

An Enhanced Routing Algorithm in Smart IoT Networks with Mobile Nodes

Zakieh Sharifian¹, Ph.D. Student, Behrang Barekatin^{1,2}, Assistant Professor, Alfonso Ariza Quintana^{1,3}, Professor, Zahra Beheshti^{1,2}, Assistant Professor, Faramarz Safi^{1,2}, Associate Professor

¹Faculty of Computer Engineering- Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

²Big Data Research Center- Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

³Faculty of Telecommunication Engineering- University of Malaga, Malaga, Spain

zak.sharifian@sco.iaun.ac.ir, behrang_barekatin@iaun.ac.ir, aarizaq@uma.es, z-beheshti@iaun.ac.ir, fsafi@iaun.ac.ir

Abstract

The internet of things (IoT) faces various challenges due to its different characteristics and due to the novelty of related technologies and standards. The existence of these different and at the same time new problems has drawn the attention of many scientific researchers toward this new technology. One of the most important and fundamental challenges is related to the topic of routing protocols in static and mobile networks, and more precisely, optimizing and improving the quality of service of it. In this work, a novel flexible, scalable, and efficient routing protocol named MLOADng-AT (mobile lightweight on-demand ad hoc distance vector routing protocol– analytic hierarchy process technique for order of preference by similarity to ideal solution) has been introduced to overcome the routing challenges in mobile scenarios. Using MLOADng-AT, firstly, taking advantage of the HELLO message, information about link quality parameters and mobility characteristics up to two hops is exchanged among static and mobile nodes. Moreover, it supports an error recovery path without rerunning a new routing process that noticeably decreases the network routing delay. MLOADng-AT can be easily adapted to any quality of service (QoS) parameter with very low complexity which is very important for a delay-sensitive IoT-based network. Finally, in case of noisy conditions especially for mobile networks, the proposed protocol can be efficiently used in low-quality links. Simulation results based on several scenarios depicted that end-to-end delay (EED) and packet delivery ratio (PDR) parameters significantly improved in the proposed method compared to other similar methods. For the area with dimensions of 400 x 200 m², the obtained values of the EED and PDR parameters are respectively 0.0011 seconds and 98.47%, and also for the scenarios implemented in the area of 800 x 400 m², the achieved results of the EED and PDR parameters are respectively 0.0059 seconds and 86.167%.

Keywords: End to end delay, internet of things, packet delivery rate, quality of service, routing protocol, smart grid

Received: 28 February 2023

Revised: 10 March 2023

Accepted: 23 April 2023

Corresponding Author: Dr. Behrang Barekatin

Citation: Z. Sharifian, B. Barekatin, A.A. Quintana, Z. Beheshti, F. Safi, "An enhanced routing algorithm in smart iot networks with mobile nodes", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 16, no. 63, pp. 1-24, September 2025 (in Persian).

یک الگوریتم بهبودیافته مسیریابی در شبکه‌های هوشمند اینترنت اشیا با گره‌های سیار

ذکيه شريفیان^۱، دانشجوی دکتری، بهرنگ برکتین^۲، استادیار، آلفونسو آریزاکوانتینا^{۱،۳}، استاد، زهرا بهشتی^{۲،۱}، استادیار، فرامرز صافی^{۲،۱}، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی کامپیوتر- واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقات کلان داده- واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۳- دانشکده مهندسی مخابرات- دانشگاه مالاگا، مالاگا، اسپانیا

zak.sharifian@sco.iaun.ac.ir, behrang_barekatain@iaun.ac.ir, aarizaq@uma.es, z-beheshti@iaun.ac.ir, fsafi@iaun.ac.ir

چکیده: اینترنت اشیا (IoT)، بنابر ویژگی‌های متفاوت و با توجه به جدید بودن فناوری‌ها و استانداردهای مربوطه، با چالش‌های مختلفی مواجه است. یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین چالش‌ها، پروتکل‌های مسیریابی در شبکه‌های ثابت و سیار و به‌طور دقیق‌تر بهینه‌سازی و ارتقای کیفیت سرویس آن مربوط می‌شود. در این مقاله، یک پروتکل مسیریابی منعطف، مقیاس‌پذیر و کارآمد به نام MLOADng-AT برای غلبه بر چالش‌های مسیریابی در سناریوهای سیار معرفی شده است. در MLOADng-AT، اولاً، با استفاده از پیام سلام، اطلاعات مربوط به پارامترهای کیفیت لینک و ویژگی‌های گره‌های سیار تا دو گام بین گره‌های ثابت و سیار جمع‌آوری می‌شود. علاوه بر این، در صورت خرابی مسیر، عملیات بازیابی بدون اجرای مجدد فرآیند مسیریابی طراحی شده که تاخیر مسیریابی شبکه را کاهش می‌دهد. MLOADng-AT می‌تواند با حفظ و بهبود پارامترهای کیفیت خدمات سرویس (QoS) با پیچیدگی بسیار کم سازگار شود. در نهایت، در شرایط نزدیک به دنیای واقعی به ویژه برای شبکه‌های سیار، پروتکل پیشنهادی می‌تواند به‌طور موثر منجر به حفظ و بهبود QoS شود. نتایج شبیه‌سازی بر اساس طراحی و آزمون چندین سناریو نشان می‌دهد که پارامترهای تأخیر انتها به انتها (EED) و نرخ تحویل بسته (PDR) در روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌های مورد مقایسه عملکرد و بهبود مناسبی ایجاد کرده است. برای فضای با ابعاد ۴۰۰×۲۰۰ مترمربع مقادیر به‌دست آمده پارامترهای EED و PDR به ترتیب برابر ۰/۰۰۱۱ ثانیه و ۹۸/۴۷۷ درصد و همچنین برای سناریوهای اجرا شده در فضای ۸۰۰×۴۰۰ مترمربع مقادیر به‌دست آمده پارامترهای EED و PDR به ترتیب برابر ۰/۰۰۵۹ ثانیه و ۸۶/۱۶۷ درصد است.

کلمات کلیدی: اینترنت اشیا، تاخیر انتها به انتها، شبکه هوشمند، کیفیت سرویس، مسیریابی، نرخ تحویل بسته

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۲۹

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۲/۳

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر بهرنگ برکتین

نشانی نویسنده‌ی مسئول: نجف‌آباد- بلوار دانشگاه- دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد- دانشکده مهندسی کامپیوتر

۱- مقدمه

اینترنت اشیاء^۱ (IoT) به عنوان یک فناوری نوظهور در حوزه فناوری اطلاعات، مجموعه‌ای از دستگاه‌های متصل به اینترنت است که قادر به پشتیبانی و انتقال داده‌ها از مکانی به مکان دیگر بدون دخالت مستقیم انسان هستند و در سال‌های اخیر، اهمیت این تکنولوژی توجه جهان تجارت و جامعه پژوهش را به طور ویژه به خود جلب نموده است [۱]. به عبارت دیگر، IoT به روند نوظهور اتصال دستگاه‌ها و اشیاء فیزیکی با قابلیت‌های سنجش، محاسبات و ارتباطات اشاره دارد که آنها را در قالب یک شبکه متصل می‌کند. تحقیقات در حوزه IoT طیف گسترده‌ای از زمینه‌ها از جمله شناسایی و ردیابی اشیاء، شبکه‌سازی اشیاء، مسیریابی مناسب، سنجش داده‌ها، کنترل حریم خصوصی، امنیت و موارد دیگر را در بر می‌گیرد [۲].

اینترنت اشیاء بنابر ویژگی‌های متفاوت و با توجه به جدید بودن فناوری‌ها و استانداردهای مربوطه، با چالش‌های مختلفی مواجه است. بر اساس تحقیقات اخیر، یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین این چالش‌ها در ارتباط با مبحث مسیریابی و به طور دقیق‌تر بهینه‌سازی و بهبود کیفیت مبادله و مسیریابی داده بالاخص هنگامی که گره‌ها سیار هستند، مطرح است. لزوم به کارگیری و مشارکت گره‌های میانی در ارسال داده میان مبدا و مقصد در شبکه و تعیین این‌که کدام یک از این گره‌ها بایستی در ارسال داده‌ها میان مبدا و مقصد شرکت کنند، باعث به وجود آمدن شیوه‌های گوناگون مبادله داده‌ها و به تبع آن الگوریتم‌های مسیریابی در این نوع شبکه‌ها شده است. مسیریابی در شبکه‌های بزرگ مانند IoT اساساً یک چالش است، به این دلیل که الگوریتم باید میان نیازمندی‌های طراحی از قبیل پایداری، بهینگی و از این قبیل، با توجه به معیارهای مختلف کارایی تعادل برقرار کند. این مهم زمانی که گره‌ها تحرک‌پذیری دارند، با چالش‌های متفاوت‌تری روبه‌رو است. با توجه به این‌که پروتکل‌های مسیریابی نقش اساسی در کارایی شبکه دارند، طراحی پروتکل‌های کارآمد از لحاظ تاخیر و نرخ تحویل بسته یک ضرورت است تا با استفاده از آنها کارایی شبکه که مهم‌ترین هدف است، حفظ شود [۳]. برای فائق آمدن به چالش ارتباط بین اشیاء در یک زیرساخت غیرمتمرکز^۲، خود سازمان یافته^۳ و در حال تغییر به دلیل تحرک‌پذیری گره‌ها، به پروتکل‌های مسیریابی مطمئن و قابل اعتماد نیاز هست. پروتکل‌هایی که ارسال و دریافت پیام را با توجه به متریک‌های متفاوت و متناسب برای کاربردهای مختلف در حالتی که گره‌های ثابت و متحرک در شبکه وجود دارند، تضمین کنند [۴].

