

Winter 2023, 3 (4), 61-74

DOR:

Received: 27 Sep 2022

Accepted: 6 Nov 2022

20.1001.1.27832570.1401.3.4.6.0

مقاله پژوهشی

## Investigating the Effect of Changing the Distance between Nanomachines on Increasing the Efficiency of Message Delivery Using Chemotaxis and Network Connectivity Nano Communicative Bacteria

Tayebeh Raiesi Ardali<sup>1</sup>, Vahid Satari Naeini<sup>2\*</sup>, Javad Mohammadzadeh<sup>3</sup>

1. PhD. Student, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

2. Associate Professor of computer engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.  
(Corresponding Author), [vnaeini@uk.ac.ir](mailto:vnaeini@uk.ac.ir)

3. Assistant Professor, Department of computer engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

### Abstract:

**Introduction:** Nanomolecular network is used as a new connection pattern in nanomachines. These connections are possible using biological components in the environment. The molecular communications have important drawbacks, such as very low capacity or the need to deploy a complex infrastructure. One of the most effective approaches for this purpose is using bacteria to carry encrypted message among nanomachines.

**Method:** The current research examines effective routing in bacterial communication nano networks based on changing the distance between nanomachines. The aim of this research is to develop routing capability for bacterial communication nano networks. For this purpose, two intrinsic characteristics of bacteria, including chemotaxis and conjugation, have been used. In order to analyze the efficiency of message delivery, simulation was done for several different topologies. The purpose of simulation in different forms of topology is to investigate the effect of changing the distance between nanomachines and also the connection process in order to improve message delivery.

**Results:** The results of this research showed that in the number of successful messages delivered to the destination for longer distances, it can be seen that topology 2 performs better. The comparison of the number of connections made at different distances for all three investigated topologies showed that with the increase in the number of bacteria in All three topologies increase the number of connections made, but in different intervals in terms of the distance between the nanomachines, it can be seen that the number of connections decreases as the distance increases due to the reduction of the effect field of the chemical adsorbent, which is needed to direct the movement of the bacteria.

By examining and evaluating the simulation results for the average delay of the messages reached to the destination by changing the distance between the nanomachines, it can be seen that for all three topologies, with the increase in the number of bacteria, the average delay decreases, and with the increase in the distance between the nanomachines, the average delay also decreases. It can be seen that topology 2 has the lowest latency in terms of average latency for longer distances.

**Discussion:** By increasing the distance among nanomachines, the number of received messages at the destination decreases as well. One of the topologies results in better average latency in longer distances compared to the others, because of the hollow center in this topology.

**Keywords:** nanomachine, nanonetwork, molecular communication, bacteria communication, nano network.



## بررسی تأثیر تغییر فاصله بین نانوماشین‌ها بر افزایش کارایی تحویل پیام با استفاده از ویژگی کموتاکسی و اتصال در شبکه نانویی ارتباطی باکتری

دوره سوم، زمستان ۱۴۰۱  
شماره چهارم، صص: ۶۱-۷۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۵  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۵

طیبه رئیسی اردلی<sup>۱</sup>، وحید ستاری نائینی<sup>۲\*</sup>، جواد محمد زاده<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران. [t.raiesi2010@gmail.com](mailto:t.raiesi2010@gmail.com)

۲- دانشیار، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان. (نویسنده مسئول) [vsnaeini@uk.ac.ir](mailto:vsnaeini@uk.ac.ir)

۳- استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران. [j.mohammadzadeh@kiau.ac.ir](mailto:j.mohammadzadeh@kiau.ac.ir)

**چکیده:** فناوری نانو حوزه جدیدی از فناوری به منظور توسعه و ساخت ماشین‌ها در مقیاس نانو است. ارتباطات ملکولی یک الگوی جدید برای نانوماشین‌هاست که در آن ارتباط با استفاده از اجزای بیولوژیکی تحقق می‌یابد. روش‌های ارتباط ملکولی ایرادهای عمده‌ای مانند ظرفیت خیلی کم یا نیاز به استقرار زیر ساخت‌های پیچیده دارند. هدف از پژوهش حاضر توسعه قابلیت مسیریابی برای شبکه‌های نانویی ارتباطی باکتری با استفاده از دو ویژگی ذاتی باکتری شامل فرآیند کموتاکسی و اتصال می باشد. هدف از شبیه سازی در اشکال مختلف توپولوژی بررسی تأثیر تغییر فاصله بین نانوماشین‌ها و نیز فرآیند اتصال به منظور بهبود تحویل پیام می باشد. نتایج نشان داد که در تعداد پیام‌های موفق تحویل داده شده به مقصد برای فواصل بیشتر توپولوژی ۲ بهتر عمل می‌کند. مقایسه تعداد اتصالات انجام شده در فواصل متفاوت برای هر سه توپولوژی نشان داد که با افزایش تعداد باکتری‌ها تعداد اتصالات افزایش می‌یابد، اما در بازه‌های مختلف از نظر فاصله بین نانوماشین‌ها با افزایش فاصله تعداد اتصالات انجام شده به دلیل کاهش میدان اثر ماده جاذب شیمیایی که به منظور جهت گیری حرکت باکتری مورد نیاز است، کاهش می‌یابد. نتایج شبیه سازی برای میانگین تأخیر پیام‌های رسیده نشان می‌دهد که برای هر سه توپولوژی با افزایش تعداد باکتری‌ها، میانگین تأخیر کاهش می‌یابد و با افزایش فاصله بین نانوماشین‌ها میانگین تأخیر نیز افزایش می‌یابد به طور کلی با بررسی موارد مطرح شده در شبکه‌های نانویی ارتباطی باکتری می‌توان چگونگی انتقال مفاهیم شبکه‌های ارتباطی را به شبکه‌های نانویی ارتباطی باکتری که در کاربردهای وسیع سودمندند، نشان داد.

**واژگان کلیدی:** فناوری نانو، نانوماشین، شبکه‌های نانویی، ارتباطات مولکولی، شبکه‌های نانویی ارتباطی باکتری.

## ۱. مقدمه

یکی از جدیدترین موضوعات تحقیقاتی در فناوری نانو، استفاده از این فناوری در حوزه اطلاعات و ارتباطات است. در سال‌های اخیر، با رشد فزاینده علم و تکنولوژی، زمینه‌های مختلف جدیدی به حیطه شبکه‌های بی سیم اضافه شده است. از جمله مهم‌ترین مسائل جدید در این زمینه، طراحی معماری، تجهیزات و پروتکل‌های مخابراتی برای شبکه‌هایی با مقیاس بسیار کوچک است. به منظور توسعه تجهیزات مخابراتی بسیار کوچک و حل مسائل مربوط به کارایی و قابلیت اطمینان این تجهیزات، از حوزه نسبتاً جدید دیگری به نام فناوری نانو استفاده می‌شود [۱]. فناوری نانو، قادر به تحقق عملی دستگاه‌های مقیاس نانو است که معمولاً به عنوان نانوماشین، شناخته می‌شوند [۲]. نانوماشین‌ها اساسی‌ترین واحد عملیاتی در فناوری نانو هستند و قادرند عملیاتی مانند اجرای محاسبات، ذخیره داده‌ها، حس کردن و حرکت در ابعاد میکروسکوپی را انجام دهند [۳]. تعدادی از نانوماشین‌ها که با همکاری هم ارتباط برقرار می‌کنند و اطلاعات مولکولی را به منظور دستیابی به وظایف خاص به اشتراک می‌گذارند، یک شبکه نانویی در نظر گرفته می‌شوند [۲]. فناوری نانو از طریق دستکاری مواد در مقیاس میکرو یا نانو منجر به فراهم کردن مزیت‌های مختلفی، مثلاً از دیدگاه بهداشت و درمان، تشخیص زود هنگام یا درمان بیماری‌های مزمن می‌گردد [۳]. جهت بهره‌گیری از مزایایی که در دستگاه‌های نانو قابل مشاهده است، محدودیت‌های از جمله اندازه نانوماشین‌ها، حافظه، قابلیت پردازش و... پیش می‌آیند [۴]. مهم‌ترین این محدودیت‌ها مربوط به ظرفیت این دستگاه‌ها است. با استفاده از دیگر ویژگی‌های موجود در محیط می‌توان این دستگاه‌ها را تقویت کرد و ظرفیت مربوط به آن‌ها را افزایش داد [۳].

برخلاف دستگاه‌های ارتباطی متداول، برقراری ارتباط در مقیاس مولکولی چالش‌هایی را به همراه دارد. اولین و مهم‌ترین این چالش‌ها ارتباط بین دستگاه‌ها است که باید با استفاده از اجزاء بیولوژیکی انجام شود. چالش بزرگ در استفاده از این روش توانایی انتقال اجزاء از ارتباطات متداول و شبکه به این اجزاء بیولوژیکی است. ارتباطات مولکولی یک رویکرد مناسب برای الگوهای ارتباطی در مقیاس نانو است [۲]. راه‌حل‌های مختلفی برای ارتباطات مولکولی مطرح شده است، از این راه‌حل‌های مختلف که در حال حاضر در حال بررسی و انجام هستند، یکی از روش‌های مورد توجه، استفاده از شبکه نانو ارتباطی باکتریایی است.

