

مسیریابی مبتنی بر محتوا در شبکه‌های اینترنت اشیاء و ادغام آن در پروتکل RPL

مهدی رضاتبار^۱، یاسره یوسف تبار^۲

^۱ کارشناس ارشد مهندسی فناوری اطلاعات، شبکه‌های کامپیوتری، دانشگاه مازندران.

^۲ کارشناس ارشد مهندسی کامپیوتر، نرم افزار، دانشگاه مازندران.

نام نویسنده مسئول:

مهدی رضاتبار

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۲۶

چکیده

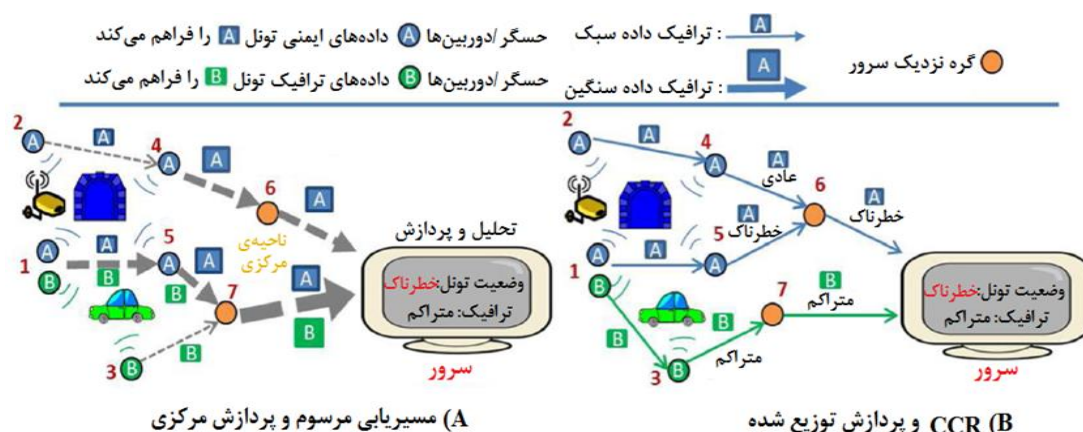
شبکه‌های اینترنت اشیاء می‌توانند برای کاربردهای بسیاری در حوزه‌های مختلف صنعتی از جمله نظارت بر زیرساخت، خدمات شهری، کاربردهای نظارتی و امنیتی و غیره مورد استفاده قرار گیرند. با این حال، جمع‌آوری مقادیر زیادی از داده‌ها از چنین شبکه‌هایی که شامل تصاویر و ویدئوها هستند، اغلب باعث تراکم ترافیک در ناحیه شبکه مرکزی می‌شود. به منظور حل این مشکل، فناوری مسیریابی محتوا محوری ارائه شده که مسیریابی توسط محتوا تعیین می‌شود. به وسیله‌ی مسیریابی داده‌های به هم مرتبط به گره‌های میانی برای پردازش، تجمیع داده‌ها با سرعت بالاتری می‌تواند به دست آید، از این رو ترافیک در شبکه به طور موثری کاهش می‌یابد. در نتیجه، کاهش قابل توجهی را در زمان تاخیر می‌توان به دست آورد. علاوه بر این، انتقال داده‌های تکراری پس از تجمیع داده‌ها می‌تواند حذف شود که عمده‌تأثری صرف شده بر روی ارتباطات بی‌سیم را کاهش داده و در نتیجه در مصرف باتری صرفه‌جویی می‌شود.

واژگان کلیدی: اینترنت اشیاء، مسیریابی، محتوا محور، جمع‌آوری داده‌ها، پیاده‌سازی.

مقدمه

در الگوی ارتباطات اینترنت اشیاء^۱ که وسایل اینترنت اشیاء مجهز به پردازش، ارتباطات، و قابلیت‌های ذخیره‌سازی مستقلی هستند، از محاسبات توزیع شده^۲ بهره‌گیری شده است [۱]. ایده اصلی این است که به جای ارسال همه‌ی داده‌های خام به طور مستقیم از طریق یک شبکه بی‌سیم با چند گام^۳ که معمولاً با مصرف انرژی و تاخیر زمانی زیادی همراه است، از یک راه مقرون به صرفه‌تر که در ابتدا حجم داده‌ها را به صورت محلی از طریق پردازش داخل شبکه کاهش داده و پس از آن تنها نتیجه‌ی پردازش به جلو هدایت شود، استفاده شود. بنابراین، می‌توان در پهنای باند و انرژی صرفه‌جویی نموده، تاخیر را کاهش و طول عمر شبکه را در شبکه اینترنت اشیاء با منابع محدود طولانی نمود [۲].

در بسیاری از موارد، داده‌های تجمیع شده برای یک برنامه‌ی یکسان خیلی با یکدیگر همبستگی دارند [۳] و از این رو وقتی به سمت مقصد هدایت می‌شوند، این داده‌ها می‌توانند ترکیب شده یا به طور مشترک پردازش شوند. به عنوان مثال، تجمیع و ادغام داده‌های خوانده شده توسط چندین حسگر که مربوط به یک رویداد فیزیکی یکسان هستند. چنین روند تجمیع و ادغام داده‌ها می‌تواند مقدار کل پیام‌هایی که باید بر روی لینک‌های بی‌سیم ارسال شوند را کاهش دهد، که تاثیر قابل توجهی بر روی مصرف انرژی و همچنین بهره‌وری کلی شبکه دارد. برای کسب دید بیشتر نسبت به موضوع، سیستم نظارت تونلی را به عنوان یک مثال در نظر می‌گیریم. همانطور که شکل ۱ نشان داده شده است، انواع گره‌های حسگر و دوربین‌ها برای نظارت به دو ارزیابی کلیدی تونل نصب شده‌اند: ایمنی ساختار تونل و مدیریت ترافیک، که مقدار عظیمی از داده‌های حس شده شامل تصاویر و جریان‌های ویدئویی نیاز به تحویل به صورت بی‌درنگ^۴ به یک مرکز کنترل از راه دور دارند. به طور معمول، سرور در ابتدا تمام داده‌ها را از طریق همان توپولوژی مسیریابی بدون توجه به اینکه آیا داده‌ها مربوط به ایمنی تونل هستند یا مدیریت ترافیک، جمع‌آوری می‌کند. این مورد در شکل ۱ قسمت (A) نشان داده شده است. به عنوان مثال گرهی ۱ را در نظر بگیرید، این گره هم داده‌های ایمنی تونل یعنی A و هم داده‌های ترافیک یعنی B را به گرهی ۵ ارسال می‌کند چرا که هر دوی این داده‌ها را یکی در نظر می‌گیرد. هنگامی که تمام داده‌ها به مقصد رسید، نتایج نهایی در سمت سرور محاسبه می‌شوند. با این حال، ترافیک شبکه‌ی سنگین در محدوده‌ی مرکزی باعث مصرف انرژی بالاتر در گره‌های نزدیک به مرکز می‌شود و همچنین ترافیک را در معرض حوادث تراکم و ازدحام قرار می‌دهد. (شکل ۱ قسمت A).



