم در گیرنده‌ی فعال تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده، بعد از زمان بیشینه پایین‌تر از گیرنده غیرفعال هستند، به همین دلیل می‌توان گفت که در این نوع گیرنده تداخل ناشی از سمبل‌های قبلی کمتر از گیرنده غیرفعال است. البته همان‌طور که گفتیم در گیرنده فعال مولکول‌ها پس از جذب توسط گیرنده و دوباره رها شدن در محیط، فرض می‌کنیم که ناپدید می‌شوند و دوباره توسط گیرنده جذب نمی‌شوند، پس می‌شود انتظار داشت که در این نوع گیرنده تداخل کمتر باشد.



شکل ۲-۱۰) تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده برحسب زمان برای گیرنده فعال و گیرنده غیرفعال

۲-۲ مدل انرژی

بخاطر ابعاد کوچک نانوماشین‌ها، نمی توان از باتری در آن‌ها برای تامین انرژی استفاده کرد بنابراین در سیستم مدل‌ها معمولاً فرض می‌شود واحد فرستنده توانایی تولید و ذخیره انرژی را دارد. بخشی از این انرژی که توسط فرستنده تولید شده است در فعالیت‌های معمول سیستم مصرف می‌شود و بخشی دیگر نیز در واحد انرژی ذخیره می‌شود. برای اینکه سیستم همواره فعال باقی بماند انرژی مصرفی نباید بیشتر از انرژی موجود باشد بنابراین سیستم نباید بیشتر از حد مجازش انرژی مصرف کند. اگر انرژی تولیدی بیشتر از انرژی مصرفی باشد باقیمانده‌ی انرژی در مخزن انرژی ذخیره می‌شود. مقدار انرژی تولیدی توسط واحد فرستنده را با P_{WT} ، مقداری از این انرژی تولیدی که در فعالیت‌های متداول سیستم مصرف می‌شود را با P_{WB} و باقیمانده‌ی این انرژی را که ذخیره می‌شود با P_{WC} نمایش می‌دهیم. مجموع این دو نباید از انرژی تولیدی بیشتر باشد.

$$P_{WT} = P_{WB} + P_{WC} \quad (۱۱-۲)$$

در ارتباط از طریق انتشار مولکولی، مصرف انرژی در فرستنده در چهار مرحله صورت می‌گیرد [۶۹]:

- تولید مولکول‌های پیام
- تولید وزیکول‌ها
- حمل وزیکول‌ها تا غشای سلول
- آزاد کردن مولکول‌ها در محیط

در تمام مراحل نام برده شده فرستنده انرژی مصرف می‌کند بنابراین اگر در هر دوره ی ارسال n مولکول ارسال شود مقدار انرژی مورد نیاز برای ارسال به شکل زیر است:

$$E_T = nE_S + \left[\frac{n}{C_v} \right] (E_V + E_C + E_E) \quad (۱۲-۲)$$

که در آن E_S ، مقدار انرژی مورد نیاز برای ساخت یک مولکول، E_V ، مقدار انرژی مورد نیاز برای ساخت وزیکول، E_C ، مقدار انرژی مورد نیاز برای حمل وزیکول و E_E مقدار انرژی مورد نیاز برای رها کردن مولکول در محیط است. سایز وزیکول خیلی بزرگتر از سایز مولکول پیام در نظر گرفته می‌شود و فرض می‌شود که فرستنده، وزیکول‌ها را از مولکول پر می‌کند.

معمولا مولکول پروتئین به عنوان مولکول پیام در نظر گرفته می‌شود. پروتئین‌ها از ترکیب آمینواسیدها ساخته می‌شوند. تعداد آمینواسیدهای مورد نیاز برای ساخت پروتئین به سایز پروتئین بستگی دارد. مقدار انرژی مورد نیاز برای اتصال یک آمینواسید به زنجیره آمینواسیدها، مستقل از نوع آمینواسیدی که مصرف می‌شود مقدار ثابت $202.88zJ$ می باشد. مقدار انرژی مورد نیاز برای ساخت پروتئینی که از n_{aa} آمینواسید ساخته شده است به شکل زیر است.

$$E_S = 202.88(n_{aa} - 1)zJ \quad (۱۳-۲)$$

بعد از اینکه مرحله ساخت مولکول تمام شد مولکول به واحد بسته بندی فرستاده می‌شود تا درون وزیکول‌ها بسته بندی شود. وزیکول‌ها از لحاظ ساختاری شبیه غشا هستند و می‌شود آن‌ها را به شکل یک کره‌ی تو خالی در نظر گرفت که دیواره‌های آن ساختار ساده و متفاوتی دارد که معمولا واحد سازنده‌ی آن فسفولیپیدها هستند. مقدار انرژی مورد نیاز برای ترکیب فسفولیپیدها، یک واحد آدنوزین تری فسفات^۱ (ATP) است که برابر $83 zJ$ می باشد. در هر nm^2 از سطح وزیکول پنج فسفولیپید وجود دارد. بنابراین مقدار انرژی مورد نیاز برای ترکیب وزیکول‌ها با شعاع r_v به شکل زیر است.

$$E_V = 83 \times 5(4\pi r_v^2)zJ \quad (۱۴-۲)$$

ظرفیت وزیکول نیز به شکل زیر قابل محاسبه است.

$$c_v = \left(\frac{r_v}{r_{mm}\sqrt{3}}\right)^3 \quad (۱۵-۲)$$

^۱ Adenosine Three Phosphate

که در آن r_{mm} شعاع مولکول پیام است.

حال وزیکول از واحد بسته بندی از طریق موتور پروتیینی به سمت غشای سلول حرکت می کند. همانطور که در شکل ۲-۱۱ نیز نشان داده شده است موتورهای پروتیینی از دو بخش تشکیل شده اند: یک بخش که با وزیکول اتصال برقرار می کند و بخش دیگر که دو اتصال با ریل های مولکولی دارد. برای انتقال وزیکول ها بر روی ریل مولکولی، موتور پروتیینی یکی از اتصال هایش را با میکروتوبل ها^۱ قطع می کند و یک گام به سمت جلو برمی دارد و دوباره اتصال را برقرار می کند. در این فرآیند، موتور پروتیینی $8nm$ طی می کند و یک آدنوزین تری فسفات (ATP) انرژی مصرف می کند. مقدار انرژی مورد نیاز برای انتقال وزیکول تا سطح غشا به شکل زیر است.

$$E_C = 83 \left[\frac{r_{unit}/2}{8} \right] zJ \quad (۲-۱۶)$$

که در آن r_{unit} شعاع فرستنده است.

در گام آخر وزیکول به غشا متصل می شود و طی فرایند شیمیایی که اتفاق می افتد مولکول ها، درون محیط پخش می شوند. در این مرحله برای هر وزیکول $10 ATP$ انرژی مصرف می شود.

$$E_E = 83 \times 10 zJ \quad (۲-۱۷)$$

از تمام توضیحاتی که درباره مصرف انرژی داده شد استفاده می شود و کل انرژی مصرفی به این شکل تخمین زده می شود.

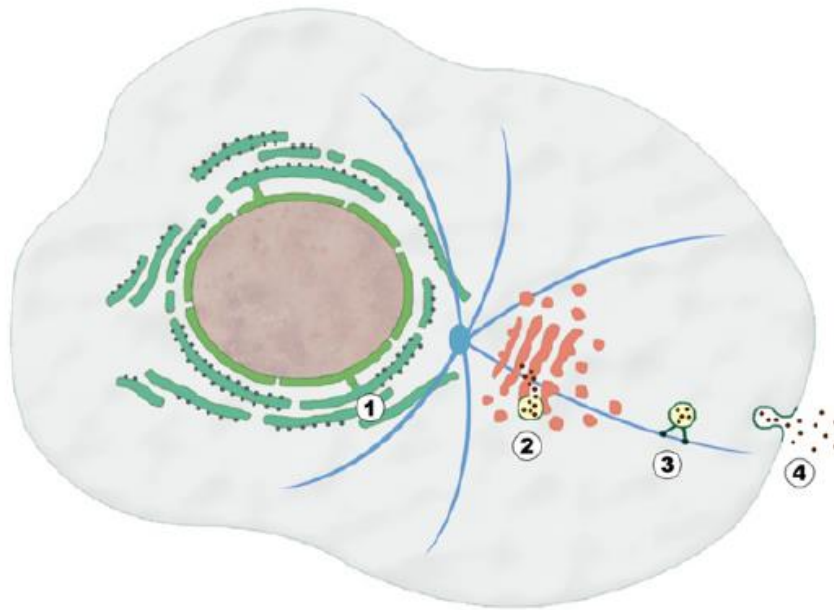
$$E_T = 202.88(n_{aa} - 1) + \left[\frac{n}{C_v} \right] \left(83 \times 5(4\pi r_v^2) + 83 \left[\frac{r_{unit}/2}{8} \right] + 83 \times 10 \right) \quad (۲-۱۸)$$

همانطور که قبل تر نیز گفته شد مقدار انرژی مصرفی نباید از انرژی موجود در مخزن بیشتر باشد

^۱ Microtobule

بنابراین تعداد مولکول های تولیدی در هر مرحله به شکل زیر محدود می شود.

$$Pw_c t_s \geq 202.88(n_{aa} - 1) + \left[\frac{n}{C_v} \right] \left(83 \times 5(4\pi r_v^2) + 83 \left[\frac{r_{unit}/2}{8} \right] + 83 \times 10 \right)$$



شکل ۲-۱۱) نحوه ی انتقال مولکول به محیط در کانال مبتنی بر انتشار [۶۹]

۲-۳ مروری بر کارهای مرتبط با پایان نامه

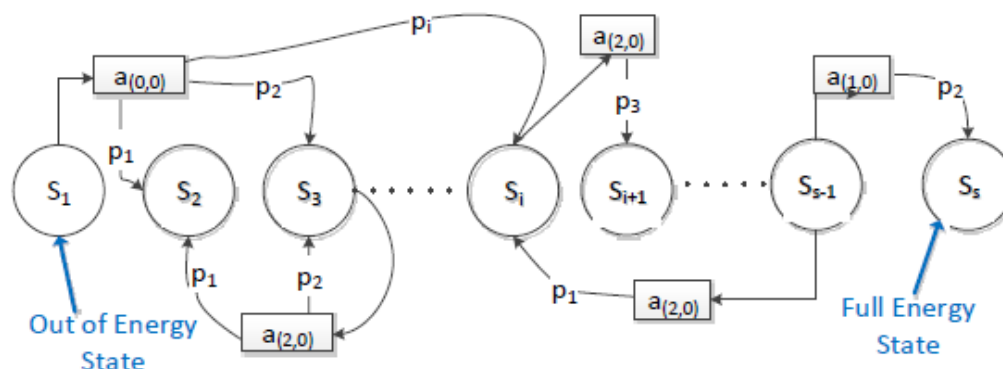
نانوماشین ها همانند ماشین ها در ابعاد بزرگتر دچار محدودیت انرژی هستند. ماشین ها در ابعاد بزرگ از طریق باتری انرژی موردنیازشان را تامین می کنند اما نانوماشین ها به دلیل ابعاد کوچکی که دارند باتری برایشان کارساز نیست چرا اینکه باتری در این ابعاد توانایی ذخیره انرژی زیادی ندارد بنابراین انتظار می رود نانوماشین ها توانایی تولید و ذخیره انرژی را داشته باشند تا بتوانند مدت بیشتری فعالیت کنند.

مقاله [۶۹] مدل مصرف انرژی را در کانال مخابراتی مبتنی برانتشار بررسی کرده است. همانطور که از این مدل انرژی برمی آید فرستنده برای ارسال هر مولکول در محیط، نیازمند مصرف انرژی است

بنابراین محدودیت انرژی در این کانال به معنی محدودیت تعداد مولکول‌های ارسالی است. اما در این مقاله هیچ گونه محدودیتی برای انرژی فرستنده در نظر گرفته نشده است بلکه فقط تاثیر انرژی ارسالی بر ظرفیت بررسی شده است به این ترتیب که هرچه انرژی ارسالی افزایش یابد ظرفیت کانال و سطح آستانه‌ی بهینه نیز افزایش می‌یابد. از نتیجه‌ی کار در این مقاله می‌توان فهمید که هرچه فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده بیشتر باشد برای رسیدن به یک ظرفیت خاص باید انرژی ارسالی و همچنین دوره ارسال افزایش یابد تا عملکرد سیستم افت نکند. بنابراین در حالت کلی می‌توان گفت وقتی فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده زیاد می‌شود شرایط کانال نامساعد می‌شود و برای جبران این شرایط، هم باید دوره ارسال را بیشتر کرد و هم تعداد مولکول‌های ارسالی.

