

Vol. 13/ No. 50/Winter 2024

Research Article

A-RPL: Routing Algorithm with the Ability to Support Mobility in Internet of Things Networks

Forough Fazli, Ph.D. Student¹  | Maisam Mansubbassiri, Assistant Professor^{2*}  | Farshad Babazadeh, Assistant Professor³ 

¹Ph.D. Student, Department of Electronics, College of Electrical Engineering, Yadegar-e-Imam Khomeini (RAH) Shahre Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
foroogh_fazly@yahoo.com

²Faculty Member, Department of Electronics, College of Electrical Engineering, Yadegar-e-Imam Khomeini (RAH) Shahre Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
m.bassiri@segaltech.com

³Faculty Member, Department of Electronics, College of Electrical Engineering, Yadegar-e-Imam Khomeini (RAH) Shahre Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
babazadeh@um.ac.ir

Correspondence

Maisam Mansubbassiri, Assistant Professor of Electronics, College of Electrical Engineering, Yadegar-e-Imam Khomeini (RAH) Shahre Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
m.bassiri@segaltech.com

Received: 21 December 2022

Revised: 15 February 2023

Accepted: 8 March 2023

Abstract

Quick development of technologies and emergence of Internet of Things technology that can link everything environment us is one of the most amazing developments environ the universe. Need to connect and manage fixed and mobile nodes in this type of networks in order to create a proper interaction among them, addition to solving many serious limitations, has caused researchers to address various challenges of this technology. One of the most important challenges is to provide an efficient routing protocol that is able to manage different aspects of network efficiency alongside manages mobility of nodes and dynamic topology of network. RPL (Routing Protocol for Low Power & Lossy Networks) is one of the famous routing protocols is proposed for internet of things networks. This protocol is designed specifically for Internet of Things networks with fixed nodes, so we developed a new routing algorithm called A-RPL to support mobility and solved some challenges caused by mobility. Our algorithm works better than some superior algorithms were proposed in recent years, because they still suffer from various disadvantages, especially for mobile networks.

Keywords: IoT, Routing, RPL, Mobility, AHP.

Highlights

- Using an effective method to detect poor performance due to network mobility.
- Considering multiple parameters simultaneously to select the best path (as possible as) for each node based on multiple aspects of network performance.
- Using the multi-criteria decision-making technique in the routing process, which leads to wiser decision-making and better route selection for nodes.

Citation: F. Fazli, M. Mansubbassiri, and F. Babazadeh, "A-RPL: Routing Algorithm with the Ability to Support Mobility in Internet of Things Networks," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 13, no. 50, pp. 11–32, 2023, doi: 10.30495/jce.2023.1975641.1183 (in Persian).

مقاله پژوهشی

A-RPL: الگوریتم مسیریابی با قابلیت پشتیبانی از تحرک در شبکه‌های اینترنت اشیا

فروغ فضل^۱ | میثم منسوب بصیری^{۲*} | فرشاد بابازاده^۳ ID

چکیده:

توسعه سریع فناوری‌ها و ظهور فناوری اینترنت اشیا که می‌تواند همه‌چیز را در محیط اطراف ما به یکدیگر متصل کند، یکی از شگفت‌انگیزترین تحولات جهان است. نیاز به اتصال و مدیریت گره‌های ثابت و متحرک در این نوع شبکه‌ها به‌منظور ایجاد تعامل مناسب میان آن‌ها، علاوه بر رفع بسیاری از محدودیت‌های جدی، سبب شده است تا محققان به چالش‌های مختلف این فناوری بپردازند. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها ارائه یک پروتکل مسیریابی کارآمد است که بتواند جنبه‌های مختلف کارایی شبکه را در کنار مدیریت تحرک گره‌ها و توپولوژی پویای شبکه مدیریت کند. پروتکل RPL (پروتکل مسیریابی برای شبکه‌های کم‌توان و با اتلاف) یکی از پروتکل‌های مسیریابی معروفی است که برای شبکه‌های اینترنت اشیا پیشنهاد شده است. این پروتکل به طور خاص برای شبکه‌های اینترنت اشیا با گره‌های ثابت طراحی شده است، بنابراین، الگوریتم مسیریابی جدیدی به نام A-RPL را برای پشتیبانی از تحرک ایجاد کردیم و برخی از چالش‌های ناشی از تحرک را حل کردیم. الگوریتم ما بهتر از برخی از الگوریتم‌های برتر پیشنهاد شده در سال‌های اخیر کار می‌کند، زیرا الگوریتم‌های ارائه شده همچنان از معایب مختلفی خصوصاً برای شبکه‌های متحرک رنج می‌برند.

کلید واژه‌ها: اینترنت اشیا، مسیریابی، RPL، تحرک، AHP

^۱ دانشجوی دکتری، گروه الکترونیک، واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، forough_fazly@yahoo.com

^۲ عضو هیات علمی، گروه الکترونیک، واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، m.bassiri@segaltech.com

^۳ عضو هیات علمی، گروه الکترونیک، واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، babazadeh@um.ac.ir

نویسنده مسئول

* میثم منسوب بصیری، استادیار، گروه الکترونیک، واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، m.bassiri@segaltech.com

تاریخ دریافت: ۳۰ آذر ۱۴۰۱

تاریخ بازنگری: ۲۶ بهمن ۱۴۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۷ اسفند ۱۴۰۱

<https://doi.org/10.30495/jce.2023.1975641.1183>

۱- مقدمه

امروزه تجهیزات هوشمند با پردازنده‌های تعبیه شده قدرتمند و حسگرهای متعدد، دنیای هوشمند اطراف ما را شکل داده‌اند. اینترنت اشیا به سرعت در حال رشد است و تلاش می‌کند تا این تجهیزات را تا حد امکان به‌سادگی و به‌طور مؤثر به یکدیگر متصل کند تا یک بستر هوشمند برای خدمات در زمینه‌های مختلف با کمک اطلاعات بسیار دقیق ایجاد کند. اینترنت اشیا گستره وسیعی از حوزه‌ها را پوشش می‌دهد و به صنایع مختلف نفوذ کرده است. آنچه منجر به توسعه روزافزون اینترنت اشیا شده است، انعطاف‌پذیری ارتباط در میان هزاران تجهیز هوشمند ثابت و متحرک است که هرکدام داده‌های موردنیاز کاربران مختلف را فراهم می‌کنند؛ بنابراین، افزایش تراکم تجهیزات متحرک از یک‌سو و تحمیل نیاز به ایجاد ارتباط بین اشیا زیاد با حسگرهای بی‌شمار در محدوده‌ای وسیع از سوی دیگر، نیاز به طراحی یک پروتکل مسیریابی مناسب و ممکن ساختن فرایند انتخاب مسیر مناسب از گره مبدأ به گره مقصد را به‌عنوان مسئولیت اصلی لایه شبکه الزام می‌نماید [۱]؛ اما فرایند انتخاب مسیر مناسب برای انتقال داده‌ها از فرستنده به گیرنده، وابسته به معیارهای کارایی، با مشکلات متعددی مواجه می‌شود و بنابراین لازم است تا برای خدمات‌رسانی به کاربران و صنایع وابسته به تجهیزات دارای قابلیت تحرک، در هنگام فرایند طراحی پروتکل مسیریابی برای شبکه‌های اینترنت اشیا متحرک، متناسب با نوع کاربرد موردنظر، موانع تشخیص داده شوند. گم‌شدن بسته‌های داده یا با تأخیر رسیدن آن‌ها برخی از این موانع هستند؛ بنابراین، به دنبال تشخیص و پیش‌بینی موانع، باید علل مرتبط با وقوع

آن‌ها مورد بررسی قرار گیرند. از جمله این علل می‌توان به ضعیف بودن لینک ارتباطی گره‌ها، در صف ماندن بسته‌ها، تصادم بسته‌های داده در شبکه یا حتی شکست گره‌ها و خارج شدن آن‌ها از شبکه اشاره کرد. مضاف بر آن، سایر مسائل حائز اهمیت مانند سربار محاسباتی پایین، پشتیبانی از طیف وسیعی از ارتباطات از راه دور در نرخ بیت پایین در برقراری ارتباط گره‌ها، برقراری ارتباط مؤثر در مکان‌های داخلی، زیرزمینی و خارجی نیز باید مدنظر قرار گیرند و موانع احتمالی برای دستیابی به دقت موردنظر در تبادل بسته‌های داده مرتفع گردند تا به یک پروتکل مسیریابی کارآمد دست یابیم.

یکی از سریع‌ترین شبکه‌های در حال رشد در فناوری اینترنت اشیا طی سال‌های اخیر، شبکه‌های ناحیه گسترده توان پایین (LPWAN)^۱ هستند. این شبکه‌های کم‌هزینه، نوعی از شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم هستند و برای طیف گسترده‌ای از ارتباطات از راه دور در نرخ بیت پایین بین اشیاء در حال برقراری ارتباط طراحی شده‌اند. این شبکه‌ها، قادر به برقراری ارتباط مؤثر در مکان‌های داخلی و زیرزمینی هستند و از سوی دیگر، برای کاهش مصرف انرژی طراحی شده‌اند [۲]. از این رو، در مقایسه با شبکه‌های حسگر بی‌سیم، آن‌ها توجه زیادی را در فناوری اینترنت اشیا به خود جلب کرده‌اند. ویژگی‌های دیگر LPWANها شامل استحکام و قابلیت اطمینان آن‌ها و همچنین مقیاس‌پذیری آن‌ها [۲] به‌عنوان راه‌حلی برای برخی از چالش‌هایی است که فناوری اینترنت اشیا با آن‌ها مواجه است؛ بنابراین محققان توسعه الگوریتم‌های مسیریابی برای LPWANها را آغاز کردند و در سال ۲۰۱۲، یک پروتکل مسیریابی استاندارد به نام RPL^۲ برای LPWANها توسعه یافت. این پروتکل مسیریابی استاندارد مبتنی بر IP که از الگوهای ترافیکی مختلفی پشتیبانی می‌کند، در شبکه‌های اینترنت اشیا، بسته‌های داده را با استفاده از لایه انطباق 6LoWPAN^۳ از هر مبدأ به هر مقصد انتقال می‌دهد [۳]. پروتکل RPL یکی از مهم‌ترین پروتکل‌های مسیریابی است که تا به امروز برای شبکه‌های LPWAN طراحی شده است و با استفاده از توابع هدف مختلف و مجموعه‌ای از پیام‌های کنترلی قادر به پشتیبانی از انواع مختلف ارتباطات نقطه‌به‌نقطه در این شبکه‌ها است.

پروتکل مسیریابی RPL نیز مانند سایر پروتکل‌ها دارای برخی مزایا و برخی معایب است. بهره‌گیری از الگوهای ترافیکی مختلف برای جریان‌های مختلف ترافیکی، انتخاب مسیر پویا، پیکربندی خودکار، تشخیص حلقه یا اجتناب از آن به‌صورت محلی یا سراسری، پردازش یا ارسال جداگانه بسته‌ها و عملکرد بر بی‌سیم با توان پایین برخی از مزایای این پروتکل هستند [۴]. در کنار این مزایا، RPL دارای معایبی نیز هست که در مطالعات مختلف به آن‌ها پرداخته شده است. برخی از موارد مهم عبارت‌اند از: عدم توجه کافی به بهره‌وری انرژی [۵]، تحرک [۵]، ازدحام [۶]، امنیت [۷] و قابلیت اطمینان [۶] که می‌توانند بر کیفیت خدمات در مسیریابی بسیار تأثیرگذار باشند [۵]. با توجه به این مسائل، بسیاری از محققان تلاش کرده‌اند تا با طراحی یک الگوریتم مسیریابی جدید یا پیشنهاد روش‌هایی برای بهبود کاستی‌ها، آن‌ها را پوشش دهند [۶].

یکی از مسائل مهم این است که هدف RPL شبکه‌های ثابت [۸] است، اما همان‌طور که گفته شد، آنچه منجر به توسعه روزافزون اینترنت اشیا شده است، انعطاف‌پذیری ارتباط میان هزاران تجهیز هوشمند ثابت و متحرک است که هر یک داده‌های موردنیاز کاربران مختلف را فراهم می‌کنند. تحت چنین شرایطی، تحرک یک عامل کلیدی است که باید در انتخاب الگوریتم مسیریابی مناسب موردتوجه قرار گیرد و البته یکی از چالش‌های مهم برای بسیاری از محققان در سراسر جهان است. تحرک، به‌خودی‌خود، چالش‌های متعددی را ایجاد می‌کند، مانند چگونگی تشخیص تحرک یک گره یا چگونگی جایگزینی یک لینک با یک لینک جدید در هنگامی که لینک قبلی به دلیل تحرک در شرف مختل شدن است. همچنین، برخی از چالش‌های دیگر مانند مسائل مربوط به الگوریتم تریکل^۴، تأخیر ناشی از پروبینگ^۵ تعداد ارسال‌های مجدد (ETX)^۶ [۸] و افزایش در تأخیر دست‌به‌دست شدن^۷ می‌توانند پیامدهای تحرک باشند و باید در هنگام طراحی در نظر گرفته شوند. لازم به ذکر است که مطالعات متعددی بر

^۱ Low-power Wide Area Network

^۲ Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks

^۳ IPv6 over Low-power Wireless Personal Area Networks

^۴ Trickle

^۵ Probing

^۶ Expected Number of Transmissions

^۷ Handoff

روی مسائل مرتبط با امنیت و قابلیت آسیب‌پذیری پروتکل-RPL از جمله [۷] انجام شده است که در آن برخی تهدیدها و همچنین برخی راه‌حل‌ها مورد بحث قرار گرفته‌اند.

