ارتقاء عملکرد شبکه‌های سیار متحمل تأخیر با اولویت‌بندی بسته‌های بافرشده

فاطمه مشاک[۱]، کارشناس ارشد؛ علیرضا کشاورزحداد[۲]، دانشیار؛ شاپور گلبهارحقیقی[۳]، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه شیراز - شیراز - ایران – fmashak@shirazu.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه شیراز - شیراز - ایران - keshavarz@shirazu.ac.ir
۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه شیراز - شیراز - ایران – golbahar@shirazu.ac.ir

چکیده: پروتکل‌های متداول مسیریابی شبکه توانایی پشتیبانی از شبکه‌های سیار منقطع را ندارد، چراکه به‌دلیل پایین‌بودن چگالی گره‌ها، متحرک-بودن آن‌ها و اتصالات ناپایدار رادیویی در بیشتر زمان‌ها، مسیری میان گره‌های مبدأ و مقصد وجود ندارد. شبکه‌های متحمل تأخیر (DTN) سازوکاری است که با تحمل‌پذیری تأخیرهای طولانی، امکان برقراری ارتباطات در شبکه‌های سیار منقطع را ممکن می‌سازد. روش‌های مسیریابی در DTN، از ایده پخش‌کردن کپی‌های بسته در میان گره‌های متحرک جهت رساندن اطلاعات به مقصدها استفاده می‌نمایند. البته جهت داشتن عملکردی مطلوب، لازم است با محدودکردن تعداد کپی‌ها، میزان بار شبکه نیز کنترل شود. در این مقاله، روشی هوشمندانه در فرایند کپی‌کردن بسته‌ها پیشنهاد می‌شود که ضمن کنترل بار شبکه می‌تواند برون‌دهی شبکه را به مقدار قابل‌توجهی افزایش دهد. ایده اصلی روش پیشنهادی اولویت‌بندی بسته‌ها موجود در بافر گره‌ها، جهت ارسال می‌باشد که تا حدی از تکرارهای بلااستفاده بسته‌ها جلوگیری کرده و مانع افزایش بیهوده بار شبکه می‌شود. این اولویت‌دهی بر اساس مبدأ بسته‌ها، سن بسته‌ها و عمر باقی‌مانده آن‌ها انجام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که روش پیشنهادی برون‌دهی شبکه را به میزان ۴۰ تا ۶۰ درصد، در مقایسه با روش‌های افشان و صبر باینری و تحویل مستقیم بهبود می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های متحمل تأخیر، مسیریابی، اولویت‌بندی بافر، نسبت تحویل.

Improving the Performance of Delay Tolerant Mobile Networks by Prioritizing Buffered Packet

F. Mashak[1], M.S. Student; A. Keshavaz-Haddad[2], Asociate Professor; S. Golbahar Haghighi[3], Assistant Professor

1- School of Electrical and Computer Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran, Email: fmashak@shirazu.ac.ir
2- School of Electrical and Computer Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran, Email: keshavarz@shirazu.ac.ir
3- School of Electrical and Computer Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran, Email: golbahar@shirazu.ac.ir

Abstract: The conventional routing protocols are not able to handle intermittent mobile networks, since because of deficiency of nodes' density, mobility, instability of radio connections, most of the times no path exists among the source and destination nodes. Delay tolerant networks (DTN) is a solution in which communications become feasible in intermittent mobile networks by tolerating long delays. Routing methods in DTN use the idea of spreading packets among the mobile nodes for transporting information toward the destinations. In order to achieve a good performance, it is necessary to control the workload of the network by limiting the number of copies. In this paper, a novel method for packet copying process is proposed which improves the throughput significantly while controlling the workload of the network. The key idea behind the proposed method is to prioritize the buffered packets at each node in order to avoid excessive repetitions of packets and stop wasteful workload grow. The packets are prioritized based on the source nodes, the ages, and their remaining lifetimes. Our simulation results indicate that the proposed method can improve packet delivery ratio by 40 to 60 percent in comparison with Spray and Binary Wait, and Direct delivery routing methods.

Keywords: Delay Tolerant Network (DTN), Routing, Prioritizing, Buffer, Delivery Ratio.

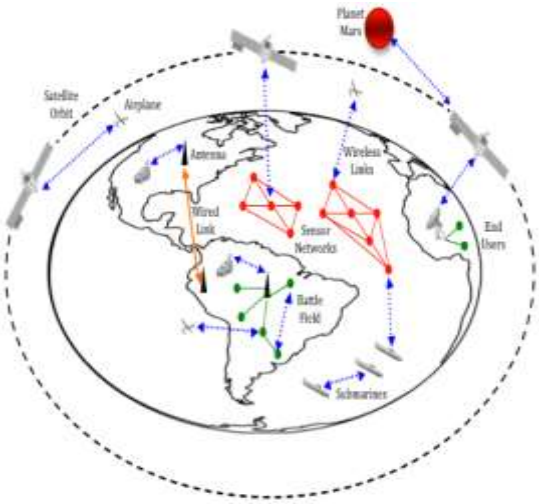
تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۲۰
تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۲۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۱۲
نام نویسنده مسئول: علیرضا کشاورزحداد
نشانی نویسنده مسئول: ایران - شیراز - میدان نمازی - بلوار زند - دانشکده مهندسی ۱ دانشگاه شیراز

۱- مقدمه

کاربردهای جدید باعث افزایش روزافزون تقاضا برای خدمات شبکه‌های سیار بی‌سیم شده است. پروتکل‌های موجود شبکه‌های کامپیوتری و مخابراتی تا حد زیادی در فراهم‌آوردن یک اتصال جهانی موفق بوده‌اند، اما با این وجود، امکان پشتیبانی از شبکه‌های متصل مقطعی[۱] را ندارند. این شبکه‌ها معمولاً در محیط‌های چالشی بنا می‌شوند و دارای ویژگی‌هایی نظیر چگالی پایین گره‌ها، برد رادیویی محدود، اتصالات ناپایدار و نامنظم هستند. به‌منظور برقراری ارتباطات در این شبکه‌ها یک ساختار جدید شبکه با نام شبکه‌های متحمل تأخیر[۲] (DTN) معرفی شده است. ازاین‌رو گاهی عبارت شبکه‌های متصل مقطعی و شبکه‌های متحمل تأخیر به‌جای هم به‌کار می‌روند. در واقع شبکه‌های متحمل تأخیر سازوکاری است که با تحمل‌پذیری تأخیر امکان برقراری ارتباطات را برای شبکه‌های متصل مقطعی فراهم می‌کند. ساختار DTN توسط کارگروه مهندسی اینترنت، گروه تحقیقات شبکه‌های متحمل تأخیر ارائه شده است [۱].

شبکه‌های متصل مقطعی شکل‌های مختلفی دارند که در سه دسته شبکه‌های بین سیاره‌ای، شبکه‌های حسگر بی‌سیم و شبکه‌های اقتضایی سیار طبقه‌بندی می‌شوند. برای مثال در دسته اول می‌توان به شبکه مخابراتی میان ماهواره‌ها و ایستگاه‌های زمینی که با تأخیرهای طولانی مواجهند اشاره نمود. شبکه‌های حسگری در مناطق آتش‌فشانی، زیرآب، دریاها و مناطق جنگلی که جهت جمع‌آوری اطلاعات مختلف از محیط به‌کار گرفته می‌شوند، متعلق به دسته دوم هستند [۲]. در دسته سوم، شبکه‌های اقتضایی سیار در نظر گرفته می‌شوند. قابلیت پیاده‌سازی و برچیدن سریع و آسان این شبکه‌ها مدیون عدم نیازشان به زیرساخت‌هایی نظیر ایستگاه مرکزی است. معمولاً گره‌های آن‌ها شامل سخت‌افزارهایی همانند GPS، تلفن‌های همراه، دستگاه‌های ردیابی و رایانه‌های همراه هستند که بر روی اجسامی که به‌طور پیوسته در حال حرکتند از نظیر وسایل نقلیه، حیوانات و حتی انسان نصب می‌شوند. ارتباطات در این‌گونه شبکه‌ها به‌دلایل مختلفی همچون خارج‌شدن گره‌ها از محدوده رادیویی یکدیگر، قرارگرفتن موانع میان آن‌ها و از بین رفتن و یا غیرقابل استفاده‌شدن یک گره، ممکن است به‌صورت متناوب دچار وقفه شود. مثال‌های یادشده نشانگر آن است که شبکه‌های متصل مقطعی طیف وسیعی از شبکه‌های کاربردی را در برمی‌گیرند. شکل ۱ نمونه‌هایی از شبکه‌های متحمل تأخیر را در کنار هم را نشان می‌دهد.

تا به امروز پژوهش‌های متنوعی در DTN جهت بررسی طراحی لایه کاربرد [۳]، طراحی لایه همگرایی [۴]، الگوریتم‌های مسیریابی [۵]، کنترل ازدحام [۶]، مکانیزیم کنترل جریان [۶] و امنیت [۷] انجام شده است. در این میان یکی از چالشی‌ترین مسائل در شبکه‌های متحمل تأخیر، مسئله مسیریابی بوده است؛ زیرا چگالی کم گره‌ها و تحرک زیاد آن‌ها موجب قطعی مکرر اتصالات گره‌ها از یکدیگر می‌شود. از این رو در بسیاری از مواقع در هنگام ارسال یک بسته داده، امکان ایجاد یک مسیر انتها به انتها بین مبدأ و مقصدها نیست. بنابراین این شبکه‌ها نیازمند پروتکل‌های مسیریابی مخصوص به خود هستند که با پذیرش تأخیرهای طولانی در انتقال بسته‌ها امکان تبادل اطلاعات را میان گره‌ها فراهم آورند.



شکل ۱: نمونه‌هایی از شبکه‌های متحمل تأخیر [۱]

در شبکه‌های متحمل تأخیر هر گره یک فضای مخصوص حافظه به نام "بافر" دارد که جهت ذخیره‌سازی بسته‌ها تا پیداکردن و پاس‌دادن بسته‌هایش به‌سمت گره بعدی یا گره مقصد از آن استفاده می‌کند. در واقع همه روش‌های مسیریابی شبکه‌های متحمل تأخیر الگوی مشابه ذخیره، حمل و ارسال را دنبال می‌کنند. بدان معنا که، اگر در زمانی خاص هیچ ارتباطی در دسترس نباشد، یک گره می‌تواند بسته را تا زمانی که با گره‌های مناسب دیگری برخورد کند، ذخیره و حمل نماید. در این زمان تمامی گره‌هایی که با آن‌ها روبرو می‌شوند می‌توانند کاندیداهایی برای جابه‌جاکردن بسته باشند. انتخاب گره بعدی و تصمیمات ارسال هر گره بر اساس روش مسیریابی تعیین می‌شود. در جدول ۱ به‌اختصار تفاوت‌های مسیریابی در شبکه اینترنت با مسیریابی در شبکه‌های متحمل تأخیر بیان‌شده است [۸].

