بهبود روش مسیریابی مبتنی بر محتوا در RPL با حضور گره‌های متحرک

آوا مهجوری[۱*]، فضل‌الله ادیب‌نیا[۲]
[۱]دانشگاه یزد، گروه مهندسی کامپیوتر، mahjouri@stu.yazd.ac.ir
[۲]دانشگاه یزد، گروه مهندسی کامپیوتر، fadib@yazd.ac.ir

چکیده: با وجود معرفی استانداردهایی در اینترنت اشیاء به عنوان یک شبکه کم‌توان و پراتلاف، همچنان چالش‌هایی در زمینه استفاده بهینه از منابع و مصرف انرژی در این شبکه‌ها وجود دارد. همچنین، با توجه به ماهیت برنامه‌های کاربردی در اینترنت اشیاء، لازم است که یک روش کارآمد برای پشتیبانی از تحرک گره‌های حسگر در این شبکه‌ها پیاده‌سازی شود. رویکرد مسیریابی مبتنی بر محتوا برای تجمیع ترافیک داده‌ای در شبکه با حضور گره‌های متحرک، برای انطباق با ماهیت پویای شبکه و مسائل ناشی از آن مانند تأخیر اتصال مجدد، سربار ارسال بسته‌های اضافی و اتلاف انرژی، نیازمند بهبود است. در این مقاله الگوریتم جدیدی ارائه شده است که بر پایه یک الگوریتم مدیریت تحرک با پیش‌بینی تحرک گره‌ها، ضمن بهینه‌سازی پاسخ به شرایط پویای شبکه، تجمیع بسته‌های تولیدی توسط گره‌های متحرک را به حداکثر می‌رساند. نتایج شبیه‌سازی در سیستم‌عامل ***Contiki*** با شبیه‌ساز ***Cooja*** نشان داده است که روش پیشنهادی عملکرد ***RPL*** را از نظر نرخ تحویل بسته، تاخیر اتصال مجدد، تأخیر انتها به انتها و مصرف انرژی شبکه بهبود می‌بخشد و بهترین عملکرد را در مقایسه داشته است.

کلید واژه‌ها: اینترنت اشیاء، پروتکل مسیریابی RPL، گره‌های متحرک، مسیریابی مبتنی بر محتوا

۱- مقدمه

ایده اصلی مفهوم اینترنت اشیاء، حضور فراگیر انواع اشیاء مانند RFID، حسگرها، محرک‌ها، تلفن‌های همراه و دستگاه‌های دیگر در جهان است که از طریق الگوهای آدرس‌دهی یکتا قادر به برقراری ارتباط با یکدیگر و همکاری با همسایگان خود برای دستیابی به اهداف مشترک هستند. برای تحقق این ایده، یکپارچگی فناوری‌های و راهکارهای ارتباطی مختلفی مورد نیاز است. فناوری‌های شناسایی و ردیابی، شبکه‌های حسگر و محرک سیمی و بی‌سیم، پروتکل‌های ارتباطی پیشرفته و هوش توزیع‌شده برای اشیاء هوشمند از مهم‌ترین الزامات طراحی شبکه اینترنت اشیاء است. فراهم کردن امکان برقراری ارتباط با یکدیگر برای اشیاء و انجام پردازش بر روی اطلاعاتی که از محیط اطراف درک می‌کنند، به طور ضمنی به معنی امکان پشتیبانی از محیط‌های مختلف با طیف وسیعی از برنامه‌های کاربردی در حوزه‌های مختلف شامل حمل و نقل و تدارکات، سلامت، محیط هوشمند (خانه، دفتر، کارخانه) و حوزه شخصی و اجتماعی است [۱].