در مقاله‌ی [۷۲] فرض شده فرستنده توانایی ارسال و دریافت مولکول را دارا است. در این مدل، فرستنده در هر دوره‌ی ارسال بر اساس یک الگوی تصادفی، مقداری انرژی دریافت می‌کند. نحوه‌ی عملکرد این سیستم در شکل ۲-۱۲ آورده شده است که البته این شکل کامل نیست و تنها بخشی از عملکرد سیستم را نشان می‌دهد. در این شکل، $a(i,j)$ نشان دهنده‌ی i ارسال و j دریافت در یک دوره‌ی ارسال است. در هر دوره‌ی ارسال، فرستنده با احتمال P_i می‌تواند iE_{min} (E_{min} واحد انرژی است) انرژی دریافت کند و در هر مرحله با توجه به اینکه چه مقدار انرژی دریافت و چه مقدار انرژی مصرف کرده است جایگاه بعدی سیستم مشخص می‌شود. S_1 وضعیتی است که سیستم انرژی ندارد و هیچ ارسال و دریافتی در آن صورت نمی‌گیرد و S_s وضعیتی است که ظرفیت سیستم اشباع شده و توانایی پذیرش انرژی جدیدی ندارد. برای اینکه سیستم بهترین عملکرد را داشته باشد باید نحوه‌ی مصرف انرژی به گونه‌ای باشد که حتی الامکان سیستم در وضعیت S_1 و یا S_s قرار نگیرد. در این مقاله با اعمال محدودیت برای حداکثر میزان انرژی دریافتی و مصرفی در هر دوره، مانع قرار گرفتن سیستم در حالت S_1 و S_s شده‌اند. اعمال این محدودیت‌ها برای برداشت و مصرف انرژی عملکرد این سیستم را نسبت به سیستم مدل‌های قبل تا حد زیادی بهبود بخشیده است. الگوهایی را که نیز پیش از این برای مصرف

انرژی در مقالات مختلف ارایه شده است در ادامه به طور اجمالی بررسی می‌کنیم.



شکل ۲-۱۲) وضعیت‌های سیستم و گذر بین وضعیت‌ها [۷۲]

در مقالات [۷۳]–[۷۶] از الگوهای متفاوتی برای مصرف انرژی استفاده شده است که بطور مختصر

آن‌ها را بررسی می‌کنیم.

۱. **تهاجمی^۱ (Agg):** در این روش براساس حداکثر انرژی در دسترس همیشه حداکثر میزان

مصرف انتخاب می‌شود. این روش سعی دارد به بیشترین نرخ ارسال برسد اما همین امر باعث می‌شود سیستم بیشتر در حالت S_1 قرار گیرد.

۲. **محافظ کارانه^۲ (Con):** در این روش براساس انرژی موجود یکی از نرخ‌های پایین مصرف

(وضعیتی که در آن حداکثر یک ارسال و یک دریافت داریم) مثل $a(1,0), a(0,1), a(1,1)$ و یا $a(0,0)$ انتخاب می‌شود. در این روش اگرچه همواره مقداری انرژی باقی می‌ماند و سیستم در وضعیت S_1 قرار نمی‌گیرد اما نرخ ارسالی مانند زمانی است که مقدار انرژی در دسترس خیلی کم است.

¹ Aggressive

² Conservative

۳. مصرف_برداشت^۱ (C_H): در این روش میزان مصرف بر اساس میزان انرژی برداشت شده در دوره‌ی ارسال قبل مشخص می‌شود یعنی در هر مرحله $a(i,j)$ ای انتخاب می‌شود که میزان انرژی مصرفی‌اش به انرژی برداشت شده در مرحله‌ی قبل نزدیک باشد. این روش از لحاظ نرخ ارسال بهتر از روش قبل است اما این روش امکان قرارگرفتن سیستم در وضعیت S_S را افزایش می‌دهد به این علت که ممکن است مقدار انرژی برداشت شده در مرحله‌ی قبل برای ارسال کافی نباشد بنابراین ارسالی صورت نمی‌گیرد و انرژی ذخیره می‌شود و اگر این اتفاق تکرار شود سیستم را در وضعیت S_S قرار می‌دهد.

۴. میانه^۲: در این روش اگر $a(i,j)$ های موجود را بر اساس انرژی مصرفی به صورت صعودی در مجموعه S_A مرتب کنیم a_k انتخابی به این صورت است $\leftarrow k = \left\lceil \frac{S_A}{2} \right\rceil$. اگر برای انتخاب این فعالیت، انرژی کافی موجود نباشد نزدیکترین گزینه به آن انتخاب می‌شود. عملکرد این روش بین روش تهاجمی و محافظ کارانه است.

۵. تصادفی^۳ (Rand): این روش به طور تصادفی یک فعالیت از مجموعه‌ی S_A انتخاب می‌کند اگر انرژی موجود برای اجرای آن کافی نباشد مجدداً عمل انتخاب تصادفی تکرار می‌شود. رفتار این طرح را به طور دقیق نمی‌توان پیش‌بینی کرد اما در دراز مدت یک رفتار میانگین دارد.

در مقاله [۸۹] نیز دو روش ارایه شده است که سطح انرژی مصرفی در سیستم را کاهش می‌دهد. در این روش از رله استفاده شده است که رله علاوه بر اینکه توانایی دمدوله کردن اطلاعاتی که از فرستنده رسیده را دارد توانایی دریافت انرژی آن را نیز دارد. رله بعد از دریافت مولکول‌ها، آن‌ها را برای مقصد مشخص ارسال می‌کند. در روش اول در هردو مسیر (فرستنده به رله و رله به گیرنده) از یک نوع مولکول استفاده می‌شود. همانطور که در شکل ۲-۱۳ الف مشاهده می‌شود در این روش تداخل افزایش می‌یابد چون مولکول‌هایی که توسط فرستنده‌ی رله ارسال می‌شود، هم توسط گیرنده‌ی رله و هم توسط

³ Consume_Harvest

¹ Mean

² Random

گیرنده‌ی مقصد دریافت می‌شود بنابراین برای حل این مشکل یا فرستنده و گیرنده‌ی رله باید به اندازه کافی دور باشند و یا باید از یک مانع بین فرستنده و گیرنده‌ی رله استفاده کرد که مانع تداخل شد. همانطور که در شکل ۲-۱۳ الف مشاهده می‌شود این مانع می‌تواند به شکل کروی^۱ و یا مستقیم^۲ باشد. در روش دوم از دو نوع مولکول در دو مسیر استفاده می‌شود استفاده از دو نوع مولکول بدین جهت جالب است که اولاً: تداخلی ایجاد نمی‌شود و ثانیاً: رله می‌تواند با تغییر سایز مولکول پیام، نرخ انتشار را کنترل کند. همانطور که در شکل ۲-۱۳ ب نشان داده شده است انواع مولکول‌های مورد استفاده از یک واحد شیمیایی مانند آمینواسید ساخته می‌شوند بنابراین یک مخزن شیمیایی همراه با واحد سازنده‌ی مولکول‌ها در رله احتیاج است. مولکول نوع A که از مسیر اول برداشت شده است با اضافه کردن و یا کم کردن آمینواسید، به مولکول نوع B تغییر می‌کند. مولکول نوع A از n_A آمینواسید ساخته شده و مولکول نوع B از n_B آمینواسید ساخته شده است و انرژی مورد نیاز برای ساخت یک مولکول که از n آمینواسید ساخته شده است $\emptyset(n-1)$ می‌باشد و $\emptyset = 202.88zJ$ است.

- اگر $n_A = n_B$ ، چون تغییری در سایز مولکول‌ها ایجاد نمی‌شود و تعدادی از مولکول‌ها در مسیر فرستنده تا رله از بین رفته‌اند عملکرد در مسیر رله تا مقصد ضعیفتر می‌شود اما خوبی این روش این است که نیازمند هیچ انرژی‌ای برای تجزیه و ترکیب مولکول‌ها در رله نیست.

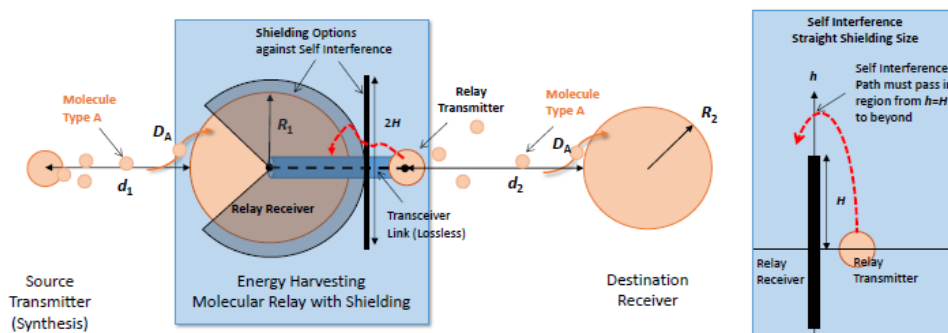
- اگر $n_A > n_B$ ، چون سایز مولکول در مسیر دوم کوچکتر است بنابراین غلظت مولکول‌ها در مسیر دوم بیشتر می‌شود و انتشار سریعتر اتفاق می‌افتد اما در این روش مقدار انرژی مورد نیاز برای تجزیه و ترکیب مولکول‌ها بالا است.

- اگر $n_A < n_B$ ، در این روش چون سایز مولکول در مسیر دوم بزرگتر است غلظت مولکول‌ها در مسیر دوم کمتر است و سرعت انتشار آن‌ها کاهش می‌یابد در نتیجه امکان از دست

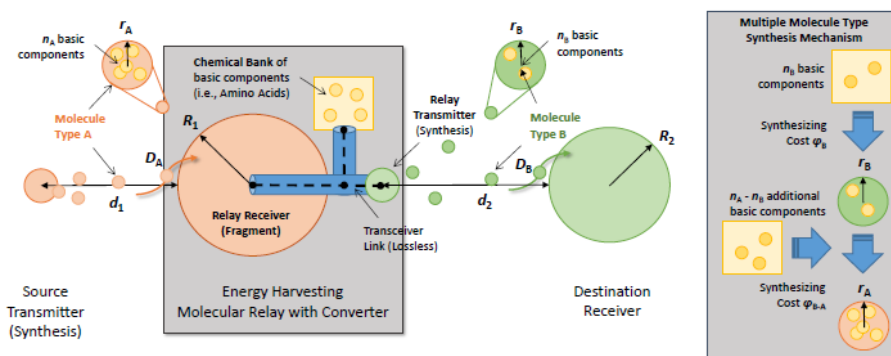
³ Spherical Shield

⁴ Straight Shield

رفتن مولکول در مسیر دوم خیلی بیشتر از مسیر اول است .



الف) کانال رله با حضور یک نوع مولکول



ب) کانال رله با حضور دو نوع مولکول

شکل ۲-۱۳) نمایش برداشت انرژی در شبکه های نانو از طریق رله [۸۹]

نکته ای که در اکثر مقالات نادیده گرفته می شود امکان تغییر فاصله ی فرستنده و گیرنده است. از آنجایی که فرستنده و گیرنده در محیط سیال قرار گرفته اند امکان جابجایی آن ها وجود دارد بنابراین ما در این پایان نامه با در نظر گرفتن الگوی مشخص برای تغییر فاصله ی بین فرستنده و گیرنده ظرفیت متوسط برای کانال مبتنی انتشار را یافته ایم. همانطور که گفته شد با تغییر فاصله ی بین فرستنده و گیرنده شرایط کانال نیز تغییر می کند بنابراین ما با در نظر گرفتن انرژی محدود و یک الگوی مشخص برای تغییر فاصله ی بین فرستنده و گیرنده، سعی کردیم با تخصیص توان مناسب در این بازه ها و انتخاب سطح آستانه ی بهینه ظرفیت این کانال را بیشینه کنیم.

فصل سوم

کارهای انجام شده در

پایان نامه و نتایج

شبیه سازی

در این پایان نامه یک سیستم مخابرات مولکولی که در آن فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده در حال تغییر است را بررسی می‌کنیم و تاثیر سمبل قبل بر سمبل جاری را نیز در محاسبات لحاظ می‌کنیم. فرض می‌کنیم که الگوی تغییرات فاصله را می‌دانیم و همچنین فرض می‌شود که این سیستم مخابراتی برای شروع کار مقدار انرژی مورد نیاز برای m دوره‌ی ارسال را دریافت می‌کند. حال باید تخصیص توان در این m دوره بر مبنای الگوی تغییر فاصله به گونه‌ای باشد که ظرفیت متوسط این سیستم بیشینه شود. علاوه بر چگونگی تخصیص توان در هر دوره‌ی ارسال، پارامترهایی از قبیل حافظه، سطح آستانه و دوره‌ی ارسال نیز از عوامل موثر در ظرفیت می‌باشد که تاثیر هر کدام را به طور جداگانه در شبیه‌سازی‌ها بررسی کرده‌ایم. در انتها سعی کردیم با تغییر مدولاسیون از On_Off_Keying به Msk اثر تداخل را از بین ببریم و ظرفیت کانال را به حداکثر برسانیم.

حال برای نشان دادن نحوه‌ی تاثیر پارامترهای مختلف، ابتدا ظرفیت این سیستم مخابراتی را بدست می‌آوریم و سپس براساس آن میزان تاثیری که هر پارامتر می‌تواند در جابجایی نقطه بهینه داشته باشد بررسی می‌کنیم.