در مسیریابی بین گره‌ها در IoT چالش‌هایی مانند وجود گره‌های متحرک، از بین رفتن لینک مسیر انتقال، انتخاب مسیر با ترافیک بالا و از بین رفتن بسته به دلایل مختلف (مانند بیشتر بودن زمان تحویل نسبت به زمان زنده بودن بسته، نویز و اعوجاج) وجود دارند. این مشکلات در بین شبکه‌ها با گره‌های ثابت یا متحرک، باعث تأخیر در ارائه سرویس می‌شوند. بنابراین کارایی پروتکل مسیریابی در گرو رفع یا جلوگیری از بروز خطا است تا شبکه با کمترین تأخیر و کارایی بالاتر به سرویس‌دهی ادامه دهد [۵]. با در نظر گرفتن مولفه‌های^۴ کیفی لینک در مسیریابی، انتخاب بهترین مسیر ممکن با توجه به وضعیت لینک و توجه به پارامترهای مختلف و اولویت دادن به هر کدام از پارامترها مد نظر است تا تصمیم بهتری در روند مسیریابی گرفته شود. از جنبه دیگر، به دلیل محدودیت‌های موجود در اجزای تشکیل دهنده اینترنت اشیاء، شبکه‌هایی متناسب با عنوان شبکه‌های کم‌توان و دارای اتصالات ناپایدار^۵ معرفی شدند. تجهیزات^۶ اینترنت اشیاء در شبکه‌های کم توان با ارتباطات ناپایدار، معمولاً از تعداد گره‌هایی با محدودیت منابع در حافظه، میزان قدرت محاسبه و پردازش و در بسیاری موارد محدودیت در میزان انرژی تشکیل شده‌اند. بنابراین در شبکه‌های کم توان و از دست‌رفته، کارایی شبکه به طور قطع وابسته به چگونگی استفاده و مدیریت محدودیت‌های منابع تجهیزات شبکه توسط پروتکل مسیریابی است [۶].

در شبکه‌های توان کم اینترنت اشیاء، پروتکل‌های مسیریابی در دو دسته واکنشی^۷ و کنشی^۸ تقسیم شده‌اند [۷]. پروتکل مسیریابی کنشی با حفظ و نگهداری مسیرهای قبلی، از تاخیرهای موجود برای کشف مسیر جلوگیری می‌کند. این دسته از پروتکل‌ها به حافظه نسبتاً بالایی برای ذخیره اطلاعات مسیرها نیاز داشته و سربار^۹ انتقال و محاسباتی بیش از حد ایجاد می‌کنند که با ماهیت شبکه IoT تناسبی ندارد [۸]. در نقطه مقابل، پروتکل‌های واکنشی تنها زمانی عمل کشف مسیر را انجام می‌دهند که گره مبداء درخواست ارسال داشته و هیچ مسیری از قبل وجود نداشته است. این پروتکل‌ها برای کاهش سربار، اطلاعات را فقط برای مسیرهای فعال پخش می‌کنند. زمانی که یک گره برای گره مقصد درخواست مسیر می‌دهد، در ابتدا یک فرآیند کشف مسیر در شبکه رخ می‌دهد. پروتکل‌هایی چون مسیریابی منبع پویا^{۱۰} (DSR) [۹]، مسیریابی بردار فاصله زمانی

مبتنی بر تقاضا^{۱۱} (AODV) [۱۰]، الگوریتم مسیریابی مرتب شده موقت^{۱۲} (TORA) [۱۱] از جمله این دسته روش‌های مسیریابی هستند [۱۲]. بر اساس تحقیقات اخیر و با توجه به ماهیت شبکه‌های هوشمند اینترنت اشیا، پروتکل‌های واکنشی کارایی بهتری از خود نشان داده‌اند [۱۳]. در بین انواع مختلف پروتکل‌های واکنشی و کنشی تحقیقات وسیع‌تری با توجه به نیازمندی‌ها و ماهیت سیستم‌ها پروتکل مسیریابی برای شبکه‌های کم‌مصرف و با ائتلاف^{۱۳} (RPL) و مسیریابی سبک‌وزن بردار فاصله زمانی مبتنی بر تقاضا نسل جدید^{۱۴} (LOADng) در IoT بر روی آنها در حال انجام است [۱۴].

در بین موارد مطرح شده، با توجه به ماهیت اینترنت اشیا انواع ترافیک همتابه‌همتا^{۱۵} (P2P) یک اتفاق شایع است. به عنوان مثال، در کنترل از راه دور یک ساختمان هوشمند، بیش از ۳۰ درصد از ترافیک می‌تواند P2P باشد [۱۴]. در این سناریو استفاده از پروتکل مسیریابی RPL باعث ایجاد ترافیک و تصادم بیشتری در شبکه و مصرف انرژی خواهد شد. متقابلاً، پروتکل‌های واکنشی برای ترافیک P2P طراحی شده‌اند. مطابق تحقیقات اخیر، بهترین و مناسب‌ترین پروتکل واکنشی برای شبکه‌های کم‌توان و از دست‌رفته پروتکل LOADng است [۱۵]. پروتکل LOADng در سناریوهای ترافیکی چند گره به یک گره^{۱۶} (MP2P) و P2P نسبت به RPL عملکرد بهتری دارد. به عبارتی، LOADng از الگوهای ترافیکی عمومی‌تری پشتیبانی می‌کند [۱۶]. پروتکل واکنشی LOADng با کارایی بهتر، تاخیر کمتر مسیریابی، مقیاس‌پذیری و مسیریابی ایمن‌تر در شبکه‌های توان کم و ناپایدار طراحی شده و هیچ جدول مسیریابی برای مقصدها در شبکه نگهداری نمی‌کند، اما کشف مسیر به سمت مقصد را تنها زمانی آغاز می‌کند که داده‌هایی برای ارسال به آن مقصد وجود داشته است تا از سرریز داده‌ها جلوگیری و مصرف حافظه مسیریابی را کاهش دهد [۱۷]. این پروتکل با تمام مزیت‌هایش نسبت به سایر پروتکل‌ها، دارای عیوبی نیز هست. با توجه به مکانیزم این پروتکل که دائماً در حال پخش پیام‌های کنترلی است، بدیهی است که بر روی سربار و تاخیر تاثیر محسوسی دارد. روش‌های گوناگونی که برای بهبود این پروتکل پیشنهاد شده‌اند، تلاش بر کمتر کردن میزان پخش پیام‌های کنترلی دارند. برای حل این مشکل، راه‌حلی‌هایی مانند قرار دادن پرچم‌های پیام‌های کنترلی برای محدود کردن ارسال بسته‌ها و یا کنترل کردن تعداد ارسال پیام‌های کنترلی انجام شده است. به‌عنوان مثال، درخواست مسیریابی هوشمند (SmartRREQ) به‌عنوان راه‌حلی برای محدود کردن پخش^{۱۷} پیام‌ها در طی فرآیند کشف مسیر پیشنهاد داده شد. این راه‌حل از اطلاعات موجود در مورد مسیرهای موجود در گره‌های میانی برای کنترل تعداد پیام درخواست مسیریابی^{۱۸} (RREQ) ارسال استفاده می‌کند. هنگامی که یک گره میانی، که نه مبدأ است و نه مقصد، RREQ را دریافت می‌کند، باید پردازش اضافی را انجام دهد تا تأیید کند آیا در مجموعه مسیریاب، گره مقصد را دارد یا وجود ندارد. در این روش اگر گره‌ای از شبکه خارج شود، کل مسیر از دست خواهد رفت [۱۸]. به دنبال حل مشکل پخش پیام‌های کنترلی و برای کاهش آن، روش جستجوی حلقه در حال گسترش^{۱۹} (ERF) معرفی شد. در این روش یک فیلد جدید در پیام کنترلی RREQ تعبیه شده است [۱۹]. در روش دیگر، برای بهبود پروتکل LOADng، ساختاری درختی در نظر گرفته شده که با استفاده از مکانیزم حافظه نهان سعی در کنترل ارسال پیام و کاهش برخورد و در نهایت ذخیره انرژی دارد [۲۰]. این روش تاخیر بسیار بالایی ایجاد می‌کند، چرا که برای هر بار مسیریابی زمان زیادی صرف پیدا کردن مسیر می‌شود.

با توجه به موارد فوق، مشکلات عمده پروتکل LOADng شامل مواردی مانند (۱) بالا بودن هزینه مسیریابی، (۲) سربار پیام در روند کشف مسیر، (۳) بی‌توجهی به مسیرهای یک طرفه در شبکه، (۴) تاخیر بالا در ارسال اطلاعات، (۵) پایین بودن کیفیت سرویس تحت تاثیر موارد ذکر شده و در نهایت (۶) به دلیل استفاده از مکانیزم پخش در ارسال پیام‌های کنترلی منابع شبکه مصرف شده و هزینه بالایی برای شبکه به بار می‌آورد. به‌عنوان مثال، در بین مشکلات موجود برای حفظ و بهبود کیفیت سرویس در مسیریابی، آگاهی از همسایگی هر گره نه تنها یک گام به جلو بلکه تا دو گام می‌تواند در انتخاب و رتبه‌بندی مسیر با کیفیت بالاتر و هزینه کمتر کمک کند [۲۱]. بدیهی است که با وجود معیارهای متعدد کیفیت لینک، نیازمند استفاده از روش‌های ریاضی و آماری برای تصمیم‌گیری بهتر و دقیق‌تر هستیم.

به‌طور کلی، دستگاه‌های اینترنت اشیا، دارای محدودیت‌های سخت افزاری (پردازش و حافظه) هستند. در مجموعه وسیعی از شبکه‌ها و محیط‌های اینترنت اشیا، دستگاه‌های شبکه می‌توانند سیار و در حال حرکت باشند، که کارکرد شبکه در راستای حفظ کیفیت سرویس را سخت‌تر می‌کند [۲۲]. بنابراین، با توجه به این ویژگی‌ها، شبکه‌های IoT به عنوان شبکه‌های کم‌توان و

دارای اتصالات ناپایدار دسته‌بندی می‌شوند. با توجه به ویژگی‌های این دسته از شبکه‌ها، پروتکل‌های مسیریابی باید در هر دستگاه اینترنت اشیا، با کمترین هزینه محاسباتی ممکن، بهترین مسیر موجود با تکنیک‌های کم‌حجم محاسبات متناسب با ویژگی‌های منحصر به فرد این نوع شبکه بوده و در عین حال کارآمد هستند. علاوه بر عملکرد متناسب دستگاه‌ها، پروتکل‌های مسیریابی باید بتوانند خود را با تغییرات ناشی از تحرک دستگاه‌های اینترنت اشیا، تطبیق دهند.