شکل ۱. مسیریابی متعارف و مرسوم در مقابل مسیریابی CCR

¹ Internet of Thing (IoT)

² Distributed computing

³ Hop

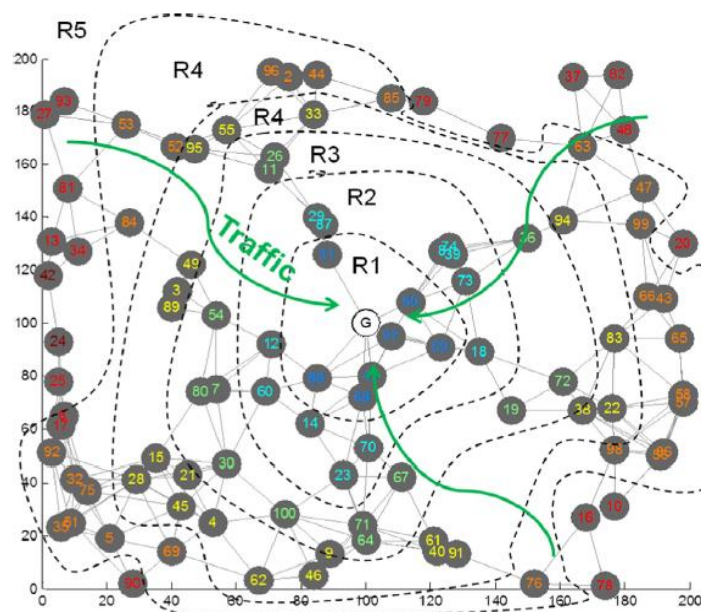
⁴ Real-time

برای غلبه بر چنین مشکلی، یک پروتکل مسیریابی محتوا محور^۵ (CCR) در مرجع [۴] برای جمع‌آوری کارآمد داده‌ها در شبکه‌های اینترنت اشیاء چندگامی ارائه شده است. داده‌ها را در هنگام مسیریابی بر اساس محتوای آنها تفکیک می‌کنیم، و داده‌های همبسته را به عنوان داده‌هایی با محتوای یکسان می‌نامیم. همانطور که در شکل ۱ قسمت B نشان داده شده است، از آنجایی که گره‌ی ۱ و گره‌ی ۳ اطلاعاتی را برای شرایط ترافیکی فراهم می‌کنند، به جای ارسال محتوای B به گره‌ی ۵ مانند آنچه در شکل ۱ قسمت A نشان داده شده است، در این مورد گره‌ی ۱ محتوای B را به گره‌ی ۳ ارسال می‌کند تا داده‌های در حال ارسال به سمت سرور در این گره بتوانند ترکیب یا تجمیع شوند. نتایج میانی از قبیل هشدارهای ترافیک سنگین می‌توانند در داخل شبکه محاسبه شوند. در نتیجه، دو توپولوژی مسیریابی متمایز بر اساس محتوای A و محتوای B در CCR ایجاد می‌شوند.

مدل‌های سیستم و مفروضات

مدل شبکه

فرض می‌کنیم که گره‌ها داده‌ها را به یک گره‌ی دروازه^۶ می‌فرستند که در مرکز توپولوژی واقع است. این گره از گره‌های عادی از نظر قدرت پردازشی، حافظه و غیره تواناتر است و به توان نیرومندتری دسترسی دارد. گره‌ها مجهز به باتری هستند و یک منبع انرژی اولیه محدود و ناهمگن دارند. همچنین فرض می‌کنیم که قابلیت پردازش گره‌ها ناهمگن است، به عنوان مثال یک گره ممکن است با توجه به محدودیت‌های سخت‌افزاری یا نرم‌افزاری خود تنها قادر به پردازش چند نوع خاص از محتوا باشد. در موردی که یک گره بسته‌ی داده‌ای را دریافت می‌کند که قادر به پردازش این بسته نیست، آنگاه گره تنها بسته را بازپخش خواهد نمود. برای شروع، گره دروازه یک پیام رادیویی را همه‌پخشی^۷ می‌کند تا بدین وسیله به گره‌ها کمک کند که بتوانند تشخیص دهند چند گام دورتر از دروازه واقع هستند. گره‌هایی که این پیام را دریافت می‌کنند به یک لایه‌ی ID نسبت داده می‌شوند. این ID در واقع حداقل فاصله‌ی گامی را بین یک گره و دروازه نشان می‌دهد. پس از انتساب ID، گره ID لایه‌ی خود را در این پیام گنجانده و آن را ارسال می‌کند. چنین موجی مانند انتشار، باعث تشکیل یک توپولوژی از نوع حلقه‌ای می‌شود که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. فاصله‌ی گامی مبتنی بر توپولوژی حلقه‌ای

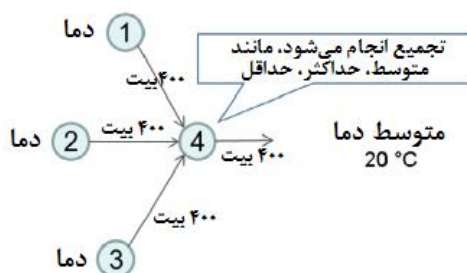
^۵ Content centric routing (CCR)

^۶ Gateway

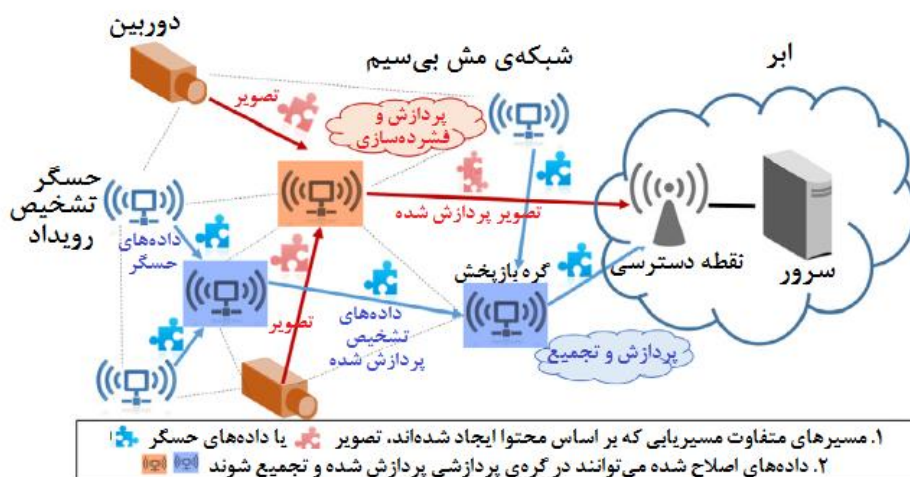
^۷ Broadcast

جمع‌آوری داده‌ها

به طور کلی سناریوی جمع‌آوری داده‌ها به صورت چند-نقطه به نقطه^۸ را برای هدف تجمیع داده‌ها در نظر می‌گیریم. تمام بسته‌های داده‌ای که به یک هدف پردازشی مربوط هستند به عنوان بسته‌هایی با محتوای یکسان در نظر گرفته می‌شوند، که سپس می‌توانند با یک گره‌ای که قابلیت پردازش چنین محتوایی را دارد، پردازش شوند. به عنوان مثال، داده‌هایی با نوع یکسان (مانند داده‌ها خوانده شده‌ی دما) که در یک ساختمان جمع‌آوری شده‌اند، می‌توانند به عنوان محتوای یکسان در نظر گرفته شوند تا در اختیار یک برنامه‌ی کاربردی قرار گیرند که نیاز به متوسط دمای ساختمان دارد. برای سادگی، ما فرض می‌کنیم هر برنامه‌ی کاربردی که در شبکه در حال اجرا است تنها یک هدف پردازشی دارد، ولی برنامه‌های کاربردی متعددی می‌توانند همزمان وجود داشته باشند. در شکل ۳ مثالی از تجمیع داده‌ها نشان داده شده است.