در سال‌های اخیر روش‌های متنوعی نیز برای مسیریابی در DTN ارائه شده است که در بخش دوم مقاله به آن‌ها پرداخته خواهد شد. این روش ها با هدف ارتقا برون‌دهی شبکه، جهت انتخاب گره های جابه‌جاکننده بسته‌ها از ایده‌ها و ابزارهای مختلفی استفاده نموده‌اند. برخی دیگر با تبادل پیام‌های کنترلی، سعی در برقراری عدالت میان گره‌ها جهت خدمت‌دهی (ارسال و دریافت بسته‌ها) داشته‌اند. الگوریتم‌های مختلفی نیز با پخش‌کردن کپی‌های بسته‌ها در شبکه در پی افزایش احتمال رسیدن آن‌ها به مقصدهایشان بوده‌اند. البته همه این روش‌ها می بایست جهت جلوگیری از سرریز بافر گره‌ها، تعداد کپی های هر بسته را در سطح شبکه به شیوه‌های مختلفی محدود نمایند. درواقع مدیریت بسته‌های بافرشده در گره ها جهت کپی‌کردن و یا دورریختن، یکی از مهم‌ترین اقدامات در روش های مسیریابی DTN است که تاثیر زیادی روی عملکرد شبکه خواهد داشت.

در این مقاله روشی جدید و هوشمندانه در فرآیند کپی‌کردن بسته‌ها در DTN ارائه شده‌است که بهبود قابل‌توجهی در برون‌دهی شبکه ایجاد می‌کند. ایده روش پیشنهادی، اولویت‌بندی بسته‌های بافرشده در سه دسته اولویت بر مبنای گره‌های مبدأ، سن بسته‌ها و باقیمانده عمر مفید آن‌ها می‌باشد. در این اولویت‌بندی، هر گره بالاترین اولویت را به بسته‌های پیامی می‌دهد که خودش تولید کرده است. سپس بسته‌هایی که در حال طی عمر مفیدشان هستند از سن زیاد به کم اولویت‌بندی می‌شوند. نهایتا بسته‌هایی که عمر مفیدشان به اتمام رسیده در انتهای لیست قرار گرفته و به‌ترتیب صعودی سنشان در بافر چیده می‌شوند. با این روش اولویت‌بندی، علاوه‌بر اینکه از کپی‌های بی‌رویه تا حد زیادی جلوگیری شده و درنتیجه برون‌دهی شبکه افزایش می‌یابد، مصرف انرژی گره‌ها نیز کاهش خواهد یافت. نتایج شبیه‌سازی‌های این مقاله نشان می دهد که روش پیشنهادی می‌تواند نسبت تحویل بسته‌ها را در مقایسه با روش‌های مرتبط، موسوم به روش افشان و صبر باینری و روش تحویل مستقیم به میزان ۴۰ تا ۶۰ درصد بهبود دهد.

نوآوری‌های مقاله را می‌توان به‌صورت دسته‌بندی نمود:

۱) پرداختن به موضوع مدیریت بسته‌های بافرشده در هر گره با تعریف سه دسته اولویت، به‌عنوان یکی از عوامل موثر در عملکرد شبکه‌های DTN

۲) ارائه روشی جدید با الگوریتم توزیع‌شده[۳] جهت اولویت‌بندی بسته‌ها با توجه به عمر مفید بسته‌ها در شبکه های DTN

۳) ارائه روشی متمم جهت بهبود بیشتر عملکرد شبکه با در نظر گرفتن مسیر حرکتی گره‌ها در یک بازه زمانی آتی

۴) انجام شبیه‌سازی‌های مفصل جهت نشان‌دادن عملکرد مطلوب روش‌های پیشنهای در مقایسه با روش‌های مرسوم در شرایط مختلف تغییر بار ترافیکی، اندازه بافر، چگالی گره‌ها، و غیره

در ادامه این نوشتار، پس از مرور کارهای پیشین در بخش دوم، به‌تشریح مدل سیستم و فرآیندها در بخش سوم پرداخته می‌شود. پس از آن در بخش چهارم روش پیشنهادی مقاله تبیین می‌شود. در بخش پنجم تحلیل نتایج شبیه‌سازی ارائه خواهد شد و درنهایت در بخش ششم به نتایج حاصل از مقاله پرداخته خواهد شد.

۲- مرور کارهای پیشین

اکثر پروتکل‌های موجود مسیریابی شبکه‌های متحمل تأخیر در سه دسته کلی مسیریابی بر اساس *معبر*[۴] بسته، مسیریابی بر اساس *فرصت*[۵] و مسیریابی بر اساس *پیش‌بینی* قابل دسته‌بندی هستند.

در دسته اول، از تعدادی گره متحرک اضافی به‌عنوان معبر جهت رساندن بسته‌ها استفاده می‌شود که کنترل مسیر این معبرها باعث بهبود عملکرد رساندن بسته با روش ذخیره و حمل می‌شود اما از طرفی منجر به ایجاد هزینه و سربار اضافه خواهد شد.

در روش‌های مسیریابی بر اساس فرصت، گره‌های متحرک به‌صورت تصادفی بسته را به‌امید رسیدن احتمالی بسته، هاپ به هاپ ارسال می کنند و طبیعتا هیچ تضمینی برای رسیدن بسته وجود ندارد. در این روش‌ها جهت افزایش شانس رسیدن بسته، چندین کپی از هر بسته در شبکه جاری می‌شود. مسیریابی بر اساس پیش‌بینی به این‌صورت انجام می‌شود که با توجه به تاریخچه مشاهدات، پارامترهای مربوط به رسیدن موفق بسته نظیر احتمال رسیدن و تأخیر مورد انتظار تخمین زده می شوند و بر اساس آن‌ها گره بعدی تعیین می‌گردد [۸].

جدول ۱: تفاوت‌های مسیریابی در شبکه‌های متحمل تأخیر

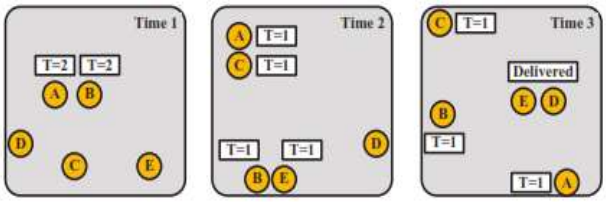
ویژگی‌ها	پروتکل اینترنت	شبکه‌های متحمل تأخیر
اتصال انتها به انتها	هم‌زمان	متناوب-متصل
تأخیر رسیدن	کوتاه	زیاد
قابلیت اطمینان	زیاد	کم
رفتار مسیریابی	منظم	نامنظم

یک روش سنتی جهت مسیریابی در شبکه‌های متحمل تأخیر روش *تحویل مستقیم*[۶] (DD) است. این روش، یک روش تک کپی است که در آن گره منبع تا زمان قرارگیری در مجاورت مقصد، بسته را در بافرش نگه می‌دارد. روش تحویل مستقیم نیاز به هیچ دانشی از شبکه ندارد؛ بدین معنا که رفتار مسیریابی ساده است و بسته بدون وجود گره میانی و بدون کپی‌شدن در شبکه به سمت مقصد فرستاده می‌شود [۹]. این روش تأخیر طولانی و قابلیت اطمینان بسیار پایینی نسبت به سایر روش‌ها دارد؛ زیرا ممکن است مبدأ و مقصد در مدت طول عمر بسته یکدیگر را نبینند یا با تأخیر خیلی زیادی رویارویی دو گره و ارسال بسته اتفاق بیفتد. اما از طرفی هم به‌دلیل عدم کپی‌کردن بسته‌ها، معمولاً مسئله سرریز بافر گره‌ها نیز به‌وجود نمی‌آید.

در روش دیگری تحت عنوان *راله کردن دو هاپی*[۷]، گره منبع بسته تولیدشده را به تعداد T گره دیگر می‌فرستد و سپس آن گره‌ها در صورت دیدن مقصد، بسته را به آن ارسال می‌کنند. در این روش ممکن است بسته بیش از یک‌بار به مقصد انتقال یابد [۹]. این روش با محدودکردن تعداد هاپ طی‌شده توسط بسته به دو هاپ، به‌نوعی تعداد کپی‌های بسته را نیز محدود کرده و در استفاده از بافر صرفه‌جویی می‌کند. البته همین محدودیت در تعداد هاپ در برخی سناریوها باعث کاهش نسبت تحویل بسته‌ها و افزایش تاخیر می‌شود.

روش دیگر مسیریابی، *ارسال همه‌گیری*[۸] است. در این روش، هدف، تولید کپی‌های تا حد امکان زیاد از بسته‌ها جهت افزایش احتمال رسیدن آن‌ها می‌باشد؛ بدین‌ترتیب که هر گره در مواجهه با گره‌های دیگر یک کپی از بسته خود را به آن‌ها می‌دهد. این روش از مکانیزم معمول اول ورود-اول خروج[۹] (FIFO) جهت مدیریت بافر استفاده می‌کند؛ درواقع برای هر گره، هر بسته‌ای که زودتر وارد بافر شود، در اولویت خارج‌شدن قرار می‌گیرد [۱۰]. روش همه‌گیری نسبت به روش تحویل مستقیم و روش دوهاپی بسته‌ها را بهتر در شبکه پخش می‌کند اما به‌دلیل کپی-کردن بی‌رویه بسته‌ها باعث پرشدن سریع بافر گره‌ها می‌شود و درنتیجه با بالارفتن بار ترافیکی عملکرد آن به‌شدت افت می‌کند. روشی دیگر،

افشان و صبر[۱۰] (SaW) [۱۱] است که سعی دارد سرعت انتشار روش همه‌گیری و نیز سادگی روش تحویل مستقیم را ترکیب کند. در این روش گره منبع یک کپی از T کپی بسته را جهت فرآیند تحویل مستقیم نزد خود نگه می‌دارد و بقیه را به گره‌های مختلف ارسال می‌کند. همچنین در روش ارتقاءیافته افشان و صبر باینری (binary SaW) جهت بهبود سرعت انتشار، گره منبع در هر مرحله تعداد کپی‌های خود (در ابتدا T کپی دارد) را با گره رله نصف می‌کند و گره‌های رله نیز مانند گره منبع عمل می‌کنند و در هر مرحله کپی‌هایشان را نصف می‌کنند [۱۱]. شیوه کار این روش مسیریابی به‌طور خلاصه در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲: کپی‌کردن بسته‌ها در روش binary SaW [۱۱]

در ادامه به تشریح ایده‌های مقالاتی پرداخته می‌شود که از فرض‌ها و روش‌های متفاوتی جهت بهبود عملکرد شبکه‌های متحمل خطا و برقراری عدالت میان گره‌ها استفاده می‌کنند. در [۱۲]، شبکه متحمل تأخیری فرض‌شده که در آن، تعدادی گره متحرک در شبکه وظیفه جمع‌آوری بسته‌ها با روش جست‌وجوی آن‌ها از مبدأها را بر عهده دارند و سپس این گره‌ها بسته‌ها را به مقصد تحویل می‌دهند. در مقاله [۱۳] یک مدل بهینه‌سازی جهت تعیین سیاست رساندن بسته برای هر گره متحرک به‌صورت منحصربه‌فرد و نیز یک مدل مشارکت به‌نام بازی تشکیل ائتلاف تکرارشونده جهت بررسی استراتژی‌های مشارکت چند گره متحرک ارائه شده است. مدل بهینه‌سازی تشکیل‌شده، از یک مدل بر اساس فرآیند تصمیم‌سازی مارکوف مقید و مدل مشارکت بر اساس نظریه بازی‌ها استفاده می‌کند. در [۱۴]، جهت مدیریت رفتار خودخواهانه گره‌ها در مشارکت در فرآیند ارسال، روشی موسوم به ICRP مبتنی بر روش رله‌کردن دو هاپی کار شده است. نویسندگان برای تعیین یک حد آستانه جهت تعیین تعداد گره‌ای که هر گره منبع باید بسته خود را به آن‌ها ارسال کند، از قانون توقف دنباله‌ای بهینه استفاده کرده‌اند. همچنین جهت انتخاب گره‌های میانی از الگوریتم حراج VCG، از نظریه بازی‌ها استفاده شده است. چنین روش‌هایی نسبت به روش‌های ساده‌تر دقیق‌ترند و بهتر عمل می‌کنند اما به‌دلیل پیچیدگی پردازش‌ها و تبادل اطلاعات زیاد میان گره‌ها، مصرف باتری را به‌شدت افزایش می دهند؛ بنابراین برای سناریوهایی که با محدودیت‌های جدی در مصرف انرژی مواجهیم مناسب نیستند.

