بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

رشته مهندسی برق گرایش مخابرت

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی عدم اطمینان در پارامترهای سیستم مخابرات مولکولی و تأثیر آن بر کارایی سیستم

نگارنده: هادی عبداللهی

استاد راهنما:

دکتر محمد رضا جوان

شهریور ۱۳۹۵

تقدیم به

پدرم که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه نمایم

مادرم، دریای بیکران فداکاری و عشق، که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر

و همسرم مهناز جان، که وجودش برایم شادی بخش و مایه آرامش است

تقدیر و تشکر

از جناب آقای دکتر محمدرضا جوان که در طی این سال ها صبورانه و دلسوزانه پیگیر و مشوق من بودند و راهنمایی ها و حمایت های ایشان، همواره کارگشای این جانب بوده، کمال سپاس گذاری و تشکر را دارم. همچنین از بقیه استادان ارجمند و بزرگوار دانشگاه شاهرود، گروه مخابرات مخصوصا دکتر معروضی کمال تشکر را دارم.

تعهد نامه

اینجانب هادی عبداللهی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق – مخابرات دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه "بررسی عدم اطمینان در پارامترهای سیستم مخابرات مولکولی و تأثیر آن بر کارایی سیستم" تحت راهنمائی دکتر محمدرضا جوان متعهد می شوم .

- 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 می باشد 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 می گردد.
- 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 ۹۵/۶/۲۳

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 می باشد . 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 فزاینده ی علم و تکنولوژی شاخه ی بسیار جدیدی از مخابرات به نام مخابرات مولکولی مطرح‌شده است. مخابرات مولکولی توسعه ساده‌ای از شبکه‌های سنتی رایج نیست بلکه این نوع مخابرات یک نمونه ارتباطی کاملاً جدید است که در آن‌ها بسیاری از فرایندهای مخابراتی با تقلید سیستم‌های زیستی موجود در طبیعت طراحی‌شده‌اند. 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 مسیریابی، نحوه کدگذاری، ارسال و دریافت اطلاعات، مباحث مربوط به نویز و امنیت در این نوع مخابرات به‌درستی موردبررسی قرار نگرفته‌اند و هنوز جای کار زیادی مانده است.

در یک سیستم مخابرات مولکولی، فرستنده اطلاعات را شبیه مدولاسیون دامنه در مخابرات کلاسیک در غلظت مولکول‌ها کدگذاری می‌کند، به این صورت که به ازای ارسال یک، فرستنده غلظتی از مولکول‌ها شامل M مولکول را در محیط پخش می‌کند و به ازای ارسال صفر هیچی نمی‌فرستد. مولکول‌های پخش‌شده در محیط تحت تأثیر عواملی همچون نویز، تداخل و شار قرار می‌گیرند تا این‌که به گیرنده برسند، و گیرنده بر اساس مقدار آستانه‌ای که دارد تصمیم می‌گیرد که فرستنده صفر یا یک ارسال کرده است. به این صورت که اگر تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده از مقدار آستانه بیشتر باشد گیرنده تصمیم می‌گیرد که فرستنده یک ارسال کرده است، و اگر تعداد مولکول‌ها کمتر از مقدار آستانه باشد صفر ارسال‌شده است.

در این پایان‌نامه، علاوه بر معرفی کامل یک سیستم مخابرات مولکولی که متشکل از فرستنده، کانال و گیرنده می‌باشد، سعی شده است که پارامترهایی از مخابرات مولکولی مانند، نویز، تداخل، تغییر فاصله گیرنده و فرستنده، شار و تعداد مولکول‌های ارسالی توسط فرستنده که بر کارایی سیستم تأثیر می‌گذارند بررسی کنیم. برای این منظور ما ابتدا رابطه‌ای برای احتمال خطا بر اساس این پارامترها بدست آورده ایم و تأثیر هرکدام از این پارامترها بر روی احتمال خطا بررسی کرده‌ایم. در پایان، با فرض اینکه فاصله ی بین فرستنده و گیرنده ثابت نیست و می تواند تغییر کند،روشی را برای تعیین بهترین مقدار آستانه در گیرنده‌یا تعداد مولکول‌های ارسالی توسط فرستنده معرفی کرده‌ایم که به ازای آن مقدار احتمال خطا همچنین کمینه باقی بماند.

کلمات کلیدی :

مخابرات مولکولی، نانوماشین، مدولاسیون مبتنی بر غلظت مولکول‌ها، احتمال خطای بیت

فهرست مطالب

۱ معرفی مخابرات مولکولی..... ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ معرفی نانو ماشین‌ها ۵

۱-۲-۱ ویژگی‌های مورد انتظار از نانو ماشین‌ها ۶

۱-۲-۲ معماری نانو ماشین‌ها ۷

۱-۳ اجزای مخابرات مولکولی ۹

۱-۳-۱ فرستنده و گیرنده ۱۰

۱-۳-۲ پیام ۱۰

۱-۳-۳ حامل ۱۱

۱-۳-۴ محیط انتقال ۱۱

۱-۴ مقایسه مخابرات مولکولی با مخابرات کلاسیک..... ۱۱

۱-۴-۱ ساختار پیام..... ۱۲

۱-۴-۲ سرعت انتشار..... ۱۲

۱-۴-۳ نویز..... ۱۳

۱-۴-۴ نوع اطلاعات..... ۱۳

۱-۴-۵ مصرف انرژی ۱۳

۱-۵ انواع ارتباطات در مخابرات مولکولی ۱۳

۱-۵-۱ مخابرات نزدیک مبتنی بر سیگنالینگ مولکولی..... ۱۴

۱-۵-۱-۱ ویژگی‌های مخابرات نزدیک برد ۱۵

۱-۶ کاربردهای مخابرات مولکولی ۱۷

۱-۶-۱ پزشکی ۱۷

۱-۶-۲ نظامی ۱۸

۱-۶-۳ کاربردهای صنعتی و لوازم مصرفی ۱۸
۱-۶-۴ کاربردهای زیست‌محیطی ۱۹
۱-۷ چالش‌های تحقیقاتی در مخابرات مولکولی ۱۹
۱-۷-۱ توسعه نانو ماشین‌ها، ابزار آزمایش و شبیه‌سازی ۲۰
۱-۷-۲ تعریف یک مدل مفهومی جدید در علم مخابرات..... ۲۱
۱-۷-۳ معماری و پروتوکل‌های انتقال دانش ۲۲
۱-۸ اهداف پایان نامه..... ۲۴
۲ مروری بر کارهای پیشین ۲۷
۲-۱ روش‌های مختلف در مخابرات مولکولی ۲۸
۲-۲ مروری بر کارهای مرتبط با پایان‌نامه..... ۲۹
۳ مدل کردن فرستنده، کانال و گیرنده در یک سیستم مخابرات مولکولی..... ۳۳
۳-۱ اجزای اصلی در یک سیستم مخابرات مولکولی ۳۴
۳-۲ فرایند انتشار ۳۵
۳-۲-۱ انواع مدولاسیون در مخابرات مولکولی..... ۳۶
۳-۲-۱-۱ مدولاسیون مبتنی بر غلظت مولکول‌ها..... ۳۶
۳-۲-۱-۲ مدولاسیون مبتنی بر مهندسی مولکول‌ها..... ۳۶
۳-۳ فرایند پخش مولکول‌ها در کانال ۳۹
۳-۳-۱ انتقال غیرفعال ۴۰
۳-۳-۲انتقال فعال ۴۱
۳-۳-۳ معادله های حاکم بر پخش مولکول‌ها ۴۱
۳-۴ فرایند پذیرش مولکول‌ها در گیرنده ۴۵
۳-۴-۱ روش‌های آشکارسازی در گیرنده..... ۴۶
۳-۴-۱-۱ آشکارسازی بر اساس مقدار آستانه..... ۴۶

۳-۴-۱-۲ آشکارسازی بر اساس انرژی ۴۶
۳-۴-۲ انواع گیرنده در مخابرات مولکولی ۴۷
۳-۴-۲-۱ گیرنده غیرفعال ۴۷
۳-۴-۲-۲ گیرنده فعال ۴۷
۴ کارهای انجام‌شده در پایان‌نامه و نتایج شبیه‌سازی ۵۱
۴-۱ سیستم مدل و فرض‌های مربوط به مساله ۵۲
۴-۲ به دست آوردن احتمال خطا..... ۵۵
۴-۳ به دست آوردن احتمال خطا با روشی ساده‌تر..... ۵۹
۴-۴ پارامترهای موردنیاز در شبیه‌سازی ۶۴
۴-۵ بررسی اثر تداخل بر کارایی سیستم ۶۵
۴-۶ بررسی تأثیر فاصله زمانی بر کارایی سیستم..... ۶۹
۴-۷ بررسی تأثیر نوع مدولاسیون برکارایی سیستم ۷۰
۴-۸ بررسی تأثیر شار بر روی کارایی سیستم ۷۲
۴-۹ بررسی تأثیر نویز بر کارایی سیستم..... ۷۴
۴-۱۰ بررسی تأثیر تعداد مولکول‌های ارسالی بر روی کارایی سیستم ۷۷
۴-۱۱ بررسی تأثیر فاصله بر کارایی سیستم..... ۷۸
۴-۱۱-۱ راه‌حلی برای کاهش تأثیر تغییر فاصله..... ۸۰
۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۹۱
۵-۱ نتیجه‌گیری..... ۹۲
۵-۲ پیشنهادها برای کارهای آتی..... ۹۳

فهرست شکل ها

شکل ۱-۱- نگاشت بین اجزای یک معماری کلی نانو ماشین و سلول زنده[۱۰]..... ۸
شکل ۱-۲- مقایسه مخابرات مولکولی با مخابرات کلاسیک[۱۰]..... ۹
شکل ۱-۳- انواع ارتباطات در مخابرات مولکولی ۱۴
شکل ۱-۴- انتشار سیگنال در سیستم مبتنی بر سیگنالینگ کلسیم. الف: ارسال سیگنال از طریق اتصالات بین سلولی منفذدار. ب: ازطریق پدیده انتشار مولکولی [۲]..... ۱۶
شکل ۲-۱- روش های مختلف در مخابرات مولکولی برای انتشار مولکول‌ها در محیط ۲۸
شکل ۳-۱- اجزای اصلی یک سیستم مخابرات مولکولی شامل فرستنده، کانال و گیرنده..... ۳۴
شکل ۳-۲- فرایند انتشار توسط فرستنده و پخش مولکول‌ها در محیط ۳۵
شکل ۳-۳- تا ثیر تداخل در مدولاسیون مبتنی بر غلظت مولکول‌ها،اگر بیت های ارسالی به ترتیب ۳۷
شکل ۳-۴- تا ثیر تداخل در مدولاسیون مبتنی بر مهندسی مولکول‌ها،اگر بیت های ارسالی به ترتیب $\{1,1,0,1,0,1,1\}$، [۵۲] ۳۸
شکل ۳-۵- فرایند پخش مولکول‌ها در کانال که به‌طور آزادانه و در هر جهتی به‌سوی گیرنده پخش می‌شوند ۴۰
شکل ۳-۶- انتقال فعال : جابه جایی مولکول‌ها با استفاده از موتورهای مولکولی[۴۶] ۴۱
شکل ۳-۷- غلظت مولکول‌های پخش‌شده در محیط برحسب زمان ۴۳
شکل ۳-۸- غلظت مولکول‌ها بر حسب زمان به ازای فاصله های مختلف..... ۴۴
شکل ۳-۹- فرایند پذیرش مولکول‌ها ۴۵
شکل ۳-۱۰- تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده بر حسب زمان برای گیرنده فعال و گیرنده غیرفعال..... ۴۹
شکل ۴-۱- فرستنده، کانال و گیرنده در یک سیستم مخابرات مولکولی ۵۳
شکل ۴-۲- نشان دادن تأثیر T_B بر روی تداخل ناشی از سمبل قبل ۵۵
شکل ۴-۳- مقایسه احتمال خطای گوسی و پواسن برحسب مقدار استانه ی گیرنده ۵۹
شکل ۴-۴- کانال باینری است که سمبل قبلی می‌تواند دو حالت صفر و یک را داشته باشد.. ۶۲
شکل ۴-۵- مقایسه ی دو روشی که برای احتمال خطا به دست اوردیم بر حسب مقدار استانه ۶۴

شکل ۴-۶- احتمال خطا برحسب مقدار آستانه گیرنده برای دو حالت، وقتی‌که تداخل اصلاً نداریم و همچنین تداخل ناشی از فقط سمبل قبلی ۶۷
شکل ۴-۷- احتمال خطا برحسب مقدار آستانه گیرنده و تأثیر همه‌ی سمبل‌های قبلی در تداخل ۶۷
شکل ۴-۸- احتمال خطا برحسب تعداد مولکول‌هایی که فرستنده می‌فرستد برای ۴ حالت مختلف ۶۸
شکل ۴-۹- احتمال خطا برحسب مقدار آستانه گیرنده برای فاصله زمانی‌های مختلف ۶۹
شکل ۴-۱۰- احتمال خطا بر حسب مقدار استانه برای دوع مدولاسیون، مدولاسیون مبتنی بر غلظت (CSK) و مدولاسیون مبتنی بر مهندسی مولکول‌ها (MoSK) ۷۲
شکل ۴-۱۱- احتمال خطا برحسب سرعت شار (m/s) ۷۴
شکل ۴-۱۲- نشان دادن نویز ناشی از حرکت تصادفی مولکول‌ها ۷۵
شکل ۴-۱۳- بررسی تأثیر نویز بر روی احتمال خطا ۷۶
شکل ۴-۱۴- بررسی تأثیر نویز، تداخل و شار باهم بر روی احتمال خطا ۷۷
شکل ۴-۱۵- احتمال خطا برحسب تعداد مولکول‌های ارسالی ۷۸
شکل ۴-۱۶- غلظت مولکول‌ها برحسب فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده برای زمان های مختلف... ..... ۷۹
شکل ۴-۱۷- جابه‌جایی فرستنده و گیرنده در کره‌هایی به شعاع R_1 و R_2..... ۸۱
شکل ۴-۱۸- میانگین احتمال خطا برحسب مقدار آستانه باوجود، نویز، تداخل و شار ۸۵
شکل ۴-۱۹- میانگین احتمال خطا برحسب تعداد مولکول‌ها باوجود، نویز، تداخل و شار ۸۶
شکل ۴-۲۰- میانگین احتمال خطا بر حسب مقدار استانه برای شعاع های مختلف کره های R1 و R2 ..... ۸۷
شکل ۴-۲۱- میانگین احتمال خطا بر حسب مقدار استانه برای تعداد مولکول‌های مختلفی که فرستنده می‌فرستد..... ۸۹
شکل ۴-۲۲- میانگین احتمال خطا بر حسب تعدا مولکول‌های ارسالی به ازای استانه های مختلف ۸۹

فهرست جدول ها

جدول ۴-۱- پارامترهای موردنیاز برای شبیه‌سازی ۶۵

فصل اول

معرفی مخابرت مولکولی

۱-۱ مقدمه

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 قابلت اطمینان بیشتر، به سیستم‌های مخابراتی قرن بیستم منجر شد که هنوز هم تحقیقات برای بهبود آن‌ها در قالب ترکیب روش‌های قبلی‌تر مانند CDMA[۱]، OFDM[۲] و MIMO[۳] ادامه دارد. در سال‌های اخیر، با رشد فزاینده علم و تکنولوژی و نزدیک شدن آن به قلمرو آرزوهای بشر، شاخه‌های متنوع بسیار جدیدتری به مسائل شبکه‌های بی‌سیم اضافه‌شده است. مسائلی که برای چالش‌های عمده در توسعه شبکه‌های بی‌سیم و خصوصاً حوزه شبکه‌های حسگر[۴] راه‌حل‌هایی 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 نانو فناوری قدم می‌گذاریم. نانو فناوری 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...) درحرکت از مقیاس‌های بزرگ‌تر به‌سوی نانو تغییر می‌کنند[۱].

به شاخه‌ای از علم مخابرات که به بررسی و حل چالش‌های شبکه‌های ریزمقیاس، با تجهیزاتی در حدود میکرو تا نانومتر می‌پردازد، شبکه‌های نانویی می‌گوییم. شبکه‌های نانویی توسعه ساده‌ای از شبکه‌های مخابراتی کلاسیک نیستند. آن‌ها یک نمونه ارتباطی کاملاً جدید هستند که در آن‌ها بسیاری از فرایندهای مخابراتی با تقلید از سیستم‌های زیستی موجود در طبیعت طراح شده‌اند. این شبکه‌ها مجموعه‌ای از نانو ماشین‌های[۵] متصل‌به‌هم هستند که از طریق هماهنگ کردن، انتشار و به اشتراک گذاشتن اطلاعات، قابلیت‌های ابزارهای الکترومکانیکی بسیار کوچکی را توسعه می‌دهند.

نانو ماشین‌ها، به‌عنوان اساسی‌ترین واحد عملیاتی در فناوری نانو هستند. اجزای کوچک متشکل از مجموعه‌ای از مولکول‌ها هستند، که می‌توانند عملیاتی مانند انجام محاسبات، ذخیره داده‌ها، حس

---

[1] Code Division Multiple Access
[2] Orthogonal Frequency Division Multiplexing
[3] Multiple Input/Multiple Output
[4] Sensor network
[5] Nanomachine

کردن محیط و حرکت را در ابعاد میکروسکوپی انجام دهند.

نانو ماشین‌ها می‌توانند برای انجام کارهای گروهی به‌صورت توزیع‌شده به هم متصل شوند. شبکه‌های نانویی حاصل، قابلیت‌ها و کاربردهای نانو ماشین‌ها را به روش‌های زیر توسعه خواهد داد:

- نانو ماشین‌هایی مانند حسگرهای شیمیایی، نانو دریچه‌ها، نانو سویچ‌ها یا بالابرهای مولکولی، به‌تنهایی نمی‌توانند کارهای پیچیده انجام دهند. تبادل اطلاعات و فرمان‌ها میان نانو ماشین‌های شبکه شده به آن‌ها اجازه می‌دهد که به‌صورت مشارکتی و هماهنگ کارهای پیچیده‌تری مانند انتقال دارو در داخل بدن انسان یا درمان بیماری‌ها را انجام دهند.
- فضای کاری یک نانو ماشین واحد بسیار محدود است. شبکه‌های نانویی امکان گسترش کاربردهای نانو ماشین‌های به هم مرتبط را فراهم می‌کنند. بنابراین قادر خواهیم بود سناریوهای عملیاتی بزرگ‌تری مانند دیده‌بانی و کنترل عامل‌های شیمیایی را در محیط پیرامون انجام دهیم.
- در بعضی از سناریوهای کاربردی، باید نانو ماشین‌ها در یک محیط بزرگ‌تر (در بازه متر یا کیلومتر) پخش شوند. در این حالت‌ها ، کنترل یک نانو ماشین خاص به دلیل اندازه بسیار کوچکش، شدیداً دشوار است. شبکه‌های نانویی، از طریق مکانیسم‌های همه پخشی[1] و ارتباطات چندگامی[2] تعامل با نانو ماشین‌های راه دور را فراهم می‌کنند.

می‌توان توسط ابزارهای ارتباطی نانو مکانیکی، صوتی، شیمیایی و مولکولی میان نانو ماشین‌ها ارتباط برقرار کرد. ارتباط نانو مکانیکی، به‌صورت انتقال اطلاعات از طریق اتصال مکانیکی فرستنده و گیرنده میسر می‌شود و باید میان فرستنده و گیرنده اتصال مستقیم وجود داشته باشد مانند نانولوله‌ها که مستقیم به فرستنده و گیرنده می‌توانند وصل شوند. در ارتباط صوتی، پیام انتقالی بر روی امواج صوتی (به‌صورت تغییرات فشار) کدگذاری می‌گردد[۳]. در مخابرات مولکولی از مولکول‌ها به‌عنوان پیام میان فرستنده و گیرنده استفاده می‌شود. ما در این پایان‌نامه از مولکول‌ها برای ارتباط نانو ماشین‌ها استفاده کردیم.

شبکه‌های نانویی می‌توانند به‌عنوان ستون فقرات برای توسعه سیستم‌های پیچیده‌تر مانند نانو روبات‌ها و ابزارهای محاسباتی مجتمع شده با نانو پردازشگرها، حافظه‌ها و زمان‌سنج‌های نانو استفاده

[1] Broadcasting
[2] Multihop

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. درمجموع، برای ایجاد ارتباط داخلی نانو ماشین‌ها، باید واسط‌های جدیدی طراحی شوند. برای ارتباط از طریق هزاران و حتی میلیون‌ها نانو ماشین توزیع‌شده، به فناوری‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری جدید و مقرون‌به‌صرفه 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 به‌جای 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 نانوی می‌شود.

از میان روش‌های متعددی که تاکنون برای ارتباط میان نانو ماشین‌ها ارایه شده است، مخابرات مولکولی به دلیل تناسب بسیار زیاد با ابعاد و محیط مسئله، بهترین گزینه ممکن به شمار می‌رود[۲]. 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 فاصله میان فرستنده و گیرنده، باید از روش‌های ارتباطی متفاوتی استفاده کرد که به‌طور عمده به سه دسته‌ی نزدیک برد[۱]، متوسط برد[۲] و دوربرد[۳] تقسیم می‌شود.

برای حالت نزدیک برد، می‌توان از دو روش موتورهای مولکولی و سیگنالینگ یونی استفاده کرد. در سیگنالینگ یونی ، اطلاعات به‌صورت نرخ غلظت مولکول‌های منتشرشده در محیط کدگذاری می‌شود و درروش مبتنی بر موتورهای مولکولی، ترکیب‌های پروتئینی مولکول‌های اطلاعات را از طریق ریل‌ها مولکولی منتقل می‌کنند. تأکید می‌کنیم که ما در این پایان‌نامه از روش ارتباطی نزدیک برد مبتنی بر سیگنالینگ یونی استفاده کرده‌ایم که در فصل سوم بیشتر توضیح خواهیم داد.

برای مخابرات مولکولی متوسط برد نیز دو روش وجود دارد. استفاده از باکتری تاژک‌دار و موتورهای کاتالیستی که در هر دو روش اطلاعات به‌صورت رشته‌های DNA[۴] کدگذاری می‌شود و از

[1] Short-range (nm to μm)
[2] Medium-range (μm to mm)
[3] Long-range (mm to m)
[4] Deoxyribonucleic Acid

طریق نانو موتور یا باکتری، از فرستنده به گیرنده می‌رسد[۲]. بـرای مخـابرات مولکـولی دوربـرد نیـز روش‌های متعددی وجود دارد، ازجمله برای مخابرات مولکولی بی‌سیم می‌توان از فرمون ها، هاگ‌هـا و گرده‌افشانی استفاده کرد و برای حالت سیمی، روش‌های ارتباطی مبتنی بر نورون و مـدارهای جریـان مویرگی را به کاربرد[۱]. معماری قابـل تجسـم بـرای ایـن شـبکه، از خوشـه‌هـایی از نـانو ماشـین‌هـا تشکیل‌شده که با استفاده از مکانیسم‌های مخابرات نزدیک برد، در داخل خوشه ارتباط برقرار می‌کنند و برای ارتباط بین خوشه‌ها، از روش‌های متوسط و دوربرد استفاده می‌کنند.

۱-۲ معرفی نانو ماشین‌ها

یک نانو ماشین، به‌صورت یک ابزار مکانیکی تعریف مـی‌شـود کـه از اجزایـی در مقیـاس نـانومتر تشکیل‌شده است. همچنین، عبارت ماشین مولکولی، یعنی، ابزار مکانیکی که با دارا بودن یک سـاختار مولکولی، با استفاده از نانو ماشین‌ها و ابزارهای طبیعی موجود در سیستم‌های زیستی، یک عمل مفید را انجام می‌دهد[۴]. در این پژوهش، مقصود کلی ما از عبارت نانو ماشین، یک ابزار متشکل از اجـزای نانومتری است که می‌تواند اعمال ویژه‌ای از قبیل تبادل اطلاعات، انجام محاسبات، ذخیره داده، حـس کردن محیط و واکنش دادن را در مقیاس نانو، انجام دهد. کار انجام‌شده توسط هر نـانو ماشـین تنهـا، عموماً بسیار ساده است و به دلیل اندازه کوچک و پیچیدگی اندکش، بیشتر مبتنی بر واکنش‌هـایی بـا محیط اطرافش است و به‌سرعت تحت تأثیر نویزهای ناشی در محیط قرار می‌گیرد.

سیستم‌های زیست مولکولی به‌عنوان نمونه‌هایی از نانو فناوری مولکولی، به‌خودی‌خود نـوعی نـانو ماشین هستند و بسیاری از ساختارهای زیستی موجود در اندام‌های[1] زنده را مـی‌تـوان بـه‌عنـوان نـانو ماشین در نظر گرفت .نانو ماشین‌های زیستی موجود در سلول زنده عبارت‌اند از: نانو بیوحسگرها، نـانو موتورها، اجزای زیستی ذخیره‌سازی اطلاعات، ابزار و واحدهای کنترلی [۵].

یک سلول زنده را می‌توان به‌عنوان مجموعه‌ای خود تکثیر[2] از نانو ماشین‌ها در نظـر گرفـت، کـه دارای ویژگی‌های مورد انتظار از نانو ماشین‌ها می‌باشد [۴]. برای اعمـال پیچیـده‌تـری ماننـد تقسـیم سلولی، تعداد بیشتری نانو ماشین زیستی به هم متصل می‌شوند و شـبکه نـانویی حاصـل، مبتنـی بـر سیگنالینگ مولکولی است. این نوع روش ارتباطی برای ارتباط بین سلولی نیز استفاده مـی‌شـود و بـه سلول‌های متعدد اجازه می‌دهد برای رسیدن به یک هدف مشترک مانند کنترل فعالیت‌های هورمون‌ها یا پاسخ‌های ایمنی در انسان، باهم همکاری کنند.

[1] Organism
[2] Self-replicating

درروش زیست-ترکیبی، از این نانو ماشین‌های طبیعی به‌عنوان الگو برای توسعه نانو ماشین‌های جدید، یا به‌عنوان اجزای تشکیل‌دهنده سیستم‌های پیچیده‌تری مانند نانو روبات‌ها استفاده می‌کند. به‌عنوان مثالی از کاربرد این روش در توسعه نانو ماشین‌ها، می‌توان به استفاده از نانو موتورها برای تأمین نیرومحرکه ابزارهای بسیار ریز یا استفاده از باکتری برای مکانیسم حرکت کنترل‌شده اشیا با ابعاد میکرو، اشاره کرد [۷].

۱-۲-۱ ویژگی‌های مورد انتظار از نانو ماشین‌ها

محدودیت اصلی در توسعه نانو ماشین‌ها، فقدان ابزاری است که بتوانند ساختارهای مولکولی را به‌طور دقیق حمل کنند و به هم بچسبانند. انتظار می‌رود که نانو ماشین‌های پیچیده حاصل از فرآیند تولید مولکولی، علاوه بر قابلیت‌های میکرو ماشین‌های موجود، با بهره‌گیری از ویژگی‌های مولکولی و انعطاف‌پذیری مواد در ابعاد نانو، توانایی‌های جدید دیگری را نیز دارا باشند. مهم‌ترین ویژگی‌های مورد انتظار از نانو ماشین‌ها به شرح زیر است:

- نانو ماشین‌ها باید بی‌نیاز باشند. یعنی هر نانو ماشین برای انجام دادن کار مورد انتظار شامل مجموعه‌ای از کدها و دستورالعمل‌های مشخص است. این ترتیب عملیاتی می‌تواند در ساختار مولکولی نانو ماشین گنجانده شود یا از ساختار مولکولی دیگری خوانده شود.
- خودتکثیری به‌عنوان فرآیندی تعریف می‌شود که در آن یک وسیله، با استفاده از اجزای خارجی، یک کپی از خود را می‌سازد. این ویژگی باعث می‌شود با تولید تعداد زیادی نانو ماشین، کارهای ابعاد ماکروسکوپیک را با قیمت ارزان‌تر و سرعت بیشتر انجام دهیم [۴]. لازمه خودتکثیری، این است که نانو ماشین شامل دستورالعمل‌هایی برای کپی کردن خودش باشد.
- نانو ماشین‌ها برای انجام کارهای خاص طراحی می‌شوند و برای انجام عملیات خود باید در مکان و زمان مشخص قرار گیرند. یعنی برای انجام صحیح وظیفه خود باید در زمان مشخص در موقعیت مکانی موردنظر باشند. به این دلیل، توانایی حرکت، یکی از مسائل مهم در طراحی نانو ماشین‌ها است. هرچند نانو ماشین‌های تنها قادر به حرکت به‌سوی هدف‌های از پیش تعیین‌شده نیستند، اما سیستم‌های پیچیده‌تر می‌توانند با استفاده ازنانوحسگرها و نانو پیشران‌ها[1] هدف را شناسایی و دنبال کنند. قابلیت حرکت، باعث می‌شود بتوانیم نانو ماشین‌ها را در مسائلی که به عملگرهای متحرک نیاز است، مانند

[1] Nano-propeller

درمان بیماری‌ها، به کار ببریم [۹].

- قابلیت برقراری ارتباط میان نانو ماشین‌ها باعث می‌شود بتوانند، به‌طور مشارکتی، کارهای پیچیده‌تری را انجام دهند. در این راستا، نویدبخش‌ترین روش ارتباطی، مخابرات مولکولی است و انتظار می‌رود، پیشرفت‌های آتی در ساخت نانو حسگرها و نانو عملگرها، به مجتمع سازی فرستنده-گیرنده های مولکولی در داخل نانو ماشین‌ها منجر شود.

۱-۲-۲ معماری نانو ماشین‌ها

بنا بر هدف ساخت و کاربرد نانو ماشین‌ها، می‌توان اجزای متفاوتی را در ساختار آن‌ها در نظر گرفت. اما به‌طورکلی، کامل‌ترین معماری برای یک نانو ماشین، می‌تواند شامل اجزای ساختاری زیر باشد:

۱) واحد کنترلی: هدف این واحد اجرای دستورالعمل‌ها برای انجام وظیفه موردنظر است. برای رسیدن به این هدف، این واحد باید قادر به کنترل تمام واحدهای دیگر نانو ماشین باشد. ضمناً این واحد می‌تواند شامل یک واحد حافظه برای ذخیره اطلاعات نانو ماشین نیز باشد.

۲) واحد مخابراتی: این واحد شامل فرستنده-گیرنده ای است که اطلاعات مقیاس نانو(مثلاً مولکول‌ها) را ارسال و دریافت می‌کند.

۳) واحد تولیدمثل و بازآفرینی: وظیفه این واحد، تولید هر جزء از نانو ماشین با استفاده از اجزای بیرونی و سپس هم‌گذاری این اجزا برای همانندسازی نانو ماشین است. این واحد توسط تمام دستورالعمل‌هایی مدیریت می‌شود که امکان عملیات تولیدمثل را فراهم می‌کنند. (مانند هسته سلول حاوی کدهای ژنتیکی).

۴) واحد تأمین نیرو[1] : این واحد برای تأمین توان موردنیاز کلیه واحدهای نانو ماشین در نظر گرفته‌شده است. این واحد می‌تواند انرژی را از منابع بیرونی مانند نور و دمای محیط استخراج کرده و برای توزیع و استفاده‌های بعدی ذخیره کند.

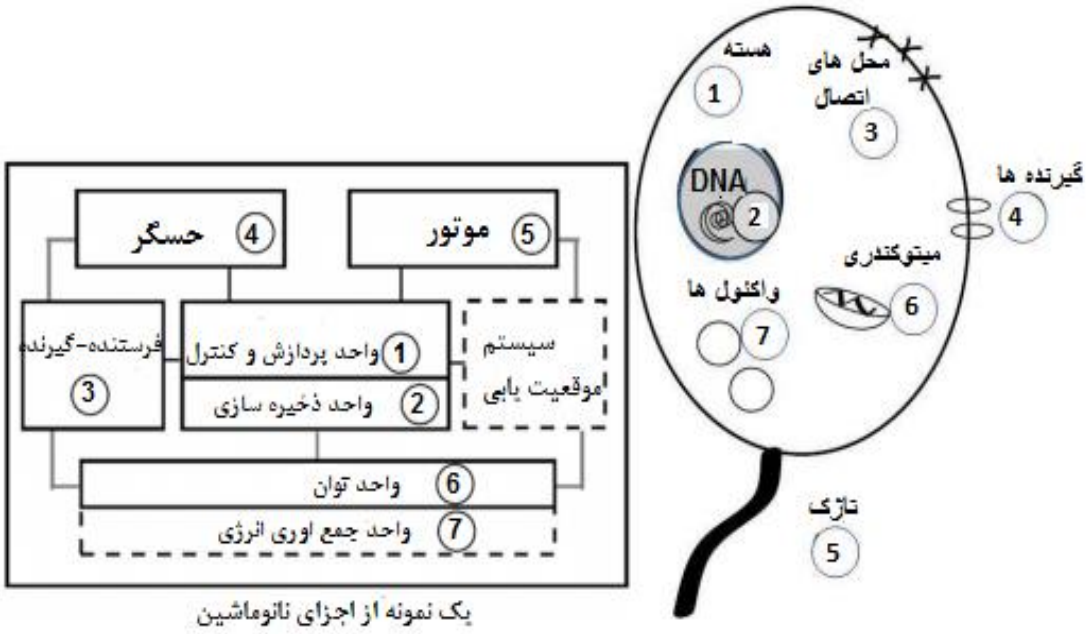
۵) حسگرها و عملگرها[۲]: مشابه واحد مخابراتی، این اجزاء به‌عنوان یک واسط میان محیط و نانو ماشین عمل می‌کنند. از حسگرها و عملگرهای مختلفی (مانند حسگرهای شیمیایی، حسگرهای دما و مکانیسم‌های حرکتی دیگر) می‌توان در نانو ماشین‌ها استفاده کرد.

در حال حاضر، نمی‌توانیم چنین نانو ماشین پیچیده‌ای را بسازیم اما سیستم‌های زیستی مانند

[1] Power Unit

۲

سلول‌های زنده، با این معماری مورد انتظار در طبیعت موجودند. طبق روش زیست-ترکیبی، این مدل‌های زیستی می‌توانند به یادگیری و درک اصول حاکم بر نحوه عملکرد نانو ماشین‌ها و فعل‌وانفعالات آن‌ها کمک شایانی کنند. در شکل ۱-۱ نگاشت بین اجزای یک معماری کلی نانو ماشین و سلول زنده شامل نانو ماشین‌های زیستی نمایش داده‌شده است.



شکل ۱-۱- نگاشت بین اجزای یک معماری کلی نانو ماشین و سلول زنده[۱۰]

مشابه معماری یک نانو ماشین، هر سلول زنده شامل اجزای زیر است:

۱) واحد کنترل: هسته سلول شامل تمام دستورالعمل‌هایی است که تمام قابلیت‌های مورد انتظار از سلول را تحقق می‌بخشد.

۲) تبادل اطلاعات: نقاط اتصال و گیرنده‌های هورمونی و فرمونی که بر روی غشای سلول قرار دارند، مانند فرستنده-گیرنده های مولکولی برای مخابرات بین سلولی عمل می‌کنند.

۳) تولیدمثل: نانو ماشین‌های متعددی مانند سنتروزوم و تعدادی از موتورهای مولکولی، در فرآیند تولیدمثل سلول شرکت می‌کنند. کد نانو ماشین، در توالی‌ها مولکولی ذخیره‌شده که قبل از تقسیم سلولی دو برابر می‌شوند.هر سلول نتیجه، دارای یک کپی از توالی DNA اصلی است.

۴) واحد تأمین نیرو: سلول‌ها برای تولید توان از نانو ماشین‌های متفاوتی استفاده می‌کنند که یکی از آن‌ها میتوکندری است. میتوکندری بسیاری از مواد شیمیایی را که در فرآیندهای سلولی، به‌عنوان سوخت مورداستفاده قرار می‌گیرند، تولید می‌کند. نانو ماشین جالب دیگر، کلروپلاست است که نور خورشید را به انرژی شیمیایی تبدیل می‌کند.

۵) حسگرها و محرک‌ها: سلول شامل حسگرها و محرک‌های متعددی است مانند کانال‌های گیرنده موقت پتانسیل برای تشخیص مژه و تاژک حرکتی در باکتری‌ها. کلروپلاست گیاهان می‌تواند به‌عنوان یک سیستم محرک نیز در نظر گرفته شود، چون آب را به اکسیژن تبدیل کرده و آن را در محیط منتشر می‌کند. در این پایان‌نامه، روش زیست-ترکیبی را به‌عنوان زیربنای نانو ماشین‌های جدید شرح داده و روش‌های مخابرات مولکولی را مطالعه و بررسی خواهیم کرد.