پروتکل مسیریابی RPL [۳]، اگرچه به‌عنوان پروتکل مسیریابی استاندارد برای شبکه‌های اینترنت اشیا [۲۳] در نظر گرفته می‌شود، اما به‌طور موثر از تحرک گره‌ها پشتیبانی نمی‌کند، زیرا با تمرکز برای شبکه‌های با گره‌های ثابت طراحی شده است [۲۴]. مطابق پیشینه تحقیقات، در پژوهش‌های کنونی به مطالعه جامعی برای ارزیابی عملکرد پروتکل LOADng در شبکه‌های IoT با گره‌های سیار پرداخته نشده است. عملکرد ضعیف راه‌حل‌های مسیریابی اینترنت اشیا، موجود در سناریوهای گره‌های سیار، نیاز به کاهش پیچیدگی محاسبات برای برآورده کردن الزامات این شبکه‌ها با توجه به خصوصیت‌های منحصر به فرد اینترنت اشیا، ایجاد می‌کند. بنابراین، در تحقیق جاری با هدف بهبود عملکرد LOADng بر پایه پروتکل LOADng-AT [۲۱] در سناریوهای گره‌های سیار، به ارائه روش جدیدی با نام MLOADng-AT (Mobile LOADng-AT) [پروتکل مسیریابی سبک‌وزن بردار موقت بر اساس تقاضا ترکیب با تکنیک فرآیند تحلیل سلسله مراتبی^{۲۰} (AHP) برای رتبه‌بندی بر اساس شباهت به راه حل ایده‌آل^{۲۱} (TOPSIS)] پرداخته شده است. پروتکل MLOADng-AT پروتکلی مبتنی بر سناریوهایی با گره‌های سیار در شبکه‌های اینترنت اشیا با عملکرد چشم‌گیر در حفظ و بهبود کیفیت سرویس شبکه معرفی شده است. این مکانیزم مسیرهای موجود بین گره‌ها سیار را بررسی و با توجه به پارامترهای کیفی لینک‌ها، مسیریابی را انجام می‌دهد. علاوه بر این، MLOADng-AT شامل پارامترهای موثر در کیفیت مسیریابی دیگری از جمله شاخص قدرت دریافت سیگنال حامل، سرعت متوسط حرکت گره و جهت حرکت به سمت همسایگی گره جاری، که به دنبال ایجاد مسیرهای قابل اعتماد است. در پروتکل پیشنهادی، سربار تحمیل شده و پیچیدگی محاسباتی با کنترل پخش پیام کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر، پروتکل پیشنهادی MLOADng-AT بهترین مسیر با هزینه کمتر را با اولویت‌دهی، وزن‌دهی و رتبه‌بندی مسیرها بر اساس مولفه‌های مختلف در سناریوهای گره‌های متحرک تضمین می‌کند. علاوه بر این، پارامترهای حیاتی ارزیابی مسیریابی مانند تأخیر انتها به انتها^{۲۲} (EED) و نرخ تحویل بسته^{۲۳} (PDR) توسط MLOADng-AT بهبود می‌یابند. بخش‌های اصلی پروتکل MLOADng-AT پیشنهادی را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

- سناریو پیاده سازی شده برای پروتکل پیشنهادی MLOADng-AT شامل گره‌های متحرک است،
- در ترافیک P2P، پروتکل MLOADng-AT با افزایش PDR و کاهش EED، کیفیت سرویس قابل توجهی را در شبکه‌های هوشمند مبتنی بر IoT ارائه می‌کند.

- همه مسیرها را می‌توان به‌صورت هوشمند و با پیچیدگی محاسباتی بسیار کم در شبکه، توسط الگوریتم ترکیبی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و تکنیک برای ترتیب رتبه‌بندی بر اساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل^{۲۴} (AT) که برای دستگاه‌های کم‌توان اینترنت اشیا، با منابع انرژی محدود بسیار مهم است، رتبه‌بندی کرد. همچنین، پیام‌های تکراری RREQ توسط MLOADng-AT حذف و پخش سیل‌آسای پیام‌های کنترلی کاهش می‌یابد. مزیت دیگر الگوریتم AT ساختار ساده آن است. بنابراین، تعداد پارامترها به‌طور قابل توجهی بر عملکرد AT تأثیر نمی‌گذارند. در نتیجه می‌توان به شکلی پویا، پارامترهای مسیریابی دیگری را برای یافتن بهترین مسیر با توجه کاربرد شبکه با اولویت‌های متفاوت در نظر گرفت.

- در نهایت، زمانی که مسیر انتخاب شده در دسترس نباشد و یا به هر دلیلی از بین برود، MLOADng-AT می‌تواند به راحتی یک مسیر جایگزین را بدون نیاز به اجرای مجدد فرآیند مسیریابی معرفی کند که این باعث کاهش چشم‌گیر سربار محاسباتی و مصرف انرژی خواهد شد.

- این تحقیق از طراحی MLOADng-AT و نتایج حاصل از شبیه سازی به دنبال بهبود و حفظ پارامترهای کیفی شبکه است. به عبارتی MLOADng-AT با انتخاب بهترین مسیر موجود در شبکه با تمرکز بر پارامترهای کیفی لینک، دنبال هدف بهبود کیفیت سرویس در شبکه‌های اینترنت اشیا است.

بخش‌های مختلف مقاله به شرح زیر سازمان‌دهی شده است. در ادامه مقاله در بخش دوم مروری بر پروتکل‌های مسیریابی واکنشی در راستای پژوهش ارائه شده در گذشته انجام شده است. در بخش سوم به بررسی پروتکل ارائه شده به صورت مفصل پرداخته شده و توضیحی از پروتکل مسیریابی برای گره‌های متحرک پیشنهاد شده در این پژوهش ارائه خواهد شد. در بخش چهارم ارزیابی روش پیشنهادی شبیه‌سازی شده مورد بررسی قرار گرفته است. و در نهایت نتایج به دست آمده از پروتکل پیشنهادی در بخش پنجم بیان شده است.

۲- پیشینه پژوهش

در این بخش به شکل مجزا به پژوهش‌هایی که به دنبال بهبود پروتکل LOADng معرفی شده‌اند، پرداخته شده است. همان‌طور که پیش از این اشاره شد، یکی از پروتکل‌های مناسب برای اینترنت اشیاء، LOADng است. LOADng تغییرات اساسی در AODV ایجاد کرده است تا یک پروتکل سبک‌تر و مطمئن‌تر برای تأمین نیازهای LLN ایجاد کند. با این حال، این پروتکل هنوز اشکالاتی دارد که به شدت عملکرد آن را محدود می‌کند. اگرچه LOADng در سال‌های اخیر بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته و پروتکل امیدوارکننده‌ای برای شبکه‌های IoT، عمدتاً با ترافیک P2P در نظر گرفته شده است، اما هنوز چالش‌هایی سر راه خود دارد. در بین پروتکل‌های واکنشی RPL و LOADng جزو پروتکل‌های مطرح برای استفاده در اینترنت اشیاء هستند. مقایسه عملکرد بین LOADng و RPL در پژوهش [۲۵] ارائه شده که در آن عملکرد هر دو پروتکل به نسبت نرخ تحویل بسته، کنترل سربار، متوسط طول مسیر و تأخیر ارزیابی شده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که LOADng عمدتاً در سناریوهای مربوط به ترافیک‌های P2P بر RPL غلبه کرده، جایی که پروتکل‌های کنشی عملکرد بسیار ضعیفی از خود نشان می‌دهند.

پروتکل LOADng به دلیل خصوصیات مسیریابی واکنشی، دارای تعداد زیادی پیام‌های کنترلی در شبکه است که موجب سربار است. به منظور حل این مشکل، محققان در مرجع [۱۸] سازوکار SmartRREQ را برای محدود کردن پخش ارسال پیام‌ها در طی فرآیند کشف مسیر پیشنهاد داده‌اند. این راه‌حل از اطلاعات موجود در مورد مسیرهای موجود در گره‌های میانی برای کنترل تعداد پخش‌های RREQ استفاده می‌کند. بنابراین، هنگامی که یک گره میانی (که نه مبدأ و نه مقصد RREQ است)، RREQ را دریافت می‌کند، باید پردازش اضافی انجام داده تا تأیید کند که در مجموعه مسیریابی خود مسیری به سمت مقصد دارد یا خیر. اگر یک مسیر پیدا شود، پیام RREQ را با استفاده از گره‌های بعدی که ذخیره شده است، به مقصد منتقل خواهد شد یا در غیر این صورت، این پیام به‌طور معمول بین تمام گره‌های همسایه پخش می‌شود (اجرای پیش فرض LOADng). در این مقاله نتایج به دست آمده را با روش‌های LOADng و AODV مقایسه کرده‌اند که در نتیجه آن این مکانیزم ساده می‌تواند تعداد پخش را کاهش داده و همچنین باعث کاهش تصادم^{۲۵} بسته و سربار شده است. با توجه به مکانیزم این روش تا حدودی می‌تواند میزان پخش پیام‌ها را کنترل کند و درصد پایینی از پخش را می‌تواند کنترل کند.

عملکرد LOADng در سناریوهای IoT با ترافیک P2P و P2MP در مرجع [۲۶] مورد بررسی قرار گرفته است. براساس محدودیت‌های LOADng در سناریوهای P2MP گروهی از محققین در مرجع [۲۰] یک تعمیم ساختار درختی را برای پروتکل LOADng پیشنهاد داده‌اند. این روش، با نام پروتکل نسل جدید مسیریابی بردار مسافتی و بر اساس تقاضا نسخه درخت مجموعه^{۲۶} (LOADng-CTP)، خصوصیتی را به LOADng اضافه می‌کند که به گره‌ها کمک می‌کند تا یک درخت مسیریابی را برای انتقال بسته‌های داده از برگ (گره‌ها) به یک گره ریشه (سینک) ایجاد کنند. عملکرد رویکرد پیشنهادی مشابه RPL در رابطه با نرخ تحویل بسته و تأخیر داشته است، اما از نظر کنترل سربار پایین‌تر بوده است. عملکردهای RPL و LOADng-CTP همچنین در یک سناریوی سیستم اندازه‌گیری هوشمند^{۲۷} (AMI) در مرجع [۲۷] مقایسه شدند.

