

# مخابرات مولکولی

## مرزهای نوین در مخابرات بی سیم نانو

یگانه ضمیری جعفریان / دانشگاه فردوسی مشهد / دانشکده مهندسی گروه برق / yeganeh.zamiri@yahoo.com  
نادیا نقوی / دانشگاه فردوسی مشهد / دانشکده مهندسی / گروه برق n.naghavi@um.ac.ir

**کلید واژه:** مخابرات مولکولی، فناوری زیستی، مولکول های اطلاعاتی، شبکه های مخابراتی نانو.

### ۱- مقدمه

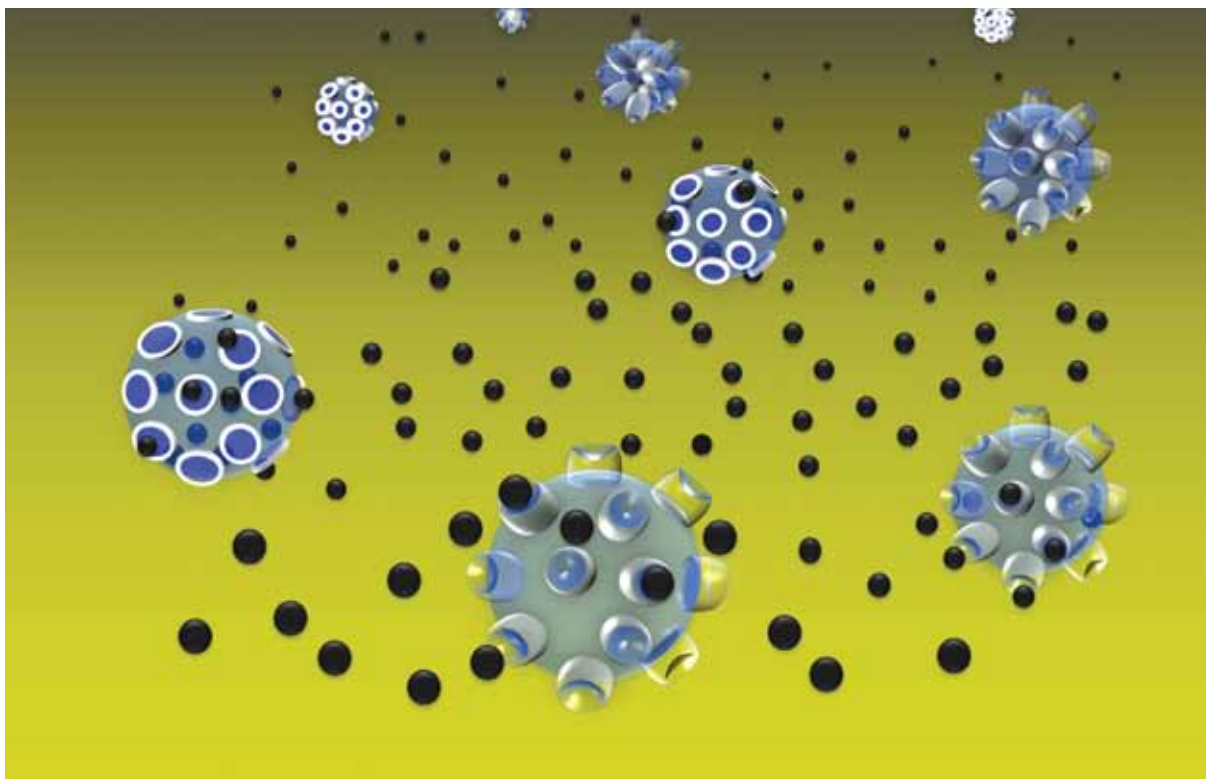
در حال حاضر، انتقال اطلاعات در سیستم های مخابراتی از طریق انتشار امواج الکترومغناطیس در فضا، جابجایی الکترون ها در کابل ها، انتشار امواج نوری در فیبرهای نوری و یا امواج صوتی در مایعات و جامدات، صورت می گیرد، به طوری که انتقال اطلاعات دیجیتال (متن، صدا و فیلم) با سرعت بالا و در مسافت های طولانی را امکان پذیر می سازد. در سیستم های مخابرات مولکولی اطلاعات توسط مولکول های شیمیایی، به نام مولکول های اطلاعاتی در محیط انتشار می یابد و مبتنی بر مکانیزم ها و سیستم های بیولوژیکی اطلاعات ارسالی در فرستنده کد گذاری و در گیرنده کد گشایی می گردد. گرچه سرعت و دامنه انتشار در مخابرات مولکولی در مقایسه با سیستم های فعلی مخابراتی محدود است، اما مخابرات مولکولی دارای توانایی انتقال اطلاعاتی است که تکنولوژی های کنونی در سیستم های مخابراتی، قابلیت آن را ندارند و یا اینکه به سختی قادر به انجام آن هستند [۱-۵].

انتظار می رود که مخابرات مولکولی، حوزه های مختلفی از تکنولوژی را تحت تاثیر قرار دهد. نظر به اینکه مخابرات مولکولی یک روش مستقیم برای ارتباط با سیستم های بیولوژیکی را ارائه می دهد، امکان کاربردهای وسیعی را در زمینه بهداشت و محیط زیست فراهم می کند. به عنوان نمونه، نانوماشین های زیستی کاشته شده در بدن می توانند بر شرایط سلامتی نظارت داشته باشند [۳-۱]. گرچه با استفاده از تکنولوژی شبکه ای، کاشت و تعبیه دستگاه های سیلیکونی

مخابرات مولکولی یک راهکار نوین اطلاعاتی و ارتباطی است که براساس مکانیزم ها و سیستم های بیولوژیکی عمل می کند. این فناوری نوین، در سال های اخیر مورد توجه ویژه پژوهشگران مهندسی زیستی قرار گرفته است.

در سیستم مخابرات مولکولی، فرستنده اطلاعات را توسط مولکول های شیمیایی به نام مولکول های اطلاعاتی ارسال نموده و بعد از انتشار در محیط، توسط گیرنده مخابراتی دریافت و کدگشایی می گردد. تئوری های مخابراتی نقش ویژه ای را در مدلسازی، تجزیه و تحلیل و طراحی سیستم های مخابرات مولکولی ایفا می کنند و چشم اندازهای نوینی را در مهندسی زیستی، پزشکی و نانو گشوده اند که در حال حاضر گام های آغازین خود را طی می کنند.