شبکه‌های نانویی مبتنی بر باکتری، شامل نانوماشین (گره)‌ها، حامل‌ها و کانال هستند. در شبکه‌های نانو ارتباطی باکتریایی مورد بررسی، نانوماشین به عنوان یک فرستنده یا

گیرنده عمل می‌کند. اطلاعات در DNA باکتری کدگذاری می‌شود، DNA، یک مولکول طولانی متشکل از دو پلیمر از نوکلئوتید است، با هر نوکلئوتید از یک پلیمر متصل به دیگری یک جفت (جفت باز) تشکیل می‌شود. هر نوکلئوتید شامل یکی از چهار باز آدنین، تیمین، سیتوزین و گوانین (A، T، C و G) است، پیام یک رشته کدگذاری شده از این بازها است. DNA از یک پلاسمید، یعنی، یک چرخه DNA استاندارد که قادر به خودتکثیری و خودانتقالی از طریق اتصال باکتری به باکتری جدید است، شکل یافته است. پیام‌ها در باکتری از طریق کدگذاری پلاسمید بارگذاری می‌شوند [۵، ۶].

یکی از انواع باکتری‌هایی که برای این منظور استفاده می‌شود باکتری اشرشیاکلاهی است که از جمله باکتری‌های تاژک‌دار است و بین ۴ تا ۱۰ تاژک دارد، که توسط موتورهای چرخشی موجود در غشای سلول حرکت می‌کند و با ترکیبات شیمیایی پر شده است [۷]. در میان تمام باکتری‌ها، به این دلیل که باکتری E.coli ارگانیزم مرجعی برای طراحی حامل‌ها است بر روی آن متمرکز شدیم [۵]. باکتری مانند E.coli، به دستگاه‌های حسی به نام گیرنده شیمیایی مجهز می‌باشند، که می‌توانند تغییرات غلظت مواد شیمیایی را اندازه‌گیری کنند. چرخش تاژک‌ها و حرکت E.coli در پاسخ به این تغییرات صورت می‌گیرد [۸].

در شبکه‌های نانو ارتباطی باکتریایی پس از کدگذاری اطلاعات در DNA باکتری E.coli، فرستنده باکتری را در محیط رهامی‌سازد. باکتری‌ها قادر هستند با استفاده از تاژک به‌طور تصادفی حرکت کنند، اما در حضور مواد خاصی به نام ماده جاذب شیمیایی، باکتری‌ها می‌توانند حرکت خود را با توجه به گرادیان (تغییرات) ماده جاذب شیمیایی به‌صورت مستقیم ادامه دهند. باکتری‌ها دارای تعداد زیادی از گیرنده‌های شیمیایی مختلف حول غشای خود هستند که منجر به تشخیص وجود ذرات جاذب در محیط و حرکت به سمتی می‌شوند که بهترین شرایط حیاتی برای آن‌ها فراهم است. به این فرآیند، فرآیند کموتاکسی می‌گویند [۹، ۱۰]. یکی از نمونه‌های معروف کموتاکسی حرکت باکتری E.coli است. ویژگی کموتاکسی در E.coli این قابلیت را فراهم می‌آورد که بتوان از این باکتری به عنوان حامل اطلاعاتی مناسب در محیط استفاده کرد [۱۱].

در طول فرآیند حرکت باکتری، باکتری‌ها معمولاً به‌طور تصادفی ملاقات خواهند شد. این ملاقات تصادفی می‌تواند منجر به انتقال پلاسمید شود که این فرآیند به عنوان فرآیند اتصال شناخته می‌شود. بنابراین اتصال یکی از حالت‌های ارتباطی باکتری‌ها است. اتصال باکتریایی شامل انتقال پلاسمید بین باکتری‌ها و گیرنده است که به‌طور معمول در تماس نزدیک هستند [۱]. در نهایت اطلاعات از طریق باکتری که در

محیط شناور است، به نانوما شین مقصد یعنی گیرنده تحویل داده می‌شود. کانال یک محیط مایع است که در آن گرادیان غلظت ماده جاذب تغییر می‌کند. در واقع گره‌ها و حامل‌ها در محیط مایع با مواد مغذی کافی که برای آن‌ها فراهم است، قرار دارند [۵، ۱۲].

به‌طور کلی شبکه‌های نانو ارتباطی باکتریایی به عنوان یک روش جدید برای ارتباطات مولکولی، پیشرفت‌های قابل توجهی مانند ظرفیتی چند برابر بیشتر نسبت به روش‌های مورد استفاده قبلی را نشان می‌دهند. این نوع شبکه برای برنامه‌های کاربردی از نانو حسگرها و یا اجرای فرمان‌های مربوط به سیستم‌های راه‌اندازی نانو بسیار مفید خواهد بود [۵].

در این پژوهش با توجه به مزایای مطرح شده برای استفاده از شبکه نانو ارتباطی باکتریایی در برقراری ارتباطات مولکولی و با استفاده از دو ویژگی ذاتی باکتری شامل فرآیند کموتاکسی و اتصال به منظور مسیریابی در این گونه شبکه‌ها، باکتری E.coli به‌عنوان باکتری مینا در شبکه نانو ارتباطی باکتریایی انتخاب و تأثیر فاصله بین نانوما شین‌ها بر عملکرد توپولوژی‌های انتخابی در شبکه‌های نانو ارتباطی باکتریایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه مقاله در بخش دوم مروری بر کارهای گذشته ارائه می‌شود، بخش سوم شامل شرح کار روش پیشنهادی است. بخش چهارم ارزیابی و ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی است و در بخش آخر نتیجه‌گیری بیان و تفسیر می‌گردد.

## ۲. بررسی پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، یکی از سیستم‌های طبیعی که از حوزه میکروبی شناسی به فناوری اطلاعات و ارتباطات راه یافته است، استفاده از باکتری تاژک‌دار برای انتقال اطلاعات در کانال مخابراتی است. برای اولین بار استفاده از باکتری برای ارتباطات مولکولی در [۱۳] پیشنهاد شده است. این پیشنهاد شامل مکانیسم‌هایی برای انتقال اطلاعات بین نانوما شین‌های مختلف است که باکتری می‌تواند از طریق فرآیند کموتاکسی، به سمت مقصد جذب شود. که در آن، یک معماری شبکه مولکولی و دو تکنیک متوسط برد از جمله، باکتری تاژک‌دار و نانوموتور کاتالیزستی، برای برقراری اتصال دستگاه‌ها در فواصل مختلف، پیشنهاد شده است.

غلظت باکتری به‌عنوان عاملی برای تجزیه اطلاعات از طریق کموتاکسی در [۱۴] مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش مقایسه‌ای بین دو روش متفاوتی که در آن‌ها از سرور به‌عنوان دافع شیمیایی یا مشتری به‌عنوان جاذب شیمیایی استفاده شد، صورت گرفت. در آزمایش‌های شبیه‌سازی شده، پیام‌های تصادفی در غلظت باکتری با استفاده از یک مدولاسیون ساده کلید روشن-خاموش رمزگذاری شد و سپس پیام اولیه توسط

گیرنده‌ها رمزگشایی شد. نتایج نشان داد که یک رویکرد کموتاکسی مثبت که در آن سنسورهای مشتری یک جاذب شیمیایی برای جذب سلول‌های باکتری آزادمی سازد، عموماً از رویکرد کموتاکسی منفی، که سرور یک ماده دافع شیمیایی را آزادمی سازد، بهتر است. در [۱۵] شبیه‌سازی شبکه nanoNS3 برای مدل‌سازی شبکه‌های ارتباطی مولکولی باکتریایی طراحی شد و شبیه‌سازی ns-3 به‌منظور کارآیی محاسباتی بالا برای مقیاس بزرگ و اجرای آسان الگوریتم‌های جدید مورد استفاده قرار گرفت. یافته‌های این پژوهش نشان داد که با استفاده از معماری لایه‌ای ns-3، امکان استفاده از پروتکل‌های لایه IP، انتقال و کاربرد در ns-3 برای آزمایش عملکرد شبکه‌های ارتباطی مولکولی باکتریایی وجود دارد. برای تکمیل شبیه‌سازی پیشنهادی لازم است پارامترهایی نظیر مدل تأخیر انتشار کانال بهبود داده شود و نانو ساختارهای سه‌بعدی با سایر شبیه‌سازهای ارتباطی مولکولی که بر روی ns-3 اجرامی شوند، مورد بررسی بیشتر قرار گیرند.

پژوهشی به‌منظور بررسی خواص باکتری برای تحویل پلاسمید در شبکه‌های نانو حسگر در [۱۶] انجام گرفت. در این پژوهش مدل‌های پیشنهادی برای انتقال پلاسمید و فرآیند تحویل بین دو نقطه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که از این مدل‌ها برای افزایش برنامه‌های کاربردی که در آن از باکتری‌ها برای تحویل پلاسمید به مقصد مورد نظر استفاده می‌شود، می‌توان بهره‌برد.

## ۳. روش پیشنهادی

### ۳.۱. شبکه نانو ارتباطی باکتریایی

شبکه نانو ارتباطی باکتریایی مورد بررسی یک محیط شامل نانوما شین‌ها است که هدف برقراری ارتباط بین نانوما شین‌ها با یکدیگر است. فرض بر این است که هر نانو ماشین قادر به انتشار یک ماده جاذب شیمیایی است که توسط باکتری جذب می‌شود. از آنجا که باکتری تنها قابلیت حرکت فضایی محدود و وابسته به تغییرات غلظت ماده جاذب شیمیایی در محیط دارد، نانوما شین‌های واسط نقش مهمی را بازی می‌کنند. بنابراین، نانوما شین‌های واسط می‌توانند به‌عنوان گره‌های رله که باکتری خاصی را به موقعیت خاص هدایت می‌کنند، استفاده شوند [۱۷]. در پژوهش حاضر منظور از نانوما شین‌ها محفظه‌هایی است که باکتری‌ها در آن نگهداری می‌شوند.