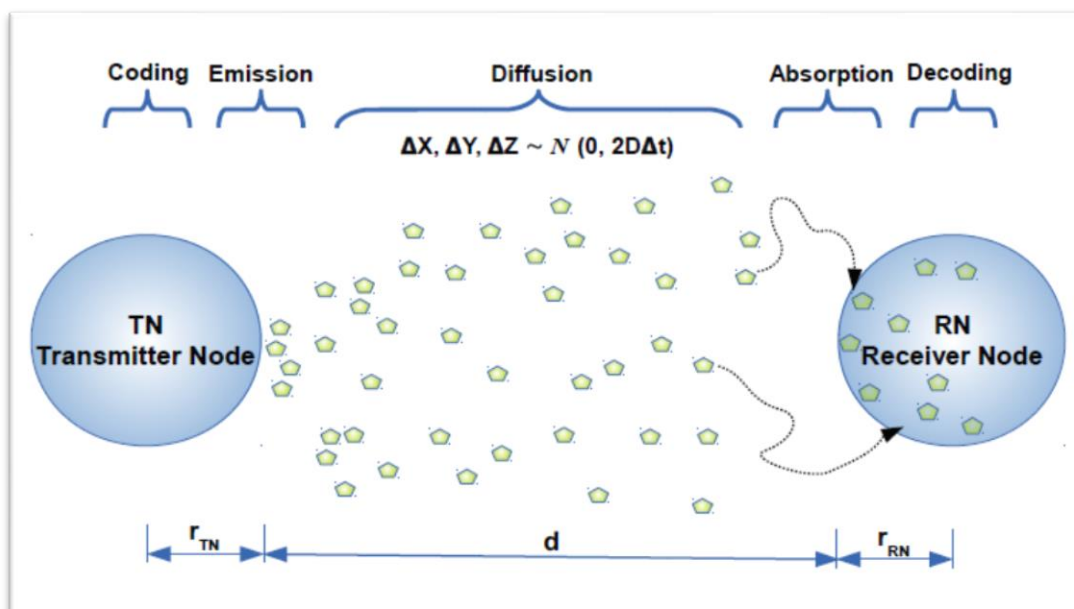
۳-۱ سیستم مدل و فرض‌های مربوط به مساله

در این قسمت می‌خواهیم رابطه احتمال خطا و ظرفیت متوسط را برای یک سیستم مخابراتی که فاصله در دوره‌های ارسال متوالی آن متغیر است را بدست آوریم. سیستم مدل مورد نظر در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. در این سیستم مدل، زمان را به بازه‌های زمانی مساوی به نام دوره‌ی ارسال تقسیم می‌کنیم که به شکل t_s آن را نمایش می‌دهیم. در هر دوره‌ی ارسال یک سمبل ارسال می‌کنیم و مقدار سطح آستانه را با τ نمایش می‌دهیم.

از جمله فرض‌هایی که در این سیستم مدل در نظر گرفتیم شامل موارد زیر است:

- فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده در یک دوره ارسال ثابت است.

- فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده در بازه‌های ارسال متوالی تغییر می‌کند.
- در تمام دوره‌های ارسال جایگاه گیرنده ثابت است و تنها فرستنده است که جابجا می‌شود.
- اندازه‌ی نانوماشین فرستنده در مقایسه با فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده ناچیز است بنابراین می‌توان نانوماشین فرستنده را به‌عنوان یک منبع نقطه‌ای در نظر گرفت.
- نانوماشین‌ها در یک محیط سه‌بعدی با چسبناکی و دمای ثابت قرار دارند.
- مولکول‌هایی که از فرستنده منتشر و در محیط پخش می‌شوند به‌طور آزادانه و تصادفی در هر طرف حرکت می‌کنند و از قانون دوم فیک تبعیت می‌کنند.
- ارتباط بین فرستنده و گیرنده باینری با مدولاسیون On_Off_Keying در نظر گرفته‌شده است.



شکل ۱-۳) فرستنده، کانال و گیرنده در یک سیستم مخابرات مولکولی

همان‌طور که گفتیم فرض می‌کنیم که مدولاسیون فرستنده On_Off_Keying است به این معنا که به ازای ارسال یک، فرستنده غلظتی از مولکول‌ها شامل n مولکول را در محیط پخش می‌کند و به

ازای ارسال صفر هیچ غلظتی نمی فرستد.

جابجایی مولکول های پیام در یک بعد ، یک متغیر تصادفی (ΔX) است که از توزیع نرمال پیروی می کند.

$$\Delta X \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2) \quad (۱-۳)$$

که μ در آن صفر است و σ براساس نوع حرکت انتخابی تعیین می شود. مقدار $\mu = 0$ نشان دهنده ی تمایل ذرات برای باقی ماندن در یک مکان ثابت است. از آنجایی که در این پایان نامه، ما بر روش مبتنی بر انتشار تمرکز کرده ایم بنابراین σ به شکل زیر محاسبه می شود.

$$\sigma = \sqrt{2D\Delta t} \quad (۲-۳)$$

که در آن D ضریب انتشار و Δt گام زمانیست. ضریب انتشار، میزان تمایل مولکول ها برای پخش شدن در محیط را نشان می دهد که به شکل زیر به دست می آید.

$$D = \frac{K_b \cdot T}{b} \quad (۳-۳)$$

که در آن K_b ثابت بولتزمن ، T دمای محیط و b ضریب اصطکاک است. نسبت اندازه ی مولکول مایع (S_{fluid}) و مولکول پیام (S_{pm}) بر ضریب اصطکاک تاثیر گذار است. ضریب اصطکاک از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$b = \begin{cases} \sqrt{\frac{K_b \cdot T}{2\pi\eta r_s} \Delta t}, & \text{if } (S_{pm} \approx S_{fluid}) \\ \sqrt{\frac{K_b \cdot T}{3\pi\eta r_s} \Delta t} & \text{if } (S_{pm} \gg S_{fluid}) \end{cases} \quad (۴-۳)$$

که در آن η میزان چسبندگی مایع و r_s شعاع استوک مولکول های پیام را مشخص می کند. شعاع استوک و شعاع مولکول متفاوت است. شعاع استوک شعاع کره ایست که در آن ضریب انتشار ثابت است.

در مدل ما مولکول‌های پیام در سه بعد منتشر می‌شوند و میزان جابجایی کلی مولکول‌ها به این شکل نمایش داده می‌شود.

$$\vec{r}=(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) \quad (5-3)$$

فرض می‌شود که با برخورد مولکول پیام با گیرنده، مولکول پیام دریافت و از محیط حذف می‌شود و اگر هم حذف نشد از مکانیسم‌هایی استفاده می‌شود که تضمین کند هر مولکول تنها یکبار توسط گیرنده دریافت می‌شود [۹۰]. هر مولکول پیام با یک احتمالی به گیرنده می‌رسد که این احتمال تحت تاثیر ضریب انتشار و فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده و زمان است.

در محیط سه بعدی احتمال دریافت مولکول توسط گیرنده به شکل زیر محاسبه می‌شود.

$$P_h^{3D}(d,t) = \frac{r_{RN}}{r_{RN} + d} \frac{d}{\sqrt{4\pi D t^3}} e^{\frac{-d^2}{4Dt}} \quad (6-3)$$

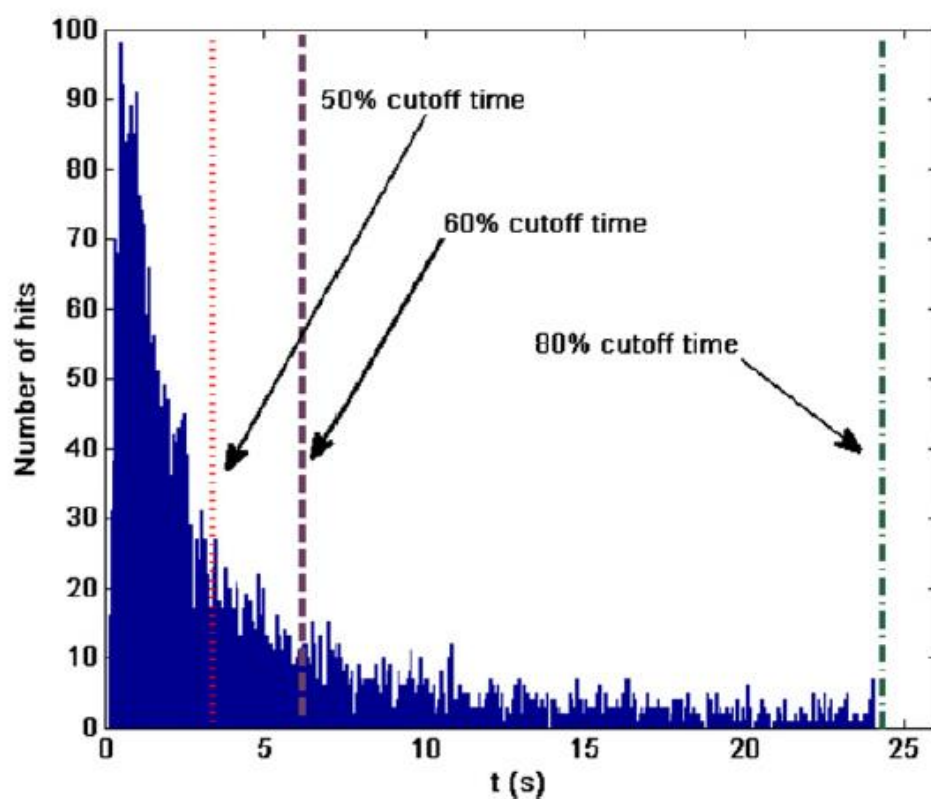
که در آن d فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده است و r_{RN} شعاع گیرنده است [۹۱]. رابطه‌ی فوق احتمال رسیدن مولکول به گیرنده را در یک زمان مشخص نشان می‌دهد درحالی‌که ما در یک دوره‌ی ارسال، امکان رسیدن مولکول به گیرنده را بررسی می‌کنیم پس احتمال اینکه یک مولکول در این دوره به گیرنده برسد تابع توزیع تجمعی رابطه‌ی فوق خواهد بود بنابراین احتمال رسیدن مولکول به گیرنده در طول دوره t_s در محیط سه بعدی به شکل زیر است.

$$P_{h(d,t_s)} = \frac{r_{RN}}{r_{RN} + d} \operatorname{erfc}\left[\frac{d}{\sqrt{4Dt_s}}\right] \quad (7-3)$$

همانطور که گفته شد در این سیستم مدل، زمان را به بازه‌های زمانی مساوی به نام دوره‌ی ارسال تقسیم می‌کنیم و در هر دوره‌ی ارسال نیز یک سمبل ارسال می‌کنیم. بخاطر رفتار احتمالی مولکول‌ها در حرکت براونی هیچ تضمینی برای رسیدن مولکول‌ها به گیرنده نیست بنابراین با یک احتمالی این مولکول‌ها به گیرنده می‌رسند که این احتمال را در محیط سه بعدی به شکل P_h^{3D} تعریف کردیم و

دیدیم که این احتمال به فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده، دوره‌ی ارسال، محیط و نوع مولکول وابسته است. از آنجایی که دما و محیط در طول دوره‌ی ارسال یکسان است اثرش را در نظر نمی‌گیریم.

اگر قرار باشد در هر بازه‌ی ارسال تمام مولکول‌های ارسالی را دریافت کنیم باید مدت زمان زیادی منتظر بمانیم که البته در محیط سه بعدی بازهم امکان از دست دادن مولکول وجود دارد از طرفی هرچه دوره‌ی ارسال طولانی‌تر باشد نرخ ارسال داده نیز کمتر می‌شود بنابراین باید یک تعادلی بین نرخ ارسال و دوره‌ی ارسال ایجاد کرد. همانطور که در شکل ۲-۳ مشاهده می‌شود درصد زیادی از مولکول‌ها در بازه‌ی زمانی کوتاهی به گیرنده می‌رسند بنابراین دوره‌ی ارسال مناسب را دوره‌ای تعریف می‌کنند که در آن ۶۰٪ مولکول‌های ارسالی به گیرنده برسند. دوره‌ی مناسب برای برخی از فاصله‌ها در جدول (۳-۱) آمده است.



شکل ۳-۲) این شکل الگوی رسیدن مولکول ها به گیرنده را نشان می‌دهد.

هر خط بیانگر زمانیکه که قبل از آن، درصد مشخص شده از مولکول ها به گیرنده

می‌رسند. این شکل برای فاصله $16 \mu m$ رسم شده است [۶۹].

جدول ۳-۱) دوره ارسال مناسب برای فاصله ها [۶۹]

Distance (μm)	t_s
1	0.03
2	0.11
4	0.40
8	1.54
16	5.9
32	22.01

در این کانال فاصله در هر دوره‌ی ارسال تغییر می‌کند و متناسب با هر فاصله یک دوره‌ی ارسال مناسب وجود دارد که تضمین می‌کند ۶۰٪ مولکول‌های ارسالی به گیرنده می‌رسد اما از آنجایی که تغییر دوره‌ی ارسال در هر بازه، سیستم را پیچیده‌تر می‌کند ما از یک دوره‌ی ارسال میانگین برای ارسال استفاده می‌کنیم.

اگر در ابتدای دوره‌ی ارسال n_c مولکول ارسال شود تعداد مولکول‌هایی که از این تعداد در دوره ارسال جاری به گیرنده می‌رسد (N_c) یک متغیر تصادفی است که از توزیع دوجمله‌ای پیروی می‌کند [۶۹].

$$N_c \sim \text{Binomial}(n_c, P_h(d_i, t_{smean})) \quad (۸-۳)$$

باتوجه به اینکه در این سیستم مدل قرار است اثر یک سمبل قبل را نیز لحاظ کنیم بنابراین تعداد مولکول‌هایی که در هر بازه به گیرنده می‌رسند تشکیل شده از مولکول‌هایی که از سمبل جاری به گیرنده رسیده‌اند (N_c) و مولکول‌هایی که از سمبل قبل دریافت شدند (N_p). حاصل تفریق توزیع‌های دوجمله‌ای است. درواقع تعداد مولکول‌هایی که در بازه‌ی قبل ارسال شدند و در همان بازه دریافت شدند را از تعداد مولکول‌هایی که در بازه‌ی قبل ارسال و در بازه‌ی جاری دریافت می‌شوند کم می‌کنیم.

$$N_p \sim \text{Binomial}(n_p, P_h(d_{i-1}, 2t_{smean})) - \text{Binomial}(n_p, P_h(d_{i-1}, t_{smean})) \quad (۹-۳)$$

که در آن $P_h(d_i, t_{smean})$ احتمال این است که مولکول‌هایی که در ابتدای بازه‌ی جاری ارسال شده‌اند در همین دوره‌ی ارسال به گیرنده برسند. $P_h(d_{i-1}, 2t_{smean})$ احتمال این است که مولکول‌هایی که در ابتدای بازه‌ی قبل ارسال شدند در بازه‌ی جاری به گیرنده برسند. $P_h(d_{i-1}, t_{smean})$ احتمال این است که مولکول‌هایی که در بازه‌ی قبل ارسال شده‌اند در همان بازه به گیرنده برسند.