در [۱۵]، نویسندگان به طبقه‌بندی روش‌های مسیریابی برای شبکه‌های متحمل تأخیر وسایل نقلیه موسوم به VDTN[۱۱] پرداخته‌اند. همچنین در [۱۶] روشی مسیریابی بر اساس سرعت وسایل نقلیه ارائه شده است. در [۱۷]، روشی جهت مشارکت عادلانه گره‌ها در مسیریابی با استفاده از جدولی به‌نام جدول دریافت و ارسال ارائه شده است. در این جدول تعداد تلاش‌هایی (اعم از رله‌کردن و یا رساندن به مقصد) که دوبه‌دوی گره‌ها برای رساندن بسته‌های یکدیگر انجام داده‌اند، درج می شود. اطلاعات تعداد تلاش گره‌ها با تبادل بسته‌های کنترلی بین آن‌ها به‌روزرسانی می‌شود. بدین ترتیب هر زوج گره در تلاشند که به یک‌میزان به یکدیگر برای رساندن بسته‌هایشان به مقصد یاری کنند.

در [۱۸] نیز، روشی انگیزشی برای مشارکت گره‌ها بر اساس مصرف انرژی بیان شده است. این روش، مشارکت گره‌ها را بر اساس میزان انرژی مصرفی برای ارسال بسته‌ها می‌سنجد. گره‌ای که بسته‌های بیشتری به بقیه گره‌ها می‌فرستد مشارکت بیشتری در کل شبکه داشته و درنتیجه خدمات بیشتری برای ارسال بسته‌هایش از شبکه دریافت خواهد کرد. بدین ترتیب رویه‌ای عادلانه بین گره‌های مختلف شبکه شکل می‌گیرد. توجه داشته باشید که دو روش اخیر میزان عدم مشارکت گره‌ها در فرآیند رساندن پیام‌های شبکه را کاهش می‌دهند اما از طرفی حجم بالای پیام‌های کنترلی جهت تبادل اطلاعات مربوط به تعداد ارسال و دریافت گره‌ها به‌یکدیگر مصرف ترافیک شبکه و نیز مصرف بیشتر باتری را به‌دنبال خواهد داشت.

در [۱۹]، نویسندگان به ارائه روشی برای کنترل تعداد کپی‌ها در فرآیند مسیریابی پرداخته‌اند. آن‌ها سناریویی در نظر گرفته‌اند که در آن یک ایستگاه مرکزی به ارتباطات در شبکه کمک می‌کند. آن‌ها تعدادی گره رله‌کننده به‌نام گره‌های مجاور در شبکه پخش کرده‌اند که این گره‌ها به آن دسته از گره‌هایی که تحت پوشش ایستگاه مرکزی نیستند کمک می‌کنند تا بسته‌هایشان را با ایستگاه مرکزی مخابره کنند. الگوریتم ارائه‌شده برای کنترل تعداد تکرارهای یک بسته بدین‌صورت است که وقتی یک گره منبع بسته جدیدی تولید می‌کند ابتدا فاصله‌اش را تا همه ایستگاه‌های مرکزی محاسبه می‌کند. سپس کوتاه‌ترین فاصله در نظر گرفته می‌شود و بر اساس آن، عددی جهت حداکثر تعداد کپی تعیین می‌شود. این روش برای سناریوهای دارای ایستگاه مرکزی و گره‌های مجهز به GPS قابل‌استفاده است. در [۲۰]، یک روش مسیریابی با در نظرگیری حد آستانه پویا ارائه شده است که درواقع الگوریتم پیشنهادی روی روش مسیریابی همه‌گیری اعمال می‌شود؛ بدین ترتیب که به‌منظور کنترل بار شبکه و نیز با توجه به محدودیت حافظه گره‌ها، تعداد کپی بسته‌ها در شبکه با در نظرگیری حد آستانه به‌صورت پویا محدود می شود. محاسبه حد آستانه بر اساس اطلاعات به‌دست‌آمده از شبکه بوده و یک مصالحه بین رسیدن مطمئن بسته و میزان بار شبکه وجود خواهد داشت. این روش نسبت به روش همه‌گیری و نیز نسبت به روش حدآستانه سنتی که مقدار آستانه آن ثابت است، عملکرد بهتری از خود نشان می دهد.

در [۲۱]، نویسندگان از ایده پیش‌بینی برخورد گره‌های متحرک استفاده کرده‌اند. روش‌های قبلی در این دسته ناپایدار بوده و از هیچ اطلاعات مسیریابی استفاده نمی‌کنند؛ لذا در این مقاله یک روش جایگزین برای پیش‌بینی برخورد گره‌ها ارائه شده است. این روش که براساس استخراج تناوب در شبکه می‌باشد، برخوردهای متناوب پایدار را

پیدا می‌کند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند الگوهای برخورد را در مسیرهای واقعی جابه‌جایی به‌خوبی کشف و استخراج نماید. اما این روش چون بر اساس یک الگوریتم مرکزی عمل می‌کند در کاربردهایی که هزاران گره متحرک وجود دارد، عملی نیست. در [۲۲]، یک راه‌حل برای موضوع عدم مقیاس‌پذیری در [۲۱] پیشنهاد شده است؛ بدین ترتیب که فرآیند کشف و استخراج تناوب، برای هر گره کپی شود که باید قدرت پردازش گره‌ها نیز بالاتر باشد.

در [۲۳] نویسندگان با کنار گذاشتن فرض بی‌نهایت‌بودن اندازه بافر گره‌ها به مدیریت بافر پرداخته‌اند؛ بدین ترتیب که در صورت ورود بسته جدید و پربودن بافر گره، قدیمی‌ترین بسته در بافر حذف شده و جای خود را به بسته ورودی می‌دهد. همچنین در [۲۴] که نویسندگان سعی در بهبود روش SaW [۱۱] دارند، با در نظرگیری محدودیت بافر، روشی برای حذف بسته‌ها از بافر پر ارائه داده‌اند؛ بدین ترتیب که با توجه به روش SaW، هر بسته دارای سقفی برای تعداد کپی است. بسته با کمترین تعداد کپی باقی‌مانده از بافر حذف خواهد شد. در صورت برابر-بودن این پارامتر برای دو بسته، آن بسته‌ای که اندازه بزرگتری دارد را حذف می‌نماید. در [۲۵] نویسندگان با در نظر گرفتن محدودیت بافر، قدیمی‌ترین بسته را برای حذف از بافر سرریزشده انتخاب می‌کنند. همچنین در [۲۶] معیاری برای حذف بسته‌ها از بافر سرریزشده بر اساس پارامترهایی چون تعداد کل گره‌های شبکه، مقدار زمان باقی‌مانده تا منقضی‌شدن بسته، تعداد گره‌هایی که بسته مذکور را در بافر خود دارند، تعداد کپی‌ها از بسته در گره فعلی و نیز تناوب دیدار دو گره در حال تبادل بسته تعریف شده است. توجه شود که برخی پارامترهای یادشده منوط به داشتن دانش عمومی از شبکه می‌باشد. در [۲۷] نویسندگان بر اساس اندازه بسته‌ها استراتژی حذف بسته از بافر را طراحی کرده‌اند. در صورت رسیدن بسته جدید و پربودن بافر، این روش به دنبال بسته‌ای با اندازه برابر با بسته ورودی در بافر خواهد بود که در صورت وجود، آن را حذف و بسته جدید دریافت می‌کند. در غیر این صورت، اولین بسته با اندازه بزرگتر از بسته ورودی از بافر حذف خواهد شد.

در آخر ذکر این نکته ضروری است که به‌دلیل عدم وجود چارچوب یکسان برای تعریف مدل‌های شبکه‌های DTN، آنالیز تحرک و عملکرد شبکه، مقایسه روش‌های مسیریابی شبکه‌های متحمل تأخیر با یکدیگر در بسیاری موارد امکان‌پذیر نیست. لذا در هر مطالعه با توجه به کاربردی که محققان دنبال می‌کنند، مدل شبکه و مدل تحرک به‌خصوصی انتخاب شده است. ازاین‌رو ارائه‌دهندگان پروتکل‌های مسیریابی معمولاً روش‌های پیشنهادی خود را با پروتکل‌های پایه مقایسه می‌کنند [۲۸]. در این مقاله نیز با پیش‌گرفتن همین رویه، روش پیشنهادی با روش‌های پایه مرتبط که در اوایل این بخش توضیح داده شده، مقایسه خواهد شد.

۳- مدل سیستم

در این مقاله یک شبکه سیار بی‌سیم در نظر گرفته شده است که گره‌های آن در یک منطقه به‌طور تصادفی پراکنده شده و دائماً در حرکت هستند. هر گره به‌صورت تصادفی و مستقل از سایر گره‌ها حرکت می‌کند. در این شبکه فرض شده است که رویدادها به‌صورت گسسته، در بازه‌های زمانی معینی اتفاق می‌افتند؛ بدین ترتیب که مجموعه‌ای از رویدادها جهت ارتباطات میان گره‌ها در یک بازه زمانی رخ می‌دهند، پس از اتمام بازه و در بازه زمانی بعدی که در آن گره‌ها مقداری جابه‌جا شده‌اند، رویدادها از سر گرفته می‌شود. هیچ ایستگاه مرکزی برای مدیریت ارتباط بین گره‌ها وجود ندارد و هر گره به‌تنهایی درباره عملکرد خود تصمیم می‌گیرد.

روش در پیش گرفته‌شده برای مسیریابی، از نوع روش‌های مسیریابی چند هاپی و مسیریابی مبتنی بر فرصت است. از آن‌جا که در شبکه‌های متحمل تأخیر لزوماً مسیر ارتباطی آماده‌ای میان مبدأ و مقصد در هرلحظه مهیا نیست، گره‌ها می‌بایست تا زمانی که فرصتی برای ارسال بسته به هاپ بعدی فراهم شود، بسته‌ها را در بافر خود نگه‌دارند. لذا هر گره دارای فضای بافری جهت ذخیره‌سازی بسته‌ها بوده و از روش‌های کپی‌های چندتایی[۱۲] جهت انتقال اطلاعات استفاده می‌کند.