پروتکل LOADng به دلیل خصوصیات مسیریابی واکنشی، دارای تعداد زیادی پیام‌های کنترلی در شبکه است که موجب سربار است. به منظور حل این مشکل، گروهی دیگر از محققین در مرجع [۱۸] سازوکار SmartRREQ را برای محدود کردن پخش ارسال پیام‌ها در طی فرآیند کشف مسیر پیشنهاد داده‌اند. این راه حل از اطلاعات موجود در مورد مسیرهای موجود در گره‌های میانی برای کنترل تعداد پخش‌های RREQ استفاده می‌کند. بنابراین، هنگامی که یک گره میانی (که نه مبدأ و نه

مقصد RREQ است)، RREQ را دریافت می‌کند، باید پردازش اضافی را انجام دهد تا تأیید کند که در مجموعه مسیریابی خود مسیری به سمت مقصد دارد یا خیر. اگر یک مسیر پیدا شود، پیام RREQ را با استفاده از گره‌های بعدی که ذخیره شده است، به مقصد منتقل خواهد شد یا در غیر این صورت، این پیام به‌طور معمول بین تمام گره‌های همسایه پخش می‌شود (اجرای پیش‌فرض LOADng). در این مقاله نتایج به‌دست آمده را با روش‌های LOADng و AODV مقایسه کرده‌اند که در نتیجه آن این مکانیزم ساده می‌تواند تعداد پخش را کاهش داده و همچنین باعث کاهش تصادم بسته و سربار شده است. با توجه به مکانیزم این روش تا حدودی می‌تواند میزان پخش پیام‌ها را کنترل کند، و درصد پایینی از پخش را می‌تواند کنترل کند.

پروتکل LOADng دارای رویکرد ماژولی است و استفاده از معیارهای مختلف مسیریابی برای ساختن مسیرها را مجاز می‌سازد. در مرجع [۲۵] یک معیار مسیریابی جدید بر اساس تعداد مسیرهای زنده^{۲۸} (LR)، انرژی باقیمانده^{۲۹} (RE) و تعداد گره^{۳۰} پیشنهاد شده است. نتایج حاصل این پژوهش نشان می‌دهد که معیار ترکیبی LRRE بهتر از معیارها (LR و RE) به‌صورت جداگانه عمل می‌کند. عملکرد LOADng با معیارهای مختلف مسیریابی نیز در [۲۸] مورد مطالعه قرار گرفته است.

در مرجع [۶] برای بهبود LOADng روشی ارائه شده که روی سناریوهای IoT متمرکز است. در این روش گره‌های بدون اتصال به اینترنت قادر هستند تا به‌صورت خودمختار دروازه‌ای^{۳۱} پیدا کنند. این پیشنهاد، همچنین مکانیزم حافظه پنهان مسیریابی^{۳۲} را برای کمک به روند کشف مسیر معرفی می‌کند. آنها روش خود را با LOADng و SmartRREQ مقایسه کردند که نتیجه آن کاهش تصادفات بسته و مصرف انرژی بوده است. در نگاه اول این مقاله جالب توجه به نظر می‌آید ولی با بررسی دقیق‌تر آن می‌توان ادعان داشت که نتیجه‌گیری نهایی برای مقایسه عملکرد کمی دچار دوگانگی است. به این ترتیب که برخی پارامترهای ذکر شده در مقاله با نتایج حاصل خوانایی ندارد.

در پژوهش دیگر با ایده مسیریابی چندکاره با استفاده از درخت پروتکل LOADng را بهبود داده‌اند [۲۹]. در روش ارائه شده از LOADng-TCP بهره برده شده است. آنها با طرح سناریوها مدل خود را به تفکیک نوع ارسال پیام از جمله ارسال به گره مشخص^{۳۳}، پخش یا یک گره به همه و ترکیب هر دو با روش LOADng-TCP مقایسه کرده‌اند که نتیجه این مقایسه عملکرد بهتر روش پیشنهادی از نظر کیفیت خدمات، مصرف انرژی و استفاده از حافظه بوده است.

در پژوهش دیگری [۳۰] برای بهبود کیفیت شبکه تحت پروتکل LOADng در شرایطی که گره‌ها سیار هستند معرفی شده است. روش ارائه شده از سه تکنیک SmartRREQ، حلقه در حال گسترش^{۳۴} (ER) و نسخه اینترنت اشیاء LOADng بهره برده شده که با اضافه کردن فیلدها و پرچم‌ها متعدد به روی بسته مسیریابی را انجام می‌دهد. برای سناریو متحرک، از پارامتر نشانگر قدرت سیگنال دریافت شده^{۳۵} (RSSI) نیز استفاده شده که با بررسی این پارامتر، برای ارسال به سمت مقاصد متحرک استفاده می‌شود. روش معرفی شده را با معیارهای PDR، تاخیر و انرژی مقایسه کرده که ادعا می‌شود، روش ارائه شده عملکرد قابل قبولی دارد. اما وجود تکنیک‌های مختلف همزمان، پیچیدگی افزایش یافته و وجود مقادیر متعدد اضافه شده به بسته، سربار را افزایش می‌دهد. همچنین هیچ مکانیزم مناسبی برای خرابی لینک‌ها حین مسیریابی بحث و ارائه نشده است.

پژوهشگران دیگری در مرجع [۳۱] به دنبال ارائه راه‌حل برای گره‌های متحرک با فرض یک گره سیار در کنار سه گره ثابت سناریو خود را مطرح کرده است. در ابتدا پارامتر موقعیت گره را در کنار سه همسایه ثابت فرض شده و با استفاده از فیلتر کالمن^{۳۶} به دنبال حدس زدن سرعت و جهت حرکت و رفتار گره سیار مسیریابی خود را انجام می‌دهد. در این ایده هر گره سیار از موقعیت خود در شبکه مطلع است. مسیریابی با تمرکز بر محدوده فرکانس رادیویی انجام می‌پذیرد. در این پژوهش نتایج را با معیارهای PDR، تاخیر و سربار سنجیده شده است. در این پژوهش حداکثر گره‌های در نظر گرفته شده گره در فضایی با ابعاد کوچک در نظر گرفته شده است. در این پژوهش هیچ توجهی به پارامترهای کیفی لینک نشده و همچنین راه‌حلی برای خرابی پیوندها در شبکه در پیش‌بینی نشده است.

در تحقیق انجام شده در مرجع [۳۲]، با تمرکز به داده‌های تجمعی^{۳۷} در شبکه مبتنی بر LOADng به دنبال حذف افزونگی داده‌ها هستند تا بتوانند با کاهش حجم ترافیک، پارامترهای کیفی انرژی و تاخیر را بهبود ببخشند. آنها با روش تجمیع داده‌های مبتنی بر خوشه‌بندی بر روی سر خوشه متمرکز می‌شوند. در این روش لیستی از داده‌های تکراری ایجاد و نگهداری می‌شود که خود این امر احتمال بالا بردن حجم مصرفی منابع ذخیره‌سازی را بالا می‌برد. از طرفی هیچ مقایسه قابل قبولی با

سایر روش‌های مرتبط انجام نشده است تا به ادعای برتری روش ارائه شده نسبت به سایر روش‌ها با منطق و محاسبات صحه گذاشت. در ادامه در جدول (۱) مهم‌ترین مطالعه‌های پیشین جمع‌آوری و مقایسه شده است. با توجه به پژوهش‌های پیشین دیده می‌شود که راه‌حل‌های ارائه شده برای سناریوهای گره‌های سیار بسیار محدود است که اغلب با افزایش سربار و بدون توجه به پارامترهای کیفی لینک در نظر گرفته شده‌اند. در ادامه روش ارائه شده با جزییات معرفی شده است.

Table (1): A summary of existing algorithms in the field of routing using the LOADNG protocol

جدول (۱): خلاصه‌ای بر الگوریتم‌های موجود در زمینه مسیریابی با استفاده از پروتکل مسیریابی سبک‌وزن بردار فاصله زمانی مبتنی بر

تقاضا نسل جدید

مرجع	نام روش	نوع روش	نوع ترافیک	پارامتر مسیریابی	گره سیار	تعداد گره	پارامترهای وابسته	روش‌های مقایسه شده
[۲۰]	LOADng CTP	ساختار درختی	P2MP	پیوند دوطرفه	ندارد	۱۰۰ تا ۵۰۰	سربار نرخ تحویل بسته	RPL LOADng
[۲۴]	SmartRREQ	ساختار مسیریابی بردار فاصله زمانی مبتنی بر تقاضا	P2MP P2P	متریک‌های پیوند	ندارد	۵۰ تا ۱۰۰	سربار، تاخیر، تصادم و نرخ تحویل بسته	Basic LOADng AODV
[۱۹]	Expanding Ring	اضافه کردن هدر + درخواست مسیریابی هوشمند	P2MP P2P	حداکثر تعداد پخش	ندارد	۵۰ تا ۱۰۰	سربار، تاخیر، تصادم و نرخ تحویل بسته	LSmartRREQ
[۲۳]	Composite Routing Metrics in LOADng	متریک ترکیبی	P2P	تعداد مسیرهای زنده، انرژی باقیمانده و تعداد گره	ندارد	۲۰ تا ۲۰۰	طول عمر شبکه، نرخ تحویل بسته، از دست رفتن بسته و انرژی باقیمانده	LOADng
[۲۹]	M-LOADng	ساختار درختی	P2MP P2P	-	ندارد	۲۰ تا ۸۰	نرخ تحویل بسته، گذردهی، سربار، تاخیر، انرژی و اندازه مجموعه مسیریابی	LOADng -CTP
[۶]	LOADng -IoT	اضافه کردن هدر + درخواست مسیریابی هوشمند	P2MP	-	دارد	۱۵ تا ۶۵	سربار، انرژی و نرخ تحویل بسته	LOADNG SmartRREQ
[۳۱]	LOADng IoT Mob	درخواست مسیریابی هوشمند، حلقه در حال گسترش، اینترنت اشیا، مسیریابی سبک‌وزن بردار فاصله زمانی مبتنی بر تقاضا نسل جدید	P2MP	نشانگر قدرت سیگنال دریافت شده	دارد	۱۰ تا ۵۰	نرخ تحویل بسته، سربار و انرژی	LOADNG SmartRREQ ExpandingRing LOADng-IoT
[۳۲]	EKF-LOADng	کالمن	P2MP P2P	-	دارد	۲۴ ثابت ۱ سیار ۱ دروازه	سربار، تاخیر، انرژی و نرخ تحویل بسته	LOADNG SmartRREQ