در توزیع دوجمله‌ای $\text{Binomial}(n, p)$ اگر p به صفر و یک میل نکند و np عدد بزرگی باشد

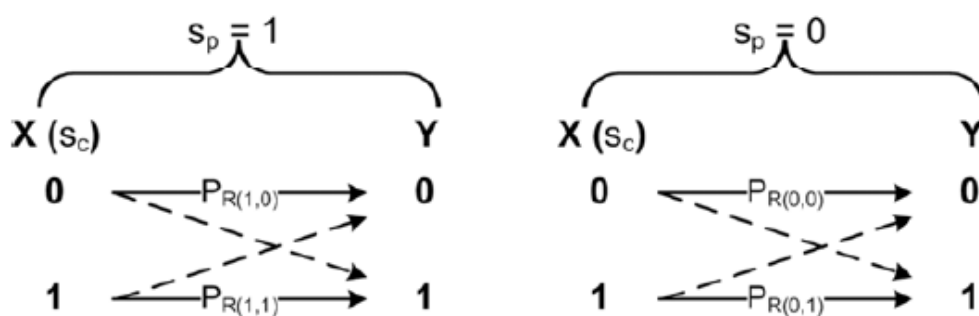
می‌توان توزیع دوجمله‌ای را با توزیع نرمال $\mathcal{N}(np, np[1-p])$ تقریب زد بنابراین رابطه فوق به شکل زیر تقریب زده می‌شود.

$$\text{Binomial}(n_p, P_h) \sim \mathcal{N}(n_p P_h, n_p P_h [1 - P_h]) \quad (۱۰-۳)$$

$$\begin{aligned} N_p \sim \mathcal{N}(n_p(P_h(d_{i-1}, 2t_{smean}) \\ - P_h(d_{i-1}, t_{smean})), n_p(P_h(d_{i-1}, 2t_{smean})(1 \\ - P_h(d_{i-1}, 2t_{smean})) + P_h(d_{i-1}, t_{smean})(1 \\ - P_h(d_{i-1}, t_{smean}))) \end{aligned} \quad (۱۱-۳)$$

۲-۳ احتمال دریافت صحیح اطلاعات

از آنجایی که این سیستم حافظه‌دار است چهارمدل برای دیکد کردن سمبل دریافتی وجود دارد و احتمال اینکه گیرنده سمبل ارسالی را صحیح دریافت کند به این چهار حالت وابسته است. این چهار حالت را به شکل $P_{R(p,c)}$ نمایش می‌دهیم که p سمبل قبلی و c سمبل جاری است. مدل کانال باینری در سیستم حافظه‌دار در شکل ۳-۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳-۳ مدل کانال باینری در سیستم حافظه دار

• حالت $S_p = 1, S_c = 1$:

در این حالت از آنجایی که یک سری مولکول‌ها از سمبل قبلی به گیرنده می‌رسند و سمبل جاری نیز یک است احتمال دریافت صحیح یک، افزایش می‌یابد. بنابراین از نظر سیگنال، این حالت یک

حالت مناسب است.

$$N_{hit} = N_p + N_c \sim \mathcal{N}(n_p(P_h(d_{i-1}, 2t_{smean}) - P_h(d_{i-1}, t_{smean})) + n_c P_h(d_i, t_{smean}), n_p(P_h(d_{i-1}, t_{smean})(1 - P_h(d_{i-1}, t_{smean})) + P_h(d_{i-1}, 2t_{smean})(1 - P_h(d_{i-1}, 2t_{smean})) + n_c P_h(d_i, t_{smean})(1 - P_h(d_i, t_{smean})) \quad (۱۲-۳)$$

$$\sigma_{11} = n_p(P_h(d_{i-1}, t_{smean})(1 - P_h(d_{i-1}, t_{smean})) + P_h(d_{i-1}, 2t_{smean})(1 - P_h(d_{i-1}, 2t_{smean})) + n_c P_h(d_i, t_{smean})(1 - P_h(d_i, t_{smean})) \quad (۱۳-۳)$$

$$\mu_{11} = n_p(P_h(d_{i-1}, 2t_{smean}) - P_h(d_{i-1}, t_{smean})) + n_c P_h(d_i, t_{smean}) \quad (۱۴-۳)$$

$$P_{R(1,1)} = P(N_{hit} \geq \tau) \approx Q\left(\frac{\tau - \mu_{11}}{\sigma_{11}}\right) \quad (۱۵-۳)$$

که در آن $P_{R(1,1)}$ احتمال دریافت صحیح یک است در حالیکه سمبل قبلی نیز یک باشد. N_{hit} مجموع تعداد مولکول‌هایی است که از سمبل قبل و سمبل جاری به گیرنده می‌رسد.

• حالت $S_p = 1, S_c = 0$:

در این حالت چون سمبل جاری صفر است بخاطر حضور سمبل قبلی احتمال دیکدکردن موفق کاهش می‌یابد. تنها در صورتی سمبل جاری درست دیکد می‌شود که مولکول‌هایی که از سمبل قبل به گیرنده می‌رسند از سطح آستانه تجاوز نکنند. این حالت، یک شرایط نامناسب برای دیکدکردن محسوب می‌شود.

$$N_{hit} = N_p \sim \mathcal{N}(n_p(P_h(d_{i-1}, 2t_{smean}) - P_h(d_{i-1}, t_{smean})), n_p(P_h(d_{i-1}, 2t_{smean})(1 - P_h(d_{i-1}, 2t_{smean})) + P_h(d_{i-1}, t_{smean})(1 - P_h(d_{i-1}, t_{smean}))) \quad (۱۶-۳)$$

$$\sigma_{11} = n_p \left(P_h(d_{i-1}, 2t_{smean})(1 - P_h(d_{i-1}, 2t_{smean})) \right. \\ \left. + P_h(d_{i-1}, t_{smean})(1 - P_h(d_{i-1}, t_{smean})) \right) \quad (۱۷-۳)$$

$$\mu_{11} = n_p (P_h(d_{i-1}, 2t_{smean}) - P_h(d_{i-1}, t_{smean})) \quad (۱۸-۳)$$

$$P_{R(1,0)} = P(N_{hit} \leq \tau) \approx 1 - Q\left(\frac{\tau - \mu_{10}}{\sigma_{10}}\right) \quad (۱۹-۳)$$

که در آن $P_{R(1,0)}$ احتمال دریافت صحیح صفر است درحالیکه سمبل قبلی یک باشد.

• حالت $S_p = 0, S_c = 1$:

در این حالت از آنجایی که سمبل قبلی صفر است هیچ تداخلی در سمبل جاری ایجاد نمی‌کند.

$$N_{hit} = N_c \sim \mathcal{N}(n_c P_h(d_i, t_{smean}), n_c P_h(d_i, t_{smean})(1 - P_h(d_i, t_{smean}))) \quad (۲۰-۳)$$

$$P_{R(0,1)} = P(N_{hit} \geq \tau) = P(N_c \geq \tau) = \quad (۲۱-۳)$$

$$\sum_{k=\tau}^{n_c} \binom{n_c}{k} P_h(d_i, t_{smean})^k (1 - P_h(d_i, t_{smean}))^{n_c-k} = I_{P(d_i, t_{smean})}(\tau, n - \tau + 1)$$

که در آن $P_{R(0,1)}$ احتمال دریافت صحیح یک است به شرط آنکه سمبل قبلی صفر باشد و $I_{P(d_i, t_{smean})}$ تابع بتای ناقص^۱ است که تقریبی مناسب برای مجموع توزیع‌های دوجمله‌ای است.

• حالت $S_p = 0, S_c = 0$:

در این حالت سمبل ارسالی صفر است. از آنجایی که هیچ تداخلی از سمبل قبل دریافت نمی‌شود و سطح آستانه نیز همواره بیشتر از صفر است پس همواره درست دیکد می‌شود.

$$P_{R(0,0)} = 1 \quad (۲۲-۳)$$

^۱ Incomplete Beta Function

که در آن $P_{R(0,0)}$ احتمال دریافت صحیح صفر است درحالیکه سمبل قبلی نیز صفر باشد.

ظرفیت متوسط این کانال برای m بازه از طریق رابطه‌ی زیر و باتوجه به اینکه احتمال ارسال صفر

و یک برابر است ($P_1 = P_0 = 0.5$) قابل محاسبه است.

$$C_{Avg} \quad (23-3)$$

$$\begin{aligned} &= \max_{n,\tau} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m I_i(X, Y) \\ &= \frac{1}{m} \max_{n,\tau} \sum_{i=1}^m \sum_{yi \in \{0,1\}} \sum_{xi \in \{0,1\}} P_{Xi,Yi}(X, Y) \log_2 \frac{P_{Xi,Yi}(X, Y)}{P_{Xi}(X)P_{Yi}(Y)} \end{aligned}$$

در رابطه‌ی فوق قرار است مجموع اطلاعات متقابل کانال روی m بازه با انتخاب مناسب سطح آستانه و

و تعداد مولکول‌های ارسالی بیشینه شود که $I_{Xi,Yi}$ در آن اطلاعات متقابل کانال در بازه‌ی i ام است.

تابع چگالی احتمال حاشیه‌ای برای این کانال در جدول (۲-۳) آمده است.

جدول ۳-۲) تابع چگالی احتمال شرطی

$Y \backslash X$	0	1
00	1	0
01	$1 - P_R(0,1)$	$P_R(0,1)$
10	$P_R(1,0)$	$1 - P_R(1,0)$
11	$1 - P_R(1,1)$	$P_R(1,1)$

در روابط زیر x همان سمبل جاری است.

$$\begin{aligned}
 P_Y(Y = 0) &= \sum_x \sum_{S_P} P(Y = 0, x, S_P) & (۲۴-۳) \\
 &= \frac{3 + P_R(1,0) - (P_R(0,1) + P_R(1,1))}{4}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_Y(Y = 1) &= \sum_x \sum_{S_P} P(Y = 1, x, S_P) & (۲۵-۳) \\
 &= \frac{1 + P_R(0,1) + P_R(1,1) - P_R(1,0)}{4}
 \end{aligned}$$

$$P_x(x = 0) = P_x(x = 1) = .5 \quad (۲۶-۳)$$

$$P_{xY}(x = 0, Y = 0) \quad (27-3)$$

$$= \sum_{S_P} P(Y = 0, x = 0, S_P) = P_{xY}(x = 0, Y = 0 | S_P = 0) P(S_P = 0)$$

$$+ P_{xY}(x = 0, Y = 0 | S_P = 1) P(S_P = 1)$$

$$= \frac{1 + P_R(1,0)}{4}$$

$$P_{xY}(x = 0, Y = 1) = \sum_{S_P} P(Y = 1, x = 0, S_P) = P_{xY}(x = 0, Y = 1 | S_P \quad (28-3)$$

$$= 0) P(S_P = 0) + P_{xY}(x = 0, Y = 1 | S_P = 1) P(S_P = 1)$$

$$= \frac{1 - P_R(1,0)}{4}$$

$$P_{xY}(x = 1, Y = 0) = \sum_{S_P} P(Y = 0, x = 1, S_P) = P_{xY}(x = 1, Y = 0 | S_P \quad (29-3)$$

$$= 0) P(S_P = 0) + P_{xY}(x = 1, Y = 0 | S_P = 1) P(S_P = 1)$$

$$= \frac{2 - (P_R(0,1) + P_R(1,1))}{4}$$

حال با فرض اینکه فرستنده در هر بار ارسال تعداد مولکول مشخصی را وارد کانال می‌کند یک

الگوی ثابت و مشخص برای تغییرات فاصله در m مرحله در نظر می‌گیریم. مثلاً فرض می‌کنیم الگوی

تغییرات فاصله برای پنج مرحله به شکل زیر است.

$$d=2, 4, 8, 16, 32 \mu m$$

دوره‌ی ارسال مناسب به هر فاصله نیز در جدول (3-1) آمده است. دوره‌ی ارسال متوسط نیز به شکل زیر

قابل محاسبه است.

$$t_S^T = t_S^1 + t_S^2 + t_S^3 + t_S^4 + t_S^5 = .11 + .4 + 1.54 + 5.9 + 22.01 = 30s$$

$$t_{smean} = \frac{30}{5} = 6s \quad (30-3)$$

ظرفیت متوسط پیشنهادی نیز برای این کانال به شکل زیر محاسبه می‌شود.

$$C_{avg}^* = \max_{n,\tau} I(x, Y) \quad (3-31)$$

$$= \frac{1}{5} \max_{n,\tau} \sum_{i=1}^5 \sum_{y \in 0,1} \sum_{x \in 0,1} P_{x_i, Y_i}(x, Y) \log_2 \frac{P_{x_i, Y_i}(X, Y)}{P_{x_i}(X) P_{Y_i}(Y)}$$