در این مقاله به بررسی جایگاه و ویژگی های مخابرات مولکولی و کاربردهای آن در زمینه های مختلف مهندسی پزشکی و فناوری زیستی می پردازیم. به دنبال آن جایگاه مدلسازی در این حوزه را به عنوان عاملی مهم در جهت پیش بینی رفتار سیستم مخابرات مولکولی به طور اجمالی مورد مطالعه قرار می دهیم. سپس با پرداختن به چالش های پیش رو، اهمیت و نیاز تحقیقات بیشتر در این حوزه جدید را مشخص می کنیم.



در بخش‌هایی از بدن امکان پذیر است، اما در سیستم مخابرات مولکولی، نانوماشین‌های زیستی جایگزین دستگاه‌های سیلیکونی می‌شوند و امکان برقراری ارتباط به طور مستقیم با سلول‌ها، اندام‌ها و بافت‌ها را فراهم می‌کنند [۵]. علاوه بر این پیش بینی می‌شود مخابرات مولکولی، راهکار محاسباتی جدیدی را با تشکیل مدارهای محاسباتی مقیاس بزرگ از ارتباط واحدهای کوچک محاسباتی (که بر پایه مکانیزم‌های بیولوژیکی عمل می‌کنند) فراهم سازد [۴].

در این مقاله بعد از مقدمه، در بخش دوم به ساختار و ویژگی‌های مخابرات مولکولی پرداخته می‌شود. معرفی کاربردهای مخابرات مولکولی در زمینه‌های مختلف مهندسی پزشکی و زیستی در بخش سوم آورده می‌شود. اهمیت مدل‌سازی در این حوزه و نمونه‌هایی از جدیدترین مدل‌هایی که برای سیستم مخابرات مولکولی پیشنهاد شده است در بخش چهارم مطرح می‌گردد. بخش پنجم به بررسی چالش‌ها و زمینه‌های پژوهشی پیش‌رو در حوزه مخابرات مولکولی می‌پردازد و در پایان، جمع‌بندی مطالب ارائه شده در بخش ششم صورت خواهد گرفت.

در این مقاله بعد از مقدمه، در بخش دوم به ساختار و ویژگی‌های مخابرات مولکولی پرداخته می‌شود. معرفی کاربردهای مخابرات مولکولی در زمینه‌های مختلف مهندسی پزشکی و زیستی در بخش سوم آورده می‌شود. اهمیت مدل‌سازی در این حوزه و نمونه‌هایی از جدیدترین مدل‌هایی که برای سیستم مخابرات مولکولی پیشنهاد شده است در بخش چهارم مطرح می‌گردد. بخش پنجم به بررسی چالش‌ها و زمینه‌های پژوهشی پیش‌رو در حوزه مخابرات مولکولی می‌پردازد و در پایان، جمع‌بندی مطالب ارائه شده در بخش ششم صورت خواهد گرفت.

در این مقاله بعد از مقدمه، در بخش دوم به ساختار و ویژگی‌های مخابرات مولکولی پرداخته می‌شود. معرفی کاربردهای مخابرات مولکولی در زمینه‌های مختلف مهندسی پزشکی و زیستی در بخش سوم آورده می‌شود. اهمیت مدل‌سازی در این حوزه و نمونه‌هایی از جدیدترین مدل‌هایی که برای سیستم مخابرات مولکولی پیشنهاد شده است در بخش چهارم مطرح می‌گردد. بخش پنجم به بررسی چالش‌ها و زمینه‌های پژوهشی پیش‌رو در حوزه مخابرات مولکولی می‌پردازد و در پایان، جمع‌بندی مطالب ارائه شده در بخش ششم صورت خواهد گرفت.

## ۲- ساختار و ویژگی‌های مخابرات مولکولی

انتقال غیر فعال، یک روش ساده برای انتشار مولکول‌های سیگنالی در داخل و بین سلول‌ها را فراهم می‌کند. در این روش، مولکول‌های سیگنالی به طور تصادفی در همه جهات ممکن منتشر می‌شوند لذا برای محیط‌های به شدت دینامیک و غیر قابل پیش‌بینی و نیز در شرایطی که زیرساخت‌های لازم برای ارتباطات امکان‌پذیر نیست، روش انتقال غیر فعال مناسب است. از نمونه‌های مبتنی بر انتقال غیر فعال در سیستم‌های بیولوژیکی می‌توان به مخابرات مولکولی مبتنی بر انتشار آزاد، مخابرات مولکولی مبتنی بر انتشار توسط کانال‌های گپ جانکشن [۷] و مخابرات مولکولی مبتنی بر واکنش-انتشار نام برد [۱].

انتقال فعال یک مکانیزم ارتباطی است که امکان انتقال جهت‌دار مولکول‌های سیگنالی به نقاط خاص را فراهم می‌کند. انتقال فعال در مقایسه با انتقال غیر فعال می‌تواند مولکول‌های سیگنالی را به فواصل دورتر (در حدود چند متر) نشر دهد.

انتقال مولکول‌های سیگنالی بزرگ در انتقال غیر فعال به دلیل اندازه‌شان بسیار ضعیف صورت می‌گیرد، در حالی که انتقال فعال با مصرف انرژی شیمیایی، نیروی کافی برای انتقال مولکول‌های سیگنالی بزرگ را تولید می‌کند. علاوه بر این، انتقال فعال مکانیسم ارتباطی با درجه اطمینان بالایی، حتی هنگامی که تعداد سیگنال‌های مولکولی برای انتقال کم باشند را ارائه می‌دهد. از آنجا که در انتقال فعال مولکول‌های سیگنالی جهت‌دار حرکت می‌کنند، احتمال رسیدن آنها به مقصد بسیار بالاتر از زمانی است که از انتقال غیر فعال استفاده می‌شود، در نتیجه انتقال فعال نیاز به مولکول‌های کمتری برای انجام ارتباطات دارد [۱]، [۶]. اما از طرفی برای غلبه

مخابرات مولکولی روشی جهت برقراری ارتباط با نانوماشین‌های زیستی است. گرچه مدها و مکانیزم‌های مختلفی از مخابرات مولکولی در داخل و بین سلول‌ها بکار می‌روند، اما می‌توان روش انتقال در مخابرات مولکولی را به دو نوع عمده دسته‌بندی نمود. نوع اول ارتباط در مخابرات مولکولی مبتنی بر انتقال غیر فعال است که مولکول‌ها خود به خود در محیط انتشار می‌یابند. نوع دوم مخابرات مولکولی بر پایه انتقال فعال می‌باشد که مولکول‌ها با مصرف انرژی

بر فعل و انفعلات شیمیایی بین مولکول‌های سیگنالی و مولکول‌های محیط، در انتقال فعال مولکول‌ها نیاز به یک منبع انرژی منظم می‌باشد.