### ۳.۲. فرآیند کموتاکسی و اتصال

همان‌طور که اشاره شد به‌منظور مسیریابی در شبکه نانو ارتباطی باکتریایی مورد بررسی از دو ویژگی باکتری شامل فرآیند کموتاکسی و اتصال استفاده می‌شود. کموتاکسی فرآیندی

است که توسط آن باکتری از طریق گیرنده شیمیایی، تغییرات غلظت ذرات خاص را احساس می‌کند و به سمت غلظت‌های بالاتر ذرات مفید که طعمه (ماده جاذب) نامیده می‌شود، حرکت می‌کند [۳]. اتصال نیز، یک فرآیند انتقال DNA از یک دهنده به یک سلول گیرنده می‌باشد.

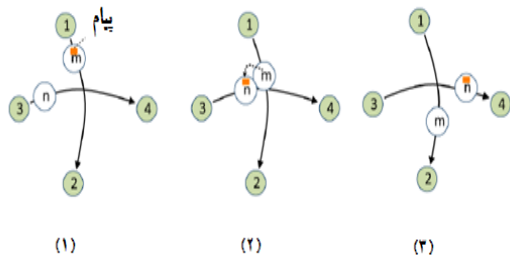
فرآیند اتصال هنگامی که پیللی بر سطح باکتری شکل گرفت منجر به ایجاد یک مجرا می‌شود و باکتری‌ها به هم متصل می‌شوند. فرض می‌شود که پیللی در حال حاضر در باکتری‌ها تشکیل شده است و به همین ترتیب در طول فرآیند برخورد، باکتری می‌تواند بلافاصله فرآیند اتصال را شروع کند. هنگامی که دو باکتری در یک نقطه به یکدیگر نزدیک می‌شوند، یک فرآیند اتصال برای ۳۰۰ ثانیه رخ می‌دهد، که برابر با انتقال طول قطعه‌ای از ژن به اندازه ۲۰ نوکلئوتید در ژن است. فرآیند اتصال اجازه می‌دهد باکتری‌های مختلف موقتاً به هم متصل شوند. اتصال باکتریایی انتقال یک جهتی DNA تک‌رشته‌ای (مثلاً پلاسمید) از یک سلول دهنده به یک سلول گیرنده با استفاده از منافذ غشاء است. هنگامی که مجرا تشکیل شد، پلاسمید از یک باکتری به دیگری انتقال می‌یابد. این فرآیند سبب می‌شود که بتوان از باکتری‌های مختلف برای انتقال فرصت‌طلبانه پلاسمیدها بین یکدیگر استفاده کرد. با انتقال فرصت‌طلبانه پیام، هدف این است که در نهایت پیام به نانوماشین مقصد برسد. [۱۷، ۱۸، ۱۹].

### ۳.۳. مسیریابی فرصت‌طلبانه

به منظور توسعه قابلیت مسیریابی برای شبکه‌های نانویی ارتباطی باکتری، فرآیند اتصال باکتریایی به کار گرفته می‌شود. مسیریابی فرصت‌طلبانه، یک فرآیند مسیریابی است که معمولاً در شبکه‌های بی‌سیم استفاده می‌شود. مفهوم اساسی متکی بر گروه‌های میانی است که کیفیت لینک واسط خوبی برای ارسال بسته‌ها به گره مقصد دارند، در صورتی که لینک گره مبدأ به مقصد ضعیف باشد و یا در محدوده قرارنگرفته باشد. یکی از انواع مسیریابی فرصت‌طلبانه مبتنی بر مفاهیم شبکه تحمل پذیر تأخیر است. استفاده از هر دو روش اتصال و جذب شیمیایی اجرای مکانیسم مسیریابی فرصت‌طلبانه را در شبکه‌های نانویی باکتریایی ممکن می‌سازد. DTN، قابلیت‌هایی را برای دستگاه‌های بی‌سیم، به‌ویژه دستگاه‌های سیار، به منظور برقراری ارتباط فرصت‌طلبانه بین گره‌ها، بسته به محیط فعلی فراهم می‌کند. در DTN، گره‌های سیار به‌طور فرصت‌طلبانه ملاقات می‌شوند و پیام به دیگری منتقل می‌شود، که در نهایت آن پیام به نقطه مقصد خواهد رسید.

یک مثال از مسیریابی فرصت‌طلبانه مبتنی بر DTN در شکل ۱ نشان داده شده است، که دستگاه سیار M از گره ۱ به گره ۲ حرکت می‌کند و دستگاه سیار N از گره ۳ به گره ۴

حرکت می‌کند. از طریق این مسیرهای حرکت، دو گره در نزدیکی هم قرار می‌گیرند، و یک فرصت برای گره M برای انتقال یک پیام به N فراهم می‌شود [۱، ۱۷، ۲۰].



شکل ۱: مسیریابی فرصت‌طلبانه مبتنی بر DTN برای شبکه‌های بی‌سیم. پیام از گره ۱ آغاز می‌شود، توسط دستگاه سیار m حمل می‌شود، که فرصت‌طلبانه به دستگاه n منتقل می‌شود [۱۷].

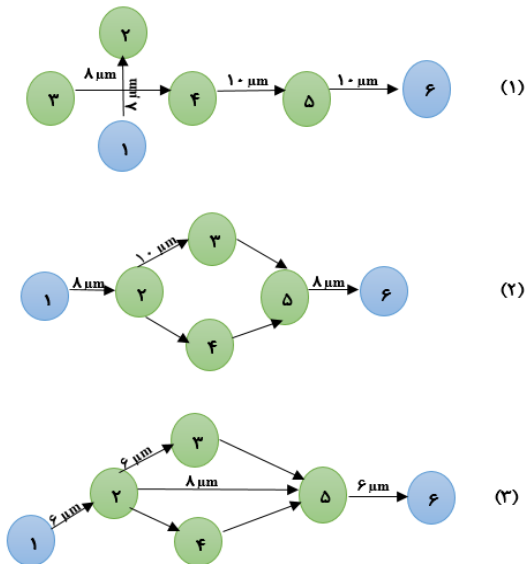
برای مسیریابی چندگامی در شبکه‌های نانویی باکتری، فرآیند مسیریابی مبتنی بر اتصال از طریق ترکیب فرآیند اتصال و کموتاکسی در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق شکل، فرآیند شامل دو خاصیت باکتری‌ها یعنی کموتاکسی و اتصال است [۱]. رویکرد مورد استفاده شبیه شبکه‌های پخش همگانی بی‌سیم است که پیام‌هایی که در نظر گرفته شده برای گره‌های گیرنده خاص، دریافت خواهند شد در حالی که پیام‌هایی که برای گیرنده در نظر گرفته نشده است، دور انداخته می‌شوند. مسیرهای حرکت باکتری‌ها باید از یکدیگر بگذرند و یا نزدیک به یکدیگر باشند. به‌عنوان مثال، باکتری‌های سبز در شکل به ماده شیمیایی منتشر شده توسط گره ۳ جذب می‌شوند، در حالی که باکتری‌های قرمز به ماده منتشر شده توسط گره ۲ جذب می‌شوند (رنگ‌های مختلف باکتری‌ها نشان‌دهنده انواع مختلف گیرنده شیمیایی بر روی باکتری است) بنابراین، همان‌طور که مشاهده می‌شود، دو نوع مختلف از باکتری‌ها از یک اتصال خاص عبور خواهند کرد. در طول این دوره عبور، اتصال باکتریایی رخ می‌دهد. در این نقاط اتصال، پیام‌های باکتری گره ۱ می‌توانند به باکتری‌های که از نقطه ۲ به نقطه ۳ می‌روند، انتقال یابند. بنابراین، مسیریابی فرصت‌طلبانه برای ۲ گام در شبکه نانویی باکتری ایجاد می‌شود، که در آن پیام از گره مبدأ ۱ سرانجام به گره ۳ خواهد رسید [۱۷].

$$t_{prop}(d) = 1.82d^2 + 4.49d + 0.17 \quad (4)$$

پس تو وسط این چند جمله‌ای می‌توان، به‌طور مناسبی میانگین زمان انتشار  $t_{prop}(d)$  را به صورت تابعی از  $d$  بر حسب  $mm$ ، به دست آورد [۱۳].

### ۵.۳. بررسی روند حرکت باکتری

برای سه توپولوژی انتخابی نشان‌داده‌شده در شکل ۳ از دو ویژگی کموتاکسی و اتصال باکتری به منظور برقراری ارتباط بین نانوماشین‌ها استفاده می‌شود. واژه نانوماشین و گره به جای هم به کار گرفته می‌شوند. فرض می‌شود، باکتری‌ها از دیدگاه بیوتکنولوژی توسط فرمون‌ها مورد هشدار قرار گرفتند. پیام‌ها در باکتری از طریق کدگذاری پلاسمید بارگذاری می‌شوند. پلاسمیدها می‌توانند از یک باکتری به دیگری و از طریق فرآیند اتصال منتقل شوند.