۳- بیان مسئله

اینترنت اشیا، طیف گسترده‌ای از حوزه‌های کاربردی در محیط‌های مختلف برای بهبود کیفیت زندگی افراد ارائه می‌دهد. این برنامه‌ها حجم عظیمی از داده‌ها را تولید می‌کنند که در شبکه ارسال و دریافت می‌شوند. بنابراین، اخیراً مسیریابی یکی از حیاتی‌ترین چالش‌های اینترنت اشیا، است. به عبارت دیگر، به دلیل محدودیت‌های ارتباطی ماهیت توزیع‌شده، انتقال چند گام، و مشکلات اتصال بی‌سیم در شبکه‌های مبتنی بر اینترنت اشیا، یک الگوریتم مسیریابی ناکارآمد به‌طور قابل توجهی بر عملکرد شبکه تأثیر می‌گذارد. این یک انگیزه بزرگ برای معرفی یا افزایش کیفیت خدمات سرویس^{۳۸} (QoS) در پروتکل‌های مسیریابی مختلف در شبکه‌های IoT برای بسیاری از محققان اخیر بوده است. استفاده از هر نوع توپولوژی و پروتکل در اینترنت اشیا، به انواع برنامه‌ها بستگی دارد. در شبکه هوشمند و انتقال آنها به انتها، پروتکل‌های واکنشی بهترین عملکرد را نشان داده‌اند [۱۷]. اگرچه مطالعات بسیاری با تمرکز بر جنبه‌های مختلف مسیریابی برای بهبود عملکرد انجام شده است، اما برخی از چالش‌های مهم هنوز وجود دارد که به اندازه کافی به آنها پرداخته نشده است. برخی از ویژگی‌های مورد نظر یک پروتکل مسیریابی موثر اینترنت اشیا، به شرح زیر است:

- مقیاس‌پذیری: یک پروتکل مسیریابی مقیاس‌پذیر باید از گره‌های حسگر متعدد در یک منطقه پشتیبانی کند. به عبارت دیگر، مقیاس‌پذیری به این معنی است که عملکرد شبکه به‌طور قابل توجهی کاهش نمی‌یابد در حالی که اندازه شبکه افزایش یا کاهش می‌یابد. یک پروتکل مسیریابی کارآمد می‌تواند این نیاز را تا حد امکان پوشش دهد.

- وضعیت لینک با توجه به ویژگی شبکه و تغییرات سریع در وضعیت لینک، کیفیت لینک را می‌توان هر لحظه تغییر داد. یک پروتکل مسیریابی کارآمد باید در صورت هر گونه تغییر در پارامترهای پیوند، یک واکنش بلادرنگ ارائه دهد.

- در دنیای واقعی گره‌های ثابت و متحرک با نرخ‌های متفاوت وجود دارند، ارائه راه‌حلی که بتواند تمام گره‌ها را پوشش دهد امری ضروری است. این امر بالاخص برای گره‌های سیار بسیار حائز اهمیت است.

- تاخیر انتقال و نسبت تحویل بسته: یک پروتکل مسیریابی کارآمد نه تنها تأخیر انتقال آنها به انتها را کاهش می‌دهد، بلکه نرخ تحویل بسته را نیز افزایش می‌دهد. در این راستا، سطح مورد نیاز QoS را می‌توان توسط پروتکل مسیریابی مورد استفاده ارائه کرد.

- تحمل خطا: لینک‌ها در شبکه‌های IoT ممکن است به هر دلیلی از کار افتاده یا از دسترس خارج شوند. هر گونه شکست لینک در یک مسیر انتخاب شده منجر به اجرای مجدد فرآیند مسیریابی می‌شود. یک پروتکل مسیریابی کارآمد باید با معرفی یک مسیر جایگزین بدون اجرای مجدد فرآیند مسیریابی معرفی کنند. چنین مکانیزمی می‌تواند به‌طور محسوسی سربار مسیریابی در شبکه‌های IoT را کاهش دهد.

روش ارائه شده در این مطالعه با نام MLOADng-AT، یک الگوریتم با پیچیدگی محاسباتی کم است که ضمن توجه به QoS مورد نیاز و سطح تحمل خطا، تاخیر کم و PDR بالا را ارائه می‌کند که برای گره‌های سیار طراحی شده است. به عبارت دیگر، وضعیت کیفی لینک به‌طور گسترده‌ای توسط پروتکل مسیریابی پیشنهادی در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از الگوریتم ترکیبی AT، MLOADng-AT به یک روش مقیاس‌پذیر تبدیل می‌شود. افزودن یا حذف پارامترهای مختلف در فرآیند انتخاب مسیر آسان است که در یک شبکه گسترده مانند اینترنت اشیا بسیار مهم است. مزیت الگوریتم ترکیبی AT در مسیریابی این است که می‌توانیم هر پارامتری را در ماتریس تصمیم اضافه یا حذف کنیم. ما حتی می‌توانیم اولویت‌های پارامترها را بر اساس بستر مورد نیاز تغییر دهیم. همچنین مسیریابی مجدد در صورت از دست رفتن لینک انتخاب شده فعلی مورد نیاز نیست که این کاهش مناسب سربار اجرایی و مصرف انرژی را به دنبال دارد. در همین راستا در بخش بعدی روش پیشنهادی به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است.

۴- روش پیشنهادی

در ادامه به بررسی روش پیشنهادی و تکنیک‌های مورد استفاده در MLOADng-AT پرداخته شده است. ابتدا بررسی پروتکل پایه LOADng و سپس تکنیک AT معرفی خواهد شد و در نهایت پروتکل ارائه شده را به جزئیات شرح داده شده است.

۴-۱- پروتکل پایه

پروتکل LOADng، بر پایه پروتکل AODV طراحی شده است و ویژگی‌هایی را به ارث برده است. پروتکل سبک و ماژولار LOADng به‌طور خاص برای شبکه‌های منابع محدود، به ویژه LLN ها طراحی شده و بر اساس مطالعات قبلی معتبر متعدد می‌توان استنباط نمود که این الگوریتم عملکرد مناسبی در ترافیک P2P ارائه می‌دهد. در پروتکل LOADng، مبداء به محض اینکه پیام RREQ پخش می‌کند، عملیات کشف مسیر شروع می‌شود. از آن سمت، هنگامی که گره مقصد پیام های RREQ را دریافت می‌کند، یک پیام کنترلی پاسخ به مسیریابی^{۳۹} (RREP) را در همان مسیر کشف شده، در جهت معکوس که RREQ دریافت شده، به سمت منبع ارسال می‌کند. به دلیل وجود ریسک‌ها در شرایط واقعی شبکه، هر پیوندی در مسیر انتخاب شده ممکن است از بین برود و یا در دسترس نباشد، در حالی که RREP به سمت گره منبع در حال ارسال است. در این حالت عملیات ترمیم مسیر به صورت محلی انجام می‌شود. پیام کنترلی خطا در مسیریابی^{۴۰} (RERR) به مبداء ارسال می‌شود تا مسیر جایگزینی بر اساس فرآیند کشف مسیر انتخاب کند. لازم به ذکر است، عملیات مجدد کشف مسیر مجدد باعث مصرف انرژی بالا و پیچیدگی محاسباتی در یک شبکه مبتنی بر اینترنت اشیاء می‌شود، که یکی از ایراداتی است که به پروتکل LOADng وارد است. اما سایر ویژگی‌های منحصر به فرد این پروتکل آن را به یک پروتکل مسیریابی واکنشی مناسب با پیاده‌سازی ساده و پیچیدگی کم تبدیل می‌کند. یکی از ویژگی‌های مهم آن، سادگی توابع اصلی این پروتکل است که اجرای آن را نسبت به سایر پروتکل‌های مسیریابی P2P آسان‌تر می‌کند. علاوه بر این، به دلیل ساختار ماژولار آن، امکان افزودن پرچم‌ها^{۴۱} یا فیلدهای جدید در سرآیند^{۴۲} پیام‌های کنترلی وجود دارد. همچنین این پروتکل می‌تواند آدرس‌های ۱ تا ۱۶ اکتاو را پشتیبانی کند. یکی دیگر از ویژگی‌های این پروتکل پشتیبانی از معیارهای مسیریابی مختلف است که به LOADng اجازه می‌دهد با توجه به آن‌ها بهترین مسیر ممکن را از مبدا به مقصد پیدا کند. چهار پیام کنترلی اصلی در پروتکل LOADng وجود دارد، از جمله RREQ، RREP، RERR و تایید پاسخ مسیریابی (RREP-Ack) که مبداء در شروع پروسه مسیریابی پیام کنترلی RREQ را برای یافتن بهترین مسیر ممکن در شبکه پخش می‌کند و آن پیام کنترلی آنقدر پخش می‌شود تا جایی که به گره مقصد می‌رسد. مبداء در ابتدا هیچ اطلاعاتی در مورد گره‌ها و مسیرها ندارد و فقط آدرس مقصد را دارد. وقتی گره مقصد پیام RREQ را دریافت می‌کند، بلافاصله پیام کنترلی RREP را تولید و به سمت مبداء با مکانیزم ارسال یک به یک^{۴۳} ارسال می‌کند. هنگامی که گره مبداء پیام RREP را دریافت می‌کند، پیام کنترلی دیگری به نام RREP-Ack به مقصد از همان مسیر قبلی، اما در جهت معکوس، برای تأیید دریافت پیام کنترل RREP به مقصد ارسال می‌شود. RERR پیام کنترل دیگری در پروتکل LOADng است که در صورت بروز خطا در هر لینکی در مسیر انتخاب شده تولید و ارسال شود. پیام کنترلی RERR توسط گره میانی که ارتباط مستقیم به لینک خراب شده تولید می‌شود و به گره منبع ارسال می‌گردد تا آن را مجبور کند تا پروسه کشف مسیر را دوباره آغاز کند. تا به اینجا به شکل کلی به بررسی نحوه عملکرد پروتکل LOADng پرداخته شد. در بخش بعدی پروتکل بسته سلام که در روش پیشنهادی از آن بهره برده شده است، معرفی شده است.