مخابرات مولکولی مبتنی بر موتور مولکولی و مخابرات مولکولی مبتنی بر موتور باکتری - مولکولی [۸]، دو نمونه از مخابرات مولکولی مبتنی بر انتقال فعال در سیستم‌های بیولوژیکی می‌باشند.

## ۲-۱- معماری مخابرات مولکولی

یک معماری متداول جهت توصیف مخابرات مولکولی شامل اجزایی چون مولکول‌های اطلاعاتی، فرستنده نانوماشین زیستی (برای آزادسازی مولکول‌های اطلاعاتی)، گیرنده نانوماشین زیستی (جهت تشخیص مولکول‌های اطلاعاتی) و محیط انتقال (برای انتشار مولکول‌های اطلاعاتی از فرستنده به گیرنده) می‌باشد. این سیستم همچنین از مولکول‌های انتقالی (برای حرکت مولکول‌های اطلاعاتی)، مولکول‌های هدایتی (برای هدایت جهت حرکت مولکول‌های انتقالی)، مولکول‌های رابط (که امکان انتقال مولکول‌های اطلاعاتی را به صورت اختیاری فراهم می‌کند) و در آخر مولکول‌های آدرسی (که به مولکول‌های اطلاعاتی یا مولکول‌های رابط متصل می‌شوند تا توانایی شناسایی گیرنده را بالا ببرند) تشکیل می‌شود [۲].

نظر به اینکه جزء اصلی مخابرات مولکولی، مولکول‌ها هستند که در محیط آبی یا هوا انتشار می‌یابند، مقدار قابل توجهی نوبز در چنین سیستم‌هایی وجود دارد که به طور مداوم در تعامل با اجزای مختلف مخابرات مولکولی می‌باشد. این نوبز ناشی از وجود انرژی حرارتی، الکتریکی، مغناطیسی و امواج الکترومغناطیسی در محیط انتشار می‌باشد. همچنین محیط شامل مولکول‌ها و نانوماشین‌هایی است که در مخابرات مولکولی شرکت نمی‌کنند، اما عامل ایجاد نوبز می‌شوند. درجه تصادفی بودن مخابرات مولکولی (حرکت تصادفی مولکول‌های اطلاعاتی، نرخ و زمان رسیدن مولکول‌ها) به نوبز محیط وابسته است [۱].

فرآیندهای اصلی درگیر در مخابرات مولکولی شامل کدگذاری، ارسال، انتشار، دریافت و کدگشایی می‌باشند [۲].

کدگذاری مرحله‌ای است که در طی آن یک فرستنده، اطلاعات را به مولکول‌های اطلاعاتی ترجمه می‌کند به طوری که توسط گیرنده قابل شناسایی و آشکارسازی باشد.

ارسال مرحله‌ای است که فرستنده نانوماشین زیستی مولکول‌های اطلاعاتی را در محیط منتشر می‌کند. فرستنده ممکن است مولکول اطلاعاتی را یا به صورت رها شده آزاد کند (برای مثال، کیسه‌های نوپا از یک سلول بیولوژیکی به شرطی که فرستنده یک سلول بیولوژیکی باشد) [۹] و یا با باز کردن گیت مولکولی اجازه دهد تا مولکول‌های اطلاعاتی به مناطق دیگر انتشار یابند.

انتشار مرحله ایست که طی آن مولکول‌های اطلاعاتی از سمت فرستنده به سمت گیرنده در محیط حرکت می‌کنند. یک مولکول اطلاعاتی می‌تواند به صورت غیر فعال، بدون مصرف انرژی شیمیایی، در محیط پخش شود و یا با اتصال به مولکول‌های انتقالی (به عنوان مثال، یک موتور مولکولی که تولید حرکت می‌کند) به صورت فعال با تجزیه آدنوزین تری فسفات (ATP) انرژی تولید کند تا در محیط انتشار یابد [۲].

دریافت مرحله‌ای که طی آن گیرنده، مولکول‌های اطلاعاتی انتشار یافته در محیط را جذب می‌کند. یک گزینه برای جذب مولکول‌های

اطلاعاتی، نفوذپذیری ساختار سطحی گیرنده برای مولکول اطلاعاتی است. مثلاً یک سلول زیستی که غشای پلاسمایی دارد برای برخی از مولکول‌های اطلاعاتی قابل نفوذ است و این مولکول‌ها بعد از عبور از غشا قادرند به طور مستقیم به گیرنده‌های داخل سلولی متصل شوند [۱]، [۹].

کدگشایی گیرنده زیستی، بعد از دریافت مولکول‌های اطلاعاتی، با واکنش شیمیایی بر روی مولکول‌های دریافت شده صورت می‌گیرد. این واکنش شیمیایی می‌تواند شامل تولید مولکول‌های جدید، انجام کار ساده، و یا تولید یک سیگنال جدید (به عنوان مثال ارسال مولکول‌های اطلاعاتی دیگر) باشد [۲].

## ۲-۲- ویژگی‌های مخابرات مولکولی

به طور کلی تنوع ویژگی‌های مخابرات مولکولی، به دلیل استفاده از مکانیسم‌های بیولوژیکی و اجزای سازنده برای برقراری ارتباط در یک محیط، بالا است. در ادامه به شرح هر یک از این ویژگی‌های منحصر به فرد مخابرات مولکولی می‌پردازیم.

رفتار تصادفی مخابرات مولکولی ناشی از عوامل زیست محیطی مانند جنبش غیر قابل پیش‌بینی مولکول‌ها در محیط و همچنین ناشی از رفتار اجزای مخابرات مولکولی مانند رفتار تصادفی نانوماشین‌ها در واکنش با مولکول‌های اطلاعاتی و کاهش مولکول‌های اطلاعاتی با گذر زمان است [۱].

کدگذاری و کدگشایی با سیگنال‌های شیمیایی از ویژگی‌های دیگر مخابرات مولکولی است که در فرستنده و گیرنده زیستی صورت می‌پذیرد، به طوری که گیرنده نانوماشین زیستی نسبت به این سیگنال‌های وارده واکنش شیمیایی نشان می‌دهد. اطلاعات را می‌توان در خواص فیزیکی و یا ویژگی‌های مولکول‌های اطلاعاتی کدگذاری کرد [۲].

سرعت و دامنه‌ی مخابرات مولکولی بسیار پایین می‌باشد و به مواد بیولوژیکی، مکانیزم و همین‌طور محیط وابسته است [۲]. در بدن انسان سریع‌ترین و طولانی‌ترین برد مخابراتی توسط سیگنالینگ عصبی بدست می‌آید که توسط سیگنال‌های الکتروشیمیایی با سرعت بیش از 100m/s منتشر می‌شوند [۳].