مسیریابی یکی از ویژگی‌های کلیدی شبکه برای محیط‌های اینترنت اشیاء است؛ چندین چالش فنی، طراحی پروتکل‌های مسیریابی برای ارتباطات ماشین به ماشین یا M2M را پیچیده می‌سازد. اول اینکه بیشتر اشیاء ارتباطی از نظر ظرفیت محاسبات، حافظه و انرژی دچار محدودیت منابع هستند. علاوه بر این، پروتکل مسیریابی باید در شبکه‌های بسیار بزرگ عمل نماید. در نهایت، فناوری‌های ارتباطی که به طور معمول برای ارتباطات M2M مورد استفاده قرار می‌گیرند با نرخ داده کم، تلفات بسته مکرر و شرایط کانال متفاوت بر حسب زمان توصیف می‌شوند. بر این اساس، راه‌حل‌های مناسب مسیریابی برای ارتباطات M2M باید مقیاس‌پذیر و قابل‌اعتماد باشد و مصرف منابع را به حداقل برساند [۲].

اخیراً، گروه کاری ROLL در IETF بر روی طراحی یک پروتکل مسیریابی مخصوص شبکه‌های اشیاء هوشمند IP بر اساس یک تحلیل دقیق از نیازمندی‌های مسیریابی در برنامه‌های کاربردی مختلف اینترنت اشیاء (مانند شبکه‌های هوشمند، اتوماسیون صنعتی، شبکه‌های خانگی و اتوماسیون ساختمان)، متمرکز شده است [۳]، [۴]، [۵]، [۶]. پروتکلی که قادر به عملکرد در شبکه‌های بزرگ-مقیاس و متشکل از دستگاه‌های کوچکی باشد که امکان برقراری ارتباط بر روی شبکه‌های کم‌توان و پراتلاف یا LLN را داشته باشند. این پروتکل با نام RPL به گونه‌ای طراحی شده است که می‌تواند با جریان‌های ترافیکی تولیدشده در گره‌های RPL به سمت نقطه جمع‌آوری یا

ریشه به شکل مؤثری عمل نماید؛ همچنین، از ترافیک در جهت معکوس و برخی از قابلیت‌های پایه‌ای برای جریان‌های نقطه به نقطه پشتیبانی کند [۲].

ساختار مقاله به این شرح است. در بخش دوم، بعد از تعاریف پایه مرتبط، به برخی از روش‌های پیشین اشاره شده است. در بخش سوم روش پیشنهادی تبیین گردیده است. بخش چهارم، به ارزیابی و تحلیل نتایج شبیه‌سازی اختصاص یافته است و در بخش پایانی نتیجه‌گیری مقاله آمده است.

۲- مروری بر روش‌های پیشین

۲-۱- تعاریف پایه

RPL یک پروتکل بردار فاصله و مسیریابی مبتنی بر منبع است که برای کار بر روی مکانیزم‌های مختلف لایه پیوند داده از جمله IEEE 802.15.4 PHY و MAC طراحی شده است. هدف این پروتکل، شبکه‌های مبتنی بر جمع‌آوری است که گره‌ها به صورت دوره‌ای، اندازه‌گیری‌ها را به نقطه جمع‌آوری ارسال می‌کنند [۷].

یکی از ویژگی‌های کلیدی در RPL این است که یک راهکار ویژه مسیریابی برای شبکه‌های کم‌توان و پراتلاف به معنی شبکه‌های با منابع بسیار محدود از لحاظ انرژی، محاسبات و پهنای باند که آنها را به شدت در معرض اتلاف بسته قرار می‌دهد، ارائه می‌کند. یک لینک پراتلاف با نرخ خطای بیت بالا و زمان طولانی غیرقابل‌دسترسی مشخص می‌شود که روی طراحی پروتکل مسیریابی تأثیر زیادی می‌گذارد. در واقع، پروتکل RPL به گونه‌ای طراحی شده است که با شرایط شبکه سازگار باشد و مسیرهای جایگزین را زمانی که مسیرهای پیش‌فرض غیرقابل دسترسی هستند، ایجاد نماید [۷].

مسیرهای RPL برای جریان‌های ترافیکی دوسویه به یک یا چند ریشه که به عنوان گره چاهک برای توپولوژی عمل می‌کنند، بهینه شده است. در نتیجه، RPL یک توپولوژی را به عنوان گراف غیرمدور جهت‌دار یا DAG سازماندهی می‌کند؛ به نحوی که یک DAG به یک یا چند DAG مقصدگرا یا DODAG، تقسیم می‌شود. یک RPLInstanceID مجموعه‌ای از یک یا چند DAG مقصدگرا را مشخص می‌کند. یک شبکه ممکن است چندین RPLInstanceID داشته باشد که هر کدام مجموعه‌ای مستقل از DODAGها را تعریف می‌کند و ممکن است برای توابع هدف یا برنامه‌های کاربردی مختلفی بهینه شده باشد. مجموعه DODAGهای مشخص‌شده توسط یک RPLInstanceID یک instance نامیده می‌شود [۸].