۳-۳ نتایج شبیه سازی

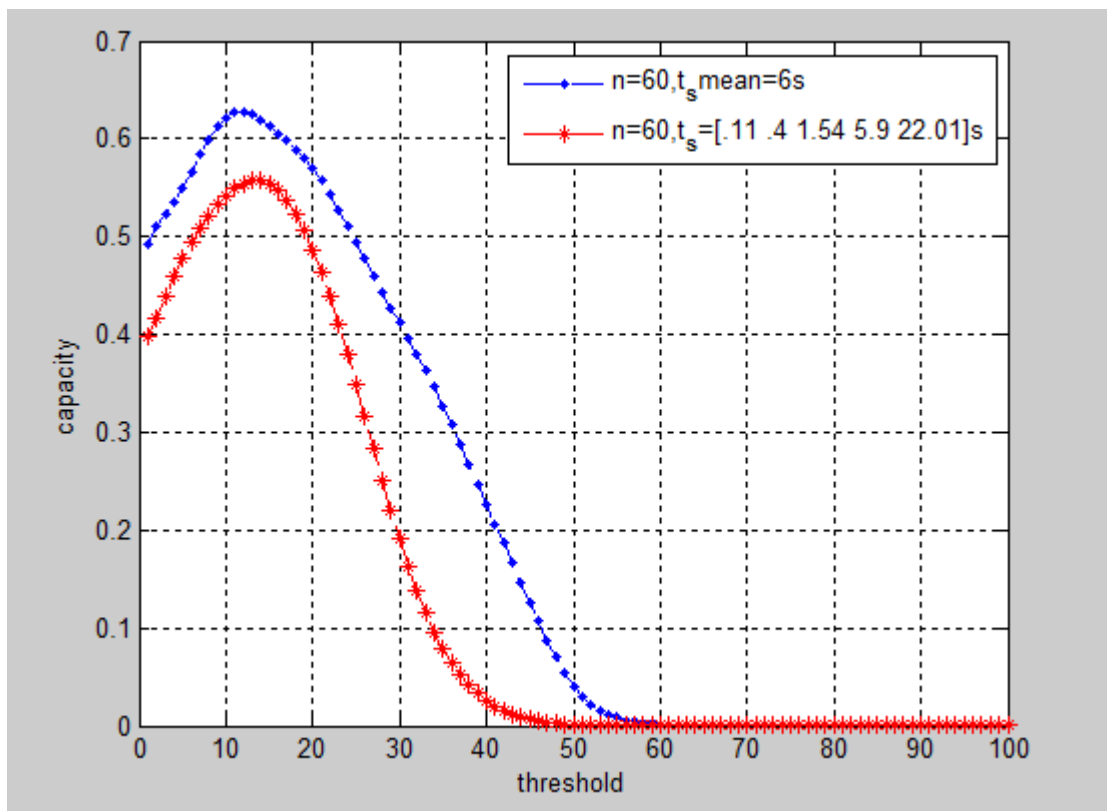
مسأله‌ی بهینه سازی به دست آمده، دستی قابل محاسبه نیست بنابراین ما برای حل کردن آن از نرم افزار متلب استفاده کرده ایم و با استفاده از این نرم افزار ظرفیت بیشینه نسبت به سطح آستانه و تعداد مولکول های ارسالی را یافته ایم و پارامترهای موثر بر این ظرفیت را نیز بررسی کرده ایم.

۳-۳-۱ بررسی تاثیر توان ارسالی و سطح آستانه بر ظرفیت

همانطور که پیش تر نیز گفته شد برای ارسال در هر فاصله ای یک دوره ی ارسال مناسب وجود دارد که به ازای آن تضمین می شود که ۶۰٪ مولکول های ارسالی به گیرنده می رسند اما اگر بخواهیم از دوره ی ارسال مناسب در هر بازه استفاده کنیم با مشکل سنکرون کردن فرستنده و گیرنده مواجه هستیم علاوه بر آن همانطور که در شکل ۳-۴ نیز مشاهده می شود وقتی از دوره ی ارسال متوسط استفاده می کنیم ظرفیت سیستم افزایش می یابد. این نیز به این علت است که دوره ی ارسال متوسط از دوره ی ارسال چهار بازه ی اول بهتر است و عملکرد سیستم در چهار بازه ی ابتدایی بهبود می یابد اما شرایط در بازه آخر نامطلوب می شود. از آنجایی که قرار است متوسط ظرفیت این پنج بازه بهبود یابد بنابراین بهبود یافتن عملکرد چهار بازه در مقابل یک بازه به نفع کانال است. در بازه ی آخر فاصله ی بین فرستنده و گیرنده نسبت به بازه های ابتدایی بیشتر است و احتمال رسیدن مولکول به گیرنده در این بازه کمتر است یعنی شرایط کانال در بازه ی آخر مطلوب نیست و سرمایه گذاری روی این بازه خیلی به نفع کانال نیست. از این پس ما از دوره ی ارسال متوسط برای کانال استفاده می کنیم.

همانطور که در شکل ۳-۴ نیز مشخص است اطلاعات متقابل کانال به ازای یک سطح آستانه ی خاص بیشینه می شود. در حالت کلی اگر سطح آستانه پایین باشد گیرنده با دریافت تعداد کمی مولکول

تصمیم می‌گیرد که یک دریافت شده و اگر سطح آستانه بالا باشد گیرنده باید تعداد زیادی مولکول دریافت کند که تصمیم بگیرد یک ارسال شده است بنابراین اگر τ انتخابی کمتر از سطح آستانه‌ی بهینه باشد مقدار $P_R(1,0)$ (احتمال دریافت صحیح صفر در حالیکه در بازه‌ی قبل یک فرستاده شده باشد) به شدت کاهش می‌یابد چون مولکول‌هایی که از بازه‌ی قبل توسط گیرنده دریافت می‌شود از سطح آستانه تجاوز کرده، گیرنده دچار خطا می‌شود و صفر را یک تشخیص می‌دهد در نتیجه اطلاعات متقابل کاهش می‌یابد. اگر τ انتخابی بیشتر از سطح آستانه‌ی بهینه باشد همچنان که τ افزایش می‌یابد $P_R(0,1)$ و $P_R(1,1)$ (احتمال دریافت صحیح یک) کاهش می‌یابند در نتیجه اطلاعات متقابل نیز کاهش می‌یابد. بنابراین تنها به ازای سطح آستانه‌ی بهینه است که بیشترین ظرفیت را داریم و اگر این سطح آستانه‌ی بهینه جابجا شود ظرفیت کاهش می‌یابد.



شکل ۳-۴) مقایسه ظرفیت در دو حالتی که از دوره ارسال متوسط و دوره ارسال مناسب هر بازه

استفاده کرده‌ایم در حالیکه $n=60$ است

آنچه که مسلم است این است که هرچه توان ارسالی (تعداد مولکول ها) در بازه ها افزایش یابد ظرفیت نیز افزایش می یابد. به ازای هر n یک τ^* (سطح آستانه بهینه) وجود دارد که اطلاعات متقابل کانال را بیشینه می کند. در جدول (۳-۳) ظرفیت کانال و سطح آستانه ی بهینه به ازای n های مختلف محاسبه شده است.

جدول (۳-۳) ظرفیت کانال به ازای n های متفاوت

n	C	τ^*
60	.63	12
100	.70	17
180	.76	29
1000	.85	64
5000	.99	314

همانطور که در جدول (۳-۳) نشان داده شده است به ازای هر n یک τ^* خاص وجود دارد که اطلاعات متقابل کانال به ازای آن بیشینه می شود. با توجه به جدول (۳-۳) هر چه n افزایش می یابد ظرفیت و سطح آستانه ی بهینه نیز افزایش می یابد. این نتیجه از قبل هم قابل پیش بینی بود چرا اینکه هرچه توان ارسالی در کانال بیشتر شود احتمال دریافت صحیح سمبل های ارسالی افزایش می یابد در نتیجه ظرفیت هم افزایش می یابد، از طرفی هرچه توان ارسالی بیشتر شود برای کاهش تداخل از سمبل های قبل سطح آستانه ی بهینه نیز باید بیشتر شود. همانطور که از این جدول برمی آید برای رسیدن به بیشترین ظرفیت باید در هر بازه ۵۰۰۰ مولکول ارسال کرد که این مقدار بهینه نیست چون در بازه هایی با فاصله ی کم می توان با تعداد مولکول کمتری نیز به عملکرد بهینه رسید. از آنجایی که مقدار توان در دسترس در کانال های مخابرات مولکولی محدود است بنابراین ما سعی داریم با در نظر گرفتن الگوی فاصله، توان بین بازه های ارسالی به گونه ای تقسیم شود که ظرفیت کانال بیشینه شود.

در این مرحله فرض می کنیم که فرستنده انرژی مورد نیاز برای ارسال در پنج بازه ی اول را همان

ابتدا از محیط برداشت می‌کند و سپس با توجه به الگوی تغییرات فاصله این انرژی را به شکل مناسب بین بازه‌ها تقسیم می‌کند تا ظرفیت بیشینه شود.

$$C_{Avg}^* = \max_{\tau, P_{wi}} \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 I_i(x, Y) \quad (32-3)$$

$$Pw_T \leq Pw_c \Rightarrow n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 \leq n_{max}, n_i \in Z$$

$$t_{smean} = \alpha$$

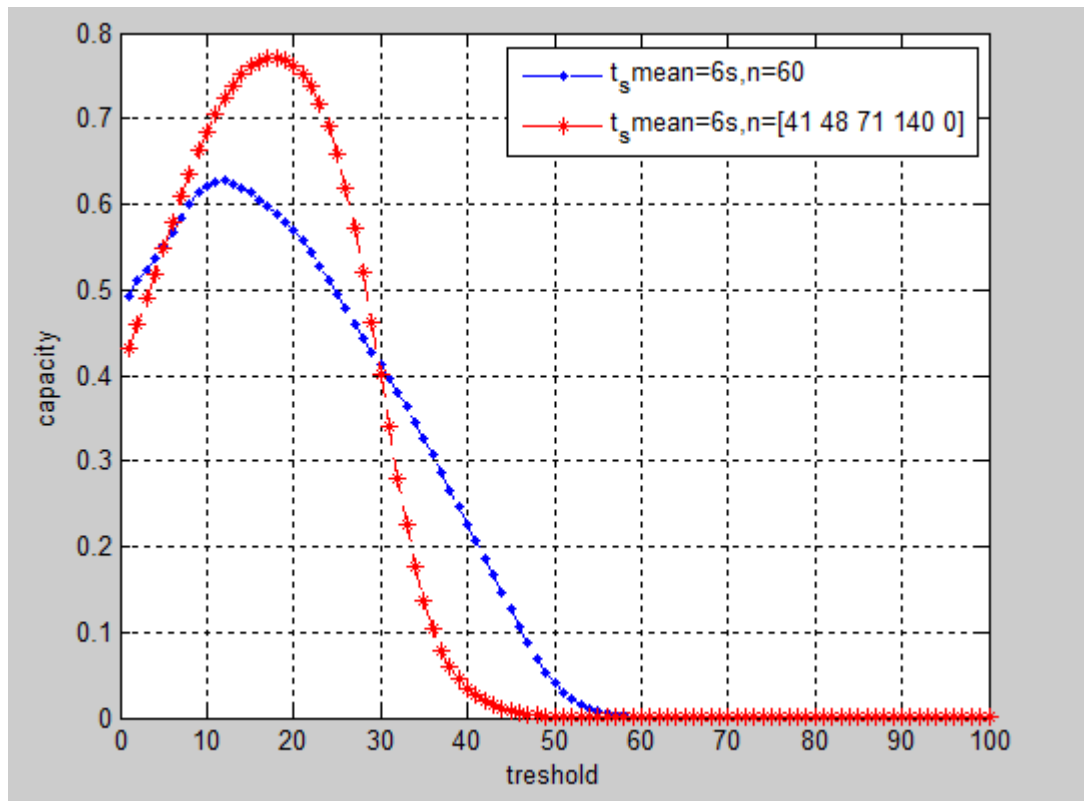
$$d = [\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5]$$

جدول ۳-۴) پارامترهای مورد نیاز در مساله

پارامتر	توضیح	مقدار
R_{rn}	شعاع فرستنده	$10\mu m$
R_t	شعاع گیرنده	$10\mu m$
T	دمای محیط	25°
n_{max}	حداکثر مولکول برای ۵ بازه	300
D	ضریب انتشار	$79.4 \frac{\mu m^2}{s}$

اگر انرژی‌ای که فرستنده در ابتدای کار دریافت می‌کند به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد رقابتی بین کانال‌ها برای تخصیص توان ایجاد نمی‌شود. بنابراین ما با در نظر گرفتن یک انرژی محدود در سیستم سعی می‌کنیم با تخصیص توان مناسب عملکرد سیستم را بهبود ببخشیم. اینجا فرض شده است در آغاز کار فرستنده انرژی لازم برای ارسال ۳۰۰ مولکول را دریافت کرده و در بازه‌ی پیش از آغاز این پنج مرحله، فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده را $4\mu m$ در نظر گرفتیم و فرض می‌کنیم در این بازه فرستنده

n_0 مولکول در محیط رها می‌کند. ساده‌ترین کار برای سیستم این است که در تمام بازه‌ها، مولکول برابر در محیط پخش کند اما این حالت ظرفیت را بیشینه نمی‌کند. بنابراین با استفاده از نرم افزار متلب بهترین تخصیص توان که به ازای آن ظرفیت متوسط بیشینه می‌شود را یافته‌ایم. در شکل ۳-۵ به ازای تخصیص توان برابر و تخصیص توان بهینه ظرفیت‌ها را مقایسه کرده ایم.