سازگاری زیستی یک ویژگی مهم مخابرات مولکولی است. از آنجا که در مخابرات مولکولی از مکانیزم ارتباطی بین سیستم‌های بیولوژیکی استفاده می‌شود، نانوماشین‌های زیستی توانایی برقراری ارتباط مستقیم با اجزای طبیعی یک سیستم بیولوژیکی از طریق کدگذاری و کدگشایی را دارند [۴]. سازگاری زیستی مخابرات مولکولی، منجر به کاربردهای پزشکی چون کاشتن نانوماشین‌های زیستی در بدن برای نظارت می‌گردد [۱]، [۳].

بهره‌وری در انرژی در مخابرات مولکولی به دلیل استفاده از مواد و مکانیزم سیستم‌های بیولوژیکی، انتظار می‌رود که مصرف انرژی بهینه گردد و تلفات حرارتی کاهش یابد. به عنوان مثال موتورهای مولکولی میوزین (پروتئین اساسی عضله)، انرژی شیمیایی (مانند ATP) را به کار مکانیکی نزدیک به ۱۰۰ درصد بهره‌وری تبدیل می‌کنند. انتظار می‌رود که انرژی شیمیایی لازم برای برقراری ارتباط مولکولی، توسط محیطی که در آن نانوماشین‌ها مستقر هستند، فراهم شود. برای نمونه، نانوماشین‌های زیستی کاشته شده در بدن انسان می‌توانند انرژی (گلوکز) را از محیط اطراف خود بگیرند که در

این صورت نیازمند هیچ منبع انرژی خارجی نخواهند بود [۱]، [۲].

و تمایز نانوماشین‌های زیستی برای ساختارهای خاص و بازسازی را امکان‌پذیر می‌سازد [۲].

### ۳- کاربردهای سیستم مخابرات مولکولی

نظر به اینکه مخابرات مولکولی یک روش مستقیم برای ارتباط با سیستم‌های بیولوژیکی را فراهم می‌کند، در نتیجه دارای کاربردهایی وسیعی در زمینه‌ی پزشکی، نانو و فناوری زیستی می‌باشد. که در اینجا به اجمال به آن‌ها می‌پردازیم [۲]، [۱۰].

#### ۳-۱- کاربردهای مهندسی پزشکی

مخابرات مولکولی کاربردهای بسیاری در زمینه مهندسی پزشکی و نانوپزشکی دارد که مهمترین آن‌ها شامل آزمایشگاه روی تراشه (Lab-on-a-chip)، پایش سلامتی، تحویل دارو و بازسازی می‌باشند. آزمایشگاه روی تراشه تکنولوژی نوظهوری است که عملیات سنتز و تجزیه و تحلیل شیمیایی نمونه‌های زیستی بر روی یک تراشه با ابعاد میلی‌متر تا سانتی‌متر را انجام می‌دهد [۱۱].

این تراشه، کاربردهای وسیعی در زمینه‌ی پزشکی جهت تشخیص بیماری و یا مطالعات علمی نمونه‌های زیستی دارد. همچنین مخابرات مولکولی تکنیک‌هایی برای انتقال مولکول‌های خاص به مکان‌های مشخص از تراشه را فراهم می‌کند. با توجه به اینکه اجزای مخابرات مولکولی در مقیاس نانومتری می‌باشند، اجرای آزمایشگاه روی یک تراشه در مقیاس خیلی کم امکان‌پذیر می‌باشد [۲].

با مانیپولیشن یک ارگانسیم (مانند انسان، حیوان و یا گیاه) شناسایی مولکول‌های خاص در بدن امکان‌پذیر می‌شود. از مولکول‌های خاص می‌توان به عنوان یک شناساگر زیستی برای تشخیص بیماری یا وضعیت پزشکی استفاده نمود. علاوه بر این می‌توان جزییات بیشتری از قبیل توزیع فضایی مولکول‌ها برای ارائه اطلاعات را استخراج کرد. مخابرات مولکولی امکان برقراری ارتباط میان سنسورهای بیولوژیکی و مصنوعی را توسط مولکول‌ها فراهم می‌کند. این سنسورهای بیوشیمیایی برای کاربردهای تشخیص (حساسیت یا ویروس) و معاینه‌های پزشکی، در بدن کاشته می‌شوند [۲]، [۵]. ارتباط مولکولی روش‌های کارآمدی برای جمع‌آوری اطلاعات از مولکول‌های بدن و انتقال آن‌ها به دستگاه‌های خارجی را فراهم می‌کند [۱۰].

با کاشتن فرستنده‌ای در بدن و به کمک مخابرات مولکولی می‌توان انتقال دارو و یا حتی DNA را با مولکول‌های انتقالی (مانند هورمون‌ها) به سوی سلول‌های گیرنده (مانند غدد) فراهم کرد. این نانوماشین‌های زیستی برای پیدا کردن هدف، از سیگنال‌های مولکولی داخل ارگانسیم و یا سیگنال‌های مولکولی منتشر شده از دیگر نانوماشین‌های زیستی استفاده می‌کنند [۲].

مکانیزم تحویل دارو احتمال اثرات جانبی در مکان‌های غیر هدف را کاهش می‌دهد [۱]. همچنین نظر به اینکه نانوماشین‌های زیستی ساخته شده از سلول‌های زنده قابلیت تقسیم شدن را دارند بنابراین می‌توانند به شکل یک ساختار تابعی (مانند بافت‌ها و اندام‌ها) رشد کنند. چنین نانوماشین‌های زیستی در زمینه‌های پزشکی بکار می‌روند. با توجه به زیست‌شناسی تکاملی، تشکیل یک ساختار تابعی توسط نانوماشین‌های زیستی براساس مخابرات مولکولی امکان‌پذیر می‌باشد [۴].

مخابرات مولکولی تکنیک‌هایی برای کنترل الگوهای ارتباطی، رشد

#### ۳-۲- کاربردهای زیست محیطی

از زمینه‌های کاربرد مخابرات مولکولی در زیست محیطی می‌توان مانتورینگ محیط زیست و کنترل آلودگی را نام برد. محیط زیست همواره در معرض عوامل سمی و رادیواکتیو می‌باشد. اطلاعات در مورد این مولکول‌ها می‌تواند به شناسایی مشکلات و ارائه روش‌هایی برای تمیز کردن محیط زیست در پاسخ به آلودگی و یا نشست اتفاقی، کمک کند. می‌توان از نانوماشین‌های زیستی یکپارچه برای شناسایی مکان مولکول‌ها در محیط‌هایی با مقیاس بزرگ یا در حد میکرو استفاده کرد. مخابرات مولکولی تکنیک‌هایی برای پردازش اطلاعات مولکولی از محیط زیست و تبادل این اطلاعات با دیگر نانوماشین‌های زیستی فراهم می‌کند [۱].