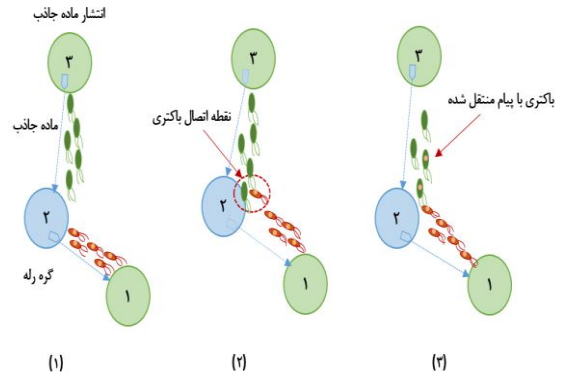


شکل ۳: توپولوژی‌های انتخابی

به منظور مدل‌سازی زمان مورد نیاز برای باکتری جهت رسیدن به گیرنده، اولین موردی که باید مدل‌سازی شود انتشار ماده جاذب از طریق محیط است. دروازه گیرنده مدام ذرات را به محیط آزادی سازد. این ذرات دور از تغییرات غلظت تولیدی منتشر و توسط باکتری احساس و دنبال خواهد شد. مطابق قوانین فیک انتشار هنگامی که در یک محیط خاص یک توزیع غیر یکنواخت ذرات وجود دارد، این ذرات به انتشار پیوسته به منظور رسیدن به یک غلظت ثابت از طریق فضا تمایل دارند [۲۱]. شار ذرات با معادله اول فیک (۵) به دست می‌آید، بر طبق این معادله شار خالص ذرات در یک زمان و موقعیت معین برابر تغییرات (گرادیان) فضایی غلظت ذرات  $C(\bar{x}, t)$  ضربدر ضریب انتشار (نفوذ) است.

$$\bar{J}(\bar{x}, t) = D \nabla C(\bar{x}, t) \quad (5)$$

که در آن



شکل ۲: مسیریابی مبتنی بر اتصال برای شبکه‌های نانویی ارتباطی باکتری [۱].

۴.۳. محاسبه زمان تأخیر انتقال پیام از گره مبدأ به مقصد تأخیر برای انتقال پیام از یک گره مبدأ به یک گره مقصد که از طریق  $N$  اتصال منتقل می‌شود، می‌تواند به صورت زیر ارائه شود:

$$t_{end-to-end, N} = t_{encoding}(plas) + t_{delivery}(plas, N) + t_{decoding}(plas) \quad (1)$$

که  $plas$ ، پلاسمید است.  $t_{encoding}(plas)$  زمان برای رمزگذاری پلاسمید، همچنین زمان برای انطباق باکتری با نانوماشین به منظور دریافت پلاسمید وابسته خواهد بود، در حالی که  $t_{decoding}(plas)$  به زمان برای انطباق باکتری با نانوماشین گیرنده به منظور  $offload$  پلاسمید وابسته است. زمان (ت)  $t_{decoding}(plas)$  کدگذاری پلاسمید است. زمان سپری شده برای اتصال ( $t_{conj}$ ) تعریف شده است.

$t_{delivery}(plas)$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$t_{delivery}(plas, N) = \sum_i^N t_{conj, i}(plas) + \sum_i^N t_{prop, i} \quad (2)$$

این رابطه برای یک پلاسمید ( $plas$ ) که از طریق  $N$  بار اتصال انتقال یافته، نشان داده شده است. اجزا  $t_{delivery}$  به شرح زیر است:

$t_{conj, i}(plas)$  نشان‌دهنده زمان اتصال برای  $i$  باکتری است که در آن:

$$t_{conj, i}(plas) = t_{piliform, i} + t_{trans, i \rightarrow j} \quad (3)$$

$t_{piliform, i}$  نشان‌دهنده زمان برای تشکیل پیلی در باکتری است.

$t_{trans, i \rightarrow j}$  زمان لازم برای انتقال پیام بین باکتری  $i$  و  $j$  در طول فرآیند اتصال است. فرض می‌کنیم سرعت  $833 \text{ bp/s}$  است.  $t_{prop, i}$  نشان‌دهنده زمان انتشار باکتری  $i$  است [۱۷].

برای محاسبه  $t_{prop}$ : مدت زمان انتشار یک باکتری از یک مبدأ به یک مقصد به صورت زیر محاسبه می‌شود، زمان انتشار با یک چند جمله‌ای مرتبه ۲، به دست آمده است:

نمی‌توان از معادله دوم فیک (۹) استفاده کرد. به منظور رعایت اصل پیوستگی، غلظت در محیط در مدت زمان کمی از زمان  $\Delta t$  را در نظر می‌گیریم. اگر  $\Delta t$  به اندازه کافی کوچک باشد، می‌توان فرض کرد که در این فاصله زمانی، تعداد ذرات در کل سیستم ثابت هستند و بنابراین اصل پیوستگی برآورده شده است. از این رو، قانون دوم فیک را با استفاده از روش اختلاف محدود در یک محیط گسسته می‌توان بیان کرد:

$$\frac{c(\bar{x}, t + \Delta t) - c(\bar{x}, t)}{\Delta t} = D \frac{c(\bar{x} - \Delta \bar{x}, t) - 2c(\bar{x}, t) + c(\bar{x} + \Delta \bar{x}, t)}{(\Delta \bar{x})^2} \quad (10)$$

به منظور استفاده از روش اختلاف محدود باید بررسی پایداری سیستم بررسی شود.

معادله ثبات (۱۱) بیان می‌کند که فاصله زمانی  $\Delta t$  باید کوچکتر از فاصله طول،  $\Delta \bar{x}$  به توان دو بخش بر دو برابر ضریب انتشار (نفوذ) باشد:

$$\Delta t \leq \frac{(\Delta \bar{x})^2}{2D} \quad (11)$$

با استفاده از (۱۰) و انتخاب پارامترهای درست و دقیق به منظور برآورد معادل (۱۱) می‌توان این که چگونه ذرات جاذب که گیرنده در حال آزاد سازی و انتشار از طریق محیط است و در نتیجه اینکه چگونه زمانی که باکتری به سمت مقصد در حال حرکت است، غلظت را احساس می‌کند محاسبه کرد، فرض می‌کنیم که گراد بان غلظت پس از یک زمان خاص به دلیل روشن شدن نانو ماشین گیرنده، بعد از شروع انتشار ذرات پایدار می‌شود. با توجه به نتایج ارائه شده در شبیه‌سازی مربوطه می‌توان نتیجه گرفت که انتشار یک فرآیند ایزوتورپیک است، که در یک مسیر یکسان در تمام جهات تحت تأثیر قرار دارد. بنابراین با توجه به اینکه میدان اثر ماده جاذب شیمیایی در وضعیت پایداری قرار دارد از رابطه (۱۲) برای شبیه‌سازی انتشار ذرات جاذب استفاده شده است [۲۳، ۲۱].

به منظور شبیه‌سازی فرآیند کموتاکسی و اتصال باکتری E.coli تجزیه و تحلیل ریاضی استفاده شده و الگوریتم حرکت باکتری پیاده‌سازی شده است. همان‌طور که اشاره شد، میدان اثر ماده جاذب شیمیایی در وضعیت مشخصی قرار دارد که به صورت زیر نشان داده شده است:

$$U(r) = \frac{1}{1000} \frac{Q}{4D\pi r} \quad (12)$$

که در آن نرخ انتشار ماده جاذب  $Q = 10-12 \text{ mol/s}$  و ضریب انتشار ماده جاذب شیمیایی  $D = 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  و شعاع تا مرکز انتشار  $r$  در نظر گرفته می‌شود [۵]. باکتری، در هر لحظه، در یکی از حالات اجرا یا توقف بوده و مداوم و متناوب بین این دو تغییر وضعیت می‌دهد. در ابتدا فرض می‌شود باکتری در حالت اجرا قرار دارد. باکتری با سرعت ثابت  $20 \text{ } \mu\text{m/sec}$  حرکت می‌کند،

$$c(\bar{x}, t) = \left( \frac{\partial c(\bar{x}, t)}{\partial x_1} \frac{\partial c(\bar{x}, t)}{\partial x_2} \dots \frac{\partial c(\bar{x}, t)}{\partial x_n} \right)$$

یک بردار می‌باشد که ابعادش همان ابعاد  $\bar{x}$  و  $\bar{J}$  است.

ضریب انتشار (نفوذ) برای ذرات کروی در حال حرکت در اعداد رینولدز پایین مایعات به شرح زیر بیان شده است:

$$D = \frac{K_b T}{6\pi\eta r} \quad (6)$$

که در آن شعاع ذره،  $\eta$  و  $T$  به ترتیب ویسکوزیته و درجه حرارت محیط و  $K_b$  ثابت بولتزمن می‌باشد. عدد رینولدز یک عدد بدون بعد می‌باشد که یک نسبت بین نیروهای اینرسی و ویسکوز (چسبناک) را بیان می‌کند:

$$R = \frac{\text{نیروهای اینرسی}}{\text{نیروهای ویسکوز}} \quad (7)$$

حرکت باکتری توسط یک مجموعه‌ای از نیروهای کاملاً متفاوت از نیروهای حاکم بر حرکت اشیاء در مقیاس ماکرو اداره می‌شود. از دیدگاه باکتری E.coli، آب یک ماده گرانبه است که از طریق آن شناسی کند، از این رو، حرکت باکتری توسط نیروهای اینرسی محدود نمی‌شود اما توسط نیروهای ویسکوز (چسبناک) محدود می‌شود. به همین دلیل گفته می‌شود که باکتری در اعداد رینولدز پایین حرکت می‌کند [۲۲].