۱-۳ اجزای مخابرات مولکولی

در شکل ۱-۲ مفاهیم کلی شبکه‌های مخابرات مولکولی در مقایسه با شبکه‌های مخابرات کلاسیک نشان داده‌شده است. اجزا اصلی این دو شبکه تقریباً متناظر باهم هستند و به پنج دسته اصلی تقسیم می‌شوند: فرستنده، گیرنده، پیام، حامل و محیط.

الف: اجزای تشکیل دهنده در مخابرات مولکولی ب: اجزای تشکیل‌دهنده در مخابرات کلاسیک

شکل ۱-۲- مقایسه مخابرات مولکولی با مخابرات کلاسیک[۱۰]

هر یک از این اجزا بر کل فرایند ارتباطی تأثیر می‌گذارند که این فرایند ارتباطی شامل مراحل زیر است:

۱) کدگذاری: فرستنده پیام را روی مولکول کدگذاری می‌کند.
۲) انتقال: فرستنده پیام را با رها کردن مولکول‌ها یا متصل کردن آن‌ها به حامل‌های مولکولی در محیط قرار می‌دهد.
۳) انتشار: پیام از فرستنده به گیرنده منتشر می‌شود.
۴) دریافت: گیرنده پیام را تشخیص می‌دهد.
۵) کدگشایی: گیرنده پیام مولکولی را به اطلاعات مفیدی مانند فرمان یک واکنش، ذخیره داده، فرمان حرکت و غیره رمزگشایی می‌کند.

۱-۳-۱ فرستنده و گیرنده

در بسیاری از شبکه‌های ارتباطی کلاسیک، فرستنده اطلاعات را از طریق مدوله کردن سیگنال‌های الکترومغناطیسی ارسال می‌کند. در مخابرات مولکولی، فرستنده اطلاعات را از طریق دست‌کاری کردن مولکول‌ها توسط واکنش شیمیایی یا با پخش کردن غلظتی مشخص از مولکول‌ها اطلاعات را کدگذاری می‌کند. پیام شامل اطلاعات مفیدی است که باید توسط گیرنده، مورداستفاده قرار گیرد و گیرنده باید بتواند پیام را از محیط استخراج کند. ازآنجاکه نانو ماشین‌ها و مولکول‌های پیغام بسیار ساده‌اند، انتقال و دریافت پیام توسط آن‌ها کار کم‌اهمیتی نیست و در ابعاد مولکولی، از کدگذاری پیام، ارسال آن در محیط، ذخیره آن و واکنش دادن به آن تشکیل می‌شود. مولکول‌های مورداستفاده در مخابرات مولکولی یک منبع متناهی از اطلاعات هستند. یعنی نانو ماشین فرستنده باید مولکول‌ها را از محیط جمع‌آوری کرده و آن‌ها را برای استفاده‌های بعدی به‌عنوان پیام ذخیره کندو نانو ماشین گیرنده بتواند پس از کدگشایی مولکول‌ها، آن‌ها را مجدداً در محیط رها کند.

۱-۳-۲ پیام

در مخابرات کلاسیک، از سیستم باینری برای نمایش اطلاعات استفاده می‌شود و اطلاعات منتقل‌شده عموماً مجموعه‌ای از بیت‌هاست. در مخابرات مولکولی، پیام یعنی مولکول‌ها باید سه ویژگی مهم داشته باشند[۱۰].

۱) باید دارای یک ساختار از پیش تعریف‌شده خارجی باشند که در گیرنده بتوان به‌سادگی آن را تشخیص داد.

۲) نباید در محیط با سایر مولکول‌ها واکنش شیمیایی انجام دهند.
۳) نانو ماشین گیرنده، بدون هیچ اثر جانبی بتواند پیام مولکولی کدگشایی‌شده را حذف کند.

البته باید تأکید کنم که ما در این پایان‌نامه از دست‌کاری مولکول‌ها برای کدگذاری اطلاعات استفاده نکردیم بلکه از روشی شبیه مدولاسیون دامنه در مخابرات کلاسیک استفاده کردیم به این صورت که برای ارسال هر بیت یک غلظت مشخصی از مولکول‌ها را فرستنده در محیط پخش می‌کند، که در فصل سوم بیشتر به این موضوع خواهیم پرداخت[۶].

۱-۳-۳ حامل

در سیستم‌های زیستی طبیعت، از دو نوع حامل برای مخابرات مولکولی استفاده می‌شود: موتورهای مولکولی و یون‌های کلسیم [۲].موتورهای مولکولی مانند کینزین، دینزین ومیوزین، پروتئین‌هایی هستند که با استفاده از انرژی شیمیایی، حرکت ایجاد می‌کنند. این موتورهای پروتئینی، می‌توانند بسته‌های داده را به‌صورت مولکول از فرستنده به گیرنده منتقل کنند[۶]. در هنگام استفاده از یون‌های کلسیم (Ca^{+2})، فرستنده می‌تواند برای کدگذاری اطلاعات، آن را به‌صورت غلظت این یون‌ها در دامنه مدوله کند[۷].

۱-۳-۴ محیط انتقال

در مخابرات کلاسیک، از تمام اجزای طبیعت مانند آب، هوا و زمین به‌عنوان محیط انتقال می‌توان استفاده کرد که شرایط این محیط‌های انتقال بر انتشار سیگنال‌های صوت، نوری و الکترومغناطیسی باهم فرق می‌کنند. در مخابرات مولکولی، محیط انتقال می‌تواند خیس مانند بدن انسان یا خشک مانند سیستم‌های کنترل کیفیت در کارخانه‌ها باشد. سرعت حرکت محیط که ممکن است از سرعت انتشار مولکول‌ها بیشتر باشد، مانند سرعت حرکت جریان خون، وجود مانع‌های فیزیکی در مسیر حرکت مولکول‌ها، تغییرات دما و چسبناکی محیط و در کل عدم قطعیت شدید محیط انتقال، باعث می‌شود برای این نوع مخابرات مفاهیم و مدل‌های انتشاری جدیدی مطرح شوند[۹].

۱-۴ مقایسه مخابرات مولکولی با مخابرات کلاسیک

در این بخش می‌خواهیم مخابرات مولکولی را با مخابرات کلاسیک ازلحاظ ساختار پیام، سرعت انتشار، نویز، نوع اطلاعات و مصرف انرژی باهم مقایسه کنیم.

۱-۴-۱ساختار پیام

همان‌طور که می‌دانیم در مخابرات کلاسیک، پیام می‌تواند به‌صورت سیگنال‌های الکترومغناطیسی، صوتی یا نوری، و در ابعاد دامنه، فرکانس یا فاز موج الکترومغناطیسی کد شود. اما در مخابرات مولکولی پیام با استفاده از دو روش متفاوت کد می‌شود.

اولین روش از غلظت یک مولکول مشخص در محیط، برای کد کردن اطلاعات استفاده می‌شود و گیرنده، برحسب تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده در واحد حجم پیام دریافتی را کدگشایی می‌کند. تأکید می‌کنیم که در این پایان‌نامه از این روش برای تجزیه‌وتحلیل استفاده کرده‌ایم. به این صورت که فرستنده غلظتی از مولکول‌ها را در محیط پخش می‌کند و گیرنده بر اساس آستانه‌ای که تعریف کردیم تشخیص می‌دهد که صفر ارسال‌شده است یا یک. به این صورت که اگر تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده بیشتر از مقدار آستانه باشد گیرنده تصمیم می‌گیرد که یک ارسال‌شده است و اگر کمتر از مقدار آستانه باشد صفر ارسال‌شده است. از نمونه واقعی این روش در سیستم انسان برای انتشار تحریک‌های عصبی استفاده می‌شود.

دومین روش که کدگذاری مولکولی نام دارد، از پارامترهای داخلی مولکولی مانند ساختار شیمیایی، موقعیت نسبی المان‌های مولکولی، پلاریزاسیون و کدگذاری DNA برای کدگذاری اطلاعات استفاده می‌شود[۲]. در این حالت برای کدگشایی اطلاعات، گیرنده باید قادر به شناسایی مولکول‌های موردنظر باشد. این روش مشابه استفاده از بسته‌های رمزگذاری شده در مخابرات کلاسیک است که تنها گیرنده موردنظر قادر به رمزگشایی پیام است.

۱-۴-۲ سرعت انتشار

سرعت انتشار[1] سیگنال‌های مورداستفاده در مخابرات کلاسیک بسیار سریع‌تر از انتشار پیغام‌های مولکولی است. در مخابرات مولکولی، مولکول‌ها باید به‌طور فیزیکی و در محیطی سیال از فرستنده به سمت گیرنده حرکت کنند. این حرکت می‌تواند غیرفعال، یعنی بدون مصرف انرژی و از غلظت بیشتر به غلظت کمتر باشد، مانند پخش قطره جوهر در آب، یا به‌طور فعال توسط مکانیسم‌هایی مانند موتورهای مولکولی یا باکتری‌ها انجام شود. به‌علاوه مولکول‌ها بیشتر از انواع سیگنال‌های دیگر تحت تأثیر شرایط محیطی مانند فرایند انتشار تصادفی و تغییرات دما قرار می‌گیرند[۹]. باید تأکید کنم که در این پایان‌نامه از پخش غیرفعال برای تجزیه‌وتحلیل استفاده کرده‌ام.

[1] Propagation Speed

۱-۴-۳ نویز

در مخابرات کلاسیک نویز به‌صورت تداخل سیگنال ناخواسته با سیگنال حامل اطلاعات تعریف می‌شود که این تداخل می‌تواند در دامنه، فاز یا فرکانس باشد. اما در مخابرات مولکولی باید فاکتورهای جدیدی از نویز را برای فعل‌وانفعالات مولکول‌ها در محیط در نظر گرفت. در مخابرات مولکولی دو نوع متفاوت نویز می‌توانند بر پیام تأثیر بگذارند. نوع اول شبیه تداخل در مخابرات کلاسیک است به این صورت که وقتی پیامی که شامل غلظتی از مولکول‌هاست، توسط فرستنده در محیط پخش می‌شود و این غلظت که به گیرنده رسیده است همچنان در فضای اطراف گیرنده باقی می‌ماند و فرستنده با فرستادن غلظتی دیگر از مولکول‌ها یا پیامی دیگر، این غلظت با غلظت قبلی تداخل پیدا می‌کند و باعث تشخیص غلط در گیرنده می‌شود. که در بخش‌های بعدی بیشتر در این موردبحث خواهیم کرد. نوع دیگر نویز به خاطر حرکت تصادفی مولکول‌ها و برخورد این مولکول‌ها با یکدیگر و دیگر مولکول‌های محیط است که در فصل‌های بعد این نوع نویز را با روابط ریاضی مدل خواهیم کرد[۷].

۱-۴-۴ نوع اطلاعات

برخلاف مخابرات کلاسیک که می‌توان انواع اطلاعات متنی، صدا و ویدئو را انتقال داد، در مخابرات مولکولی چون اطلاعات توسط مولکول‌ها منتقل می‌شوند، بسته‌های اطلاعاتی، پدیده‌ها، وضعیت شیمیایی و فرایندها هستند[۸].

۱-۴-۵ مصرف انرژی

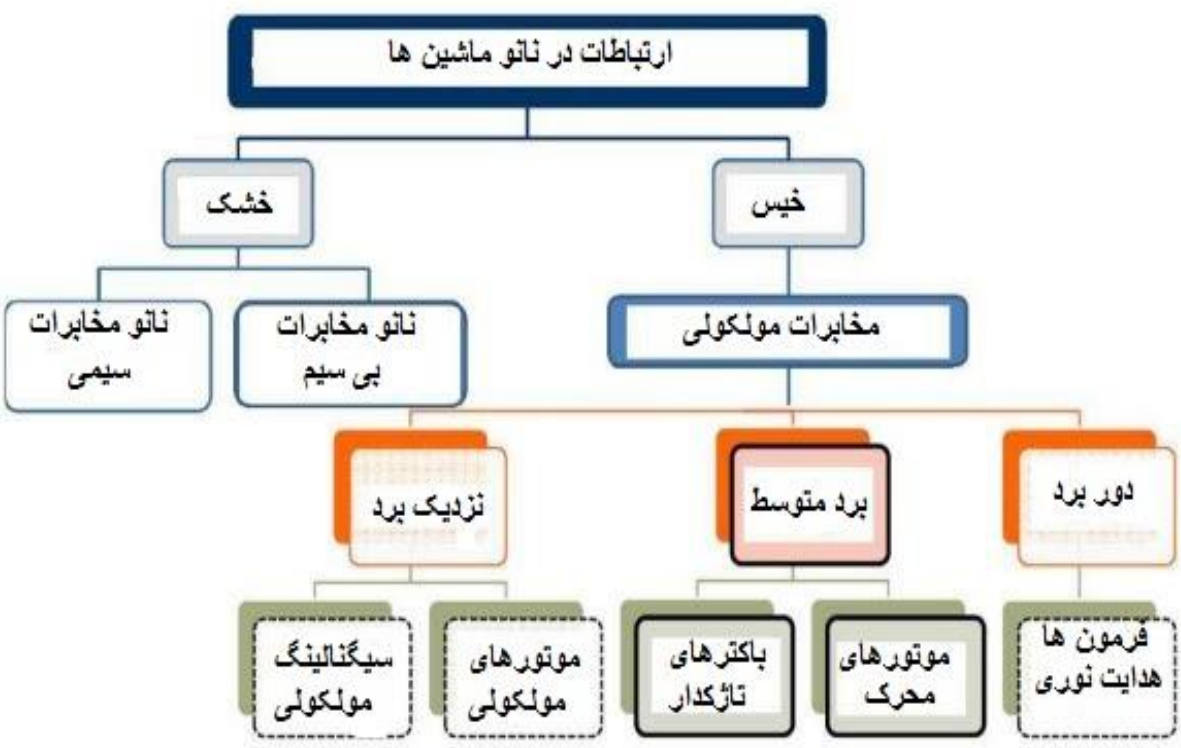
در شبکه‌های ارتباطی سنتی، فرایند تبادل اطلاعات انرژی الکتریکی را مصرف می‌کند که آن را از باتری یا منابع خارجی کسب می‌کند. در شبکه‌های نانویی مولکولی، بسیاری از فرآیندها به دلیل ماهیت شیمیایی‌شان انرژی کمی مصرف می‌کنند. در شبکه‌های نانو الکترومغناطیسی، تلاش بر این است که از سیستم‌هایی شبیه تگ‌های RFID[1] و انرژی حاصل از روش‌های ترکیبی نانوتیوب های کربنی و باتری‌های مولکولی، انرژی موردنیاز نانو ماشین‌ها را تأمین کرد[۱۱].

۱-۵ انواع ارتباطات در مخابرات مولکولی

اولین مدل‌های شبکه‌های نانویی، به تقلید از مخابرات مولکولی موجود در سیستمهای زیستی طراحی‌شده‌اند. شبکه‌های نانویی زیستی، برای ارتباطات داخل سلول، بین سلول‌ها و بین بافت‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرند. با توجه به‌اندازه‌ی کوچک سلول‌ها و فضای بین آن‌ها، به شبکه‌های ارتباطی میان سلولی، شبکه‌های نزدیک برد می‌گوییم که بازه عمل آن‌ها، حدود نانومتر تا میکرومتر

[1] Radio Frequency Identification

است. برای فاصله‌های بین میکرومتر تا میلی‌متر، از شبکه‌های برد متوسط و برای فاصله‌های میلی‌متر تا متر از شبکه‌های نانویی دوربرد استفاده می‌کنیم. در شکل ۱-۳ می‌توانید این دسته‌بندی‌ها را به‌طور خلاصه مشاهده کنید.



شکل ۱-۳- انواع ارتباطات در مخابرات مولکولی

در این پایان‌نامه ما از مخابرات مولکولی نزدیک برد مبتنی بر سیگنالینگ مولکولی استفاده کرده‌ایم، به همین دلیل در بخش بعدی بیشتر در مورد این نوع مخابرات بحث خواهیم کرد.

۱-۵-۱ مخابرات نزدیک مبتنی بر سیگنالینگ مولکولی

ارتباطات میان سلولی مبتنی بر مولکول‌ها، از شناخته‌ترین روش‌های مخابرات مولکولی است که در بسیاری از اعمال هماهنگ‌کننده سلولی مانند لقاح، انقباض و تراوش سلولی نقش مهمی ایفا می‌کند[۷]. در این روش، اطلاعات با توجه به پیامی که باید منتشر شود، توسط غلظت‌های متنوعی از مولکول‌های سیگنال در محیط منتقل می‌شوند. سطح غلظت مولکول‌ها ممکن است در بعد دامنه یا فرکانس مدوله‌شده باشد. مولکول‌ها، هم می‌تواند برای مبادله‌ی اطلاعات در میان سلول‌هایی که ازلحاظ فیزیکی مجاور هم هستند، مورداستفاده قرار گیرد و هم در سلول‌های غیر مجاور. بنابراین،

مولکول‌های شیمیایی منتشرشده می‌تواند شامل پیغام‌آورهای متفاوتی از قبیل ماده ATP[1]، یون کلسیم[2] ،یا اینوزیتول[3] باشد.

۱-۵-۱-۱ ویژگی‌های مخابرات نزدیک برد

می‌توان از مولکول‌ها برای مخابرات نزدیک برد میان تعدادی نانو ماشین استفاده کرد[۹]. مشابه مدل‌های طبیعی، ممکن است نانو ماشین‌ها به هم نزدیک باشند و انتشار اطلاعات، بنا بر نحوه قرارگیری نانو ماشین‌ها، به یکی از دو روش زیر انجام پذیرد:

۱) دسترسی مستقیم

اگر نانو ماشین‌ها به‌طور فیزیکی به هم متصل باشند، مولکول‌ها از طریق مدخل‌ها از نانو ماشینی به دیگری می‌روند. این مدخل‌ها باید مانند اتصالات منفذدار بین سلولی عمل کنند و اجازه دهند که شار یون‌ها و مولکول‌ها از یک نانو ماشین به داخل نانو ماشین دیگر برقرار شود، همان‌طور که در شکل ۱-۴- الف نشان داده‌شده است.

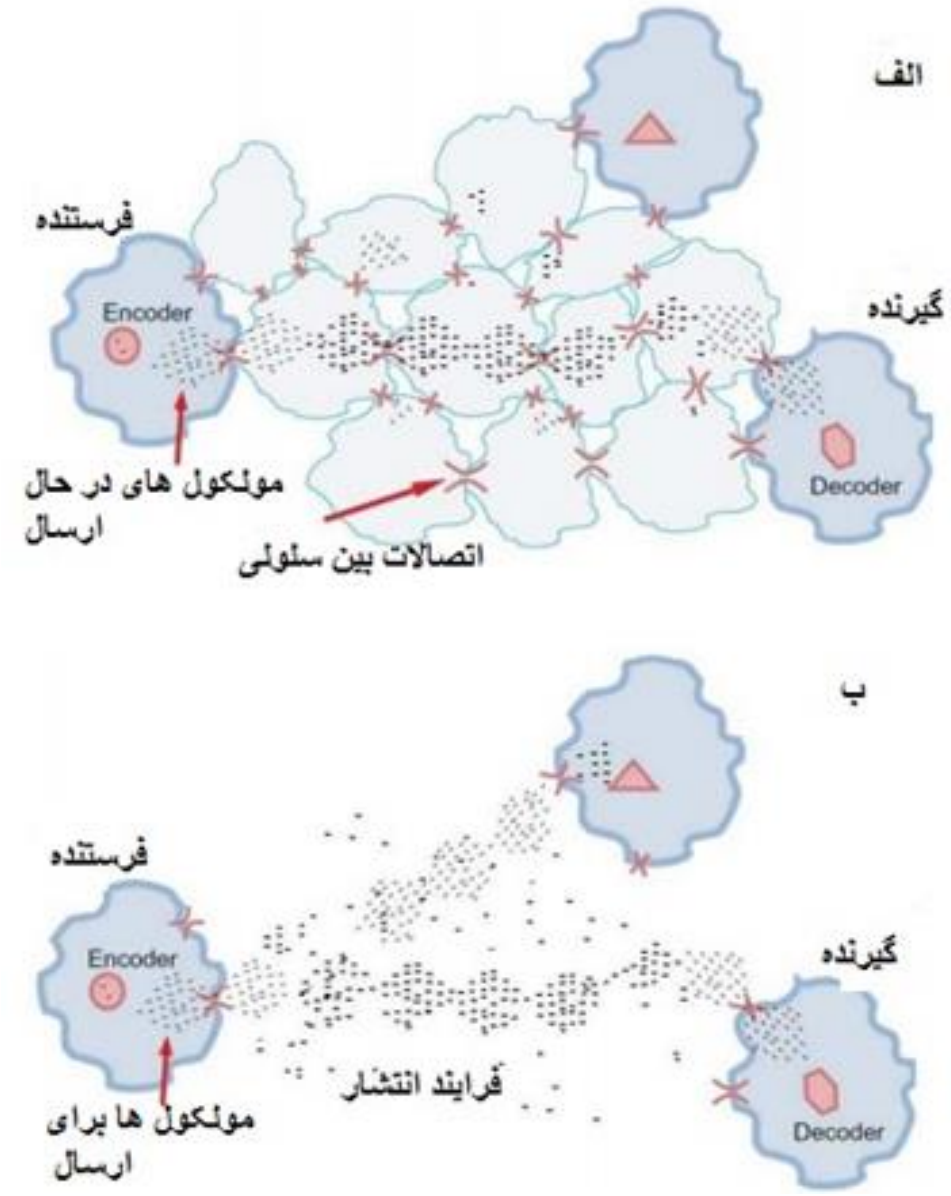
۲) غیرمستقیم

اگر نانو ماشین‌ها باهم اتصال مستقیم نداشته باشند، باید نانو ماشین منتقل‌کننده بتواند مولکول‌های اطلاعات را به‌عنوان پیغام‌آورهای اولیه در داخل محیط رها کند. مولکول‌های اطلاعات با پیروی از فرآیند انتشار مولکولی، در داخل محیط حرکت می‌کنند و سپس به نانو ماشین گیرنده می‌رسند و گیرنده تشخیص می‌دهد که فرستنده چه پیامی ارسال کرده است. همان‌طور که در شکل ۱-۴- ب ، نشان داده‌شده است، انتقال‌دهنده می‌تواند اطلاعات را در غلظت‌های مختلف پیغام‌آور اولیه کدگذاری کند. سیستم‌های زیستی، اطلاعات را به‌صورت فرکانس و دامنه تغییرات غلظت کد می‌کنند که عموماً به‌صورت نوسان و ضربه Ca^{2+} در نظر گرفته می‌شود[۹].

به‌وسیله این دو روش انتشار می‌توان مکانیسم‌های انتقالی چندپخشی و همه پخشی را در شبکه‌های نانویی پیاده‌سازی کرد و کل سیستم مخابراتی مبتنی بر سیگنالینگ یونی را به این صورت درنظرگرفت که،نانو ماشین‌های فرستنده و گیرنده از طریق یک شبکه ارتباطی شامل گره‌های به هم متصل، با استفاده از انتشار مولکول‌ها اطلاعات را بین خود مبادله می‌کنند. هرچند که نمی‌توان کانال انتقال را بدون نویز درنظرگرفت، در یک شبکه نانویی، با توجه به شرایط مساله، می‌توان از مولکول‌های

[1] Adenosine Ttriphosphate
[2] (Ca^{2+})
[3] Itriphosphate (IP3)

پیغام‌آور مختلفی برای ارسال اطلاعات استفاده کرد. ضمناً باید در طراحی این شبکه‌های نانویی، به فرآیندهای مخابراتی بالقوه‌ای که در محیط در حال اجرا هستند، توجه کرد. یکی از نقاط ضعف بالقوه در استفاده از سیگنالینگ کلسیم، تداخل احتمالی است که ممکن است توسط فرآیندهای طبیعی مانند انقباض عضلانی یا سیگنال‌های عصبی، ایجاد شود [۶].



شکل ۱-۴- انتشار سیگنال در سیستم مبتنی بر سیگنالینگ کلسیم. الف: ارسال سیگنال از طریق اتصالات بین سلولی منفذدار. ب: ازطریق پدیده انتشار مولکولی [۲]

در این پایان‌نامه فرض کردیم که نانو ماشین‌ها باهم اتصال مستقیم ندارند و به‌طور غیرمستقیم و

از طریق مولکول‌هایی که فرستنده در محیط پخش می‌کند باهم در ارتباط هستند.

۱-۶ کاربردهای مخابرات مولکولی

بازه کاربردهای مخابرات مولکولی و ابزار مربوط به این حیطه به‌طور شگفت‌آوری گسترده است. در اینجا به چند حوزه اصلی آن اشاره خواهیم کرد.

۱-۶-۱ پزشکی

مستقیم‌ترین کاربرد مخابرات مولکولی، در صنایع پزشکی معنا می‌یابد. مانند پشتیبانی از سیستم ایمنی، پیوند اعضا، سیستم‌های انتقال دارو و مهندسی ژنتیک. الگوهای زیستی بشر را به استفاده از فناوری در تعامل با بافت‌ها و اندام‌ها تشویق می‌کند. شبکه‌های مخابرات مولکولی، از طریق کنترل اجزای سیستم در سطوح مولکولی باعث سازگاری و پایداری زیستی بیشتر سیستم‌های درمانی می‌شود. موارد زیر تعدادی از قابلیت‌های پزشکی قابل تجسم برای این شبکه‌ها هستند:

- پشتیبانی از سیستم ایمنی: سیستم ایمنی از نانو ماشین‌های متعددی تشکیل‌شده که از اندام‌های زنده را در برابر عوامل بیماری‌زا محافظت می‌کنند. این ماشین‌ها مجموعه‌ای از سیستم‌های نانو، میکرو و ماکرو به‌صورت حسگر و محرک هستند که به‌صورت هماهنگ شده، از طریق موقعیت‌یابی و دادن پاسخ مناسب، عوامل و سلول‌های خطرناک را شناسایی و با روش‌های درمانی هدفمند کنترل می‌کنند[۹]،[۱۱].
- پیوند و ترمیم اعضا به روش زیست-ترکیبی: شبکه‌های نانویی مخابرات مولکولی می‌توانند واسط‌های ارتباطی مساعدی را میان عضو پیوندی و محیط اطرافش ایجاد کنند. ترمیم انتهای رشته‌های عصبی در سیستم اعصاب مرکزی می‌تواند نمونه‌ای از کاربرد ترمیم زیست- ترکیبی باشد.
- سیستم رسانش دارو: شبکه‌های مخابرات مولکولی می‌توانند برای برقراری ارتباط میان نانو ماشین‌هایی که با تشخیص بافت بیمار، دارو را با دوز مشخص به آن انتقال می‌دهند، مورداستفاده قرار گیرد. این ارتباط می‌تواند برای افزایش کارایی و کاهش مصرف انرژی، مسیریابی سریع‌تر با استفاده از پردازش گروهی و نیز کنترل دقیق‌تر میزان دارو از طریق هماهنگی میان نانو ماشین‌های تزریق کننده، انجام گیرد.
- بررسی سلامت: نظارت بر سطح اکسیژن و کلسترول خون، ناهنجاری‌های هورمونی و تشخیص زودهنگام بیماری‌ها، نمونه‌هایی از کاربردهای شبکه‌های نانویی در بدن انسان هستند[۹].

- مهندسی ژنتیک: توسط نانو ماشین‌ها می‌توان نانو ساختارهایی مانند توالی‌های مولکولی و ژن‌ها را دست‌کاری و اصلاح کرد. استفاده از شبکه‌های نانویی، اجازه می‌دهد که کاربردهای بالقوه مهندسی ژنتیک را گسترش دهیم.

۱-۶-۲ نظامی

در صنایع نظامی، بازه به‌کارگیری شبکه‌های نانویی به‌تناسب شرایط جنگی بسیار گسترده است. هنگامی‌که هدف، سیستم نظارت بر کارایی سربازان باشد، شبکه‌های نانویی در یک ناحیه کوچک مانند داخل بدن فرد پخش می‌شوند و هنگامی‌که هدف، دیده‌بانی میدان نبرد باشد، یک آرایش از شبکه‌های نانویی را در محیط‌های وسیع پخش خواهیم کرد. دو قابلیت زیر از عمده‌ترین کاربردهای شبکه‌های نانویی در صنایع نظامی هستند:

- صنایع دفاع هسته‌ای، زیستی و شیمیایی: می‌توان نانو ماشین‌ها را در کل میدان نبرد یا بخشی از آن پخش کرد تا با شناسایی مواد شیمیایی خطرناک و عامل‌های زیستی، برای دفاعی مناسب هماهنگی لازم را ایجاد کنند[۲]. همچنین می‌توان شبکه‌های نانو حسگر را در حامل‌های بار پخش کرد تا ورود غیرمجاز مواد شیمیایی یا رادیولوژی را تشخیص دهند.
- تجهیزات جنگی نانویی: شبکه‌های نانوی را می‌توان در طراحی لباس‌های جنگی باقابلیت استتار هوشمند در محیط به کاربرد. همچنین می‌توان با استفاده از مواد هوشمند و این شبکه‌های نانو در لباس سرباز، با کنترل دمای بدن و علایم حیاتی فرد، بر وضعیت سلامت او نظارت کرد و اقدامات اولیه‌ای از قبیل تنظیم درجه حرارت لباس یا تشخیص محل جراحت را انجام داد.

۱-۶-۳ کاربردهای صنعتی و لوازم مصرفی

شبکه‌های نانویی می‌توانند به توسعه مواد جدید و محصولات پیشرفته، رویه‌های کنترل کیفیت و فرایندهای تولید مواد کمک کنند و همچنین در کنترل کیفیت آب و غذا، با گرداوری و اداره اطلاعات حسگرها، به‌طور مؤثر به کار گرفته شوند. یکی از بارزترین کاربردهای شبکه‌های نانویی در صنایع غذایی کنترل کیفیت آب و غذا است. شبکه‌های نانو حسگرها می‌توانند به شناسایی غلظت‌های کم از باکتری‌های کوچک و مواد سمی که بر کیفیت محصول تأثیر می‌گذارند و توسط تکنولوژی‌های حسگری فعلی قابل‌تشخیص نیستند، کمک کنند[۳].

۱-۶-۴ کاربردهای زیست‌محیطی

ازآنجاکه شبکه‌های نانویی از سیستم‌های زیستی الهام گرفته‌اند، و به خاطر شباهت فراوان آن‌ها به طبیعت، می‌توان آن‌ها را به‌گونه‌ای در محیط به کار گرفت که برای فناوری‌های فعلی میسر نیست. بعضی از کاربردهای زیست‌محیطی شبکه‌های نانویی عبارت‌اند از:

- عامل کمکی در تجزیه زیستی مواد: وجود فزاینده زباله در جهان یکی از مشکلات بزرگ تمدن بشر است. در این زمینه، شبکه‌های نانویی می‌توانند به فرایند تخریب پذیری زباله‌ها کمک کنند. این عمل می‌تواند از طریق شناسایی و علامت‌گذاری مواد متفاوت ، توسط شبکه نانویی پخش‌شده در توده زباله‌ها انجام می‌پذیرد. سپس نانو محرک‌ها با توجه به موقعیت‌های تعیین‌شده توسط شبکه نانویی به جدا کردن مواد از یکدیگر می‌پردازند.
- کنترل تنوع زیستی: می‌توان از شبکه‌های نانویی برای کنترل تنوع زیستی در طبیعت استفاده کرد. مثلاً شبکه‌های نانویی می‌توانند برای کنترل رفتارهای خاص، با حیوانات مشخصی تعامل داشته باشند.
- کنترل آلودگی هوا: مانند کاربردهای کنترل کیفیت، می‌توان توسط شبکه‌های نانویی بر کیفیت هوا نیز نظارت کرد. این شبکه‌ها با کنترل نانو فیلترهایی که ذرات معلق خطرناک را از هوا جدا می‌کنند، می‌توانند نقش مؤثری در کاهش آلودگی‌ها تنفسی داشته باشند[۴].

۱-۷ چالش‌های تحقیقاتی در مخابرات مولکولی

نانو فناوری، به دلیل قابلیت‌های وسیعش در بهینه‌سازی بنیادین صنایع مختلف، در سال‌های اخیر توجه محافل تحقیقاتی متعددی را در سراسر جهان به خود جلب کرده است. تلاش در ساخت تجهیزات در مقیاس اتمی و مولکولی، به توسعه ابزار جدیدی برای این کار مانند شبیه‌سازی‌ها، میکروسکوپ‌های پیشرفته منجر شده است. در سال‌های اخیر، روش‌های ساخت مولکولی جدید، توسعه‌ی نانو ماشین‌های پیشرفته‌تری را امکان‌پذیر ساخته است و توسعه‌ای این نانو ماشین‌ها با تقلید از ساختارهای زیستی و استفاده قطعات طبیعی موجود به‌عنوان اجزای سازنده آن‌ها، چشم‌انداز خوش‌بینانه‌ای را ورای کلیه فناوری‌ها گشوده است.

با استفاده از شبکه‌های نانویی، می‌توان نانو ماشین‌ها را برای کارهای پیچیده‌تر و دقیق‌تر به هم متصل کرد. برای پیاده‌سازی مخابرات نانویی، می‌توان از استراتژی‌های مختلفی استفاده کرد. یکی از

این استراتژی‌ها، مخابرات مولکولی می‌باشد که بر کدگذاری و انتقال اطلاعات توسط مولکول‌ها بنیان نهاده شده و با تقلید از روش‌های مخابرات داخل سلولی و میان سلولی طراحی‌شده است[۸]. فناوری‌های نزدیک برد، ارتباط میان نانو ماشین‌ها را در مقیاس کوچک‌تر از میکرومتر فراهم می‌کنند و برای فاصله‌های بیشتر، سرعت عمل آن‌ها بسیار کم می‌شود. توسعه‌ی شبکه‌های نانویی، تنها به روش‌های مخابرات مولکولی محدود نمی‌شود، بلکه باید نانو ماشین‌ها نیز طوری طراحی شوند که بتواند در این ابعاد به تبادل اطلاعات بپردازند. در ادامه چالش‌های تحقیقاتی عمده در توسعه شبکه‌های نانویی را موردبحث قرار خواهیم داد.

۱-۷-۱ توسعه نانو ماشین‌ها، ابزار آزمایش و شبیه‌سازی

یکی از اولین مراحل در طرح توسعه‌ای شبکه‌های نانویی، ساخت نانو ماشین‌هایی شامل فرستنده- گیرنده‌های مولکولی است. تلاش‌های اخیر در تحقیقات فناوری نانو، به ایجاد نانو ساختارهای عملیاتی منجر گردیده که دارای قابلیت‌هایی برای راه گزینی، حافظه و ساطع کردن نور هستند[۱۲]. هرچند که این ساختارها هنوز خیلی ساده هستند، اما ترکیب آن‌ها به ساخت نانو ماشین‌های پیچیده‌تری باقابلیت انجام فرایندهای مخابراتی ویژه، منجر خواهد شد. انتظار می‌رود که نانو ماشین‌های آینده، دارای قابلیت‌های خودتکثیری، برقراری ارتباط و حرکت باشند.

در حوزه علوم شبکه و تکنولوژی‌های مخابراتی، به دلیل محدودیت امکانات برای دست‌کاری‌های میکروسکوپی و حساسیت بسیار این حوزه، به‌جز آزمایش‌های محدودی که برای پیاده‌سازی شبکه‌های نانویی نزدیک برد (مانند موتورهای مولکولی یا سیگنالینگ یونی) انجام‌شده، همه کارهایی که تاکنون به انجام رسیده‌اند، در حوزه شبیه‌سازی‌ها تئوری بوده‌اند و امکان پیاده‌سازی آزمایشگاهی آن‌ها باید بیشتر موردبررسی قرار گیرد[۸].

علی‌رغم امکانات موجود برای مدل‌سازی سیستم‌های زیستی و شیمیایی، هنوز ابزار خاصی برای شبیه‌سازی شبکه‌های نانویی وجود ندارد. ابزار شبیه‌سازی موردنظر باید از انواع مختلف پیکربندی و روش‌های مخابراتی با معماری‌های مختلف، پشتیبانی کند و درعین‌حال به کاربر اجازه دهد که حامل‌های مختلف برای انتقال اطلاعات، نوع مدولاسیون سیگنال، ترافیک شبکه، منابع نویز و سایر پارامترهای محیط انتشار سیگنال را انتخاب کند.برای ایجاد چنین محیط شبیه‌سازی، باید مدل‌های کانال فیزیکی متناسب با روش‌های مختلف مخابرات مولکولی توسعه داده شوند[۱۰].