علاوه بر این از نانوماشین‌های زیستی می‌توان برای نظارت بر مولکول‌های محیط زیست و همچنین به صورت دقیق‌تر شناسایی محل یک منبع آلودگی استفاده کرد. نانوماشین‌های زیستی برای شناسایی، از مولکول‌های خاص برای نشانه‌گذاری مواد سمی در محیط زیست استفاده می‌کنند. آن‌ها با راهنمایی نانوماشین زیستی یا دستگاه‌های مقیاس بزرگ به سوی منبع سم حرکت و با تقویت سیگنال‌های مولکولی محل آلودگی را شناسایی می‌کنند و جهت رفع آلودگی به تجزیه مواد به حالت غیرسمی و یا قابل تجدیدپذیر می‌پردازند [۲].

#### ۳-۳- کاربردهای ساخت مولکولی

از مخابرات مولکولی برای کنترل در انتقال مولکول‌ها و همچنین برای تولید الگوهای جدیدی از مولکول‌ها، می‌توان استفاده نمود. این سیستم می‌تواند طوری برنامه‌ریزی شود تا یک الگوی خاصی از مولکول‌ها را با داشتن آدرس متناظرشان در سیستم به سوی نانوماشین‌های زیستی و یا مولکول‌های مشخص انتقال دهد. پس از انتقال مولکول‌های نانوماشین زیستی به هریک از آدرس‌های مورد نظر، می‌توان برای تکمیل ساختار، فرآیندهای شیمیایی را فعال کرد.

اگر امکان برنامه‌ریزی فرآیندهای الگودهی در توالی مولکول‌ها وجود داشته باشد، می‌توان انواع زیادی از اشکال و ساختارها را فقط با استفاده از مکانیزم مشابه، تولید کرد [۲].

#### ۴- مدلسازی سیستم‌های مخابرات مولکولی

مدلسازی سیستم‌های مخابرات مولکولی نقش مهمی در تجزیه و تحلیل و طراحی این نوع سیستم‌ها دارد و می‌تواند به افزایش درک ما از سیستم‌های بیولوژیکی کمک کنند. یک هدف ویژه از مدلسازی چنین سیستم‌هایی، پیاده‌سازی و ساخت شبکه‌های مخابرات مولکولی مصنوعی از نانو سنسورها است که برای نظارت بر سلامت، تشخیص پزشکی و درمان سرطان، کاربرد دارند.

مدل‌های بسیاری برای توصیف و پیشبرد حوزه مخابرات مولکولی ارائه شده است. در این بخش، ابتدا یک مدل ساده از حرکت تصادفی مخابرات مولکولی در سه حالت، حرکت ساده تصادفی، حرکت تصادفی همراه بارانش و حرکت تصادفی همراه با تقویت (مخابرات

رله‌ای) آورده می‌شود. در ادامه یک مدل مبتنی بر واکنش-انتشار ارائه می‌گردد [۱۲].

#### ۴-۱-۱-۴ مدل حرکت تصادفی

حرکت تصادفی اساسی‌ترین مکانیسمی است که مخابرات مولکولی بر آن متکی است. در اینجا سه مدل مختلف آن را بیان می‌کنیم.

#### ۴-۱-۱-۴-۱ حرکت ساده تصادفی

در این روش مولکول‌های اطلاعاتی بطور ساده و بدون اتکا به هیچ‌گونه مکانیسم اضافی در محیط انتشار می‌یابند [۲].

نمونه‌های بسیاری از این دسته از ارتباط مولکولی در زیست‌شناسی یافت می‌شود. یک نمونه آن متابولیت‌های داخل سلولی است که میان سلول‌ها برقرار می‌باشد [۳].

در این روش انتشار، فرستنده نانوماشین زیستی اطلاعات را بر روی یک مولکول اطلاعاتی کدگذاری می‌کند و آن را آزاد می‌کند. سپس مولکول‌ها به طور تصادفی در محیط زیست حرکت می‌کنند و به محض ورود مولکول به گیرنده، اطلاعات آن کدگشایی می‌شود.

#### ۴-۱-۲-۲ حرکت تصادفی همراه بارانش

در این روش حرکت مولکول‌های اطلاعاتی بصورت تصادفی همراه با رانش جهت‌دار می‌باشند. بطوری‌که حرکت تصادفی آن‌ها تحت تأثیر سرعت رانش سیال نیز قرار می‌گیرند. مبتنی بر این روش، مواد هورمونی ترشح شده در جریان خون در سراسر بدن منتشر می‌شوند و به سلول‌های هدف می‌رسند [۱۳]. این روش از مخابرات مولکولی نیز نشان‌دهنده حالت فعال ارتباط مولکولی است که از طریق آن موتورهای پروتئینی، انتقال مولکول‌ها را از یک فرستنده نانوماشین زیستی به یک گیرنده نانوزیستی برعهده می‌گیرند [۱، ۶].

#### ۴-۱-۳-۳ حرکت تصادفی همراه با تقویت (مخابرات رله‌ای)

روش سوم مبتنی بر حرکت تصادفی همراه با تقویت توسط واکنش شیمیایی است که در مسیر انتشار بین فرستنده و گیرنده صورت می‌پذیرد. تقویت‌کنندگی در محیط می‌تواند قابلیت اطمینان انتشار مولکولی را با افزایش تعداد مولکول‌های اطلاعاتی منتشر شده، افزایش دهد. نقش تقویت‌کننده تولید کپی از مولکول منتشر شده در محیط می‌باشد. این روش مخابرات مولکولی مشابه وجود رله در سیستم‌های مخابرات راه دور است. در این روش از مخابرات مولکولی می‌توان از فعالیت مولکول‌های پروتئینی شامل عامل تقویت یون‌های کلسیم، آدنوزین تری فسفات (ATP) و آدنوزین منوفسفات حلقوی فعال (cAMP) بهره‌گیری کرد [۲].

#### ۴-۲-۲ مدل واکنش-انتشار

در این بخش بر اساس دو پدیده انتشار و واکنش یک مدل تصادفی برای شبکه‌های مخابرات مولکولی ارائه می‌گردد. این روش در فیزیک و شیمی برای مدل کردن سیستم‌هایی که هم واکنش و هم انتشار در آن‌ها صورت می‌گیرد، پرکاربرد است.