پیام DIO توسط ریشه DODAG برای ساختن یک DAG جدید به صورت چندپخشی از طریق ساختار DODAG به گره‌هایی که در محدوده‌اش قرار دارند، ارسال می‌شود. گره‌های همسایه گره ریشه بعد از دریافت و به‌روزرسانی بعضی از اطلاعات این پیام، آن را برای همسایگان خود ارسال می‌کنند. درواقع، پیام DIO شامل اطلاعات شبکه است و به گره دریافت‌کننده، امکان شناسایی یک RPL instance و پارامترهای پیکربندی آن را می‌دهد. با توجه به این اطلاعات، گره‌ها برای پیوستن به DODAG تصمیم می‌گیرند و یک مجموعه والد DODAG را انتخاب می‌کنند. پس از شکل‌گیری گراف، گره‌ها به صورت متناوب بر اساس یک timer به نام trickle timer، بسته‌های DIO را برای همسایگان خود می‌فرستند. پیام DAO هم برای انتشار اطلاعات مقصد به سمت ریشه در طول DODAG استفاده می‌شود. پیام DIS برای درخواست یک پیام DIO از یک گره برای پیوستن به توپولوژی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷]، [۸].

۲-۲- مدیریت تحرک

ME-RPL روشی است که برای مدیریت تحرک پروتکل RPL ارائه شده است که از رویکرد مدیریت پویای DIS بهره می‌برد. در واقع فواصل زمانی ارسال پیام‌های DIS بسته به شرایط شبکه تغییر می‌کند. به بیان دقیق‌تر این روش، نرخ تغییر والد برگزیده را به عنوان تنها پارامتر برای بی‌ثباتی که نشان‌دهنده تحرک گره در شبکه است در نظر می‌گیرد. به گونه‌ای که هر چه نرخ انتخاب والد برگزیده جدید بیشتر باشد، فواصل زمانی بین ارسال پیام‌های DIS کمتر می‌شود. در این روش، ارسال پیام‌های DIS می‌تواند منجر به تنظیم مجدد زمان‌سنج trickle همه گره‌ها در محدوده موردنظر شود که همیشه موردنیاز نیست؛ به این دلیل که باعث ارسال چندین پیام DIO و درنتیجه ایجاد سربار اضافی می‌شود، درصورتی که گره متحرک هنوز اتصالش را از دست نداده است [۹].

روش CO-RPL، شبکه را به نواحی دایره‌ای متمرکز در اطراف ریشه به نام کورونا تقسیم می‌کند. هر گره در هر زمان تنها به یک کورونا تعلق دارد. گره ریشه پیام‌های DIO را به صورت دوره‌ای ارسال می‌کند تا از موقعیت گره‌ها به صورت بلادرنگ مطلع شود. فاصله زمانی بین ارسال این پیام‌ها بر اساس سرعت گره‌ها تنظیم می‌شود. بعد از کشف هر بی‌ثباتی، گره‌های

همسایه پیام‌های DIO را بدون انتظار برای انقضای زمان‌سنج می‌فرستند. این پروتکل از اتلاف بسته‌ها تا حدود زیادی جلوگیری می‌کند؛ ولی باعث افزایش سربار پیام‌های کنترلی و مصرف انرژی گره‌ها می‌شود [۱۰].