۱-۷-۲ تعریف یک مدل مفهومی جدید در علم مخابرات

یک فرآیند مخابراتی معمولی، از مراحل زیر تشکیل‌شده است:

- مراحل کدگذاری که در آن فرستنده، مولکول‌های اطلاعات را تولید می‌کند.
- مرحله ارسال، که مولکول‌ها به محیط انتشار رها می‌شوند.
- مرحله انتشار مولکول‌های اطلاعات در محیط
- مرحله دریافت مولکول‌های اطلاعات
- مرحله کدگشایی مولکول‌های اطلاعات دریافت شده

که در مدل‌های اقتباس‌شده از طبیعت برای مخابرات نانویی، همه این مراحل توسط نانو ماشین‌های زیستی انجام می‌گیرد. یکی از اولین پرسش‌هایی که در طراحی و پیاده‌سازی شبکه‌های نانویی مطرح می‌شود، مسئله کدگذاری و کدگشایی اطلاعات در این نوع شبکه است. بر اساس مدل‌های طبیعی، دو روش کلی برای بیان مولکولی اطلاعات وجود دارد. درروش اول، داده‌های انتقالی، در ساختار یا قطبیت خود مولکول اطلاعات کد می‌شوند و این مولکول، بنا به ساختار خود، تنها به گیرنده موردنظر در مقصد متصل می‌شود. بنابراین، سیستم مخابراتی می‌تواند از مولکول‌ها و گیرنده‌های متفاوتی برای کدگذاری اطلاعات در الگوهای فضایی و زمانی مختلف، استفاده کند. درروش دوم، شبیه به روش مدولاسیون دامنه و فرکانس در شبکه‌های سنتی، اطلاعات به‌صورت نوسانات غلظت یون‌ها در محیط، کد می‌شوند. هرچند که نحوه کدگشایی این نوسانات غلظت توسط گیرنده‌ها، هنوز با عدم قطعیت همراه است، اما می‌دانیم که بعضی از فرایندهای سلولی با این تغییرات غلظت، فعال می‌شوند[۱۳].

کیفیت انتقال و دریافت اطلاعات به طراحی فرستنده- گیرنده در نانو ماشین بستگی دارد و در این راستا با پرسش‌های فراوانی مواجه هستیم. مثلاً، چگونه مولکول‌های جدید را از محیط گرفته و آن‌ها را برای کدگذاری اطلاعات دست‌کاری کنیم؟، چگونه مولکول‌های دریافت شده را مدیریت کنیم؟، چگونه فرآیند اتصال در گیرنده‌ها، می‌توانیم میان گیرنده‌ها و سیگنال اطلاعات را بهتر درک کنیم و ویژگی‌هایی از قبیل نرخ انتشار و حساسیت گیرنده را مورد ارزیابی قرار دهیم.

انتشار سیگنال‌های مخابراتی در شبکه‌های نانویی، به‌طورکلی با شبکه‌های مخابراتی کلاسیک متفاوت است. استفاده از مولکول‌ها به‌جای امواج الکترومغناطیسی یا صوتی، باعث می‌شود انتشار اطلاعات در آن‌ها، به پارامترهای متعدد دیگری در محیط مانند چسبندگی مایع و دما نیز وابسته باشد و شرایط کنترل نشده محیطی مانند باران، موانع، باد و جزر و مد، نیز می‌توانند بر گذرگاه ارتباطی

تأثیر بگذارند.

قبل از توسعه مکانیسم‌ها و پروتوکل‌های ارتباطی، باید مدل کانال و مسائل مربوط به انتشار سیگنال، تحلیل و درک شوند. می‌توان از طریق مدل‌های حرکت براونی، حرکت آزادانه ذرات در مایعات را توصیف کرد و با استفاده از چنین مدل‌هایی، به بررسی مخابرات مبتنی بر انتشار مولکول‌ها و سایر روش‌های نزدیک برد مبتنی بر انتشار ذرات پرداخت. برای تعیین ظرفیت کانال مولکولی، می‌توان خصیصه‌های پیوندی فرستنده- گیرنده‌ها را به مدل‌های انتشار اضافه کرد و با دقیق کردن این مدل‌ها، آن‌ها را برای توصیف مدل‌های کدگذاری پیچیده‌تر مانند AM[1] و FM[2]، به کار گرفت[۱۳].

اگر به‌عنوان حامل اطلاعات، از موتورهای مولکولی استفاده کنیم، انتشار آن، به زیرساخت شبکه نانویی محدود می‌شود و بنابراین، می‌توان فرآیند مخابراتی را با قطعیت بیشتری موردمطالعه قرار داد. در این راستا، باید بتوان سرعت انتشار سیگنال‌ها در کانال فیزیکی و قابلیت اعتماد انتقال توسط ریل‌های مولکولی را اندازه گرفت. شبیه‌سازی همزمان مدل‌های متفاوت، ارزیابی معماری شبکه نانویی را ساده‌تر می‌کند و ابزار تشخیص و اصلاح تنگناهای شبکه را فراهم می‌سازد. به‌این‌ترتیب، می‌توان روش‌های مختلف مدولاسیون و کدگذاری را تحلیل کرد و برای به دست آوردن ظرفیت کل کانال، رفتار شبکه را در بارهای ترافیکی متفاوت موردبررسی قرارداد.

در طراحی شبیه‌سازی‌های شبکه‌های نانویی، باید منابع نویز در مقیاس نانو مشخص و دسته‌بندی کرد. مثلاً در هنگام استفاده از بسته‌های DNA برای انتقال اطلاعات، جهش در DNA و وقوع واکنش‌های شیمیایی در کانال، به تخریب اطلاعات دریافتی، منجر می‌شود. بعد از شناسایی منابع متفاوت نویز، برای بازیابی اطلاعات اولیه، باید از روش‌های تشخیص و اصلاح خطا، استفاده کنیم و تا حد امکان خطاهای کانال را کاهش دهیم.

۱-۷-۳ معماری و پروتوکل‌های انتقال دانش

توسعه شبکه‌های نانویی را می‌توان از طریق معماری لایه شامل پروتوکل‌های دسترسی به رسانه، روش‌های مسیریابی و واسط‌های عملیاتی، انجام داد. برای تعریف و اعمال مکانیسم‌های مدیریت عادلانه کانال، به یک پروتکل دسترسی به رسانه، (MAC[3])، متناسب با ساختار شبکه موردنظر، نیازمندیم. در شبکه‌های مولکولی زیستی، بسیاری از روش‌های دسترسی به کانال بر تقسیم کد مبتنی هستند. در شبکه‌های نانویی نیز، برای انتقال اطلاعات می‌توان از روش‌های کدگذاری مولکولی

[1] Amplitude Modulation
[2] frequency modulation
[3] Medium Access Control

متعددی استفاده کرد که با یکدیگر تداخل ندارند و شرایط محیطی مانند میزان ویسکوزیته مایع را تغییر نمی‌دهند. یکی از نمونه‌های بارز این روش، مخابرات مبتنی بر مهندسی مولکول‌ها است که در آن، هر کانال ارتباطی، از مولکول متفاوتی به‌عنوان اطلاعات استفاده می‌کند که تنها توسط گیرنده متناظر با آن، قابل کدگشایی است و به‌این‌ترتیب در یک رسانه انتقال واحد، به‌طور همزمان، کانال‌های ارتباطی متعددی میان گونه‌های متفاوت از جاندار وجود دارند. یک روش دسترسی به رسانه دیگر که در سیستم‌های زیستی مورداستفاده قرار می‌گیرد، بر مدولاسیون فرکانس (FM) و مدولاسیون دامنه (AM)، برای سیگنال مولکولی مبتنی است. در این روش‌ها کانال‌های مخابراتی میان نانو ماشین‌ها، با استفاده از فرکانس‌ها و دامنه‌های متفاوت سیگنال ایجاد می‌شوند و هر کانال دامنه و فرکانس تنها توسط نانو ماشین‌های ویژه آن کانال قابل استفاده است. برای شبکه‌های پیچیده‌تر، به روش‌های آدرس‌دهی و مسیریابی نیز نیازمندیم. چون، برای ارتباطات دوطرفه و چند گامی، باید بسته شامل اطلاعاتی در مورد مبدأ و مقصد خود باشد. با توجه به این‌که در مدل‌های طبیعی شبکه‌های نانویی، اطلاعات عمدتاً بدون آدرس‌دهی مشخص توسط فرستنده، کدگذاری و همه‌پخشی می‌شوند، نحوه قرارگیری این اطلاعات مسیریابی در بسته‌های مولکولی، یک زمینه تحقیقاتی بسیار جدید به شمار می‌رود. در شبکه‌های زیستی، فرض می‌شود که تنها فرستنده- گیرنده‌های مجاز به کانال دسترسی دارند و زمانی که اطلاعات به گیرنده می‌رسد، با صرف‌نظر از منبع ارسال‌کننده آن، به اطلاعات مولکولی بسته واکنش نشان می‌دهد. بنابراین، می‌توان این شبکه‌های نانویی را داده محور در نظر گرفت. این رفتار در مخابرات فرمونی، شبکه سلول‌های زنده، انتقال دارو و درمان‌های هورمونی، مشاهده می‌شود که در گیرنده، واکنش موردنظر از طریق خود سیگنال مولکولی ایجاد می‌شود که حاوی هیچ اطلاعات خاصی در مورد منبع آن نیست. در مقابل عدم نیاز به آدرس فرستنده، عموماً وجود آدرس گیرنده در شبکه‌های داده محور، امری الزامی است و نانو ماشین‌های عضو شبکه باید بتوانند از طریق آدرس مقصد مسیر مناسب برای ارسال بسته را پیدا کنند. با توجه به استفاده از همه پخشی در شبکه‌های طبیعی، قابلیت مسیریابی در این شبکه‌ها، چندان حیاتی نیست و برای ارتباط نانو ماشین‌های پیچیده‌تر، باید راه‌حل‌های جدیدتری ابداع شوند[۱۴].

شبکه‌های نانویی، عموماً برای اهداف مشخصی توسعه می‌یابند که این شرح وظایف، یا در یک کنترلر اصلی در شبکه مشخص می‌شود و یا به‌صورت کدهای توزیع‌شده در نانو ماشین‌های عضو شبکه، قرار می‌گیرد. در این راستا، باید تمام جزئیات واسط ارتباطی میان کنترلر نانو ماشین و سایر اجزای شبکه، مطالعه و تحلیل شود و واسط‌های استانداردی شامل پروتوکل‌ها و زیربناهای لازم برای انتقال، کدگشایی و اتخاذ واکنش مناسب به مولکول‌های اطلاعات، ارائه گردد. این واسط‌ها باید برای

سیستم‌های ماکرویی عضو شبکه نانویی، مانند شبکه رایانه‌های نظارتی در مهندسی پزشکی، با مسائل نظامی، نیز قابل‌استفاده باشند[۱۴].

قابلیت اطمینان مخابراتی یکی از مسائل کلیدی دیگر در شبکه‌های نانویی است. در بعضی از کاربردها، به مکانیسم‌های قابل اعتمادی برای نظارت یا قطع روند تبادل بسته‌ها یا فرایندهای مداوم 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 قرار داد.

کلیه مدل‌های ریاضی که تاکنون، برای انواع مختلف شبکه‌های نانویی ارایه شده‌اند، در مراحل اولیه تحقیقاتی خود قرار دارند و با محدودیت‌های فراوان و فرض‌های غیرواقعی در بیان مسائل روبه‌رو هستند. هرچند که ویژگی‌های مخابرات مولکولی، با مخابرات سنتی مبتنی بر امواج الکترومغناطیسی متفاوت است، روزبه‌روز بر توجه دانشمندان حوزه فن‌آوری اطلاعات به این حوزه جدید میان‌رشته‌ای، افزوده می‌شود[۱۵].

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 باهمکاری کمیته‌های تحقیقاتی زیست‌شناسی و مهندسی مخابرات امکان‌پذیر خواهد بود.

۱-۸ اهداف پایان‌نامه

در این پایان‌نامه، علاوه بر معرفی کامل یک سیستم مخابرات مولکولی که متشکل از فرستنده، کانال و گیرنده می‌باشد، سعی شده است که پارامترهایی از مخابرات مولکولی مانند، نویز، تداخل، تغییر فاصله گیرنده و فرستنده، شار و تعداد مولکول‌های ارسالی توسط فرستنده که بر کارایی سیستم تأثیر می‌گذارند بررسی کنیم. برای این منظور ما ابتدا رابطه‌ای برای احتمال خطا بر اساس این پارامترها به دست آوردیم و تأثیر هرکدام از این پارامترها بر روی احتمال خطا بررسی کرده‌ایم. در مقالات فاصله بین فرستنده و گیرنده و همچنین تعداد مولکول‌های ارسالی را ثابت در نظر گرفته‌اند. در پایان ما با فرض اینکه فاصله بین فرستنده و گیرنده ثابت نیستند، بدون استفاده از فیدبک یا تخمین، روشی را برای تعین بهترین مقدار آستانه در گیرنده‌یا تعداد مولکول‌های ارسالی توسط

فرستنده معرفی کرده‌ایم که به ازای آن مقدار احتمال خطا همچنان کمینه باقی بماند.

در فصل دوم، به‌مرور کارهای پیشین خواهیم پرداخت و کارهایی که مرتبط با پایان‌نامه هستند را بیشتر توضیح خواهیم داد. در فصل سوم فرستنده، کانال و گیرنده را در یک سیستم مخابرات مولکولی مدل خواهیم کرد و توابع ریاضی حاکم بر آن‌ها را به دست خواهیم آورد. و درنهایت در فصل چهارم سیستم مدل را بیان خواهیم کرد و عوامل و پارامترهایی که بر روی احتمال خطا تأثیر دارند و همچنین راه‌حل‌هایی برای مقابله با این عوامل بررسی خواهیم کرد.

فصل دوم

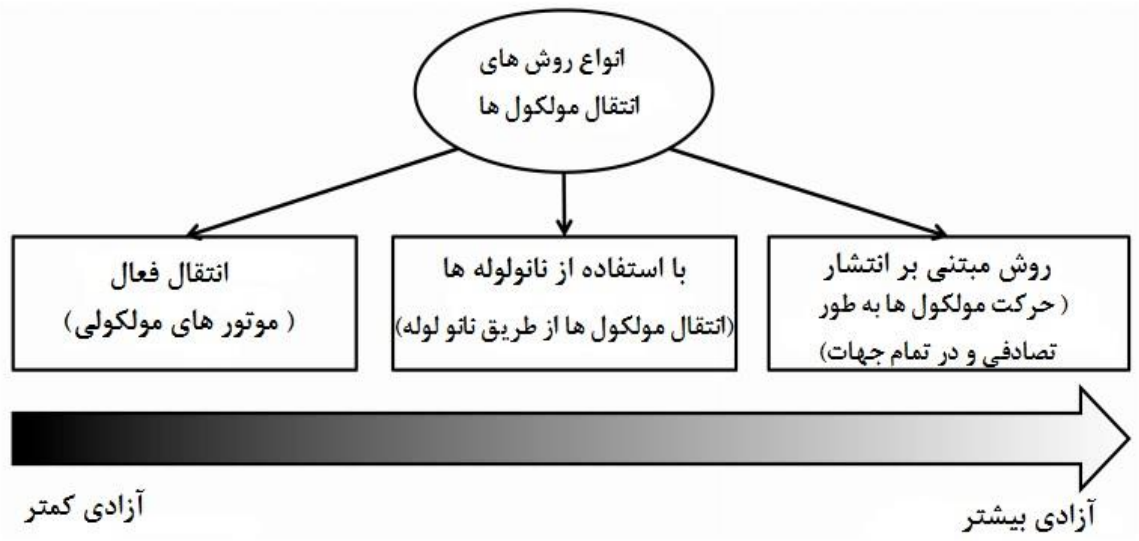
مروری بر

کارهای پیشین

در این فصل مروری خواهیم داشت به کارهایی که در این زمینه انجام‌شده‌اندT برای این منظـور در دو بخش به توضیح کارهای پیشین می‌پردازیم. در بخش ۲-۱، مروری خواهیم داشت به روش‌های مختلفی که در مخابرات مولکولی برای انتشار مولکول‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرد. در بخـش ۲-۲ بـر روی کارهایی که به این پایان‌نامه نزدیک و مرتبط هسـتند تمرکـز خـواهیم داشـت و بـه‌مـرور آن‌هـا خواهیم پرداخت.

۲-۱ روش‌های مختلف در مخابرات مولکولی

روش‌های مختلفی در مخابرات مولکولی برای انتشار مولکـول‌هـا در محـیط سـیال[1] موردمطالعـه قرارگرفته‌اند اما در کل سه روش اصلی در اکثر مقاله‌ها مورداستفاده قرار می‌گیـرد کـه در شـکل۲-۱ نشان داده‌شده است[۱۷]. با توجه به شکل ۲-۱ این روش‌ها عبارت‌اند از، روش مبتنی بر انتقال فعال[2] (استفاده از موتورهای مولکولی)، روش مبتنی بر نانولوله‌ها[3] و روش مبتنی بر انتشار[4]، و همان‌طور کـه نشان داده‌شده است درروش مبتنی بر انتشار مولکول‌ها از آزادی بیشتری نسبت بـه روش‌هـای دیگـر برخوردار هستند و به‌طور آزادانه در محیط پخش می‌شوند.



شکل ۲-۱- روش های مختلف در مخابرات مولکولی برای انتشار مولکول ها در محیط

تأکید می‌کنیم که ما در این پایان‌نامه از روش مبتنی بر انتشار مولکـول‌هـا بـرای مـدل‌سـازی و شبیه‌سازی استفاده کرده‌ایم.

[1] Fluidic Medium
[2] Active Transport-based
[3] Advection-based
[4] Diffusion-based

درروش مبتنی بر انتقال فعال، مولکول‌ها از طریق انتقال‌دهنده‌های فعال (موتورهای مولکـولی) و از طریق مسیر مشخصی که بین فرستنده و گیرنده وجود دارد منتقل می‌شوند. در این روش مولکول‌ها از طریق موتورهای مولکولی و با مصرف انرژی جابه‌جا می‌شوند [۱۶]،[۱۷]. موتورهای مولکـولی [۱۸] مانند کینزین، دینزین ومیوزین، پروتئین‌هایی هستند که با استفاده از انرژی شیمیایی، حرکـت ایجـاد می‌کنند. این موتورهای پروتئینی، می‌توانند بسته‌های داده را به‌صورت مولکول از فرستنده به گیرنـده منتقل کنند. در [۱۶] ،[۱۷] به نحوی اتصال فیزیکی موتورهای مولکولی به نانو ماشین‌های فرستنده و گیرنده و چگونگی تولید نیرو برای انتشار مولکول‌ها پرداخته است. بـه ایـن روش انتقـال فعـال گفتـه می‌شود چون برای انتقال مولکول‌ها باید انرژی مصرف شود.

درروش مبتنی بر نانولوله‌ها، مولکول‌ها از طریق نانولوله‌هایی که از فرسـتنده بـه گیرنـده متصـل هستند منتقل می‌شوند، در این نانولوله‌ها شار یا جریان هم می‌توانـد وجـود داشـته باشـد[۱۹]،[۲۰]. درنتیجه در این روش، جابه‌جایی مولکول‌ها تعریف‌شده و قابل پـیش‌بینـی اسـت. تفـاوت آن بـا روش انتقال فعال در این است که در این روش مولکـول‌هـا در نانولولـه رهـا مـی‌شـوند و بـدون اسـتفاده از موتورهای مولکولی و بدون مصرف انرژی منتقل می‌شوند و از آزادی بیشتری برخوردار هستند[۲۱].

درروش مبتنی بر انتشار، مولکول‌ها در همه جهات و به‌طور تصـادفی و بـدون مصـرف انـرژی در محیط سیال پخش می‌شوند. در این روش نسبت به روش‌های دیگر مولکول‌ها بیشترین آزادی را دارند و هیچ محدودیتی در جهت و نحوه‌ی حرکت مولکول‌هـا وجـود نـدارد[۲۲]. ایـن روش اولـین بـار در [۲۳]،[۲۴]،[۲۵]، مورداستفاده قرار گرفت که در آن مولکول‌ها آزادانه و بـه‌طـور تصـادفی بـر اسـاس حرکت براونی[1] فاصله بین فرستنده و گیرنده را طی می‌کنند. مثالی کـه در ایـن زمینـه مـی‌شـود زد، مانند مولکول‌های هوا که در یک اتاق بـه‌طـور تصـادفی و در اثـر برخـورد بـه هـم در محـیط پخـش می‌شوند[۲۶]. تأکید می‌کنیم که در این پایان‌نامه از این روش برای انتقال مولکول‌ها استفاده کرده‌ایم.

۲-۲ مروری بر کارهای مرتبط با پایان‌نامه

در این بخش می‌خواهیم به‌مرور کارهایی بپردازیم که مرتبط با پایان‌نامـه هسـتند و بیشـتر روی آن‌ها تمرکز خواهیم کرد. به این منظور ابتدا به‌طـور خلاصـه خـواهیم گفـت کـه در ایـن پایـان‌نامـه چه‌کارهایی انجام داده‌ایم.

در [۲۷]،[۲۸] روابطی برای به دست آوردن احتمال خطا به دست آورده‌اند که ازجمله مشـکلات ایـن

[1] Brownian Motion

روابط سادگی زیاد و بررسی نکردن تأثیر تداخل ناشی از همه‌ی سمبل‌های قبلی است. ما در این پایان‌نامه از دو نوع روش برای به دست آوردن رابطه‌ی احتمال خطا استفاده کرده‌ایم که آن‌ها را باهم مقایسه کرده‌ایم. در [۲۹]،[۳۰] به بررسی تأثیر تداخل بر کارایی سیستم پرداخته و راه‌کارهایی برای کم کردن تداخل ارائه داده‌اند. اما به دلیل سادگی در اکثر مقاله‌ها از تأثیر سمبل‌های قبلی‌تر چشم‌پوشی کرده‌اند[۳۱]،[۳۰]. در [۳۲] به بررسی تأثیر همه سمبل‌های قبلی بر روی تداخل پرداخته است.در فصل‌های بعدی بیشتر به توضیح تداخل و تأثیر آن بر روی کارایی سیستم خواهیم پرداخت. در [۳۳]،[۳۴] به بررسی تأثیر شار بر روی غلظت مولکول‌های رسیده به گیرنده پرداخته است و برای سادگی در اکثر مقاله‌ها شار را در یک‌جهت و معمولاً هم‌راستا با فرستنده و گیرنده در نظر می‌گیرند.

در [۲۸]،[۲۹] به مدل کردن فرستنده و کانال و گیرنده و همچنین تأثیر نویز بر این مدل پرداخته است، نویز را ناشی از حرکت تصادفی مولکول‌ها می‌دانند که به‌طور تصادفی در هر جهتی پخش می‌شود. در [۳۵]،[۳۶] دو نوع مدولاسیون که بیشتر مورداستفاده قرار می‌گیرند استفاده‌شده است، هرچند که بعضی از مقاله‌ها از مدولاسیون‌هایی که ترکیب این دو نوع مدولاسیون است نیز استفاده کرده‌اند[۳۷]. مدولاسیون مبتنی بر غلظت مولکول‌ها که شبیه مدولاسیون دامنه در مخابرات کلاسیک است، مدولاسیون مبتنی بر غلظت، (CSK[1]) به این صورت است که به ازای ارسال یک غلظتی از مولکول‌ها و به ازای ارسال صفر غلظتی کمتر از غلظت ارسال یک می‌فرستیم. اگر به ازای ارسال صفر هیچی نفرستیم، یعنی هیچ غلظتی نفرستیم به آن مدولاسیون On-Off Keying می‌گویند. تداخل[2] در مدولاسیون On-Off Keying کمتر است .مدولاسیون مبتنی بر مهندسی مولکول‌ها، MoSK[3] شبیه مدولاسیون FSK[4] در مخابرات کلاسیک است، به‌این‌ترتیب که برای ارسال b بیت به 2^b نوع مولکول متفاوت نیاز داریم. یعنی برای ارسال ۱ بیت باید دو نوع مولکول متفاوت بفرستیم. در این نوع مدولاسیون هرچند تداخل نسبت به CSK کمتر است چون اثر ناشی از سمبل‌های قبلی در گیرنده کمتر می‌شود اما ازلحاظ پیچیدگی در فرستنده و گیرنده در مقایسه با CSK موجب می‌شود که کمتر از این نوع مدولاسیون در مقاله‌ها استفاده کنند. به‌خصوص برای ارسال بیت‌های بیشتر این پیچیدگی بیشتر نمایان می‌شود.

در [۳۸]،[۳۹] به بررسی روش‌هایی برای آشکارسازی پرداخته است، بیشتر مقالات از آشکارسازی بر اساس مقدار آستانه استفاده می‌کنند. آشکارسازی بر اساس مقدار آستانه ساده‌ترین نوع

---

[1] Concentration Shift Keying
[2] Interference
[3] Molecule Shift Keying
[4] Frequency Shift Keying

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 ارسال‌شده است. به دست آوردن بهترین مقدار آستانه برای گیرنده کار خیلی از مقالات را شامل می‌شود[۴۰]. 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 فاصله بین فرستنده و گیرنده نیز می‌تواند مقدار آستانه بهینه را جابه‌جا کند به همین خاطر بعضی از مقالات به دنبال تخمین فاصله بین فرستنده و گیرنده هستند که گیرنده با توجه به فاصله‌ی تخمین زده بتواند مقدار آستانه‌ی خود را تنظیم کند.

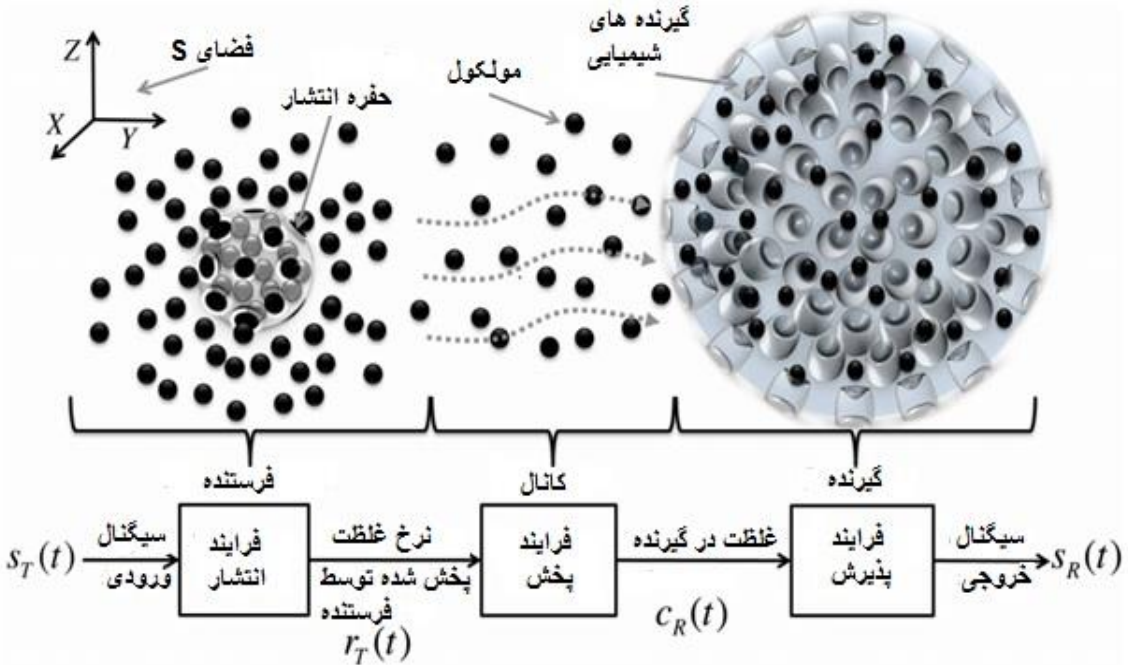
ازجمله مشکلاتی که در مخابرات مولکولی وجود دارد تغییر فاصله بین فرستنده و گیرنده است که این تغییر فاصله می‌تواند احتمال خطا را زیاد کند و کارایی سیستم را پایین بیاورد. در مخابرات کلاسیک با یک فیدبک ساده می‌توان از تغییر فاصله بین فرستنده و گیرنده اطلاع پیدا کرد و بدون کمترین تأخیری در به دست آوردن اطلاعات کارهای لازم را انجام داد. در [۴۱]،[۴۲] کارهایی برای به دست آوردن فاصله بین فرستنده و گیرنده با توجه به فیدبک انجام‌شده است، اما با توجه به کند بودن سیستم‌های مخابراتی که در ذات این نوع سیستم‌ها است، نمی‌توان در عمل از فیدبک استفاده کرد[۴۴]. در [۴۳]،[۴۵]،[۴۴] از تخمین برای به دست آوردن فاصله بین فرستنده و گیرنده استفاده کرده‌اند و فیدبک را حذف کرده‌اند اما با توجه به‌سادگی نانو ماشین‌های فرستنده و گیرنده نمی‌توان از آن‌ها انتظار داشت که عملیات پیچیده ریاضی را بتوانند انجام دهند. و با توجه به این‌که روش‌های تخمین روش‌های پیچیده ازنظر ریاضی هستند این نانو ماشین نمی‌توانند این روش‌ها را اجرا کنند. با توجه به این مشکلات، ما راه‌حلی برای تغییر فاصله بین فرستنده و گیرنده ارایه داده‌ایم که در فصل چهارم بیشتر به این موضوع خواهیم پرداخت.

فصل سوم

مدل کردن فرستنده، کانال و گیرنده در یک سیستم مخابرات مولکولی

۳-۱ اجزای اصلی در یک سیستم مخابرات مولکولی

همان‌طور که در شکل ۳-۱ نشان داده‌شده است اجزای اصلی در یک سیستم مخابرات مولکـولی را می‌توان به سه بخش کلی فرسـتنده (فراینـد انتشـار)، کانـال (فراینـد پخـش) و گیرنـده (فراینـد پذیرش) تقسیم کرد که در ادامه به‌طور جداگانه به توضیح هرکدام از بخش‌ها خواهیم پرداخت.



شکل ۳-۱- اجزای اصلی یک سیستم مخابرات مولکولی شامل فرستنده، کانال و گیرنده

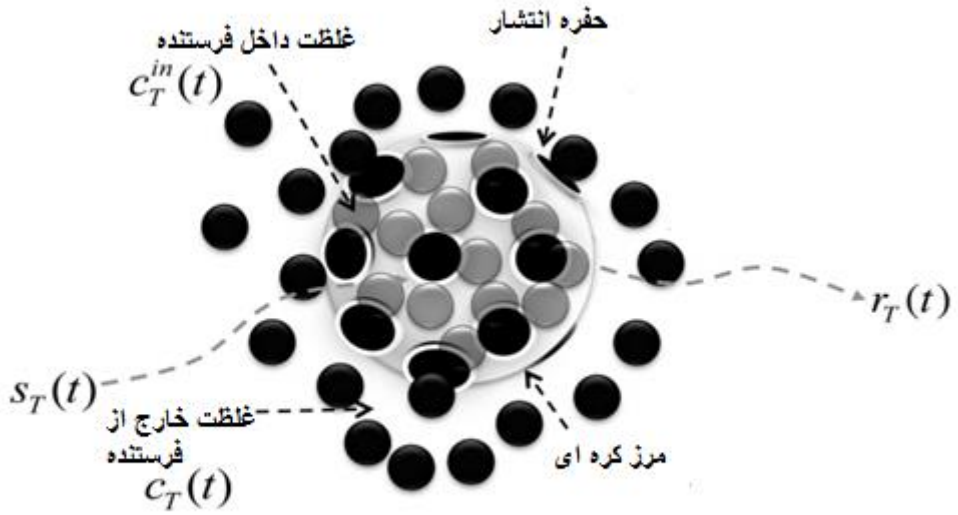
مولکول‌ها در فرستنده با توجه به سیگنال ورودی $S_T(t)$ مدوله می‌شوند و از طریق حفره‌هایی در فرستنده با نرخ $r_T(t)$ در محیط پخش می‌شوند. فرض شده است که محیط، سه‌بعدی و سـیال اسـت. منظور از سیال روان بودن محیط است. مولکول‌ها در نزدیکی فرسـتنده، غلظـت بیشـتری دارنـد و در جهت شیب غلظت و بدون مصرف انرژی در تمام جهات پخش می‌شوند. مولکول‌ها به‌طور تصادفی و از غلظت بیشتر به غلظت کمتر به‌طرف گیرنده، در محیط پخـش مـی‌شـوند کـه ایـن حرکـت تصـادفی 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 برحسـب شـرایط محیط، فاصله فرستنده و گیرنده و زمان به دست خواهیم آورد.

مولکول‌های رسیده به گیرنده توسط گیرنده‌های شیمایی که در سطح کره‌ای گیرنده قـرار دارنـد واکنش انجام می‌دهند و گیرنده از طریق این واکنش تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده را مـی‌توانـد حساب کند. درنتیجه گیرنده بر اساس تعداد مولکول‌های رسیده تصمیم می‌گیرد که فرستنده یک یـا

صفر ارسال کرده است.

۳-۲ فرایند انتشار

فرایند انتشار[1] شامل مدوله کردن مولکول‌ها در فرستنده بر اساس سیگنال ورودی $S_T(t)$ و واردکردن غلظتی از مولکول‌ها با نرخ $r_T(t)$ به کانال می‌باشد که در شکل ۳-۲ نشان داده‌شده است.



شکل ۳-۲- فرایند انتشار توسط فرستنده و پخش مولکول ها در محیط

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

$$S_T(t) = A \times rec\left(\frac{t - T_e/2}{T_e}\right) \qquad (۱-۳)$$

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

برای فرایند انتشار فرض‌هایی در نظر گرفته‌شده است ازجمله:

- فرستنده به‌صورت کره در نظر گرفته‌شده است که فضای مجاورت خود را به دو قسمت داخلی و بیرونی تبدیل می‌کند.
- ارتباط بین لایه داخلی و لایه بیرونی به‌وسیله‌ی حفره‌های انتشار برقرار می‌شود و مولکول‌ها از طریق این حفره‌ها در محیط منتشر می‌شوند.

[1] Emission Process

- $C_T^{in}(t)$ 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 $S_T(t)$ را دارد.

۳-۲-۱ انواع مدولاسیون در مخابرات مولکولی

در کل در مقاله‌ها از دو نوع مدولاسیون استفاده‌شده است، هرچند که بعضی از مقاله‌ها از مدولاسیون‌هایی که ترکیب این دو نوع مدولاسیون است نیز استفاده کرده‌اند.

۳-۲-۱-۱ مدولاسیون مبتنی بر غلظت مولکول‌ها

این نوع مدولاسیون شبیه مدولاسیون دامنه ASK[1] در مخابرات کلاسیک است[۳۵]. مدولاسیون مبتنی بر غلظت CSK به این صورت است که 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 هیچی نفرستیم، یعنی هیچ غلظتی نفرستیم به آن مدولاسیون On-Off Keying می‌گویند. تداخل[2] در مدولاسیون On-Off Keying کمتر است و در مقاله‌ها بیشتر این نوع مدولاسیون را در نظر می‌گیرند.