شکل ۳-۵) مقایسه ظرفیت به ازای تخصیص توان برابر و تخصیص توان بهینه، $n_0=60$

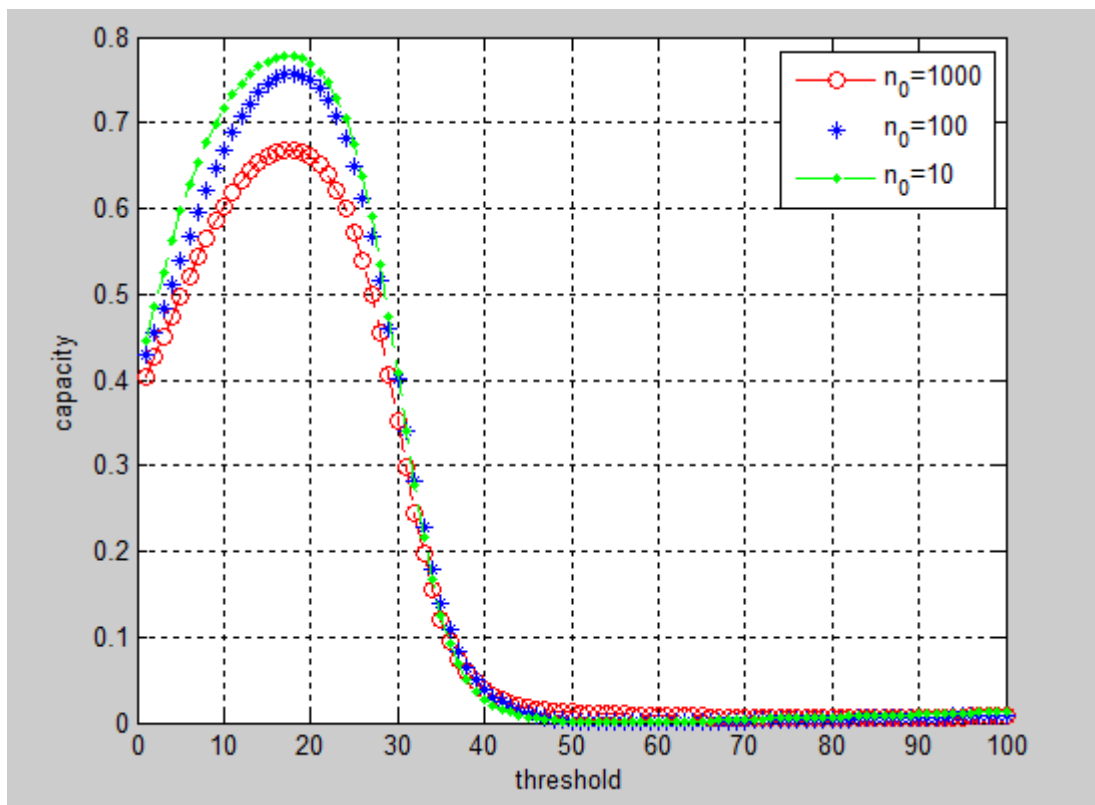
همانطور که پیش‌تر گفتیم هرچه فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده کمتر باشد احتمال دریافت مولکول توسط گیرنده بیشتر است بنابراین در فواصل کوتاه نسبت به فواصل بلند با تعداد مولکول کمتری می‌توان ظرفیت را بیشینه کرد. به عبارتی هرچه شرایط کانال مساعدتر باشد برای رسیدن به ظرفیت بیشینه نیاز به توان کمتری داریم. در سیستم مدل ما نیز فاصله در چهار بازه‌ی اول نسبت به بازه‌ی آخر کمتر است پس چهار بازه اول را با تعداد مولکول کمتری می‌توان به بیشترین ظرفیت رساند. از طرفی با انتخاب دوره‌ی ارسال $t_{smean} = 6s$ که از دوره‌ی ارسال چهار بازه‌ی اول بیشتر است شرایط را برای

این بازه‌ها بهتر هم کردیم این در حالیست که دوره‌ی ارسال متوسط به شدت کمتر از دوره‌ی ارسال مناسب در بازه‌ی آخر است و همین امر شرایط کانال را در بازه‌ی آخر بسیار نامناسب می‌کند بنابراین برای بیشینه کردن ظرفیت در بازه‌ی آخر نیاز به مولکول زیادی هست. از انجایی که قرار است متوسط ظرفیت این بازه‌ها را با تعداد مولکول محدود بیشینه کنیم مسلماً بهتر است که ابتدا ظرفیت بازه‌هایی را که با تعداد مولکول کمتری بیشینه می‌شوند بیشینه کنیم. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که ظرفیت متوسط این کانال همانطور که در شکل ۳-۵ نیز نشان داده شده است برای الگوی فاصله‌ی تعریف شده به ازای $n=[41\ 48\ 71\ 140\ 0]$ مولکول بیشینه می‌شود. درحالت تخصیص توان بهینه ظرفیت بازه‌ها به ترتیب به شکل زیر است.

$$C=[0.97\ 0.98\ 0.96\ 0.94\ 2.33e-4]$$

در حالت تخصیص توان بهینه سعی شده است که ابتدا ظرفیت در بازه‌ها با شرایط مناسب بیشینه شود. اگرچه در بازه‌ی اول فاصله کمتر از بازه دوم است و به نظر می‌رسد که ظرفیت بیشتری به این بازه باید اختصاص داده شود اما ازطرفی تداخل در این بازه بیشتر از بازه دوم است که همین امر باعث می‌شود بهترین شرایط کانال مربوط به بازه‌ی دوم شود. در این شبیه‌سازی $n_0 = 60$ در نظر گرفته شده است. ظرفیت ناچیز بازه‌ی آخر نیز اثر تداخل بازه‌ی قبل آن است.

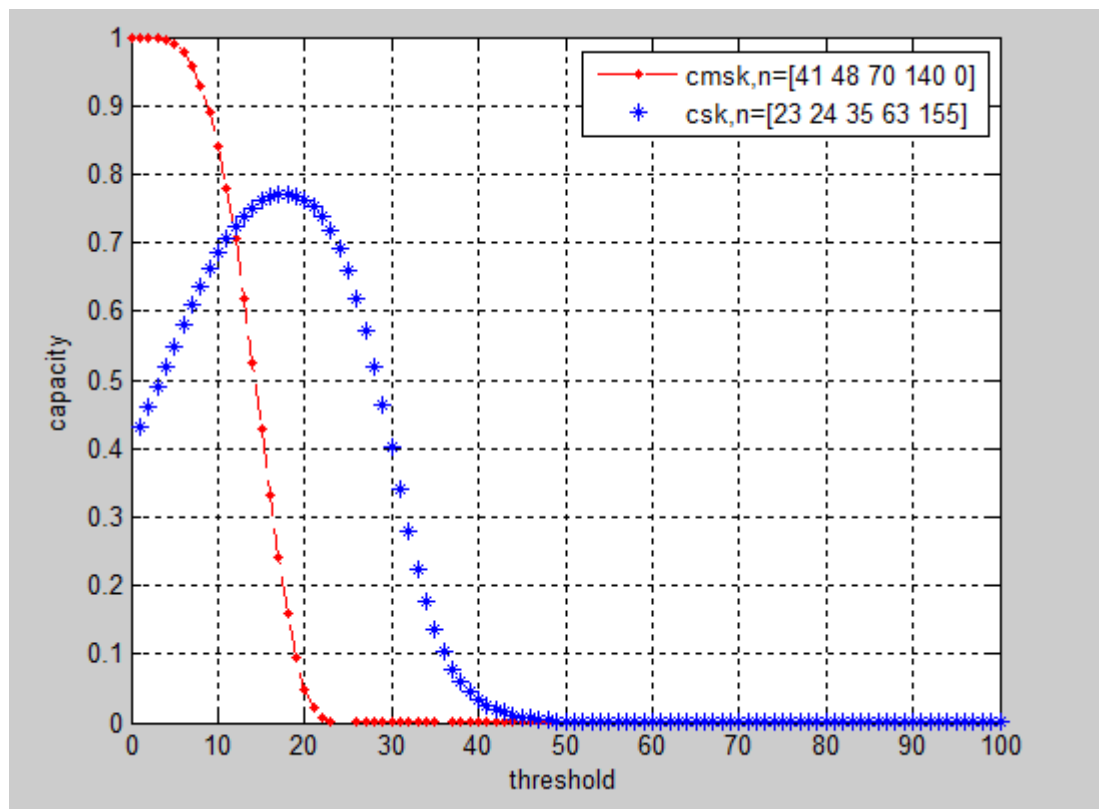
تعداد مولکول‌های ارسالی در بازه‌ی پیش از شروع این پنج بازه (n_0) نیز بر ظرفیت کانال اثر می‌گذارد به این ترتیب که هرچه تعداد مولکول‌های ارسالی در این بازه کمتر باشد تداخل در بازه‌ی اول کمتر است و ظرفیت کانال بهتر می‌شود. در شکل ۳-۶ ظرفیت کانال به ازای n_0 های مختلف رسم شده است.



شکل ۳-۶) تاثیر n_0 بر ظرفیت کانال

۲-۳-۳ بررسی تاثیر نوع مدولاسیون بر ظرفیت

در این مساله تا اینجا از مدولاسیون On_Off_keying استفاده کردیم که در آن پیام بر اساس غلظت مولکول‌ها کد می‌شود یعنی برای ارسال یک، غلظتی از مولکول‌ها ارسال می‌شود و برای ارسال صفر هیچ مولکولی در کانال فرستاده نمی‌شود. بیشترین تداخل در هر بازه، ناشی از بازه‌ی قبل از آن است به‌طوریکه می‌توان اثر تداخل بازه‌های قبل‌تر را نادیده گرفت. ما نیز در سیستم مدل مورد نظر فقط اثر یک سمبل قبل را در تداخل لحاظ کرده‌ایم که برای از بین بردن اثر آن روش‌های متعددی ارایه شده است که ما از روش تغییر مدولاسیون برای خنثی کردن اثر تداخل استفاده می‌کنیم. اگر به جای مدولاسیون On_Off_keying از مدولاسیون Cmsk استفاده کنیم در این صورت تداخل نخواهیم داشت و عملکرد سیستم به شدت افزایش می‌یابد. در مدولاسیون On_Off_keying مولکول‌ها براساس غلظت کد می‌شوند اما در هر دوبازه‌ی متوالی از دو نوع مولکول برای ارسال استفاده می‌شود در نتیجه اثر تداخل سمبل قبل بر سمبل جاری از بین می‌رود.



شکل ۳-۷) مقایسه ظرفیت کانال در حالت استفاده از مدولاسیون Cmsk و Csk

همانطور که در شکل ۳-۷ مشاهده می شود وقتی از مدولاسیون Cmsk استفاده می شود به ازای سطح آستانه‌ی صفر بیشترین ظرفیت ($C^* = 0.9999$) را داریم که از قبل هم قابل پیش بینی بود. چون در کانالی که هیچ تداخلی وجود ندارد با دریافت یک مولکول می توان تصمیم گرفت یک ارسال شده و اگر مولکولی دریافت نشد می توان تصمیم گرفت صفر ارسال شده است. از آنجایی که هیچ مولکولی از بازه‌ی قبل دریافت نمی شود و تمام مولکول های دریافتی مربوط به بازه‌ی جاری هستند دریافت تنها یک مولکول نیز می تواند بیانگر ارسال یک باشد. بنابراین با از بین بردن تداخل در کانال توانستیم ظرفیت کانال را به بیشترین مقدار خودش برسانیم. همچنین در این روش که تداخل از بین رفته است با تعداد مولکول های کمتری در هر بازه میتوان به ظرفیت بیشینه رسید و نحوه‌ی تخصیص توان در این حالت با حالت قبل که تداخل داشتیم یکی نمی باشد. در واقع در روش Cmsk چون تداخل از بین رفته است ۳۰۰ مولکول برای بیشینه کردن ظرفیت در تمام بازه ها کفایت می کند و هیچ رقابتی بین بازه ها برای تخصیص توان ایجاد نمی شود. بهترین تخصیص توان در این روش ها برای رسیدن به بیشترین ظرفیت

با بهینه سازی در برنامه‌ی متلب به دست آمده است و نتایج آن در شکل‌ها نمایش داده شده است.

فصل چهارم

نتیجه‌گیری و

پیشنهادات

۴-۱ نتیجه گیری

موج وسیعی از تحقیقات جدید در نانو فناوری، و ترکیب آن با اکتشافات جدید در زیست‌شناسی مولکولی، به توسعه ابزارهای بسیار ریز، قوی و دقیقی منجر می‌شود که مرزهای حوزه فناوری اطلاعات و ارتباطات را وسیع‌تر خواهد کرد. در پژوهش جاری، عبارت شبکه نانویی، به تجهیزات مخابراتی بسیار ریزی اطلاق می‌شود که از طریق مخابرات مولکولی، با یکدیگر ارتباط متقابل برقرار می‌کنند. شبکه‌های نانویی، امکان ایجاد کانال‌های مخابرات مولکولی را میان نانو ماشین‌ها، ایجاد می‌کنند.