در میان کلیه مسائل مختلف ذکر شده در رابطه با RPL، این مقاله بر مشکلات مربوط به تحرک به‌عنوان بالاترین اولویت تمرکز دارد و در عین حال سعی می‌کند تا مصرف انرژی و کنترل ازدحام را به‌عنوان مسائل مهم دیگر در پروتکل RPL در نظر داشته باشد.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه پشتیبانی از تحرک در اینترنت اشیا با استفاده از پروتکل مسیریابی RPL انجام شده است و چندین راه‌حل مفید توسط آن‌ها پیشنهاد شده است اما تقریباً همگی آن‌ها تنها بر روی یک جنبه خاص از الگوریتم متمرکز شده‌اند که تأثیر محدودی بر کارایی آن دارد. در این تحقیق، تمرکز ما بر روی طیف گسترده‌ای از پارامترهای تأثیرگذار است که می‌توانند کارایی الگوریتم RPL را در جنبه‌های مختلف بهبود بخشند و کیفیت خدمات بالاتری را در شبکه‌های LPWAN به ارمغان آورند. اگرچه هدف الگوریتم پیشنهادی برای کاربردهای داخلی یعنی فضاهای بسته با تعداد قابل توجهی از حسگرهای متحرک است، اما این الگوریتم می‌تواند به راحتی و با اطمینان برای سایر کاربردها در فضاهای باز و با نرخ تحرک بالاتر نیز مورد استفاده قرار گیرد. سرعت گره‌ها در کاربرد داخلی می‌تواند تا حدود ۲ متر بر ثانیه متغیر باشد، این در حالی است که این مقدار می‌تواند تا ۶ متر بر ثانیه و بالاتر در برخی کاربردها در فضاهای باز افزایش یابد. یک نکته بسیار مهم در مورد کاربردهای داخلی این است که الگوریتم پیشنهادی نمی‌تواند مانند برخی از مطالعات اخیر مبتنی بر GPS^۱ باشد. به‌عنوان مثال، موارد استفاده این الگوریتم، مراقبت‌های بهداشتی و پزشکی در محیط‌های بیمارستانی است که در آن حسگرهای مختلف مرتبط با بیماران، تجهیزات بیمارستانی، دارایی‌ها، کادر پزشکی، پارامترهای محیطی و سیستم‌های هشدار مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این‌گونه محیط‌ها، دارایی‌ها، کارکنان و بیماران را می‌توان با استفاده از کلیه اطلاعات ارائه شده توسط مجموعه‌ای از حسگرهای ثابت و متحرک به شیوه‌ای هوشمندانه و مؤثر مدیریت کرد.

به‌طور خلاصه، سهم اصلی این پژوهش، بهبود کارایی پروتکل مسیریابی RPL در شبکه‌های اینترنت اشیا متحرک با استفاده از تکنیک‌های زیر است:

- استفاده از روشی مؤثر برای شناسایی عملکرد ضعیف ناشی از تحرک در شبکه
- در نظر گرفتن چندین پارامتر به‌طور هم‌زمان برای انتخاب بهترین مسیر (تا حد امکان) برای هر گره بر اساس چندین جنبه از کارایی شبکه
- استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره در فرایند مسیریابی که منجر به تصمیم‌گیری عاقلانه‌تر و انتخاب مسیر بهتر برای گره‌ها می‌شود

۲- کارهای مرتبط

تاکنون کارهای مختلفی توسط محققان در سراسر جهان برای حمایت از تحرک در پروتکل مسیریابی RPL و بهبود عملکرد مسیریابی با در نظر گرفتن و پرداختن به مفاهیم مختلف تحرک در شبکه‌های اینترنت اشیا انجام شده است که در ادامه، برخی از مهم‌ترین این مطالعات را مرور خواهیم کرد.

کو و همکاران در سال ۲۰۱۴ به منظور پشتیبانی از قابلیت تحرک مبتنی بر پروتکل RPL الگوریتمی به نام MOMORO پیشنهاد کردند [۹]. مکانیسم مسیریابی MOMORO، rout-over است و مکانیسم تشخیص تحرک آن واکنش‌گر است. در واقع از یک روش تشخیص تحرک مبتنی بر تعداد باز ارسال استفاده می‌کند و پس از آن از طریق همه پخشی بیکن‌ها سعی بر یافتن مسیر جدید دارد. در طراحی این پروتکل نویسندگان به مسئله علامت‌دهی^۲ و تأخیر دست‌به‌دست شدن توجهی نکرده‌اند.

اولفا گادور و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۴ الگوریتمی به نام Co-RPL را معرفی کردند. پروتکل Co-RPL یک پروتکل مسیریابی مبتنی بر RPL برای شبکه‌های حسگر بیسیم کم‌توان متحرک با استفاده از مکانیسم کرونا است. در این الگوریتم، مکانیسم

^۱ Global Positioning System

^۲ Signaling

تشخیص تحرک یک مکانیسم واکنش گر است. در ارزیابی کارایی، اثر سرعت حرکت گره‌ها، نرخ ارسال بسته‌ها و تعداد ریشه‌های DAG^۱ بر کارایی مسیریابی در نظر گرفته شده است. همچنین نویسندگان سعی بر مدیریت تریکل تایمر داشته‌اند. در سال ۲۰۱۵، الگوریتم mrPL توسط فتوحی و همکاران [۱۱] پیشنهاد شد. فرایند عملکرد mrPL از دو مرحله تشکیل شده است. در مرحله اول، فرایند تشخیص تحرک گره بر اساس کاهش شاخص توان سیگنال دریافتی (RSSI)^۲ انجام می‌شود و در مرحله دوم، مکانیسمی برای یافتن والد جایگزین و مدیریت فرایند دست‌به‌دست شدن پیشنهاد شده است. در این مکانیسم، یافتن والد جدید نیز بر اساس RSSI است. نویسندگان چندین تایمر اضافه کرده‌اند و آن‌ها را مدیریت کرده‌اند. در mrPL تنها برای گره‌های برگ قابلیت تحرک وجود دارد و هیچ توجهی به مدیریت مصرف انرژی در گره‌ها نشده است.

در سال ۲۰۱۵، غالب و همکاران [۱۲] یک الگوریتم تریکل پیشرفته برای شبکه‌های کم‌توان و با اتلاف به نام E-Trickle ایجاد کردند. مکانیسم تشخیص تحرک در این الگوریتم واکنش گر است. نویسندگان با ارائه روشی جدید سعی بر حل مشکل گوش دادن کوتاه بدون تحمیل دوره فقط گوش دادن داشته‌اند.

بارسلو و همکاران در سال ۲۰۱۶ الگوریتمی تحت عنوان KP-RPL [۱۳] که یک استراتژی موقعیتیابی RPL برای شبکه‌های اینترنت اشیا متحرک است پیشنهاد کردند. مکانیسم مسیریابی در این الگوریتم rout-over است و تشخیص تحرک مبتنی بر فیلترینگ کالمن است. فیلتر کالمن، دقت موقعیتیابی را افزایش می‌دهد. همچنین از محلی سازی به‌عنوان راه‌حلی برای قابلیت تحرک استفاده شده است. به این ترتیب که هر گره متحرک، یک منطقه اعتماد ایجاد می‌کند که به احتمال زیاد بیشترین موقعیت‌ها را شامل می‌شود و سپس فیلترینگ^۳ کالمن را اعمال می‌نماید. هر گره متحرک، لیست سیاهی از گره‌های غیرقابل دسترس ایجاد می‌کند و سپس بر اساس مقدار ETX، بهترین مسیر را انتخاب می‌کند.

در سال ۲۰۱۷ طاهر و همکاران باهدف فراهم آوردن پشتیبانی از تحرک در شبکه‌های LLN^۴ با ترافیک شبکه‌ای بسیار پویا، الگوریتم Backpressure RPL یا به اختصار BRPL را پیشنهاد کردند [۱۴]. نویسندگان رتبه و طول صف را به‌عنوان معیار در نظر گرفته‌اند. الگوریتم BRPL برای ارسال بسته‌ها در برخی شرایط از تابع هدف RPL و در برخی شرایط از backpressure استفاده می‌کند. در این الگوریتم، مسئله انرژی مدنظر قرار نگرفته است.

بوعزیز و همکاران در سال ۲۰۱۷ الگوریتمی تحت عنوان EKF-MRPL به‌عنوان راه‌حلی برای مسیریابی با قابلیت پشتیبانی از گره‌های متحرک در شبکه‌های کم‌توان و پر اتلاف پیشنهاد دادند [۱۵]. در این الگوریتم، والدها نقش پررنگی در مسیریابی برای گره‌های متحرک دارند لذا مسیریابی با تأخیر بیشتری همراه است. در این الگوریتم از RSSI به‌عنوان معیار استفاده شده است. فتوحی و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۷ با ایجاد تغییراتی در mrPL الگوریتمی به نام mrPL+ را ارائه کردند. در mrPL+، فرایند دست‌به‌دست شدن به دو صورت نرم و سخت انجام می‌شود. در این الگوریتم، روش دیگری برای تشخیص تحرک گره، مورد استفاده قرار می‌گیرد که بر اساس انقضای تایمر دسترسی والد است. همانند mrPL، معیار انتخاب والد RSSI است. در این الگوریتم، فعال نگه‌داشتن مداوم رادیوها سبب افزایش مصرف انرژی در گره‌ها و کاهش طول عمر شبکه شده است که یکی از نقاط ضعف الگوریتم پیشنهادی است.

در سال ۲۰۱۷، سانشی و همکاران [۱۷] الگوریتم ERPL را به‌عنوان راه‌حلی برای مشکلات مرتبط با تحرک پیشنهاد کردند. در ERPL، دو تابع هدف مجزا با معیارهای مختلف برای گره‌های ثابت و متحرک پیشنهاد شده است. مجموع وزنی فاصله، ETX و انرژی باقیمانده گره به‌عنوان معیاری برای تابع هدف برای گره‌های ثابت در نظر گرفته شده است، در حالی که تابع هدف برای گره‌های متحرک، مجموع وزنی مشتمل بر فاصله، ETX و واریانس فاصله است. در این الگوریتم، معیار فاصله دارای بالاترین اولویت است، به‌گونه‌ای که انتخاب نزدیک‌ترین والد تضمین می‌شود و از انتخاب یک همسایه دور به‌عنوان والد اجتناب می‌گردد. در سال ۲۰۱۸، باندری و همکاران [۱۸] الگوریتم COAR را برای حل مشکل ازدحام شبکه پیشنهاد کردند. عدم تحرک گره‌ها در COAR نکته مهمی در این الگوریتم است. الگوریتم COAR از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس برای انتخاب والد

¹ Directed Acyclic Graph

² Received Signal Strength Indicator

³ Filtering

⁴ Low-power and Lossy Network

جایگزین به منظور کاهش ازدحام شبکه استفاده کرده است. میزان فضای آزاد در بافر گره، مقدار انرژی باقیمانده، و تعداد گره‌های فرزند متصل، و ETX، معیارهای تصمیم‌گیری هستند. این الگوریتم خاص شبکه‌های ثابت طراحی شده است.

در سال ۲۰۱۹، مورالی و همکاران [۱۹] یک الگوریتم انتخاب والد انرژی-کارآمد آگاه از تحرک را برای LPWANها با یک الگوریتم تریکل تایمر پویا معرفی کردند. در این مقاله نیز مانند سایر مقالات، مقدار RSSI معیاری برای تشخیص تحرک گره‌ها است. آن‌ها همچنین از رتبه، ETX، طول عمر قابل قبول شبکه یعنی ELT^1 و فاصله اقلیدسی گره متحرک از والد به عنوان معیاری برای انتخاب والد جدید استفاده کرده‌اند. در میان همگی این معیارها، رتبه دارای بیشترین اولویت است. به منظور کاهش مصرف انرژی، تنظیمات تریکل تایمر به صورت پویا در نظر گرفته شده است.

در سال ۲۰۱۹، گارا و همکاران [۲۰] یک الگوریتم جدید به نام mod-RPL را برای پشتیبانی از تحرک در شبکه‌های حسگر بیسیم پیشنهاد کردند. در این تحقیق RSSI به عنوان معیاری برای تشخیص تحرک در نظر گرفته شده است. آن‌ها کاربردهای مختلفی را در سرعت‌های مختلف در نظر گرفته‌اند و والد جدید را بر اساس رتبه و حداقل هزینه مسیر در نظر گرفته‌اند. در کاربردهای با سرعت بالا نیز معیارهای مختلفی مانند ETX، RSSI و رتبه، برای انتخاب والد ارجح در نظر گرفته شده است. در سال ۲۰۱۹، بوعزیز و همکاران [۲۱] EMA-RPL را به عنوان راه‌حلی برای حل مشکل تحرک پیشنهاد کردند. در EMA-RPL، اساس تشخیص تحرک است و از همین معیار برای انتخاب والد جدید استفاده می‌شود. در این الگوریتم، تشخیص تحرک مبتنی بر نظارت مداوم بر فاصله بین گره متحرک و گره والد است. در این الگوریتم تنها گره برگ است که می‌تواند متحرک باشد.

در سال ۲۰۱۹، سوگانیا و همکاران [۲۲] LNR-PP را برای حل مسئله تحرک پیشنهاد کردند. آن‌ها از RSSI و تعداد فرزندان متحرک متصل به هر گره به عنوان معیاری برای انتخاب والد ارجح استفاده کرده‌اند.

در سال ۲۰۲۰، الگوریتم MARPL توسط نیس [۲۳] ارائه شد. در MARPL مکانیسم تشخیص تحرک واکنش‌گر است و سعی بر ارتقاء تریکل تایمر در این الگوریتم بوده است. در این الگوریتم، واریانس RSSI به عنوان معیار اصلی تشخیص تحرک و انتخاب والد در نظر گرفته شده است.