(a) مدل ساده‌ی تجمیع داده‌ها



(b) پردازش پیچیده در داخل شبکه

شکل ۳. مثال‌هایی از مدل تجمیع برای کاربردهای مختلف

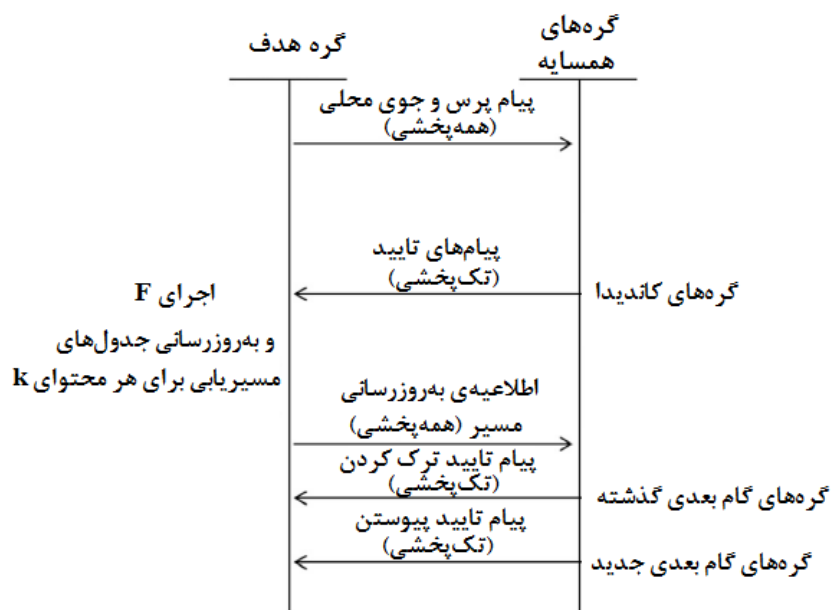
پروتکل CCR

CCR یک فرآیند توزیع شده است، وقتی که یک برنامه‌ی کاربردی به دروازه می‌رسد، در ابتدا از یک ساختار مسیریابی پیش‌فرض برای جمع‌آوری داده‌ها استفاده می‌شود. تمرکز مراحل بعدی در مورد بهینه‌سازی این ساختار مسیریابی است. هر گره یک احتمال P_t دارد تا گره‌ی بازپخش گام بعدی خود را به وسیله‌ی اجرای یک تابع هدف F مشخص کند. گره‌ای که تمایل به اجرای F دارد (یک گره‌ی هدف)، در ابتدا یک پیام پرس و جوی محلی^۹ را به گره‌های همسایه‌ی خود پخش می‌کند که تنها یک گام با آنها فاصله دارد. پیام پرس و جو شامل انواع محتوای ترافیک خروجی گره‌ی هدف و حجم مربوط به ترافیک، و معیار انتخاب کاندیدا برای گره‌ی هدف است. سپس کاندیدای واجد شرایط گام بعدی به این پیام پرس و جو با یک پیام

^۸ Multi-point to point

^۹ Local query message

تایید^{۱۰} پاسخ می‌دهد، که شامل اطلاعات موردنیاز تابع هدف F از قبیل شناسه‌ی (ID) خود و طول عمر تخمینی گره‌ی پاسخ دهنده در صورتی که ترافیک تعیین شده به این گره‌ی کاندیدا ارسال شود. با استفاده از این اطلاعات به عنوان ورودی تابع هدف، رتبه‌بندی گره‌های کاندید تولید شده و یکی که بالاترین رتبه‌بندی را دارد به منظور بازپخش ترافیک موردنظر انتخاب می‌شود. در نهایت، گره‌ی هدف جدول مسیریابی را به‌روزرسانی کرده و یک پیام شامل ID گره‌ی گام بعدی برای محتوای ترافیک مربوطه را همه‌پخش می‌کند. پس از آن، گره‌های گام بعدی جدید با پیام‌های تایید پیوستن^{۱۱} پاسخ داده و گره‌های بازپخش قبلی نیز با ارسال پیام‌های تایید ترک^{۱۲} به گره هدف گزارش می‌دهند. جزئیات دنباله‌ی پیام‌های سیگنالینگ در شکل ۴ نشان داده شده است.



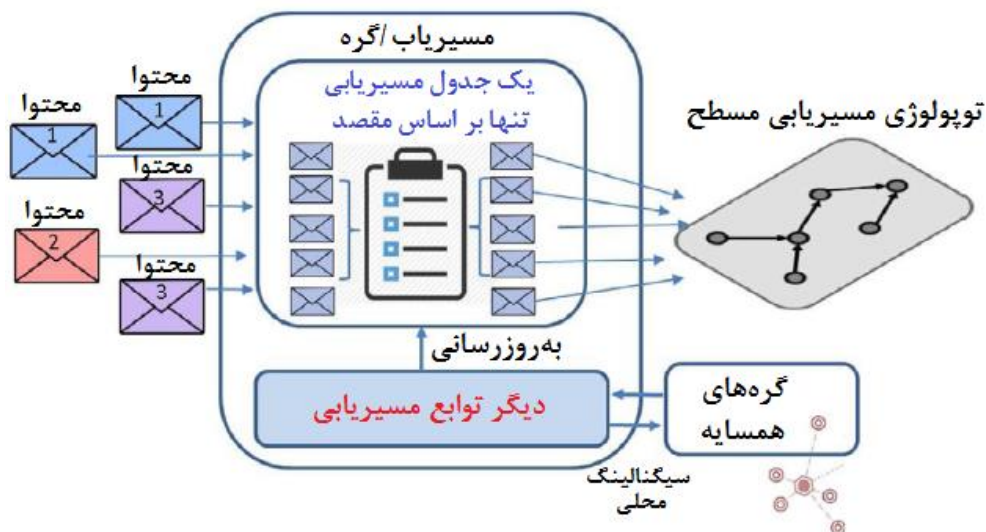
شکل ۴. پیام‌های سیگنالینگ پروتکل CCR

سیستم مسیریابی CCR شامل سه تابع اصلی است: تابع فعال سازی برای کنترل هزینه سیگنالینگ، تابع هدف برای اجرای بهینه‌سازی مسیر و تابع تشخیص جهت جلوگیری از حلقه‌های ارتباطی. تابع فعال سازی تصمیم می‌گیرد که تابع هدف CCR برای به روز نگه داشتن جدول مسیریابی به طور مکرر انجام شود و در صورت تثبیت شبکه، برای کاهش هزینه سیگنالینگ محلی، از سرعت اجرای بالا در شرایط شبکه پویا اطمینان حاصل می‌کند. با اجرای تابع هدف، گره از همسایگان خود درخواست می‌نماید تا برخی اطلاعات مانند وضعیت ترافیک داده، سطح باتری باقیمانده و محتوای جداول مسیریابی خود را ارائه دهند. با استفاده از این اطلاعات به عنوان ورودی تابع هدف، رتبه‌بندی مسیرهای نامزد تولید می‌شود و بالاترین رتبه برای مسیریابی محتوای مربوطه انتخاب می‌شود. از این رو، تابع هدف برای هر محتوا در جدول مسیریابی یک ورودی مسیریابی جداگانه ایجاد می‌نماید. سرانجام، یک مکانیسم موثر برای جلوگیری از حلقه به منظور شناسایی حلقه‌های ارتباطی و صرفه جویی در مقدار محدود انرژی ذخیره شده در هر گره، لحاظ می‌گردد. ساختار معماری سیستم‌های مسیریابی متعارف و CCR در شکل ۵ نشان داده شده است.