بسته‌ها به‌مرورزمان و به‌صورت تصادفی در شبکه توسط یک گره تولید و برای گره دیگری ارسال می‌شود. هر بسته در لحظه‌ای متولد می‌شود و پس از سپری‌کردن تعداد مشخصی بازه زمانی می‌میرد و به یک‌باره از شبکه محو می‌شود. هدف این است که در مدت زنده‌بودن بسته (و کپی‌های آن)، اطلاعاتش به مقصد برسد. تعداد بازه‌های زمانی که هر بسته فرصت زندگی دارد، مقداری از پیش تعیین‌شده است که TTL[۱۳] نامیده می‌شود.

ازآنجاکه ارسال و دریافت هم‌زمان اطلاعات برای گره‌های بی‌سیم میسر نیست، در هر بازه زمانی یک گره می‌تواند دریکی از دو وضعیت فرستندگی یا گیرندگی باشد. در هر بازه زمانی هر گره یکی از استراتژی‌های فرستندگی و گیرندگی را به‌صورت تصادفی انتخاب می‌کند. جهت جلوگیری از ارسال‌های بی‌هدف، هر فرستنده با ارسال پیامی به همسایه‌ها بسته موجود در بافر خود را قبل از ارسال معرفی می‌کند؛ این اطلاعات شامل نام گره مقصد و TTL بسته می‌باشد. اگر به‌طور اتفاقی مقصد بسته در میان همسایه‌ها باشد انتقال آن پیام در همان بازه زمانی انجام می‌شود. سپس گره فرستنده که تعدادی بسته به مقصدهای مختلف در بافر خود دارد، طی فرآیندی به یکی از بسته‌ها اولویت ارسال‌شدن می‌دهد و با انتشار پیامی آن را برای شبکه تبلیغ می‌کند. هر گره گیرنده از بین درخواست‌های ارسال فرستنده‌های اطرافش، یکی از آن‌ها را انتخاب می‌کند و برای او پیام قبول درخواست ارسال را می‌فرستد. سپس بسته از طرف فرستنده برای او ارسال می‌شود. ممکن است در هنگام ارسال بسته چند گیرنده دیگر نیز علاقه‌مند به دریافت آن بسته باشند و آن را دریافت کنند. این موضوع سبب می‌شود که تعداد کپی‌های بسته در سطح شبکه افزایش یابد. با پیش‌گرفتن روند یادشده، کپی‌های بسته در بافر گره‌های مختلف قرار می‌گیرند تا با جابه‌جایی گره‌های شبکه و ایجاد فرصت برخورد گره‌های مختلف با یکدیگر، فرصتی برای دیدار با مقصدهای نهایی و تحویل بسته‌ها فراهم شود.

در این مقاله از جهت مدل‌سازی مصرف انرژی در شبکه، از مدل انرژی مرتبه اول رادیویی[۱۴] استفاده شده است [۲۹]. این مدل، مصرف انرژی را برای ارسال و دریافت بسته‌ها با در نظرگرفتن یک مدل ساده‌شده از تضعیف کانال محاسبه می‌کند که در شکل ۳ نمایش داده شده است.

مدل رادیویی مرتبه اول ارسال بسته k بیتی به گیرنده‌ای که در فاصله d از فرستنده واقع شده است را به‌صورت رابطه (۱) مدل می‌کند.

$$E_{Tx}(k,d) = E_{Tx\text{-}elec}(k) + E_{Tx\text{-}amp}(k,d) \quad (۱)$$

که در آن $E_{Tx\text{-}elec}(k)$ انرژی مصرفی جهت پردازش k بیت و $E_{Tx\text{-}amp}(k,d)$ انرژی جهت تقویت‌کنندگی برای رسیدن به SNR مطلوب می‌باشد. با در نظر گرفتن یک مدل ساده برای مدارات الکتریکی و تضعیف کانال، مقدار انرژی مصرفی، به‌صورت رابطه (۲) قابل‌محاسبه خواهد بود.

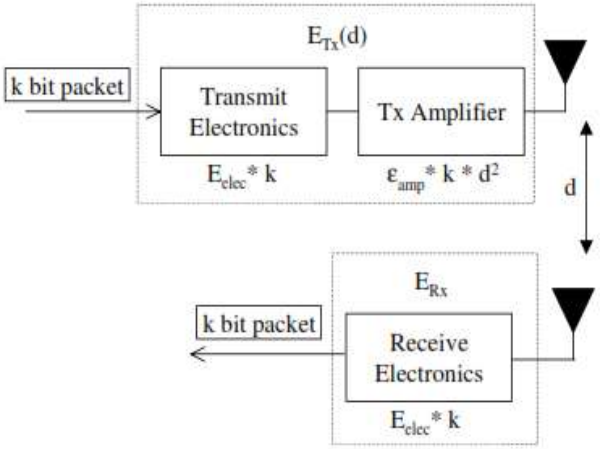
$$E_{Tx}(k,d) = E_{elec} * k + E_{amp} * k * d^2 \quad (۲)$$

که برای یک فرستنده، E_{elec} برابر ۵۰ نانو ژول بر بیت و E_{amp} برابر ۱۰۰ پیکو ژول بر بیت بر مترمربع در نظر گرفته می‌شود.

همچنین برای دریافت و پردازش k بیت در گیرنده، مصرف انرژی به‌صورت رابطه (۳) مدل می‌شود.

$$E_{Rx}(k) = E_{elec} * k \quad (۳)$$

که در آن مشابه حالت قبل E_{elec} برابر ۵۰ نانو ژول بر بیت است.



شکل ۳: مدل رادیویی مرتبه اول [۲۹]

۴- روش پیشنهادی

در این بخش، روش پیشنهادی این مقاله با نام MCBF (Multi Copy Buffer Priority) جهت مسیریابی در شبکه‌های متحمل تأخیر ارائه می شود. قبل از تشریح روش، لازم است به‌طور مختصر ایده اصلی آن را شرح داده شود.

نتایج شبیه‌سازی‌های این مقاله روی شبکه متحمل تأخیر نشان می‌دهد که عملکرد شبکه به‌طور پیچیده‌ای وابسته به عوامل مختلفی می‌باشد؛ به‌طوری‌که تغییر هر پارامتر، عملکرد کلی شبکه را برحسب معیارهای مختلف دست‌خوش تغییر می‌کند. پارامترهایی چون لود ترافیکی، چگالی گره‌ها، اندازه بافر هر گره و TTL تأثیر به‌سزایی بر عملکرد شبکه دارند. ایده اصلی روش پیشنهادی مقاله با بررسی عوامل تأثیرگذار در عملکرد شبکه و نتایج استخراج‌شده از شبیه‌سازی‌های مفصل به‌دست آمده است.

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌داد که جهت داشتن عملکرد بهتر باید از بافر گره‌ها به‌گونه‌ای هوشمندانه و مناسب استفاده شود. بدین ترتیب که برخلاف رویه روش‌های پیشین، نباید صرفاً به‌دنبال افزایش کپی‌های بسته در شبکه بود؛ زیرا با بالارفتن بار شبکه، کپی‌های بیهوده باعث پرشدن سریع بافر گره‌ها می‌شود و در پی آن، گره‌ها برای ادامه فعالیت در شبکه ناچار به دورریختن بسته‌ها از بافر خود خواهند شد. کنترل تعداد کپی از هر بسته، تا حدی اوضاع را نسبت به حالت کپی‌کردن بی‌رویه بسته‌ها بهتر می‌کند اما موقعیتی را فرض کنید که در زمانی خاص در ناحیه خاصی از شبکه تعداد بسته‌های تولیدی بالا برود. در این شرایط حتی محدودکردن تعداد کپی‌ها کمک زیادی نمی‌کند؛ زیرا همچنان این احتمال وجود دارد که به‌دلیل حجم بالای بسته‌های تولیدی و کپی‌شدن پی‌درپی هرکدام تا رسیدن به تعداد کپی مدنظر از هر بسته، به‌سرعت بافر گره‌ها پر شود و درنتیجه قبل از رسیدن به تعداد کپی قابل‌قبول از یک بسته و حتی شاید در زمانی کوتاه پس تولد بسته، شاهد دورریختن آن از شبکه باشیم.

مطالب فوق بیانگر آنست که می‌بایست در عملیات کپی‌کردن تجدیدنظر اساسی صورت گیرد. در این فرآیند باید از تولید کپی‌های اضافه و بلااستفاده از بسته‌ها پرهیز شود تا از فضای بافر موجود به‌صورت مناسب‌تری استفاده شود. پیش‌گرفتن چنین رویه‌ای مانع از پرشدن سریع بافر گره‌ها و همچنین به‌دنبال آن مانع از دور ریختن بدون برنامه بسته‌ها خواهد شد.

۴-۱- باز چینش بسته‌ها در بافر

ایده روش پیشنهادی این است که قبل از کپی‌کردن بسته‌ها، چینش مناسبی روی آن‌ها در بافر انجام شود. چینش بافر گره دائماً و در هر بازه زمانی بر اساس الگوریتم اولویت‌بندی بسته‌ها در حال تغییر و به‌روزرسانی خواهد بود. این مسئله به هر گره یادآور می‌شود که در طول زمان، در صورت ایجاد موقعیت ارسال، ارسال‌کردن کدام بسته را در اولویت قرار دهد. از طرف دیگر در صورت پرشدن بافر گره، مشخص می‌کند احتمالاً با دورریختن کدام بسته عملکرد شبکه کمتر لطمه خواهد دید.

قبل از پرداختن به نحوه اولویت‌بندی بسته‌ها لازم است به مفهومی تحت عنوان "عمر مفید بسته" پرداخته شود. عمر مفید بسته به سنی گفته می‌شود که با رسیدن به آن، بسته به‌اندازه کافی در شبکه دیده شده و کپی شده باشد و به احتمال زیاد یکی از کپی‌های بسته قبل از خود بسته به مقصد رسیده باشد؛ به‌عبارت دیگر طول عمر مفید بسته سنی است که پس از گذر (تا رسیدن به سن TTL)، تبادل آن بسته در شبکه به احتمال زیاد تاثیری در عملکرد کلی شبکه ندارد. توجه داشته باشید که عمر مفید بسته به عوامل و پارامترهایی نظیر الگوی تحرک گره‌ها، ابعاد شبکه، و اندازه بافر گره‌ها وابسته می‌باشد.

در فرآیند اولویت‌بندی بسته‌های داخل بافر سه دسته اولویت تعریف می‌شود. اولویت دسته اول به بسته تولیدشده توسط خود گره داده می‌شود؛ به‌عبارت دیگر، مهم‌ترین هدف هر گره حمل بسته‌های خودش به سمت مقصدها است.

اولویت دسته دوم به بسته‌هایی داده می‌شود که در طول دوره عمر مفیدشان هستند. در میان این بسته ها آن‌هایی که سن بیش‌تری دارند اولویت بالاتری نیز خواهند داشت.