۳-۲-۱-۲ مدولاسیون مبتنی بر مهندسی مولکول‌ها

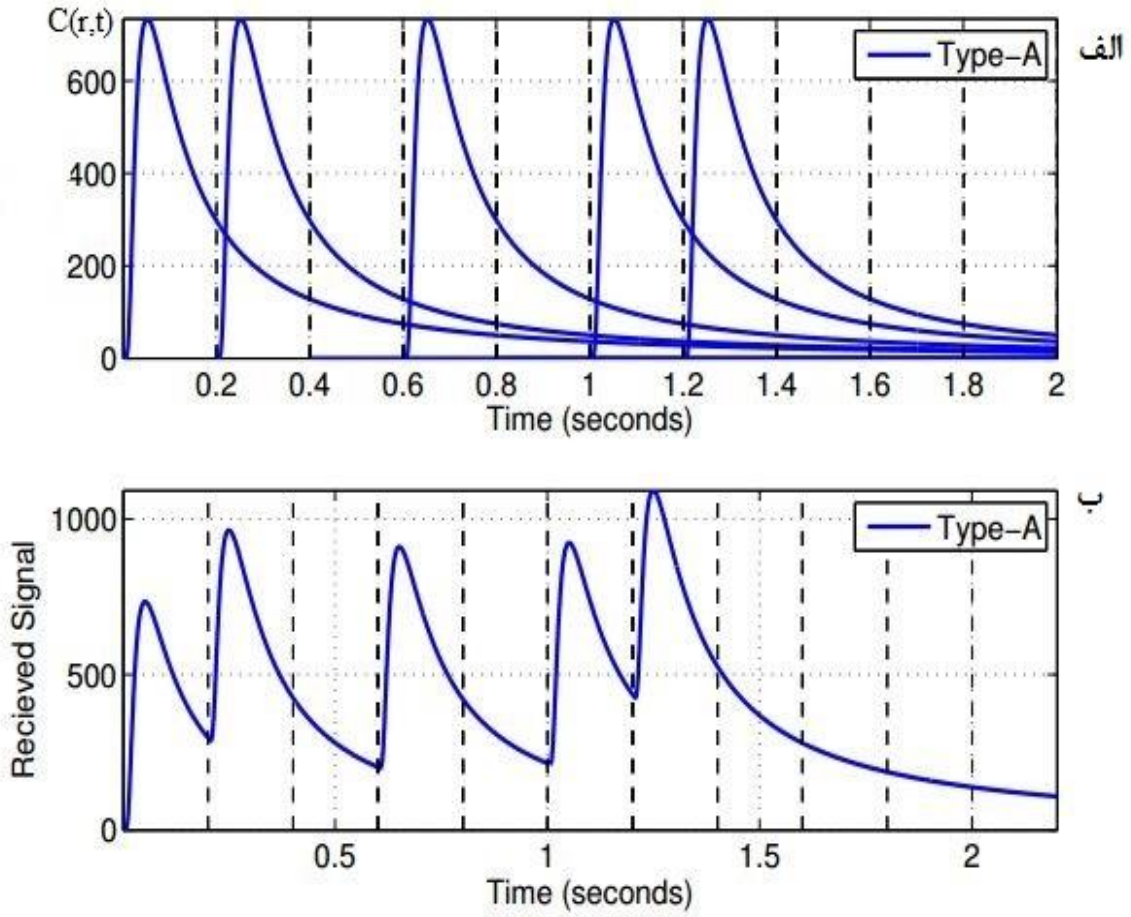
مدولاسیون مبتنی بر مهندسی مولکول‌ها MoSK شبیه مدولاسیون FSK در مخابرات کلاسیک است، به‌این‌ترتیب که برای ارسال b بیت به 2^b نوع مولکول متفاوت نیاز داریم. یعنی برای ارسال ۱ بیت باید دو نوع مولکول متفاوت بفرستیم. در این روش به ازای ارسال یک از یک نوع مولکول و برای ارسال صفر از نوعی دیگر استفاده می‌شود که این مولکول‌ها می‌توانند در اندازه، شکل ظاهری یا قطبیت باهم تفاوت داشته باشند.

در این نوع مدولاسیون هرچند تداخل نسبت به CSK کمتر است چون اثر ناشی از سمبل‌های قبلی در گیرنده کمتر می‌شود اما ازلحاظ پیچیدگی در فرستنده و گیرنده در مقایسه با CSK موجب می‌شود که کمتر از این نوع مدولاسیون در مقالات استفاده کنند [۳۶]. به‌خصوص برای ارسال بیت‌های بیشتر این پیچیدگی بیشتر نمایان می‌شود. تأکید می‌کنیم که ما در این پایان‌نامه از مدولاسیون مبتنی بر غلظت مولکول‌ها استفاده کرده‌ایم.

---

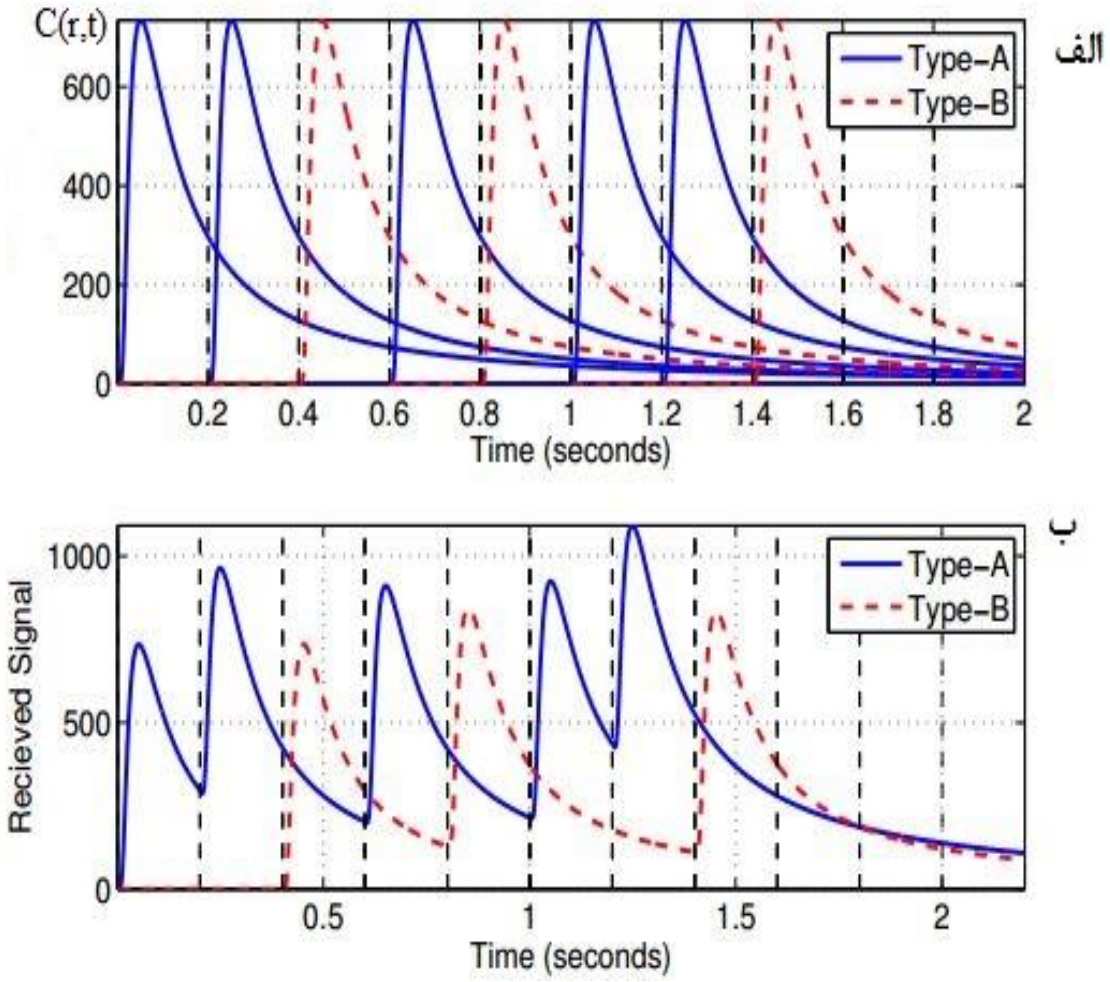
[1] Amplitude Shift Keying
[2] Interference

در شکل ۳-۳ تأثیر تداخل بر روی سیگنال دریافتی توسط گیرنده در مدولاسیون مبتنی بر غلظت مولکول‌ها نشان داده‌شده 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 براثر تداخل تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده خیلی افزایش می‌یابد که ممکن است موجب خطا در گیرنده شود. شکل ۳-۳- الف غلظتی را که فرستنده می‌فرستد را نشان می‌دهد و شکل ۳-۳- ب غلظتی که به گیرنده می‌رسد را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳- تأثیر تداخل در مدولاسیون مبتنی بر غلظت مولکول‌ها،اگر بیت‌های ارسالی به ترتیب $\{1,1,0,1,0,1,1\}$، [۵۲]

در شکل ۳-۴ تأثیر تداخل بر روی سیگنال دریافتی توسط گیرنده در مدولاسیون مبتنی بر مهندسی مولکول‌ها نشان داده‌شده 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، به‌طورکلی 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 ۳-۴- الف غلظتی را که فرستنده می‌فرستد را نشان می‌دهد و شکل ۳-۴- ب غلظتی که به گیرنده می‌رسد را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴- تا ثیر تداخل در مدولاسیون مبتنی بر مهندسی مولکول ها،اگر بیت های ارسالی به ترتیب $\{1,1,0,1,0,1,1\}$، [۵۲]

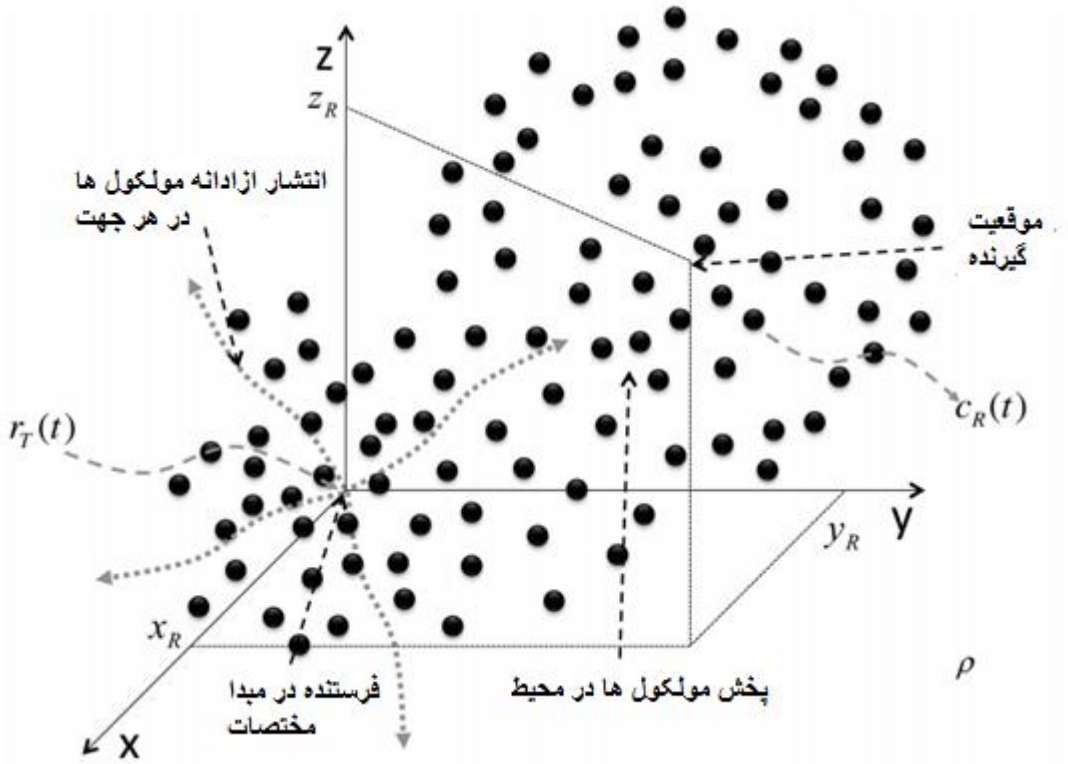
۳-۳ فرایند پخش مولکول‌ها در کانال

در فرایند پخش[1] همان‌طور که در شکل ۳-۵ نشان داده‌شده است مولکول‌ها از فرستنده، که در مبدأ مختصات قرار دارد در محیط پخش می‌شوند، محیط سه‌بعدی در نظر گرفته‌شده است و همچنین فرض شده است که محیط پخش یا همان کانال، سیال[2] و یکنواخت است. غلظت مولکول‌های رسیده به گیرنده $C_R(t)$ در مختصات $[x_R, y_R, z_R]$ به‌عنوان خروجی فرایند پخش در نظر می‌گیریم. مولکول‌ها از فرستنده با حرکت تصادفی و بر اساس حرکت براونی 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. البته همچنین کانال 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 ۳-۵ فرایند 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 دارند. 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 نیز می‌باشد. سایر عوامل مانند بار ذره (مثبت یا منفی) و ماهیت ماده نیز مؤثر است. در سلول، مواد مختلف به دو روش منتقل می‌شوند: انتقال فعال و انتقال غیرفعال. مولکول‌های کوچک مانند اکسیژن، اتانول و دی‌اکسید کربن می‌توانند به آسانی از غشای سلول عبور کنند. اگر غلظت این مولکول‌ها در فضای درون سلول تفاوت زیادی با بیرون داشته باشد، مولکول‌ها از غشاء عبور می‌کنند و به‌طرف مقابل می‌روند تا تفاوت غلظت‌ها کاهش پیدا کند. این فرآیند، همان انتقال غیرفعال است. دلیل این نام‌گذاری آن است که برای انجام آن انرژی صرف نمی‌شود. اما برای انتقال مولکول‌های بزرگ مانند پروتئین‌ها، پلی نوکلئوتیدها و پلی ساکاریدها باید از روش دیگری استفاده شود. انتقال این

[1] Diffusion Process
[2] Fluidic

مولکول‌ها نیاز به انرژی دارد و انتقال فعال نامیده می‌شود.



شکل ۳-۵- فرایند پخش مولکول‌ها در کانال که به‌طور آزادانه و در هر جهتی به‌سوی گیرنده پخش می‌شوند

همان‌طور که قبلاً گفتیم مخابرات مولکولی برگرفته از ارتباط سلول‌های بدن است و همان‌طور که می‌دانیم در سلول، مواد مختلف به دو روش منتقل می‌شوند: انتقال فعال و انتقال غیرفعال. مولکول‌های کوچک مانند اکسیژن، اتانول و دی‌اکسید کربن می‌توانند به‌آسانی از غشای سلول عبور کنند. اگر غلظت این مولکول‌ها در فضای درون سلول تفاوت زیادی با بیرون داشته باشد، مولکول‌ها از غشاء عبور می‌کنند و به‌طرف مقابل می‌روند تا تفاوت غلظت‌ها کاهش پیدا کند. این فرآیند، همان انتقال غیرفعال است. دلیل این نام‌گذاری آن است که برای انجام آن انرژی صرف نمی‌شود؛ اما برای انتقال مولکول‌های بزرگ مانند پروتئین‌ها، پلی نوکلئوتیدها و پلی ساکاریدها باید از روش دیگری استفاده شود. انتقال این مولکول‌ها نیاز به انرژی دارد و انتقال فعال نامیده می‌شود.

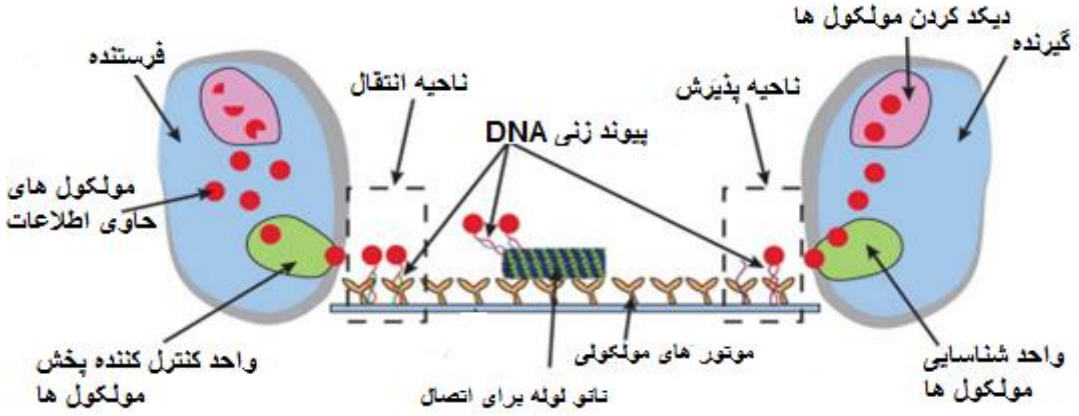
۳-۳-۱ انتقال غیرفعال

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، شکل ۳-۵ نمونه‌ای از

پخش غیرفعال است. تأکید می‌کنیم که ما در این پایان‌نامه پخش غیرفعال را در نظر گرفتیم و معادلات ریاضی مبتنی بر این نوع پخش است. به‌عنوان‌مثال، 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 وقتی‌که به تعادل برسد ادامه خواهد داشت.

۳-۳-۲ انتقال فعال

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. همان‌طور که در شکل ۳-۶ نشان داده‌شده است، مولکول‌ها که حاوی اطلاعات هستند از طریق موتورهای مولکولی، و با مصرف انرژی که از واکنش‌های شیمیایی به دست می‌آید به سمت گیرنده حمل می‌شوند.



شکل ۳-۶- انتقال فعال : جابه جایی مولکول ها با استفاده از موتورهای مولکولی[۴۶]

۳-۳-۳ معادله‌های حاکم بر پخش مولکول‌ها

در این قسمت می‌خواهیم رابطه‌ی غلظت مولکول‌های پخش‌شده در محیط برحسب زمان، فاصله‌ی فرستنده و گیرنده و شرایط محیط به دست بیاوریم. برای 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[1] برای توصیف تغییر غلظت مولکول‌ها نسبت به زمان هنگام فرایند پخش استفاده می‌شود [۴۷]. 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 :

$$\frac{\partial C(r,t)}{\partial t}=D\nabla^2 C(r,t) \qquad (۲-۳)$$

که $\nabla^2 C(r,t)$ مجموع مشتق دوم یا همان گرادیان $C(r,t)$ در محیطی سه‌بعدی است. در اینجا D ضریب انتشار[2] است که با معادله زیر بیان می‌شود[۳۴]:

$$D=\frac{k_B T}{6\pi\eta R_m} \qquad (۳-۳)$$

که k_B ثابت بولتزمن ($k_B=1.38\times10^{-23}$)، T دما برحسب کلوین، η چسبناکی محیط و R_m شعاع مولکول‌های ارسالی است. همان‌طور که از رابطه‌ی (۳-۳) 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 (۳-۲) به شرایط اولیه زیر نیاز داریم :

$$C(r_T,t=0)=M\delta(r_T) \qquad (۴-۳)$$

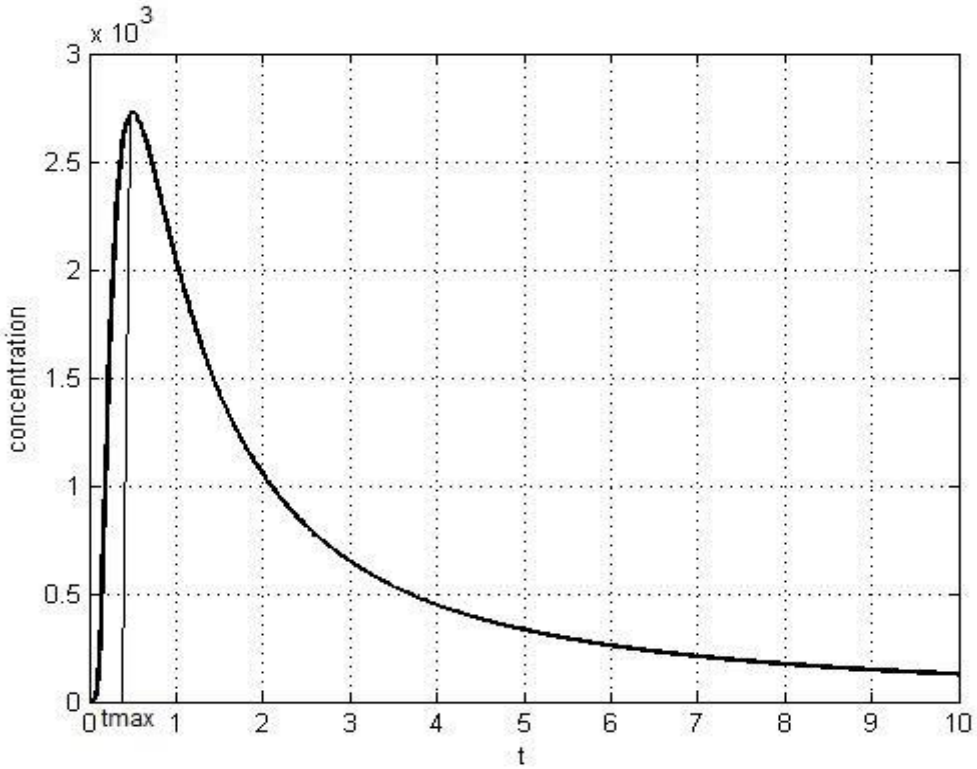
رابطه‌ی بالا نشان‌دهنده‌ی این است که ضربه‌ای به تعداد M مولکول از فرستنده در محیط پخش می‌شوند. $r_T=(x_T,y_T,z_T)$ موقعیت مکانی فرستنده و $\delta(.)$ تابع ضربه است. بنابراین غلظت مولکول‌های پخش‌شده در محیط از طرف فرستنده برحسب زمان و فاصله گیرنده و فرستنده با توجه به رابطه زیر به دست می‌آید[۳۳] :

$$C(r,t)=\frac{M}{\sqrt{(4\pi Dt)^3}}\exp\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right) \qquad (۵-۳)$$

[1] Fick Second Law
[2] Diffusion Coefficient

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

در شکل ۳-۷ غلظت مولکول‌های پخش‌شده در محیط برحسب زمان رسم شده است. همان‌طـور که مشاهده می‌کنیم در زمان $t_{\max}$ غلظت مولکول‌ها بیشترین مقدار خـود را دارد و بعـدازاین زمـان به‌طور نمایی کاهش پیدا می‌کند. این نمودار به ازای $r = 300nm$، $M = 5000$ رسم شده است.



شکل ۳-۷- غلظت مولکول‌های پخش‌شده در محیط برحسب زمان

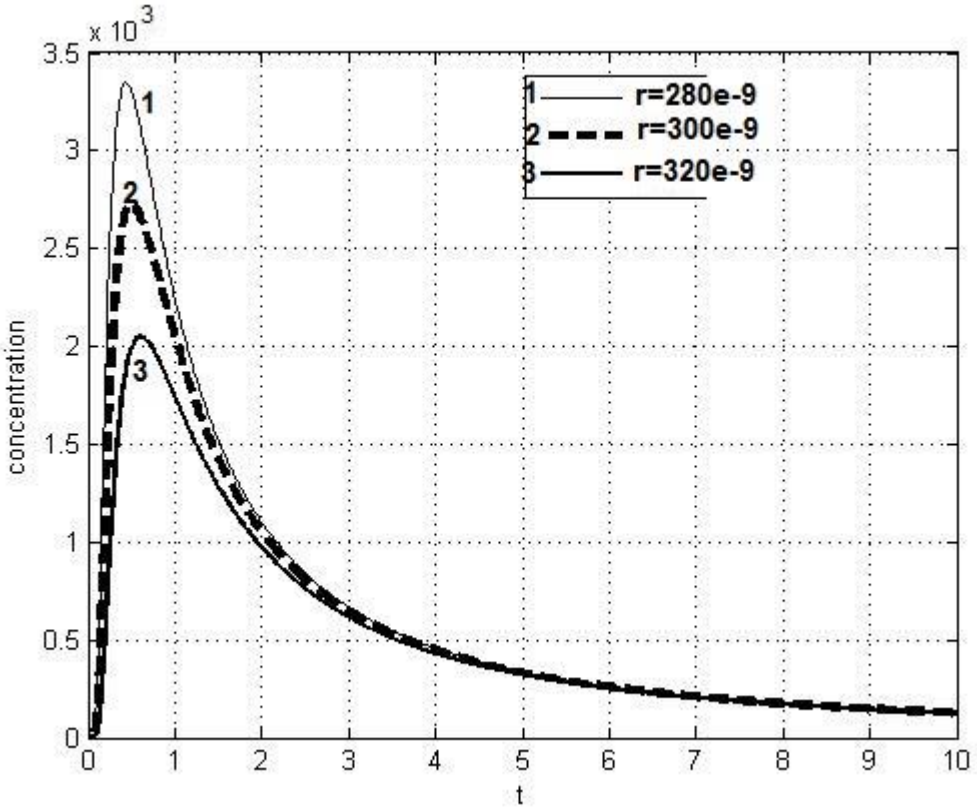
برای به دست آوردن $t_{\max}$ کافی است که از رابطه‌ی (۳-۵) نسبت به زمان مشتق بگیریم و برابر صفر قرار دهیم، درنتیجه خواهیم داشت:

$$t_{\max} = \frac{r^2}{6D} \qquad (۳-۶)$$

با توجه به رابطه (۳-۵) غلظت مولکول‌های پخش‌شده در محیط تحت تأثیر عوامل مختلفـی ازجملـه، تعداد مولکول‌های ارسالی، ضریب انتشار و فاصله بین فرستنده و گیرنده قرار دارد.کـه هرکـدام از ایـن عوامل به نحوی بر روی غلظت مولکول‌ها تأثیر می‌گذارد. در این پایان‌نامه ما فرض کردیم کـه ضـریب انتشار ثابت است چون دما و چسبندگی محیط را ثابت در نظـر گرفتـه‌ایـم. در اکثـر مقالـه‌هـا فـرض

کرده‌اند که فاصله بین فرستنده و گیرنده و همچنین تعداد مولکول‌هایی که فرستنده می‌فرستد ثابت است، درحالی‌که تغییر بسیار کمی از این دو پارامتر می‌تواند خیلی بر غلظت مولکول‌ها تأثیر بگذارد.

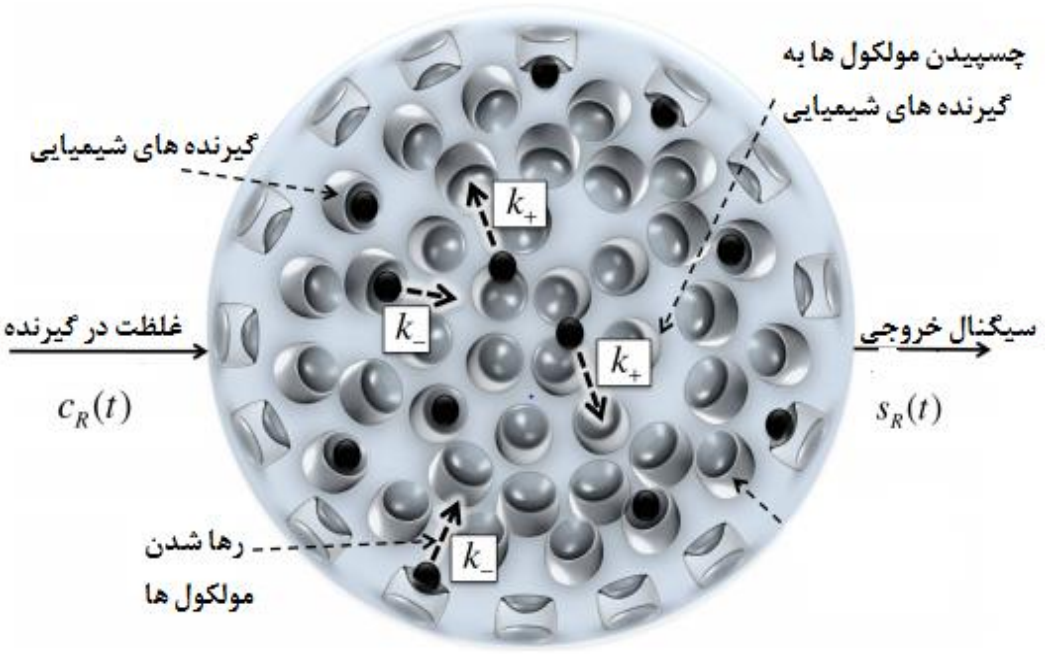
شکل ۳-۸ غلظت مولکول‌ها را برحسب زمان برای فاصله‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به رابطه‌ی (۳-۵) می‌توان گفت که هر چه فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده بیشتر شود غلظت مولکول‌های رسیده به گیرنده کمتر خواهد شد که کاملاً منطقی هم است. پس درصورتی‌که ما یک سیستم مخابرات مولکولی را برای فاصله ثابت طراحی کنیم با کوچک‌ترین تغییر در فاصله ممکن است کارایی سیستم به‌کلی از بین برود. فرض این‌که فاصله می‌تواند تغییر کند کاملاً منطقی است چون نانو فرستنده و گیرنده در یک محیط سیال قرار دارند و هرلحظه ممکن است به علت وجود شار یا هر عامل دیگری فاصله تغییر کند. در فصل چهار بیشتر به این موضوع خواهیم پرداخت و راه‌حلی هم برای این مشکل ارایه خواهیم داد.



شکل ۳-۸- غلظت مولکول ها بر حسب زمان به ازای فاصله های مختلف

۳-۴ فرایند پذیرش مولکول‌ها در گیرنده

همان‌طور که در شکل ۳-۹ نشان داده‌شده است از طریق فرایند پـذیرش[1]، مولکـول‌هـای رسـیده بـه گیرنده $C_R(t)$ از طریق واکنش شیمیایی حس می‌شوند و گیرنده می‌تواند تشخیص دهد که چه تعداد مولکول به گیرنده رسیده است. در سطح گیرنده، گیرنده‌های شیمیایی قرار دارند که ابتدا مولکول‌هـای رسیده به گیرنده با ضریب K_+ به این گیرنده‌های شیمیایی می‌چسـبند و بعـد از انجـام واکـنش ایـن گیرنده‌های شیمیایی مولکول را با ضرب K_- دوباره در محیط رها می‌کنند.



شکل ۳-۹- فرایند پذیرش مولکول ها

برای فرایند پذیرش فرض‌هایی در نظر گرفته‌شده است ازجمله:

- گیرنده به‌صورت کره در نظر گرفته‌شده است، همچنین فضای اطراف گیرنده که گیرنـده در مرکز این فضا در نظر گرفته‌شده است نیز کره‌ای به شعاع ρ است.
- غلظت مولکول‌های قرارگرفته در فضای اطراف گیرنده‌یکنواخت در نظر گرفته‌شده اسـت که در [۴۸] اثبات‌شده است که این فرض درست است.
- فرض شده است که گیرنده‌های شیمیایی به‌طور یکنواخت در تمام سطح کره قرار دارند.

[1] Reception Process

- مولکول‌ها با ضریب K_+ به گیرنده‌های شیمیایی می‌چسبند و با ضریب K_- دوباره در محیط رها می‌شوند.

۳-۴-۱ روش‌های آشکارسازی در گیرنده

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

۳-۴-۱-۱ آشکارسازی بر اساس مقدار آستانه

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 ارسال‌شده 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 نیز می‌تواند مقدار آستانه‌ی بهینه را جابه‌جا کند به همین خاطر بعضی از مقاله‌ها به دنبال تخمین فاصله بین فرستنده و گیرنده هستند که گیرنده با توجه به فاصله‌ی تخمین زده بتواند مقدار آستانه‌ی خود را تنظیم کند. باید تأکید کنم که یکی از کارهایی که در این پایان‌نامه انجام داده‌ایم پیدا کردن نقطه بهینه برای آستانه گیرنده است با فرض این‌که فاصله بین فرستنده و گیرنده ثابت نباشد.

۳-۴-۱-۲ 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 تصمیم می‌گیرد که یک ارسال‌شده است در غیر این صورت تصمیم می‌گیرد که صفر ارسال‌شده است[۴۹]. انرژی یک پالس از مولکول‌ها با توجه به رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E_p = \int_0^{T_B} C(r,t)dt \qquad (۷-۳)$$

در رابطه‌ی (۳-۷)، $C(r,t)$ 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، اما به دلیل پیچیدگی محاسباتی برای گیرنده ترجیح داده می‌شود که از آشکارسازی بر اساس آستانه استفاده شود.

۳-۴-۲ انواع گیرنده در مخابرات مولکولی

در مخابرات مولکولی گیرنده جدا از روش‌های آشکارسازی به دو نوع گیرنده غیرفعال[1] و گیرنده فعال[2] تقسیم می‌شود.

۳-۴-۲-۱ 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 ضرب 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 (۳-۵) که برای غلظت مولکول‌های پخش‌شده در محیط به دست اوردیم برای گیرنده غیرفعال است درنتیجه تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده با توجه به رابطه‌ی زیر بدست خواهد آمد:

$$N_p(t) = V_R \times C(r,t)$$

$$N_p(t) = \frac{V_R \times M}{\sqrt{(4\pi Dt)^3}} \exp\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right) \qquad (۳-۸)$$

که $N_p(t)$ 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 به‌صورت 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 (۳-۵) بدست آوردیم. ما در این پایان‌نامه گیرنده را غیرفعال در نظر گرفتیم و شبیه‌سازی‌ها بر اساس ان انجام‌شده است.

۳-۴-۲-۲ گیرنده فعال

در گیرنده فعال، مولکول‌ها پس از آن‌که به گیرنده چسبیدند، دوباره در محیط رهاشده و ناپدید

---

1 Passive Receiver
2 Active Receiver

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 ان با گیرنده‌ی غیرفعال این است کـه در این حالت شرایط مرزی تغییر خواهد کرد. برای گیرنده غیرفعال شرایط مـرزی بـرای حـل قـانون دوم فیک به‌صورت زیر است:

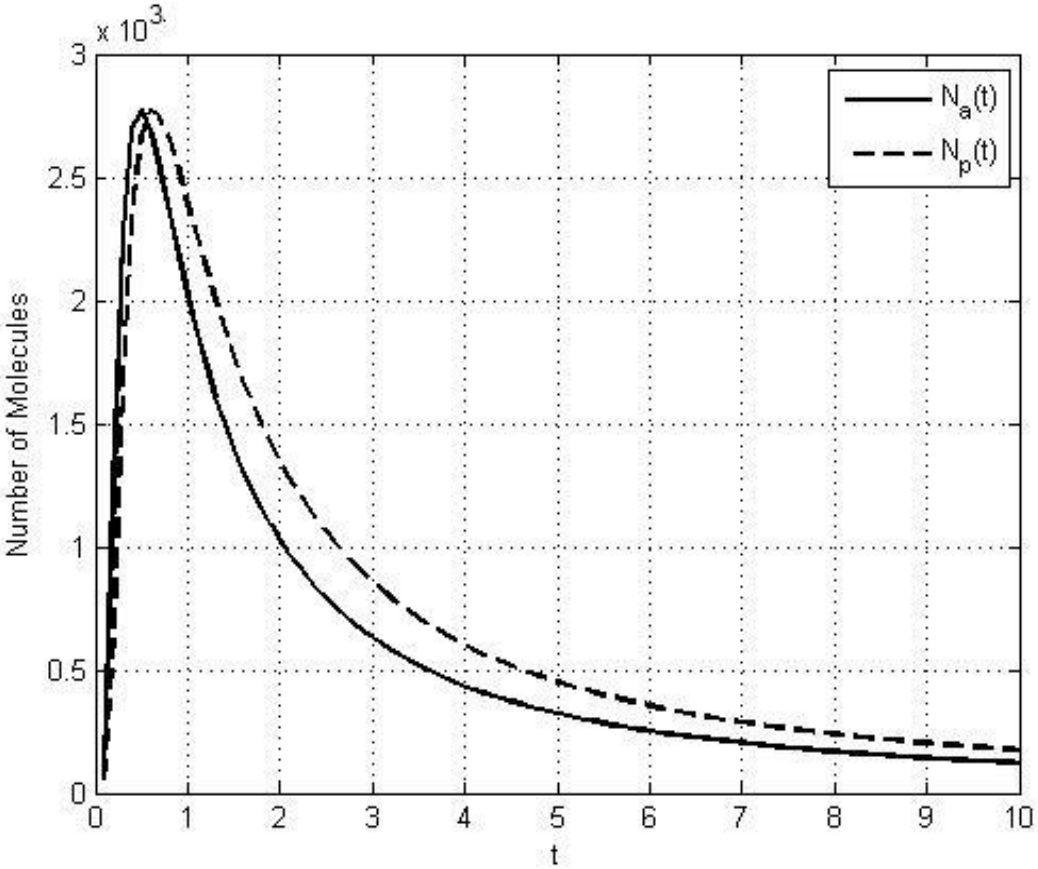
$$\begin{aligned}&(1)\lim_{r\to\infty}C(r,t)=0\\&(2)\frac{\partial C(r,t)}{\partial r}=\omega C(r,t)\forall\to|r|=\rho\end{aligned}\qquad(۹-۳)$$

که شرط اول نشان‌دهنده‌ی این است که وقتی فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده خیلی زیـاد مـی‌شـود، غلظت مولکول‌های رسیده به گیرنده به سمت صفر میل می‌کند و غلظتی به گیرنده نمی‌رسد. با توجه به‌شرط دوم و اینکه $\omega\to\infty$ می‌توان نوشت [۵۲] :

$$N_a(r,t)=\frac{M\rho}{r}\exp\left(\frac{r-\rho}{\sqrt{4Dt}}\right)\qquad(۱۰-۳)$$

که $N_a(r,t)$ نشان‌دهنده‌ی تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده در فاصله r و زمان t در گیرنده فعال است. در این حالت بـرخلاف گیرنـده غیرفعـال، از حـل معادلـه‌ی قـانون دوم فیـک مسـتقیماً تعـداد مولکول‌های رسیده به گیرنده به دست می‌آید نه غلظت مولکـول‌هـای پخـش‌شـده در محـیط[۵۲]. r نشان‌دهنده‌ی فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده و M تعداد مولکول‌هایی است کـه فرسـتنده در محـیط پخش می‌کند.