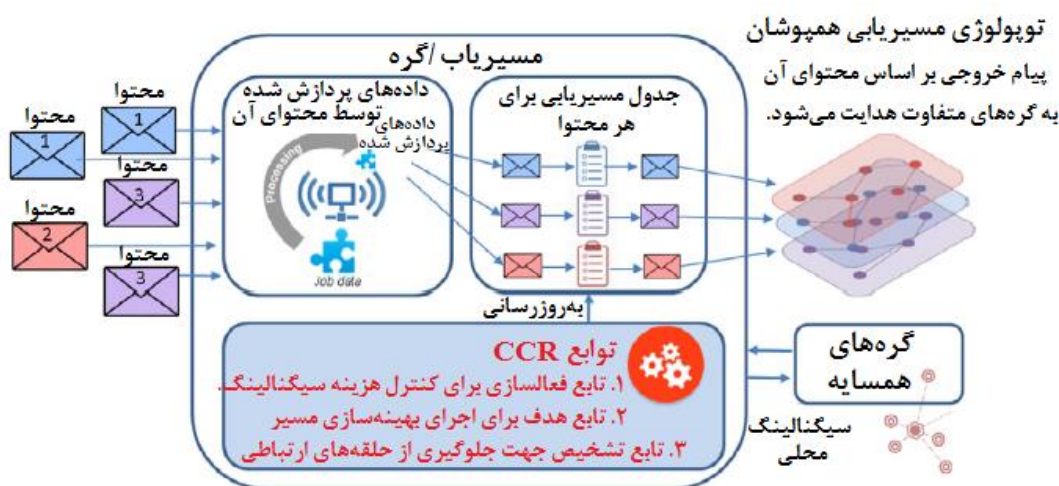
¹⁰ ACK message

¹¹ Join ACK

¹² Leave ACK



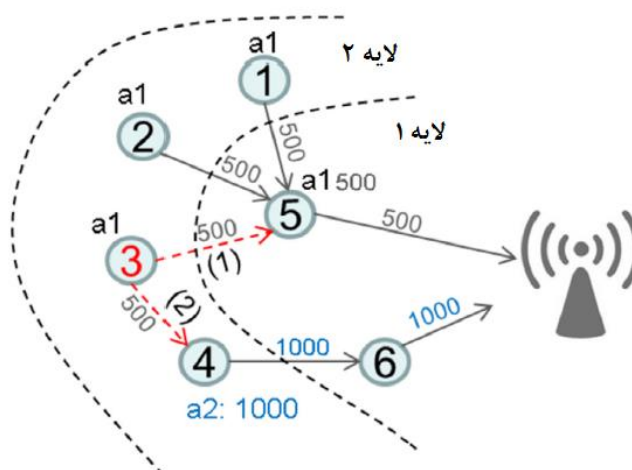
(a) رویکرد مرسوم با یک توپولوژی مسیریابی واحد



(b) CCR یک توپولوژی مسیریابی بر روی توپولوژی اصلی بر اساس محتوا ایجاد می کند

شکل ۵. معماری مسیریابی متعارف و مسیریابی CCR و تفاوت های عملیاتی

در شکل ۶، دو برنامه‌ی کاربردی (a_1 و a_2) در حال جمع‌آوری داده در یک شبکه متشکل از ۶ گره هستند. گره‌های ۱ تا ۳ در واقع گره‌های مبدأ برای a_1 و گره‌ی ۴ نیز گره‌ی مبدأ برای برنامه‌ی کاربردی a_2 است. فرض شده است که هر دو گره‌ی ۴ و ۵ می‌توانند a_1 و a_2 را پردازش کنند. فرض کنیم که گره‌ی ۳ در حال اجرای تابع هدف برای تعیین این که به کدامیک از دو گره‌ی ۴ یا ۵ باید ترافیک خود یعنی a_1 را ارسال کند، می‌باشد. واضح است که در این مثال، گره‌ی ۵ انتخاب خواهد شد چرا که بهره‌برداری بهتری دارد البته با توجه به این واقعیت که این گره تنها گذرگاه یک نوع برنامه‌ی کاربردی است و از این رو می‌تواند اطلاعات را تجمیع کند، بر خلاف گره‌ی ۴ که نمی‌تواند ترافیک را تجمیع کند چرا که در حال انتقال داده‌ها برای دو نوع متفاوت از برنامه‌ی کاربردی است.



شکل ۶. مثال‌هایی برای بهره‌برداری

تخمین طول عمر محلی بر اساس کیفیت پیوند

با توجه به ماهیت ذاتی رسانه‌های بی‌سیم، کیفیت پیوند می‌تواند تغییر کند. روش‌های مختلفی برای تخمین کیفیت پیوند وجود دارد. به عنوان مثال، ETX^{۱۳} (شمارش انتقال موردانتظار) [۵] یک پارامتر مشهور کیفیت پیوند با قابلیت اطمینان است که در اکثر پروتکل‌های مسیریابی از قبیل RPL استفاده شده است [۶]. ETX در واقع متوسط تعداد انتقال‌های موردنیاز برای یک حسگر است که بتواند به طور موفقیت‌آمیزی پیام را به مقصد تحویل دهد. از آنجا که مقدار ETX یک پیوند می‌تواند به راحتی به متوسط مقدار انرژی صرف شده برای انتقال هر بسته توسط پیوند تبدیل شود، به همین دلیل از این پارامتر برای ارزیابی کیفیت پیوند ارتباطی و در نهایت برای ارزیابی طول عمر شبکه استفاده شده است.

شبیه‌سازی CCR و ادغام آن در RPL^{۱۴}

پارامترهای شبیه‌سازی

در این شبیه‌سازی از یک شبکه، شامل ۲۰۰ گره فرض شده است که گره‌های آن به طور یکنواخت در منطقه‌ای با ۲۰۰ × ۲۰۰ مترمربع توزیع شده‌اند. سه برنامه‌ی کاربردی با نرخ‌های ناهمگن ترافیک در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. فرض شده است که گره‌ها در زمان شروع، سطوح انرژی نابرابری در حدود ۴ الی ۶ ژول دارند. انرژی مصرف شده به وسیله‌ی عملیات مختلف (در هر بایت) برای بستر Tmote Sky از مراجع [۸] و [۹] و آنچه در جدول ۱ لیست شده، گرفته شده است. در نهایت، عملکرد الگوریتم CCR پیشنهادی با یک الگوریتم درختی حداکثرسازی طول عمر متمرکز [۷] (درخت ایستا^{۱۵}) و روش معمولی پردازش متمرکز مقایسه شده است.

درخت ایستا یک الگوریتم متمرکز است که پیش از اینکه شبکه شروع به کار کند، یک درخت جمع‌آوری داده‌ها با حداکثر طول عمر را از قبل ایجاد می‌کند. با هر بار تغییر در شبکه مانند خرابی گره/پیوند، محاسبه‌ی مجدد درخت بهینه بسیار وقت‌گیر می‌باشد.

¹³ Expected Transmission Count (ETX)

¹⁴ Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks (RPL)

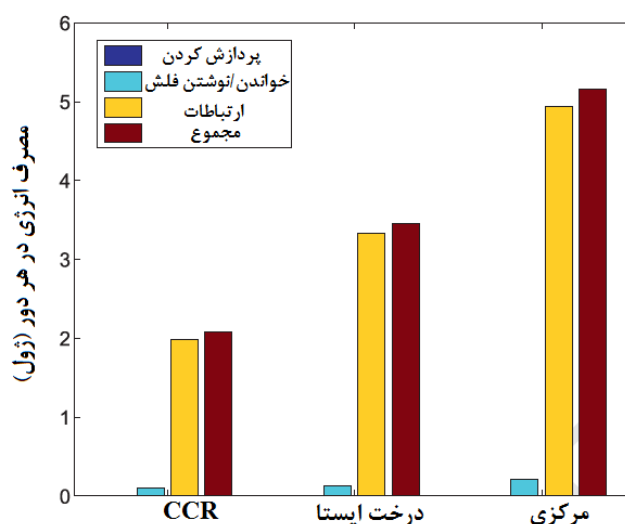
¹⁵ Static Tree

جدول ۱. مقایسه‌ی مصرف انرژی در عملیات مختلف برای هر بایت.