اولویت سوم و آخر به بسته‌هایی داده می‌شود که عمر مفید آن‌ها در شبکه سپری شده باشد. در این دسته اولویت بالاتر به بسته‌هایی با سن کمتر داده می‌شود چراکه پس از گذر از عمر مفید، بسته به احتمال خوبی کپی شده است و هرچه سنش بالاتر باشد این احتمال قوی‌تر خواهد بود.

برای مثال فرض کنید در یک شبکه مقدار TTL برابر ۲۰ و عمر مفید بسته‌ها ۱۵ باشد. همچنین فرض کنید سن بسته‌های بافرشده در گره i ام مطابق ستون سوم جدول ۲ باشد.

حال چینش بافر گره i ام به‌صورت جدول ۲ خواهد بود. اولویت اول به بسته‌ای که تولیدی گره i ام است داده می‌شود فارغ از اینکه سن آن بسته چقدر باشد. اولویت دوم تا پنجم به بسته‌هایی که در بازه عمر مفیدشان قرار دارند داده شده است. این بسته‌ها به‌ترتیب از سن بیشتر به سن کمتر چیده شده‌اند و در نهایت اولویت ششم و هفتم به آن دسته از بسته‌ها داده شده است که عمر مفیدشان در شبکه سپری شده است که هر چه از بازه عمر مفید فاصله بیش‌تری گرفته باشند در اولویت پایین‌تری خواهند بود.

جدول ۲: مثالی از چینش بسته‌ها در بافر گره مفروض i

اولویت بسته در بافر	مبدأ بسته	سن بسته
۱	گره i ام	۵ بازه زمانی
۲	هر گره‌ای جز i	۱۴ بازه زمانی
۳	هر گره‌ای جز i	۱۰ بازه زمانی
۴	هر گره‌ای جز i	۷ بازه زمانی
۵	هر گره‌ای جز i	۵ بازه زمانی
۶	هر گره‌ای جز i	۱۶ بازه زمانی
۷	هر گره‌ای جز i	۱۹ بازه زمانی

ازآنجاکه در شبکه‌های متحمل تأخیر گره‌ها برای مشارکت در ارسال بسته‌ها، انرژی و فضای حافظه مصرف می‌کنند، طبیعی است که هر گره، ارسال بسته خود را در اولویت قرار دهد. همچنین به بسته‌ای که دارای سن بیشتری است، اولویت بالاتری داده می‌شود؛ زیرا می‌بایست با سرعت بیش‌تری در شبکه کپی شود تا کپی‌های آن، زمان باقی‌مانده مناسبی در شبکه داشته باشند و بتوانند با دست‌به‌دست شدن بین گره‌ها به مقصد برسند. این روند باعث می‌شود که بسته‌ها با احتمال بیشتری مقصدشان را ملاقات کنند. از طرفی هر بسته با عبور از سن خاصی (عبور از بازه عمر مفید بسته) تعداد کپی‌های کافی در شبکه دارد و در این مرحله باید به بسته‌های جوان‌تر فرصت کپی‌شدن داده شود تا آن‌ها نیز تعداد کپی‌های مناسبی در شبکه بسازند و کپی‌هایشان زمان مناسبی برای یافتن مقصد داشته باشند. بنابراین فرآیند کپی‌کردن بسته‌ها با روش پیش‌گرفته برای اولویت‌بندی فضای بافر می‌تواند کمک شایان توجهی به بهبود عملکرد شبکه نمایند.

روش مسیریابی MCBF شامل چهار گام است:

- گام اول: معرفی بسته‌های موجود

در این گام هر گره با انتشار پیامی خود و بسته‌های داده درون بافرش و نیز مقصد هر بسته را معرفی می‌کند.

- گام دوم: تحویل بسته‌ها به مقصدهای مجاور

اگر برحسب اتفاق مقصد برخی بسته‌ها در مجاورت هر گره باشد، این بسته‌ها به مقصدشان ارسال شده و از بافر حذف می‌شوند.

- گام سوم: تبلیغ بسته‌ها جهت کپی‌کردن

در این گام گره‌های ارسال‌کننده به معرفی بسته با بالاترین اولویت در بافرشان می‌پردازند.

- گام چهارم: قبول درخواست کپی و کپی‌شدن بسته‌ها

در این گام گره‌های گیرنده از میان درخواست‌های کپی بسته از سوی گره‌های فرستنده مجاور، یکی را به‌تصادف انتخاب می‌کنند. در صورت پربودن بافر گره گیرنده، بسته با پایین‌ترین اولویت از بافر گیرنده حذف خواهد شد. گره‌های فرستنده به هر گره‌ای که درخواستشان را قبول کرده، یک کپی از بسته را ارسال می‌کنند. پس از ارسال، درصورتی که گره فرستنده، منبع بسته ارسالی نباشد، آن را از بافرش حذف می کند. البته در صورتی که این بسته توسط چند گره گیرنده دریافت شود تعداد کپی‌هایش در شبکه افزایش خواهد یافت. فلوچارت الگوریتم MCBP در شکل ۴ نمایش داده شده است.

۴-۲- روش متمم MCBP

این روش، موسوم به MCBP-LB (MCBP-Location Based) بهبودیافته روش MCBP می‌باشد. بدین ترتیب که جهت کپی‌کردن مناسب‌تر بسته‌ها، گیرنده‌ها به‌جای انتخاب تصادفی فرستنده‌ها در گام چهارم روش MCBP، با نگاهی به آینده به قبول بسته‌های دریافتی خواهند پرداخت.

در واقع هر گیرنده مفروض، از بین درخواست‌های دریافتی از سوی فرستنده‌ها، به مکانی که هر فرستنده قصد رفتن به آنجا را در بازه زمانی بعدی دارد توجه می‌کند. اگر گره درخواست‌کننده برای ارسال بسته در بازه زمانی بعدی در مجاورت گیرنده قرار خواهد گرفت، گره گیرنده آن گره را از لیست انتخاب‌های خود برای قبول درخواست ارسال حذف می‌کند؛ زیرا در صورت قبول بسته از فرستنده مذکور، در بازه زمانی بعدی احتمالا دو کپی مشابه از یک بسته در یک ناحیه از شبکه وجود خواهد داشت که این امر موجب اشغال بیهوده فضای بافر گره‌ها و همچنین مصرف بیهوده انرژی برای ارسال و دریافت آن بسته خواهد شد. با حذف درخواست این‌گونه فرستنده‌ها از گزینه‌های پیش رو، گره گیرنده از میان درخواست‌های باقی‌مانده یک گره را به‌تصادف انتخاب و بسته قبول درخواست را برای آن ارسال می‌کند. با پیش گرفتن این روند از فضای بافر گره‌ها به‌طور مناسب‌تری استفاده شده و بهبود عملکرد شبکه را در پی خواهد داشت.

۵- شبیه‌سازی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده روی روش‌های پیشنهادی این مقاله و سایر روش‌های مرتبط ارائه می‌گردد. این شبیه‌سازی‌ها در محیط MATLAB پیاده‌سازی شده‌اند. در این شبیه‌سازی‌ها عملکرد لایه فیزیکی (در محدوده برد رادیویی) و لایه پیوند داده ایده‌آل فرض شده‌است و تمرکز اصلی روی عملکرد لایه شبکه و مصرف انرژی (بر اساس مدل) بوده است.

پارامترهای مفروض شبکه، مطابق با مقادیر جدول ۳ در نظر گرفته شده‌اند. زمان به‌صورت یک کمیت گسسته با بازه‌هایی به طول برابر در نظر گرفته شده است و ارتباطات میان گره‌های مجاور در انتهای این بازه‌های زمانی اتفاق می‌افتد. تغییرات مکانی گره‌ها ناشی از حرکت تصادفی آن‌ها در طول یک بازه زمانی با استفاده از روابط (۴) و (۵) مدل می شود.

$$X_i(t+1) = X_i(t) + \Delta X \ , \ -50 \le \Delta X \le +50 \qquad (۴)$$

$$Y_i(t+1) = Y_i(t) + \Delta Y \ , \ -50 \le \Delta Y \le +50 \qquad (۵)$$

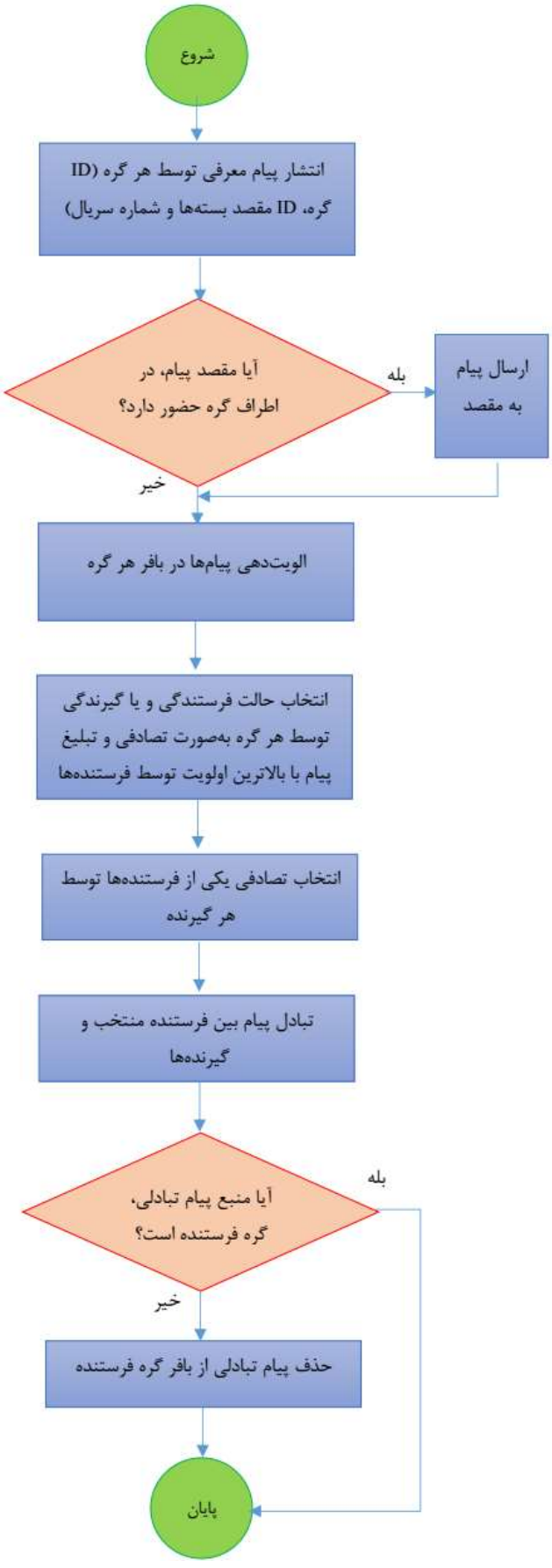
در روابط فوق $X_i(t+1)$ و $Y_i(t+1)$، مختصات گره i در انتهای بازه زمانی $(t+1)$ ام و $X_i(t)$ و $Y_i(t)$، مختصات گره در انتهای بازه زمانی t ام می‌باشند. ΔX و ΔY اعدادی تصادفی هستند که به‌صورت تصادفی یکنواخت از بازه [-۵۰ , +۵۰] انتخاب شده‌اند.