در این مدل مولکول‌های سیگنالی  $L$  که فرستنده را ترک می‌کنند با توجه به حرکت براونی در محیط پراکنده می‌شوند. هر گیرنده از یک یا چند رسپتور  $R$  تشکیل شده است. هنگامی که مولکول سیگنالی  $L$  به رسپتور  $R$  می‌رسد، به هم متصل می‌شوند و کمپلکس

$C$  را تشکیل می‌دهند. تعداد کمپلکس‌های تشکیل شده در گیرنده، به عنوان خروجی گیرنده در نظر گرفته می‌شود. برای مثال هرگاه در گیرنده تعداد کمپلکس‌ها از یک مقدار آستانه بیشتر شد، می‌توان نتیجه گرفت که یک بیت توسط فرستنده فرستاده شده است. واکنشی که میان سیگنال‌های مولکولی  $L$  و کمپلکس  $C$  رخ می‌دهد به صورت زیر است.



که در آن  $k_f$  و  $k_r$  ثابت‌های نرخ واکنش در حد میکروسکوپی می‌باشند. با این فرض، نرخ تشکیل کمپلکس‌ها در گیرنده در هر زمان به تعداد مولکول‌های سیگنالی در محل گیرنده بستگی دارد. هر دو پدیده انتشار و واکنش توسط فرآیند مارکف قابل مدل‌سازی هستند و احتمال شرطی تعداد مولکول‌های سیگنالی در هر زمان توسط معادله اصلی واکنش-انتشار (RDME<sup>1</sup>) قابل توصیف است [۱۴-۱۵].

با توسعه RDME، مدل RDME<sup>2</sup> ارائه شده است که در آن علاوه بر مدل کردن انتشار در محیط و واکنش‌های صورت گرفته در گیرنده، فرستنده نیز به صورت سری زمانی از تعداد مولکول‌های سیگنالی مدل می‌شود. در محیط همگن یک بعدی با ضریب نفوذپذیری  $D$  و مبتنی بر معادله اصلی واکنش-انتشار، میانگین تعداد مولکول‌های سیگنالی،  $\langle x(t) \rangle$ ، در مکان  $x$  و زمان  $t$  از حل معادلات دیفرانسیلی زیر بدست می‌آید [۱۲].

$$\frac{\partial \ell(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \ell(x,t)}{\partial x^2} + \delta(x-v_T)v_T(t) - \delta(x-v_R) \frac{du_R(t)}{dt}$$

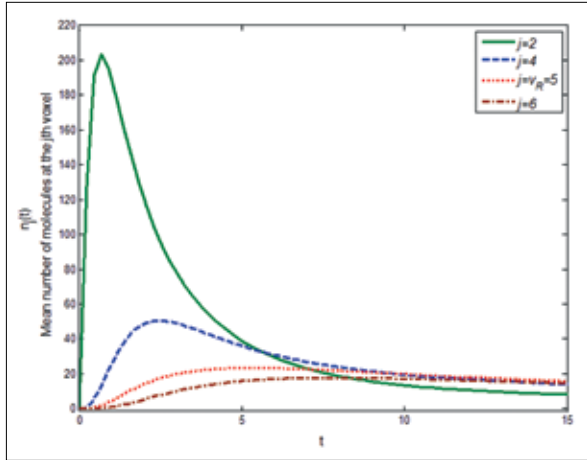
$$\frac{du_R(t)}{dt} = k_f \ell(v_R, t) - k_r u_R(t)$$

به طوری‌که  $v_R$  و  $v_T$  به ترتیب مکان فرستنده و گیرنده،  $V_T(t)$  سیگنال مولکولی ارسالی و  $u_R(t)$  سیگنال خروجی گیرنده می‌باشند. از مزایای مدل RDME امکان تعمیم آن به شبکه‌های ارتباط مولکولی با سیستم چند فرستنده - چند گیرنده است. با فرض خطی بودن واکنش در گیرنده، مدل RDME برای تعیین میانگین و کواریانس خروجی گیرنده عبارات‌هایی به فرم بسته ارائه می‌دهد. نتایج حاصل از این مدل نشان می‌دهند که سیگنال خروجی هر گیرنده تحت تأثیر حضور گیرنده‌های دیگر است.

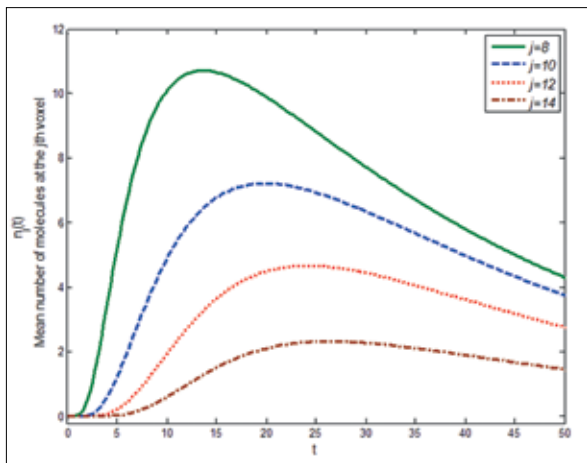
به بیان دیگر این روش برای مدل‌سازی سیستم‌های مخابراتی چند ورودی و چند خروجی (MIMO<sup>2</sup>) مناسب می‌باشد. برای توسعه معادله بالا به حالت سه بعدی و هنگامی که تعداد فرستنده و گیرنده بیش از یکی باشد علاقمندان می‌توانند به [۱۲] مراجعه نمایند.

#### ۴-۳-۳ مدل گسسته یک بعدی

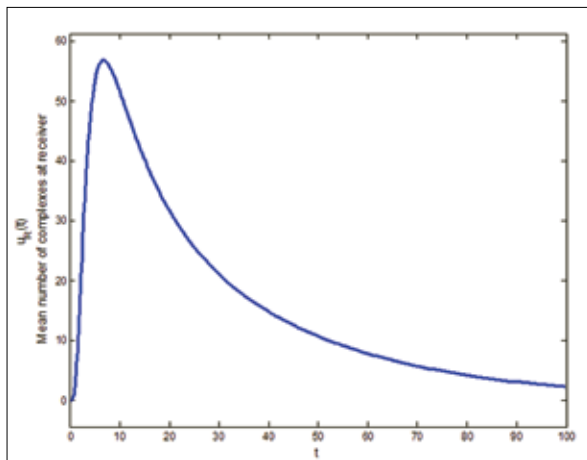
می‌توان نشان داد که حد پیوستگی RDME در واقع یک RDPDE<sup>3</sup> می‌باشد. یک ویژگی خوب نتیجه RDPDE این است که یک جواب به فرم بسته را در دسترس قرار می‌دهد. این فرم بسته نشان می‌دهد



شکل (۲) - میانگین مقدار مولکول سیگنالی،  $n_j(t)$ ، برای  $j=2,4,5,6$  هنگامی که  $k_f=1$  است و فرستنده در  $v_i=1$  و گیرنده در  $v_R=5$  قرار دارد.