عملیات	مصرف انرژی (میکرو ژول)
انتقال	۹,۷۲
دریافت	۸,۲۲
نوشتن در حافظه فلش	۰,۴۴۲
خواندن از حافظه فلش	۰,۳۱۵
تجمیع داده‌ها	۰,۰۰۱۱

مصرف انرژی

شبیه‌سازی‌هایی برای شناسایی سهم هر یک از عملیات پردازش داده‌ها، خواندن/نوشتن فلش و ارتباطات در مصرف انرژی انجام شده است. شکل ۷ انرژی مصرف شده در هر دور عملیات پردازش، خواندن/نوشتن فلش و ارتباطات و مجموع کل این مقادیر را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشهود است انرژی مصرف شده به وسیله‌ی ارتباطات، سهم قابل توجهی از مصرف انرژی را نسبت به عملیات دیگر دارد. الگوریتم مرکزی تمام داده‌ها را جمع‌آوری کرده و سپس عملیات پردازش را انجام می‌دهد، در نتیجه این روش بیشترین هزینه‌ی ارتباطی را ارائه می‌کند. با بهره‌گیری از مزیت تجمیع داده‌ها به صورت محتوا محور جهت کاهش حجم داده‌هایی که باید انتقال یابند، CCR بیش از نیمی از انرژی صرف شده برای ارتباطات را در مقایسه با رویکرد مرکزی، و در حدود یک سوم انرژی صرف شده در مقایسه با رویکرد درخت ایستا صرفه‌جویی و ذخیره می‌کند. اگر چه تجمیع داده‌ها در داخل شبکه در رویکرد درخت ایستا نیز فعال است، ولی همچنان این روش هزینه‌ی ارتباطی بالاتری را در مقایسه با الگوریتم پیشنهادی تحمیل می‌کند. دلیل این امر نیز این است که روش درخت ایستا از یک رویکرد بهینه‌سازی مسیریابی متمرکز استفاده می‌کند و در یک محیط شبکه‌ی پویا، اینکه با هر بار تغییر ایجاد شده در شبکه مانند خرابی‌های گره/پیوند یا ورود یک برنامه‌ی کاربردی جدید، درخت بهینه دوباره محاسبه شود، می‌تواند کار وقت‌گیری باشد. بنابراین، عملکرد توپولوژی شبکه‌ی از پیش بهینه شده در رویکرد درخت ایستا در طول زمان کاهش می‌یابد. علاوه بر این، از آنجا که هزینه‌ی پردازش در شکل ۷ مقدار خیلی کوچکی است، متوجه می‌شویم که رویکرد مرکزی تنها ۳۱ میکروژول برای پردازش انرژی صرف می‌کند. این مقدار تنها نیمی از هزینه‌ی پردازشی در مقایسه با CCR و درخت ایستا است. نکته‌ی کلیدی که باید به آن توجه داشت این است که حتی یک افزایش کوچک در هزینه‌ی پردازشی برای CCR و درخت ایستا می‌تواند به معنی افزایش بزرگی در بهره‌های صرفه‌جویی انرژی در ارتباطات باشد.



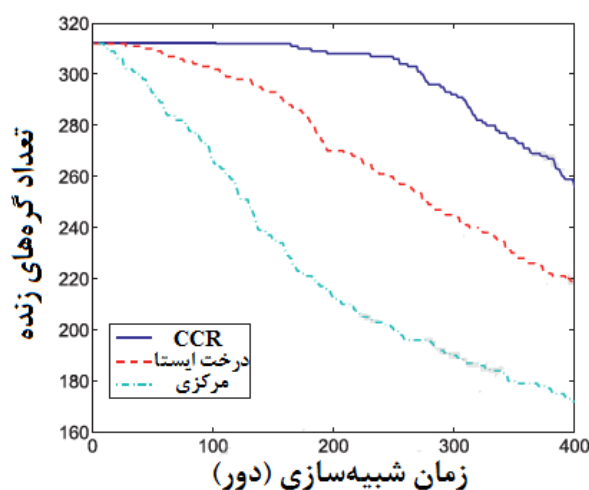
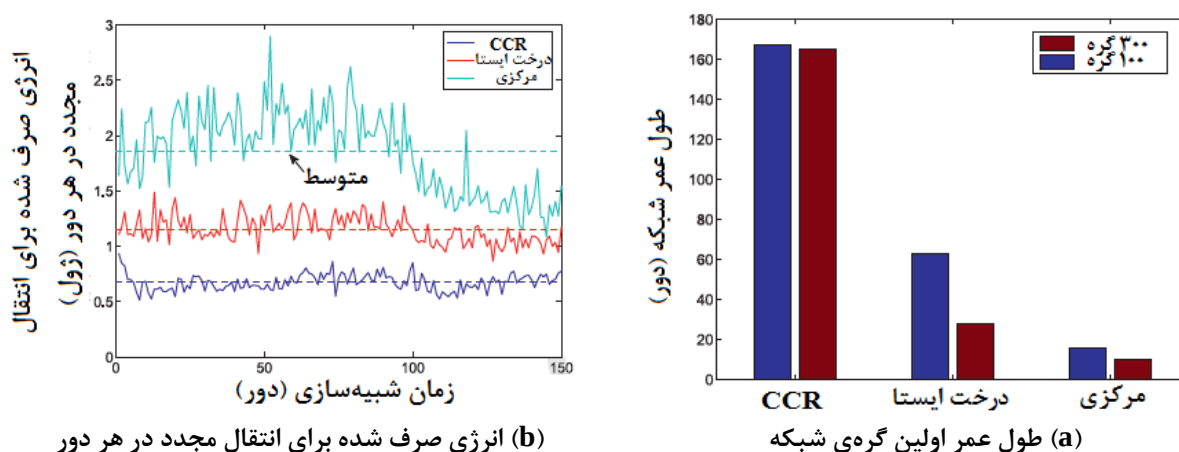
شکل ۷. مصرف انرژی در هر دور برای فرآیندهای مختلف

طول عمر شبکه

طول عمر شبکه به صورت مدت زمانی تعریف می‌شود که شبکه آغاز به کار می‌کند تا زمانی که اولین گره در اثر تخلیه‌ی انرژی از کار می‌افتد. همانطور که از شکل ۸ قسمت (a) آشکار است، CCR در مقایسه با دو روش دیگر، افزایش قابل توجهی را در طول عمر شبکه فراهم می‌کند. علاوه بر این، مشاهده می‌کنیم که وقتی مقیاس شبکه از ۱۰۰ گره به ۳۰۰ گره افزایش می‌یابد، روش CCR شکاف زمانی کوچکتری را نسبت به دو روش دیگر دارد. علت اصلی این امر در واقع توانایی CCR در کاهش مقدار قابل توجهی از ترافیک در شبکه با استفاده از تجمیع داده‌ها به صورت محتوا محور است.