۴-۲- بسته سلام

بسته سلام^{۴۴} یک بسته داده ویژه است که به‌صورت دوره‌ای از یک روتر برای ایجاد و تأیید روابط همسایگی با روترهای دیگر است که در پروتکل ارتباطی کوتاهترین مسیر اولین مسیر^{۴۵} (OSPF) ارسال می‌شود. در شبکه‌هایی که قابلیت پشتیبانی پخش یا انتقال چندپخشی^{۴۶} را دارند، یک بسته سلام می‌تواند به‌طور همزمان از یک روتر به همه روترهای دیگر ارسال شود تا مسیرهای همسایه را کشف کند. بسته سلام روشی است که روترها به یکدیگر اعلام می‌کنند که یک رابط مشترک دارند. هنگامی که روترها با موفقیت بسته‌های سلام را مبادله می‌کنند، می‌توانند به‌طور خودکار به همسایگی خود آگاه شوند و شروع به مسیریابی داده‌ها بین آنها کنند. در پروتکل ارائه شده بسته سلام بدنبال دو هدف اصلی مورد استفاده قرار گرفته شده است؛ اول آگاهی هر گره از همسایگی خود تا دو گام بعدی و دوم جمع‌آوری اطلاعات مربوط به پارامترهای کیفی تا گام همسایگی اطلاعات جمع‌آوری شده توسط بسته سلام به عنوان ورودی تکنیک AT در جهت مسیریابی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بخش بعدی تکنیک تصمیم‌گیری و رتبه‌بندی AT که در روش پیشنهادی از آن بهره برده شده است، معرفی شده است.

۳-۴- تکنیک تصمیم‌گیری برای رتبه‌بندی مسیر

به‌طور کلی تکنیک‌های تصمیم‌گیری تصمیم‌گیری چند معیاره^{۴۷} (MCDM) به دو دسته مدل‌های چندهدفه^{۴۸} (MODM) و مدل‌های چند شاخصه^{۴۹} (MADM) تقسیم می‌شوند. روش ترکیبی AHP و TOPSIS به عنوان تکنیک‌های تصمیم‌گیری تقریباً در تمامی مسائل تصمیم‌گیری، میزان محاسبات و مقایسه زوجی را حداقل به نصف کاهش می‌دهد که علاوه بر اینکه باعث دقت در محاسبات و نتایج می‌شود، راه حل قابل قبول و منطقی نیز است. روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی AHP باتوجه به سادگی، انعطاف‌پذیری، به‌کارگیری معیارهای کیفی و کمی به‌طور همزمان و نیز قابلیت بررسی سازگاری در قضاوت‌ها می‌تواند در بررسی موضوعات اولویت‌بندی پروژه‌های تحقیقاتی کاربرد مطلوبی داشته است. روش AHP، مسئله تصمیم‌گیری چند معیاری پیچیده را به سلسله مراتب عناصر تصمیم یعنی هدف، معیار و گزینه‌های تصمیم مرتبط با آن مسئله تبدیل می‌کند. روش AHP اهداف، معیار و گزینه‌ها را به شکل ساختار سلسله مراتبی شبیه به درخت مرتب می‌سازد. همچنین این روش زمینه‌ای را برای تحلیل و تبدیل مسایل مشکل و پیچیده به سلسله مراتبی منطقی و ساده فراهم می‌آورد که در چارچوب آن برنامه‌ریز بتواند ارزیابی گزینه‌ها را با کمک معیارها و زیرمعیارها به راحتی انجام دهد. برای ساختن سطوح سلسله مراتبی باید، سطوح مختلف و مرتبط بین اجزا تشکیل‌دهنده هر سطح با سطوح بالاتر و پایین‌تر مشخص گردد [۳۳].

پس از مشخص شدن ساختار سلسله مراتبی، باید ماتریس‌های مقایسه زوجی براساس نظر شخص تصمیم‌گیرنده تعیین گردد. به این‌صورت که بر اساس هدف تصمیم، بررسی می‌شود کدام مقیاس مقایسه زوجی به عنوان میزان اهمیت معیارها تخصیص داده شود. ماتریس AHP حامل الویت‌های هر پارامتر در نظر گرفته شده برای مسیریابی است که به عنوان یکی از ورودی‌های TOPSIS در نظر گرفته می‌شود. تنها داده ذهنی مورد نیاز روش TOPSIS، اهمیت وزن‌ها معیارهاست که این امر موجب جذابیت این روش برای تصمیم‌گیرندگان شده است. مفهوم TOPSIS بیان‌کننده این مطلب است که ایده‌آل‌ترین گزینه، تنها گزینه‌ای نیست که کوتاه‌ترین فاصله را از راه‌حل ایده‌آل مثبت دارد، بلکه بیشترین فاصله را از راه‌حل ایده‌آل منفی نیز داراست. بنابراین، مفهوم TOPSIS نیازمند تعیین یک نقطه ایده‌آل است [۳۴]. این روش بهترین و بدترین پاسخ‌ها را محاسبه می‌کند و هر گزینه را یک نقطه در نظر می‌گیرد تا فاصله اقلیدسی هر نقطه به عنوان مسیر جاری با هر دوی آنها را پیدا کرده، تمام مسیرهای موجود را وزن‌دهی و در نهایت رتبه‌بندی می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود این شاخص بیانگر وزن نسبی فاصله‌ای است. هر چقدر مقدار محاسبه شده برای گزینه‌ای بیشتر است، فاصله از ایده‌آل منفی بیشتر و در نتیجه رتبه‌ی بالاتری نسبت به سایر گزینه‌ها خواهد داشت. و در صورتی که این مقدار از یک کم کنیم، این شاخص نشانگر فاصله از ایده‌آل مثبت خواهد بود، بنابراین هر چقدر میزان آن برای گزینه‌ای کمتر است رتبه‌ی بالاتری خواهد داشت.

۴-۴- جزئیات پروتکل پیشنهادی

در این بخش هدف آن است که پروتکل مسیریابی پیشنهادی را معرفی و جزئیات طراحی و عملکرد آن را مورد بحث و بررسی قرار داده خواهد شد. برای این منظور پیش از آغاز بحث در ارتباط با نحوه عملکرد پروتکل مسیریابی MLOADng-AT، برخی اصول کلیدی که برای طراحی پروتکل پیشنهادی در نظر گرفته شده معرفی و سپس به تشریح جزئیات نحوه عملکرد آن خواهیم پرداخت. در ادامه به بحث و بررسی در ارتباط با فرضیه‌های پیش‌بینی شده برای سازمان‌دهی مکانیزم پیشنهادی پرداخته شده و این مباحث را تحلیل و تشریح خواهیم نمود. در این پژوهش، فرض بر این است که:

- گره‌ها ثابت و سیار هستند. هر گره سیار می‌تواند برای یک زمان تصادفی متوقف و دوباره در جهت دیگری به حرکت ادامه دهد.

- توزیع اولیه گره‌ها در شبکه به صورت تصادفی انجام می‌گیرد.

- عملکرد پروتکل پیشنهادی برای مسیریابی از استاندارد پروتکل LOADng پیروی می‌کند.

- گره‌های شبکه از لحاظ انرژی، سخت‌افزار و برد رادیویی به ترتیب مشابه و محدود هستند.

- هر یک حسگرهای عضو شبکه و یا هر موجودیتی که عضو شبکه است، یک شناسه انحصاری و مجزا برای خود دارد.

- ارتباطات گره‌های شبکه به صورت دو سویه است. به این معنی که گره الف تنها در صورتی می‌تواند با گره ب ارتباط برقرار نموده که گره ب نیز قادر به ارتباط با گره الف است.

- شبکه طراحی شده دارای دروازه ورودی جهت ارتباط با بیرون از شبکه (مانند اینترنت) است.

- ارتباطات گره‌ها با مقصد به صورت چندگامی انجام می‌شود.

- گره‌ها برای دسترسی به رسانه ارتباطی مشترک از استاندارد دسترسی چندگانه با جلوگیری از تصادم^۵ (CSMA-CA) [۳۵] استفاده می‌نمایند.

از دیدگاه استاندارد ارتباطات در مورد استفاده در پروتکل مسیریابی پیشنهادی، شبکه طراحی شده شامل k گره بوده که این گره‌ها به صورت تصادفی در شبکه توزیع و در محیط تحت پوشش شبکه مستقر هستند. علاوه بر این شبکه دارای یک دروازه نیز هست که مدخل شبکه به شمار می‌آید. برای ارتباطات و مبادلات در پروتکل پیشنهادی مبتنی بر پروتکل LOADng عمل می‌شود. بر همین اساس تمامی ارتباطات و مبادلاتی که در پروتکل LOADng مطرح بوده برای MLOADng-AT نیز مطرح هستند. همان‌گونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، LOADng الگوی ارتباطی P2P را پشتیبانی می‌نماید. پروتکل پیشنهادی MLOADng-AT برای مسیریابی و مبادلات داده‌های اینترنت اشیاء با رویکرد بهینه‌سازی پارامترهای کیفی برای گره‌های سیار طراحی و پیاده‌سازی گردیده است. برای این منظور بر تحلیل نیازها و ضرورت‌های مسیریابی موثر با اطمینان متمرکز شده و مهم‌ترین هدف آن رفع محدودیت‌های تحقیقات گذشته و حفظ و بهبود پارامترهای کیفی است. علاوه بر این MLOADng-AT به نحوی پیکربندی شده که سازگار با شرایط حاکم بر IoT و کاربردهای این فناوری است. تحلیل نحوه جزئیات طراحی و عملکرد هر یک از مراحل معرفی شده در ادامه بررسی و تشریح گردیده است.