اصل تداوم (۸) بیان می‌کند که ذرات نمی‌توانند ایجاد شوند یا از بین بروند، بنابراین، تعداد ذرات ورودی و خروجی سیستم باید یکسان باشد. طبق این اصل، مشتق زمان از غلظت ذرات در مکان  $\bar{x}$  و زمان  $t$  برابر است با منفی شار غلظت ذرات  $J(\bar{x}, t)$  در مکان  $\bar{x}$  و زمان  $t$ .

$$\frac{\partial c(\bar{x}, t)}{\partial t} = \nabla \cdot \bar{J}(\bar{x}, t) \quad (8)$$

قانون دوم فیک (۹) است، با جایگزین کردن معادله اول قانون فیک (۵) در اصل پیوستگی به دست آمده است:

$$\frac{\partial c(\bar{x}, t)}{\partial t} = D \nabla^2 c(\bar{x}, t) \quad (9)$$

که در آن

$\nabla^2$  یا  $\Delta$  عملگر لاپلاس می‌باشد که بیانگر واگرایی گرادیان است، از این رو:

$$\nabla^2 c(\bar{x}, t) = \frac{\partial^2 c(\bar{x}, t)}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 c(\bar{x}, t)}{\partial x_2^2} + \dots + \frac{\partial^2 c(\bar{x}, t)}{\partial x_n^2}$$

معادله قانون دوم فیک در دو یا ابعاد بیشتر مشابه است با معادله حرارت، که بیانگر توزیع حرارت به عنوان یک تابع از فضا و زمان است [۲۳، ۲۱]. گیرنده مداوم ذرات را در محیط اضافه می‌کند، از این رو غلظت همیشه در حال افزایش است و در نتیجه اصل پیوستگی برقرار نیست. بر اساس این محدودیت،

زمان انتشار باکتری از مبدأ به مقصد محاسبه شده و اگر باکتری ظرف حداکثر زمان شبیه‌سازی در نظر گرفته شده به مقصد نرسید، فرض بر آن است که مفقود شده است. زمانی باکتری به مقصد می‌رسد که فاصله آن تا مقصد کمتر از  $5\mu\text{m}$  باشد. این محاسبات هر  $0.1$  ثانیه یکبار تکرار می‌شوند. دستورات اجرا شده توسط باکتری به وضعیت فعلی آن بستگی دارد، بعد از حس کردن غلظت ماده جاذب در محیط، باکتری احتمال تغییر حالت را محاسبه کرده و تصمیم می‌گیرد که در آن وضعیت بماند و یا تغییر وضعیت دهد.

این احتمال‌ها با توجه به میانگین طول اجرا یا توقف محاسبه می‌شوند. برای محاسبه طول اجرا، یک رویداد به‌عنوان تغییر در حالت باکتری از اجرا به توقف در نظر گرفته می‌شود. سپس احتمال این که رویداد در زمان خاص  $t_0$  رخ دهد، برابر است با:

$$p(t_0, \lambda) = \lambda e^{-\lambda t_0} \quad (13)$$

که در آن  $\lambda$  میانگین طول اجرای باکتری است. طول توقف وابسته به احتمال تغییر وضعیت باکتری از توقف به اجرا در لحظه خاص  $t_0$  است که به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$p(t_0, \mu) = \mu e^{-\mu t_0} \quad (14)$$

که در آن  $\mu$  میانگین طول توقف باکتری است. در این مورد  $\mu=0.1$  ثانیه است [۲۴].

در هر مرحله زمانی، احتمال انتقال حالت محاسبه شده و حالت باکتری به‌روز می‌گردد. سپس موقعیت و جهت باکتری تعیین می‌شود. هنگامی که باکتری در حالت اجرا قرار دارد به اندازه  $0.2$  میکرومتر در جهت  $\theta$  حرکت می‌کند، در غیر این صورت در همان موقعیت قبلی خود باقی می‌ماند. انتشار چرخشی توسط یک عدد تصادفی با واریانس مشخص محاسبه می‌شود و تغییر جهت در حالت توقف از طریق تولید یک عدد تصادفی مدیریت می‌شود.

برای هر سه توپولوژی گره ۱ مبدأ و گره ۶ گره مقصد است. توپولوژی ۱، برای جریان یافتن ماده جاذب از گره مبدأ در جهت مختلف به سمت گره مقصد ایجاد شده است. هدف، ایجاد بیشترین میزان اتصالات در بین جریان باکتری از گره ۱ به گره ۲ و از گره ۳ به گره ۴ می‌باشد. اتصال در نقطه تقاطع تعیین خواهد کرد که چگونه بسیاری از باکتری‌های حامل پیام در نهایت به سمت گره مقصد حرکت خواهند کرد. هدف از توپولوژی ۲ تعیین این امر است که چگونه دو مسیر ممکن به

سمت مقصد می‌توانند در انتخاب حرکت تأثیرگذار باشند و چگونه می‌توانند بر تعداد اتصالات تأثیر گذارند.

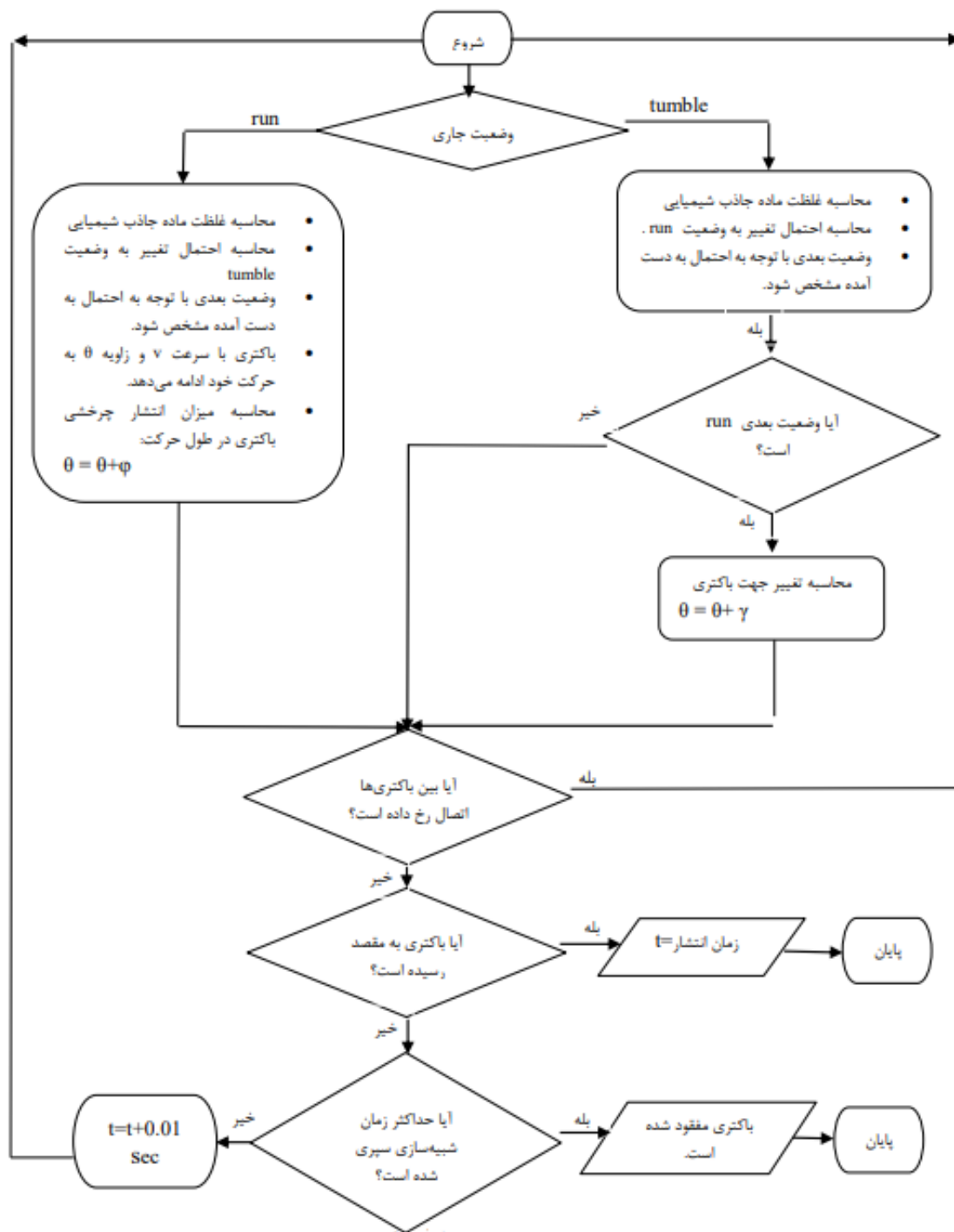
در مورد توپولوژی ۳، جهت تغییرات کموتاکسی مستقیماً به سمت گره مقصد گرایش دارد. هدف این توپولوژی خاص به منظور تعیین چگونگی انتقال باکتری به سمت خاصی است که باکتری‌ها می‌توانند برای انجام اتصال در مکان خاص تجمع پیداکنند، در واقع افزایش تعداد اتصالات در یک گره خاص (گره ۵). علاوه بر آن چگونگی افزایش قابلیت اطمینان نیز مد نظر است. فرض می‌کنیم هر یک از گره‌ها (نانوماشین‌ها) ثابت هستند. هر کدام از گره‌ها هم باکتری تولید می‌کنند و هم ماده جاذب شیمیایی، فلش بین گره‌ها در توپولوژی‌ها جهت ماده جاذب شیمیایی را نشان می‌دهد.

از باکتری به منظور انتقال پیام بین گره‌ها استفاده می‌شود. فرض می‌کنیم فرآیندهایی برای آلود اطلاعات بر روی باکتری وجود دارد. با افزایش تعداد باکتری‌های منتشر شده (۲ باکتری تا ۱۰ باکتری) از هر گره در مسیر، بین باکتری‌ها با احتمال  $0.5$  اتصال ایجاد می‌شود و پیام از یک باکتری به دیگری منتقل می‌شود. فرض می‌شود پیل در حال حاضر در باکتری‌ها تشکیل شده است و  $1\mu\text{m}$  طول دارد. در طول فرآیند برخورد، باکتری می‌تواند بلافاصله فرآیند اتصال را شروع کند.