RT یک روش مدیریت تحرک دیگر است که تمرکزش بر روی گره‌هایی است که در ارتباط با گره‌های متحرک قرار دارند؛ بنابراین پیکربندی کل شبکه را تغییر نمی‌دهد. یک گره متحرک، وضعیت تحرک خود را در پیام کنترلی DAO با یک فیلد پرچم تحرک، مشخص و تبلیغ می‌کند. در این روش برای پشتیبانی از گره‌های متحرک، یک زمان‌سنج trickle معکوس پیشنهاد شده است که براساس آن فواصل ارسال پیام‌های DIO از حداکثر مقدار مجاز شروع و پس از هر بار ارسال پیام DIO جدید نصف می‌شود. این مکانیزم بر این فرض متکی است که بعد از اتصال گره متحرک به یک والد، باقی ماندن در ناحیه این والد جدید در ابتدا دارای احتمال بیشتری است. نویسندگان بیان کرده‌اند که این روش سبب کاهش تأخیر اتصال مجدد و افزایش نرخ تحویل بسته می‌شود و درعین حال سربار پیام‌های کنترلی را پایین نگه می‌دارد [۱۱].

۲-۳- روش CCR برای RPL

در روش CCR یا مسیریابی مبتنی بر محتوا، هر گره بر اساس محتوای یک پیام، از طریق اجرای تابع هدف تعریف‌شده در الگوریتم CCR یک مدخل مسیریابی جداگانه برای هر نوع محتوا ایجاد می‌کند. ایده اصلی این است که انواع ناهمگون محتوا از طریق لینک‌های ارتباطی قابل اطمینان به گره‌هایی که قادر به تجمیع و پردازش اطلاعات و سپس ارسال خلاصه اطلاعات هستند، مسیریابی شوند که باعث کاهش ترافیک شبکه و مصرف انرژی گردد [۱۲].

۳- روش پیشنهادی

در الگوریتم RT، رویکرد ساده، سبک‌وزن و کارایی برای پشتیبانی از تحرک گره‌ها در پروتکل RPL ارائه شده است. نرخ پایین اتلاف بسته‌ها و مصرف انرژی محدود از دستاوردهای این روش است. در این مقاله روشی برای بهبود پیش‌بینی تحرک گره‌ها در الگوریتم RT پیشنهاد شده است که به همراه رویکرد تجمیع محتوای ارائه‌شده در روش CCR، از مزیت‌های هر دو روش استفاده و به بیان دیگر، قابلیت‌های مدیریت تحرک و مسیریابی با تجمیع محتوا را همزمان پشتیبانی می‌کند.

در پروتکل RT، پس از اینکه گره متحرک پیام DIO را دریافت کرد، یک زمان‌سنج را تنظیم می‌کند. اگر این زمان‌سنج منقضی شود و DIO جدیدی از والد دریافت نشود، گره متحرک والد قبلی خود را حذف می‌کند. پس از آن برای شناسایی والد جدید، اقدام به ارسال پیام‌های DIS در محدوده همسایگی خود می‌کند و منتظر دریافت پیام‌های DIO از گره‌های همسایه خود و ایجاد اتصال با والد جدید می‌ماند.

خلاصه روش پیشنهادی، به این شرح است که بعد از منقضی شدن زمان‌سنج، گره متحرک وارد فاز انتخاب و تغییر والد می‌شود. در این فاز ابتدا گره متحرک بسته‌های DIS را به همسایه‌های خود ارسال می‌کند و سپس زمان‌سنج دیگری را فعال می‌کند. در این مرحله درست بعد از منقضی شدن این زمان‌سنج والد جدید براساس تابع هدف انتخاب خواهد شد. همچنین از معیار RSSI یا شاخص قدرت سیگنال برای وارد شدن به فاز انتخاب و تغییر والد استفاده شده است؛ به نحوی که اگر RSSI بسته دریافتی توسط گره متحرک از مقدار آستانه‌ای کمتر باشد، نشان‌دهنده فاصله زیاد والد و گره متحرک است. درغیراین صورت، گره متحرک افزایش یا کاهش فاصله‌اش با گره والد را از طریق مقایسه مقدار RSSI فعلی و قبلی تشخیص می‌دهد. درصورتی که این فاصله درحال افزایش باشد، میانگین متحرک وزن‌دار نمایی اختلاف RSSIها را به‌روزرسانی می‌کند. در حالتی هم که مجموع RSSI فعلی با میانگین محاسبه‌شده از مقدار آستانه‌ای کمتر باشد، وارد فاز انتخاب و تغییر والد می‌شود.