جدول ۳: پارامترهای مفروض شبیه‌سازی

تعداد گره‌ها	۳۰۰
تعداد بازه‌های زمانی	۱۰۰۰
TTL	۲۰
اندازه بافر گره‌ها	۵
بار ترافیکی (λ)	۱
تعداد کپی در روش BSaW	۶۴

جهت مدل‌سازی شبکه فرض شده است که ۳۰۰ گره به‌طور تصادفی یکنواخت در سطح یک ناحیه مربعی پراکنده شده‌اند. برای مدل‌سازی ترافیک شبکه، فرض شده است که به‌طور متوسط مجموعاً λ بسته با مبدأ و مقصدهای تصادفی توسط گره‌های مختلف تولید می‌شوند. مقدار پیش‌فرض λ در شبیه‌سازی‌های ارائه‌شده عدد ۱ می‌باشد، مگر اینکه مقادیر آن اشاره شود. همچنین در شبیه‌سازی‌ها، حجم بافر هر گره به اندازه ۵ بسته فرض شده است. جهت تحلیل نتایج شبیه‌سازی در حالت دائمی سیستم، عملکرد شبکه در ۱۰۰۰ بازه زمانی بررسی شده است.

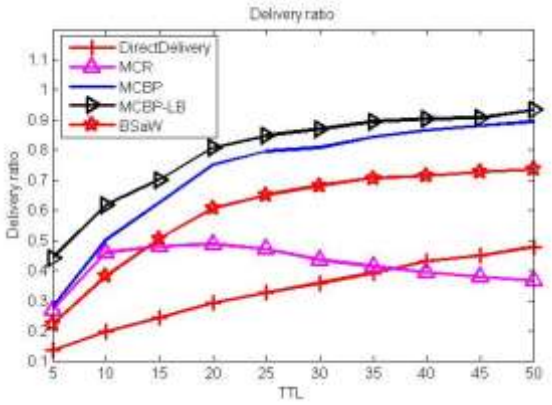
همان‌طور که در بخش کارهای پیشین اشاره شد، به‌دلیل شرایط خاص شبکه‌های متحمل تأخیر معمولا روش‌های ارائه‌شده توسط مقالات مختلف با روش‌های مسیریابی پایه مقایسه می‌گردند [۲۸]. در این مقاله روش پیشنهادی با روش‌های مسیریابی تحویل مستقیم (DirectDelivery)، افشان و صبر باینری (BSaW) و روش چینش تصادفی۱۵ (MCR) مقایسه خواهد شد. روش چنینش تصادفی (MCR) روشی است که رویه کلی آن مانند روش MCBP-LB است اما الگوریتم چینش بافر و هم‌چنین انتخاب فرستنده‌ها در گام چهارم به‌صورت کاملاً



شکل ۴: فلوچارت الگوریتم MCBP

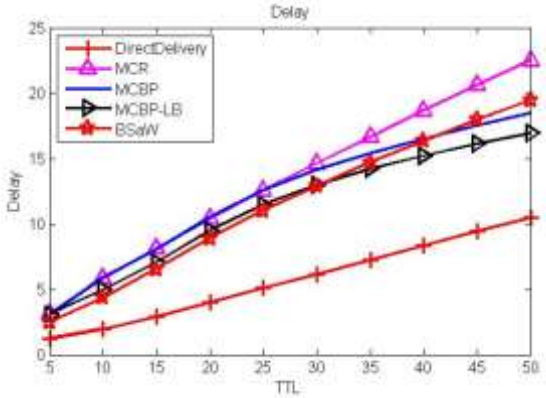
تصادفی انجام می‌شود؛ درواقع مقایسه عملکرد روش‌های پیشنهادی با این روش نشان می‌دهد که تا چه حد ایده‌های استفاده‌شده در روش پیشنهادی در زمینه اولویت‌بندی بسته‌های بافرشده و انتخاب فرستنده توسط گیرنده‌ها روی عملکرد مسیریابی تاثیر می‌گذارند.

در آغاز می‌بایست نقطه کار شبکه با توجه به شرایط الگوی تحرک و تعدا گره‌ها و سایر پارامترهای تاثیرگذار تعیین گردد. برای این کار ابتدا عملکرد شبکه نسبت به تغییرات TTL بررسی خواهد شد. در شکل ۵ نتایج شبیه‌سازی برای بررسی تغییرات نسبت تحویل بسته‌های شبکه بر حسب TTL نمایش داده شده است.



شکل ۵: به اشباع‌رفتن نسبت تحویل با افزایش TTL

در شکل ۵ روند صعودی نسبت تحویل شبکه را برای روش‌های تحویل مستقیم، BSaW، MCBP و MCBP-LB ملاحظه می‌شود. اما روش MCR با رفتار صعودی تا نقطه TTL برابر ۲۰ و سپس با پیش‌گرفتن سیر نزولی، رفتار متفاوتی نسبت به روش‌های دیگر نشان می‌دهد. این تفاوت به‌دلیل در پیش‌گرفتن روند تصادفی در فرآیند کپی و حذف بسته‌ها اتفاق افتاده است. درواقع گاهی بسته‌های قدیمی‌تر و گاهی بسته‌های جدیدتر را کپی و نیز در صورت پربودن حافظه، یک بسته را به‌طور تصادفی حذف می‌کند. بنابراین با افزایش TTL و نیز افزایش تعداد کپی‌های شبکه، به‌ناچار فضای بافر دائماً پر و خالی می‌شود و تصادفی‌بودن انتخاب از بافر جهت فرآیندهای کپی و حذف، منجر به خراب‌شدن نسبت تحویل خواهد شد. در این‌بین، روش BSaW به‌دلیل محدودکردن تعداد کپی‌ها و تولید تعداد کم‌تری کپی، به مشکل روش MCR برنمی‌خورد و به روند صعودیش ادامه می‌دهد.



شکل ۶: رشد میانگین تأخیر بسته‌های تحویلی با افزایش TTL

البته ازآنجاکه معیارهای عملکردی شبکه به‌شدت به یکدیگر وابسته‌اند بنابراین لازم است نمودارهای تأثیر TTL بر نسبت تحویل بسته‌ها و میانگین تأخیر آن‌ها در کنار هم بررسی شوند. در نگاه اول به‌نظر می‌رسد با توجه به صعودی‌بودن نسبت تحویل، هرچقدر TTL، مقدار بزرگ‌تری تعریف شود، شبکه به عملکرد بهتری خواهد رسید. اما باید به این نکته توجه داشت که درست است که با افزایش TTL، بسته‌ها بیشتر در شبکه زنده می‌مانند و به کمک تحرک گره‌ها به مقصدشان می‌رسند. اما شبیه‌سازی شکل ۶ نشان می‌دهد که نهایتا بسته‌ها با تأخیر بیشتری خواهند رسید؛ درواقع پذیرش میزان تأخیر بیشتر، نسبت تحویل بالاتری را نتیجه خواهد داد.

از طرفی با توجه به مقایسه شیب نمودارهای نسبت تحویل و تأخیر در روش MCBP و MCBP-LB نشان می دهد که انتخاب مقدار ۲۰ برای TTL می‌تواند انتخاب مناسبی برای شبکه باشد؛ زیرا شیب نمودار نسبت تحویل پس‌از این نقطه کاهش می‌یابد اما از طرف دیگر تأخیر به سیر صعودی خود همچنان ادامه می‌دهد. همچنین در روش MCR برای مقادیر بالاتر از ۲۰، نسبت تحویل سیر نزولی به خود می‌گیرد. لذا در ادامه شبیه‌سازی‌ها جهت انتخاب نقطه کار مناسب برای روش‌های مورد بررسی مقدار TTL روی عدد ۲۰ تنظیم شده است.

در شبیه‌سازی بعدی، تأثیر افزایش بار ترافیکی روی عملکرد شبکه بررسی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۷ نشان می‌دهد که افزایش بار ترافیکی تاثیری چندانی روی عملکرد روش تحویل مستقیم ندارد؛ زیرا با توجه به عدم کپی‌شدن بسته‌ها در این روش، شبکه زود به بار اشباع خود نمی‌رسد و نسبت تحویل در شبکه کاهش نمی‌یابد. در روش‌های MCR، MCBP و MCBP-LB، کاهش نسبت تحویل قابل‌ملاحظه است که به‌دلیل افزایش تعداد بسته‌های داده و به‌تبع آن حضور کپی‌های بسته‌ها در بافر گره‌ها می‌باشد. درواقع با افزایش بار شبکه، بافر گره‌ها مجبورند سریع‌تر پر و خالی شوند؛ ازاین‌رو کپی‌های بسته‌ها فرصت کم‌تری برای حضور در بافر گره‌ها دارند و با سرعت بیشتری از شبکه حذف می‌شوند؛ درنتیجه نسبت کم‌تری از بسته‌ها به مقصد خواهند رسید. در اینجاست که هر روشی که از فضای بافر خود به‌طور مناسب‌تر استفاده نماید، برون‌دهی بهتری خواهد داشت.

روش MCR که بسته‌ها را به‌صورت تصادفی کپی می‌کند نسبت به روش‌های MCBP، MCBP-LB و BSaW نسبت تحویل کم‌تری دارد. روش BSaW به‌دلیل محدودکردن تعداد کپی‌ها نسبت به روش MCR عملکرد بهتری نشان می‌دهد. البته نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش‌های پیشنهادی این مقاله عملکرد بهتری نسبت به BSaW دارند. همچنین روش ترکیبی MCBP-LB از روش MCBP بهتر عمل می‌کند؛ زیرا در جایی که دو گره، در بازه زمانی بعدی در مجاورت هم قرار می‌گیرند از ایجاد کپی‌های اضافه در بافرشان ممانعت به‌عمل می‌آورد چون نیاز نیست از بسته‌های مشابه در بافر خود کپی داشته باشند؛ ازاین‌رو، این روش از فضای بافر بهتر استفاده کرده است و به نتیجه بهتری خواهد رسید.