در سال ۲۰۲۰ حقوقی و همکاران، روش جدیدی را برای بهبود RPL جهت پشتیبانی از تحرک در اینترنت اشیا پیشنهاد کردند [۲۴]. در این الگوریتم، تنها والد و بر اساس RSSI مسئول تشخیص تحرک است و سپس به گره متحرک اطلاع می‌دهد تا شروع به انتخاب والد جدید نماید. گره متحرک، والد جدید را بر اساس معیارهای ETX، RSSI و انرژی باقیمانده از میان والد‌های بالقوه انتخاب می‌کند. در این الگوریتم فقط گره برگ است که می‌تواند متحرک باشد.

در سال ۲۰۲۱، رعنا و همکاران یک پروتکل مسیریابی مبتنی بر RPL را به منظور افزایش طول عمر شبکه پیشنهاد کردند [۲۵]. در این الگوریتم، برای هر گره بر اساس چهار معیار که عبارت‌اند از تعداد همسایگان، رتبه، انرژی باقیمانده گره و تعداد بسته‌های تولیدشده در گره، وزن محاسبه می‌گردد. بر اساس وزن‌های محاسبه‌شده، گره سینک در شبکه تصمیم می‌گیرد که به سمت گره با وزن بالاتر حرکت کند. رویکرد این تحقیق کاملاً متفاوت است و فرض تحرک برای گره سینک است. نویسندگان نشان داده‌اند که استفاده از این تکنیک نسبت به الگوریتم RPL استاندارد، می‌تواند سبب افزایش طول عمر شبکه گردد.

در سال ۲۰۲۱، محمدصالحی و همکاران [۲۶]، الگوریتم ARMOR را برای پشتیبانی از تحرک در شبکه‌های اینترنت اشیا ارائه کردند. آن‌ها یک پارامتر جدید به نام TTR^2 را معرفی کردند که این پارامتر، تخمینی از مدت زمانی است که گره متحرک در محدوده پوشش هر یک از همسایگان خود خواهد بود. برای محاسبه این پارامتر، نویسندگان از سرعت نسبی گره متحرک، هماهنگی اولیه آن، جهت حرکت و پوشش انتقال بهره می‌گیرند. الگوریتم پیشنهادی از رتبه و TTR برای انتخاب بهترین والد ارجح در یک شبکه متحرک استفاده می‌کند. اشکال اصلی الگوریتم پیشنهادی الزامی بودن تجهیز شدن به GPS برای گره‌ها است که می‌تواند از بسیاری جهات به خصوص از نظر میزان مصرف انرژی و استفاده از الگوریتم برای کاربردهای داخلی، مشکل بزرگی ایجاد کند.

¹ Expected Life Time

² Time To Repair

در سال ۲۰۲۲ فضلی و همکاران [۲۷] پروتکل V-RPL را برای پشتیبانی از تحرک در شبکه‌های اینترنت اشیا ارائه کردند. آن‌ها برای انتخاب مناسب‌ترین والد از تکنیک تصمیم‌گیری AHP-VIKOR^۱ استفاده کردند و به‌طور هم‌زمان پنج معیار کلیدی شاخص توان سیگنال دریافتی، کارایی لینک، رتبه، انرژی باقیمانده و ازدحام را مدنظر قرار دادند. همچنین با طراحی الگوریتم تریکل حساس به سرعت از ایجاد سربار اضافی در شبکه جلوگیری کردند. از مزایای این الگوریتم، مدنظر قرار دادن هم‌زمان کیفیت و پایداری لینک‌های بین گره‌ها، مدیریت مصرف انرژی گره‌ها و کاهش شکست آن‌ها در شبکه و نهایتاً افزایش طول عمر شبکه بوده است. این الگوریتم برای شبکه‌های با تعداد زیادی از گره‌های متحرک و تا سرعت‌های حدود ۶ متر بر ثانیه کاربردی است. در جدول ۱ خلاصه الگوریتم‌های مورد استفاده در ارزیابی A-RPL، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است و خلاصه‌ای مفید از معیارهای انتخاب والد در الگوریتم‌ها، به همراه رویکرد حل مسئله آن‌ها ارائه شده است. مضاف بر آن، محدودیت‌های هر یک از این الگوریتم‌ها به‌منظور شفاف‌تر شدن نقصان موجود در هر یک، در ستون توضیحات/محدودیت‌ها بیان شده است.

جدول ۱: خلاصه الگوریتم‌های مورد استفاده در ارزیابی A-RPL
Table 1. Summary of the algorithms used in the evaluation of A-RPL

روش پیشنهادی	رویکرد	معیارهای انتخاب والد	توضیحات / محدودیت‌ها
MARPL [۲۳] (۲۰۲۰)	تشخیص تحرک با استفاده از واریانس RSSI	RSSI Variance	بهره‌گیری از مکانیسم تشخیص تحرک واکنش‌گر
D-Trickle [۱۹] (۲۰۱۸)	استفاده از الگوریتم تریکل پویا برای بهبود مصرف انرژی	RSSI, Rank, ETX, Euclidean distance between nodes	الگوریتم واکنش‌گر است، همچنین تأخیر انتها به انتها افزایش یافته است
E-Trickle [۱۲] (۲۰۱۵)	روشی جدید برای مدیریت تریکل تایمر به‌منظور حل مشکل گوش دادن کوتاه‌مدت	ETX	بهره‌گیری از مکانیسم تشخیص تحرک واکنش‌گر

۳- پروتکل مسیریابی برای شبکه‌های کم‌توان و پر اتلاف

پروتکل RPL برای عملکرد مستقل لایه‌های MAC^۲ و PHY^۳ در IEEE 802.15.4 طراحی شده است و برای تحویل بسته‌ها به مقصد از مسیریابی بردار فاصله استفاده می‌کند [۳]. این پروتکل از سه نوع الگوی ترافیکی در شبکه پشتیبانی می‌کند: MP2P^۴ (چندپخشی از پایین به بالا)، P2MP^۵ (تک‌پخشی از بالا به پایین) و P2P^۶ (الگوی ارتباطی بین دو گره از شبکه). پروتکل مسیریابی RPL یکی از پروتکل‌های مسیریابی پیش‌گستر است و از توپولوژی‌های مش و سلسله‌مراتبی بر اساس گراف بدون چرخه جهت‌دار (DAG) پشتیبانی می‌کند [۳]. پروتکل RPL گره‌ها را قادر می‌سازد تا یک جدول مسیریابی را ایجاد، ذخیره و به‌روزرسانی کنند که می‌تواند برای فرایند مسیریابی و انتخاب والد مورد استفاده قرار گیرد. جزء توپولوژیکی اصلی در RPL یک DAG مقصد‌گرا (DODAG^۷) است که ریشه آن DODAG Root نامیده می‌شود. در RPL، DODAG وابسته به سیاست مسیریابی ایجاد می‌شود و این سیاست توسط تابع هدف (OF^۸) تعریف می‌شود [۲۶]. تابع هدف می‌تواند به‌منظور ایجاد بهترین مسیرهای ممکن در DODAG از یک یا چند معیار استفاده کند. این معیارها می‌توانند فاصله از ریشه، مصرف انرژی، کیفیت لینک بین هر جفت از گره‌ها یا هر پارامتر مرتبط دیگری باشند [۲۶]. همچنین در RPL، یک یا چند DODAG که از یک سیاست واحد پیروی می‌کنند، به‌عنوان یک نمونه شناخته می‌شوند [۲۴]. پروتکل RPL از سه نوع گره پشتیبانی می‌کند: مسیریاب‌های مرزی کم‌توان و با اتلاف (LBRs^۹)، مسیریاب‌ها و میزبان. LBR به‌عنوان یک مسیریاب مرزی بین اینترنت و LLN ها عمل می‌کند، مسیریاب به‌عنوان تولیدکننده و ارسال‌کننده ترافیک عمل می‌کند و در نهایت، میزبان یک تجهیز نهایی است

¹ Analytic Hierarchy Process – Vlekkriterijumsko KOMPromisno Rangiranje

² Media Access Control

³ Physical

⁴ Multi-point to Point

⁵ Point to Multi-point

⁶ Point to Point

⁷ Destination Oriented Directed Acyclic Graph

⁸ Objective Function

⁹ Low-power and lossy network Border Router

که می‌تواند ترافیک را تولید کند تا توسط مسیریاب‌ها ارسال شود. پیام‌های کنترلی RPL به‌عنوان نوع جدیدی از پیام‌های کنترلی ICMPv6^۱ از دیگر اجزای مهم این پروتکل هستند که DIS^۲، DIO^۳، DAO^۴، DAO-ACK^۵ و CC^۶ نامیده می‌شوند. پیام‌های DIO برای ایجاد مسیره‌های رو به بالا از مبدأ تا مقصد استفاده می‌شوند. پیام‌های DAO برای ایجاد مسیره‌های رو به پایین از مقصد به مبدأ مورد استفاده قرار می‌گیرند و پیام‌های DAO-ACK توسط گیرنده پیام DAO در پاسخ و به‌عنوان یک پیام تک‌پخش‌ی در یکی از این دو حالت ارسال می‌شوند: حالت ذخیره‌سازی (Storing) و حالت غیر ذخیره‌سازی (Non-storing). پیام‌های DIS برای درخواست پیوستن به یک شبکه یا هنگامی که لینکی با شکست مواجه می‌شود ارسال می‌شوند. هر یک از این بسته‌های کنترلی را می‌توان با یک کد از سایرین متمایز نمود. همچنین هر یک از آن‌ها شامل فیلدهای مختلفی هستند که برخی از آن‌ها از پیش تعریف شده و برخی اختیاری هستند و می‌توانند برای اهداف مختلفی مورد استفاده قرار گیرند. پروتکل RPL از تایمری به نام تریکل استفاده می‌کند. تریکل تایمر، مکانیسمی است که نرخ ارسال پیام‌های DIO در شبکه را تنظیم می‌کند. پیام DIO یک پیام دوره‌ای است و دوره آن توسط تریکل تایمر کنترل می‌شود [۲۴].

۴- الگوریتم مسیریابی پیشنهادی A-RPL

با توجه به کارهای مرتبط مرور شده، تقریباً در کلیه موارد برای پرداختن به مسئله تحرک، محققان به دنبال یافتن راه مناسبی برای تشخیص تحرک هر گره یا تشخیص شکست لینک به دلیل تحرک از طریق رویکرد واکنش‌گر و سپس جایگزینی والد ارجح با یک والد ارجح جدید بودند. در این مقاله، الگوریتم پیشنهادی A-RPL از رویکردی پیش‌گستر برای بررسی عملکرد لینک بین هر گره و والد آن، به‌صورت دوره‌ای و از طریق پردازش داده‌های موجود در بسته‌های کنترلی DIO استفاده می‌کند؛ بنابراین، A-RPL قادر است که هرگونه عملکرد ضعیف ناشی از تحرک گره‌ها را قبل از خرابی هر لینک تشخیص دهد و به‌منظور جلوگیری از شکست لینک و گم‌شدن بسته‌ها، والد ارجح فعلی را با والد جدید جایگزین کند.

یکی از مزایای اصلی A-RPL، استفاده از پنج معیار فاقد همپوشانی از قبیل RSSI، Rank، کارایی لینک، انرژی باقیمانده و شاخص ازدحام به‌طور هم‌زمان برای انتخاب مناسب‌ترین والد ممکن در طول فرایند مسیریابی است. استفاده از چندین معیار به‌طور هم‌زمان، سبب می‌شود که الگوریتم بتواند جنبه‌های مختلفی از عملکرد شبکه را به‌طور هم‌زمان در نظر بگیرد. در واقع A-RPL از طریق استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره توانسته است بر پیچیدگی تصمیم‌گیری بر اساس معیارهای متعدد و متضاد غلبه کند. همچنین A-RPL برای مدیریت تریکل تایمر و تنظیم بازه زمانی ارسال پیام‌های کنترلی DIO از یک رویکرد تطبیقی حساس به سرعت بهره گرفته است. این الگوریتم بین نرخ به‌روزرسانی روند مسیریابی و سربار ارتباطی که ناشی از ارسال پیام‌های کنترلی DIO در طول عملیات شبکه است تعادل برقرار کرده است.

A-RPL ابتدا معیارهای موردنیاز برای انتخاب والد جدید را اندازه‌گیری، استخراج و یا محاسبه می‌کند. سپس اطلاعات مرتبط با این معیارها در جداول مرتبط با مسیریابی به‌روزرسانی می‌گردد و نهایتاً بر اساس این اطلاعات است که تصمیم‌گیری مناسب انجام می‌شود. مبتنی بر اطلاعات به‌روزرسانی، الگوریتم تریکل مدیریت می‌شود و گره‌ها متناسب با نرخ تغییرات در شبکه، تنظیمات مرتبط با تریکل تایمر خود را اعمال می‌کنند و در واقع نرخ تصمیم‌گیری با نرخ تغییرات ایجادشده در شبکه تنظیم می‌شود. به‌طور خلاصه، هر گره قادر به تنظیم دوره تریکل تایمر خود و علاوه بر آن، تشخیص هرگونه عملکرد ضعیف در لینک ارتباطی خود با والد خواهد بود. در صورت تشخیص هرگونه عملکرد ضعیف ناشی از تحرک یا هر مشکل دیگری از قبیل ازدحام، سطح انرژی پایین و غیره توسط گره، پروتکل A-RPL با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره، مسیر بهتری را پیشنهاد خواهد کرد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، کلیه گره‌های داخل شبکه بسته‌های DIO را به‌صورت دوره‌ای ارسال می‌کنند. در این الگوریتم، پارامترهای سرعت متوسط گره‌ها، میزان ازدحام ایجادشده در بافر گره‌ها و همچنین انرژی باقیمانده آن‌ها توسط

¹ Internet Control Message Protocol version 6

² DODAG Information Solicitation

³ DODAG Information Object

⁴ DODAG Advertisement Object

⁵ DAO-Acknowledgement

⁶ Consistency Check

هر گره به بسته‌های کنترلی DIO اضافه می‌شوند و به‌صورت متناوب و متناسب با تنظیمات تریکل انجام‌شده در هر گره، برای اطلاع‌رسانی همسایه‌ها ارسال می‌گردند.