شکل (۳) - میانگین مقدار مولکول سیگنالی،  $n_j(t)$ ، برای  $j=8,10,12,14$  هنگامی که  $k_f=1$  است و فرستنده در  $v_i=1$  و گیرنده در  $v_R=5$  قرار دارد.



شکل (۴) - میانگین مقدار کمپلکس،  $u_R(t)$ ، برای  $k_f=1$  است هنگامی که فرستنده در  $v_i=1$  و گیرنده در  $v_R=5$  قرار دارد.

که سیگنال خروجی گیرنده می‌تواند در حضور گیرنده‌های دیگر در شبکه، تحت تاثیر قرار بگیرد.

در ادامه، برای سادگی، نتایج شبیه‌سازی برای حالت یک بعدی ارائه شده‌اند. بدین منظور نخست مدل یک بعدی پیوسته و بدنبال آن برای شبیه‌سازی، مدل گسسته مناسبی را بدست می‌آوریم. سپس مبتنی بر مدل گسسته، شبیه‌سازی سیستم مخابرات مولکولی را برای کانال انتقال یک بعدی و واکنش تک مولکولی هنگامی که محیط ارتباطی همگن باشد، انجام می‌دهیم.

سیستم مخابراتی شامل یک فرستنده و یک گیرنده است و در کل محیط انتقال ضریب انتشار مولکولی یکسان فرض می‌گردد. جهت مدل‌سازی گسسته فرض می‌کنیم کانال مخابراتی مطابق شکل (۱) دارای  $N$  خانه (وکسل) می‌باشد.

به طوری که در لحظه  $t$  میانگین تعداد مولکول‌های سیگنالی در خانه  $j$ ام را  $n_j(t)$  می‌نامیم. روابط دینامیک تغییرات میانگین تعداد مولکول‌های سیگنالی در خانه  $j$ ام بصورت زیر است.

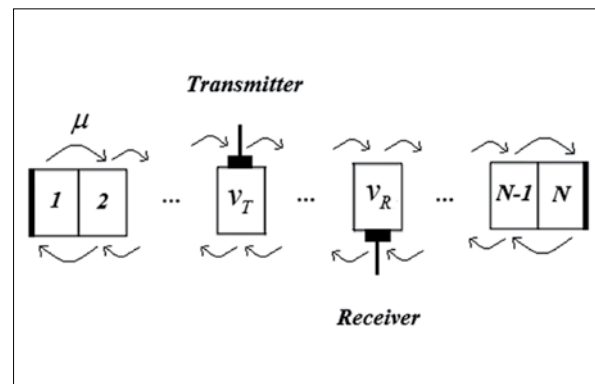
$$\frac{dn_j(t)}{dt} = \mu n_{j-1}(t) - 2\mu n_j(t) + \mu n_{j+1}(t) + v_T(t) \delta(j-v_T) - \frac{du_R(t)}{dt} \delta(j-v_R)$$

$$j = 1, \dots, N$$

$$\frac{du_R(t)}{dt} = \frac{k_f}{\Delta x} n_{v_R}(t) - k_r u_R(t)$$

$u_R(t)$  و  $n_{v_R}(t)$  به ترتیب میانگین تعداد مولکول‌های کمپلکس و میانگین تعداد مولکول‌های سیگنالی در خانه  $v_R$  است که گیرنده در آن قرار دارد. هم‌چنانکه شکل (۱) نشان می‌دهد هر خانه فقط با خانه‌های همسایه‌اش تبادل مولکولی دارد. هدف حل  $N+1$  معادله در روابط فوق جهت بدست آوردن میانگین تعداد مولکول‌های کمپلکس و میانگین تعداد مولکول‌های سیگنالی است.

در شبیه‌سازی عددی انجام شده، یک سیستم مخابرات مولکولی با یک فرستنده و یک گیرنده بطوری که کانال انتقال بین آنها یک بعدی گسسته با  $N=15$  می‌باشد را پیاده‌سازی نموده‌ایم. سیگنال مولکولی ورودی پالس مربعی با بازه  $\tau=0.1$  واحد زمانی در نظر گرفته شده است بطوریکه در این بازه زمانی ۱۰۰۰ مولکول را در



شکل (۱) - خانه‌ها در مدل یک بعدی

فناوری زیستی و نانوماشین‌های محاسباتی گشوده است که در آینده جایگاه ویژه‌ای را در علوم و مهندسی خواهد داشت.

\*\*\*

خانه منتشر می‌کند. نرخ نفوذپذیری انتشار (یک مولکول در واحد زمان) است و همچنین فرض می‌کنیم  $\Delta x=0.001$  و  $k_f=2.5 \times 10^{-3}$  می‌باشد.

در شکل‌های (۲) و (۳) میانگین مقدار مولکول سیگنالی،  $n_j(t)$  برای خانه‌های گوناگون هنگامی که  $k_f=1$  است و گیرنده در  $v_R=5$  قرار دارد نشان داده شده‌اند. چنانچه مشاهده می‌شود با دور شدن از مکان انتشار مولکول‌ها  $n_j(t)$  به شدت کاهش می‌یابد و تاخیر رسیدن مولکول به آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. شکل (۴) میانگین مقدار کمپلکس‌ها،  $n_R(t)$  را نشان می‌دهد که مقدار آن در حدود  $t=7$  به بیشینه می‌رسد و سپس بصورت نمای کاهش می‌یابد.

## چالش‌ها و پژوهش‌های پیش‌رو

بی‌نوشته

تحقیقات اخیر در مخابرات مولکولی به طراحی و تجزیه و تحلیل شبکه‌های مقیاس کوچک که از چند نانوماشین زیستی تشکیل شده است، محدود می‌باشد. یک چالش کلیدی برای پیشبرد حوزه مخابرات مولکولی، توسعه تکنیک‌های قابل اعتماد و مقیاس‌پذیری است که برای ایجاد شبکه‌های مقیاس بزرگ در محیط زیست کاربرد داشته باشند. از دیدگاه شبکه‌های مخابراتی، چالش‌های مربوط به شبکه‌های مخابرات مولکولی با مقیاس بزرگ در سه لایه فیزیکی، پیوندی و شبکه‌ای است که بایستی مورد پژوهش و بررسی قرار گیرد.