اولین شبکه‌های نانویی، به تقلید از شبکه‌های زیستی موجود، طراحی شده‌اند. به‌طور کلی، در مقیاس نانو، بسیاری از اجزا و فرآیندهای مخابراتی، از دیدگاه زیستی یا شیمیایی مورد بررسی قرار می‌گیرند. باوجود مدل‌های ارتباطی جدید که به دیدگاه میان‌رشته‌ای نیاز دارند، فناوری‌های اطلاعاتی و مخابراتی نقش بسیار کلیدی در تکامل شبکه‌های نانویی خواهند داشت. معماری شبکه، مدل‌های کانال، معماری نانوماشین‌ها و فرستنده-گیرنده‌ها، پروتکل‌های مسیریابی و کنترل دسترسی به رسانه، تعدادی از نقش‌هایی است که از شاخه‌ی مخابرات انتظار می‌رود.

در این پایان‌نامه، مسأله‌ی انرژی مصرفی در نانو ماشین‌ها بررسی شده است. ویژگی نانو ماشین‌ها بر روی دریافت و ذخیره‌ی انرژی اثر می‌گذارد. نرخ پایین برداشت انرژی از محیط و فضای کم برای ذخیره‌ی انرژی محدودیت‌هایی بر این سیستم‌ها اعمال می‌کند که تا کنون تحقیق‌هایی برای مدیریت این محدودیت‌ها انجام شده است اما در بیشتر مقالات فرض شده است که فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده ثابت است این در حالیست که فرستنده و گیرنده در محیطی سیال قرار گرفته‌اند و هر لحظه ممکن است جابجا شوند. کوچکترین تغییر در فاصله می‌تواند احتمال خطا را تا حد زیادی افزایش دهد بنابراین ما در این پایان‌نامه فرض کرده‌ایم فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده متغیر است و ما الگوی این تغییرات را می‌دانیم. در واقعیت نیز می‌توان با بررسی فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده در دوره‌های متوالی یک الگوی مشخص برای تغییرات فاصله یافت.

در این پایان نامه، با دانستن الگوی تغییرات فاصله و لحاظ کردن تاثیر سمبل قبل بر سمبل جاری کانال را مدل کردیم و احتمال دریافت صحیح سمبل ارسالی را یافتیم. در نهایت یک مساله‌ی بهینه سازی برای ظرفیت مطرح شد که با تخصیص توان مناسب به بازه‌های ارسال متوالی و انتخاب درست سطح آستانه آن را بهینه کردیم. در این بهینه‌سازی میزان انرژی در دسترس را نیز محدود در نظر گرفتیم. یکی از مشکلات اساسی در مخابرات مولکولی بحث تداخل بین سمبلی است که ما با تغییر کدگذاری اطلاعات از On_Off_Keying به Cmsk، اثر این تداخل را از بین بردیم و ظرفیت کانال را به بیشترین مقدار خودش رساندیم.

۲-۴ پیشنهادها برای کارهای آتی

با توجه به این که مخابرات مولکولی یک شاخه‌ی جدید از مخابرات است، و در سال‌های اخیر توجه محقق‌ها را به خود جلب کرده است در اکثر زمینه هنوز جای کار زیاد دارد. ازجمله کارهایی که به نظر می‌شود پیشنهاد داد عبارت‌اند از :

(۱) ارایه‌ی راه حلی برای کاهش تغییر فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده و یا ارایه‌ی یک مدل دقیق و واقع بینانه برای تغییر فاصله که براساس آن بتوان عملکرد سیستم را مدیریت کرد.

(۲) یکی از معضلات اساسی در سیستم های مخابرات مولکولی بحث نرخ پایین دریافت انرژی و فضای کم برای ذخیره‌ی انرژی می باشد. بنابراین می توان با ایجاد یک فضای کمکی برای ذخیره‌ی انرژی و یا افزایش انرژی دریافتی نرخ تبادل اطلاعات را در این سیستم‌ها را تا حد زیادی افزایش داد.

(۳) کار کردن در ابعاد نانو با محدودیت‌های بسیاری همراه است. باید با توجه به محدودیت‌های فیزیکی و عملیاتی مقیاس‌های بسیار کوچک، تا حد ممکن ساختار ساده‌تری برای فرستنده و گیرنده و کانال ارایه کرد تا امکان پیاده سازی آن افزایش یابد.

(۴) امنیت در مخابرات مولکولی : قابلیت اطمینان مخابراتی یکی از مسائل کلیدی دیگر در

شبکه‌های نانویی است. در بعضی از کاربردها، به مکانیسم‌های قابل‌اعتمادی برای نظارت یا قطع روند تبادل بسته‌ها یا فرایندهای دیگر، نیازمند هستند. در بعضی از شبکه‌های نانویی که بر فرآیندهای تصادفی مبتنی هستند، نمی‌توان دریافت پیام منتقل‌شده توسط گیرنده موردنظر را تضمین کرد. پس باید، با توجه به ویژگی‌های فرآیندهای مخابراتی تصادفی و زیرساخت‌های مرسوم در شبکه‌های مولکولی، قابلیت اطمینان شبکه را مورد تحلیل و آزمایش قرارداد.

۵) درنهایت، یکی از زمینه‌های ارزشمند کار در این حوزه، تلاش برای یافتن روش‌های ارتباطی جدیدی است که از طریق آن‌ها بتوان اطلاعات را در سراسر بدن انسان کسب و جابه‌جا کرد. ایجاد چنین شبکه‌های مخابراتی پیچیده و قدرتمندی، از طریق روش‌های جدید مهندسی مولکولی، تنها با همکاری کمیته‌های تحقیقاتی زیست‌شناسی و مهندسی مخابرات امکان‌پذیر خواهد بود.

مراجع:

- [1] H. Y. Shinsuke Hara, "New paradigms in wireless communication systems," *Wireless Personal Communications* 37, pp. 233–241, 2006
- [2] I. F. Akyildiz and J. M. Jornet, "The internet of nano-things," *IEEE Wireless Communications*, vol. 17, pp. 58 –63, 2010.
- [3] M. Kuran, T. Tugcu, and B. O. Edis, "Calcium signaling: overview and research directions of a molecular communication paradigm," *IEEE Wireless Communications*, vol. 19, no. 5, pp. 20–27, 2012.
- [4] I. F. Akyildiz, F. Fekri, R. Sikavumar, C. R. Forest, and B. K. Hammer, "Monaco: fundamentals of molecular nano-communication networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 19, no. 5, pp. 12–18, 2012.
- [5] B. Atakan, S. Balasubramaniam, and O. B. Akan, "Body area nanonet-works with molecular communications in nanomedicine," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, pp. 28 –34, 2012.
- [6] M. Moore, A. Enomoto, T. Suda, T. Nakano, and Y. Okaie, " Molecular communication: New paradigm for communication among nano-scale biological machines," in *The Handbook of Computer Networks* .Hoboken, NJ: Wiley, 2007, vol. 3, pp. 1034–1054.
- [7] I. F. Akyildiz, F. Brunetti, and C. Blazquez, "Nanonetworks: a new communication paradigm at molecular level," *Computer Networks (Elsevier) Journal*, vol. 52, pp. 2260–2279, Aug. 2008.
- [8] S. Hiyama and Y. Morita, "Molecular communication: Harnessing biochemical materials to engineer biomimetic communication systems," *Nano Communication Networks*, vol. 1, no. 1, pp. 20-30, 2010.
- [9] B. Alberts, D. Bray, K. Hopkin, A. Johnson, J. Lewis, M. Raff, K. Roberts, and P. Walter, *Essential Cell Biology*. Garland, 3 ed., 2009.
- [10] T. D. Pollard, W. C. Earnshaw, and J. Lippincott-Schwartz, *Cell Biology*. Saunders,

2 ed., 2007.

[11] T. Nakano, T. Suda, M. Moore, R. Egashira, A. Enomoto, and K. Arima, "Molecular communication for nanomachines using intercellular calcium signaling," *5th IEEE Conference on Nanotechnology*, 2005, pp. 478-481 .

[12] M. T. Barros, S. Balasubramaniam, B. Jennings, and Y. Koucheryavy, "Transmission Protocols for Calcium-Signaling-Based Molecular Communications in Deformable Cellular Tissue," *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 13, no. 4, pp. 779-788, Jul. 2014.

[13] M. T. Barros, S. Balasubramaniam, and B. Jennings, "Error control for calcium signaling based molecular communication," *2013 Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, 2013, pp. 1056-1060.

[14] M. T. Barros, S. Balasubramaniam, B. Jennings, and Y. Koucheryavy, "Adaptive transmission protocol for molecular communications in cellular tissues," *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Sydney, NSW, 2014, pp. 3981-3986.

[15] M. T. Barros, S. Balasubramaniam, and B. Jennings, "Comparative End-to-End Analysis of Ca^{2+} -Signaling-Based Molecular Communication in Biological Tissues," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 63, no. 12, pp. 5128-5142, Dec. 2015.

[16] J. Chen, X. Zhang , and H. Wang, "Research on biomechanical model of muscle fiber based on four-state operating mechanism of molecular motors," *10th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, Xi'an, 2015, pp. 529-532.

[17] A. Enomoto, M. J. Moore, T. Nakano and T. Suda, "Stochastic cargo transport by molecular motors in molecular communication," *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Ottawa, ON, 2012, pp. 6142-6145.

[18] A. E. Butterfield and M. Skliar, "Temporally resolved molecular motor dynamics: A case of ncd-microtubule interactions," *2011 5th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering*, Cancun, 2011, pp. 708-711.

[19] A. Mansson *et al.* , "Actin-Based Molecular Motors for Cargo Transportation in

Nanotechnology— Potentials and Challenges,” in *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, vol. 28, no. 4, pp. 547-555, Nov. 2005.

[20] M. Moore *et al.* , “A design of a molecular communication system for nanomachines using molecular motors,” *4th Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW'06)*, Pisa, 2006, pp. 554-559.

[21] M. Moore, A. Enomoto, S. Watanabe, K. Oiwa, and T. Suda, “Simulating molecular motor uni-cast information rate for molecular communication,” *2009 43rd Annual Conference on Information Sciences and Systems*, Baltimore, MD, 2009, pp. 859-864.

[22] B. Atakan and O. B. Akan, “On channel capacity and error compensation in molecular communication,” *Transactions on Computational Systems Biology X*, vol. 5410, pp. 59–80, 2008.

[23] M. U. Mahfuz, D. Makrakis, and H. T. Mouftah, “On the characterization of binary concentration-encoded molecular communication in nanonetworks,” *Nano Communication Networks*, vol. 1, no. 4, pp. 289–300, 2010.

[24] M. U. Mahfuz, D. Makrakis, and H. T. Mouftah, “A Comprehensive Analysis of Strength-Based Optimum Signal Detection in Concentration-Encoded Molecular Communication With Spike Transmission,” *IEEE Transactions on NanoBioscience*, vol. 14, no. 1, pp. 67-83, Jan. 2015.

[25] A. Singhal, R. K. Mallik, and B. Lall, “Molecular communication with Brownian motion and a positive drift: performance analysis of amplitude modulation schemes,” *IET Communications*, vol. 8, no. 14, pp. 2413-2422, Sept. 2014.

[26] M. S. Kuran, H. B. Yilmaz, T. Tugcu, and I. F. Akyildiz, “Modulation techniques for communication via diffusion in nanonetworks,” *2011 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2011.

[27] A. Einolghozati, M. Sardari, and F. Fekri, “Design and Analysis of Wireless Communication Systems Using Diffusion-Based Molecular Communication Among Bacteria,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.12, no.12, pp.6096–6105, Dec. 2013.

- [28] N. R. Kim and C. B. Chae, "Novel modulation techniques using isomers as messenger molecules for nano communication networks via diffusion," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC)*, vol. 31, no. 12, pp. 847–856, 2013.
- [29] M. H. Kabir, S. M. Riazul Islam, and K. S. Kwak, "D-MoSK Modulation in Molecular Communications," *IEEE Transactions on NanoBioscience*, vol. 14, no. 6, pp. 680-683, Sept. 2015.
- [30] A. W. Eckford, "Achievable information rates for molecular communication with distinct molecules," in *Proceeding Workshop on Computing and Communications from Biological Systems: Theory and Applications*, 2007, pp. 313–315.
- [31] T. Nakano and M. Moore, "In-sequence molecule delivery over an aqueous medium," *Nano Communication Networks*, vol. 1, no. 3, pp. 181–188, 2010.
- [32] H. Arjmandi, A. Gohari, M. Nasiri-Kenari, and Farshid Bateni, "Diffusion based nanonetworking: A new modulation technique and performance analysis," *IEEE Communications Letters*, vol. no. 4, pp. 645 - 648, 2013.
- [33] C. T. Chou, "Molecular circuits for decoding frequency coded signals in nano-communication networks," *Nano Communication Networks*, vol. 3, pp. 46–56, 2012.
- [34] N. Farsad, H. B. Yilmaz, C. B. Chae, and A. Goldsmith, "Energy model for vesicle-based active transport molecular communication," *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kuala Lumpur, 2016, pp. 1-6.
- [35] N. Farsad, A. W. Eckford, and S. Hiyama, "A Markov Chain Channel Model for Active Transport Molecular Communication," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 62, no. 9, pp. 2424-2436, May 2014.
- [36] N. Farsad, A. W. Eckford, and S. Hiyama, "A mathematical channel optimization formula for active transport molecular communication," *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Ottawa, ON, 2012, pp. 6137-6141.
- [37] N. Farsad, A. W. Eckford, S. Hiyama, and Y. Moritani, "A simple mathematical model for information rate of active transport molecular communication," *2011 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, Shanghai, 2011, pp. 473-478.