در الگوریتم پیشنهادی A-RPL، از پنج معیار مهم استفاده شده است که عبارت‌اند از: شاخص توان سیگنال دریافتی، رتبه، کارایی لینک، انرژی باقیمانده و شاخص ازدحام. در واقع، پروتکل A-RPL تلاش می‌کند تا بر اساس این پنج معیار، بهترین والد (تا حد امکان) را برای هر گره انتخاب کند. در ادامه، پیش از پرداختن به جزئیات فرایند مسیریابی و انتخاب والد جدید، لازم است بدانیم که تعریف و تأثیر هر معیار چیست و هر یک از این معیارها چگونه به دست می‌آیند. اولین معیار، شاخص توان سیگنال دریافتی (RSSI) است که نشان‌دهنده فاصله بین آن گره و گره همسایه یا والد بالقوه است. توان سیگنال بالا به معنای فاصله نزدیک‌تر یا پیوند رادیویی قوی‌تر است و توان سیگنال پایین‌تر به معنای فاصله بیشتر و پیوند رادیویی ضعیف‌تر میان دو گره است. این پارامتر با استفاده از سخت‌افزار دریافت‌کننده گره قابل اندازه‌گیری است و تغییرات زیاد در این پارامتر می‌تواند شاخصی برای تحرک گره‌ها در شبکه باشد.

دومین معیار، رتبه (rank) هر گره است که موقعیت آن گره را نسبت به گره ریشه در DODAG نشان می‌دهد. هر سطحی که گره از گره ریشه دور می‌شود، رتبه یک واحد افزایش می‌یابد؛ بنابراین، رتبه گره برابر با صفر است و گره‌هایی که مستقیماً به گره ریشه متصل شده‌اند دارای رتبه ۱ هستند و به همین ترتیب، رتبه فرزندان آن‌ها یک واحد افزایش خواهد یافت. هنگامی که یک گره به شبکه (DODAG) می‌پیوندد، رتبه آن بر اساس رتبه والد تعیین می‌شود. اساساً گره تلاش خواهد کرد تا یک والد با رتبه پایین‌تر را انتخاب کند. رتبه هر گره از ساختار پیام کنترلی DIO قابل استخراج است.

معیار سوم، انرژی باقیمانده است که نشان‌دهنده درصد باقیمانده انرژی یک گره است و بر اساس این واقعیت تعریف شده است که کلیه گره‌ها با باتری کار می‌کنند و مصرف انرژی یک عامل حیاتی برای آن‌ها است. در ابتدای فعالیت، مقدار این پارامتر برای هر گره برابر با یک است و به این معنی است که باتری آن‌ها در حالت شارژ کامل است. در طول عملیات، انرژی گره مصرف می‌شود و در نتیجه، انرژی باقیمانده کمتر و کمتر می‌شود و زمانی که گره به‌طور کامل تخلیه شد، این مقدار برابر با صفر خواهد شد. بنابراین در هر زمان معین، انرژی باقیمانده نشان می‌دهد که چقدر انرژی برای گره باقی مانده است و بدیهی است که رابطه مستقیمی بین مصرف انرژی در گره و مقدار انرژی باقیمانده در آن گره وجود دارد. RE_{iN} سطح انرژی باقیمانده نرمالیزه شده هر گره را می‌توان با استفاده از رابطه ۱ محاسبه کرد [۲۷]،

$$RE_{iN} = (E_i - CE_i) / E_i \quad (1)$$

که در آن E_i کل انرژی گره i است که وابسته به نوع باتری است و عددی ثابت است. پارامتر CE_i مقدار انرژی مصرف‌شده توسط گره i را نشان می‌دهد که توسط پیکربندی سخت‌افزاری و مدت‌زمان فعالیت گره تعیین می‌شود. این مقدار را با استفاده از رابطه ۲ [۱۷] می‌توان محاسبه کرد،

$$CE_i = V \times (I_{ap} T_{ap} + I_{lp} T_{lp} + I_{tx} T_{tx} + I_{rx} T_{rx} + \sum_i I_{ni} T_{ni}) \quad (2)$$

که در آن V ولتاژ فراهم‌شده است و I_{rx} ، I_{tx} ، I_{lp} ، I_{ap} به ترتیب جریان‌های موردنیاز برای سخت‌افزار در حالت فعال، حالت کم‌توان، حالت انتقال، حالت دریافت هستند و I_{ni} جریان موردنیاز برای کلیه حسگرهای متصل به گره است [۱۷]. T_{rx} ، T_{tx} ، T_{lp} ، T_{ap} و T_{ni} به ترتیب مدت‌زمان فعالیت گره در هر یک از حالت‌های نام‌برده شده است. به این ترتیب هر گره قادر است معیار انرژی باقیمانده را با اندازه‌گیری جریان‌های مذکور محاسبه کند.

معیار چهارم یعنی شاخص ازدحام، نشان‌دهنده این مسئله است که چگالی بسته‌های داده که در بافر هر گره ذخیره شده و در انتظار انتقال هستند به چه میزان است. همان‌طور که در رابطه ۳ [۲۷] نشان داده شده است، معیار شاخص ازدحام هر گره یا در واقع گره i ام (CI_i)، مقداری بین صفر و یک دارد. مقدار صفر به این معنی است که هیچ بسته‌ای در بافر گره در انتظار فرایند انتقال نیست و برعکس، مقدار یک برای شاخص ازدحام به معنای پر بودن بافر گره است. به عبارت دیگر، هرچه مقدار شاخص ازدحام بیشتر باشد، ازدحام در گره بیشتر است.

$$CI_i = n_p / L \quad (3)$$

که در آن n_p تعداد بسته‌هایی است که در بافر گره i منتظر فرایند انتقال هستند و L طول کل بافر گره است [۲۷]. اساساً هنگامی که بار اعمال شده به یک گره از ظرفیت آن گره بیشتر شود، در آن گره ازدحام رخ خواهد داد و ممکن است بر عملکرد گره و متعاقباً بر عملکرد شبکه تأثیر بگذارد. در واقع ازدحام زیاد در یک گره می‌تواند تأثیر منفی بر روند مسیریابی مانند افزایش تأخیر انتها به انتها یا حتی افزایش گم‌شدن بسته‌ها داشته باشد.

معیار پنجم یعنی کارایی لینک (LP) دو جنبه مهم از لینک بین هر گره و همسایگان آن را در نظر می‌گیرد: کیفیت ارتباط، و دوم پایداری ارتباط [۲۷]. در واقع، به‌منظور انتخاب بهترین والد (تا حد امکان)، کیفیت ارتباط لینک تنها عامل تعیین‌کننده نیست و تداوم و ماندگاری لینک ارتباطی نیز بسیار حائز اهمیت است که "ثبات یا پایداری لینک" نامیده می‌شود [۲۷]. به‌عبارت‌دیگر، این یکی از تفاوت‌های کلیدی بین فرایند انتخاب لینک در شبکه‌های ثابت و شبکه‌های پویا است. تحرک گره‌ها در شبکه‌های پویا احتمال شکست لینک را افزایش می‌دهد و طول عمر لینک را کاهش می‌دهد. هر چه تحرک گره‌ها بیشتر باشد، پایداری لینک‌ها کم‌تر خواهد بود و کاهش پایداری لینک منجر به اتلاف بیشتر بسته‌ها و سرشار ارتباطی بیشتر در شبکه می‌شود، زیرا گره‌ها باید لینک‌های خود را به‌روز کنند و لینک‌های جدید را جایگزین نمایند که این امر منجر به مصرف انرژی بیشتر در گره‌ها نیز خواهد شد.

با توجه به موارد فوق، مفهوم و تعریف کارایی لینک، معیاری جامع‌تر از کیفیت لینک است. همچنین شایان ذکر است که معیار کارایی لینک با معیار RSSI متفاوت است، زیرا به‌عنوان یک مثال، RSSI می‌تواند برای یک لینک خاص بالا باشد اما کارایی آن لینک می‌تواند به دلیل وجود یک منبع نویز شدید پایین باشد. به‌عبارت‌دیگر، RSSI فقط مرتبط با توان سیگنال دریافتی است و نه کیفیت سیگنال.

در [۲۷] از دو پارامتر مختلف برای اطمینان از کارایی لینک استفاده شده است. در این خصوص پارامتر اول، ETX است که تا حد زیادی کیفیت لینک را نشان می‌دهد و پارامتر دوم، MMI^1 یا تحرک متقابل است که به‌عنوان شاخصی برای احتمال شکست لینک بین دو گره تفسیر می‌شود. رابطه ۴ [۲۷] برای محاسبه کارایی لینک ارائه شده است.

$$LP = 1 / ((1 + ETX_N) \times (1 + MMI_N)) \quad (۴)$$

که ETX_N و MMI_N به ترتیب ETX نرمالیزه شده و MMI نرمالیزه شده هستند [۲۷]. این پارامترها در ادامه توضیح داده شده‌اند. ETX نشان‌دهنده تعداد ارسال‌های مجدد تا زمان ارسال موفقیت‌آمیز برای هر لینک است و حداکثر مقدار این پارامتر را می‌توان با توجه به کاربرد و شرایط هدف تعریف کرد. مقدار ETX با اندازه‌گیری احتمال انتقال موفقیت‌آمیز بسته و دریافت موفقیت‌آمیز بسته Ack محاسبه می‌شود. در تئوری، ETX را می‌توان با استفاده از رابطه ۵ محاسبه کرد که در آن D_f و D_r به ترتیب، احتمال انتقال موفقیت‌آمیز و احتمال دریافت موفقیت‌آمیز Ack هستند. برای سهولت، هر گره تعداد ارسال‌های مجدد را برای یک بسته ذخیره می‌کند تا هنگامی که برای آن بسته Ack دریافت کند. این عدد نشان‌دهنده مقدار لحظه‌ای ETX است و در یک بازه زمانی معین میانگین می‌شود تا تخمین بهتری از ETX را به ما بدهد. سپس با استفاده از رابطه ۶ که مقداری بین صفر و یک خواهد داشت، مقدار تخمینی ETX نرمال می‌گردد.

در این رابطه ETX_{max} را می‌توان بر اساس برنامه هدف تنظیم کرد و عددی ثابت است که توسط طراح و وابسته به نوع کاربرد مدنظر وی تنظیم می‌شود.

$$ETX = 1 / (D_f \times D_r) \quad (۵)$$

$$ETX_N = ETX / ETX_{max} \quad (۶)$$

شاخص تحرک متقابل (MMI) پارامتری است که برای اندازه‌گیری درجه تحرک برای یک جفت گره نسبت به یکدیگر استفاده می‌شود [۲۷]. تحرک یک عامل نسبی است و به‌منظور داشتن تخمینی مناسب از درجه تحرک برای یک لینک، سرعت نسبی دو گره تشکیل‌دهنده آن لینک در نظر گرفته می‌شود. با فرض مدل تحرک تصادفی برای کلیه گره‌های داخل شبکه، MMI را می‌توان با استفاده از رابطه ۷ [۲۷] محاسبه کرد. هر چه سرعت نسبی گره‌ها بیشتر باشد، MMI بالاتر خواهد بود. افزایش MMI نشان‌دهنده احتمال بالاتر شکست لینک است و به‌نوبه خود، ثبات یا پایداری لینک را کاهش می‌دهد. اگر هر دو گره دوسر یک

¹ Mutual Mobility Index

لینک ثابت باشند، MMI برابر با صفر خواهد بود و اگر یکی از دو گره ثابت باشد، در این صورت MMI تنها به سرعت گره دیگر وابسته خواهد بود. در رابطه ۷، MMI بر اساس حداکثر سرعت نسبی (V_{max}) نرمالیزه می‌شود و مقداری بین صفر و یک دارد [۲۷].

$$MMI_{i,j} = \begin{cases} 1 & , \text{if } (V_i + V_j) \geq V_{max} \\ (V_i + V_j) / V_{max} & , \text{if } (V_i + V_j) < V_{max} \end{cases} \quad (7)$$

در این رابطه، پارامترهای V_i و V_j به ترتیب نشان‌دهنده سرعت متوسط گره i و گره j هستند که در بازه زمانی بین دو بسته متوالی DIO اندازه‌گیری می‌شوند و حداکثر سرعت را می‌توان با توجه به برنامه هدف تنظیم کرد.

همان‌طور که در ابتدای این بخش اشاره کردیم، در A-RPL هر گره متناسب با تغییرات ایجادشده در اطلاعات مرتبط با سرعت در جدول اطلاعات همسایگان خود، دوره تریکل تایمر خود را مدیریت و تنظیم می‌نماید که در ادامه شرح مختصری از نحوه انجام این فرایند ارائه می‌گردد.