در لایه فیزیکی، که وظیفه انتقال مولکول‌ها در محیط فیزیکی را برعهده دارد، مواردی چون انتشار سیگنال، مدولاسیون سیگنال، دامنه سیگنال، ظرفیت کانال، رابطه‌ها و دستگاه‌های سخت افزاری مورد توجه است [۱۸-۱۶].

هر یک از این موارد نیاز به ارائه راهکارهای نوینی در سطح مولکولی دارد. لایه پیوندی در مخابرات مولکولی با چالش‌هایی چون کنترل خطا، آدرس دهی، همگامی، کنترل دسترسی به رسانه، کنترل جریان و اندازه‌گیری فاصله مواجه است و در لایه شبکه، مسائلی چون مسیریابی و پردازش میان شبکه‌ای چالش برانگیز هستند [۴-۲]. با توجه به اینکه پژوهش در شبکه‌های مخابرات مولکولی گام‌های آغازینش را طی می‌کند، هر یک از موارد بیان شده زمینه‌ی پژوهشی نوینی را مطرح می‌کند که در مهندسی پزشکی و فناوری‌های زیستی کاربرد دارد.

## ۶- جمع‌بندی

مخابرات مولکولی روشی مستقیم برای ارتباط با سیستم‌های بیولوژیکی و انتقال اطلاعات بین نانوماشین‌های زیستی است. در این نوع سیستم‌های مخابراتی، اطلاعات توسط مولکول‌های شیمیایی به نام مولکول‌های اطلاعاتی در محیط انتشار می‌یابد و مبتنی بر مکانیزم‌ها و سیستم‌های بیولوژیکی اطلاعات ارسالی کدگذاری و کدگشایی می‌گردد.

در مقایسه با سیستم‌های مخابراتی مرسوم، سیستم‌های مخابرات مولکولی دارای سرعت و دامنه انتشار محدودی هستند، اما در عوض دارای توانایی انتقال اطلاعات بطور مستقیم با سلول‌ها، اندام‌ها و بافت‌ها می‌باشند که تکنولوژی‌های مخابرات فعلی فاقد آن می‌باشند. مخابرات مولکولی افق‌های نوین پژوهشی را در کاربردهای پزشکی،

1. Reaction-Diffusion Master Equation (RDME)
2. Reaction-Diffusion Master Equation with Exogenous Input
3. Multi-Input Multi-Output
4. Reaction-Diffusion Partial Differential Equation

مراجع

- [1] T. Nakano, M. Moore, A. Enomoto, T. Suda and H. Sawai (ed.), Biological Functions for Information and Communication Technologies. (Springer-Verlag-Berlin Heidelberg), pp. 49-86, 2011.
- [2] T. Nakano, M. Moore, F. Wei, A. Enomoto, A.V. Vasilakos, J. Shuai, "Molecular Communication and Networking: Opportunities and Challenges," IEEE Trans. Nanobiosci., Vol. 11, No. 2, pp. 135-148, 2012.
- [3] D. Malak, O. B. Akan, "Molecular communication nanonetworks inside human body," Nano Communication Networks Journal (Elsevier), No. 3, pp. 19-35, 2012.
- [4] I. F. Akyildiz, F. Brunetti, and C. Blazquez, "Nanonetworks: A new communication paradigm," Comp. Netw., Vol. 52, No. 12, pp. 2260-2279, 2008.
- [5] T. Suda, M. Moore, T. Nakano, R. Egashira, and A. Enomoto, "Exploratory research on molecular communication between nanomachines," in Proc. Late-Breaking Papers Genetic Evol. Comput. Conf. (GECCO), 2005.
- [6] N. Farsad, A. W. Eckford, S. Hiyama and Y. Moritani, "A Simple Mathematical Model for Information Rate of Active Transport Molecular Communication," 1st IEEE International Workshop on Molecular and Nano Scale Communication, pp. 473-478, 2011.
- [7] T. Nakano, T. Suda, T. Koujin, T. Haraguchi, Y. Hiraoka, "Molecular Communication through Gap Junction Channels: System Design, Experiments and Modeling," Bionetics'07, 2007.
- [8] L. C. Cobo and I. F. Akyildiz, "Bacteria-based communication in nanonetworks," Nano Commun. Netw., Vol. 1, No. 4, pp. 244-256, 2010.
- [9] Y. Moritani, S. Hiyama, and T. Suda, "Molecular communication among nanomachines using vesicles," in Proc. NSTI Nanotech. Conf., Vol. 2, pp. 705-708, 2006.
- [10] Y. Moritani, S. Hiyama, and T. Suda, "Molecular Communication for Health Care Applications," 2006.
- [11] E. Oosterbroek and A. van den Berg, Lab-on-a-Chip: Miniaturized systems for (Bio) Chemical Analysis and Synthesis, Elsevier Science & Technology Books, 2003.
- [12] C. T. Chou, "Extended master equation models for molecular communication networks," IEEE Trans. Nanobiosci., Vol. 12, No. 2, pp. 79-92, 2013.
- [13] K. V. Srinivas, R. S. Adve, and A. W. Eckford, "Molecular Communication in Fluid Media: The Additive Inverse Gaussian Noise Channel," IEEE Trans. Inf. Theory, Vol. 58, No. 7, 2012.
- [14] I. Lestas, J. Paulsson, N. Ross, and G. Vinnicombe, "Noise in gene regulatory networks," IEEE Trans. Auto. Cont., Vol. 53, No. 1, pp. 198-200, 2008.
- [15] D. Mirandani, "A stochastic model for molecular communications," Nano Communication Networks Journal (Elsevier), No. 2, pp. 205-212, 2012.
- [16] M. Pierobon and I. F. Akyildiz, "Capacity of a Diffusion-based Molecular Communication System with Channel Memory and Molecular Noise," IEEE Trans. Inf. Theory, Vol. 59, No. 2, pp. 942-954, 2013.
- [17] D. Arifler, "Capacity Analysis of a Diffusion-Based Short-Range Molecular Nano-communication Channel," Computer Networks Journal (Elsevier), Vol. 55, No. 6, pp. 1426-1434, 2011.
- [18] P. C. Yen, K. C. Chen, Y. C. Lee, L. S. Meng, P. J. Shin, P. Y. Ko and W. A. Lin, "A New Frontier of Wireless Communication Theory: Diffusion-Based Molecular Communications," IEEE Wireless Communications, Vol. 19, No. 5, pp. 28-35, 2012.