- [38] A. Davidovic, Y. Coudiere, T. Desplantez, and C. Poignard, "Microscopic modelling of the non-linear gap junction channels," *2015 Computing in Cardiology Conference (CinC)*, Nice, 2015, pp. 425-428.
- [39] Y. Yang and C. K. Yeo, "Molecular communication model through gap junction channel with selective permeabilities," *2012 18th IEEE International Conference on Networks (ICON)*, Singapore, 2012, pp. 256-261.
- [40] T. Nakano, T. Suda, T. Koujin, T. Haraguchi, and Y. Hiraoka, "Molecular communication through gap junction channels: System design, experiments and modeling," in *Proceeding. of the 2nd International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information, and Computing Systems*, Budapest, Hungary, 2007, pp. 139–146.
- [41] D. Kilinc and O. B. Akan, "An Information Theoretical Analysis of Nanoscale Molecular Gap Junction Communication Channel Between Cardiomyocytes," *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 12, no. 2, pp. 129-136, Mar. 2013.
- [42] A. O. Bicen, I. F. Akyildiz, S. Balasubramaniam, and Y. Koucheryavy, "Linear Channel Modeling and Error Analysis for Intra/Inter-Cellular Ca^{2+} Molecular Communication," *IEEE Transactions on NanoBioscience*, vol. 15, no. 5, pp. 488-498, Jul. 2016.
- [43] A. Einolghozati and F. Fekri, "Error detection in diffusion-based molecular communication," *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, London, 2015, pp. 1128-1133.
- [44] A. Einolghozati and F. Fekri, "Analysis of Error-Detection Schemes in Diffusion-Based Molecular Communication," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 3, pp. 615-624, Mar. 2016.
- [45] A. Singhal, R. K. Mallik, and B. Lall, "Performance Analysis of Amplitude Modulation Schemes for Diffusion-Based Molecular Communication," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 10, pp. 5681-5691, Oct. 2015.
- [46] D. Malak, H. Ramezani, M. Kocaoglu and O. B. Akan, "Diversity in diffusion-based molecular communication channel with drift," *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kuala Lumpur, 2016, pp. 1-6.

- [47] M. Pierobon and I. F. Akyildiz, "End-to-end Physical Model of Molecular Communications," *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, vol. 28, no. 4, pp. 602-611, May 2010.
- [48] S. Galmes and B. Atakan, "Performance Analysis of Diffusion-Based Molecular Communications With Memory," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 64, no. 9, pp. 3786-3793, Sept. 2016.
- [49] B. Li, M. Sun, S. Wang, W. Guo, and C. Zhao, "Low-Complexity Noncoherent Signal Detection for Nanoscale Molecular Communications," *IEEE Transactions on NanoBioscience*, vol. 15, no. 1, pp. 3-10, Jan. 2016.
- [50] J. Lee, M. Kim and D. H. Cho, "Asynchronous Detection Algorithm for Diffusion-Based Molecular Communication in Timing Modulation Channel," *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 12, pp. 2114-2117, Dec. 2015.
- [51] M. U. Mahfuz, D. Makrakis, and H. T. Mouftah, "A Comprehensive Study of Sampling-Based Optimum Signal Detection in Concentration-Encoded Molecular Communication," *IEEE Transactions on NanoBioscience*, vol. 13, no. 3, pp. 208-222, Sept. 2014.
- [52] I. Llatser, A. Cabellos-Aparicio, M. Pierobon, and E. Alarcon, "Detection Techniques for Diffusion-based Molecular Communication," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 12, pp. 726-734, Dec. 2013.
- [53] A. Singhal, R. K. Mallick, and B. Lall, "Effect of Molecular Noise in Diffusion-Based Molecular Communication," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 3, no. 5, pp. 489-492, Oct. 2014.
- [54] M. Pierobon and I. F. Akyildiz, "Noise Analysis in Ligand-Binding Reception for Molecular Communication in Nanonetworks," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 59, no. 9, pp. 4168-4182, Sept. 2011.
- [55] A. O. Bicen and I. F. Akyildiz, "End-to-End Propagation Noise and Memory Analysis for Molecular Communication over Microfluidic Channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 7, pp. 2432-2443, Jul. 2014.
- [56] N. Farsad, W. Guo, C. B. Chae, and A. Eckford, "Stable Distributions as Noise

Models for Molecular Communication,” *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, San Diego, CA, 2015, pp. 1-6.

[57] M. Pierobon and I. F. Akyildiz, “Diffusion-Based Noise Analysis for Molecular Communication in Nanonetworks,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 59, no. 6, pp. 2532-2547, Jun. 2011.

[58] M. Pierobon and I. F. Akyildiz, “Capacity of a Diffusion-Based Molecular Communication System With Channel Memory and Molecular Noise,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 59, no. 2, pp. 942-954, Feb. 2013.

[59] L. Shi and L. L. Yang, “Diffusion-based molecular communications: Inter-symbol interference cancellation and system performance,” *2016 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, Chengdu, 2016, pp. 1-6.

[60] W. A. Lin, Y. C. Lee, P. C. Yeh, and C. h. Lee, “Signal detection and ISI cancellation for quantity-based amplitude modulation in diffusion-based molecular communications,” *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Anaheim, CA, 2012, pp. 4362-4367.

[61] P. J. Shih, C. h. Lee, and P. C. Yeh, “Channel codes for mitigating intersymbol interference in diffusion-based molecular communications,” *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Anaheim, CA, 2012, pp. 4228-4232.

[62] M. Movahednasab, M. Soleimanifar, A. Gohari, M. Nasiri-Kenari, and U. Mitra, “Adaptive molecule transmission rate for diffusion based molecular communication,” *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, London, 2015, pp. 1066-1071.

[63] M. Movahednasab, M. Soleimanifar, A. Gohari, M. Nasiri-Kenari, and U. Mitra, “Adaptive Transmission Rate With a Fixed Threshold Decoder for Diffusion-Based Molecular Communication,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 64, no. 1, pp. 236-248, Jan. 2016.

[64] B. Tepekule, A. E. Pusane, H. B. Yilmaz, C. B. Chae, and T. Tugcu, “ISI Mitigation Techniques in Molecular Communication,” *IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multi-Scale Communications*, vol. 1, no. 2, pp. 202-216, Jun. 2015.

- [65] S. Ghavami, R. Adve, and F. Lahouti, "Bounds on the Capacity of ASK Molecular Communication Channels with ISI," *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, San Diego, CA, 2015, pp. 1-6.
- [66] M. Pierobon and I. F. Akyildiz, "Intersymbol and co-channel interference in diffusion-based molecular communication," *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Ottawa, ON, 2012, pp. 6126-6131.
- [67] M. S. Kuran, H. B. Yilmaz, T. Tugcu, and I. F. Akyildiz, "Interference effects on modulation techniques in diffusion based nanonetworks," *2012 Nano Communication Networks*, Vol. 3, pp. 65–73, 2012.
- [68] J. M. Jornet, "A joint energy harvesting and consumption model for self-powered nano-devices in nanonetworks," *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Ottawa, ON, 2012, pp. 6151-6156.
- [69] M. u. Kuran, H. B. Yilmaz, T. Tugcu, and B. Ozerman, "Energy model for communication via diffusion in nanonetworks," *2010 Nano Communication Networks*, Ottawa, 2010, pp. 86–95.
- [70] N. Farsad, H. B. Yilmaz, C. B. Chae, and A. Goldsmith, "Energy model for vesicle-based active transport molecular communication," *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kuala Lumpur, 2016, pp. 1-6.
- [71] S. Misra, N. Islam, J. Mahapatro, and J. Jose, P. C. Rodrigues, "Green Wireless Body Area Nanonetworks: Energy Management and the Game of Survival," *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, vol. 18, no. 2, pp. 467-475, Mar. 2014.
- [72] S. Mohrehkesh and M. C. Weigle, "Optimizing Energy Consumption in Terahertz Band Nanonetworks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 12, pp. 2432-2441, Dec. 2014.
- [73] K. Tutuncuoglu and A. Yener, "Optimal power policy for energy harvesting transmitters with inefficient energy storage," *46th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, 2012, pp. 1–6.
- [74] N. Michelusi, K. Stamatiou, and M. Zorzi, "Transmission policies for energy harvesting sensors with time-correlated energy supply," *IEEE Transation on*

Communication, vol. 61, no. 7, pp. 2988–3001, July 2013.

[75] D. Gunduz, K. Stamatou, N. Michelusi, and M. Zorzi, “Designing intelligent energy harvesting communication systems,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 1, pp. 210–216, January 2014.

[76] A. Seyedi and B. Sikdar, “Energy efficient transmission strategies for body sensor networks with energy harvesting,” *IEEE Transactions Communication*, vol. 58, no. 7, pp. 2116–2126, 2010.

[77] C. Bustamante, D. Keller, and G. Oster, “The physics of molecular motors,” *Accounts of Chemical Research*, vol. 34, no. 6, pp. 412–420, 2001.

[78] G. Alfano and D. Miorandi, “On information transmission among nanomachines”, in *Proceeding of First International Conference on Nano-Networks and Workshops*, 2006. pp. 1–5.

[79] D. J. Spencer, S. K. Hampton, P. Park, J. P. Zurkus, and P. J. Thomas, “The diffusionlimited biochemical signal-relay channel,” *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 16, 2004.

[80] B. Atakan and O. B. Akan, “An information theoretical approach for molecular communication,” in *Proceeding of Second International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (Bionetics)*, 2007, pp. 33–40.

[81] P. Nelson and S. Doniach, “Biological physics: Energy, information life”, *Physics Today*, vol. 57, no. 11, pp. 63–64, 2004.

[82] A. Noel, K. C. Cheung, and R. Schober, “Diffusive molecular communication with disruptive flows,” in *Proceeding IEEE ICC*, pp. 1–7, Jun. 2014

[83] A. Noel, K. C. Cheung, and R. Schober, “Using dimensional analysis to assess scalability and accuracy in molecular communication,” in *Proceeding IEEE ICC Monacom*, pp. 818–823, Jun. 2013

[84] A. Enomoto. M. Moore, S. Nakano, and T. Suda, “Measuring distance with

molecular communication feedback protocols,” *Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (Bionetics)*, 2010.

[85] M. Moore, T. Nakano, A. Enomoto, and T. Suda, “Measuring distance from single spike feedback signals in molecular communication,” *IEEE Transactions Signal Process*, vol. 60, no. 7, pp. 3576–3587, Jul. 2012.

[86] J. T. Huang, H. Y. Lai, Y. C. Lee, C. H. Lee, and P. C. Yeh, “Distance estimation in concentration-based molecular communications,” in *Proceeding IEEE GLOBECOM*, pp. 2587–2597. Dec. 2013

[87] M. Moore and T. Nakano, “Comparing transmission, propagation, and receiving options for nanomachines to measure distance by molecular communication,” in *Proceeding IEEE ICC*, pp. 6132–6136, Jun. 2012

[88] P. Stoica and T. L. Marzetta, “Parameter estimation problems with singular information matrices,” *IEEE Transaction. Signal Procesing*, vol. 49, no. 1, pp. 87–90, Jan. 2001.

[89] W. Guo et al. , “SMIET: Simultaneous Molecular Information and Energy Transfer,” Available at arXiv:1605.09474.

[90] M. S. Kuran, H. B. Yilmaz, and T. Tugcu, “A tunnel-based approach for signal shaping in molecular communication”, in *Proeceding of IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)* , 2013, pp. 776–781.

[91] H. B. Yilmaz, A. C. Heren, T. Tugcu, and C. B. Chae , “Three-dimensional channel characteristics for molecular communications with an absorbing receiver”, *IEEE communications letters*, pp. 929-932, 2014.

Abstract

With the development of science and technology in recent years, a new branch of communication name molecular communication is proposed in electrical conferences. Molecular communication is not a simple development traditional network, but this type of communication is a sample completely new communication, which many communication processes are designed to imitate biological systems found in nature. Molecular communication networks are collection of nano-machines connected that through publish and share information new applications that by current technology is not possible proposed. Among the several methods of communication between the nano-machines that have been proposed, using a molecules reason of very high proportion with dimensions and the environment is the best possible option. Communication molecule is a new interdisciplinary field of information and communication technology, biotechnology and nanotechnology, that data are sent and received through the molecules. Due to the many difference of traditional communication and molecular communication, many aspects of communication such as routing, coding, send and receive data, issues related to noise and security have not been studied properly in this type of communication and there is still a lot of work remains.

The molecule is used to communicate in molecular communication. These systems need energy to produce and distribute molecules in the environment. Since nano systems have small dimation and energy storage, it's expected that transmitters produce and store energy. Transmitters use part of produced energy for usual activities and the rest is stored. Energy consumption should not be more than produced energy. Therefor energy consumption is very important. In this research we investigate the capacity in the channels with variable distance between source and reciever. Finally we show that achiving to maximum capacity is available by allocating appropriate power and eliminating the memory effect. Also the results show it's better to allocate more power in entervals with less distance and favorable condition to have succesful communication.

Keywords: Molecular communication, nano machine, energy, capacity, communication via diffusion



Faculty of Electrical Engineering and Robotic
M.Sc. Thesis in Communication Systems Engineering

Energy Analysis of Molecular communication

By: Atefe Gharaeian Barde

Supervisor

Dr Mohammad Reza Javan

December 2016