مکانیسم مسیریابی، مسیریابی فرصت طلبانه است. شکل (۴) مربوط به الگوریتم حرکتی باکتری است. ابتدا برای سه توپولوژی مختلف، تعداد پیام‌های موفق رسیده به مقصد، تعداد اتصالات انجام شده و میانگین تأخیر، با افزایش تعداد باکتری‌ها، محاسبه و در سه توپولوژی مقایسه می‌شوند.

سپس با افزایش فاصله بین نانوماشین‌ها برای فواصل دورتر، در چند بازه انتخابی تعداد پیام‌های موفق، تعداد اتصالات انجام شده و نیز میانگین تأخیر مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.





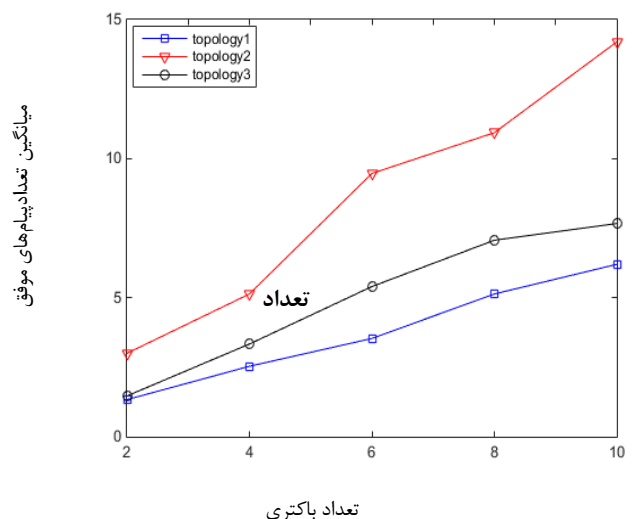
شکل ۴: شبه کد مربوط به فرآیند کموناکسی و اتصال

## ۱.۴ نتایج شبیه‌سازی

فرض می‌کنیم که در شبیه‌سازی، باکتری‌ها در ابتدا درون نانوماشین‌ها قرار دارند و همگی همزمان منتشر می‌شوند، پس از یک دوره کوتاه، باکتری‌ها در فضای شبیه‌سازی موقعیت‌های تصادفی خواهند داشت. فرض کنید هر نانوماشین قادر است به‌عنوان جایگاه انتشاردهنده جاذب‌های شیمیایی عمل کند که ماده جاذب شیمیایی را از گره‌های همسایه به باکتری‌های جاذب منتشر سازد. هر گره همچنین می‌تواند جایگاهی برای انتشار باکتری‌ها باشد. فرض می‌کنیم هر باکتری تنها توسط گره همسایه یک گامی خود جذب می‌شود، فلش بین گره‌ها جهت ماده جاذب شیمیایی را نسبت به گره همسایه آن نشان می‌دهد. بنابراین گیرنده شیمیایی باکتری هر گره باید با ماده جاذب شیمیایی گره همسایه هم‌خوانی داشته باشد.

## ۲.۴ بررسی عملکرد توپولوژی‌ها بر تعداد پیام‌های موفق رسیده به مقصد، تعداد اتصالات و میانگین تأخیر با افزایش تعداد باکتری‌ها

نتایج شبیه‌سازی ما برای ۱۵ بار اجرای شبیه‌سازی با استفاده از شبیه‌ساز Matlab در شکل ۵ تا ۱۰ نشان داده شده است. عملکرد تحویل پیام، را با توجه به تعداد باکتری‌های منتشرشده در هر گره (۲ تا ۱۰ باکتری) مورد ارزیابی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. شکل ۵ نشان‌دهنده تعداد پیام‌هایی است که با موفقیت به مقصد رسیده‌اند در حالی که در شکل ۶ تعداد اتصالات با توجه به تعداد باکتری‌های منتشر شده در هر گره نمایش داده شده است. شکل ۷ مربوط به میانگین تأخیر است. شکل‌های ۸ تا ۱۰ نیز تعداد پیام‌های موفق رسیده به مقصد، تعداد اتصالات انجام شده و میانگین تأخیر با تغییر فاصله بین نانوماشین‌ها را نشان می‌دهند.



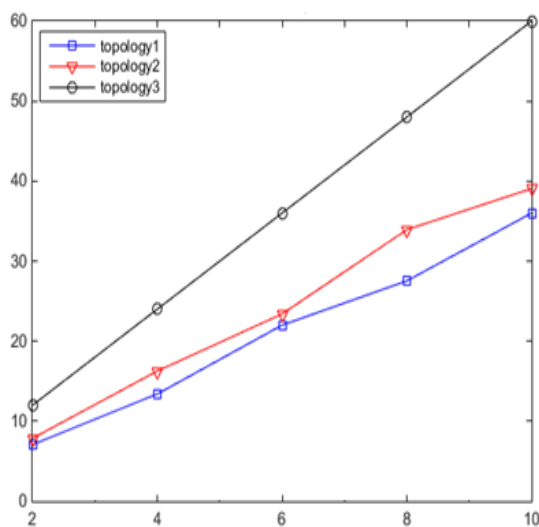
شکل ۵: تعداد پیام‌های موفق رسیده با افزایش تعداد باکتری‌ها

نتایج و اطلاعات حاصل از شبیه‌سازی تعداد پیام‌های موفق در مقابل تعداد باکتری انتشار یافته در هر گره همان‌طور که در شکل ۵

نشان داده شده است، بیانگر این است که تعداد پیام‌هایی که به صورت موفقیت‌آمیز به مقصد رسیده با افزایش تعداد باکتری‌های هر گره در هر سه توپولوژی افزایش می‌یابد. که تا حد زیادی به دلیل افزایش احتمال اتصال و نیز تعداد باکتری‌هایی است که به مقصد می‌رسد. افزایش تعداد اتصالات منجر به انتقال فرصت‌طلبانه پیام می‌شود که این امر به نوبه خود سبب افزایش تعداد پیام‌هایی می‌شود که به صورت موفقیت‌آمیز به مقصد می‌رسند.

با چندین بار اجرای شبیه‌سازی تا آنجا که به تعداد پیام‌های موفق تحویل داده شده به مقصد مرتبط می‌شود، مشاهده می‌شود که توپولوژی ۲ بهتر از توپولوژی ۳ و ۱ می‌باشد، به‌ویژه زمانی که تعداد باکتری‌ها در هر گره زیاد است. این عملکرد تا حد زیادی به شکل توپولوژی ۲، نسبت داده می‌شود. باکتری منتشر شده از گره ۲ به مواد جاذب شیمیایی گره ۳ و ۴ خود جلب می‌شوند و در حالی که بیشتر باکتری‌ها به این دو جهت گرایش دارند، تعدادی از باکتری‌ها از مرکز توخالی توپولوژی، برای رسیدن به مقصد خود در گره ۶ استفاده می‌کنند.

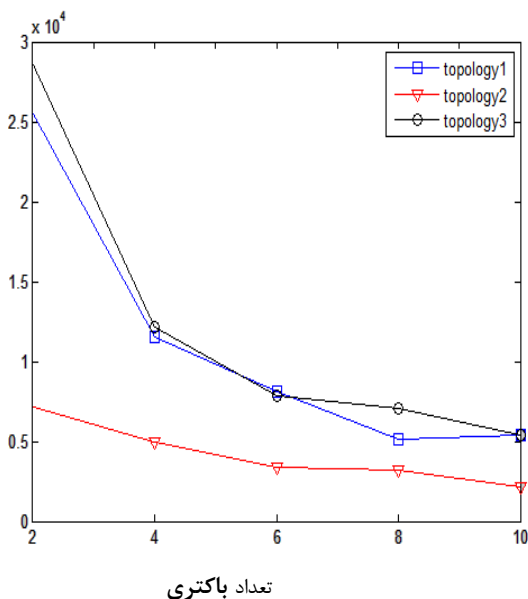
با مقایسه میانگین تعداد پیام‌های موفق تحویل داده شده به مقصد برای ۱۰ باکتری منتشر شده در سه توپولوژی دریافتیم که میانگین پیام‌های تحویل داده شده ۱۴.۲ برای توپولوژی ۲ در مقایسه با ۷.۶ برای توپولوژی ۳ و ۶.۲ برای توپولوژی ۱ است.



شکل ۶: تعداد اتصالات انجام شده با افزایش تعداد باکتری‌ها

تعداد اتصالات انجام شده در مقابل تعداد باکتری‌های منتشر شده در هر گره در شکل (۶) نشان داده شده است و سه توپولوژی با هم مورد مقایسه قرار گرفتند، نتایج و اطلاعات حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش تعداد باکتری‌های منتشر شده در هر گره تعداد اتصالات انجام شده در هر سه توپولوژی افزایش می‌یابد. توپولوژی ۱ به‌منظور ارزیابی مزایای فرآیند اتصال به‌ویژه اگر گره مقصد در جهتی متفاوت با باکتری‌های منتشر شده از گره مبدأ

قرارداد داشته باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. در توپولوژی ۱، باکتری حامل پیام منتشر شده از گره ۱، توسط گره ۲ که ۹۰ درجه در خلاف جهت عقربه‌های ساعت نسبت به جهت گره مقصد ۶ است، جذب می‌شود. با بررسی نتایج می‌توان مشاهده کرد که توپولوژی ۳ منجر به تعداد بیشتری از اتصالات می‌گردد، زیرا باکتری‌ها به سمت گره مقصد تمایل دارند، از آنجا که بیشتر باکتری‌ها به سمت این گره تمایل به حرکت دارند، می‌توان نتیجه گرفت که تراکم زیادی از باکتری‌ها، در حال حرکت به سمت مقصد است که این امر به نوبه خود منجر به تعداد زیادی از اتصالات می‌شود.