در پروتکل CCR، مسیریابی و انتخاب والد براساس محتوا انجام می‌شود. در واقع هر گره، والدی را برمی‌گزینند که بتواند داده‌های ارسالی آن را تجمیع نماید. در این شرایط، وجود گره متحرک وضعیت را پیچیده می‌کند؛ زیرا اگر گره متحرک والد موردنظر را نیابد، بسته‌هایش از دست می‌روند. تغییری که در روش پیشنهادی برای رفع این مشکل ایجاد شده به این صورت است که گره‌های همسایه‌ای که بتوانند داده تولیدی گره متحرک را تجمیع کنند برای انتخاب در اولویت قرار می‌گیرند و براساس تابع هدف CCR، به عنوان والد انتخاب می‌شوند. حال درصورت عدم دسترسی به چنین والدی، گره متحرک یکی از همسایه‌های خود را برمبنای تابع هدف جدیدی انتخاب می‌کند و در این حالت بسته‌ها به صورت عادی و بدون شرکت در فرآیند تجمیع به سمت ریشه هدایت می‌شوند.

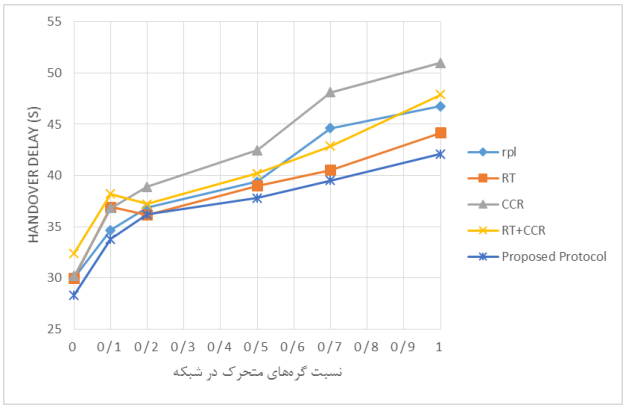
۴- ارزیابی و تحلیل نتایج

در این بخش نتایج شبیه‌سازی‌ها در قالب نمودار آمده است. شبیه‌ساز مورد استفاده برای ارزیابی، شبیه‌ساز Cooja در سیستم‌عامل Contiki به عنوان پرکاربردترین ابزار شبیه‌سازی می‌باشد [۱۳]، [۱۴]، [۱۵].

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، چهار روش شامل RPL به عنوان پروتکل پایه، CCR، RT و ترکیب CCR و RT در مقایسه براساس معیارهای نرخ تحویل بسته‌ها، تأخیر انتها به انتها، تأخیر اتصال مجدد و میزان مصرف انرژی شرکت داده شده‌اند.

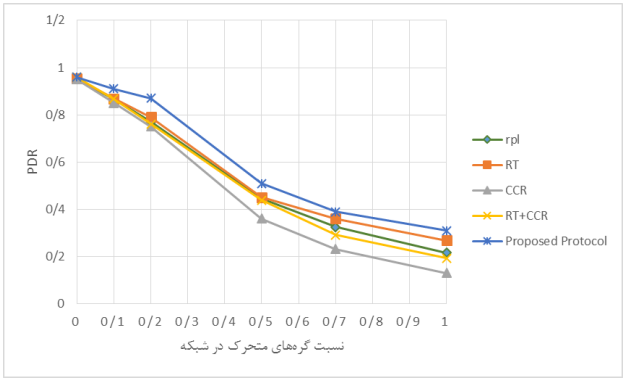
شبیه‌سازیهای صورت‌گرفته در شبکه‌هایی با ۶۰ گره فرستنده اطلاعات انجام شده است که در فواصل ۴۰ متری و در یک چیدمان مربعی ۱۲ × ۵ قرار گرفته‌اند. در این شبکه‌ها نسبت تعداد گره‌های متحرک به کل گره‌ها متغیر فرض شده است.