شکل ۳-۱۰ تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده برای گیرنده فعال و گیرنده غیرفعـال را نشـان مـی‌دهـد. ایـن شـبه سـازی‌هـا بـه ازای $r=300nm$، $M=5000$، $\rho=45nm$ و $D=4.3\times10^{-10}$ 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. البتـه همـان‌طـور کـه گفتیم در گیرنده فعال مولکول‌ها پس از جذب توسط گیرنده و دوبـاره رهـا شـدن در محـیط، فـرض می‌کنیم که ناپدید می‌شوند و دوباره توسط گیرنده جذب نمی‌شوند، پس می‌شود انتظار داشت کـه در این نوع گیرنده تداخل کمتر باشد.



شکل ۳-۱۰- تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده برحسب زمان برای گیرنده فعال و گیرنده غیرفعال

فصل چهارم

کارهای انجام‌شده در پایان‌نامه و نتایج شبیه‌سازی

در این پایان‌نامه ما به بررسی پارامترهـای تأثیرگـذار بـر روی یـک سیسـتم مخـابرات مولکـولی پرداخته‌ایم. این پارامترها از قبیل، فاصله بین فرستنده و گیرنده، نویز، تداخل و شـار کـه هرکـدام بـه نحوی بر کارایی سیستم تأثیر می‌گذارند که در شبیه‌سازی‌ها تأثیر هرکدام از این پارامترها را بـه‌طـور جداگانه موردبررسی قرار داده‌ایم. و در آخر راه‌کاری برای حل تغییر فاصله‌ی بین فرسـتنده و گیرنـده ارایه داده‌ایم. و با فرض اینکه فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده ثابت نباشد، بهترین مقدار آستانه را برای گیرنده بدست می‌آوریم.

برای نشان دادن اینکه هر پارامتر چطور تأثیر می‌گذارد، ابتدا ما رابطه احتمال خطـا را بـه دسـت می‌آوریم و بر اساس آن میزان تأثیری که هر پارامتر می‌تواند در جابه‌جایی نقطه بهینـه داشـته باشـد بررسی می‌کنیم.

۴-۱ سیستم مدل و فرض‌های مربوط به مساله

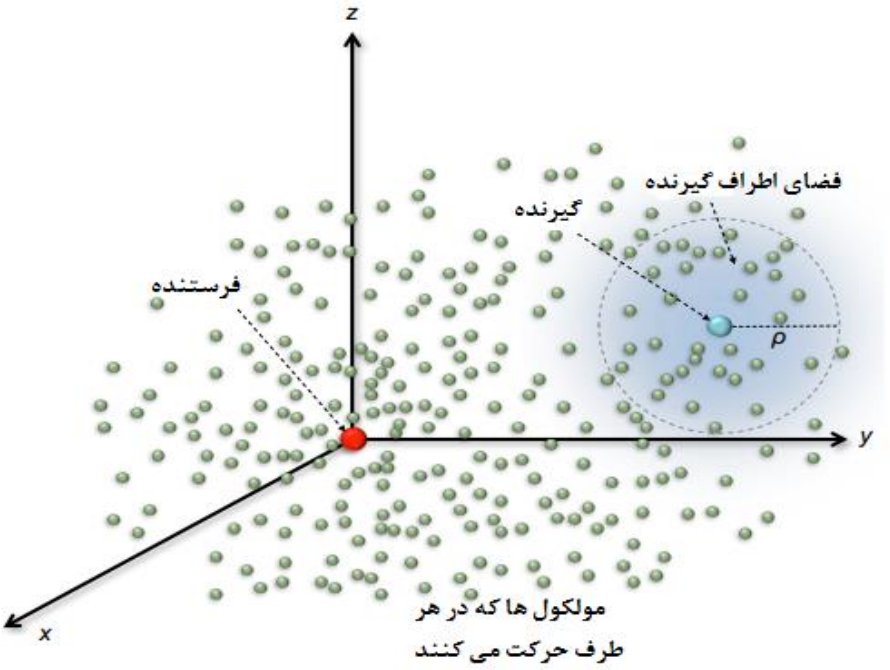
در این قسمت می‌خواهیم رابطه احتمال خطا را برای ساده‌ترین سیستم یعنی وقتی‌که نویز، شـار و تداخل نداریم به دست بیاوریم. همچنین فرض می‌کنیم که فاصله بین فرستنده و گیرنده ثابت است. همان‌طور که در شکل ۴-۱ نشان داده‌شده است فرض می‌کنیم که فرستنده ثابت در مبـدأ مختصـات یک محیط سه‌بعدی سیال با دما و چسبناکی ثابت قرارگرفته است. گیرنده هم بـه‌صـورت کـره‌ای بـه شعاع ρ و حجم V_R در مختصات $\{x_0,0,0\}$ در نظـر گرفتـه‌شـده اسـت کـه $\vec{r}_0$ بـرداری از مبـدأ بـه مختصات $\{x_0,0,0\}$ می‌باشد.

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

- اندازه نانو ماشین فرستنده در مقایسه بافاصله‌ی بـین فرسـتنده و گیرنـده نـاچیز اسـت بنابراین می‌توان نانو ماشین فرستنده را به‌عنوان یک منبع نقطه‌ای که در مبدأ مختصات قرار دارد در نظر گرفت.
- نانو ماشین‌ها در یک محیط سه‌بعدی با چسبناکی و دمای ثابت قرار دارند.
- مولکول‌هایی که از فرستنده منتشر و در محیط پخش می‌شوند به‌طور آزادانه و تصـادفی در هر طرف حرکت می‌کنند و از قانون دوم فیک تبعیت می‌کنند.
- گیرنده به‌صورت کره‌ای به شعاع ρ در نظر گرفته‌شده است و غلظت مولکول‌های داخل این فضا یکنواخت فرض شده است که در [۴۸] ثابت شده است که فرض درستی است.
- ارتباط بین فرستنده و گیرنده باینری با مدولاسیون On-Off Keying در نظر گرفته‌شده

است.

- فرض می‌کنیم که فرستنده در هر بار ارسال تعداد مولکول‌هایی که در محیط پخش می‌کند تغییری نمی‌کند و باهم برابرند.



شکل ۴-۱- فرستنده، کانال و گیرنده در یک سیستم مخابرات مولکولی

همان‌طور که گفتیم فرض می‌کنیم که مدولاسیون فرستنده On-Off Keying است به این صورت که به ازای ارسال یک، فرستنده غلظتی از مولکول‌ها شامل M مولکول را در محیط پخش می‌کند و به ازای ارسال صفر هیچ غلظتی نمی‌فرستد.

مولکول‌ها در محیط به‌صورت تصادفی و در جهت شیب غلظت ، یعنی از غلظت بیشتر به غلظت کمتر و بدون مصرف انرژی پخش می‌شوند که با توجه به قانون دوم فیک که در فصل سوم روابط آن را به دست آوردیم غلظت مولکول‌ها در فاصله r از فرستنده و در زمان t برای یک محیط سه‌بعدی با توجه به رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C(r,t)=\frac{M}{\sqrt{(4\pi Dt)^3}}\exp\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right) \qquad (۱-۴)$$

که M تعداد مولکول‌هایی است که فرستنده در محیط پخش می‌کند، r فاصله فرستنده و گیرنده و D ضریب انتشار است که به شرایط محیط مانند دما و چسبناکی محیط بستگی دارد و از رابطه زیر به

دست می‌آید:

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta R_m} \qquad (۴-۲)$$

که k_B ثابت بولتزمن ($k_B = 1.38\times10^{-23}$)، T دما برحسب کلوین، η چسبناکی محیط و R_m شعاع مولکول‌های ارسالی است. ما فرض کردیم که ضریب انتشار ثابت است، می‌توان گفت که فرض درستی است چون فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده در مخابرات مولکولی در حدود ۳۰۰ میکرومتر در نظر می‌گیریم و در این فاصله کم احتمال این‌که دما یا چسبناکی محیط تغییر کند خیلی کم است، شعاع مولکول‌های ارسالی نیز ثابت و بدون تغییر می‌باشد.

مولکول‌هایی که از فرستنده در محیط پخش می‌شوند، در هر جهتی و به‌طور تصادفی حرکت می‌کنند تا به فضای اطراف گیرنده برسند. فرض می‌کنیم که غلظت مولکول‌های داخل فضای گیرنده به شعاع ρ یکنواخت و برابر با غلظت در مرکز گیرنده است. همان‌طور که گفتیم گیرنده توانایی شمارش مولکول‌های رسیده به سطح گیرنده را دارد. پس می‌توان تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده را می‌توان با توجه به رابطه زیر به دست آورد.

$$N_R(t) = C(r_0, t)\times V_R \qquad (۴-۳)$$

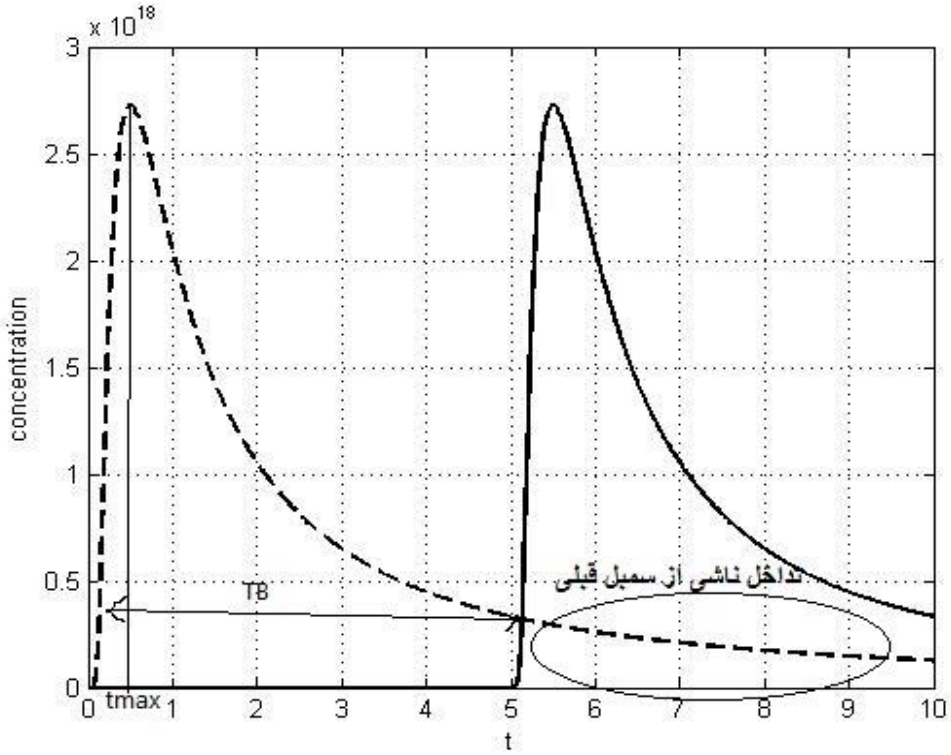
$$N_R(t) = \frac{M\times V_R}{\sqrt{(4\pi Dt)^3}}\exp\left(-\frac{{r_0}^2}{4Dt}\right) \qquad (۴-۴)$$

که $N_R(t)$ نشان‌دهنده‌ی تعداد مولکول‌های رسیده به فضای اطراف گیرنده است که به‌طور یکنواخت در این فضا قرار دارند و r_0 برداری از فرستنده تا مرکز گیرنده است. توجه داشته باشید که $C(r_0, t)$ غلظت مولکول‌ها در مرکز گیرنده را نشان می‌دهد که اگر این غلظت را در حجم گیرنده ضرب کنیم تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده به دست می‌آید. V_R حجم گیرنده است که با توجه به شعاع آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_R = \frac{4}{3}\pi\rho^3 \qquad (۴-۵)$$

۴-۲ به دست آوردن احتمال خطا

در این قسمت می‌خواهیم احتمال خطا را برای ساده‌ترین حالت یعنی وقتی‌که نویز و شار نداریم به دست بیاوریم و در قسمت‌های بعدی تأثیر هرکدام را بر جابه‌جایی نقطه بهینه بررسی کنیم. گیرنده دارای یک آستانه است به این صورت که اگر تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده از مقدار آستانه بیشتر باشد تصمیم می‌گیرد که یک ارسال‌شده است و اگر تعداد مولکول‌ها کمتر از مقدار آستانه باشد تصمیم می‌گیرد که صفر ارسال‌شده است. ساده‌ترین آشکارسازی در گیرنده به این صورت است که گیرنده تعداد مولکول‌ها را در زمان t_{max} می‌شمارد و آن را با مقدار آستانه (τ) مقایسه می‌کند. همان‌طور که در شکل۴-۲ نشان داده‌شده است بیشینه غلظت مولکول‌ها در زمان t_{max}است. اگر فاصله زمانی بین دو بیت با فرض این‌که دو بیت ارسالی یک باشند را با T_B نشان دهیم برای کاهش تداخل باید T_B به اندازی کافی بزرگ‌تر از t_{max} باشد ($T_B > t_{\max}$). اما باید توجه داشته باشیم که نمی‌توان فاصله زمانی بیت‌ها خیلی بزرگ باشد که تداخل را کم کنیم چون در این صورت نرخ انتقال ما کاهش پیدا می‌کند ($R = \frac{1}{T}$).شکل ۴-۲ بر اساس معادله‌ی (۴-۱) رسم شده است که در آن تعداد مولکول‌ها (M=5000) و فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده ۳۰۰ نانومتر می‌باشد.



شکل ۴-۲- نشان دادن تاثیر T_B بر روی تداخل ناشی از سمبل قبل

فرض کنید که $W[j]$، j امین بیت ارسالی توسط فرستنده است و احتمال پیشین را اگر یک ارسال کنیم P_1 در نظر می‌گیریم یعنی ($\Pr(W[j]=1)=P_1$) و احتمال پیشین به ازای ارسال صفر P_0 است ($\Pr(W[j]=0)=P_0$). همچنین اگر فرض کنیم که $\hat{W}[j]$ j امین بیت دریافتی توسط گیرنده می‌باشد می‌توان نوشت:

$$\hat{W}[j]=\begin{cases}1 \xrightarrow{if} N_R(t)\geq\tau \\ 0 \xrightarrow{if} N_R(t)<\tau\end{cases} \qquad (۶-۴)$$

با توجه به رابطه (۴- ۶)می‌توان گفت که هرگاه تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده ($N_R(t)$) در زمان t بیشتر از مقدار آستانه (τ) باشد، گیرنده تشخیص می‌دهد که فرستنده یک ارسال کرده است و برعکس. واضح است زمانی خطا اتفاق می‌افتد که $W[j]\neq\hat{W}[j]$ یعنی فرستنده برای مثال یک ارسال کند ولی گیرنده صفر تشخیص داده باشد. احتمال خطا برای j امین بیت ارسالی را به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم.

$$P_e[j]=P\left(W[j]\neq\hat{W}[j]\right) \qquad (۷-۴)$$

برای به دست آوردن شکل بسته احتمال خطا، ابتدا احتمال حضور یک مولکول را در فضای اطراف گیرنده به حجم V_R را به دست می‌آوریم. برای این کار فرض می‌کنیم که موقعیت مولکول‌های ارسالی توسط فرستنده مستقل از هم هستند. فرض می‌کنیم که فرستنده یک مولکول (M=1) را در محیط منتشر می‌کند. اگر از رابطه (۴-۱) بر روی حجم گیرنده انتگرال بگیریم احتمال حضور یک مولکول با توجه به رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_{one}(t)=\int_0^{\rho}\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} r^2 C(r_0,t)\sin\theta d\theta d\phi dr \qquad (۸-۴)$$

اما رابطه (۴-۸) پیچیده است و شکل بسته‌ای نمی‌توان به دست آورد. در رابطه‌ی (۴-۴) تعداد مولکول‌های داخل فضای گیرنده را به دست آوردیم و چون فرض کردیم که تعداد مولکول‌های داخل این فضا یکنواخت است پس کافی است که در این رابطه به‌جای M ، یک قرار دهیم تا احتمال حضور یک مولکول در فضای اطراف گیرنده به دست آید پس خواهیم داشت:

$$P_{one}(t)=\frac{V_R}{\sqrt{(4\pi Dt)^3}}\exp\left(-\frac{{r_0}^2}{4Dt}\right) \qquad (۹-۴)$$

اگر فرستنده M مولکول را در محیط پخش کند تعداد مولکول‌های مشاهده‌شده در فضای اطراف گیرنده‌یک توزیع دوجمله‌ای خواهد بود و احتمال اینکه تعداد مولکول‌ها بزرگ‌تر مقدار آستانه باشد برابر خواهد بود با[۵۰]:

$$P\left(N_R(t)\geq\tau\right)=\sum_{i=\tau}^{M}\binom{M}{i}P_{one}(t)^{i}\left(1-P_{one}(t)\right)^{M-i} \qquad (۴-۱۰)$$

رابطه‌ی (۴-۱۰) برای مقادیر بزرگ N پیچیده و سخت می‌شود. پس دو تخمین پوآسن و گوسی را برای توزیع دوجمله‌ای در نظر می‌گیریم. اگر M به‌اندازه کافی بزرگ و همچنین P_{one} به‌اندازه کافی کوچک باشد می‌توان توزیع دوجمله‌ای را به توزیع پوآسن با میانگین $\overline{N_R(t)}=M\times P_{one}$ تخمین زد پس می‌توان نوشت [۵۰]:

$$P\left(N_R(t)\geq\tau\right)=1-\exp\left(-\overline{N_R(t)}\right)\times\sum_{i=0}^{\tau-1}\frac{\overline{N_R(t)}^{i}}{i!} \qquad (۴-۱۱)$$

$$P\left(N_R(t)<\tau\right)=\exp\left(-\overline{N_R(t)}\right)\times\sum_{i=0}^{\tau-1}\frac{\overline{N_R(t)}^{i}}{i!} \qquad (۴-۱۲)$$

رابطه‌ی (۴-۱۱) نشان‌دهنده‌ی احتمال اینکه تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده از مقدار آستانه بیشتر باشد که در این صورت گیرنده تشخیص می‌دهد که فرستنده یک ارسال کرده است پس وقتی خطا رخ خواهد داد که تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده کمتر از مقدار آستانه باشد در این صورت گیرنده تشخیص می‌دهد که صفر ارسال‌شده است درحالی‌که فرستنده یک ارسال کرده است. رابطه‌ی (۴-۱۲) هم نشان‌دهنده‌ی احتمال اینکه تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده کمتر از مقدار آستانه باشد.

همچنین همانند روابط بالا می‌توان توزیع دوجمله‌ای را به توزیع گوسی با میانگین $\overline{N_R(t)}=M\times P_{one}$ و واریانس $\overline{N_R}(t)\times(1-P_{one})$ تخمین زد پس می‌توان نوشت[۵۱]:

$$P\left(N_R(t)\geq\tau\right)=0.5\left[1-erf\left(\frac{\tau-\overline{N_R}(t)}{\sqrt{2\overline{N_R}(t)(1-P_{one}(t))}}\right)\right] \qquad (۴-۱۳)$$

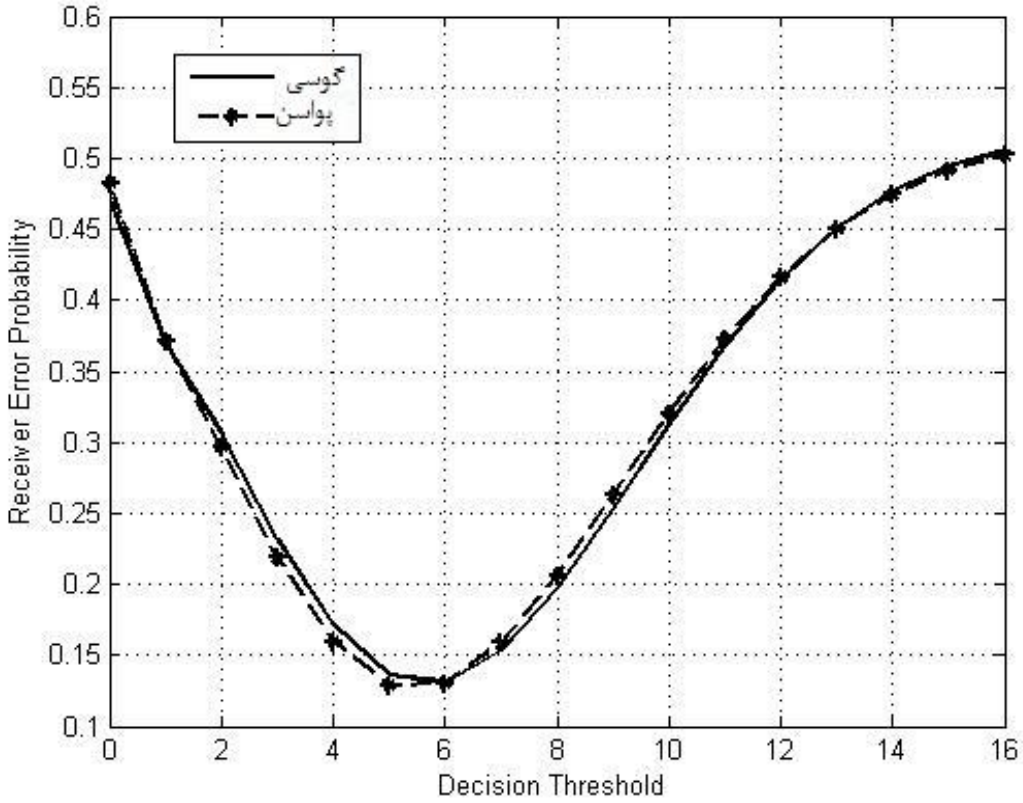
$$P\left(N_R(t)<\tau\right)=1-\left(0.5\left[1-erf\left(\frac{\tau-\overline{N_R}(t)}{\sqrt{2\overline{N_R}(t)(1-P_{one}(t))}}\right)\right]\right) \qquad (۴-۱۴)$$

تأکید می‌کنیم که تخمین توزیع پوآسن از توزیع گوسی دقیق‌تر است اما چون در توزیع گوسی فاکتوریل نداریم، عملیات ریاضی در توزیع گوسی ساده‌تر است. با توجه به همه روابطی که به دست آوردیم، احتمال خطا برابر خواهد بود با :

$$P_e[t_{\max}] = P_1 \times P\left(N_R(t_{\max}) < \tau | W[j]=1\right) + P_0 \times P\left(N_R(t_{\max}) \geq \tau | W[j]=0\right) \quad (۱۵-۴)$$

در رابطه‌ی (۴-۱۵) ما احتمال خطا را برای حالتی که نویز، تداخل و شار نداریم به دست آوردیم و برای بررسی تأثیر هرکدام از این عوامل بر احتمال خطا در بخش‌های بعدی بیشتر توضیح خواهیم داد. فرض کردیم که احتمال پیشین P_0 و P_1 باهم برابرند. در رابطه‌ی (۳-۶)، t_{max} را برحسب فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده و ضریب انتشار بدست آوردیم. برای تأثیر تداخل ناشی از سمبل‌های قبل در بخش‌های بعدی بیشتر توضیح خواهیم داد.

شکل ۴-۳ نشان‌دهنده‌ی احتمال خطای گوسی و پوآسن برحسب آستانه‌ی گیرنده است، همان‌طور که نشان داده‌شده است اختلاف چندانی باهم ندارند و در شبیه‌سازی‌های بعدی از هرکدام که استفاده کنیم جایز است. البته همان‌طور که گفتیم رابطه‌ی پوآسن دقیق‌تر است اما کار با گوسی راحت‌تر است. در شکل ۴-۳ احتمال خطای گوسی و پوآسن به ازای پارامترهای یکسان رسم شده‌اند. در این پایان‌نامه و شبیه‌سازی‌های بعدی از رابطه‌ی پواسن برای شبیه‌سازی استفاده کرده‌ایم و هر جا به دلیل سادگی بیشتر از رابطه‌ی گوسی استفاده کرده باشیم اشاره خواهیم کرد. در مدل کردن نویز که در بخش های بعدی توضیح خواهیم داد از تخمین گوسی استفاده خواهیم کرد چون نویز به صورت گوسی در نظرگرفته شده است. با توجه به این که ما در این پایان نامه به بررسی تاثیر عومل تاثیرگذار بر کارایی سیستم خواهیم پرداخت، ابتدا احتمال خطا را بدست می آوریم و سپس تاثیر این عوامل را بر احتمال خطا بررسی خواهیم کرد. روشی که ما در رابطه ی (۴-۱۵) بدست آوردیم در مقایسه با روش های استفاده شده در مقاله ها انعطاف بیشتری دارد و راحت تر می توان تاثیر نویز، تداخل و شار را بررسی کرد. باید خاطر نشان کرد که این روش از لحاظ ریاضی هم دقیق تر است. در بخش بعدی یک روش دیگر برای بدست آوردن احتمال خطا ارایه خواهیم داد که از لحاظ ریاضی ساده تر است و در مدل کردن تاثیر نوع مدولاسیون از این روش استفاده خواهیم کرد.



شکل ۴-۳- مقایسه احتمال خطای گوسی و پواسن برحسب مقدار استانه ی گیرنده

۴-۳ به دست آوردن احتمال خطا با روشی ساده‌تر

در این بخش هم می‌خواهیم احتمال خطا را اما با روشی ساده‌تر به دست بیاوریم. هدف از این کار این است که در بخشی از شبیه‌سازی‌ها به دلیل آسان‌تر بودن از این روش استفاده کنیم. برای به دست آوردن احتمال خطا، ما ابتدا به‌صورت جداگانه تعداد مولکول‌هایی که در اثر تداخل، نویز و خود فرستنده که می‌فرستد تا به گیرنده برسند را حساب می‌کنیم و در آخر با جمع تمام مولکول‌های رسیده به گیرنده که یک تابع گوسی خواهد بود احتمال خطا را حساب خواهیم کرد.

با توجه به رابطه‌ی (۴-۹) ما احتمال حضور یک مولکول در فضای اطراف گیرنده را به دست آوردیم. با این فرض که غلظت مولکول‌های داخل این فضا یکنواخت است. اگر فرستنده M مولکول را در محیط پخش کند تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده از یک توزیع دوجمله‌ای پیروی خواهد کرد پس خواهیم داشت [۳۵] :

$$N_C \sim Binomial(M, P_{one}(r_0, t_{\max})) \qquad (۱۶-۴)$$

که N_C نشان‌دهنده تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده در زمان t_{max} است. r_0 فاصله فرستنده از

مرکز گیرنده است. اگر M به‌اندازه کافی بزرگ و همچنین P_{one} به‌اندازه کافی کوچک باشد می‌توان توزیع دوجمله‌ای را به توزیع گوسی با میانگین $MP_{one}(r_0, t_{\max})$ و واریانس $MP_{one}(r_0, t_{\max})(1 - P_{one}(r_0, t_{\max}))$ تخمین زد درنتیجه خواهیم داشت:

$$N_C \sim Normal(MP_{one}, MP_{one}(1 - P_{one})) \qquad (۱۷-۴)$$

در مخابرات کلاسیک تداخل از چندمسیرگی و هم فرکانس بودن پیام‌ها ناشی می‌شود. به‌طور مشابه در یک سیستم مخابرات مولکولی وقتی از یک نوع مولکول برای ارسال پیام استفاده می‌کنیم تداخل پیش می‌آید، به این صورت که ما وقتی غلظتی شامل M مولکول را برای ارسال یک بیت در محیط پخش می‌کنیم، این غلظت همچنان در محیط باقی می‌ماند وقتی‌که غلظت دوم برای ارسال بیت دوم را در محیط پخش می‌کنیم، به این صورت این دو غلظت بر روی‌هم تداخل ایجاد می‌کنند. برای به دست آوردن تعداد مولکول‌هایی که در اثر تداخل به گیرنده می‌رسند کافی است که تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده در زمان $t_{\max} + T_B$ را از تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده در زمان $t_{\max}$ کم کنیم، در این صورت خواهیم داشت[۳۵]:

$$N_{ISI} \sim Binomial(M, P_{one}(r_0, t_{\max} + T_B)) - Binomial(M, P_{one}(r_0, t_{\max})) \qquad (۱۸-۴)$$

که رابطه‌ی (۴-۱۸) را می‌توان به تابع گوسی به‌صورت زیر تخمین زد:

$$\begin{aligned} N_{ISI} \sim\ & Normal(MP_{one}(r_0, t_{\max} + T_B), MP_{one}(r_0, t_{\max} + T_B) \times \ldots \\ & (1 - P_{one}(r_0, t_{\max} + T_B))) - \ldots \\ & Normal(MP_{one}(r_0, t_{\max}), MP_{one}(r_0, t_{\max})(1 - P_{one}(r_0, t_{\max}))) \end{aligned} \qquad (۱۹-۴)$$

حال تعداد مولکول‌هایی که در اثر نویز به گیرنده می‌رسند را حساب می‌کنیم. برای این منظور فرض می‌کنیم که نویز سفید جمع کننده با میانگین صفر و واریانس σ^2 است[۳۶]. پس خواهیم داشت:

$$N_n \sim Normal(0, \sigma^2) \qquad (۲۰-۴)$$

که واریانس هم از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید[۳۶]:

$$\sigma^2 = \frac{3\times C(r_0,t)}{4\pi\rho^3} \qquad (۲۱-۴)$$

که ρ شعاع گیرنده است و $C(r_0,t)$ غلظت مولکول‌های رسیده به گیرنده می‌باشد. با توجه به رابطه‌ی (۴-۲۰) خواهیم فهمید که هر چه تعداد مولکول‌هایی که فرستنده می‌فرستد یا به عبارتی غلظت مولکول‌های که به گیرنده می‌رسند بیشتر باشد نویز بیشتر خواهد شد، همچنین نویز با شعاع گیرنده رابطه‌ی عکس دارد.

درنتیجه تعداد کل مولکول‌های رسیده به گیرنده ناشی از تداخل و نویز و مولکول‌هایی که خود فرستنده می‌فرستد برابر خواهد بود :

$$N_T = N_C + N_{ISI} + N_n \qquad (۲۲-۴)$$

از [۵۰] خواهیم داشت که جمع چند متغیر گوسی که مستقل از هم هستند، خود نیز یک متغیر گوسی خواهد بود که میانگین و واریانس آن‌هم حاصل جمع تک‌تک آن‌ها به ترتیب خواهد بود.

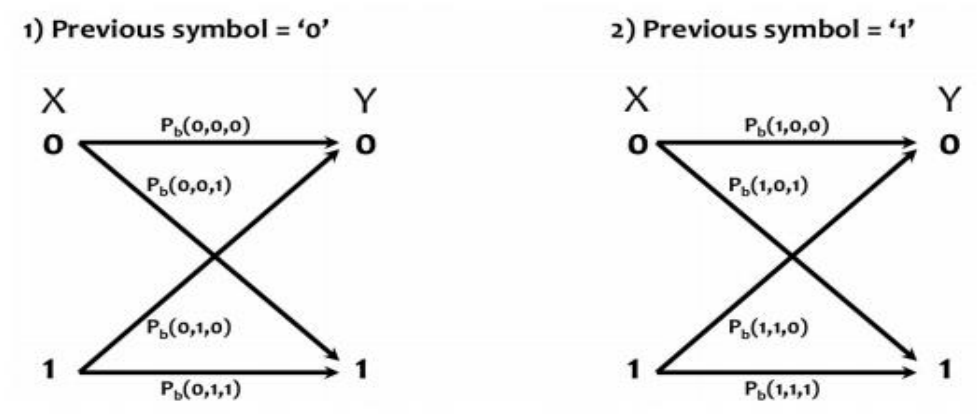
آشکارسازی بر اساس آستانه‌ی مشخص ساده‌ترین نوع آشکارسازی است که در مخابرات کلاسیک هم از این روش استفاده می‌کنند. فرض می‌کنیم که مدولاسیون فرستنده On-Off Keying باشد. در این روش گیرنده دارای یک مقدار آستانه (τ) است، اگر تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده از مقدار آستانه بزرگ‌تر باشد، گیرنده تصمیم می‌گیرد که فرستنده یک ارسال کرده است و اگر تعداد مولکول‌ها کمتر از مقدار آستانه باشد گیرنده تصمیم می‌گیرد که صفر ارسال‌شده است. خطا زمانی رخ خواهد داد که اگر فرستنده یک ارسال کرده باشد اما غلظت مولکول‌های رسیده به گیرنده کمتر از مقدار آستانه باشد و در این حالت گیرنده تصمیم می‌گیرد که صفر ارسال‌شده و خطا رخ خواهد داد یا برعکس برای حالتی که فرستنده صفر ارسال کرده و گیرنده تشخیص می‌دهد که یک ارسال‌شده است.

ابتدا احتمال خطا برای ارسال صفر را به دست می‌آوریم به‌این‌ترتیب که اگر تعداد کل مولکول‌های رسیده به گیرنده بیشتر از مقدار آستانه باشد یعنی $P_E^{x_A=0} = P(N_T > \tau)$ پس خطا رخ‌داده و خواهیم داشت:

$$P_E^{x_A=0} = P(0,1) = P(0,0,1) + P(1,0,1) \qquad (۲۳-۴)$$

که منظور از $P(X,Y)$ یعنی احتمال اینکه فرستنده X بفرستد و گیرنده Y تشخیص دهد. و منظور از $P(Z,X,Y)$ یعنی فرستنده X بفرستد و گیرنده Y تشخیص دهد به‌طوری‌که بیت قبلی که فرستنده

فرستاده است Z باشد که بیت قبلی می‌توان صفر یا یک باشد. در این روش فقط اثـر تـداخل ناشـی از سمبل قبلی را در نظر می‌گیریم که بیشترین تأثیر را دارد و از بقیه صرف‌نظـر مـی‌کنـیم. شـکل ۴-۴ نشان‌دهنده‌ی یک کانال باینری است که سمبل قبلی می‌تواند دو حالت صفر و یک را داشته باشد.



شکل ۴-۴- کانال باینری است که سمبل قبلی می‌تواند دو حالت صفر و یک را داشته باشد.

درنتیجه احتمال خطا برای ارسال صفر به صورت زیر بدست می‌آید :

$$
\begin{aligned}
P_E^{x_A=0} &= P(0,1) = P(0,0,1) + P(1,0,1) \\
&= \frac{1}{2}\left[P(N_n > \tau) + P(N_{ISI} + N_n > \tau)\right] \\
&= \frac{1}{2}\left[erfc\left(\frac{\tau}{\sqrt{2\sigma^2}}\right)\right] + \frac{1}{2}\left[erfc\left(\frac{\tau - N(p_2 - p_1)}{\sqrt{2N\left[p_2(1-p_2) + p_1(1-p_1)\right] + \sigma^2}}\right)\right]
\end{aligned}
\qquad (۲۴-۴)
$$

کـه $p_1 = P_{one}(r_0, t_{\max})$ و $p_2 = P_{one}(r_0, t_{\max} + T_B)$ و $P(X,Y)$ یعنـی احتمـال اینکـه فرستنده X بفرستد و گیرنده Y تشخیص دهد. و منظور از $P(Z,X,Y)$ یعنی فرسـتنده X بفرسـتد و گیرنده Y تشخیص دهد به‌طوری‌که بیت قبلی که فرسـتنده فرسـتاده اسـت Z باشـد کـه بیـت قبلـی می‌توان صفر یا یک باشد.