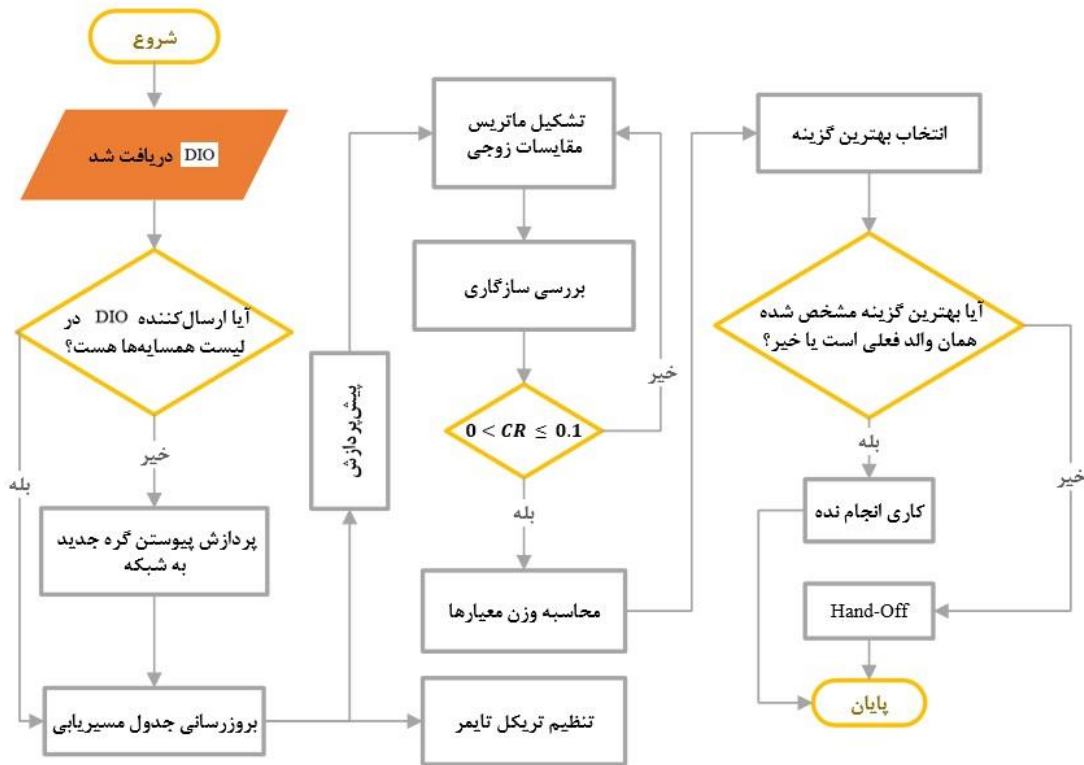
اساساً نرخ انتقال بسته‌های DIO، نرخ به‌روزرسانی الگوریتم مسیریابی را تنظیم می‌کند. افزایش دوره تریکل تایمر می‌تواند منجر به افزایش سربار ارتباطی در شبکه و ازدحام بیشتر شود اما به دلیل افزایش نرخ اجرای الگوریتم مسیریابی و تشخیص سریع‌تر لینک‌هایی که در شرف شکست هستند، احتمال از دست‌دادن بسته‌ها را کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، کاهش دوره تریکل تایمر می‌تواند منجر به کاهش ازدحام و سربار ارتباطی در شبکه شود اما می‌تواند احتمال از دست‌دادن بسته‌ها را به دلیل سرعت پایین به‌روزرسانی مسیر در شبکه افزایش دهد؛ بنابراین، یافتن راه‌حلی مصالحه‌آمیز بین این دو حالت برای شبکه بسیار حائز اهمیت است. در بسیاری از مطالعات، دوره تریکل تایمر به‌عنوان یک مقدار ثابت در الگوریتم تنظیم می‌شود که انعطاف‌پذیری الگوریتم را در مواجهه با موقعیت‌های مختلف کاهش می‌دهد. در A-RPL، یک رویکرد تطبیقی برای مدیریت تریکل تایمر و تنظیم دوره آن در نظر گرفته شده است [۲۷]. در این رویکرد هر گره، دوره تریکل تایمر را با توجه به سرعت متوسط خود و گره‌های همسایه تنظیم می‌کند [۲۷]. مفهوم اصلی این ایده مبتنی بر این واقعیت است که هنگامی که یک گره یا یکی از همسایه‌های آن با سرعت نسبتاً بالایی شروع به حرکت می‌کند، توپولوژی شبکه با سرعت نسبتاً سریعی تغییر می‌کند [۲۷]؛ بنابراین، به‌منظور پیگیری تغییرات و به‌روزرسانی مسیرها، گره‌ها باید نرخ انتقال DIO را افزایش دهند تا بتوانند پارامترها را سریع‌تر به‌روزرسانی کنند و قبل از اینکه لینک فعلی با والد ارجح با شکست مواجه شود به دنبال یک مسیر جایگزین باشند [۲۷]. اگر تحرک گره‌ها کم باشد به این معنی خواهد بود که گره‌ها ثابت هستند و یا با سرعت بسیار کمی در حرکت هستند؛ بنابراین، توپولوژی شبکه به سرعت تغییر نخواهد کرد و نیازی به ارسال بسته‌های DIO در بازه‌های زمانی کوتاه نیست.

با توجه به مطالب فوق، برای مدیریت کارآمد تریکل تایمر، هر گره در ابتدای عملیات به‌عنوان یک مقدار اولیه، بازه زمانی را به مقدار حداکثر تنظیم می‌کند. با دریافت بسته‌های DIO از کلیه همسایه‌ها، هر گره می‌تواند اطلاعات موردنیاز در مورد سرعت گره‌های همسایه را به دست آورد و به‌نوبه خود، هر گره قادر خواهد بود تا با استفاده از رابطه ۸ [۲۷]، با توجه به اینکه V حداکثر مقدار سرعت به‌دست‌آمده از مجموعه گره‌های همسایه علاوه بر خود گره است، می‌تواند دوره تریکل تایمر را تنظیم کند [۲۷].

$$T_{Ni} = \begin{cases} T_{max} & , \text{if } 0 \leq V \leq 1 \\ 0.7T_{max} & , \text{if } 1 < V \leq 1.7 \\ 0.5T_{max} & , \text{if } V > 1.7 \end{cases} \quad (8)$$

در رابطه ۸، T_{max} حد بالای تریکل تایمر است و توسط طراح تنظیم می‌شود. همچنین، T_{Ni} دوره تریکل تایمر برای گره N_i است [۲۷]. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این یک رویکرد گام‌به‌گام برای تعیین دوره تریکل تایمر است که در آن هنگامی که سرعت در مجموعه‌ای از گره‌ها از محدوده معینی تجاوز می‌کند، دوره تریکل تایمر به‌صورت گام‌به‌گام کاهش می‌یابد [۲۷].

همان‌طور که در رابطه ۸ مشاهده می‌شود، هنگامی که سرعت گره‌ها افزایش می‌یابد، دوره تایمر کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که تغییر در دوره تریکل تایمر به‌صورت محلی رخ می‌دهد و فقط برای گره‌هایی صورت می‌گیرد که وضعیت آن‌ها از نظر تحرک و سرعت تغییر کرده است و به‌این‌ترتیب از افزایش غیرضروری نرخ تولید DIO برای سایر گره‌های موجود در شبکه جلوگیری می‌شود و سربار ارتباطات تا حد امکان پایین نگه‌داشته می‌شود [۲۷].



شکل ۱: فلوچارت الگوریتم A-RPL
Figure 1. Flowchart of A-RPL algorithm

همان‌طور که در فلوچارت A-RPL (شکل ۱) مشاهده می‌شود، روند پیاده‌سازی این الگوریتم به‌گونه‌ای است که هنگامی که یک گره جدید به شبکه می‌پیوندد، کلیه گره‌های همسایه، جدول مسیریابی خود را با ارسال و دریافت دوره‌ای بسته‌های DIO به‌روزرسانی می‌کنند. مطابق آنچه گفته شد، هر گره می‌تواند داده‌های موردنیاز خود را از بسته‌های DIO استخراج کند و معیارهای موردنیاز را بر اساس داده‌های موجود، محاسبه و به‌روزرسانی کند. هنگامی که هر گره، معیارهای موردنیاز را محاسبه نماید، قادر به مدیریت تریکل تایمر خود خواهد بود و دوره تریکل تایمر را به مقدار مناسبی تنظیم خواهد کرد، همچنین با حذف گره‌هایی که شرایط حد آستانه مشخص شده در جدول ۲ را فراهم نمی‌سازند فرایند وزن دهی به معیارها و به دنبال آن وزن دهی به گزینه‌ها را به‌منظور انتخاب والد جدید انجام خواهد داد [۲۷]. در A-RPL برای معیارهای کارایی لینک، انرژی باقیمانده و شاخص ازدحام مقادیر حدی از پیش تعیین‌شده به‌عنوان حد بالا یا پایین در نظر گرفته‌شده است. مقادیر حدی بر اساس کاربرد مدنظر، کارایی موردنیاز و سربار محاسباتی قابل‌تحمل برای گره‌ها و توسط طراح تعیین می‌شوند. در A-RPL مقادیر حد آستانه مطابق با جدول ۱ تنظیم‌شده‌اند.

جدول ۲: حدود بالا/پایین از پیش تعیین‌شده برای معیارها
Table 2. Predefined upper/lower bounds for metrics

مقادیر حدی معیارها	حد بالای شاخص ازدحام	حد پایین انرژی باقیمانده	حد پایین کارایی لینک
	۰/۷۵	۰/۰۷	۰/۲۵

وزن‌های محاسبه‌شده توسط تکنیک AHP برای هر یک از معیارها در A-RPL در جدول ۳ قابل‌مشاهده است. در A-RPL بیشترین وزن متعلق به معیار رتبه و پس‌از آن متعلق به معیار شاخص توان سیگنال دریافتی است و معیارهای شاخص ازدحام، انرژی باقیمانده و کارایی لینک دارای اولویت یکسان نسبت به یکدیگر و بنابراین وزن یکسانی هستند.

جدول ۳: وزن‌های محاسبه‌شده برای هر یک از معیارها در A-RPL

Table 3. Calculated weights for each criterion in A-RPL

مقادیر	وزن معیارها
۰/۰۹۱	وزن شاخص ازدحام
۰/۲۷۳	وزن معیار RSSI
۰/۴۵۵	وزن رتبه
۰/۰۹۱	وزن معیار کارایی لینک
۰/۰۹۱	وزن انرژی باقیمانده

فرایند جستجوی والد جدید ممکن است به همان والد ختم شود، به این معنی که هیچ گره دیگری وضعیت بهتری برای اتصال به‌عنوان والد نسبت به والد موجود نداشته باشد. در صورتی که یک والد جدید توسط الگوریتم انتخاب شود، فرایند دست‌به‌دست شدن شروع خواهد شد که شامل اطلاع‌رسانی به والد جدید و خاتمه دادن به لینک فعلی با والد موجود و سوئیچ کردن به والد جدید است.

۵- فرایند تصمیم‌گیری

استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM^۱) برای انتخاب بهترین راه‌حل در میان راه‌حل‌های مختلف ممکن تحت شرایطی که معیارها، متعدد، پیچیده و متضاد هستند، یکی از مؤثرترین روش‌ها در کاربردهای مختلف است. برخی از مطالعات، انواع مختلف طبقه‌بندی‌ها را برای تکنیک‌های MCDM شرح داده‌اند [۲۸-۳۰]. در این پژوهش، از تکنیک وزن دهی و تصمیم‌گیری مشهور فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) برای انتخاب والد ارجح از میان چندین والد بالقوه در الگوریتم مسیریابی استفاده شده است. تکنیک AHP یکی از بهترین تکنیک‌ها برای مسائل پایداری پیچیده با تشخیص و تعریف جزئیات یک مسئله تصمیم‌گیری و تجزیه آن به اجزای اصلی در یک ساختار سلسله‌مراتبی است. در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، امکان تحلیل حساسیت روی معیارها وجود دارد. منظور از تحلیل حساسیت این است که با تغییر وزن معیارها در رتبه‌گزین‌ها چه تغییری ایجاد می‌شود. همچنین از مزایای دیگر این تکنیک، تعیین میزان سازگاری و ناسازگاری تصمیم است. فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، مسائل پیچیده را به شکل ساده تبدیل می‌کند و مقادیر به‌دست‌آمده از این تکنیک به دلیل استفاده از سازگاری و بردارهای ویژه به‌صورت واقع‌بینانه‌تری برآورد می‌شوند. در ادامه شرح و روابط ریاضی این تکنیک ارائه خواهد شد.

در تکنیک AHP، ابتدا اولویت نسبی هر معیار بر اساس جدول ۴ [۳۱] تعیین می‌شود که در آن عدد ۹ به معنای بالاترین درجه ترجیح یا اولویت نسبی برای یک معیار در مقایسه با سایر معیارها است و عدد ۱ به معنای ترجیح یا اولویت نسبی یکسان با سایر معیارها است. پس از تعیین اولویت نسبی هر معیار، ماتریس مقایسه بر اساس شکل ۲ تشکیل می‌شود. همان‌طور که در این ماتریس نشان داده شده است، سطرها و ستون‌های ماتریس همگی معیارها هستند و هر عنصر ماتریس با تقسیم اولویت نسبی سطر مربوطه به اولویت نسبی ستون مربوطه محاسبه می‌شود؛ بنابراین، ماتریس مقایسه همیشه یک ماتریس $n \times n$ است [۳۲] که در آن n تعداد معیارها است و کلیه عناصر در قطر اصلی ماتریس برابر با ۱ هستند. شکل ۲ ماتریس مقایسه را برای کاربرد مدنظر ما در این پژوهش نشان می‌دهد که در آن اولویت نسبی همگی معیارها مشخص شده است. بسته به کاربرد یا موقعیت، اولویت نسبی متفاوتی می‌تواند توسط کاربران تعریف گردد. به‌عنوان مثال در شکل ۲ درایه a_{12} برابر با ۳ در نظر گرفته شده است که به این معنی است که اولویت نسبی معیار RSSI، ۳ برابر معیار شاخص ازدحام است یا به‌عبارت‌دیگر مطابق با آنچه در جدول ۴ ذکر شده است، معیار RSSI نسبت به معیار شاخص ازدحام دارای مطلوبیت قوی است. همچنین به‌عنوان مثالی دیگر می‌توان درایه a_{14} را در نظر گرفت که اولویت نسبی دو معیار کارایی لینک و شاخص ازدحام برابر ۱ در نظر گرفته شده است که در جدول ۴ عدد ۱ به مطلوبیت یکسان دو معیار تعبیر شده است. اولیویتی که با استفاده از جدول ۴ برای معیارها در نظر گرفته می‌شود متناسب با کاربرد الگوریتم طراحی شده و شرایط حاکم بر آن متفاوت است. به‌عنوان مثال در کاربرد مدنظر ما

^۱ Multiple-criteria Decision Making

مطابق با جدول ۴، معیار RSSI کمی مطلوب‌تر است اما معیار Rank دارای مطلوبیت قوی است در حالی که همین دو معیار برای کاربردی دیگر ممکن است ترجیحات دیگری از جدول مذکور را به خود اختصاص دهند.