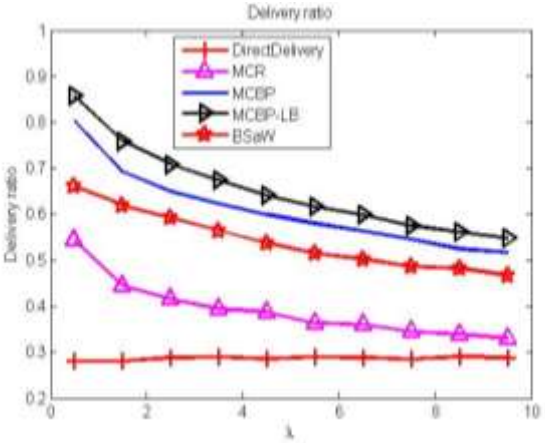
در ادامه یک تحلیل ریاضیاتی میزان بار شبکه ارائه می‌شود. با توجه به تعریف پارامتر λ که نشان‌دهنده میانگین نرخ تولید بسته های جدید در سطح شبکه است، احتمال تولید بسته توسط هر گره در هر بازه زمانی از رابطه (۶) به‌دست می‌آید.

$$P_g = \frac{\lambda}{\mathrm{N}} \qquad (۶)$$

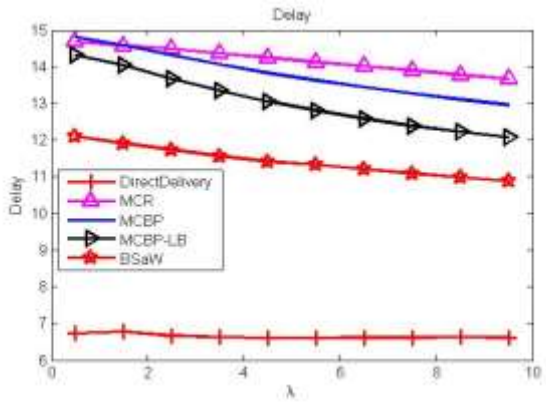
که در آن P_g احتمال تولید بسته توسط هر گره و N تعداد کل گره‌های شبکه می‌باشد. ازآنجاکه احتمال تولید بسته توسط گره مفروض i برابر P_g است، پس این گره به‌طور میانگین پس از گذشت T_g بازه زمانی یک بسته داده تولید خواهد کرد که T_g برابر است با (رابطه (۷)):

$$T_g = \frac{1}{P_g} \qquad (۷)$$

حال اگر مقدار T_g از TTL شبکه کم‌تر باشد، گره i به احتمال زیاد مشغول جابه‌جایی بسته‌های خود بوده و سرویسی به شبکه نمی‌دهد. ازاین‌رو عملکرد روش‌های پیشنهادی مقاله به روش ارسال مستقیم نزدیک خواهد شد. بار دیگر به شکل ۷، به نمودار تغییرات نسبت تحویل شبکه نسبت به بار شبکه توجه شود. برای مثال برای نقطه با بالاترین بار ترافیکی در این نمودار رابطه (۸) را می توان نوشت.



شکل ۷: کاهش نسبت تحویل با افزایش ترافیک شبکه



شکل ۸: تأثیر بار شبکه بر میانگین تأخیر بسته‌های تحویلی

$$T_g = \frac{1}{P_g} = \frac{\mathrm{N}}{\lambda} = 31.6 \qquad (۸)$$

$$\lambda = 9.5,\ \mathrm{N} = 300,\ \mathrm{TTL} = 20$$

بنابراین در شرایط مطلوب باید رابطه زیر برقرار باشد (رابطه (۹)):

$$T_g > \mathrm{TTL} \qquad (۹)$$

بنا بر رابطه فوق، هر چه به‌طور میانگین یک گره در بازه‌ای بزرگ‌تر از TTL بسته جدیدی تولید کند، فرصت بیشتری جهت سرویس‌دهی به سایر گره‌های شبکه خواهد داشت. به‌همین علت در شکل ۷ ملاحظه می‌شود که سه روش MCR، MCBP و MCBP-LB که به کپی‌کردن بسته‌ها می‌پردازند، عملکرد بهتری را نسبت به روش تحویل مستقیم دارند، اما با افزایش بار عملکرد آن‌ها به روش تحویل مستقیم نزدیک می‌شود.

در شکل ۸ میانگین تأخیر بسته‌هایی که به مقصدشان رسیده‌اند نمایش داده شده است. از بین سه روش MCR، MCBP و MCBP-LB هر روشی که از فضای بافر خود مناسب‌تر استفاده کند میانگین تأخیر کم‌تری خواهد داشت. روش BSaW به‌دلیل محدودکردن کپی‌ها درگیر تعداد کم‌تری بسته است و آن‌ها را با تأخیر نسبتا کمتری به مقصد می‌رساند. همچنین سیر نزولی منحنی بدان دلیل است که با افزایش بار شبکه، فرصت کم‌تری برای هر بسته برای رسیدن به مقصد فراهم می‌شود. درواقع احتمال رسیدن آن‌ها در ابتدای عمرشان بیشتر است. به‌بیان دیگر با افزایش بار، به‌طور میانگین به هر بسته سهم کم‌تری از کپی‌شدن در شبکه خواهد رسید؛ زیرا فرایند کپی‌شدن به چگالی شبکه و تحرک گره‌ها وابسته است و در این سناریو احتمال برخورد گره‌ها و تعداد انتقال‌ها در شبکه ثابت مانده است ولی در عین حال بار شبکه افزایش یافته است؛ که این وضعیت منجر به کاهش تعداد کپی‌ها را خواهد شد. به‌عبارت دیگر بسته‌هایی که شانس رسیدن به مقصد را داشته‌اند به احتمال زیاد در اوایل طول عمرشان به مقصدشان رسیده‌اند، این موضوع سبب شده که منحنی‌های مربوط به میانگین تاخیر روندی نزولی داشته باشند. توجه داشته باشید از آنجا که روش MCBP و MCBP-LB که بسته‌های بافرشده را اولویت‌دهی می‌کنند با اینکه نسبت تحویل بالاتری

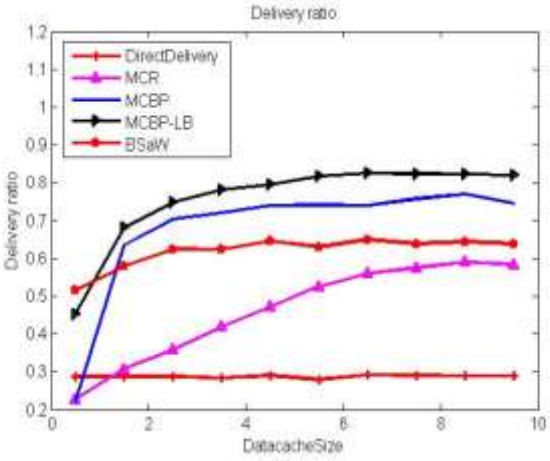
نسبت به روش MCR دارند میانگین تاخیر کمتری نسبت به این روش دارند.

شکل ۹ نمودار نسبت تحویل بسته‌ها را بر حسب فضای بافر را نمایش می‌دهد. افزایش فضای بافر برای هر گره تأثیری بر عملکرد روش تحویل مستقیم ندارد؛ زیرا در این روش بسته‌ها کپی نمی‌شوند و با توجه به بار موجود، اندازه بافر تاثیر چندانی روی عملکرد آن ندارد. در سایر روش‌ها نسبت تحویل بسته‌ها روند صعودی دارد؛ چراکه با افزایش اندازه بافر، فضای بیشتری برای نگه‌داری بسته‌ها خواهند داشت. طبیعتا، ازآنجا که روش MCR استراتژی مناسبی در مورد مدیریت بسته‌های بافرشده ندارد و به‌صورت تصادفی آن‌ها را کپی می‌کند، نسبت‌تحویل کم‌تری را نسبت به روش‌های MCBP، MCBP-LB و BSaW نشان می‌دهد.

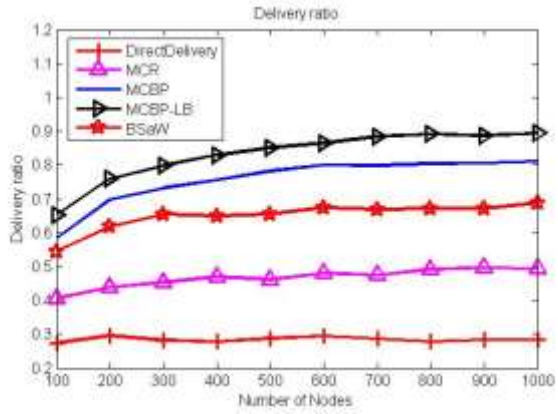
در اندازه بافر برابر ۱، روش MCR و MCBP یک رفتار را نشان می‌دهند؛ چراکه در این حالت اولویت‌بندی بافر معنایی ندارد. اما روش MCBP-LB عملکرد بهتری دارد؛ زیرا گیرنده‌ها از پذیرش بسته از آن دسته از فرستنده‌هایی که در بازه زمانی بعدی با آن‌ها در یک ناحیه قرار خواهند گرفت امتناع می‌ورزند؛ بدین ترتیب کپی‌های بلااستفاده از یک بسته تولید نخواهد شد و استفاده بهتری از فضای بافر شده است.

شکل ۱۰ عملکرد روش‌های مورد بحث را در شبکه متحمل تاخیر نشان می‌دهد در شرایطی که تعداد گره‌های در سطح شبکه (چگالی گره‌ها) افزایش یابد. توجه داشته باشید که با افزایش تعداد گره‌ها در شبکه، مجموع اندازه بافرهای کل شبکه افزایش می‌یابد و همچنین گره‌ها با هم برخورد بیشتری خواهند داشت؛ بنابراین از هر بسته کپی‌های بیشتری تولید می‌شود. همین امر باعث افزایش احتمال رسیدن بسته‌ها خواهد شد. از آنجا که روش MCR استراتژی خوبی برای استفاده از این فضای ایجادشده به‌طور مناسبی ندارد بهبود عملکرد چشمگیری نسبت تحویل بسته‌ها نشان نمی‌دهد. روش‌های MCBP و MCBP-LB افزایش بیشتری در نسبت تحویل نشان می‌دهند که این امر به‌دلیل ایجاد کپی‌های هدفمند از بسته‌ها می‌باشد (شکل ۱۰). همچنین روش BSaW به‌دلیل محدودکردن تعداد کپی‌ها، عملکرد نسبتا خوبی دارد.

در آخر به موضوع میزان انرژی مصرفی روش MCBP پیشنهادی که در شکل ۱۱ نمایش داده شده است پرداخته می‌شود. از آنجا که عمده مصرف انرژی در این روش مربوط به ارسال بسته‌های کنترلی است و روش‌های MCBP-LB و MCR همین تعداد بسته را جهت ارتباطات استفاده می‌کنند، تفاوتی چندانی در مصرف انرژی این روش‌ها با روش MCBP دیده نمی‌شود. لذا در ترسیم نمودارهای انرژی آن‌ها در شکل ۱۱ صرف‌نظر شده است. محاسبات صرف انرژی بر اساس روابط (۱)، (۲) و (۳) انجام شده است. مطابق نتایج شبیه‌سازی زمانی که تعداد گره‌ها کمتر از ۳۰۰ است، شبکه جهت جابه‌جایی بسته‌های داده نسبت به بسته‌های کنترلی انرژی بیش‌تری مصرف می‌کند. اما کم‌کم با افزایش تعداد (چگالی) گره‌ها عمده مصرف انرژی صرف ارسال بسته‌های کنترلی شده است و با بیش‌ترشدن آن‌ها این وضعیت تشدید می‌شود چراکه لازم است جهت مکانیزم هماهنگی بین گره‌ها[۱۶] بسته‌های کنترلی بیشتری ردوبدل شود. جالب است که میان نتایج به‌دست‌آمده در مورد نسبت تحویل بسته‌ها در شکل ۱۰ و انرژی مصرفی در شکل ۱۱ هم‌خوانی وجود دارد. هر دو شکل نشان می‌دهند که در صورتی که چگالی گره‌های شبکه از حدی تجاوز کند (در اینجا حدود ۳۰۰ گره در منطقه فرض شده)، عملکرد شبکه از نظر تحویل بسته بهبود چندانی نخواهد داشت حال آنکه به‌دلیل بالارفتن تعداد همسایه‌های هر گره، تعداد بسته‌های کنترلی به‌شدت افزایش می‌یابد که این امر باعث مصرف بی‌رویه انرژی خواهد شد. لذا بهتر است مکانیزیم‌های دیگری به پروتکل مسیریابی اضافه شود که با بالارفتن تعداد همسایه‌ها، هر گره فقط با تعداد محدودی از آن‌ها جهت کپی‌کردن بسته‌ها تعامل کند.