به‌طور مشابه احتمال خطا برای زمانی که فرستنده یک ارسال می‌کند و گیرنده صفر تشخیص می‌دهد برابر خواهد بود با :

$$P_E^{x_A=1} = P(1,0) = P(0,1,0) + P(1,1,0) \qquad (۲۵-۴)$$

که می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} P_E^{x_A=1} &= P(1,0) = P(0,1,0) + P(1,1,0) \\ &= \frac{1}{2}\left[P(N_C + N_n < \tau) + P(N_C + N_{ISI} + N_n < \tau)\right] \\ &= \frac{1}{2}\left[erf\left(\frac{\tau - Np_1}{\sqrt{2Np_1(1-p_1)+\sigma^2}}\right)\right] + \ldots \\ &\frac{1}{2}\left[erf\left(\frac{\tau - Np_2}{\sqrt{2N\left[p_2(1-p_2)+2p_1(1-p_1)\right]+\sigma^2}}\right)\right] \end{aligned} \qquad (۲۶-۴)$$

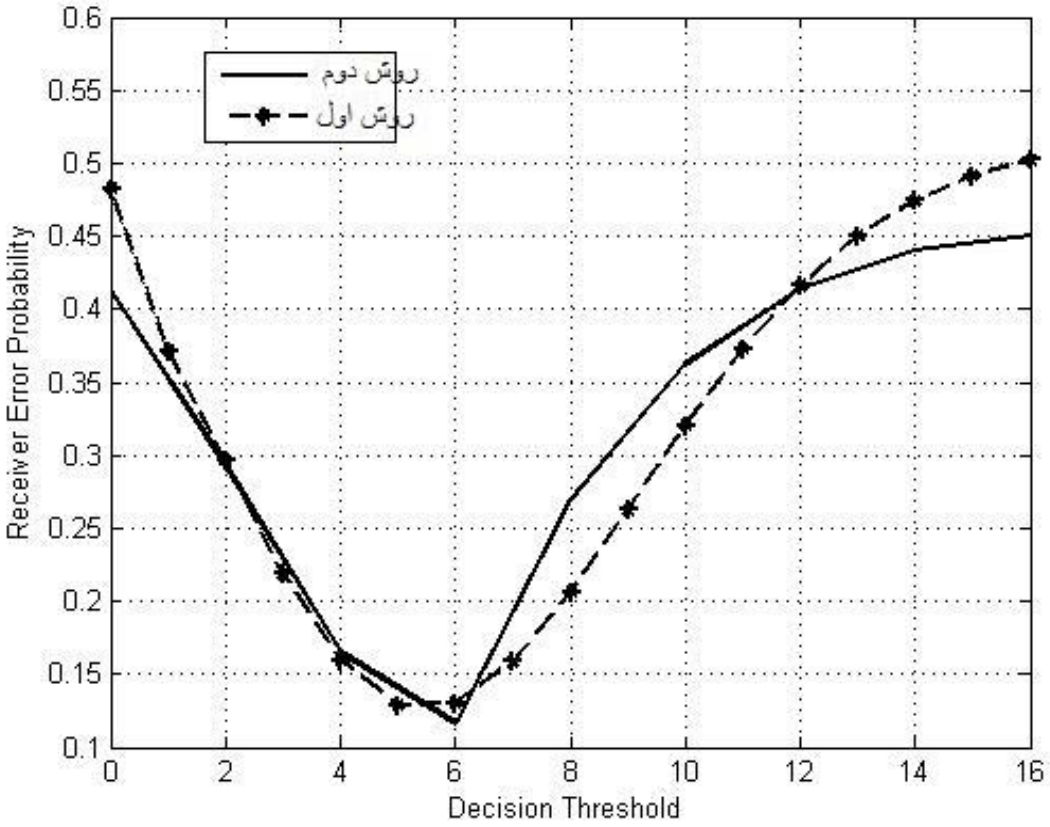
با توجه به روابط (۴-۲۴) و (۴-۲۶) احتمال خطای کل، از مجموع احتمال خطای صفر و یک به دست خواهد آمد و خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} P_E &= P_E^{x_A=0} \times P(x_A = 0) + P_E^{x_A=1} \times P(x_A = 1) \\ &= 0.5 \times \left\{P_E^{x_A=0} + P_E^{x_A=1}\right\} \end{aligned} \qquad (۲۷-۴)$$

فرض کردیم که احتمال پیشین برای ارسال صفر و یک باهم برابرند. رابطه‌ی (۴-۲۷) نشان‌دهنده‌ی احتمال خطا برای یک سیستم مخابرات مولکولی است که اثر تداخل ناشی از فقط سمبل قبلی را در نظر گرفته‌ایم و همچنین تأثیر نویز را که به‌صورت نویز سفید گوسی فرض شده است را در نظر گرفته‌ایم. این رابطه‌ای که برای احتمال خطا به دست آوردیم با رابطه‌ی (۴-۱۵) اختلاف خاصی باهم ندارند فقط می‌توان گفت که رابطه‌ی (۴-۱۵) ازلحاظ ریاضی دقیق‌تر است.

شکل ۴-۵ احتمال خطای هر دو روش یعنی رابطه‌ی (۴-۱۵) به‌عنوان روش اول و رابطه‌ی (۴-۲۷) به‌عنوان روش دوم را برحسب مقدار آستانه نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴-۵ می‌توان گفت که این دو روش تقریباً شبیه هم هستند. البته باید گفت که در هر دو روش کمترین مقدار احتمال خطا به ازای مقدار آستانه ۶ به‌دست‌آمده است که نشان‌دهنده این است که این دو روش تقریباً شبیه هم هستند. این دو روش به ازای پارامترهای یکسان رسم شده‌اند و درروش اول ما فقط تأثیر سمبل قبلی

را در نظر گرفته‌ایم که شرایط شبیه‌سازی شبیه هم باشد. در این پایان‌نامه ما از روش اول برای شبیه‌سازی‌های بعدی استفاده خواهیم کرد.



شکل ۴-۵- مقایسه ی دو روشی که برای احتمال خطا به دست آوردیم بر حسب مقدارآستانه

۴-۴ پارامترهای موردنیاز در شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی و مقایسه نتایج شبیه‌سازی پارامترها را برحسب جدول ۴-۱ قرار خواهیم داد. در هرجایی که از پارامترهایی به‌غیراز این جدول استفاده کنیم،اشاره خواهیم کرد. پارامترهایی مانند دما و چسبندگی بر اساس شرایط واقعی موجود در بدن انسان انتخاب‌شده‌اند.

جدول ۴-۱- پارامترهای موردنیاز برای شبیه‌سازی

پارامتر	توضیح	مقدار
T	دمای محیط	25^{0C}
η	چسبندگی مایع که نانو ماشین‌ها در ان قرار دارند	$10^{-3} kg.m^{-1}.s^{-1}$
R_s	شعاع مولکول‌های ارسالی توسط فرستنده	0.5nm
M	تعداد مولکول‌های ارسالی توسط فرستنده	5000
ρ	شعاع فضای اطراف گیرنده	45nm
r	فاصله بین فرستنده و گیرنده	300nm
τ	مقدار آستانه گیرنده	5000
$R_1=R_2$	شعاع تغییرات فرستنده و گیرنده	100nm

۴-۵ بررسی اثر تداخل بر کارایی سیستم

یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که بر روی احتمال خطا و جابه‌جایی نقطه بهینه تأثیر زیادی می‌گذارد تداخل است. تداخل، ناشی از سمبل‌های قبلی است که مولکول‌های سمبل قبلی همچنان در محیط باقی‌مانده و بر روی کارایی سیستم و بالا بردن احتمال خطا تأثیر می‌گذارد.

حال می‌خواهیم اثر تداخل را بر روی احتمال خطا برای همه‌ی سمبل‌های قبلی در نظر بگیریم. در [۳۱] و [۳۰] فقط اثر یک سمبل قبلی را در نظر گرفته‌اند و از اثر سمبل‌های قبلی‌تر صرف‌نظر کرده‌اند و همان‌طور که گفتیم به این نوع تداخل، تداخل پسیو می‌گویند. در رابطه‌ی (۴-۱۵) که برای احتمال خطا به دست آوردیم، تأثیر تداخل را در نظر نگرفته بودیم حال می‌خواهیم تأثیر همه‌ی سمبل‌های قبلی را بر روی احتمال خطا بررسی کنیم. برای این کار کافی است که غلظت ناشی از همه‌ی سمبل‌های قبلی را باهم جمع کنیم که در این صورت به‌جای رابطه‌ی (۴-۴) از رابطه‌ی زیر استفاده خواهیم کرد:

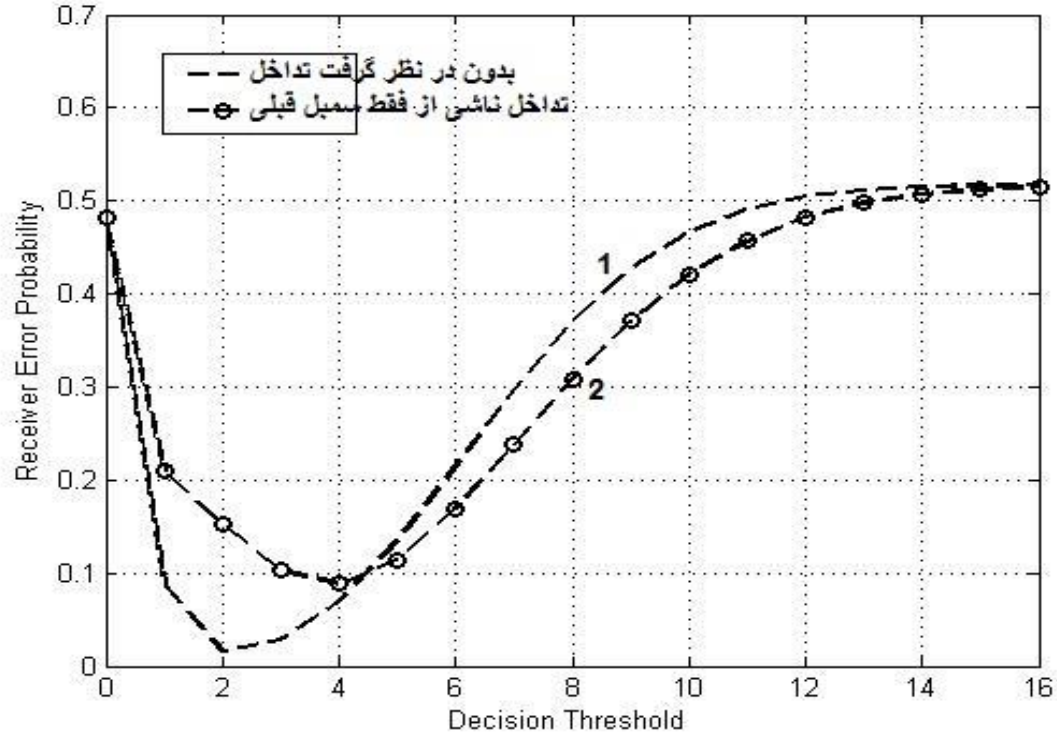
$$N_R(j) = M\sum_{i=1}^{j} W[i] P_{one}((j-1)T_B + t_{\max}) \qquad (۴-۲۸)$$

که در رابطه بالا $W[i]$ می‌تواند صفر یا یک باشد، اگر یک باشد، فرستنده M مولکول را در محیط منتشر می‌کند و اگر صفر باشد فرستنده هیچی نمی‌فرستد. همان‌طور که واضح است در رابطه‌ی (۴-۲۸) اثر تداخل ناشی از همه‌ی سمبل‌های قبل از j امین بیت را در نظر گرفته‌ایم. اگر $i=j$ باشد یعنی از تداخل صرف‌نظر کرده‌ایم و اگر $i=j-1$ باشد یعنی تنها اثر تداخل یک بیت قبلی را در نظر گرفته‌ایم. در رابطه با زمان ($t=(j-1)T_B+t_{\max}$) باید گفت که اگر گیرنده به‌جای زمان $t=t_{max}$ مولکول‌ها را در زمان $t=(j-1)T_B+t_{\max}$ اندازه‌گیری کند یعنی اثر همه‌ی سمبل‌های قبلی را در نظر گرفته‌ایم که این کار را با جمع کردن غلظت ناشی از همه‌ی غلظت‌های قبلی انجام داده‌ایم. درنتیجه احتمال خطا برای j امین بیت ارسالی برابر خواهد بود با :

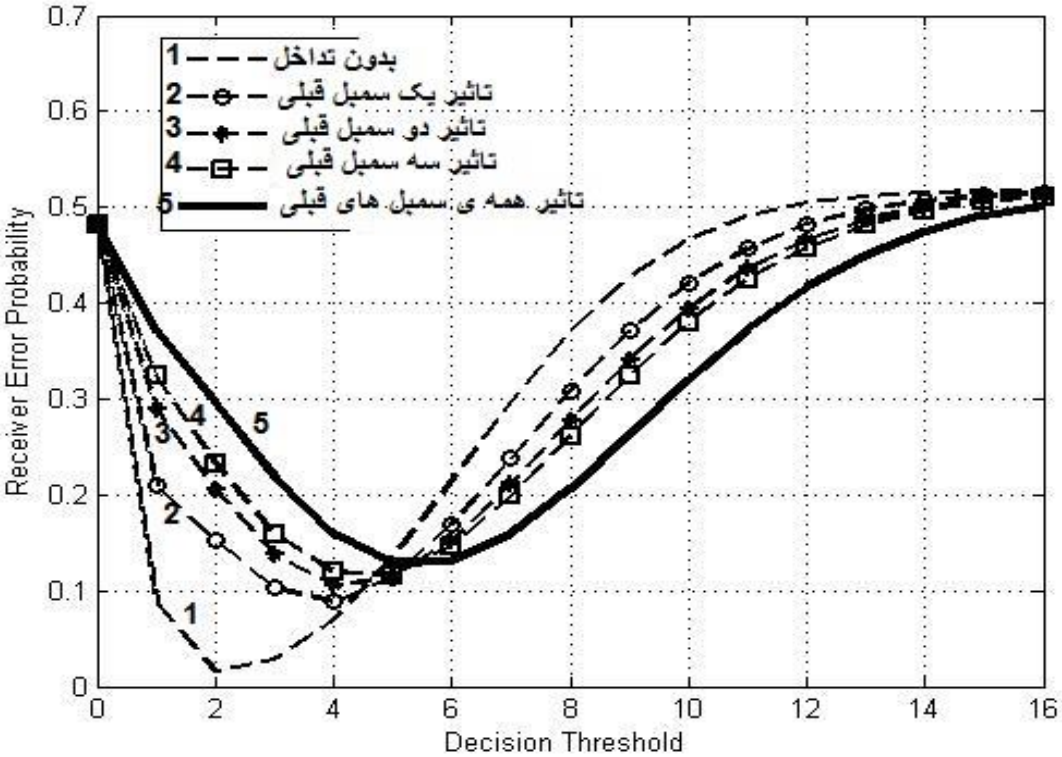
$$P_e[j]=P_1\times P\left(N_R(j)<\tau|W[j]=1\right)+P_0\times P\left(N_R(j)\geq\tau|W[j]=0\right) \qquad (۲۹-۴)$$

در شکل ۴-۶ احتمال خطا برحسب مقدار آستانه‌ی گیرنده برای دو حالت یعنی وقتی‌که تداخل اصلاً نداریم و همچنین تداخل ناشی از فقط سمبل قبلی رسم شده است و اثر تداخل بر جابه‌جایی نقطه بهینه و همچنین افزایش احتمال خطا نشان داده‌شده است. البته باید تأکید کرد که در این نمودار فاصله بین فرستنده و گیرنده و همچنین تعداد مولکول‌هایی که فرستنده می‌فرستد ثابت است. همان‌طور که در شکل معلوم است وقتی‌که تداخل نداریم احتمال خطا در نقطه بهینه خیلی کم است. با تأثیر تداخل سمبل قبلی در احتمال خطا می‌بینیم که احتمال خطا زیاد شده و نقطه بهینه هم تغییر می‌کند که تغییر چشم‌گیری هم هست. در بیشتر مقاله‌ها که اشاره کردیم فقط اثر یک سمبل قبلی را در نظر می‌گیرند و تأثیر بقیه سمبل‌ها در تداخل را نادیده می‌گیرند. همچنین مشاهده می‌کنیم نقطه بهینه از ۲ به ۴ تغییر کرده است، پس تداخل هم احتمال خطا را افزایش می‌دهد هم باعث جابه‌جایی نقطه بهینه می‌شود.

در شکل ۴-۷ نیز احتمال خطا برحسب مقدار آستانه گیرنده برای ۵ حالت رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنیم تأثیر تداخل سمبل‌های قبل از سمبل اول به نسبت کمتر است، به همین خاطر در بعضی از مقاله‌ها فقط تأثیر سمبل اول را در نظر می‌گیرند و از بقیه چشم‌پوشی می‌کنند. نمودار ۳ و۴ به ترتیب تأثیر دو سمبل قبلی و سه سمبل قبلی را نشان می‌دهد که همان‌طور که مشخص است تأثیر این سمبل‌ها نسبت به سمبل اول خیلی کمتر است. نمودار ۵ به ازای تأثیر همه‌ی سمبل‌های قبلی رسم شده است که شامل تأثیر ۱۰ سمبل قبلی است.

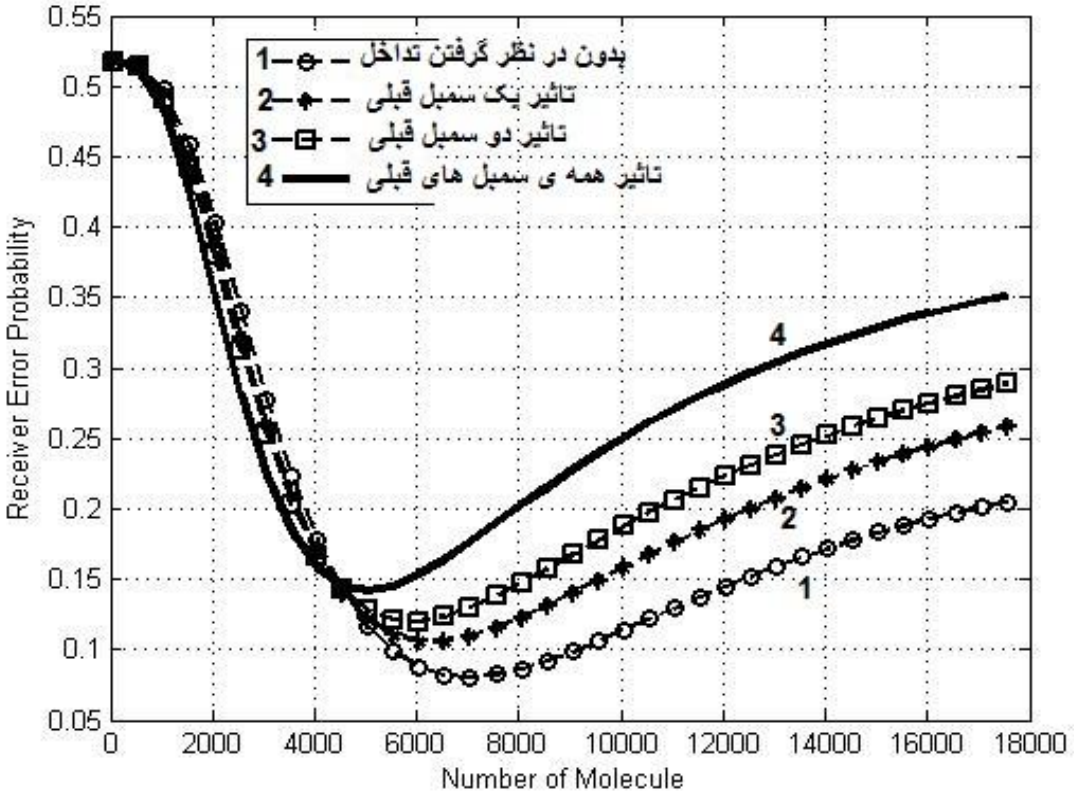


شکل ۴-۶- احتمال خطا برحسب مقدار آستانه گیرنده برای دو حالت، وقتی‌که تداخل اصلاً نداریم و همچنین تداخل ناشی از فقط سمبل قبلی



شکل ۴-۷- احتمال خطا برحسب مقدار آستانه گیرنده و تأثیر همه‌ی سمبل‌های قبلی در تداخل

در شکل ۴-۸ نیز احتمال خطا برحسب تعداد مولکول‌هایی که فرستنده می‌فرستد برای ۴ حالت و به ازای مقدار آستانه ثابت نشان داده‌شده است. در این حالت نیز تداخل احتمال خطا را افزایش و نقطه بهینه را جابه‌جا می‌کند و همانند شکل‌های قبل بیشترین تأثیر را اولین سمبل قبلی بر روی احتمال خطا می‌گذارد. نکته‌ای که در مورد شکل ۴-۸ مهم این است که وقتی تعداد مولکول‌های ارسالی توسط فرستنده کم هستند تداخل تأثیر چندانی بر روی احتمال خطا ندارد و هر چه تعداد مولکول‌های ارسالی بیشتر می‌شود تداخل تأثیرش بیشتر نمایان می‌شود. البته چنین چیزی قابل پیش‌بینی هم هست چون هر چه تعداد مولکول‌ها بیشتر باشد برای مدت‌زمان بیشتری در محیط می‌مانند و به همان نسبت نیز بیشتر در تداخل مؤثر خواهند بود.در تمام شبیه‌سازی‌های این قسمت فرض کردیم که فاصله بین فرستنده و گیرنده ثابت و برابر ۳۰۰ نانومتر است. و بقیه پارامترها هم طبق جدول ۴-۱ قرار داده‌شده‌اند. در شبیه‌سازی‌های بعدی ما تأثیر همه‌ی سمبل‌های قبلی بر روی احتمال خطا را در نظرخواهیم گرفت.

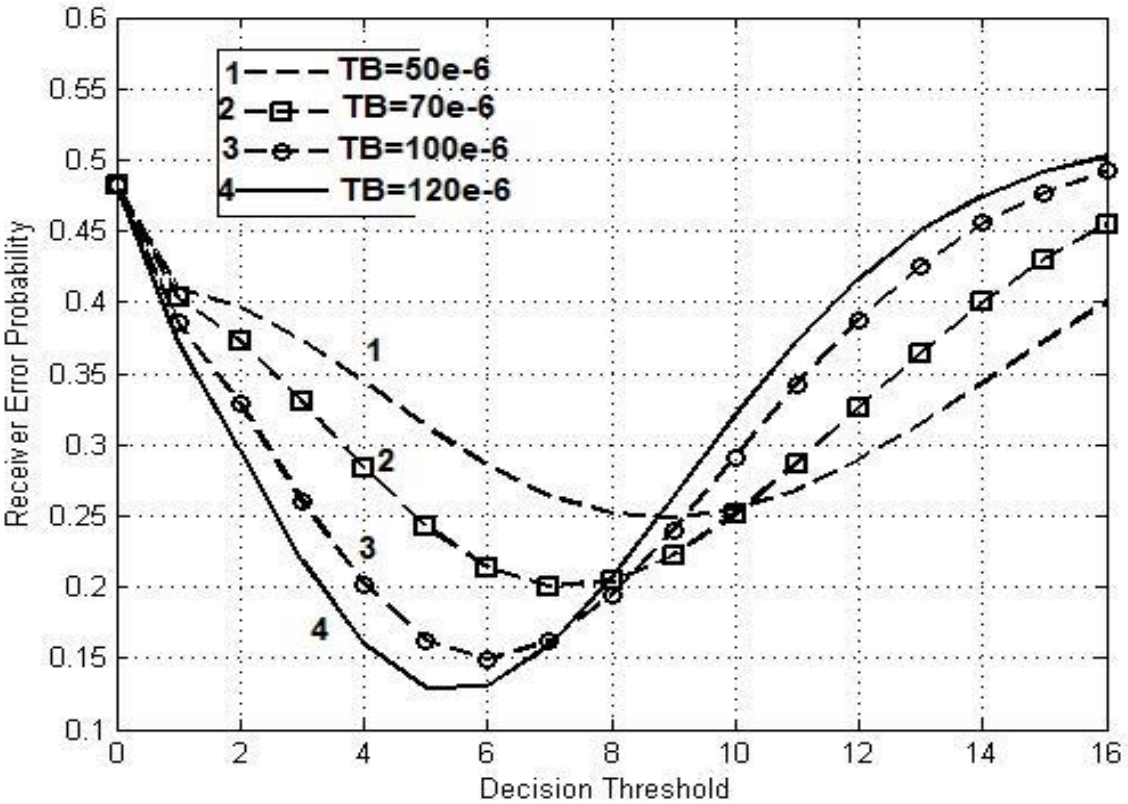


شکل ۴-۸- احتمال خطا برحسب تعداد مولکول‌هایی که فرستنده می‌فرستد برای ۴ حالت مختلف

ازجمله راه‌کارهایی که برای مقابله با تداخل می‌شود انجام داد این است که فاصله‌ی زمانی که سمبل‌ها را داریم می‌فرستیم به‌اندازه کافی از زمان بیشینه بیشتر باشد ($T_B > t_{\max}$). اما همان‌طور که گفتیم هر چه فاصله زمانی بیشتر باشد نرخ ارسال داده پایین می‌آید. پس نمی‌توان به‌دلخواه فاصله زمانی را برای از بین بردن تداخل زیاد کرد. ما در این قسمت فاصله زمانی را ۱۲۰ میکرومتر انتخاب کردیم که تقریباً چهار برابر $t_{\max}$ است. در بخش بعدی به تأثیر فاصله زمانی بر کارایی سیستم خواهیم پرداخت.

۴-۶ بررسی تأثیر فاصله زمانی بر کارایی سیستم

در شکل ۴-۹ احتمال خطا برحسب مقدار آستانه گیرنده برای فاصله زمانی‌های مختلف رسم شده است. در این شبیه‌سازی فاصله بین فرستنده و گیرنده ثابت و برابر ۳۰۰ نانومتر است همچنین تعداد مولکول‌هایی که فرستنده می‌فرستد نیز ثابت و برابر ۵۰۰۰ می‌باشد. با توجه به شکل کامل واضح است که هر چه فاصله زمانی را بیشتر کنیم احتمال خطا کمتر و کمتر خواهد شد به آن دلیل چون هر چه فاصله زمانی بیشتر باشد تأثیر تداخل کمتر می‌شود و درنتیجه احتمال خطا کاهش پیدا می‌کند. در این شبیه‌سازی تداخل همه‌ی سمبل‌های قبلی را در نظر گرفته‌ایم. باید توجه داشت که



شکل ۴-۹- احتمال خطا برحسب مقدار آستانه گیرنده برای فاصله زمانی‌های مختلف

فاصله زمانی را نمی‌توان به‌دلخواه زیاد کرد تا احتمال خطا کمتر شود چون در این صورت نرخ ارسال اطلاعات کاهش پیدا می‌کند. در شبیه‌سازی‌های بعدی ما از مقدار ۱۲۰ میکرومتر برای فاصله زمانی استفاده خواهیم کرد که به‌اندازه کافی بزرگ است. در شکل ۴-۲ به‌خوبی رابطه‌ی بین فاصله زمانی و تداخل سمبل قبلی نشان داده‌شده است .

۴-۷ بررسی تأثیر نوع مدولاسیون بر کارایی سیستم

تا حالا که روابط احتمال خطا را بدست آوردیم، مدولاسیون را مبنی بر غلظت مولکول‌ها در نظر گرفته‌ایم. در این بخش می‌خواهیم احتمال خطا را برحسب مدولاسیون مبتنی بر مهندسی مولکول‌ها بدست آوریم و با مدولاسیون مبتنی بر غلظت مولکول‌ها مقایسه کنیم. مدولاسیون مبتنی بر مهندسی مولکول‌ها شبیه مدولاسیون FSK در مخابرات کلاسیک است، به‌این‌ترتیب که برای ارسال b بیت به 2^b نوع مولکول متفاوت نیاز داریم. یعنی برای ارسال ۱ بیت باید دو نوع مولکول متفاوت بفرستیم، یعنی فرستنده به ازای ارسال صفر مولکول نوع α را در محیط پخش می‌کند و به ازای ارسال یک، فرستنده مولکول‌های نوع β را می‌فرستد که این مولکول‌ها ازنظر شعاع و شکل ظاهری و حتی می‌توانند ازنظر ماهیت باهم تفاوت داشته باشند. در سطح گیرنده باید دو نوع گیرنده‌ی شیمیایی متناسب با مولکول‌های نوع α و β وجود داشته باشد که گیرنده بتواند نوع مولکول‌ها را تشخیص دهد و همین امر پیچیدگی این روش را مشخص می‌کند. مزیت استفاده از این روش کاهش تأثیر تداخل نسبت به روش مبتنی بر غلظت مولکول‌ها می‌باشد. برای بدست آوردن احتمال خطا از روش دوم که روشی ساده‌تر است استفاده می‌کنیم. خطا زمانی رخ خواهد داد که فرستنده مولکول نوع α را بفرستد و گیرنده نوع β تشخیص دهد. برای بدست آوردن احتمال خطا، اثر ناشی از فقط سمبل قبلی را نیز در نظر گرفته‌ایم درنتیجه خواهیم داشت:

$$P_e^{\alpha} = P(\alpha,\beta) = P(\alpha,\alpha,\beta) + P(\beta,\alpha,\beta) \qquad (۴-۳۰)$$

که $P(\alpha,\beta)$ یعنی فرستنده مولکول نوع α را فرستاده و گیرنده نوع β تشخیص داده است، همچنین منظور از $P(Z,\alpha,\beta)$ یعنی فرستنده α بفرستد و گیرنده β تشخیص دهد به‌طوری‌که بیت قبلی که فرستنده فرستاده است Z باشد، که بیت قبلی می‌توان α یا β باشد. درنتیجه خواهیم داشت:

$$P_e^{\alpha} = \left(\frac{1}{2}\right)\left[P\left(N_n \geq \tau\right)P\left(N_C + N_n + N_{ISI} < \tau\right)\right] + \ldots$$

$$\left(\frac{1}{2}\right)\left[P\left(N_{ISI} + N_n \geq \tau\right)P\left(N_C + N_n < \tau\right)\right]$$

$$P_e^{\alpha} = \left(\frac{1}{2}\right)\left[erfc\left(\frac{\tau}{\sqrt{2\sigma^2}}\right) \times erf\left(\frac{\tau - Np_2}{\sqrt{2N\left[p_2(1-p_2) + 2p_1(1-p_1)\right] + \sigma^2}}\right)\right] + \ldots \quad (۴-۳۱)$$

$$\left(\frac{1}{2}\right)\left[erfc\left(\frac{\tau - N(p_2 - p_1)}{\sqrt{2N\left[p_2(1-p_2) + p_1(1-p_1)\right] + \sigma^2}}\right) \times erf\left(\frac{\tau - Np_1}{\sqrt{2Np_1(1-p_1) + \sigma^2}}\right)\right]$$

که در بخش ۴-۳ روابطی برای N_C، N_n ، N_{ISI}، p_1 و p_2 بدست آوردیم. به‌طور مشابه برای حالتی کـه فرستنده مولکول نوع β می‌فرستد و گیرنده نوع α تشخیص می‌دهد، می‌توان نوشت:

$$P_e^{\beta} = P(\beta,\alpha) = P(\alpha,\beta,\alpha) + P(\beta,\beta,\alpha)$$

$$P_e^{\beta} = \left(\frac{1}{2}\right)\left[P\left(N_{ISI} + N_n \geq \tau\right)P\left(N_C + N_n < \tau\right)\right] + \ldots$$

$$\left(\frac{1}{2}\right)\left[P\left(N_n \geq \tau\right)P\left(N_C + N_n + N_{ISI} < \tau\right)\right]$$

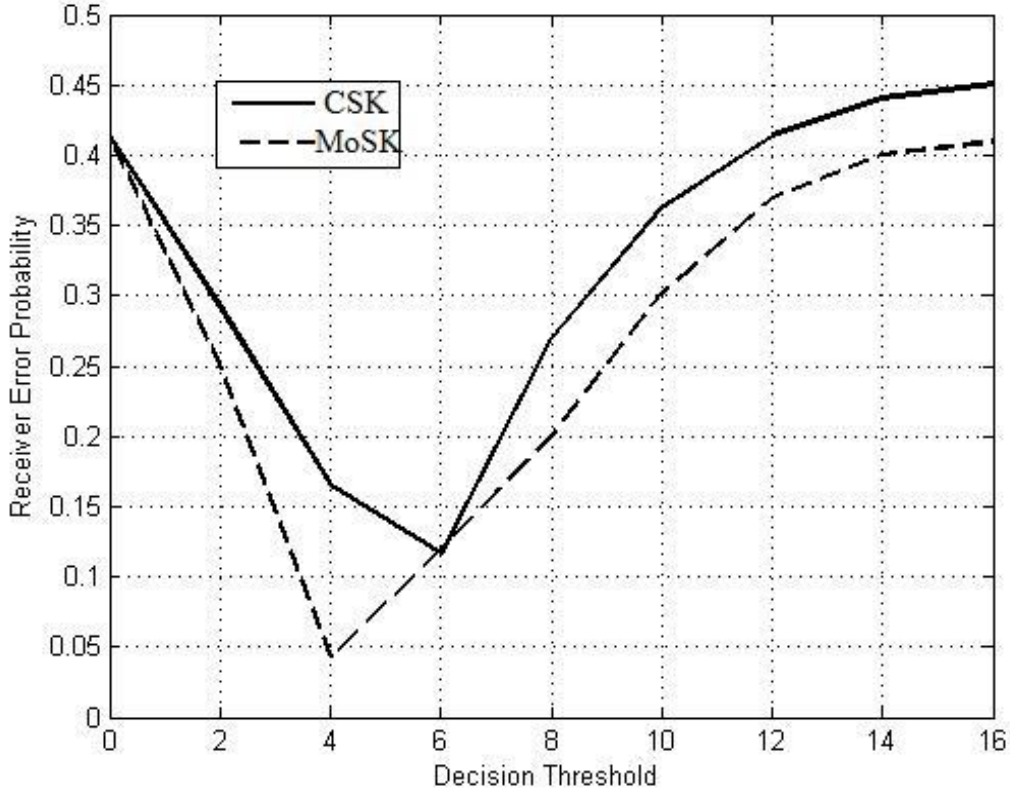
$$P_e^{\beta} = \left(\frac{1}{2}\right)\left[erfc\left(\frac{\tau - N(p_2 - p_1)}{\sqrt{2N\left[p_2(1-p_2) + p_1(1-p_1)\right] + \sigma^2}}\right) \times erf\left(\frac{\tau - Np_1}{\sqrt{2Np_1(1-p_1) + \sigma^2}}\right)\right] + \ldots \quad (۴-۳۲)$$

$$\left(\frac{1}{2}\right)\left[erfc\left(\frac{\tau}{\sqrt{2\sigma^2}}\right) \times erf\left(\frac{\tau - Np_2}{\sqrt{2N\left[p_2(1-p_2) + 2p_1(1-p_1)\right] + \sigma^2}}\right)\right]$$

درنتیجه احتمال خطای کل برابر خواهد بود با:

$$P_E = 0.5 \times \left\{P_e^{\alpha} + P_e^{\beta}\right\} \quad (۴-۳۳)$$

در شکل ۴-۱۰ احتمال خطا برحسب مقدار آستانه‌ی گیرنده برای دو نوع مدولاسیون رسم شده است. همان‌طور که معلوم است احتمال خطا در مدولاسیون مبتنی بر مهندسی مولکول‌ها در مقایسه با مدولاسیون مبتنی بر غلظت مولکول‌ها کمتر است. همان‌طور که گفتیم در مدولاسیون MoSK تداخل ناشی از سمبل قبلی کمتر است و به همین علت احتمال خطا کمتر است.



شکل ۴-۱۰- احتمال خطا بر حسب مقدار استانه برای دوع مدولاسیون، مدولاسیون مبتنی بر غلظت (CSK) و مدولاسیون مبتنی بر مهندسی مولکول ها (MoSK)

۴-۸ بررسی تأثیر شار بر روی کارایی سیستم

شار یا جریان ازجمله عواملی است که بر روی احتمال خطا و به‌طورکلی بر روی کارایی سیستم مخابراتی تأثیرگذار است. خون رگ نمونه‌ای از شار در داخل بدن است. شار بر روی پخش مولکول‌ها در محیط، با توجه به‌سرعت شار می‌تواند خیلی تأثیر بگذارد.