علاوه بر این، شکل ۸ قسمت (b)، کل انرژی صرف شده برای انتقال‌های مجدد در هر دور شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشهود است، CCR کمترین مقدار انرژی را برای انتقال‌های مجدد صرف می‌کند. این مورد را نیز می‌توان به توانایی CCR برای تشکیل توپولوژی مسیریابی قابل اعتماد با در نظر گرفتن کیفیت پیوند نسبت داد. الگوریتم مرکزی به دلیل ترافیک سنگین بر روی پیوندها، بیشترین انرژی صرف شده برای انتقال‌های مجدد را دارد. با این حال، این مقدار در مرحله‌ی دوم به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. دلیل این امر نیز ناشی از این واقعیت است که تعداد گره‌های زنده در شبکه به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد، از این رو نسبت به دو روش دیگر ترافیک کمتری در شبکه تولید می‌شود.

در نهایت، تعداد گره‌های زنده بر حسب زمان شبیه‌سازی در شکل ۸ قسمت (c) نشان داده شده است. به وضوح، CCR منابع انرژی بیشتری را برای گره‌ها حفظ می‌کند که برای وسایلی با منابع محدود بسیار حیاتی و مهم است.

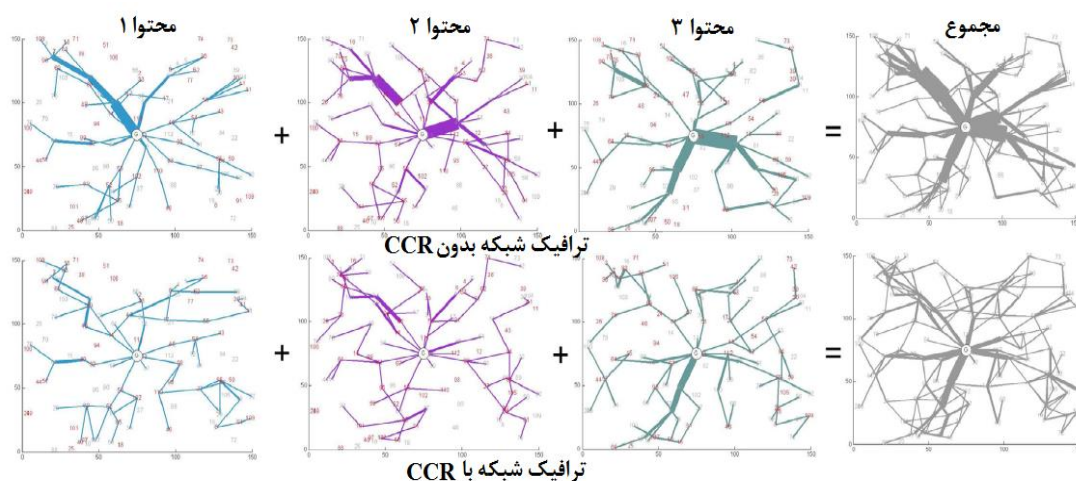


(c) تعداد گره‌های زنده در طول زمان شبیه‌سازی

شکل ۸. مقایسه‌ی طول عمر شبکه

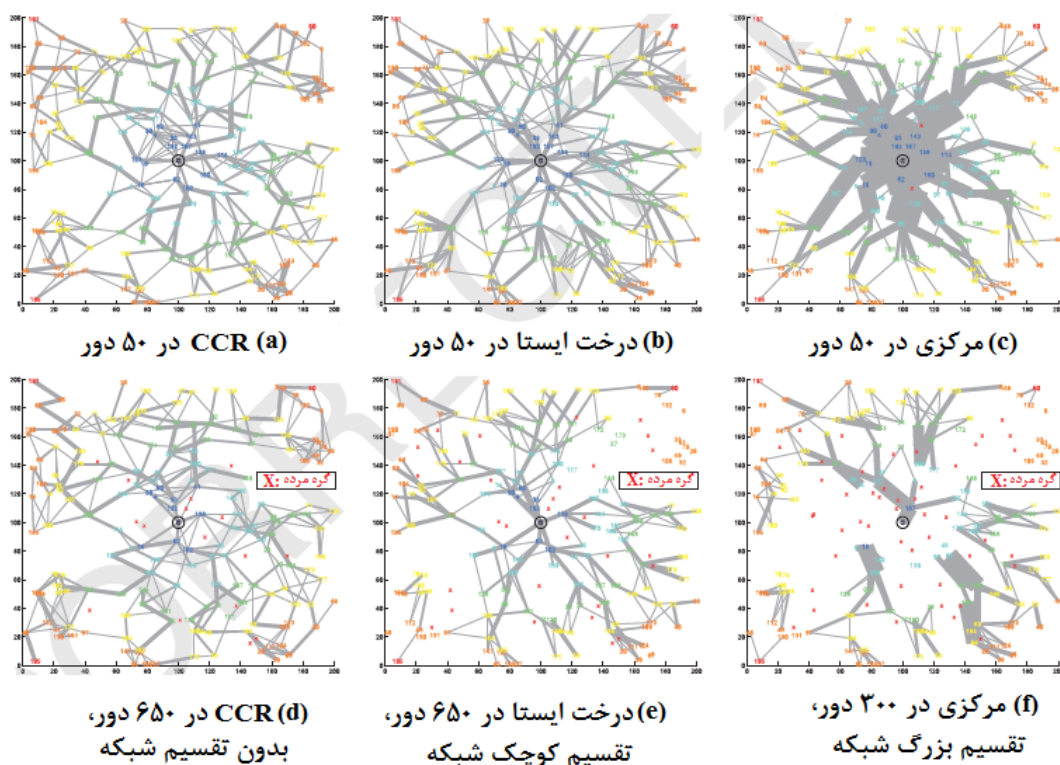
۴-۴. مقایسه‌ی گرافیکی ترافیک شبکه

شکل ۹ نقشه‌های ترافیک را برای یک شبکه‌ی شبیه‌سازی شده ارائه می‌دهد که این شبکه شامل گره‌هایی است که انواع مختلفی از محتواها را تولید می‌کنند. عرض خط در نقشه‌ی ترافیک نشان‌دهنده‌ی حجم داده‌های در حال عبور از پیوند است، به عنوان مثال، خط ضخیم‌تر یعنی ترافیک حجیم‌تری از آن در حال عبور است. گره‌هایی که در هر نقشه‌ی ترافیک محتوا با رنگ قرمز مشخص شده‌اند، گره‌هایی هستند که می‌توانند محتوای موردنظر را پردازش کنند. با استفاده از CCR، می‌توان مشاهده کرد که جریان‌های ترافیکی از یک محتوای یکسان به احتمال زیاد به سمت گره‌های پردازشی قرمز مسیردهی شده و داده‌های همبسته نیز به احتمال زیاد در داخل شبکه تجمع می‌شوند که همانطور که در شکل ۹ دیده می‌شود، به مقدار ترافیک بسیار کمتری منتهی می‌شود.