شکل ۷: میانگین تأخیر پیام‌های رسیده به مقصد

با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی مشاهده می‌شود که میانگین تعداد اتصال برای توپولوژی ۳، ۶۰ بوده که در مقایسه با ۳۹ برای توپولوژی ۲ کمتر است که علت آن است که بیشتر باکتری‌ها به‌طور مستقیم به گره ۶ مهاجرت می‌کنند و از دیگر گره‌های واسط عبور نمی‌کنند. میانگین تعداد اتصال‌ها برای توپولوژی ۱ برابر ۳۵.۶ است.

میانگین تأخیر پیام‌های رسیده به مقصد در شکل (۷) نشان داده شده است، می‌توان مشاهده کرد که با افزایش تعداد باکتری‌ها در هر گره، میانگین تأخیر شروع به کاهش می‌کند. به‌طور کلی در مقایسه سه توپولوژی مورد بررسی مشاهده می‌شود که توپولوژی ۲ کم‌ترین تأخیر را دارد، که برای ۱۰ باکتری یا گره میانگین تأخیر برای توپولوژی ۲ برابر ۰.۱ ثانیه است، در حالی که این زمان برای توپولوژی ۱ برابر ۵۴۱۴.۴ و برای توپولوژی ۳ برابر ۱۵۴۲۷.۴ است. اختلاف زیاد در زمان تأخیر را می‌توان به فرآیند اتصال نسبت داد، چراکه باکتری در طول این روند بدون حرکت خواهد بود.

#### ۳.۴. بررسی تغییر فاصله بین نانوماشین‌ها بر عملکرد توپولوژی‌ها

بررسی نتایج شبیه‌سازی در شکل (۸) نشان می‌دهد که تعداد پیام‌های موفق رسیده به مقصد برای فواصل مختلف در هر سه توپولوژی با افزایش فاصله بین نانوماشین‌ها کاهش می‌یابد.

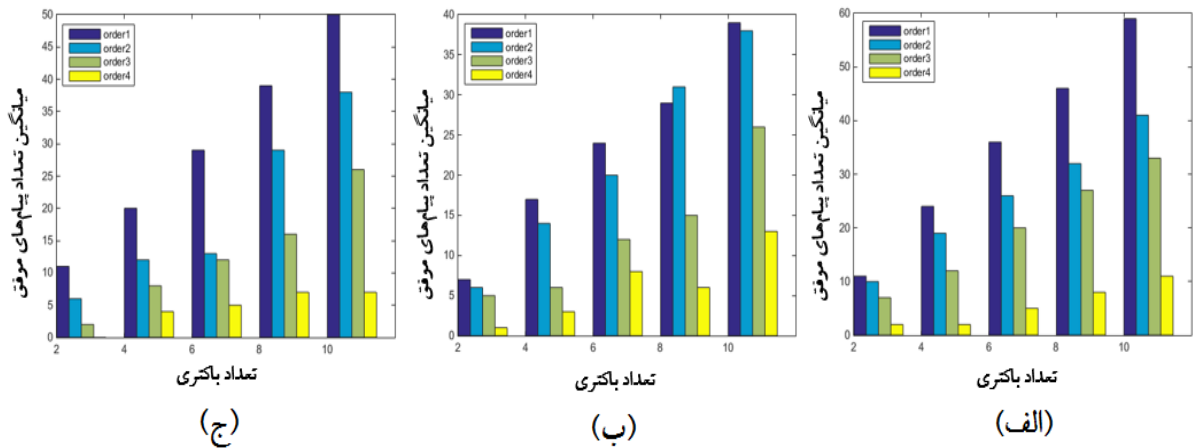
همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد باکتری‌ها منتشر شده در هر گره تعداد پیام‌های موفق رسیده به مقصد برای هر سه توپولوژی افزایش یافته است، از طرفی در هر بار افزایش فاصله بین نانوماشین‌ها تعداد پیام‌های موفق رسیده به مقصد کاهش می‌یابد، چون باکتری خارج از محدوده ماده جاذب شیمیایی است در فاصله طولانی‌تر مقدار خیلی کوچکی از ماده جاذب شیمیایی را احساس می‌کند. مقایسه تعداد اتصالات انجام شده در فواصل متفاوت برای هر سه توپولوژی مورد بررسی در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش تعداد باکتری‌ها در هر سه توپولوژی منجر به افزایش تعداد اتصالات انجام شده و در نتیجه افزایش قابلیت اطمینان انتقال پیام می‌گردد، اما در بازه‌های مختلف از نظر فاصله بین نانوماشین‌ها می‌توان دید که با افزایش فاصله، تعداد اتصالات کاهش می‌یابد.

انتخابی برای اولین بازه یعنی کم‌ترین فاصله برابر ۳۹، در بازه دوم ۳۸، در بازه سوم ۲۶ و در بازه چهارم یعنی بیشترین فاصله برابر ۱۳ است. که نشان‌دهنده یک سیر نزولی برای تعداد پیام‌های موفق رسیده به مقصد با افزایش فاصله است. در تعداد پیام‌های موفق تحویل داده شده به مقصد برای فواصل بیشتر می‌توان دید که توپولوژی ۲ به دلیل وجود مرکز توخالی، بهتر عمل می‌کند.

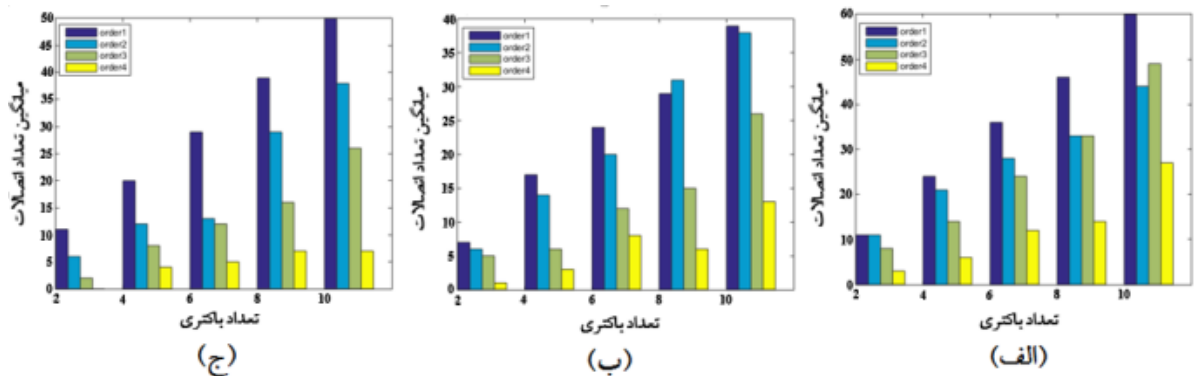
دلیل این امر میدان اثر ضعیف ماده جاذب شیمیایی احساس شده توسط باکتری طی می‌شود که منجر به کاهش تراکم باکتری‌ها و بنابراین کاهش تعداد اتصالات انجام شده در فواصل دورتر می‌گردد. در تعداد اتصالات انجام شده برای فواصل بیشتر برای بازه انتخابی چهارم یعنی بیشترین فاصله می‌توان دید که توپولوژی ۱ تعداد اتصالات بیشتری دارد. بنابراین حرکت تصادفی بیشتری خواهد داشت و در نتیجه در تعداد پیام‌هایی که قادرند در حداکثر زمان در نظر گرفته شده به مقصد مورد نظر برسند، کاهش دیده می‌شود. میانگین تعداد پیام‌های موفق تحویل داده شده به مقصد در توپولوژی ۲ برای ۱۰ باکتری در بازه‌های تعریف شده انتخابی برای اولین بازه یعنی کم‌ترین فاصله برابر ۳۹، در بازه دوم ۳۸، در بازه سوم ۲۶ و در بازه چهارم یعنی بیشترین فاصله برابر ۱۲ است. که نشان‌دهنده سیر نزولی برای تعداد پیام موفق رسیده به مقصد با افزایش فاصله است. در تعداد پیام‌های موفق تحویلی به فاصله بین نانوماشین‌ها میانگین تأخیر نیز افزایش می‌یابد. با بررسی و ارزیابی نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای میانگین تأخیر پیام‌های رسیده به مقصد با تغییر فاصله بین نانوماشین‌ها طبق شکل ۱۰، می‌توان دید که برای هر سه توپولوژی با

توپولوژی ۲ کمترین مقدار را نسبت به دو توپولوژی دیگر دارد، می‌توان مشاهده کرد که توپولوژی ۲ به دلیل وجود مرکز توخالی برای فواصل طولانی‌تر، کمترین زمان تأخیر را دارد.