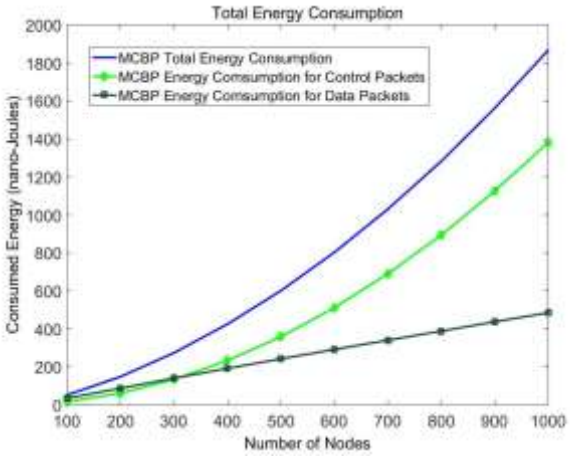


شکل ۹: رشد نسبت تحویل با افزایش اندازه بافر



شکل ۱۰: تأثیر افزایش چگالی شبکه بر نسبت تحویل

توجه داشته باشید که با توجه به مدل مصرف انرژی گره‌ها، پردازش-های مربوط به اولویت‌بندی بسته‌های بافرشده تاثیر چندانی در مصرف انرژی شبکه ندارد و مصرف اصلی انرژی مربوط به ارتباطات است.



شکل ۱۱: مصرف انرژی شبکه در روش پیشنهادی

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله دو روش مسیریابی DTN مبتنی بر فرصت، جهت بهبود نسبت تحویل بسته‌ها ارائه شده است. روش اول موسوم به MCBP بسته‌های موجود در بافر گره‌ها را بر مبنای مبدأ بسته، سن بسته و عمر مفید بسته اولویت‌بندی کرده و سپس در بین گره‌های شبکه، فرآیند کپی‌شدن بسته‌ها را بر اساس اولویت‌ها انجام می‌داد؛ بنابراین تا حد زیادی از ایجاد کپی‌های بیهوده در شبکه پرهیز می‌شد. در روش دوم موسوم به MCBP-LB که متمم روش MCBP است، درصورتی‌که قرار باشد دو گره در بازه زمان بعدی در مجاورت یکدیگر قرار بگیرند بین آن‌ها تبادلی صورت نمی‌داد؛ بدین‌ترتیب تکرارهای بلااستفاده از بسته‌ها را کاهش داده و عملکرد شبکه بهبود می‌یافت. مقایسه این روش‌ها با روش‌های پایه در شبیه‌سازی‌های مقاله نشان داد که مدیریت مناسب بسته‌های بافرشده در گره‌ها، سبب بهبود عملکرد شبکه به میزان ۴۰ تا ۶۰ درصد در نسبت تحویل بسته‌ها خواهد شد. همچنین نتایج شبیه‌سازی روش‌های مختلف نشان داد که با بالارفتن چگالی گره‌ها نسبت تحویل بسته‌ها بهبود چندانی نخواهد داشت، حال آنکه مصرف انرژی به‌دلیل افزایش شدید تعداد بسته‌های کنترلی بالا می‌رود. یکی از موضوعات جالبی که می تواند در ادامه این پژوهش مورد بررسی قرار گیرد این است که چگونه می‌توان با محدودکردن تعامل هر گره با همسایه‌هایش بدون افت عملکرد شبکه میزان انرژی مصرفی گره‌ها را کاهش داد.

مراجع

[1] M. J. Khabbaz, C. M. Assi and W. F. Fawaz, "Disruption-tolerant networking: A comprehensive survey on recent developments and persisting challenges," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 14, no. 2, pp. 607-640, 2012.

[۲] رضا غزالیان، علی آقاگل‌زاده و سید مهدی حسینی اندرگلی، «کمینه‌سازی انرژی مصرفی در شبکه‌های حس‌گر بی‌سیم دیداری با انتخاب دوربین برای ردگیری هدف متحرک در شبکه با عامل انسداد»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۸، شماره ۱، صفحه ۱۸۵-۱۹۵، بهار ۱۳۹۷.

[3] L. Wood and P. Holliday, "Using http for delivery in delay/disruption-tolerant networks09", Experimental Internet Draft, https://tools.ietf.org/html/draft-wood-dtnrg-http-dtn-delivery-09, 2014.

[4] L. Wood, W. M. Eddy, W. Ivancic, J. McKim, and C. Jackson, "Saratoga: a delay-tolerant networking convergence layer with efficient link utilization," in International Workshop on Satellite and Space Communications, pp. 168-172, IEEE, 2007.

[5] Z. Zhang, "Routing in intermittently connected mobile ad hoc networks and delay tolerant networks: overview and challenges," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 8, no. 1, pp .24-37, 2006.

[6] K. Fall, "A delay-tolerant network architecture for challenged internets," in Conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications, ACM, pp. 27-34, 2003.

[7] A. Kate, G .M. Zaverucha and U. Hengartner, "Anonymity and security in delay tolerant networks," in Third International Conference on Security and Privacy in Communications Networks and the Workshops, IEEE, pp. 504-513, 2007.

[8] Y. Zhu, B .Xu, X. Shi, and Y. Wang, "A survey of social-based routing in delay tolerant networks: positive and negative social effects," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 15, no. 1, pp. 387-401, 2013.

[9] M. Grossglauser and D. N. Tse, "Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks," IEEE/ACM transactions on networking, vol. 10, no. 4, pp. 477-486, 2002.

[10] W. Mitchener and A. Vadhat, "Epidemic routing for partially connected ad hoc networks," Technical Report CS-2000-06, 2000.

[11] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C. S. Raghavendra, "Efficient routing in intermittently connected mobile networks: The multiple-copy case," IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 16, no. 1, pp. 77-90, 2008.

[12] D. Niyato, P. Wang, H.-P. Tan, W. Saad, and D. I. Kim, "Cooperation in delay-tolerant networks with wireless energy transfer: performance analysis and optimization," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 64, no. 8, pp. 3740-3754, 2015.

[۱۳] رحیم بجانی، محمد کلانتری و امیرمسعود افتخاری مقدم، «ارائه چهارچوبی مبتنی بر نظریه بازی‌ها برای جلب مشارکت گره‌ها در فرآیند شناسایی گره‌های مخرب در شبکه‌های حسگر بی‌سیم»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۷، شماره ۴، صفحه ۱۳۲۹-۱۳۴۲، زمستان ۱۳۹۶.

[14] Y. Cai, Y. Fan, and D. Wen, "An incentive-compatible routing protocol for two-hop delay-tolerant networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 65, no. 1, pp. 266-277, 2016.

[15] J. N. Isento, J. J. Rodrigues, J. A. Dias, M. C. Paula, and A. Vinel, "Vehicular delay-tolerant networks? A novel solution for vehicular communications," IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, vol. 5, no. 4, pp. 10-19, 2013.

[16] M. J. Khabbaz, W. F. Fawaz, and C. M. Assi, "Modeling and delay analysis of intermittently connected roadside communication networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 61, no. 6, pp. 2698-2706, 2012.

[17] T. Abdelkader, K. Naik, and W. Gad, "A game-theoretic approach to supporting fair cooperation in delay tolerant networks," in Vehicular Technology Conference (VTC Spring), IEEE, pp. 1-7: 2015.

[18] Y. Mao and P. Zhu, "A game theoretical model for energy-aware DTN routing in MANETs with nodes' selfishness," Mobile Networks and Applications, vol. 20, no. 5, pp. 593-603, 2015.

[19] A. Takahashi, H. Nishiyama, N. Kato, K. Nakahira, and T. Sugiyama, "Replication control for ensuring reliability of convergecast message delivery in infrastructure-aided dtns," IEEE

Transactions on Vehicular Technology, vol. 63, no. 7, pp. 3223-3231, 2014.

[20] N. Ng, H. Chang, Z. Zou ,and S. Tang, "An adaptive threshold method to address routing issues in delay-tolerant networks," in GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), 2011, pp. 1122-1126, IEEE.

[21] Z. Wang, M. A. Nascimento, and M. H. MacGregor, "Discovering periodic patterns of nodal encounters in mobile networks," Pervasive and Mobile Computing, vol. 9, no. 6, pp. 892-912, 2013.

[22] Z. Wang, M. A. Nascimento, and M. H. MacGregor, "Optimal encounter-based routing via objects with periodic behaviours," in 39th Conference on Local Computer Networks Workshops (LCN Workshops), IEEE, pp. 730-737, 2014.

[23] R. R. Mhatre and M. Deshmukh, "Buffer management in delay tolerant networks," International Journal of Modern Trends in Engineering and Research (IJMTER), vol. 3, no. 02, 2016.

[24] E.-H. Kim, W.-K. Seo, J.-C. Nam, J.-I. Choi, and Y.-Z. Cho, "Probability-based spray-and-wait protocol with buffer management in delay tolerant networks," in Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), 2014, pp. 406-411: IEEE.

[25] M. Abdelmoumen, M. Frikha, and T. Chahed, "Performance of delay tolerant mobile networks and its improvement using mobile relay nodes under buffer constraint," in International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC), 2015, pp. 1-6: IEEE.

[26] E. Wang, Y.-J. Yang, J. Wu, and W.-B. Liu, "A buffer scheduling method based on message priority in delay tolerant networks," Journal of Computer Science and Technology, vol. 31, no. 6, pp. 1228-1245, 2016.

[27] S. Rashid and Q. Ayub, "Integrated sized-based buffer management policy for resource-constrained delay tolerant network," Wireless Personal Communications, vol. 103, no. 2, pp. 1421-1441, 2018.

[28] C. Sobin, V. Raychoudhury, G. Marfia, and A. Singla, "A survey of routing and data dissemination in delay tolerant networks," Journal of Network and Computer Applications, vol. 67, pp. 128-146, 2016.

[29] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in 33rd annual Hawaii international conference on System sciences, IEEE, pp. 10, 2000.

زیرنویس‌ها

[1] Intermittent Connected Network
[2] Delay Tolerant Network
[3] Distributed
[4] Ferry
[5] Opportunistic
[6] Direct Delivery
[7] Two Hop Relaying
[8] Epidemic
[9] First In First Out
[10] Spray and Forward
[11] Vehicular Delay Tolerant Network (VDTN)
[12] Multi Copy Scheme
[13] Time To Live (TTL)
[14] First Order Radio Model
[15] Multi Copy Random(MCR)
[16] Hand Shaking