همان‌طور که در بخش قبل بیان شد، اساسی‌ترین چالش‌های پروتکل‌های معرفی شده مبتنی بر LOADng و نسخه‌های بعدی آن را می‌توان به بالا بردن کارایی شبکه با بهبود پارامترهای کیفی اشاره کرد. پروتکل پیشنهادی MLOADng-AT تلاش در جهت رفع چالش‌های موجود برای سناریوهای گره‌های سیار را دارد. به عبارت دیگر MLOADng-AT پارامترهای مهم کیفیت لینک را در نظر گرفته و مسیرهای موجود را با استفاده از هر دو الگوریتم AHP و TOPSIS رتبه‌بندی می‌کند تا در نتیجه آن به کارایی بهتری دست یابد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، AHP و TOPSIS بهترین روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره با پیچیدگی کم و کارایی بالا هستند. بنابراین، الگوریتم ترکیبی AT در MLOADng-AT دارای چندین مزیت به شرح زیر است:

- برای تصمیم‌گیری می‌توان از معیارهای کمی و کیفی استفاده کرد.

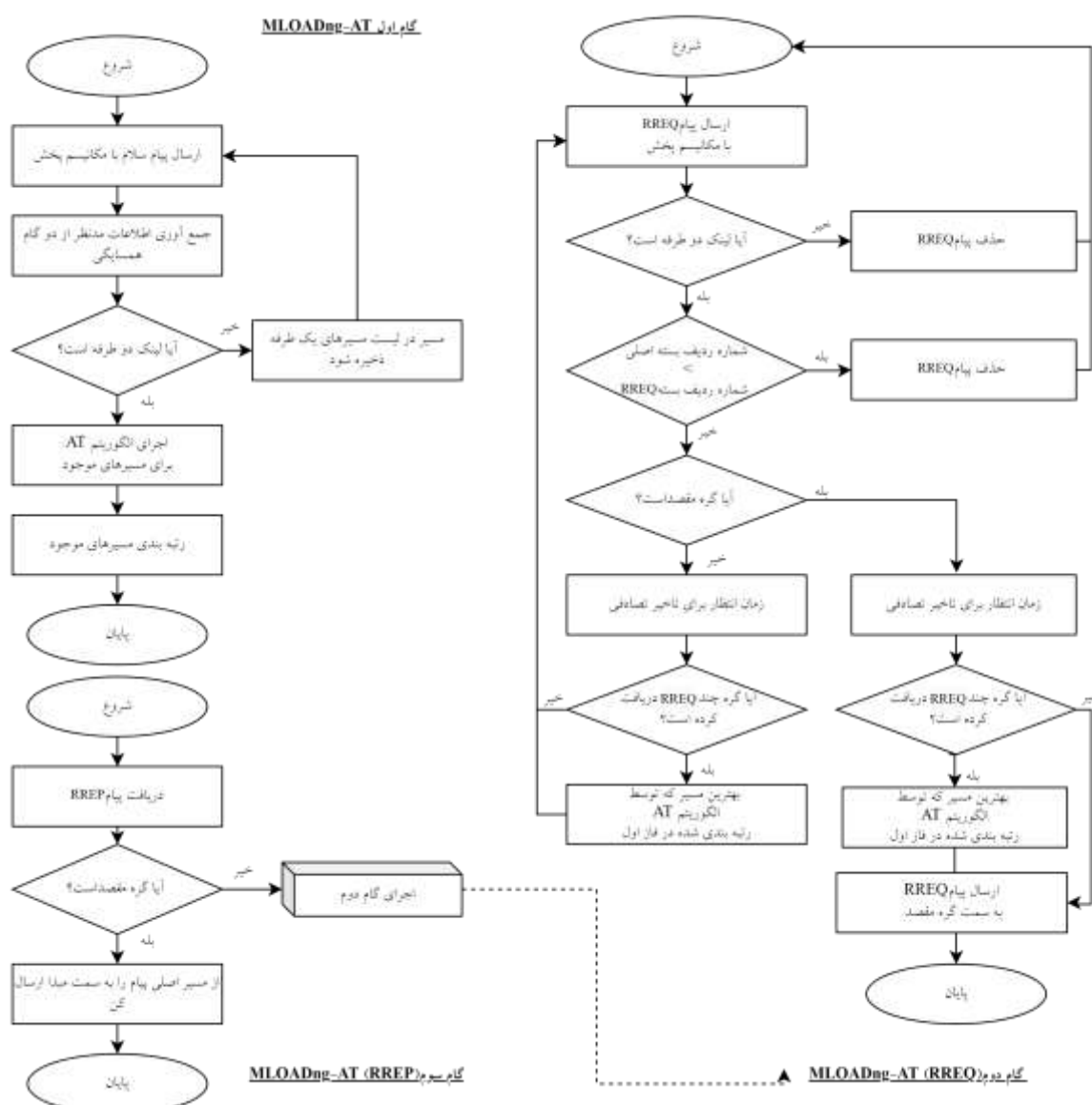
- در AT چارچوب تولید شده را می‌توان با معیارهای مختلف در نظر گرفت.

- این روش ساختار ساده و محاسبات سبک دارد که برای محیط IoT بسیار مناسب است.

- آینده‌نگری با قابلیت در نظر گرفتن پارامترهای دیگر به سادگی در آن وجود دارد.

در این پژوهش با در نظر گرفتن زمان انتظار تصادفی برای دریافت پیام کنترلی RREQ در هر گره، این فرصت به شبکه داده می‌شود تا بیشترین تعداد پیام RREQ موجود احتمالی دریافت و از بین مسیرهای موجود با تعداد بیشتر بهترین مسیر انتخاب شود. همین امر باعث کاهش تداخل در شبکه خواهد شد. زیرا پس از دریافت پیام‌های RREQ پس از زمان تصادفی توسط گره مبدأ و تصمیم‌گیری برای انتخاب بهترین مسیر، سایر پیام‌های RREQ حذف خواهند شد. اگر با دریافت اولین پیام‌های RREQ سریعاً مسیریابی انجام شود، احتمال دریافت سایر RREQ‌های مشابه از سایر مسیرهای موجود وجود دارد که زمانی به گره مدنظر می‌رسند که عملاً شبکه مسیریابی را انجام داده است. این بسته‌ها تبدیل به بسته‌های سرگردان خواهند شد یا از مسیرهای دیگر موجب تداخل و ازدحام می‌شوند. مکانیزم ذکر شده نه تنها به شکل چشمگیری مانع این مشکلات برای شبکه می‌شود، بلکه با بررسی مسیرهای موجود بیشتری می‌توان با اطمینان بالاتر بهترین مسیر موجود را انتخاب کرد. همچنین MLOADng-AT با توجه به رتبه‌بندی مسیرها، در صورت از دست رفتن لینک و ایجاد ازدحام توسط پیام‌های کنترلی متعدد، بلافاصله بهترین مسیرهای بعدی را جایگزین می‌کند. روش ارائه شده در سه گام طراحی شده است. در گام اول، بسته سلام به گره‌های همسایه ارسال می‌شود تا اطلاعات مورد نیاز را از دو گره همسایه گره مبدأ جاری جمع‌آوری کند. سپس الگوریتم AT

تمامی مسیرهای موجود را رتبه‌بندی می‌کند. در گام دوم فرآیند پخش پیام RREQ مورد بررسی قرار می‌گیرد. گام سوم مربوط به پیام RREP است. در شکل (۱) فلوچارت روش پیشنهادی با توجه به سه گام ذکر شده، نمایش داده شده است. گام اول: با توجه به فلوچارت، این گام شامل دو بخش اساسی است. اول جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز از شبکه و دوم اجرای الگوریتم AT. در اولین مرحله از مسیریابی در LOADng-AT، هر گره یک پیام سلام به همسایگان مستقیم و غیرمستقیم خود ارسال می‌کند تا اطلاعات مورد نیاز در مورد پارامترهای کیفیت لینک را به شرح زیر جمع‌آوری کند. همسایگی‌ها ممکن است ثابت و سیار باشند و پارامترهای کیفی لینک به همراه دو پارامتر متوسط سرعت حرکت و جهت حرکت گره‌های سیار توسط بسته سلام جمع‌آوری می‌شوند. این تکنیک در روش پیشنهادی برای آگاهی از پارامترهای کیفیت لینک مسیر تا دو گام بعدی استفاده شده است. پارامترهای جمع‌آوری شده توسط پروتکل بسته سلام طراحی شده در MLOADng-AT در ادامه بیان شده است.



شکل (۱): فلوچارت پروتکل مسیریابی سبک‌وزن بردار موقت بر اساس تقاضا ترکیب با تکنیک فرآیند تحلیل سلسله مراتبی برای رتبه‌بندی بر اساس شباهت به راه حل ایده‌آل