شکل ۹. نقشه‌های ترافیک شبکه با ۳ محتوای مختلف

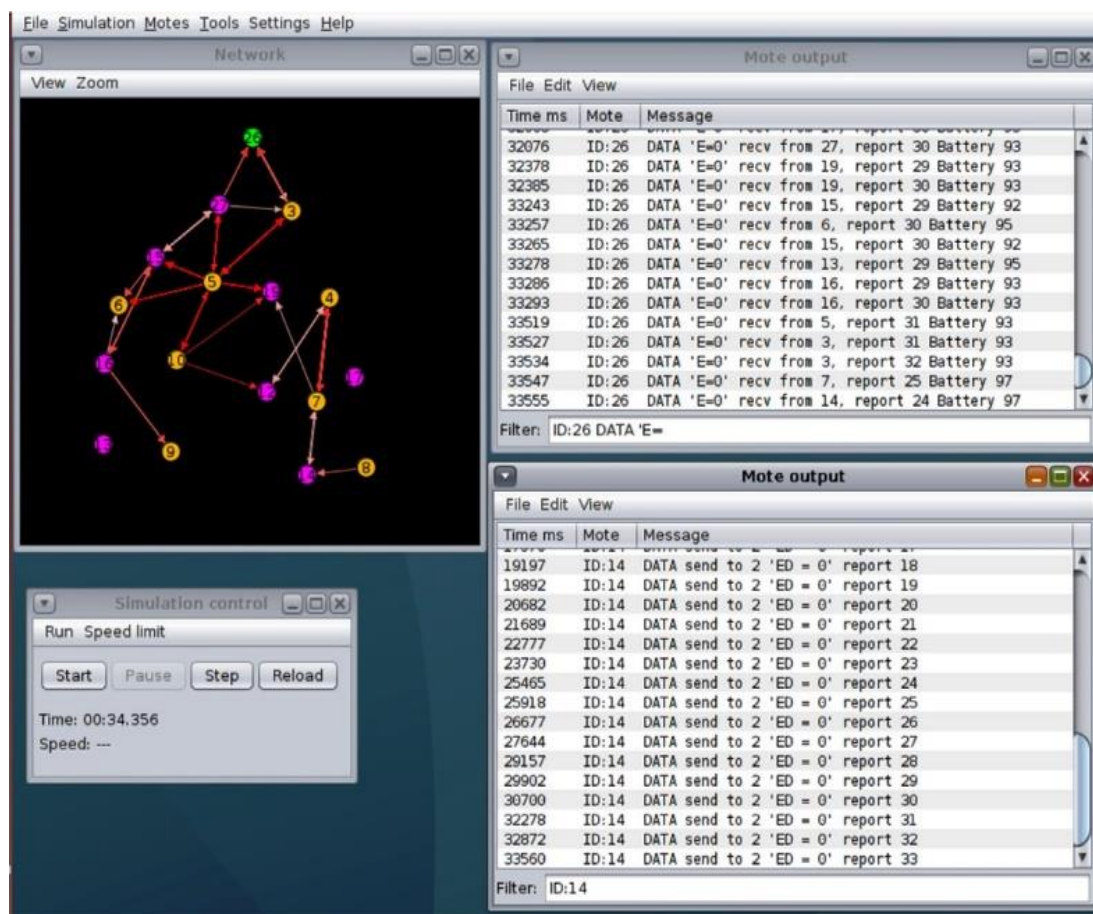
شکل ۱۰ مقایسه‌ی نقشه‌ی ترافیکی را در نمونه‌های زمانی مختلف عملکرد شبکه ارائه می‌کند. علامت 'x' گره‌ی مُرده‌ای را نشان می‌دهد که قبلاً انرژی آن تخلیه شده است. ما می‌توانیم مشاهده کنیم که رویکرد مرکزی در مقایسه با CCR ترافیک ارتباطی سنگین‌تری را دارد. علاوه بر این، از آنجا که آن دسته از گره‌های موجود در ناحیه که به مقصد نزدیکتر هستند، مجبورند که اطلاعات را برای نواحی بیرونی‌تر بازپخش کنند. به همین دلیل در روش مرکزی، ترافیک زیادی را می‌توان در مرکز شبکه مشاهده نمود. علاوه بر این، با مشاهده‌ی تعداد گره‌های مُرده در شکل ۱۰، به وضوح می‌توانیم بگوییم که CCR در صرفه جویی انرژی گره و همچنین ارائه‌ی پوشش کامل شبکه عملکرد بهتری دارد.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی گرافیکی از نقشه‌های ترافیک در نمونه‌های زمانی مختلف

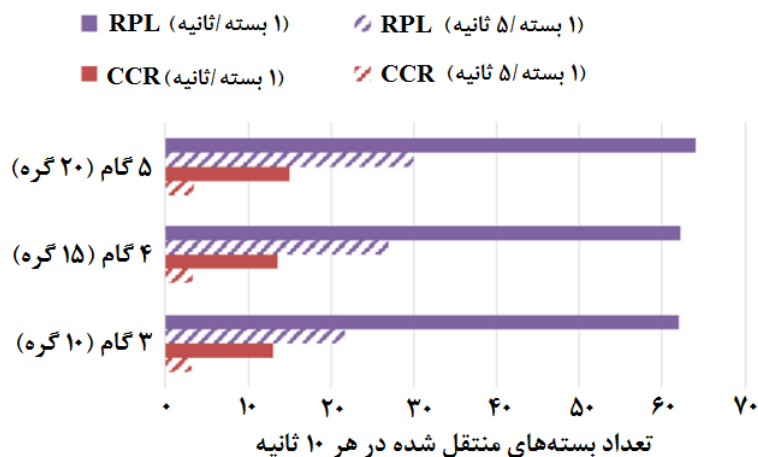
نتایج پیاده‌سازی

برای ارزیابی عملکرد CCR از ابزار شبیه‌سازی Contiki Cooja بر اساس بستر TelosB (که Tmote Sky نیز گفته می‌شود) استفاده شده و آزمایشها انجام شده است. در شکل ۱۱ تصویری از این شبیه‌ساز نشان داده شده است.

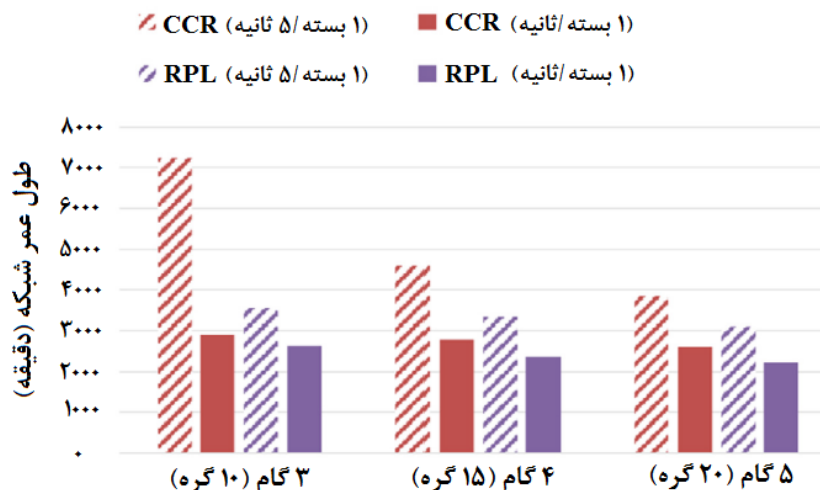


شکل ۱۱. ارزیابی CCR بر روی شبیه ساز Contiki Cooja

شکل ۱۲ تعداد متوسط بسته‌های انتقال یافته را در یک دوره‌ی زمانی ۱۰ ثانیه در شبکه نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده نمود که CCR توانایی کاهش قابل توجهی از مقدار ترافیک را دارد. در نتیجه، همانطور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، CCR انرژی کمتری را برای ارتباطات صرف کرده و طول عمر شبکه را نیز افزایش می‌دهد. اگر چه می‌توان متوجه شد که CCR بهتر از RPL طول عمر شبکه را افزایش می‌دهد، ولی بهره عملکرد در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی بدست آمده کاهش می‌یابد. علت اصلی این امر، سیگنالینگ پیام مبتنی بر RPL به منظور سازگار کردن آن با استاندارد است. با این حال، این سیگنالینگ هزینه‌های اضافی را بر روی سربار کنترلی تحمیل می‌کند.