فرض می‌کنیم که فرستنده در مبدأ مختصات و گیرنده در مختصات $\{x_0,0,0\}$ قرارگرفته است. شار را می‌توان در همه‌ی جهات محورهای مختصات در نظر گرفت اما ما در این پایان‌نامه شار را در جهت محور X و هم‌راستا با فرستنده و گیرنده در نظرخواهیم گرفت. به‌طورکلی شار بر روی فاصله فرستنده و گیرنده مؤثر خواهد بود و در حضور شار می‌توان نوشت[۳۴]:

$$\left|r_{eff}\right| = \sqrt{\left(x_0 - \upsilon_x t\right)^2 + \left(y_0 - \upsilon_y t\right)^2 + \left(z_0 - \upsilon_z t\right)^2} \qquad (۳۴-۴)$$

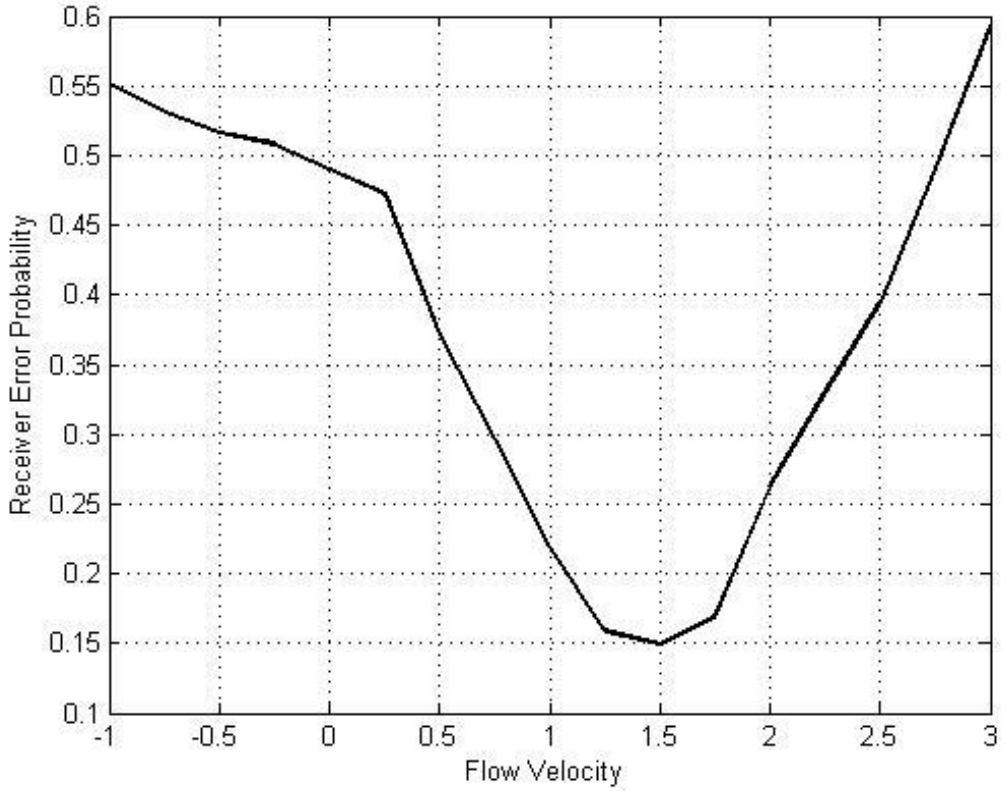
که υ_x، υ_y و υ_z به ترتیب سرعت در جهت محور x ، y و z هستند و چون ما فرض کردیم که

گیرنده در مکان $\{x_0,0,0\}$ قرار دارد و شار هم فقط در راستای محور x و هم‌راستا با فرستنده و گیرنده داریم بنابراین با توجه به رابطه‌ی (۴-۳۴) خواهیم داشت:

$$\left|r_{eff}\right| = \sqrt{\left(x_0 - \upsilon_x t\right)^2} \qquad (۳۵ -۴)$$

در شبیه‌سازی‌های قبلی ما فاصله بین فرستنده و گیرنده، (x_0) را ۳۰۰ نانومتر فرض کردیم. پس با توجه به رابطه‌ی (۴-۳۵) می‌توان گفت که اگر جریان در جهت پخش مولکول‌ها یعنی از فرستنده به گیرنده باشد در این صورت سرعت مثبت است و باعث کاهش فاصله بین فرستنده و گیرنده می‌شود. اما اگر جریان در خلاف جهت پخش مولکول‌ها باشد در این صورت سرعت منفی و در کل باعث افزایش فاصله بین فرستنده و گیرنده می‌شود.

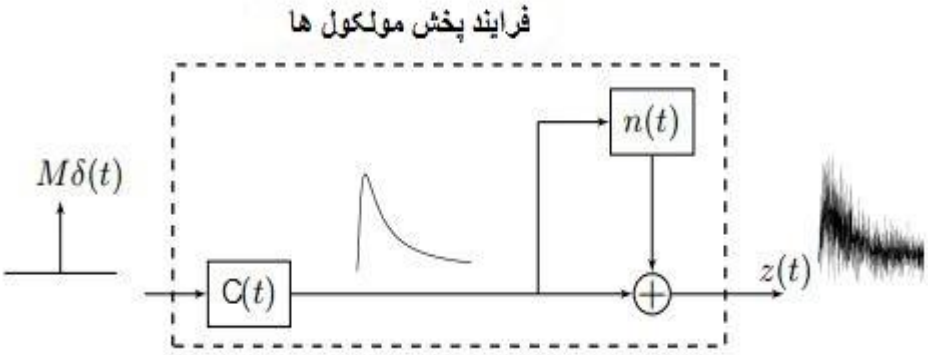
در شکل ۴-۱۱ احتمال خطا برحسب سرعت شار رسم شده است. در این شکل هم به ازای سرعت‌های منفی و هم به ازای سرعت‌های مثبت احتمال خطا نشان داده‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنیم وقتی سرعت منفی است احتمال خطا بالا و با کم شدن این سرعت تا صفر کم‌کم احتمال خطا پایین می‌آید. و این به این خاطر است که سرعت منفی یعنی در خلاف جهت پخش مولکول‌ها شار وجود دارد و مانع رسیدن مولکول‌ها به گیرنده می‌شود. به‌محض مثبت شدن سرعت یعنی هم‌راستا شدن شار با پخش مولکول‌ها احتمال خطا کاهش پیدا می‌کند. اما همان‌طور که مشاهده می‌کنیم از یک حدی که سرعت بیشتر می‌شود احتمال خطا به‌شدت افزایش پیدا می‌کند. و این به این خاطر است که تا وقتی‌که سرعت شار کم است، شار، غلظت مولکول‌های ناشی از سمبل‌های قبل را تا رسیدن غلظت مولکول‌های جدید، از اطراف گیرنده دور می‌کند و باعث کاهش تداخل و درنتیجه کاهش احتمال خطا می‌شود. اما به‌محض این‌که سرعت شار از مقدار بهینه بیشتر شود باعث افزایش احتمال خطا خواهد شد چون اگر شار با سرعت زیاد جریان داشته باشد به مولکول‌های رسیده به گیرنده فرصت نخواهد داد که گیرنده آن‌ها را شناسایی کند و گیرنده درهرحال تصمیم می‌گیرد که صفر ارسال‌شده است. باید تأکید کنیم که در شکل ۴-۱۱ تداخل ناشی از همه سمبل‌های قبلی در نظر گرفته‌شده است و به ازای فاصله زمانی ۱۲۰ میکرومتر شبیه‌سازی‌شده است.



شکل ۴-۱۱- احتمال خطا برحسب سرعت شار (m/s)

۴-۹ بررسی تأثیر نویز بر کارایی سیستم

نویز در یک سیستم مخابرات مولکولی مانند هر سیستم مخابرات دیگری باعث افزایش احتمال خطا و درنتیجه پایین آمدن کارایی سیستم می‌گردد. نویز در مخابرات مولکولی ناشی از حرکت تصادفی مولکول‌ها است، چون وقتی فرستنده غلظتی شامل M مولکول را در محیط پخش می‌کند مولکول‌ها به‌طور آزادانه و در هر جهتی در محیط پخش می‌شوند و بعضی از مولکول‌ها ممکن است هرگز به گیرنده نرسند یا مولکول‌های ناشی از سمبل‌های قبلی که در محیط سرگردان هستند به گیرنده برسند. در شکل ۴-۱۲ نویز که ناشی از حرکت تصادفی مولکول‌ها است به‌خوبی نشان داده‌شده است. نویز می‌تواند ناشی از فرستنده‌های دیگری نیز باشد که از همان نوع مولکول برای برقراری ارتباط استفاده می‌کنند.



شکل ۴-۱۲- نشان دادن نویز ناشی از حرکت تصادفی مولکول‌ها

در [۲۸] نویز را به‌صورت یک نویز سفید گوسی جمع کننده با میانگین صفر و واریانس σ^2 مدل کرده است پس خواهیم داشت:

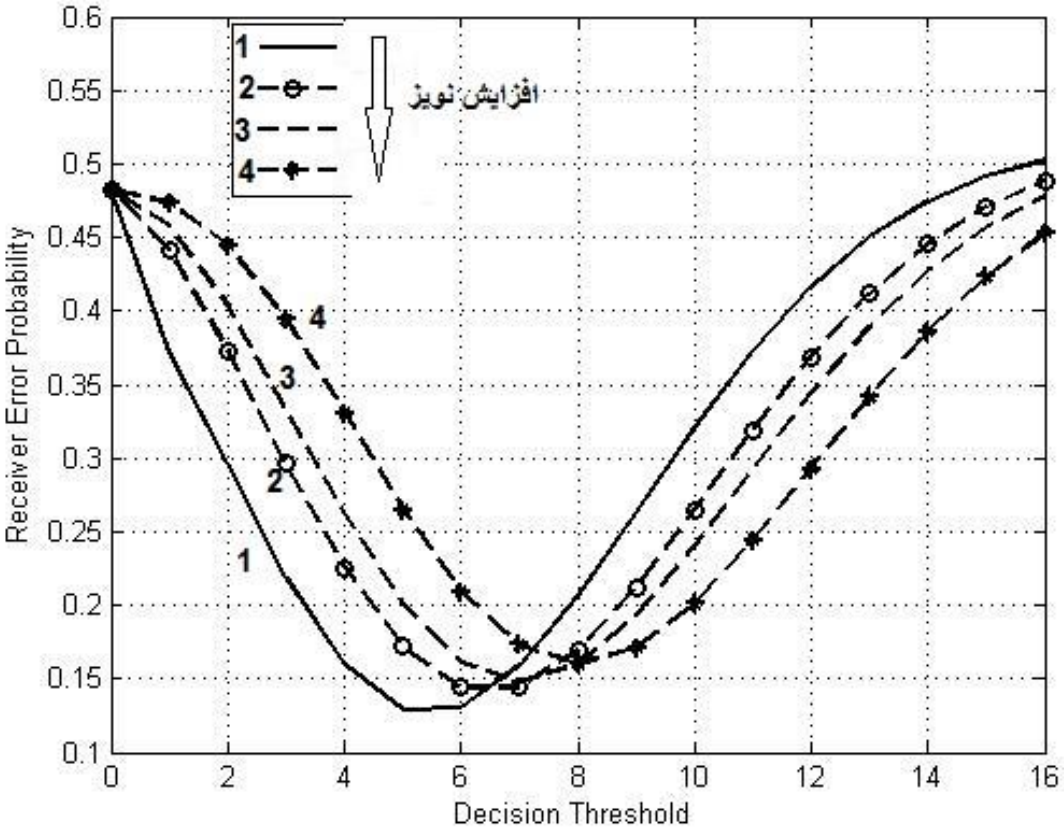
$$N_n \sim Normal(0,\sigma^2) \qquad (۳۶-۴)$$

که N_n نشان‌دهنده‌ی تعداد مولکول‌هایی است که در اثر نویز اضافه می‌شوند. واریانس هم از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\sigma^2 = \frac{3\times C(r_0,t)}{4\pi\rho^3} \qquad (۳۷-۴)$$

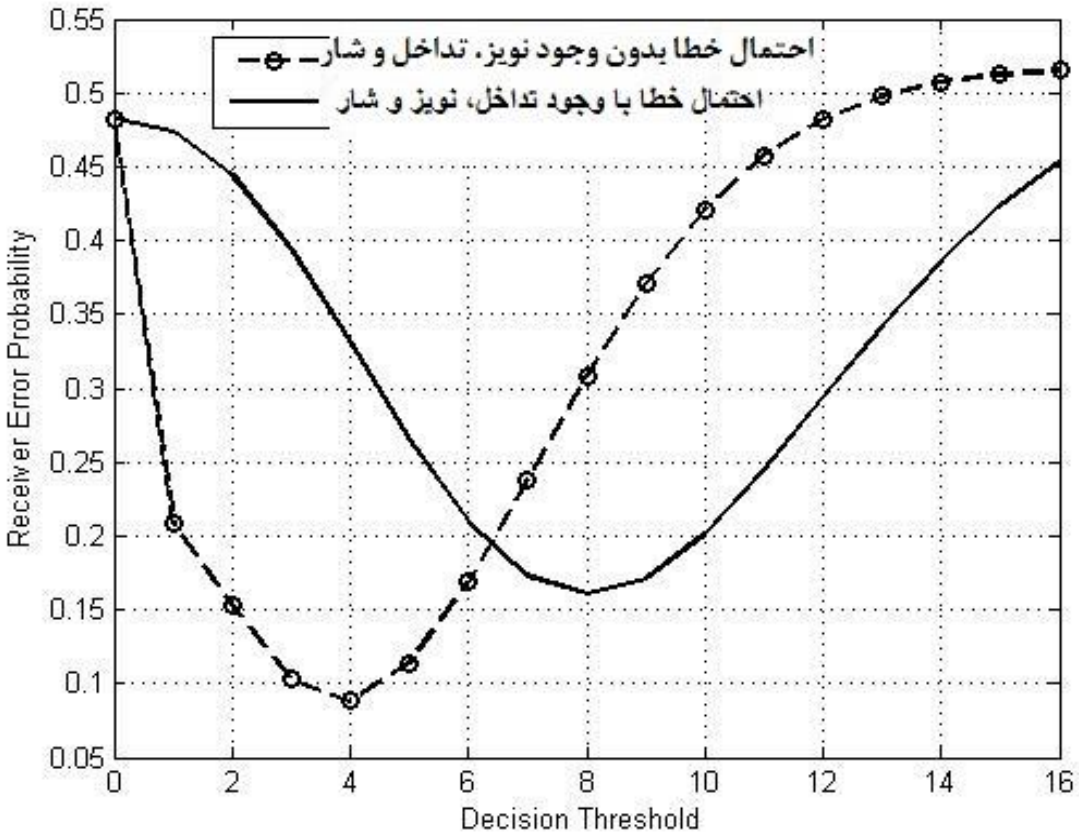
که ρ شعاع گیرنده است و $C(r_0,t)$ غلظت مولکول‌های رسیده به گیرنده می‌باشد. با توجه به رابطه‌ی (۴-۳۷) خواهیم فهمید که هر چه تعداد مولکول‌هایی که فرستنده می‌فرستد یا به عبارتی غلظت مولکول‌های که به گیرنده می‌رسند بیشتر باشد نویز بیشتر خواهد شد، همچنین نویز با شعاع گیرنده رابطه‌ی عکس دارد. چه بخواهیم یا نه در یک سیستم مخابراتی نویز وجود دارد. هرچند که راه‌حل‌هایی برای کاهش ان وجود دارد ازجمله این‌که تعداد مولکول‌هایی که می‌فرستیم را کاهش دهیم ، هرچند که زیاد اجازه چنین کاری را نداریم چون در این صورت غلظتی به گیرنده نمی‌رسد پس به‌ناچار باید تعداد مولکول‌هایی که فرستنده می‌فرستد به‌اندازه کافی بزرگ باشند.

در شکل ۴-۱۳ احتمال خطا برحسب مقدار آستانه برای حالت‌های مختلف رسم شده است. نمودار ۱ برای حالتی است که اصلاً نویز نداریم و به ترتیب نویز را کم‌کم افزایش دادیم به‌طور که نمودار ۴ از همه‌ی آن‌ها نویز بیشتر دارد. همچنان که مشاهده می‌کنیم با افزایش نویز احتمال خطا بیشتر شده و نقطه‌ی بهینه هم جابه‌جا می‌شود.



شکل ۴-۱۳- بررسی تاثیر نویز بر روی احتمال خطا

در شکل ۴-۱۴ احتمال خطا برحسب مقدار آستانه برای دو حالت یعنی وقتی‌که نویز، تداخل و شار نداریم و همچنین وقتی‌که هر سه این پارامتر را به هم داریم نشان داده‌شده است. این شکل طبق پارامترهای جدول ۴-۱ شبیه‌سازی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنیم در اثر وجود این سه پارامتر، هم احتمال خطا خیلی افزایش پیداکرده و هم اینکه نقطه‌ی بهینه جابه‌جاشده است. البته باید تأکید کنم که برای تأثیر شار، آن را بیشتر از ۱.۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته‌ایم. باید تأکید کرد که در بین سه پارامتر نویز، تداخل و شار، تداخل بیشتر اثر را بروی کارایی سیستم و بالا بردن احتمال خطا دارد، مخصوصاً تداخل ناشی از سمبل قبل که در شکل ۴-۶ به‌خوبی نشان داده‌شده است.



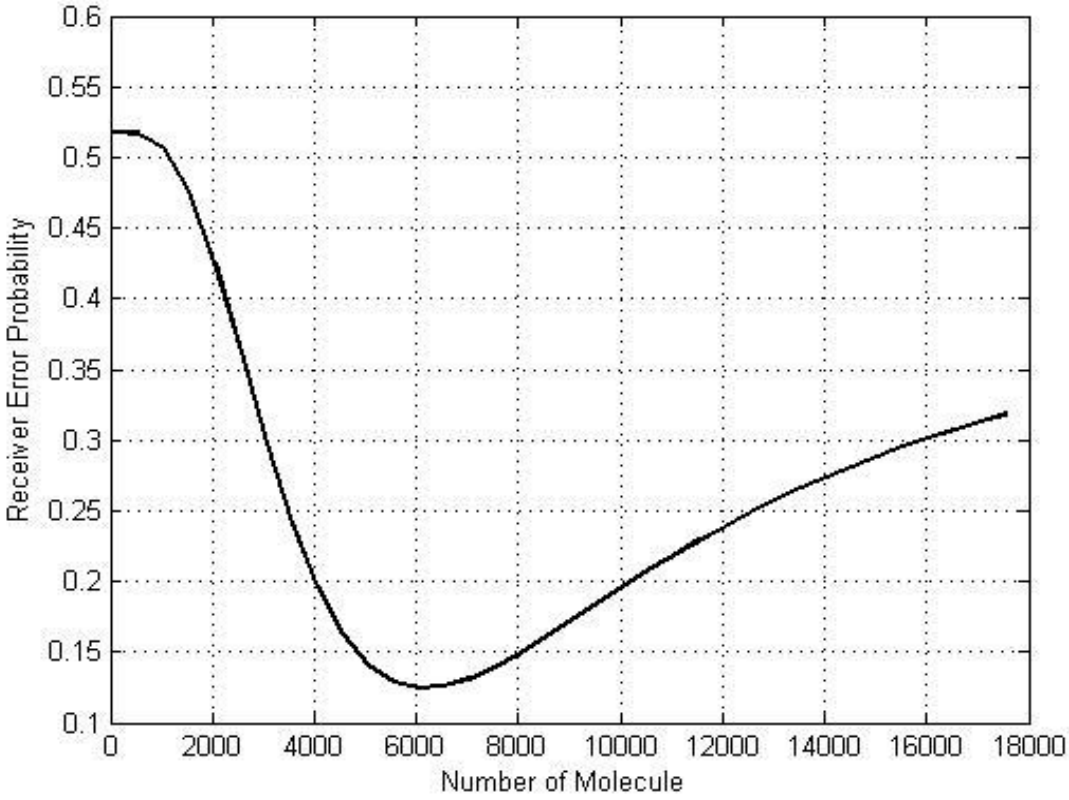
شکل ۴-۱۴- بررسی تأثیر نویز، تداخل و شار با هم بر روی احتمال خطا

۴-۱۰بررسی تأثیر تعداد مولکول‌های ارسالی بر روی کارایی سیستم

در کارهایی که تا الان منتشرشده فرض شده است که تعداد مولکول‌هایی که فرستنده برای هر بار ارسال سمبل در محیط پخش می‌کند ثابت هستند. چون در مخابرات مولکولی مانند مخابرات کلاسیک به‌سادگی نمی‌توانیم از فیدبک برای آگاهی از اوضاع کانال و فاصله بین فرستنده و گیرنده استفاده کنیم. در مخابرات کلاسیک می‌توان توانی که فرستنده می‌فرستد را به‌دلخواه و با توجه به شرایط کانال به‌سادگی کم‌وزیاد کرد. اما در مخابرات مولکولی به‌سادگی این امر امکان‌پذیر نیست.

شکل ۴-۱۵ احتمال خطا برحسب تعداد مولکول‌های ارسالی برای یک سیستم با فاصله ثابت را نشان می‌دهد. همان‌طور که واضح است وقتی‌که تعداد مولکول‌های ارسالی پایین باشند احتمال خطا بالا است چون در این صورت گیرنده بیشتر تصمیم می‌گیرد که فرستنده صفر یعنی غلظتی از مولکول‌ها را ارسال نکرده است. با زیادشدن تعداد مولکول‌ها احتمال خطا کاهش پیدا می‌کند. اما به‌محض این‌که تعداد مولکول‌ها از حدی بیشتر شوند احتمال خطا دوباره افزایش پیدا می‌کند چون در این صورت تداخل ناشی از سمبل‌های قبل افزایش پیدا می‌کند و گیرنده در صورت ارسال صفر

تصمیمی می‌گیرد که یک ارسال‌شده است.



شکل ۴-۱۵- احتمال خطا برحسب تعداد مولکول‌های ارسالی

۴-۱۱ بررسی تأثیر فاصله بر کارایی سیستم

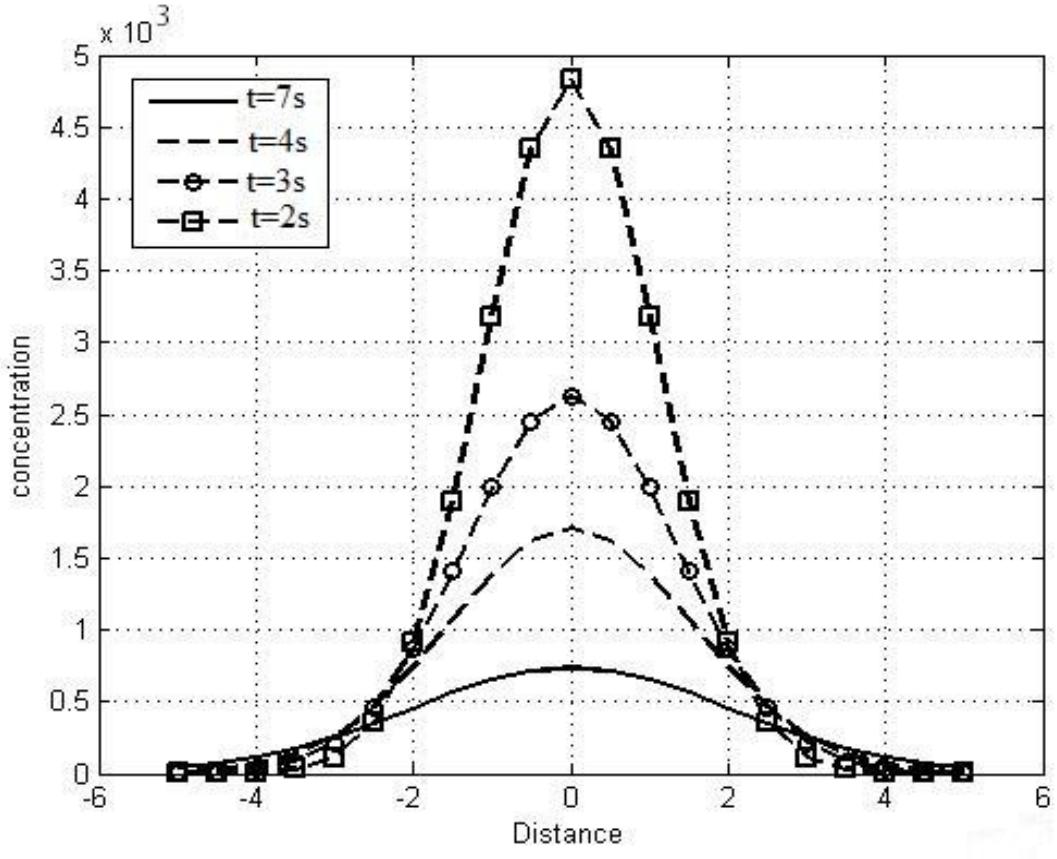
تا حالا فرض کردیم که فاصله بین فرستنده و گیرنده ثابت است. اما همان‌طور که می‌دانیم نانو ماشین‌های فرستنده و گیرنده در یک محیط سیال قرا دارند و هرلحظه امکان دارد براثر عواملی مانند شار این فاصله تغییر کند. با فرض این‌که تعداد مولکول‌هایی که فرستنده می‌فرستد ثابت باشد، با بیشتر شدن فاصله بین فرستنده و گیرنده غلظت مولکول‌های رسیده به گیرنده همواره از مقدار آستانه کمتر خواهد بود و همواره گیرنده تصمیمی می‌گیرد که صفر ارسال‌شده است. برعکس وقتی‌که فرستنده و گیرنده به هم نزدیک شوند غلظت مولکول‌های رسیده به گیرنده از مقدار آستانه بیشتر خواهد شد و گیرنده همواره تصمیمی می‌گیرد که یک ارسال‌شده است.

شکل ۴-۱۶ غلظت مولکول‌ها برحسب فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده به ازای تعداد مولکول‌های ثابت را نشان می‌دهد. همان‌طور که واضح است وقتی فاصله نزدیک است غلظت مولکول‌ها زیاد است اما هر چه این فاصله بیشتر شود غلظت هم کمتر خواهد شد تا اینکه درنهایت هیچ مولکولی به گیرنده

نمی‌رسد. برای حل این مشکل بهترین کار این است که با بیشتر شدن فاصله بین فرستنده و گیرنده یا فرستنده تعداد مولکول‌های خود را افزایش دهد یا اینکه گیرنده مقدار آستانه خود را پایین آورد، اما چنین کاری در حال حاضر در مخابرات مولکولی عملی نیست. در بخش بعدی بیشتر در این مورد حرف خواهیم زد و راه‌کاری را برای این مشکل ارایه خواهیم داد. اگر از غلظت نسبت به فاصله مشتق بگیریم و مساوی صفر قرار بدهیم می‌بینیم که بیشینه غلظت به ازای $r=0$ بدست می‌آید :

$$\frac{\delta C(r,t)}{\delta r} = 0 \Rightarrow r = 0 \qquad (۳۸-۴)$$

که کاملاً منطقی است که به ازای $r=0$ بیشترین غلظت را داشته باشیم چون هر چه فاصله از منبع تولیدکننده‌ی غلظت بیشتر شود معمولاً غلظت کمتر می‌شود ، همان‌طور که در شکل ۴-۱۶ نشان داده‌شده است. در شکل ۴-۱۶ غلظت به ازای زمان های مختلف رسم شده است و همان طور که واضح است به ازای زمان های کمتر غلظت بیشتر است و این نشان دهنده ی این است که هرچه زمان بیشتری بگذرد غلظت کمتر و کمتر می شود



شکل ۴-۱۶- غلظت مولکول‌ها برحسب فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده برای زمان های مختلف

۴-۱۱-۱ راه‌حلی برای کاهش تأثیر تغییر فاصله

در مخابرات کلاسیک با تغییر فاصله بین فرستنده و گیرنده به‌راحتی می‌توان مقدار توانی که فرستنده می‌فرستد را کم‌وزیاد کرد تا پیام به‌درستی و با کمترین احتمال خطای ممکن ارسال شود، چون در این نوع مخابرات با توجه به‌سرعت بالای امواج الکترومغناطیسی می‌توان در هرلحظه فیدبکی از شرایط محیط گرفت و با توجه به تغییرات کانال و وضعیت فرستنده و گیرنده اقدامات لازم را انجام داد. اما همان‌طور که می‌دانیم در مخابرات مولکولی به دلیل سادگی نانو ماشین‌های فرستنده و گیرنده که توان انجام دادن هر نوع عملیات ریاضی را ندارند و همچنین ذات این نوع مخابرات مبنی بر این‌که به‌اندازه کافی سریع نیست به‌سادگی نمی‌توان مثل مخابرات کلاسیک فیدبک بگیریم، تا با توجه به شرایط، غلظت مولکول‌ها یا مقدار آستانه گیرنده را تغییر دهیم.

در [۴۱]،[۴۲] از فیدبک در مخابرات مولکولی برای تعیین فاصله بین فرستنده و گیرنده استفاده کرده‌اند و همچنین در [۴۳]،[۴۴] بدون استفاده از فیدبک و با استفاده از تخمین، فاصله بین فرستنده و گیرنده را به دست آورده‌اند. اما مشکل استفاده از ین روش‌ها مخصوصاً در آن‌هایی که از تخمین استفاده کرده‌اند پیچیدگی معادلات و غیرقابل اجرا بودن برای نانو ماشین‌های فرستنده و گیرنده است. همچنین در استفاده از فیدبک باید فرستنده و گیرنده سنکرون باشند که در این مقالات حرفی در این مورد زده نشده و فرض بر این است که سنکرون باشند. همچنین با خاطر کند بودن سرعت انتقال اطلاعات، استفاده از فیدبک غیرعملی و غیرممکن است.

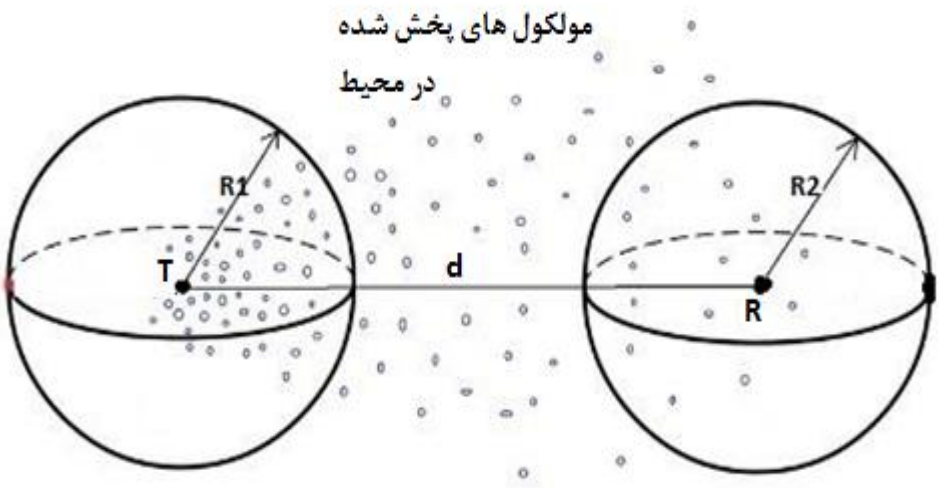
ازجمله فرض‌هایی که در این سیستم مدل در نظر گرفتیم شامل موارد زیر است:

۱) در این مدل فرستنده را با مدولاسیون On-Off keying در نظر می‌گیریم به این صورت که وقتی می‌خواهیم ۱ بفرستیم پالسی از مولکول‌ها شامل M مولکول را می‌فرستیم و وقتی می‌خواهیم یک بفرستیم هیچی نمی‌فرستیم.
۲) کانال ما هم می‌تواند شامل نویز ناشی از حرکت تصادفی مولکول‌ها باشد و هم می‌تواند شامل تداخل ناشی از سمبل‌های قبلی که فرستادیم و یا شار باشد.
۳) گیرنده دارای یک مقدار آستانه است که اگر تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده از مقدار آستانه بیشتر باشد یعنی یک ارسال‌شده و اگر کمتر باشد یعنی صفر. فضای اطراف گیرنده به شعاع ρ و حجم V_R در نظر گرفته‌شده است و فرض شده است تعداد مولکول‌های داخل این فضا به‌طور یکنواخت پخش‌شده‌اند.

با توجه به این فرض‌ها و شرایط محیط ما احتمال خطا را برحسب فاصله‌ی بین فرستنده و

گیرنده و تعداد مولکول‌های ارسالی و همچنین شرایط محیط طبق رابطه‌ی (۴-۱۵) به دست آوردیم.

کاری که در این زمینه می‌خواهیم انجام بدهیم تخمین فاصله یا استفاده از فیدبک برای به دست آوردن فاصله نیست. همان‌طور که در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است فرض می‌کنیم که فرستنده و گیرنده، در هرجایی داخل کره می‌توانند قرار داشته باشند. فرستنده و گیرنده می‌توانند بر اساس توزیع یکنواخت یا گوسی در هر نقطه‌ای از داخل کره قرار داشته باشند.



شکل ۴-۱۷- جابه‌جایی فرستنده و گیرنده در کره‌هایی به شعاع R_1 و R_2

ازجمله فرض‌هایی که برای این سستم مدل در نظر گرفته‌ایم :

۱) شعاع کره‌ها (R_1 و R_2) از شعاع فضای اطراف گیرنده بزرگ‌تر هستند اما نسبت به فاصله بین فرستنده و گیرنده کوچک‌تر هستند.
۲) فرستنده و گیرنده بر اساس توزیع یکنواخت در هر نقطه داخل کره می‌توانند قرار گیرند.
۳) فرستنده در مبدأ مختصات و گیرنده در نقطه‌ی $\{x_0,0,0\}$ و به فاصله d از هم قرار دارند.

حال می‌خواهم مقدار آستانه در گیرنده یا غلظت مولکول‌هایی که فرستنده می‌فرستد را طوری تعیین کنیم که به ازای هر فاصله‌ای که فرستنده و گیرنده می‌توانند از هم داشته باشند احتمال خطا از حدی بالاتر نرود یا ظرفیت کانال از حدی پایین‌تر نیاید. این کار شبیه ظرفیت ارگادیک[1] در

[1] Ergodic Capacity

مخابرات کلاسیک است به این صورت که ما با توانی که به‌اندازه کافی بزرگ است پیام را می‌فرستیم تا تغییر در فاصله بین فرستنده و گیرنده یا هر شرایط بد دیگری تأثیری در پیام ما نداشته باشد. همین کار را می‌شود در مخابرات مولکولی انجام داد به این صورت که مقدار غلظتی که فرستنده می‌فرستد یا مقدار آستانه‌ی گیرنده را طوری تعیین کنیم که تغییر فاصله باعث نشود احتمال خطا از حدی بالاتر رود.

درنتیجه برای رسیدن به چنین نتیجه‌ای باید میانگین احتمال خطا را نسبت به مقدار آستانه گیرنده یا تعداد مولکول‌هایی که فرستنده می‌فرستد را کمینه کنیم درنتیجه خواهیم داشت:

$$\min_{\tau} E\{(P_e(M,r,\tau))\} \qquad (۳۹-۴)$$

که $P_e(M,r,\tau)$ احتمال خطا برحسب مقدار مولکول‌های فرستنده M ، فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده و مقدار آستانه گیرنده است که در رابطه‌ی (۴-۱۵) و (۴-۲۷) بدست آوردیم. E امید ریاضی[1] یا همان میانگین است. با توجه به رابطه‌ی (۴-۳۹) می‌خواهیم بهترین مقدار آستانه را طوری تعیین کنیم که احتمال خطا به ازای هر فاصله‌ای که فرستنده و گیرنده می‌توانند از هم داشته باشند مینیمم گردد.