در شکل ۱ مشاهده می‌شود که در تمامی روش‌ها، با افزایش نسبت گره‌های متحرک در شبکه تأخیر اتصال مجدد افزایش یافته است. روش پیشنهادی پایین‌ترین تأخیر اتصال مجدد را دارد؛ زیرا علاوه بر استفاده از مکانیزم پیش‌بینی موجود در RT برای پیش‌بینی خروج از محدوده والد، از تغییر روند RSSI بسته‌های دریافتی از گره والد نیز استفاده می‌کند و به طور دقیق‌تر و سریع‌تری خروج را پیش‌بینی می‌کند که همین امر تأخیر اتصال مجدد را کاهش می‌دهد.



شکل ۱: نمودار تأخیر اتصال مجدد برحسب نسبت گره‌های متحرک در شبکه

در شکل ۲ مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی بیشترین میزان ارسال موفق داده‌ها را در مقایسه با روش‌های دیگر داشته است؛ چون تأخیر اتصال مجدد آن به نسبت دیگر روش‌ها کمینه بوده است.



شکل ۲: نمودار نرخ تحویل بسته برحسب نسبت گره‌های متحرک در شبکه

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش جدیدی بر پایه پروتکل RPL به منظور مدیریت شرایط پویای شبکه در حضور گره‌های متحرک در ضمن مسیریابی مبتنی بر محتوا ارائه گردید. در روش پیشنهادی بهره‌گیری از شاخص RSSI، موجب تسریع در پیش‌بینی تحرک گره‌ها و در نتیجه آن کاهش تأخیر اتصال مجدد و افزایش نرخ تحویل بسته‌ها گردید. از طرف دیگر تغییر و سازگار نمودن روش مسیریابی مبتنی بر محتوا برای ادغام با روش پیشنهادی، سبب کاهش تأخیر انتها به انتها و توان مصرفی شد.

مراجع

[1] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The Internet of Things: A survey," *Computer Networks*, vol.54, no. 15, pp. 2787-2805, 2010.
[2] E. Borgia, "The Internet of Things vision: Key features, applications and open issues," *Computer Communications*, vol. 54, pp. 1-31, 2014.
[3] M. Dohler, et al., "Urban wsns routing requirements in low power and lossy networks," no. RFC 5548, 2009.
[4] K. Pister, et al., "Industrial Routing Requirements in Low Power and Lossy Networks," no. RFC 5673, 2009.
[5] A. Brandt, J. Buron, and G. Porcu, "Home automation routing requirements in low-power and lossy networks," no. RFC 5826, 2010.
[6] J. Martocci, et al., "Building automation routing requirements in low-power and lossy networks," no. RFC 5867, 2010.
[7] O. Gaddour and A. Koubâa, "RPL in a nutshell: A survey," *Computer Networks*, vol. 56, no. 14, 2012.
[8] T. Winter, et al., "RPL: IPv6 Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks," no. RFC 6550, 2012.
[9] I. E. Korbi, M. B. Brahim, C. Adjih, and L. A. Saidane, "Mobility Enhanced RPL for Wireless Sensor Networks," in *Third International Conference on The Network of the Future (NOF)*, 2012, pp. 1-8.
[10] O. Gaddour, A. Koubâa, and M. Abid, "Quality-of-service aware routing for static and mobile IPv6-based low-power and lossy sensor networks using RPL," *Ad Hoc Networks*, vol. 33, pp. 233-256, 2015.

[11] C. Cobarzan, J. Montavont, and T. Noel, "Analysis and Performance Evaluation of RPL under Mobility," in *Computers and Communications (ISCC)*, 2014, pp. 1-6.
[12] Y. Jin, S. Gormus, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Content centric routing in IoT networks and its integration in RPL," *Computer Communications*, Vol. 89, pp. 87-104, 2016.
[13] A. Dunkels, B. Gronvall, and T. Voigt, "Contiki - a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors," in *Proceedings of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks*, 2004, pp. 455-462.
[14] N. Tsiftes, J. Eriksson, N. Finne, F. Österlind, J. Höglund, and A. Dunkels, "A framework for low-power IPv6 routing simulation, experimentation, and evaluation," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2011, pp. 479–480.
[15] H. Kim, J. Ko, D. E. Culler, and J. Paek, "Challenging the IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL): A Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 4, 2017.