جدول ۴: مقیاس اولویت نسبی یا ترجیحات برای هر معیار [۳۱]

Table 4. Relative preference scale or preferences for each criterion [31]

مقادیر عددی	اولویت‌ها
۹	کاملاً مطلوب‌تر
۷	مطلوبیت بسیار قوی
۵	مطلوبیت قوی
۳	کمی مطلوب‌تر
۱	مطلوبیتی یکسان با سایر معیارها
۰.۲، ۰.۴، ۰.۶، ۰.۸	ترجیحات بین فواصل فوق

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} CI & RSSI & RANK & LP & RE \end{matrix} \\ \begin{matrix} CI \\ RSSI \\ RANK \\ LP \\ RE \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & \frac{3}{1} & \frac{5}{1} & 1 & 1 \\ \frac{1}{3} & 1 & \frac{5}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{5} & \frac{3}{5} & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} \\ 1 & 3 & 5 & 1 & 1 \\ 1 & 3 & 5 & 1 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

شکل ۲: ماتریس مقایسات زوجی A، اهمیت نسبی هر یک از معیارها در مقایسه با یکدیگر در A-RPL

Figure 2. A matrix of pairwise comparisons, the relative importance of each criterion compared to each other in A-RPL

هنگامی که ماتریس مقایسه تشکیل می‌شود، لیست وزن‌های نسبی باید محاسبه شود که بردار وزن (w) نامیده می‌شود و با استفاده از رابطه ۹ [۳۲] که در آن λ یک مقدار ویژه است [۳۲] به دست می‌آید. سپس لازم است تا نسبت سازگاری (CR) [۳۲] بررسی شود. نسبت سازگاری نشان‌دهنده سازگاری قضاوت‌ها نسبت به قضاوت‌های ممکن مختلف است. تفاوت بین بیشترین مقدار لاندا که بزرگ‌تر یا مساوی با n است و n (تعداد معیارها) نشانه‌ای از ناسازگاری قضاوت‌ها است. اگر بیشترین مقدار لاندا برابر با n باشد، قضاوت‌ها کاملاً سازگار خواهند بود [۳۱].

$$Aw = \lambda_{\max} w \quad (9)$$

با استفاده از رابطه ۱۰ [۳۲] می‌توانیم شاخص سازگاری (CI) [۳۳] را محاسبه کنیم و با استفاده از رابطه ۱۱ [۳۲]، نسبت سازگاری CR را ارزیابی کنیم که در آن (RI) شاخص تصادفی بر اساس جدولی است که ساعتی و کلاتو در [۳۳] پیشنهاد کرده‌اند (در کاربرد این پژوهش برای ۵ معیار $RI=1/12$ [۳۱]).

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (10)$$

$$CR = CI / RI \quad (11)$$

اگر نرخ سازگاری محاسبه شده (CR) کوچک‌تر یا مساوی ۰/۱ باشد، سازگاری سیستم قابل قبول خواهد بود [۳۲]، در غیر این صورت باید در ارتباط با مقادیر اختصاص داده شده به ماتریس، تجدیدنظر شود. در ماتریس مقایسات زوجی ما $CR=0$ است که به معنای سازگاری کامل قضاوت‌ها است. پس از محاسبه وزن‌های نسبی معیارها، معادله با معیارهای وزنی آماده می‌شود و

¹ Consistency Ratio

² Consistency Index

³ Random Index

می‌توان گزینه‌ها را ارزیابی کرد و بهترین گزینه را انتخاب نمود. لازم به ذکر است که این محاسبات ریاضی به صورت دستی انجام نمی‌شود و نرم‌افزارهایی از قبیل اکسپرت چویس به‌سادگی قابل استفاده هستند.

۶- ارزیابی کارایی

به منظور ارزیابی کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی A-RPL، همانند سایر کارهای پیشین از شبیه‌ساز کوجا سیستم‌عامل کانتیکی نسخه ۲/۶ استفاده کردیم. شبیه‌سازی‌ها در دو سناریوی نیمه-متحرک و تماماً-متحرک به لحاظ میانگین نسبت تحویل بسته، یک‌بار نسبت به تعداد گره‌های شبکه، یک‌بار نسبت به مدت‌زمان شبیه‌سازی و بار دیگر نسبت به میانگین سرعت گره‌های متحرک انجام شدند. علاوه بر این میانگین انرژی مصرف شده در یک گره متحرک و همچنین میانگین تأخیر انتها به انتها نسبت به مدت‌زمان شبیه‌سازی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. پارامترهای شبیه‌سازی برای ارزیابی الگوریتم‌ها در جدول ۵ [۲۷] ارائه شده است.

جدول ۵: پارامترهای شبیه‌سازی [۲۷]

Table 5. Simulation parameters [27]

پارامترهای شبیه‌سازی	مقادیر
تعداد گره‌ها	۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰
رنج انتقال	۵۰ متر
مدل تحرک	مدل تصادفی
زمان شبیه‌سازی	۳۰۰۰ ثانیه
نرخ انتقال	۱ بسته بر ثانیه
فضای شبیه‌سازی	m ۳۰۰ x m ۳۰۰
انرژی اولیه هر گره	mJ ۷۵۶۰۰ ~ mJ ۳۲،۴۰۰

شبیه‌سازی‌ها چندین مرتبه بر اساس دو سناریوی مختلف تحت عناوین نیمه-متحرک (به معنای تحرک فقط نیمی از گره‌های موجود در شبکه به‌جز گره ریشه) و تماماً-متحرک (به معنای تحرک کلیه گره‌های موجود در شبکه به‌جز گره ریشه) انجام شده است [۲۷]. مدل تحرک گره‌ها تصادفی بوده است و رنج انتقال و نرخ انتقال به ترتیب برابر با ۵۰ متر و ۱ بسته بر ثانیه در نظر گرفته شده است [۲۷]. همچنین هر بار گره‌ها به صورت تصادفی در فضایی با طول و عرض ۳۰۰ متر توزیع شدند و شبیه‌سازی‌ها برای مدت‌زمان ۳۰۰۰ ثانیه اجرا شدند [۲۷]. به هر گره به طور تصادفی مقداری انرژی به‌عنوان مقدار اولیه سطح انرژی اختصاص داده شده است که این مقدار بین حداقل ۳۰ درصد تا حداکثر ۷۰ درصد به عبارتی از ۳۲۴۰۰ میلی ژول تا ۷۵۶۰۰ میلی ژول به صورت متغیر در نظر گرفته شده است تا بتوانیم برای گره‌ها، شرایطی واقعی‌تر ایجاد کنیم تا بتوانیم ارزیابی مناسب‌تری داشته باشیم [۲۷].

همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، سه پارامتر حیاتی در این الگوریتم مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است که در ادامه تعریف مختصری از نحوه محاسبه هر یک ارائه می‌گردد:

الف- میانگین نسبت تحویل بسته

تعداد کل بسته‌هایی که با موفقیت توسط کلیه گره‌های شبکه دریافت شده‌اند تقسیم بر تعداد کل بسته‌های ارسال شده توسط کلیه گره‌ها در شبکه.

ب- میانگین انرژی مصرف شده در یک گره متحرک

مصرف انرژی کلیه گره‌های متحرک شبکه برای کلیه فعالیت‌ها از جمله اجرای الگوریتم مسیریابی، ارسال/دریافت بسته‌ها و غیره، تقسیم بر تعداد کل گره‌های متحرک موجود شبکه.

ج- میانگین تأخیر انتها به انتها

مجموع تأخیر کلیه بسته‌ها تقسیم بر تعداد کل بسته‌های دریافت شده، یا به عبارتی دیگر، این پارامتر برابر با میانگین اختلاف‌زمانی برای یک بسته بین زمان ارسال و زمان دریافت آن است.

در هر یک از دو سناریوی نیمه-متحرک و تماماً-متحرک، چهار نمودار مقایسه ارائه شده است که در ادامه، مشخصات شبیه‌سازی هر یک از این چهار نمودار تشریح می‌گردد:

نمودار ۱- تعداد گره‌ها را از ۱۰ تا ۶۰ گره تغییر دادیم تا بتوانیم اثر تعداد گره‌ها را بر میزان نسبت تحویل بسته مورد بررسی قرار دهیم. لازم به ذکر است که میزان سرعت در این حالت به‌طور تصادفی بین ۱ متر بر ثانیه و ۲ متر بر ثانیه انتخاب شده است.

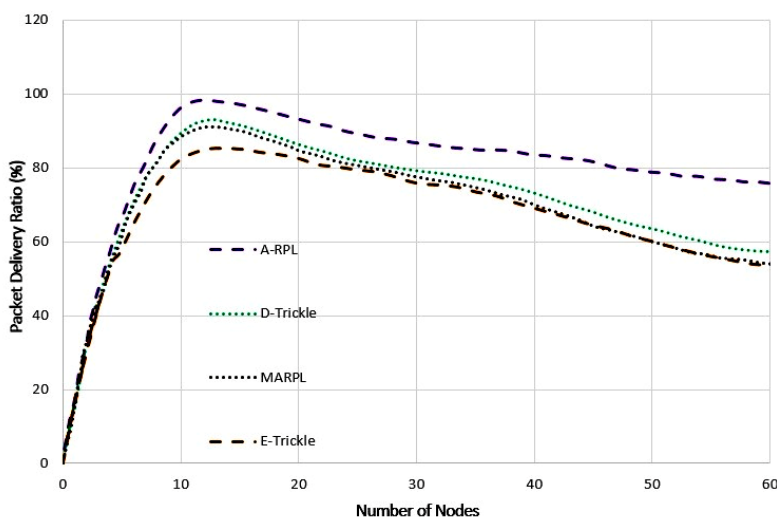
نمودار ۲- میزان میانگین نسبت تحویل بسته را نسبت به گذشت مدت‌زمان شبیه‌سازی محاسبه کردیم. در این حالت نیز میزان سرعت به‌طور تصادفی بین ۱ متر بر ثانیه و ۲ متر بر ثانیه انتخاب شده است. در این ارزیابی، تعداد کل گره‌های شبکه در حالت نیمه-متحرک ۲۵ گره و در حالت تماماً-متحرک ۲۲ گره در نظر گرفته شده است.

نمودار ۳- میزان میانگین انرژی مصرفی یک گره متحرک در شبکه تحت شرایط سرعت تحرک تصادفی بین ۱ متر بر ثانیه و ۲ متر بر ثانیه مورد ارزیابی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که تعداد کل گره‌های شبکه در هر دو حالت نیمه-متحرک و تماماً-متحرک برابر با ۶۰ گره بوده است.

نمودار ۴- میزان میانگین تأخیر انتها به انتها نسبت به گذشت مدت‌زمان شبیه‌سازی در سرعت متوسط بین ۱ متر بر ثانیه و ۲ متر بر ثانیه ارزیابی شده است. لازم به ذکر است که تعداد کل گره‌های شبکه در حالت نیمه-متحرک برابر با ۲۵ گره و در حالت تماماً-متحرک برابر با ۲۲ گره بوده است.

نمودار (۱). میانگین نسبت تحویل بسته نسبت به تعداد کل گره‌های شبکه

در این سناریو تعداد گره‌ها از ۱۰ گره به ۶۰ گره افزایش می‌یابد و مقدار PDR^۱ برای الگوریتم‌های مختلف، زمانی که تعداد گره‌ها کمتر از ۱۰ گره است، تقریباً یکسان است اما این مقدار در A-RPL مقداری متفاوت است زیرا مقدار نسبت تحویل بسته در A-RPL در قبل از ۱۰ گره با سرعت بیشتری افزایش یافته است که این مسئله به نظر می‌رسد به دلیل انتخاب معیار حداقل رتبه با بالاترین وزن باشد. با گذر از ۱۰ گره کلیه الگوریتم در میزان نسبت تحویل با روند کاهشی مواجه می‌شوند و البته تفاوت میان الگوریتم‌ها نیز به تدریج افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، A-RPL این روند کاهشی را با شیب کمتری تجربه می‌کند. A-RPL برتری خود را نسبت به سایر الگوریتم‌ها به ترتیب با ۹۸ درصد و ۷۶ درصد به ترتیب به‌عنوان بیشترین و کمترین مقادیر به نمایش گذاشته است. مزیت A-RPL، با رشد شبکه و افزایش ترافیک در شبکه قابل مشاهده است؛ اما به‌طور کلی با افزایش تعداد گره‌های تشکیل دهنده شبکه، به دلیل تولید ترافیک بیشتر در شبکه که سبب افزایش رخدادها در شبکه و نهایتاً افزایش تلفات در شبکه می‌گردد نسبت تحویل بسته کاهش می‌یابد.