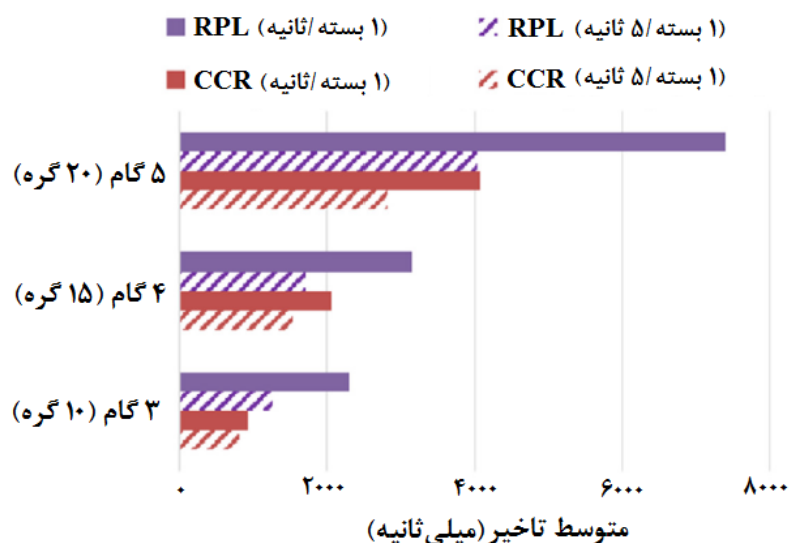


شکل ۱۲. نتایج آزمایشی - بهره تجمیع



شکل ۱۳. نتایج آزمایشی - طول عمر شبکه

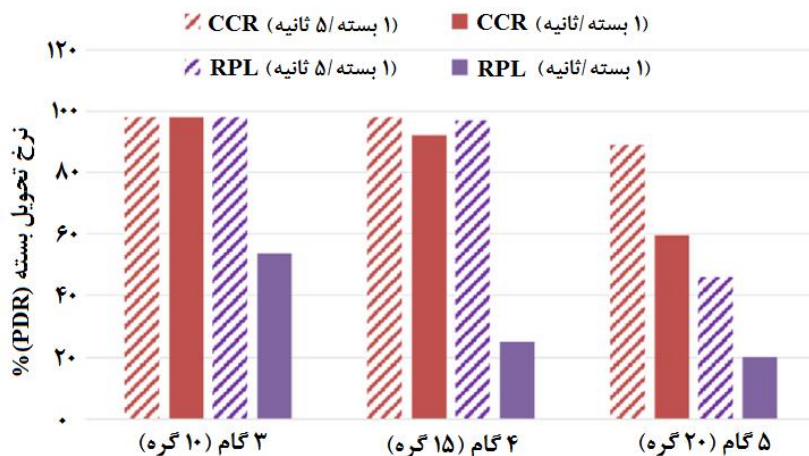
در آزمایشی دیگر، متوسط تاخیر بسته را اندازه‌گیری می‌کنیم. در این آزمایش، یک پیام خاص بر روی دورترین گرهی برگ تولید شده، و متوسط زمان دریافت این پیام بر روی گرهی ریشه ثبت می‌شود. به منظور داشتن یک اندازه‌گیری درست و عادلانه از تاخیر شبکه، این پیام خاص در CCR کش^{۱۶} نمی‌شود چرا که این عمل یک زمان انتظار اضافی را تحمیل می‌کند، در حالی که دیگر پیام‌ها در شبکه کش شده و پردازش می‌شوند. نتایج به دست آمده در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۴. نتایج آزمایشی - تاخیر شبکه

اگر چه وقتی تعداد گام‌ها افزایش یابد، در هر دو رویکرد (CCR و RPL) باعث افزایش تاخیر شبکه می‌شود، با این حال CCR عملکرد بهتری را هم در مورد نرخ داده‌ی پایین و هم در مورد نرخ داده‌ی بالا از خود نشان می‌دهد. دلیل این امر نیز به این علت است که با استفاده از CCR شبکه دچار ازدحام کمتری می‌شود، بنابراین یک تاخیر کم شبکه نیز می‌تواند حاصل شود. ما همچنین مشاهده می‌کنیم که میزان بهبود با افزایش مقیاس شبکه افزایش می‌یابد. با تنظیم ۵ گام (۲۰ گره) و نرخ داده‌ی بالا، CCR می‌تواند به اندازه‌ی دو برابر تاخیر شبکه را کاهش دهد. این امر، مقیاس‌پذیری CCR را در استقرارهای انبوه و متراکم نشان می‌دهد.

در آزمایشی دیگر، نرخ تحویل بسته را نیز اندازه‌گیری نموده و حاصل را در شکل ۱۵ نشان داده‌ایم. وقتی که تعداد گره‌ها تا ۲۰ افزایش می‌یابد، RPL اُفت عملکرد سریعی دارد. دلیل این امر نیز این است که ناحیه‌ی مرکزی با توجه به ترافیک سنگین شبکه دچار ازدحام شدیدی می‌شود، که RPL قادر به جا دادن و سازگار شدن با آن نیست. در مقابل، CCR همچنان در مورد نرخ داده‌ی پایین با ۲۰ گره به نرخ تحویل بسته‌ی بیش از ۹۰٪ و در مورد نرخ داده‌ی بالا نیز به نرخ تحویل بسته‌ی ۶۰٪ دست می‌یابد.



شکل ۱۵. نتایج آزمایشی - نرخ تحویل بسته.

منابع و مراجع

- [1] D. Datla, X. Chen, T. Tsou, S. Raghunandan, S. Hasan, J. Reed, C. Dietrich, T. Bose, B. Fette, J. Kim (2012), Wireless distributed computing: a survey of research challenges, IEEE Commun. Mag. 50 (1), 144–152, doi: 10.1109/MCOM.2012.6122545.
- [2] J. Yick, B. Mukherjee, D. Ghosal (2008), Wireless sensor network survey, Comput. Netw. 52 (12), 2292–2330.
- [3] E. Fasolo, M. Rossi, J. Widmer, M. Zorzi (2007), In-network aggregation techniques for wireless sensor networks: a survey, IEEE Wirel. Commun. 14 (2), 70–87, doi: 10.1109/MWC.2007.358967.
- [4] Y. Jin, P. Kulkarni, S. Gormus, M. Sooriyabandara (2012), Content centric and load-balancing aware dynamic data aggregation in multihop wireless networks, in: Proceedings of the IEEE 8th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob).
- [5] D.S.J. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, R. Morris (2003), A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing, in: Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '03), ACM, New York, NY, USA, pp. 134–146.
- [6] T. Winter, P. Thubert, et al (2012), Rpl: Ipv6 Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks, (rfc 6550), <http://www.ietf.org/rfc/rfc6550.txt>.
- [7] Y. Wu, Z. Mao, S. Fahmy, N. Shroff (2010), Constructing maximum-lifetime data-gathering forests in sensor networks, IEEE/ACM Trans. Netw. 18 (5), 1571–1584, doi: 10.1109/TNET.2010.2045896.
- [8] N. Tsiftes, A. Dunkels (2011), A database in every sensor, in: Proceedings of the 9th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '11), ACM, New York, NY, USA, pp. 316–332, doi: 10.1145/2070942.2070974.
- [9] S. Nath (2009), Energy efficient sensor data logging with amnesic flash storage, in: Proceedings of the International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '09), IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, pp. 157–168.