باید توجه داشته باشیم که در این حالت فاصله بین فرستنده و گیرنده به‌طور تصادفی و در هر نقطه در داخل کره می‌تواند تغییر کند. اگر فرض کنیم که فرستنده در مبدأ مختصات یعنی در (0,0,0) قرار دارد و مرکز گیرنده در فاصله d از فرستنده و در مختصات (d,0,0) است در این صورت x,y,z در مختصات کروی به‌صورت زیر حساب می‌شوند:

$$\begin{aligned} x_1 &= r_1 \sin\phi_1 \cos\theta_1 \\ y_1 &= r_1 \sin\phi_1 \sin\theta_1 \\ z_1 &= r_1 \cos\phi_1 \end{aligned} \qquad (۴۰-۴)$$

و همچنین خواهیم داشت:

[1] Expectation

$$x_2 = d + r_2 \sin\phi_2 \cos\theta_2$$
$$y_2 = r_2 \sin\phi_2 \sin\theta_2 \qquad (۴۱-۴)$$
$$z_2 = r_2 \cos\phi_2$$

با توجه به روابط بالا می‌توان گفت که r_1، θ_1 و φ_1 مربوط به تغییرات فرستنده در داخل کره و r_2، θ_2 و φ_2 مربوط به تغییرات گیرنده می‌باشد.و همچنین (z_1,y_1,x_1) مربوط به فرستنده و (z_2,y_2,x_2) مربوط به گیرنده می‌باشد . در این صورت فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$r^2 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 \qquad (۴۲-۴)$$

پس با توجه به روابط بالا می‌توان رابطه‌ی (۴-۳۹) را به‌صورت زیر نوشت:

$$E\{P_e(Q,\tau,r)\} = \int_{r_1=0}^{R_1}\int_{\theta_1=0}^{2\pi}\int_{\phi_1=0}^{\pi}\int_{r_2=0}^{R_2}\int_{\theta_2=0}^{2\pi}\int_{\phi_2=0}^{\pi} P_e(Q,\tau,r)\frac{3}{4\pi R_1^3}\times\frac{3}{4\pi R_2^3}\times\ldots$$
$$r_2^2 \sin\phi_2 r_1^2 \sin\phi_1 d\phi_2 d\theta_2 dr_2 d\phi_1 d\theta_1 dr_1 \qquad (۴۳-۴)$$

اگر بخواهیم رابطه‌ی (۴-۴۳) را مینیمم کنیم به شکل بسته‌ای نخواهیم رسید اما در شبیه‌سازی می‌توان چنین معادله‌ای را حل کرد و بهینه کرد. باید تأکید کنیم که لازم نیست نانو ماشین‌های فرستنده یا گیرنده معادله بالا را حل کنند، بلکه ما خودمان حل می‌کنیم و نتایج را در نانو ماشین‌ها قرار می‌دهیم. برای شبیه‌سازی رابطه‌ی (۴-۴۳) مطابق الگوریتم زیر عمل می‌کنیم

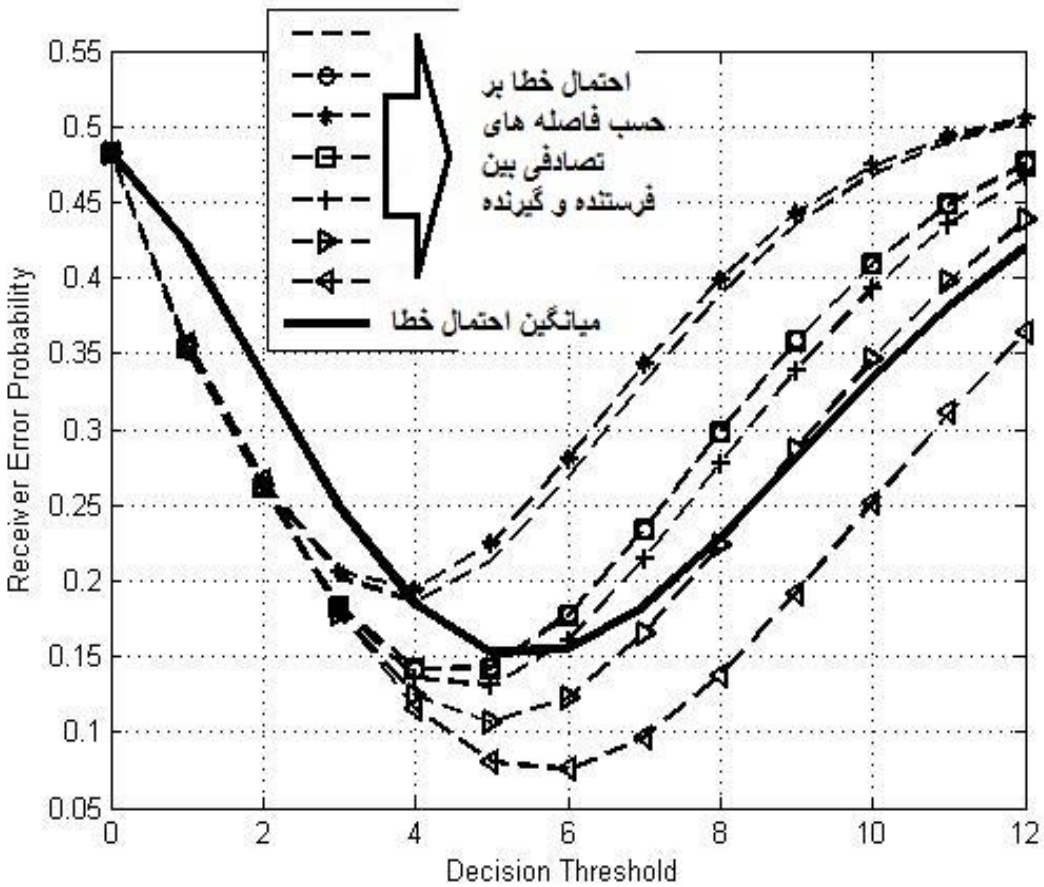
الگوریتم برای محاسبه‌ی رابطه‌ی (۴-۴۳)

---

۱. انتخاب نقاط تصادفی برحسب توزیع یکنواخت یا گوسی برای r_1,θ_1,ϕ_1 و r_2,θ_2,ϕ_2
۲. محاسبه r بر طبق رابطه‌ی ۴-۴۲
۳. for y=1: num r ⟵ منظور از num r تعداد r است که از مرحله ۲ بدست آوردیم.
۴. for n=1:10 ⟵ چون فرض کردیم که فرستنده ۱۰ بیت را پشت سر هم می‌فرستد.
۵. $t = (n-1)T_B + t_{\max}$
۶. محاسبه P_{one} طبق رابطه‌ی ۴-۹
۷. end for

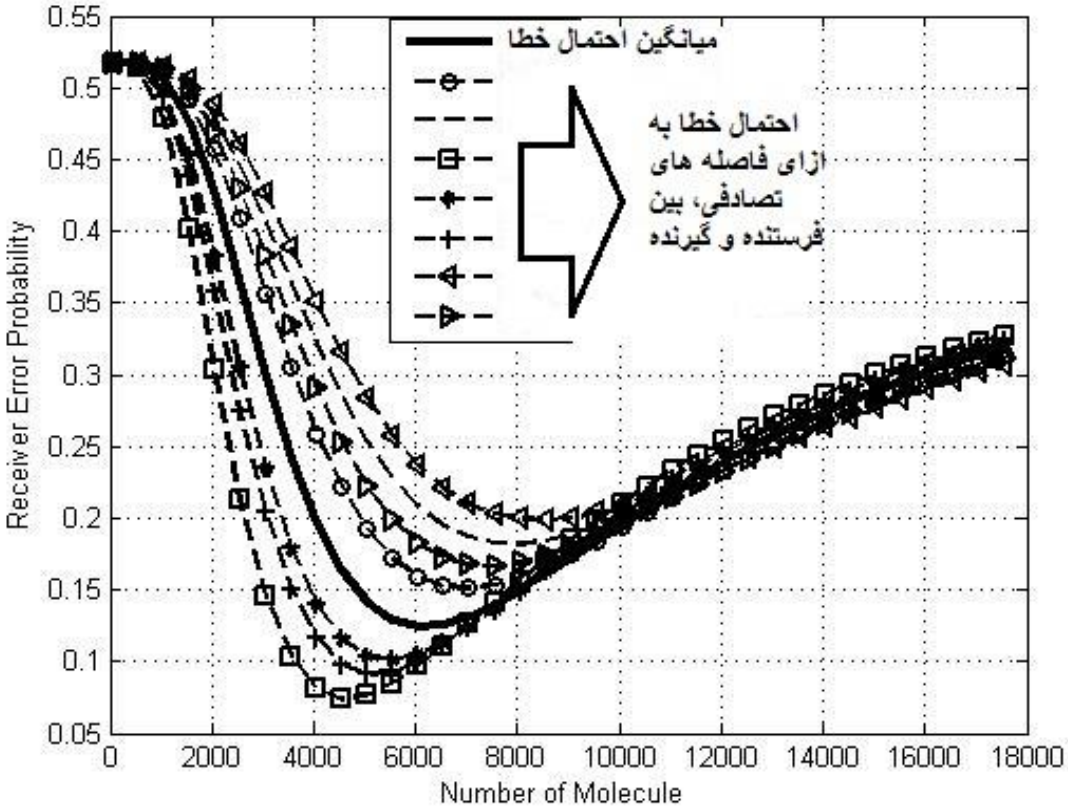
۸. end for
۹. Treshold=0:12
۱۰. for z=1: num r
۱۱. for t=1: num Treshold
۱۲. for n=1: 10
۱۳. for q=1: 10 ⟵ تعداد تکرار مراحل به‌اندازه تعداد بیت‌ها
۱۴. محاسبه تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده طبق رابطه‌ی ۴-۲۸
۱۵. if bit=1
۱۶. محاسبه‌ی احتمال خطا طبق رابطه‌ی ۴-۱۲
۱۷. else
۱۸. محاسبه‌ی احتمال خطا طبق رابطه‌ی ۴-۱۱
۱۹. end if
۲۰. end q
۲۱. end n
۲۲. محاسبه‌ی میانگین احتمال خطای مراحل ۱۶ و ۱۸
۲۳. end t
۲۴. end z

شکل ۴-۱۸ احتمال خطا برحسب مقدار آستانه را نشان می‌دهد. در این شکل نموداری که با خط پررنگ معلوم است، نتیجه حل معادله‌ی (۴-۴۳) است، یعنی مینیمم کردن احتمال خطا برحسب مقدار آستانه است. همان‌طور که واضح است مقدار آستانه‌ی بهینه‌ای که به ازای ان احتمال خطا مینیمم است در حد وسط است و در اثر تغییرات فاصله تغییر چندانی نخواهد کرد. بقیه‌ی نمودارها که با خط کم‌رنگ نشان داده است به ازای حرکت تصادفی فرستنده و گیرنده در داخل کره و فاصله‌های تصادفی که به وجود میان رسم شده است. نباید انتظار داشته باشیم که به ازای حل معادله‌ی (۴-۴۳) به مقدار آستانه‌ای برسیم که به ازای ان احتمال خطا از بقیه نمودارها پایین‌تر باشد، چون ما به دنبال مقدار آستانه‌ای هستیم که به ازای تغییر فاصله کمترین جابه‌جایی را داشته باشد.



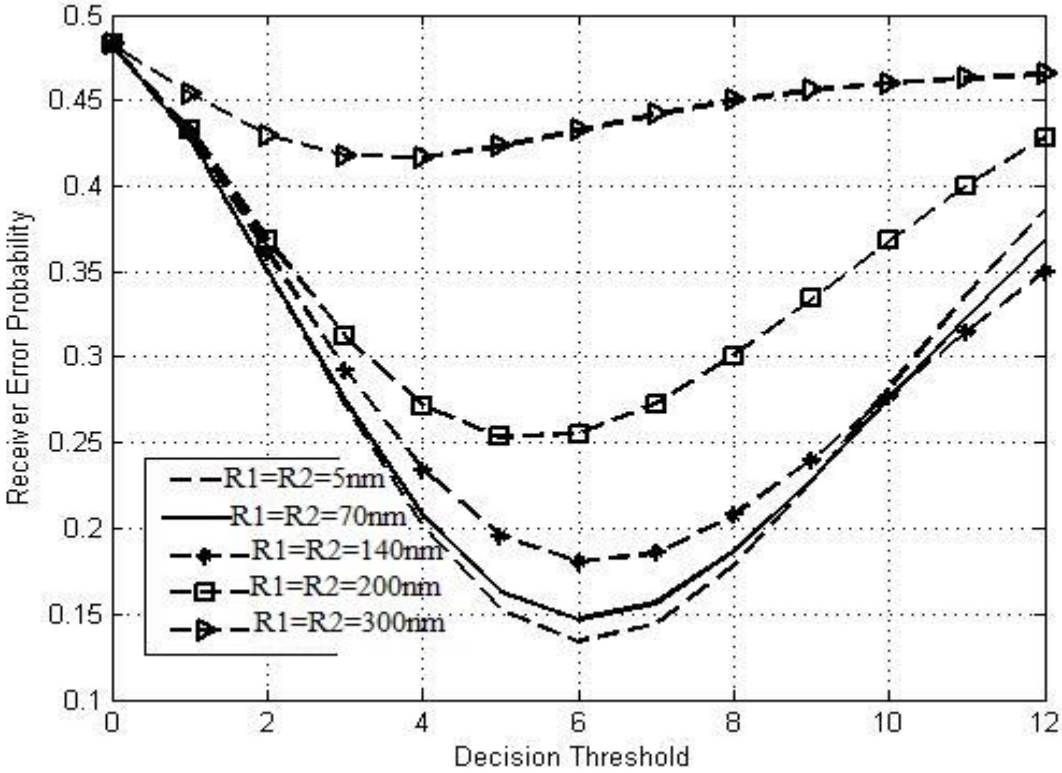
شکل ۴-۱۸- میانگین احتمال خطا برحسب مقدار آستانه باوجود، نویز، تداخل و شار

در شکل ۴-۱۹ احتمال خطا برحسب تعداد مولکول‌های ارسالی توسط فرستنده نشان داده‌شده است. در این شکل میانگین احتمال خطا را برحسب تعداد مولکول‌های ارسالی مینیمم کردیم و همان‌طور که مشاهده می‌کنیم در این حالت در اثر تغییر فاصله نقطه‌ی بهینه کمترین جابه‌جایی را خواهد داشت. باید تأکید کنیم در نمودارهای ۴-۱۸ و ۴-۱۹ اثر نویز، تداخل و شار را در نظر گفته‌ایم و بقیه پارامترهای موردنیاز نیز طبق جدول ۴-۱ استفاده‌شده‌اند.



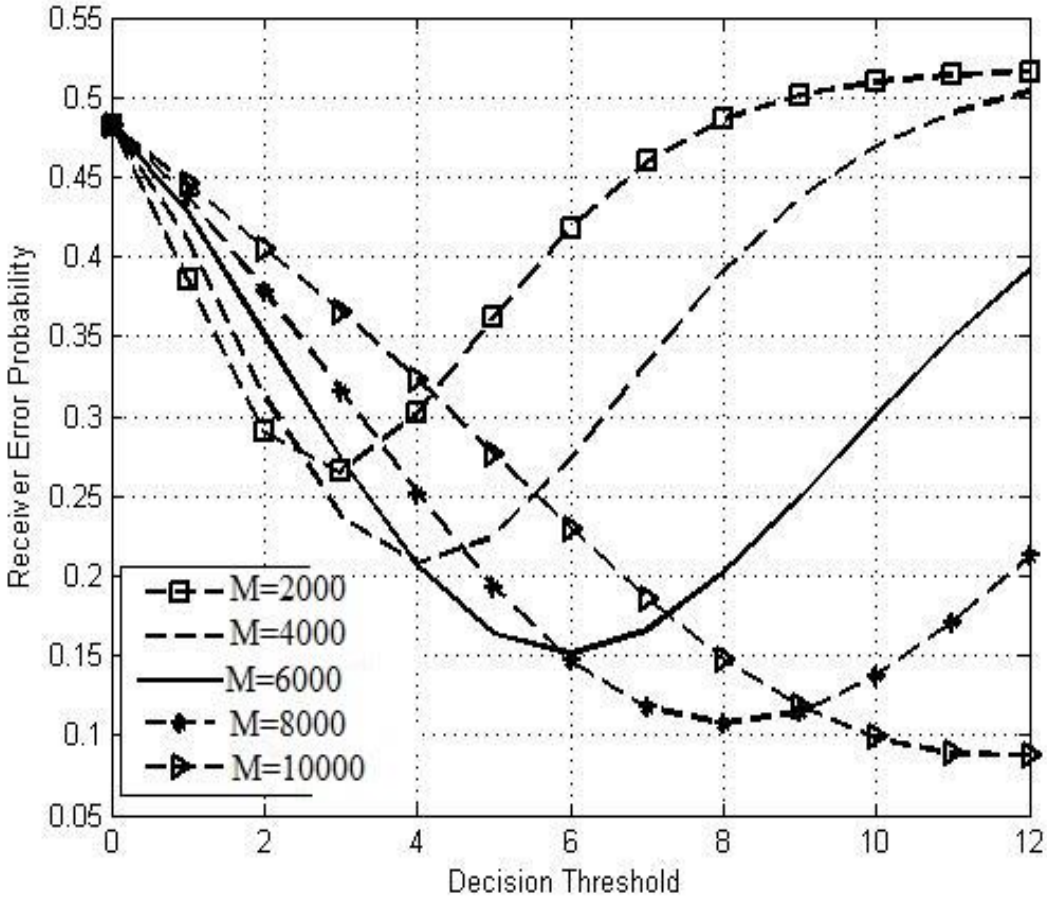
شکل ۴-۱۹- میانگین احتمال خطا برحسب تعداد مولکول‌ها باوجود، نویز، تداخل و شار

در شکل ۴-۲۰ میانگین احتمال خطا برحسب مقدار آستانه برای شعاع‌های مختلف کره‌های R_1 و R_2 نشان داده‌شده است. هر چه شعاع تغییرات فرستنده و گیرنده (R_1، R_2) کمتر باشد میانگین احتمال خطا کمتر است چون در این صورت تغییر در فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده کمتر رخ خواهد داد و به ازای تعداد مولکول‌های ثابتی که فرستنده می‌فرستد کمتر خطا رخ خواهد داد. باید توجه داشت که در این حالت تعداد مولکول‌هایی که فرستنده می‌فرستد ثابت است درنتیجه بیشتر شدن شعاع تغییرات فرستنده و گیرنده یعنی بیشتر شدن تغییر در فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده که ممکن است از هم خیلی دور یا به هم خیلی نزدیک شوند، درنتیجه این تغییرات زیاد در فاصله با توجه به ثابت بودن تعداد مولکول‌هایی که فرستنده می‌فرستد احتمال خطا را افزایش می‌دهد. هرچه تغییرات شعاع فرستنده و گیرنده کوچک‌تر باشد یعنی فرض کردیم که فاصله بین فرستنده و گیرنده ثابت است و خیلی کم تغییر می‌کند.



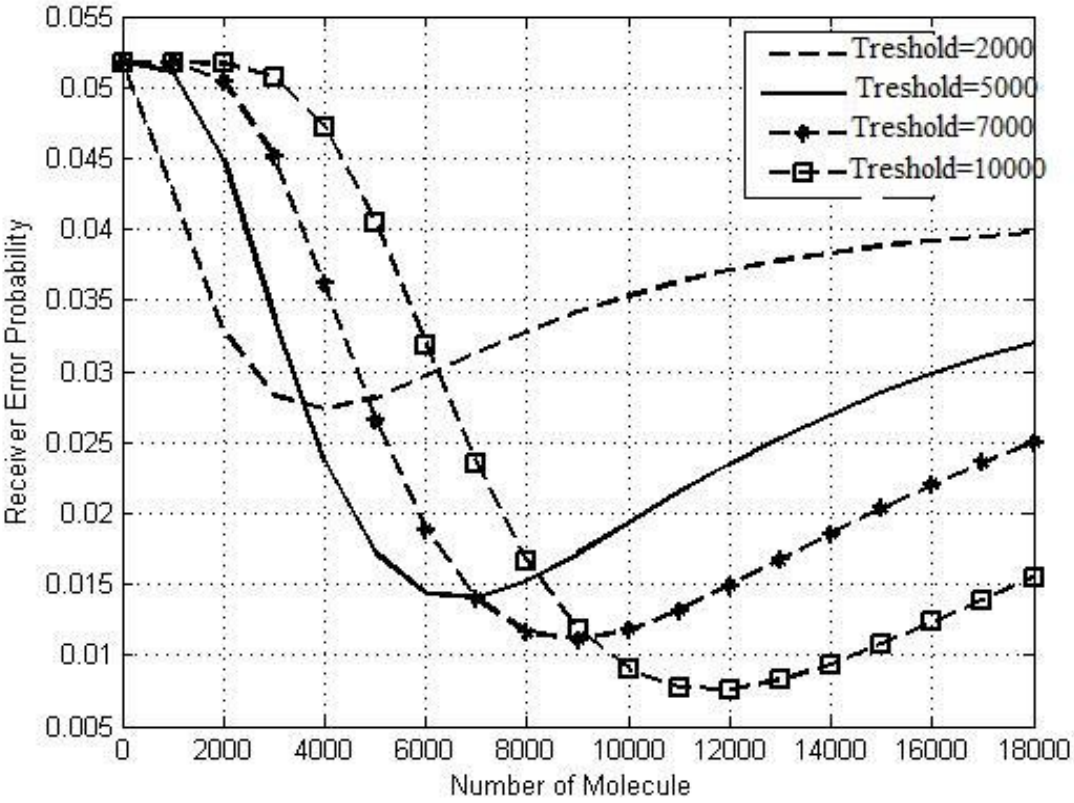
شکل ۴-۲۰- میانگین احتمال خطا بر حسب مقدار استانه برای شعاع های مختلف کره های R1 و R2

در شکل ۴-۲۱ میانگین احتمال خطا برحسب مقدار آستانه به ازای تعداد مولکول‌های مختلفی که فرستنده می‌فرستد نشان داده‌شده است. همان‌طور که نشان داده‌شده است هرچه تعداد مولکول‌های ارسالی بیشتر شود احتمال خطا هم پایین‌تر می‌آید، اما باید توجه داشت که متناسب با بیشتر شدن تعداد مولکول‌ها مقدار آستانه را نیز باید بالا ببریم تا احتمال خطا کمینه شود. یکی از مشکلات اصلی در مخابرات مولکولی همین است که نمی‌توان گیرنده‌ای ساخت که بتواند متناسب با زیاد شدن تعداد مولکول‌های ارسالی مقدار آستانه‌ی خود را بالا ببرد چون همان‌طور که گفتیم چنین کاری نیاز به فیدبک یا تخمین تعداد مولکول‌های ارسالی توسط گیرنده دارد و چنین کاری در حال حاضر به خاطر سادگی نانو ماشین‌ها و شرایط خاصی که مخابرات مولکولی دارد ممکن نیست. به همین خاطر ما در این پایان‌نامه به دنبال روشی بودیم که بدون استفاده از تخمین یا فیدبک زدن بتوان بهترین مقدار آستانه برای گیرنده را پیدا کرد که احتمال خطا کمینه باشد.



شکل ۴-۲۱- میانگین احتمال خطا بر حسب مقدار استانه برای تعداد مولکول های مختلفی که فرستنده می فرستد

در شکل ۴-۲۲ میانگین احتمال خطا برحسب تعداد مولکول‌های ارسالی به ازای آستانه‌های مختلف رسم شده است. هر چه مقدار آستانه بیشتر باشد احتمال خطا کاهش پیدا می‌کند اما به شرطی که فرستنده تعداد مولکول‌های ارسالی خود را افزایش دهد. همان‌طور که گفتیم در حال حاضر نمی‌توان فرستنده‌ای ساخت که بتواند متناسب با مقدار آستانه، تعداد مولکول‌های خود را افزایش یا کاهش دهد. باید توجه داشت وقتی‌که می‌گوییم مقدار آستانه‌ی گیرنده ۵۰۰۰ است یعنی اگر تعداد مولکول‌های رسیده به گیرنده بیشتر از ۵۰۰۰ باشد تصمیم می‌گیرد که فرستنده یک ارسال کرده است و اگر کمتر باشد گیرنده تصمیم می‌گیرد که فرستنده صفر ارسال کرده است.



شکل ۴-۲۲- میانگین احتمال خطا بر حسب تعدا مولکول های ارسالی به ازای استانه های مختلف

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و

پیشنهادها

۵-۱ نتیجه‌گیری

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، طراحی‌شده‌اند. به‌طورکلی، در مقیاس نانو، بسیاری از اجزا و فرآیندهای مخابراتی، از دیدگاه زیستی یا شیمیایی موردبررسی 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 نانو ماشین‌ها و فرستنده-گیرنده ها، پروتکل‌های مسیریابی و کنترل دسترسی به رسانه، تعدادی از نقش‌هایی است که از شاخه‌ی مخابرات انتظار می‌رود.

در این پایان‌نامه، علاوه بر معرفی کامل یک سیستم مخابرات مولکولی که متشکل از فرستنده، کانال و گیرنده می‌باشد، سعی شده است که پارامترهایی از مخابرات مولکولی مانند، نویز، تداخل، تغییر فاصله گیرنده و فرستنده، شار و تعداد مولکول‌های ارسالی توسط فرستنده که بر کارایی سیستم تأثیر می‌گذارند بررسی کنیم. برای این منظور ما ابتدا رابطه‌ای برای احتمال خطا بر اساس این پارامترها به دست آوردیم و تأثیر هرکدام از این پارامترها بر روی احتمال خطا بررسی کرده‌ایم. همان‌طور که در شبیه‌سازی‌ها دیدیم وجود تداخل یکی از مشکلات اصلی در مخابرات مولکولی است که احتمال خطا را به مقدار زیادی افزایش می‌دهد.

در بیشتر مقاله‌ها فرض شده است که فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده ثابت است درحالی‌که کوچک‌ترین تغییر در فاصله می‌تواند احتمال خطا را افزایش دهد. این درحالی‌که است که نانو ماشین‌های فرستنده و گیرنده در یک محیط سیال قرار دارند و هرلحظه ممکن است فاصله تغییر کند. ما یک مدل جدید با در نظر گرفتن اینکه فاصله ثابت نیست در نظر گرفته‌ایم، به این صورت که فرستنده و گیرنده در داخل کره‌ای به شعاع R قرار دارند و در هر نقطه‌ای در داخل این کره می‌توانند جابه‌جا شوند. ما بهترین مقدار برای آستانه‌ی گیرنده و همچنین بهترین مقدار برای تعداد مولکول‌های ارسالی را با در نظر گرفتن تغییر در فاصله بین فرستنده و گیرنده به دست آوردیم .

۵-۲ پیشنهادها برای کارهای آتی

با توجه به این‌که 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 نظرم می‌شود پیشنهاد داد عبارت‌اند از :

۱) یافتن راه‌حلی برای کاهش تداخل : با توجه به این‌که یکی از مشکلات اصلی در مخابرات مولکولی تداخل است پس تحقیق در این زمینه می‌تواند بسیار مفید و موردتوجه واقع شود.

۲) 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 مداوم 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.

۳) مدل کردن دقیق‌تری از نویز : نویز می‌تواند هم ناشی از حرکت تصادفی مولکول‌ها و هم ناشی از محیط و عوامل مؤثر بر آن باشد (مانند دما) و یا ناشی از فرستنده‌های دیگری که در اطراف گیرنده قرار دارند، باشد. لازم است که نویز با یک مدل واقعی و دقیق‌تر توصیف شود.

۴) 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:

[۱] Shinsuke Hara, H. Y. *"*New paradigms in wireless communication systems,*"* *Wireless Personal Communications* 37, pp: 233–241, 2006

[۲] 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.

[۳] G. Alfano, D. Miorandi, *"*On information transmission among nanomachines*", in: Proceedings of the First International Conference on Nano-Networks (NanoNet'06), September* 2006

[۴] K.E. Drexler, "*Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation*", John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, ISBN: 0-471-57518-6, 1992

[۵] K.E. Drexler, "Molecular anomachines: physical principles and implementation strategies", *Annual Review of Biophysics and Biomolecular Structure*, pp. 377-405, 1994.

[۶] R. K.Soong, "Powering an inorganic nanodevice with a biomolecular motor". *Science*, 290, pp: 1555–1558, 2000

[۷] M. Moore, A. Enomoto, T. Nakano et al, "A Design of a Molecular Communication System for Nanomachines Using Molecular Motors", *Pervasive Computing and Communications Workshops*, 2006

[۸] A. Enomoto, M. Moore, T. Nakano et al., "A molecular communication system using a network of cytoskeletal filaments", *Proceedings of the 2006 NSTI Nanotechnology Conference*, May 2006

[۹] A.Shojaie, M.Safaienezhad, *"*Using nanonetworks for drug deliver micriscopic robots", *Proceedings of 13th Conference on electrical Engineering, Tarbiat modares University, Tehran*, pp: 1- 5, September 2010

[۱۰] T. Suda, M. Moore, T. Nakano, R. Egashira and A. Enomoto, "Exploratory

research on molecular communication between nanomachines" *in Genetic and Evolutionary Computation Conference, Washington DC*, June 2005.

[۱۱] A.Shojaie, M.Safaienezhad, "Mathematical Swarm Model for Nanorobotic Communication," *Proceedings of 6th Vienna International Conference on Mathematical Modeling, Vienna University of Technology*, Austria 2009

[۱۲] L. Parcerisa, I.F. Akyildiz, "Molecular communica nanonetworks", *Computer Networks*, pp. 2753-2766, 2009

[۱۳] B, Atakan, O, Akan, "An information theoretical approach for molecular communication," *Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems. Bionetics* 2007. 2nd, pp. 33–40, 2007

[۱۴] R. Laocharoensuk, J. Burdick, J. Wang, "Carbon-nanotube-induced acceleration of catalytic nanomotors", *ACS Nano*, pp: 1069-1075, (2008).

[۱۵] Y. Wang, R. M. Hernandez, D.J. Bartlett, J.M. Bingham, T.R. Kline, A. Sen, "Bipolar electrochemical mechanism for the propulsion of catalytic nanomotors in hydrogen peroxide solutions", Langmuir 22 (25), pp:10451-10456, 2006

[۱۶] M. Moore, A. Enomoto, T. Nakano, R. Egashira, T. Suda, A. Kayasuga, H. Kojima, H. Sakakibara, and K. Oiwa, "*A design of a molecular communication system for nanomachines using molecular motors*", in Proc. of Fourth Annual IEEE Intl. Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshops, pp. 6–12, Mar. 2006.

[۱۷] M.-J. Moore, T. Suda, and K. Oiwa, "*Molecular communication: modeling noise effects on information rate*", IEEE Transactions on NanoBioscience, vol. 85, pp. 295–385, June 2009.

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

[۱۹] T. Nakano, T. Suda, T. Koujin, T. Haraguchi, and Y. Hiraoka, "Molecular communication through gap junction channels: system design, experiments and modeling", *in Proc. of 2nd Intl. Conf. on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (Bionetics)*, pp. 139–146, Dec. 2007.

[۲۰] M. Gregori and I. F. Akyildiz, "A new nanonetwork architecture using flagellated bacteria and catalytic nanomotors," *IEEE J. Selected Areas in Communications (JSAC)*,

vol. 28, pp. 602–611, May 2010.

[٢١] M. Gregori, I. Llatser, A. Cabellos-Aparicio, and E. Alarc´on, “Physical channel characterization for medium-range nanonetworks using flagellated bacteria,” *Computer Networks*, vol. 55, no. 3, pp. 779–791, 2011.

[٢٢] M. J. Berridge, “The AM and FM of calcium signalling”, *Nature*, vol. 386, pp. 759– 780, Apr. 1997.

[٢٣] G. Alfano and D. Miorandi, “On information transmission among nanomachines”, *in Proc. of First Intl. Conf. on Nano-Networks and Workshops*, pp. 1–5, Sept. 2006.

[٢٤] 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.

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

[٢٦] L. Parcerisa and I. F. Akyildiz, “Molecular communication options for long range nanonetworks,” *Computer Networks (Elsevier) Journal*, vol. 53, pp. 2753–2766, Aug. 2009.

[27] B. Atakan and O. B. Akan, “On channel capacity and error compensation in molecular communication”, *Springer Trans. on Computational System Biology*, vol. 10, pp. 59–80, December 2008.

[٢٨] M. Pierobon and I. Akyildiz, “Diffusion-based noise analysis for molecular communication in nanonetworks,” *IEEE Trans. Signal Process*, vol. 59, no. 6, pp. 2532–2547, June 2011.

[٢٩] M. S. Kuran, H. B. Yilmaz, T. Tugcu, and I. F. Akyildiz, “Interference effects on modulation techniques in diffusion based nanonetworks,” *Nano Communication Networks (Elsevier) Journal*, vol. 3, pp. 65–73, March 2012.

[٣٠] M. Mahfuz, D. Makrakis, and H. Mouftah, “Characterization of intersymbol interference in concentration-encoded unicast molecular communication”, *in Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)* , pp. 164–168, May 2011

[٣١] M. Pierobon and I. F. Akyildiz, “Intersymbol and co-channel interference in diffusion-based molecular communication,” *in Proc. of the 2nd IEEE International Workshop on Molecular and Nano Scale Communication (MoNaCom), ICC*, June 2012.

[٣٢] J. Ilow and D. Hatzinakos, “Analytic alpha-stable noise modeling in a Poisson field of interferers or scatterers,” *IEEE Trans. Signal Process*, vol. 46, no. 6, pp. 1601–1611, June 1998.

[٣٣] B. Atakan and O. B. Akan, “Deterministic capacity of information flow in molecular nanonetworks”, *Nano Communication*, vol. 1, no. 1, pp. 31–42, Mar. 2010.

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

[٣٥] M. S. Kuran, H. B. Yilmaz, T. Tugcu, and I. F. Akyildiz, “Modulation techniques for communication via diffusion in nanonetworks,” *in Proc. IEEE Int. Conf. Commun*, June 2011.

[٣٦] N. Kim and C.-B. Chae, “Novel modulation techniques use isomer as messenger molecules for molecular communication via diffusion,” *in Proc. IEEE Int. Conf. Commun*, pp. 1–5, June 2012

[٣٧] H. Arjmandi, A. Gohari, M. Nasiri-Kenari and Farshid Bateni, “Diffusion based nanonetworking: A new modulation technique and performance analysis,*” IEEE Communications Letters*, pp. 645 - 648, 2013.

[٣٨] I. Llatser, A. Cabellos-Aparicio, M. Pierobon, and E. Alarcon, “Detection techniques for diffusion-based molecular communication,” *IEEE J. Sel. Areas Commun*, vol. 31, no. 12, pp. 726–734, December 2013.

[٣٩] I. Llatser, E. Alarcón, and M. Pierobon, “Diffusion-based channel characterization in molecular nanonetworks”, *in Proc. IEEE Int. Workshop Molecular Nanoscale Commun. (MoNaCom)*, pp. 467–472. 2011

[٤٠] M. Pierobon and I. F. Akyildiz, “Information capacity of diffusion-based molecular communication in nanonetworks,” *in Proc. IEEE INFOCOM Miniconf*, vol. 59, no. 4, pp. 602–611. 2011

[٤١] A. E. M. J. Moore, S. Nakano and T. Suda, “Measuring distance with molecular communication feedback protocols,” *in Proc. Bio-Inspired Models of Netw, Inf, Comput. Syst. (BIONETICS)*, 2010.

[٤٢] M. Moore, T. Nakano, A. Enomoto, and T. Suda, “Measuring distance from single

spike feedback signals in molecular communication," *IEEE Trans. Signal Process*, vol. 60, no. 7, pp. 3576–3587, Jul. 2012.

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

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

[۴۵] P. Stoica and T. L. Marzetta, "Parameter estimation problems with singular information matrices," *IEEE Trans. Signal Process.* vol. 49, no. 1, pp. 87–90, Jan. 2001.

[۴۶] N. Farsad, A. W. Eckford, S. Hiyama, "A markov chain channel model for active transport molecular communication," *IEEE Trans. Signal Process*, vol. 62, No. 9, MAY, 2014

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

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

[۴۹] I. Llatser, A. Cabellos-Aparicio, M. Pierobon, and E. Alarcon, "Detection techniques for diffusion-based molecular communication," *IEEE J. Sel. Areas Commun*, vol. 31, no. 12, pp. 726–734, December 2013.

[۵۰] M. Ullah and O. Wolkenhauer, *Stochastic Approaches for Systems Biology*, New York: Springer, 2011

[۵۱] K. B. Oldham, J. C. Myland, and J. Spanier, *An Atlas of Functions with Equator, the Atlas Function Calculator*, 2nd ed. New York: Springer, 2008.

[۵۲] B. Tepekule, A. E. Pusane, H. B. Yilmaz, C.-B. Chae, and T. Tugcu, "ISI mitigation techniques in molecular communication," *IEEE Trans. on Molecular Biological and Multi-Scale Communications*, vol. 1, no. 2, pp. 202 – 216, 2015.

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 moleculs 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.

In a molecular communications, transmitter coded information at molecules concentrations similar to amplitude modulation in classic communication, this means that for send one, transmitter release concentration includes M molecule in environment and not send anything for write zero. Molecules distributed in the environment influenced by factors such as noise, interference and flow are to make to the receiver, and the receiver based on threshold is decided the transmitter has sent zero or one. This means that if the number of molecules reached on receiver more than the threshold, receiver decides that the transmitter has one Send, and if the number of molecules is less than the threshold value transmitter sent the zero.

In this thesis, in addition to introducing a molecular communication system which consists of transmitter, channel and receiver, tried to discussion about parameters of the molecular communication such as noise, interference, changing the distance beetwen receiver and transmitter, flow and number of molecules sent by the transmitter that affect system performance. For this purpose we first obtained the probability of error relation to on these parameters and the effect of each of these parameters have investigated on probability of error. In the articles the distance between the transmitter and receiver and number of molecules has been sent is constant. In the end, assuming that the distance between the transmitter and receiver is not fixed and can change, we are proposed a method to determine the best threshold at the receiver that probability of error stay the minimaize.

Key words: molecular communication, nano-machines, the modulation based on the concentration of molecules, bit error rate

Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical Engineering

MSc Thesis in Communication

Evaluation of the uncertainty in the parameters of a molecular communication system and its impact on system performance

By: Hadi Abdollahi

Supervisor:

Dr Mohammad Reza Javan

September 2016