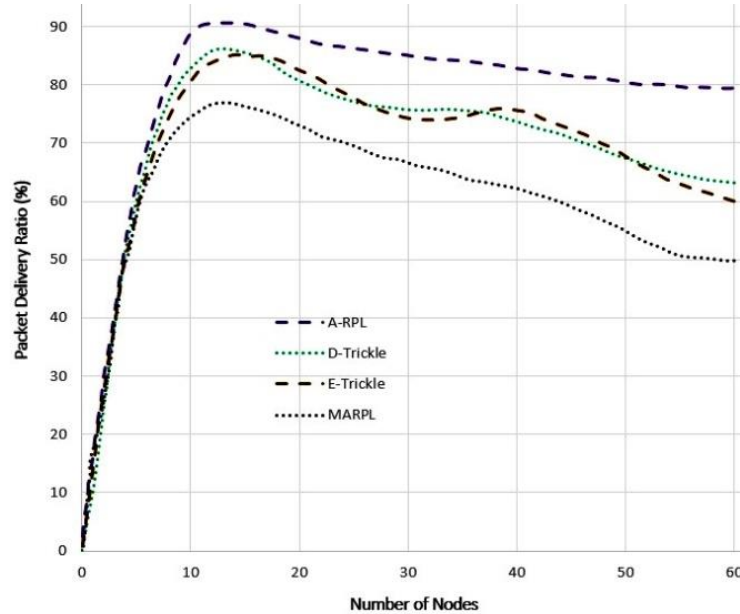


شکل ۳: میانگین نسبت تحویل بسته نسبت به تعداد گره‌ها در حالت نیمه-متحرک

Figure 3. Average packet delivery ration versus the number of nodes in semi-mobile mode

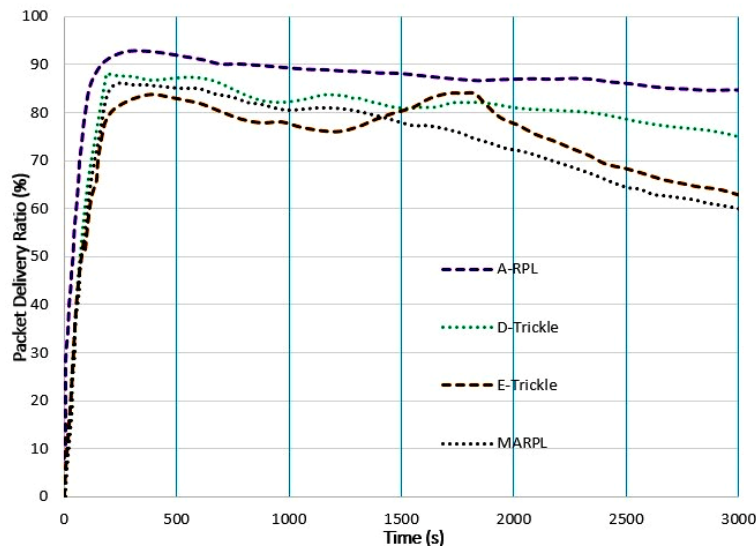
^۱ Packet Delivery Ratio

این آزمون مجدداً در سناریوی تماماً-متحرک تکرار شد. همان‌طور که در شکل ۴ قابل مشاهده است افزایش تعداد گره‌های متحرک سبب کاهش نسبت تحویل بسته شده است اما همچنان A-RPL با فراهم کردن ۹۰ درصد نسبت تحویل بسته در بیشترین حالت نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارای نسبت تحویل بسته بهتری است که می‌تواند به علت در نظر گرفتن معیار شاخص ازدحام باشد.



شکل ۴: میانگین نسبت تحویل بسته نسبت به تعداد گره‌ها در حالت تماماً-متحرک
Figure 4. Average packet delivery ratio versus the number of nodes in fulli-mobile mode

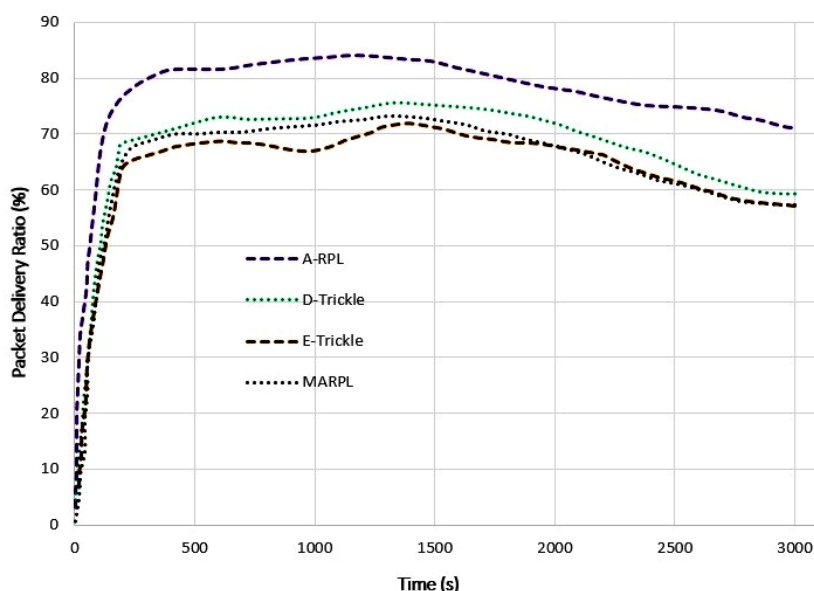
نمودار (۲). میانگین نسبت تحویل بسته نسبت به گذشت مدت زمان شبیه‌سازی



شکل ۵: میانگین نسبت تحویل بسته نسبت به مدت زمان شبیه‌سازی در حالت نیمه-متحرک (N=۲۵)
Figure 5. The average packet delivery ratio versus the simulation time in semi-mobile mode (N=25)

در این حالت تعداد گره‌های شبکه را ثابت نگه داشتیم تا بتوانیم تأثیر گذشت زمان را بر نسبت تحویل بسته بسنجیم. در سناریوی نیمه-متحرک تعداد کل گره‌های شبکه را ۲۵ گره و در سناریوی تماماً-متحرک تعداد کل گره‌های شبکه را ۲۲ گره انتخاب کردیم. شکل ۵ تغییرات نسبت تحویل بسته را در طول زمان شبیه‌سازی برای الگوریتم‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که نشان داده شده است نسبت تحویل بسته برای کلیه الگوریتم‌ها با گذشت زمان شبیه‌سازی کاهش می‌یابد. دلیل

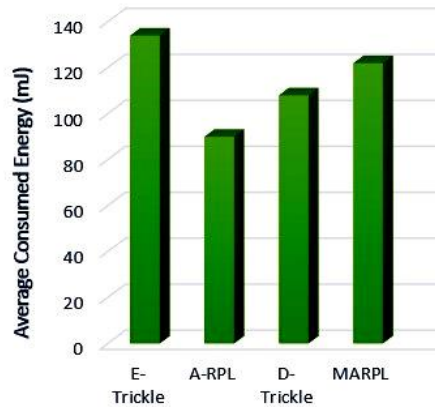
اصلی این مسئله، فقدان انرژی برای برخی از گره‌ها در شبکه است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، به‌منظور نزدیک بودن نتایج شبیه‌سازی به حالت واقعی، سطح انرژی اولیه گره‌ها یک مقدار تصادفی بین ۳۰ تا ۷۰ درصد از حداکثر سطح انرژی در نظر گرفته شده است. میزان ذخیره انرژی برخی از گره‌ها با گذر زمان شبیه‌سازی به پایان می‌رسد و در نتیجه با شکست مواجه می‌شوند و این امر شرایط خاصی را برای شبکه ایجاد می‌کند. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است، برخی از الگوریتم‌های مسیریابی که معیارهای مرتبط با انرژی را برای تصمیم‌گیری در نظر نگرفته‌اند به‌گونه‌ای چشم‌گیر، از سقوط میزان نسبت تحویل بسته رنج می‌برند. از آنجاکه در A-RPL از معیار حداقل رتبه استفاده شده است حتی گره‌هایی که تحت شرایط بحرانی اتمام انرژی قرار دارند با ارسال بسته‌های خود به والد با رتبه کوچک‌تر و در واقع والد نزدیک‌تر به گره ریشه توانسته‌اند سبب افزایش میزان نسبت تحویل بسته گردند. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است، بیشترین و کمترین مقادیر نسبت تحویل بسته در A-RPL برای سناریوی نیمه-متحرک ۹۳ درصد در ۲۵۰ ثانیه و ۸۵ درصد در پایان زمان شبیه‌سازی است. این آزمون برای حالت تماماً-متحرک تکرار گردید. همان‌طور که در شکل ۶ قابل مشاهده است، با افزایش تعداد گره‌های متحرک، میزان نسبت تحویل بسته کاهش یافته است، اما هنوز هم نتیجه حاصل از الگوریتم A-RPL قابل قبول است و فاصله زیادی با سایر الگوریتم‌ها دارد. میزان نسبت تحویل بسته در A-RPL در سناریوی تماماً-متحرک در بیشترین حالت ۸۴ درصد در ۱۲۰۰ ثانیه و ۷۰ درصد در انتهای زمان شبیه‌سازی است.



شکل ۶: میانگین نسبت تحویل بسته نسبت به مدت زمان شبیه‌سازی در حالت تماماً-متحرک (N=۲۲)
Figure 6. Average packet delivery ratio versus simulation time in fulli-mobile mode (N=22)

نمودار (۳). میانگین انرژی مصرفی یک گره متحرک

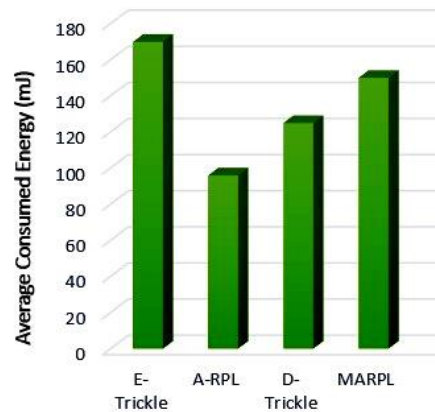
شکل ۷ میانگین مصرف انرژی یک گره متحرک را در الگوریتم‌های مختلف در طول زمان شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همان‌طور که نشان داده شده است، در الگوریتم پیشنهادی A-RPL، مقدار میانگین برای مصرف انرژی به‌طور قابل توجهی کمتر از سایر الگوریتم‌ها است که یکی از دلایل آن می‌تواند در نتیجه در نظر گرفتن سطح انرژی باقیمانده در فرایند مسیریابی باشد. از طرف دیگر معیار کارایی لینک و همچنین مدیریت تریکل تایمر که سبب تعدیل تعداد پیام‌های کنترلی ارسال در شبکه شده است می‌تواند دلایل دیگر کاهش میزان مصرف انرژی در A-RPL باشند. با توجه به استفاده این الگوریتم از معیار کوچک‌ترین رتبه، گره‌ها از کوتاه‌ترین مسیر در کنار سایر ویژگی‌ها بهره‌مند می‌شود که یکی از نتایج آن می‌تواند کاهش مصرف انرژی باشد. همچنین این الگوریتم به دلیل استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری AHP نسبت به الگوریتم V-RPL به دلیل سربار محاسباتی کمتر، انرژی کمتری مصرف می‌کند.



شکل ۷: میانگین مصرف انرژی یک گره متحرک در الگوریتم‌های مختلف در حالت نیمه-متحرک (N=60)

Figure 7. Average energy consumption of a mobile node in different algorithms in semi-mobile mode (N=60)

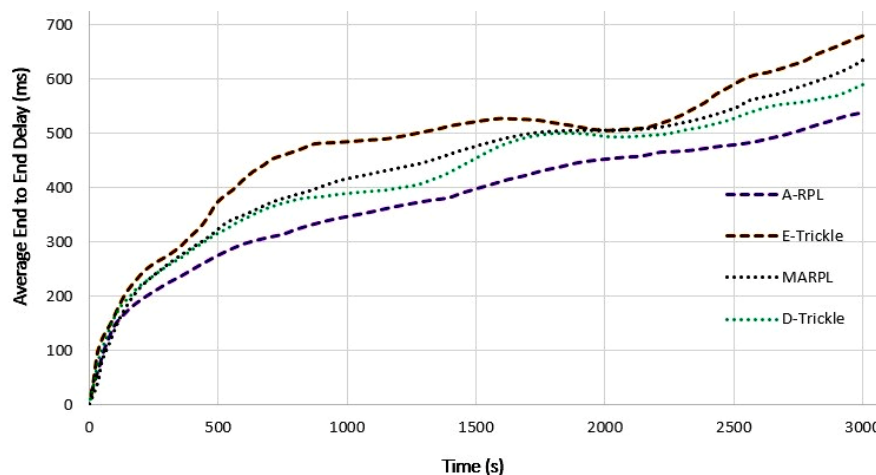
این آزمون مجدداً برای سناریوی تماماً-متحرک تکرار شد. همانند آنچه در سناریوهای قبل تر هم دیده شد، افزایش تحرک از جنبه‌های مختلفی بر عملکرد شبکه تأثیر منفی می‌گذارد. در اینجا نیز تحرک بیشتر، سبب تلفات بیشتر و نهایتاً باز ارسال‌های بیشتر و نتیجتاً افزایش میزان مصرف انرژی شده است (شکل ۸ را مشاهده کنید).