افزایش تعداد باکتری‌ها، میانگین تأخیر کاهش می‌یابد و با افزایش فاصله بین نانوماشین‌ها میانگین تأخیر نیز افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین تأخیر در بازه چهارم یعنی بیشترین فاصله تعریف شده انتخابی بین نانوماشین‌ها برای ۱۰ باکتری در



شکل ۸: تعداد پیام‌های موفق در مقابل تعداد باکتری انتشار یافته در گره در فواصل مختلف (از چپ به راست به ترتیب order 1 کمترین فاصله تا order 4 بیشترین فاصله)  
 (الف) توپولوژی ۱ (ب) توپولوژی ۲ (ج) توپولوژی ۳

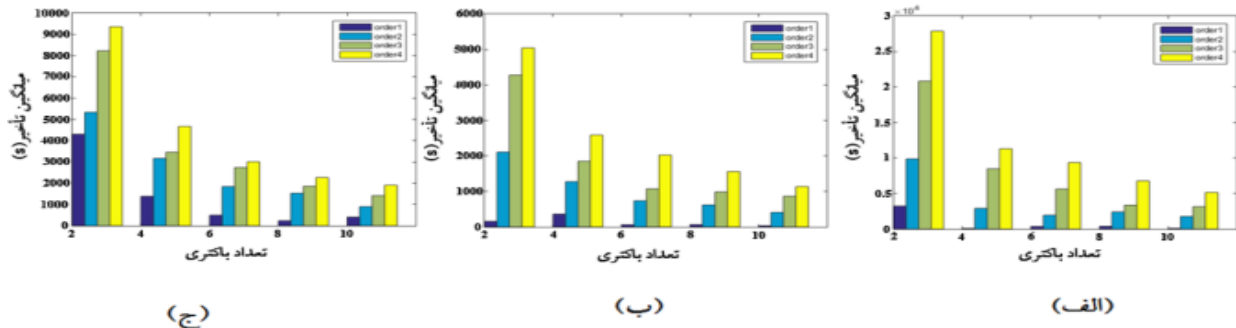


شکل ۹: تعداد اتصالات انجام شده در مقابل تعداد باکتری‌های منتشر شده در هر گره در فواصل مختلف (از چپ به راست به ترتیب order 1 کمترین فاصله تا order 4 بیشترین فاصله)  
 (الف) توپولوژی ۱ (ب) توپولوژی ۲ (ج) توپولوژی ۳

تعداد باکتری‌ها، میانگین تأخیر کاهش می‌یابد و با افزایش فاصله بین نانوماشین‌ها میانگین تأخیر نیز افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین تأخیر در بازه چهارم یعنی بیشترین فاصله تعریف شده انتخابی بین نانوماشین‌ها برای ۱۰ باکتری در توپولوژی

با بررسی و ارزیابی نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای میانگین تأخیر پیام‌های رسیده به مقصد با تغییر فاصله بین نانوماشین‌ها طبق شکل ۱۰، می‌توان دید که برای هر سه توپولوژی با افزایش

۲ کمترین مقدار را نسبت به دو توپولوژی دیگر دارد، می توان مشاهده کرد که توپولوژی ۲ به دلیل وجود مرکز توخالی برای فواصل طولانی تر، کمترین زمان تأخیر را دارد.



شکل ۱۰: میانگین تأخیر پیام های رسیده به مقصد در فواصل مختلف (از چپ به راست به ترتیب order 1 کم ترین فاصله تا order 4 بیشترین فاصله) (الف) توپولوژی ۱ (ب) توپولوژی ۲ (ج) توپولوژی ۳

## مراجع

- [1] Sasitharan Balasubramaniam, "Opportunistic routing through conjugation in bacteria communication nanonetwork." Nano Communication Networks pp. 36-45, 2012.
- [2] Maria Gregori, Llatser Ignacio, Albert Cabellos-Aparicio, Alarcón Eduard. "Physical channel characterization for medium-range nanonetworks using catalytic nanomotors." Nano Communication Networks , pp. 102-107, 2 0201.
- [3] Ian F Akyildiz, Brunetti Fernando, Blázquez Cristina. "Nanonetworks: A new communication paradigm." Computer Networks, pp 2260-2279, 2008.
- [4] Atakan, Baris, and Ozgur B. Akan. "Deterministic capacity of information flow in molecular nanonetworks." Nano Communication Networks 1, no. 1 (2010): 31-42.
- [5] Arash Einolghozati, Mohsen Sardari, Ahmad Beirami, Faramarz Fekri. "Data gathering in networks of bacteria colonies: Collective sensing and relaying using molecular communication." In 2012 Proceedings IEEE INFOCOM Workshops, . IEEE, pp. 256-26, 12012.
- [6] Yunlong Gao, Lakshmanan Sriram, Sivakumar Raghupathy. "On attractant scheduling in networks based on bacterial communication." In 2011 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPs), IEEE, pp. 419-424., 2011.
- [7] Daniel A Fletcher, Julie A. Theriot. "An introduction to cell motility for the physical scientist." Physical biology pp.1, 2004.
- [8] Julius Adler, "Chemoreceptors in Bacteria: Studies of chemotaxis reveal systems that detect attractants independently of their metabolism." Science pp. 1588-1597, 1969.

## ۴. نتیجه گیری

نانوماشین های باکتریایی به دلیل سرعت انتشار مخابراتی نسبتاً مناسب، سازگاری طبیعی و کم هزینه بودن برای کاربردهای خاص به ویژه در حوزه بهداشت و درمان سودمند خواهند بود. با توجه به اطلاعات به دست آمده از شبیه سازی می توان مشاهده کرد که تغییر فاصله بین نانوماشین ها بر روی تعداد پیام های موفق رسیده به مقصد، تعداد اتصالات انجام شده و نیز میانگین تأخیر تأثیرگذار است. در تعداد پیام های موفق تحویل داده شده به مقصد برای فواصل بیشتر می توان دید که توپولوژی ۲ بهتر عمل می کند و از نظر میانگین تأخیر توپولوژی ۲ برای فواصل طولانی تر، کم ترین زمان تأخیر را دارد.

بنابراین انتخاب نوع توپولوژی بر روی تعداد پیام های موفق رسیده به مقصد، تعداد اتصالات انجام شده و نیز میانگین تأخیر تأثیرگذار است. به طور کلی با بررسی موارد مطرح شده در شبکه های نانویی ارتباطی باکتری می توان نشان داد که چگونه مفاهیم شبکه های ارتباطی را می توان به شبکه های نانو ارتباطی باکتریایی انتقال داد. با توجه به قابلیت های ذکر شده برای شبکه های نانو ارتباطی باکتریایی می توان از این شبکه ها به منظور کاربردهای ویژه از جمله جمع آوری اطلاعات از نانو حسگرها، ارسال دستور برای نانو فعال کننده ها و طراحی دستگاه های میکروفلوئیدی بهره برد.

- [22] E.M. Purcell "Life at Low Reynolds Number," American Journal of Physics pp. 3-11, 1977.
- [23] M.Pierobon, I.F. Akyildiz, "A Physical Channel Model for Molecular Communication in Nanonetworks," To appear in IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC) on BIO-INSPIRED NETWORKING, pp:602-611, 2008.
- [24] H. E. Berg "coli in Motion" 1 edition, New York, Springer-Verlag. pp , 2003.
- [9] Albert Mestres Sugrañes, I. F. Akyildiz. "Capacity and delay of bacteria-based communication in nanonetworks." PhD diss., Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona. Departament d'Arquitectura de Computadors, 2012 (Enginyeria de Telecomunicació),pp ,2012.
- [10] Albert Mestres Miller, Melissa B , Bassler Bonnie L. "Quorum sensing in bacteria." Annual Reviews in Microbiology, pp. 165-199, 2001.
- [11] Howard C Berg, A. Brown Douglas. "Chemotaxis in Escherichia coli analysed by three-dimensional tracking." Nature 239 , pp. 500-504, 1972.
- [12] M. Llatser Gregor, I. Cabellos-Aparicio, A. Alarcón, E. "Physical channel characterization for medium-range nanonetworks using catalytic nanomotors," Nano Communication Networks (Elsevier Journal), pp. 779–791 , 2010.
- [13] Maria Gregori, Ian F. Akyildiz. "A new nanonetwork architecture using flagellated bacteria and catalytic nanomotors." IEEE Journal on selected areas in communications pp. 612-619, 2010.
- [14] Mavrid opoulos, S Nicopolitidis "Using Bacterial Concentration as Means of Dissipating Information through Chemotaxis," Nano Communication Networks, pp.1–8, 2017.
- [15] Dinç, Fatih, Matija Medvidović, and Leander Thiele. "Effective Geometry Monte Carlo: A Fast and Reliable Simulation Framework for Molecular Communication." IEEE Access , pp.28635-28650,2019
- [16] Sasitharan Balasubramaniam, "Multi-hop conjugation based bacteria nanonetworks." IEEE Transactions on nanobioscience pp. 47-59, 2013.
- [17] Vitaly Petrov, Sasitharan Balasubramaniam, Yevgeni Koucheryavy, Mikael Skurnik. "Forward and reverse coding for bacteria nanonetworks." In 2013 First International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), pp. 74-78. IEEE, 2013.
- [18] Petrov, V. April. Feasibility study of the THz band for communications between wearable electronics. In 2015 17th Conference of Open Innovations Association (FRUCT) (pp. 157-162). IEEE,pp. 157-162. 2015
- [19] Khaled A Harras, Kevin C. Almeroth. "Transport layer issues in delay tolerant mobile networks." In NETWORKING 2006. Networking Technologies, Services, and Protocols; Performance of Computer and Communication Networks; Mobile and Wireless Communications Systems: 5th International IFIP-TC6 Networking Conference, Coimbra, Portugal, May 15-19, 2006. Proceedings Springer Berlin Heidelberg 5, pp. 463-475, 2006.
- [20] Kärger, Jörg, ed. *Diffusion Fundamentals: Leipzig 2005*. Leipziger Universitätsverlag, 2005.
- [21] Edward M Purcell, "Life at low Reynolds number." *American journal of physics* , pp. 3-11. 1977.