شکل ۸: میانگین مصرف انرژی یک گره متحرک در الگوریتم‌های مختلف در حالت تماماً-متحرک (N=60)

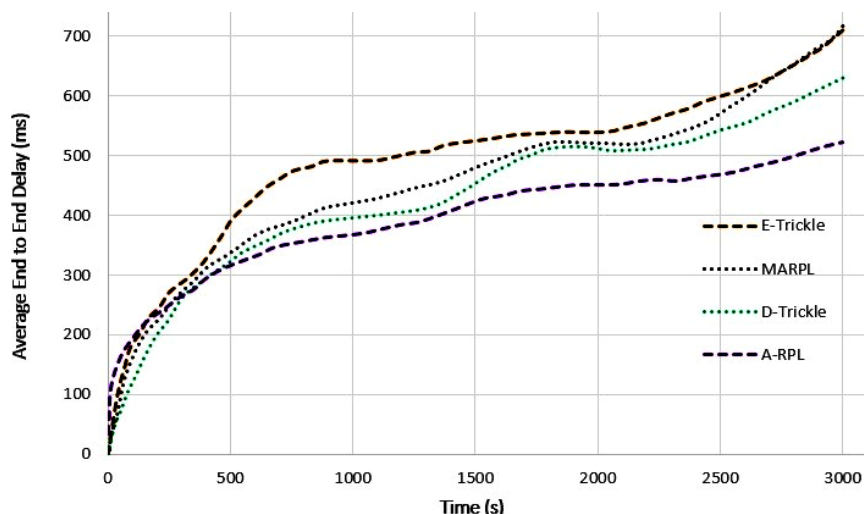
Figure 8. Average energy consumption of a mobile node in different algorithms in fulli-mobile mode (N=60)

نمودار (۴). میانگین تأخیر انتها به انتها نسبت به گذشت مدت زمان شبیه‌سازی در این حالت نیز تعداد کل گره‌های شبکه ثابت نگه‌داشته شد تا بتوانیم اثر گذشت زمان را بر نتیجه تأخیر انتها به انتها مشاهده و ارزیابی نماییم. تعداد کل گره‌های شبکه در سناریوی نیمه-متحرک برابر با ۲۵ گره و در سناریوی تماماً-متحرک برابر با ۲۲ گره در نظر گرفته شد. همان‌طور که پیش‌تر هم در نمودار PDR نسبت به زمان توضیح دادیم، باگذشت زمان، تعداد گره‌هایی که در اثر اتمام انرژی از شبکه خارج می‌شوند افزایش می‌یابد، بنابراین طبیعی است که باگذشت زمان، با افزایش تأخیر انتها به انتها در الگوریتم‌ها مواجه شویم؛ اما به دلیل استفاده از معیار حداقل رتبه، تا حد زیادی سبب کاهش تأخیر انتها به انتها در A-RPL شده است. شکل ۹ میانگین تأخیر انتها به انتها را برای الگوریتم‌های مسیریابی مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که نشان داده شده است، حداکثر تأخیر انتها به انتها در A-RPL برابر با ۵۳۸ میلی‌ثانیه است.



شکل ۹: میانگین تأخیر انتها به انتها نسبت به مدت زمان شبیه‌سازی در حالت نیمه-متحرک (N=۲۵)
Figure 9. Average end-to-end delay over simulation duration in semi-mobile mode (N=25)

این آزمون مجدداً برای سناریوی تماماً-متحرک تکرار شد. در اینجا نیز تأثیر منفی افزایش تحرک گره‌ها در نتایج شبیه‌سازی‌ها عیان شده است؛ اما همان‌طور که در شکل ۱۰ قابل مشاهده است حداکثر تأخیر انتها به انتها در A-RPL برابر با ۵۲۲ میلی‌ثانیه گزارش شده است که حتی از سناریوی نیمه-متحرک این الگوریتم مقدار آن ۱۶ میلی‌ثانیه نیز کمتر شده است. یکی از علل این مسئله می‌تواند در نظر گرفتن معیار رتبه باشد، به این ترتیب که گره‌های با رتبه کمتر و نزدیک‌تر به گره ریشه به‌عنوان والد انتخاب شده‌اند.



شکل ۱۰: میانگین تأخیر انتها به انتها نسبت به مدت زمان شبیه‌سازی در حالت تماماً-متحرک (N=۲۲)
Figure 10. Average end-to-end delay over simulation duration in fulli-mobile mode (N=22)

۷- نتیجه‌گیری

با توجه به توسعه روزافزون فناوری اینترنت اشیا در حوزه‌های مختلف و نفوذ آن به صنایع مختلف متشکل از گره‌های ثابت و متحرک و افزایش تراکم تجهیزات متحرک، طراحی الگوریتم مسیریابی مناسب برای انتقال بسته‌های داده از گره مبدأ به گره مقصد به‌گونه‌ای که تحرک گره‌ها و جنبه‌های مختلف کارایی شبکه (وابسته به نوع کاربرد به‌عنوان مثال حوزه سلامت) مدیریت گردد بسیار حائز اهمیت است. از جمله جنبه‌های مختلف کارایی شبکه می‌توان به انرژی، نسبت تحویل بسته و تأخیر انتها به انتها اشاره کرد. در این مقاله الگوریتم A-RPL ارائه گردید که سهم اصلی آن، استفاده از روشی مؤثر برای شناسایی عملکرد ضعیف ناشی از تحرک در شبکه، بهره‌گیری از پنج معیار مختلف فاقد همپوشانی با یکدیگر برای انتخاب گره والد جدید و استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره در فرایند انتخاب گزینه است. به‌عنوان برخی از ویژگی‌های A-RPL می‌توان به استفاده

هم‌زمان از چندین معیار، تریکل تایمر حساس به سرعت، حداکثر کاهش سربار شبکه و در نتیجه کاهش تلفات و افزایش نسبت تحویل بسته، کمترین قطع و حداقل تلفات بسته، جلوگیری از تلاش گره‌ها برای ارسال بسته‌ها از طریق لینک‌های باکیفیت پایین و ناپایدار، مسیر کوتاه‌تر از مبدأ تا مقصد، کاهش انرژی مصرفی در شبکه و ایجاد قابلیت خود-مدیریتی برای کلیه گره‌های شبکه نه تنها تحت شرایط تحرک بلکه در هر شرایط ناسازگار و نامطلوب دیگر به‌عنوان مثال احتمال شکست گره‌ها به دلیل تخلیه باتری اشاره کرد. علاوه بر این A-RPL با توجه به نتایج به دست آمده منطقی‌مقیاس پذیر نیز هست. به‌عنوان کار آتی امنیت A-RPL می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع

- [1] N. Shabbir and S. R. Hassan, "Routing Protocols for Wireless Sensor Networks (WSNs)," 2017, doi: 10.5772/intechopen.70208.
- [2] D. Ismail, M. Rahman and A. Saifullah, "Low-Power Wide-Area Networks: Opportunities, challenges, and directions," *Conference, Association for Computing Machinery*, no. January, pp. 8:1–8:6, 2018, doi: 10.1145/3170521.3170529.
- [3] O. Gaddour and A. Koubâa, "RPL in a nutshell: A survey," *Journal on Computer Networks*, vol. 56, no. 14, pp. 3163–3178, 2012, doi: 10.1016/j.comnet.2012.06.016.
- [4] N. Gupta, A. Pughat, and V. Sharma, "A critical analysis of RPL objective functions in internet of things paradigm," *Journal on Peer-to-Peer Networking and Applications*, vol. 14, pp. 2187-2208, 2021, doi: 10.1007/s12083-021-01180-9.
- [5] K. Subash and L. Arockiam, "A Survey on issues and Challenges in RPL Based Routing for IoT," *Journal on Annals of R.S.C.B.*, vol. 25, no. 5, pp.501-510, 2021.
- [6] D. Pancaroglu and S. Sen, "Load balancing for RPL-based Internet of Things: A review," *Journal on Ad Hoc Networks*, vol. 116, 2021, doi: 10.1016/j.adhoc.2021.102491.
- [7] C. Pu, "Sybil Attack in RPL-Based Internet of Things: Analysis and Defenses," *Journal on IEEE Internet of Things*, vol. 7, no. 6, pp. 4937-4949, 2020, doi: 10.1109/JIOT.2020.2971463.
- [8] Z. Shah, A. Levula, K. Khurshid, J. Ahmed, I. Ullah and S. Singh, "Routing Protocols for Mobile Internet of Things (IoT): A Survey on Challenges and Solutions," *Journal on electronics*, vol. 10, no. 19, 2021, doi: 10.3390/electronics10192320.
- [9] J. Ko and M. Chang, "MoMoRo: Providing mobility support for low-power wireless applications," *IEEE Systems Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 585–594, 2014, doi: 10.1109/JSYST.2014.2299592.
- [10] O. Gaddour, A. Koubâa, R. Rangarajan, O. Cheikhrouhou, E. Tovar and M. Abid, "Co-RPL: RPL routing for mobile low power wireless sensor networks using Corona mechanism," *Proceeding of 9th IEEE International Symposium on Industrial Embedded Systems (SIES 2014)*, 2014, pp. 200–209, doi: 10.1109/SIES.2014.6871205.
- [11] H. Fotouhi, D.I. Moreira and M. Alves, "mRPL: Boosting mobility in the Internet of Things," *Journal on Ad Hoc Networks*, vol. 26, March 2015, pp. 17–35, 2014, doi: 10.1016/j.adhoc.2014.10.009.
- [12] B. Ghaleb, A. Al-Dubai and E. Ekonomou, "E-Trickle: Enhanced Trickle Algorithm for Low-Power and Lossy Networks," *IEEE International Conference on Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing*, Liverpool, UK, 2015, pp. 1123-1129, doi: 10.1109/CIT/IUCC/DASC/PICOM.2015.168.
- [13] M. Barcelo, A. Correa, J. L. Vicario, A.i Morell and X. Vilajosana, "Addressing Mobility in RPL with Position Assisted Metrics," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 7, pp. 2151–2161, 2016, doi: 10.1109/JSEN.2015.2500916.
- [14] Y. Tahir, S. Yang and J. McCann, "BRPL: Backpressure RPL for High-Throughput and Mobile IoTs," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 17, no. 1, pp. 29–43, 2017, doi: 10.1109/TMC.2017.2705680.
- [15] M. Bouaziz, A. Rachedi and A. Belghith, "EKF-MRPL: Advanced mobility support routing protocol for

- internet of mobile things: Movement prediction approach,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 93, pp. 822–832, 2019, doi: 10.1016/j.future.2017.12.015.
- [16] H. Fotouhi, D. Moreira, M. Alves and P. Meumeu Yoms, “mRPL+: A mobility management framework in RPL/6LoWPAN,” *Journal on Computer Communications*, vol. 104, May 2017, pp. 34–54, 2017, doi: 10.1016/j.comcom.2017.01.020.
- [17] S. Sanshi and C. D. Jaidhar, “Enhanced mobility aware routing protocol for Low Power and Lossy Networks,” *Journal on Wireless Networks*, vol. 25, pp. 1641–1655, 2017, doi: 10.1007/s11276-017-1619-6.
- [18] K. S. Bhandari, A. S. M. Sanwar Hosen and G.H. Cho, “CoAR: Congestion-aware routing protocol for low power and lossy networks for IoT applications,” *Journal on Sensors*, vol. 18, no. 11, pp. 3838, 2018, doi: 10.3390/s18113838.
- [19] S. Murali and A. Jamalipour, “Mobility-aware energy-efficient parent selection algorithm for low power and lossy networks,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 2593–2601, 2018, doi: 10.1109/JIOT.2018.2872443.
- [20] F. Gara, L. B. Saad, R. B. Ayed and B. Tourancheau, “A new scheme for RPL to handle mobility in wireless sensor networks,” *Journal on Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, vol. 30, no. 3, pp. 173–186, 2019, doi: 10.1504/IJAHUC.2019.098479.
- [21] M. Bouaziz, A. Rachedi, A. Belghith, M. Berbineau and S. Al-Ahmadi, “EMA-RPL: Energy and mobility aware routing for the Internet of Mobile Things,” *Journal on Future Generation Computer Systems*, vol. 97, pp. 247–258, 2019, doi: 10.1016/j.future.2019.02.042.
- [22] P. Suganya and C.H. Pradeep Reddy, “LNR-PP: Leaf Node Count and RSSI Based Parent Prediction Scheme to Support QoS in Presence of Mobility in 6LoWPAN,” *Journal on Computer Communications*, vol. 150, January 2020, pp. 472–487, 2020, doi: 10.1016/j.comcom.2019.12.012.
- [23] J. Kniess and V. d. Figueiredo Marques, “MARPL: A crosslayer approach for Internet of things based on neighbor variability for mobility support in RPL,” *Journal on Transactions on Emerging Telecommunication Technologies*, vol. 31, no. 12, 2020, doi: 10.1002/ett.3931.
- [24] S. Hoghooghi and R. Javidan, “Proposing a new method for improving RPL to Support mobility in the Internet of Things,” *Journal on IET Networks*, vol. 9, no. 2, pp. 48-55, 2020, doi: 10.1049/iet-net.2019.0152.
- [25] R. H. Hussain, “Strategies for Enhancing the Performance of (RPL) Protocol,” *Journal on Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering*, vol. 17, no. 2, pp. 198-203, 2021, doi: 10.37917/ijeee.17.2.22.
- [26] A. Mohammadsalehi, B. Safaei, A. M. Hosseini Monazzah, L. Bauer, J. Henkel and A. Ejlali, “ARMOR: A Reliable and Mobility-aware RPL for Mobile Internet of Things Infrastructures,” *Journal on IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 1503-1516, 2021, doi: 10.1109/JIOT.2021.3088346.
- [27] F. Fazli and M. Mansubbassiri, “V-RPL: An effective routing algorithm for low power and lossy networks using multi-criteria decision-making techniques,” *Journal on Ad Hoc Networks*, vol. 132, July, 2022, doi: 10.1016/j.adhoc.2022.102868.
- [28] D. M. Castro and F. S. Parreiras, “A review on multi-criteria decision-making for energy efficiency in automotive engineering,” *Journal on Applied Computing and Informatics*, 2018, doi: 10.1016/j.aci.2018.04.004.
- [29] D. Sabaei, J. Erkoyuncu and R. Roy, “A review of multi-criteria decision making methods for enhanced maintenance delivery,” *Journal on Procedia CIRP*, vol. 37, pp. 30–35, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2015.08.086.
- [30] E. K. Zavadskas, J. Antucheviciene and S. Kar, “Multi-objective and multi-attribute optimization for sustainable development decision aiding,” *Journal on Sustainability*, vol. 11, no. 11, 2019, doi: 10.3390/su11113069.
- [31] T. L. Saaty, “A scaling method for priorities in hierarchical structures,” *Journal on Mathematical Psychology*, vol. 15, no. 3, pp. 234–281, 1977.

- [32] M. Brunelli, "A survey of inconsistency indices for pairwise comparisons," *International Journal of General Systems*, vol. 47 , no. 8 , pp. 751–771, 2018, doi: 10.1080/03081079.2018.1523156.
- [33] S. Klutho, "Mathematical Decision Making An overview of the analytic hierarchy process," *Journal on Computer Science*, 2013.

COPYRIGHTS

©2024 by the authors. Published by the Islamic Azad University Bushehr Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