Figure (1): MLOADng-AT flowchart

- تعداد همسایه‌ها^{۵۱} (NN): هر گره در شبکه از طریق لینک‌های موجود به یک یا چند گره‌های شبکه متصل هستند. تعداد کمتر همسایه‌های هر گره که در مسیر انتخاب شده قرار می‌گیرد موجب کاهش احتمال برخورد انتخاب می‌شود.
 - تعداد گام^{۵۲} (HC): منظور از تعداد گام این است که بین گره مبدا و مقصد در مسیرهای موجود چند گره وجود دارد. با انتخاب مسیر با حداقل گام احتمال افزایش سرعت ارسال و دریافت بسته را افزایش می‌دهد.
 - توان دریافتی^{۵۳} (RP): توان دریافتی هر گره به فاصله گره از منبع (آنتن) بستگی دارد. حداکثر RP برای محاسبه و رتبه‌بندی مسیرها انتخاب می‌شود. بالاترین انرژی دریافتی، گره نزدیکتر را نشان می‌دهد.
 - انرژی باقیمانده (RE): اندازه‌گیری انرژی باقیمانده توسط هیچ عاملی در شبکه به‌طور دقیق قابل اندازه‌گیری و تخمین نیست مگر خود گره، که انرژی باقی‌مانده خود را محاسبه و اعلام کند. حداکثر میزان RE هر گام برای داشتن حداکثر طول عمر گره انتخاب می‌شود.
 - نسبت سیگنال به نویز^{۵۴} (SINR): حداکثر SINR هر لینک برای انتخاب مسیر انتخاب می‌شود. نسبت سیگنال به نویز، سطح توان سیگنال را با سطح توان نویز مقایسه می‌کند. هرچه مقدار بیشتر است، مشخصه بهتری محسوب می‌شود؛ زیرا بسته‌های داده بیشتری، نسبت به نویز دریافت می‌شود.
 - تعداد انتقال مورد انتظار^{۵۵} (ETX): معیار ETX یا تعداد انتقال مورد انتظار، معیاری از کیفیت یک مسیر بین دو گره در یک شبکه بسته بی‌سیم است. تعداد ارسال‌ها^{۵۶} و بازارسال‌ها^{۵۷} (DF و DR) بین دو گره در مسیر رفت و برگشت به دنبال تحویل یک بسته به مقصد است.
 - وضعیت لینک‌های دوطرفه^{۵۸} و یک طرفه^{۵۹}: LOADng-AT پیوندها دوطرفه را ترجیح می‌دهد زیرا RREP از همان مسیری استفاده می‌کند که RREQ می‌رسد.
 - زمان انتقال مورد انتظار^{۶۰} (ETT): پارامتر دیگری برای یافتن کیفیت لینک است. ETT بر اساس ETX و نرخ بیت باینری محاسبه می‌شود. ETX و ETT در این مطالعه یکسان هستند، زیرا در این پژوهش همه رابط‌های رادیویی دارای نرخ‌های یکسانی در نظر گرفته شده‌اند.
 - جهت حرکت گره‌های همسایگی: این پارامتر فقط دو مقدار ۰ یا ۱ خواهد داشت. در زمان مسیریابی، گره جاری، گره‌های همسایگی خود را بررسی می‌کند. اگر جهت حرکت گره به سمت گره جاری است، مقدار این پارامتر مقدار ۱ می‌گیرد، در غیر این صورت مقدار ۰ خواهد داشت.
 - متوسط سرعت گره‌های همسایگی: حرکت گره‌ها تا دوگام بررسی و متوسط سرعت آن‌ها به عنوان پارامتری دیگر در نظر گرفته می‌شود.
- با توجه به فلوچارت در شکل (۱) در گام اول، ارسال بسته سلام و جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز و اجرای AT طراحی شده است. در ادامه نحوه استفاده از پارامترهای کیفیت لینک و نحوه وزن‌دهی به آن‌ها توسط AHP بررسی شده است. اختصاص وزن‌های مختلف به پارامترهای تعریف شده امری ضروری است؛ زیرا اهمیت و اولویت پارامترها در روش پیشنهادی متفاوت است. در این پژوهش، این وزن‌ها به‌صورت تجربی و با آزمودن در شبیه‌سازی‌های متعدد نتیجه شده است. مقادیر حاصل و مورد استفاده در رابطه (۱) نمایش داده شده است. ماتریس نمایش داده شده برای تبیین بهتر بحث با فرض شش پارامتر به ترتیب P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 و P_6 ساخته شده و وزن‌ها (ماتریس A)، به عنوان ورودی الگوریتم AHP هستند که با استفاده از رابطه (۲)، نرمال می‌شوند. رابطه (۳) نمونه‌ای برای نرمال‌سازی ماتریس برای درایه مربوط به پارامتر P_1 است که در آنها P_m نمادی از پارامترهای مورد استفاده در این پژوهش هستند. برای مثال پارامترهای ۱ تا ۶ ذکر شده در بخش قبل هستند. روش‌های مختلفی برای نرمال‌سازی محاسبه وزن پارامترها استفاده می‌شود. در روش پیشنهادی، بردار W_n بر اساس وزن پارامترها W_i به‌دست می‌آید و هر عنصر ماتریس با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.
- روش TOPSIS به تنهایی قادر به محاسبه وزن معیارها نیست. به همین خاطر از روش AHP استفاده شده است. پس از آماده‌سازی ماتریس AHP، ماتریس تصمیم TOPSIS ($D_{n \times m}$) با استفاده از رابطه (۶) تولید می‌شود که در آن n نمایانگر تعداد مسیرهای موجود است که کمترین مقدار آن برابر ۱ است.

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 & P_6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 1/2 & 1 & 2 & 4 & 5 & 7 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1/4 & 1/4 & 1/2 & 1 & 1 & 5 \\ 1/5 & 1/5 & 1/3 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

$$P_m^* = \frac{P_m}{P_1 + L + P_m + L + P_n}, m = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$P_1^* = \frac{P_1}{P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6} \quad (3)$$

$$W_i = \frac{\sum \text{Row}}{\text{Number of columns}}, i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$W_i = [W_1, \dots, W_n] \quad (5)$$

$$D_{n \times m} = \begin{bmatrix} P_{11} & \dots & P_{61n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{1m1} & \dots & P_{6mm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

تعداد ستون‌های این ماتریس برابر با تعداد کل پارامترهای در نظر گرفته است که در رابطه (۶) با m مشخص شده است. ماتریس $D_{n \times m}$ نیاز به نرمال‌سازی دارد که با استفاده از رابطه (۷) هر درایه نرمال و در ماتریس $R_{n \times m}$ ذخیره می‌گردد. در رابطه (۷) X_{ij} نمایان‌گر درایه‌ای از ماتریس $R_{n \times m}$ است که در سطر i م و ستون j م قرار گرفته است.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum (x_{ij})^2}} \quad (7)$$

$$R_{n \times m} = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

در این مرحله برای تعیین ماتریس بی‌مقیاس وزن‌دار از رابطه (۹) استفاده شده است. این ماتریس برای محاسبه خروجی نهایی TOPSIS که مسیرهای رتبه‌بندی شده است، نیاز است. در این جا باید وزن معیارها را در ماتریس نرمال ضرب کنیم تا ماتریس وزن‌دار حاصل شود. همان‌طور که در رابطه (۹) مشخص است، از حاصل ضرب رابطه‌های (۵) و (۶) ماتریس V به‌دست می‌آید. این ماتریس به عنوان ورودی اصلی روش TOPSIS است که پردازش‌های اولیه لازم روی ماتریس AHP آن انجام گرفته است.

$$V = W_n \times R_{n \times m} \quad (9)$$

$$v = \begin{bmatrix} v_{11} & \dots & v_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

پارامترها به عنوان معیارهای روش یا جنبه مثبت و یا جنبه منفی دارند. معیارهای مثبت معیارهایی هستند که افزایش آن‌ها دلیلی بر کیفیت برتر لینک است (مانند پارامتر انرژی باقیمانده گره که از نوع مثبت است) و هر چه بیشتر، بهتر است. برعکس، پارامتر تعداد گام هر چه کمتر است، برای مسیریابی گزینه بهتری است. یافتن حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل گام بعدی تکنیک TOPSIS است.

در اینجا باید جنبه پارامترها مشخص شود. برای مثال برای پارامتری مانند انرژی باقیمانده که مقدار بیشتر آن، بهتر است، حل ایده‌آل برای جنبه‌های مثبت بزرگترین عضو ستون مربوط به آن پارامتر و و ضد ایده‌آل برابر با کمترین درایه است و برعکس. به شکل خلاصه می‌توان گفت برای معیارهایی که بار مثبت دارند ایده‌آل مثبت بزرگترین مقدار آن معیار است و در مقابل

ایده‌آل منفی کوچکترین مقدار آن معیار است. برای معیارهایی که بار منفی دارند ایده‌آل مثبت کوچکترین مقدار آن معیار است و ایده‌آل منفی بزرگترین مقدار آن معیار است و بالعکس. حال مقادیر A^+ (ایده‌آل مثبت) و A^- (ایده‌آل منفی) به ترتیب بر پایه رابطه‌های (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌شوند. تا در نهایت بردارهای V_j^+ و V_j^- به دست بیایند. راه حل ایده‌آل مثبت معیارهای هزینه را به حداقل می‌رساند و معیارهای سود را به حداکثر می‌رساند. برعکس، راه حل ایده‌آل منفی، معیارهای هزینه را به حداکثر می‌رساند و معیارهای سود را به حداقل می‌رساند. روابط مربوطه به شرح زیر است:

$$A^+ = \left\{ \left[\max v_{ij} \mid j \in J \right], \left[\min v_{ij} \mid j \in J' \right] \mid i = 1, 2, \dots, m \right\} = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\} \quad (11)$$

$$A^- = \left\{ \left[\min v_{ij} \mid j \in J \right], \left[\max v_{ij} \mid j \in J' \right] \mid i = 1, 2, \dots, m \right\} = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \quad (12)$$

در گام بعدی فاصله مسیرها از ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی برای هر ستون (معیار) بر اساس رابطه (۱۳) و (۱۴) محاسبه خواهد شد.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

در رابطه‌های فوق‌الذکر، S_i^+ فاصله هندسی v_{ij} از v_j^+ و S_i^- فاصله هندسی v_{ij} از v_j^- است. در نهایت برای محاسبه شاخص شباهت و رتبه‌بندی گزینه‌ها از رابطه (۱۵) استفاده می‌کنیم. شاخص شباهت که با C_i نمایش داده می‌شود، نشان‌دهنده امتیاز هر مسیر است. این شاخص مقداری بین ۰ و ۱ دارد. هر چقدر این شاخص به عدد یک نزدیکتر است، نشان از برتری آن مسیر می‌دهد و به نسبت بزرگی هر شاخص مسیرها رتبه‌بندی خواهند شد.

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}, (0 < C_i < 1) \quad (15)$$

بنابراین حداکثر و حداقل مقدار C_i به ترتیب بهترین و بدترین مسیرها هستند. مسیرهای جایگزین بین مقادیر حداقل و حداکثر جای می‌گیرند. خروجی گام اول یک شبکه است که هر گره نسبت دو گام همسایگی خود آگاهی دارد. همچنین تمامی مسیرهای موجود توسط الگوریتم AT وزن و رتبه‌بندی شده‌اند. این الگوریتم اجازه می‌دهد تا پارامترهای QoS مختلف را در فرآیند تصمیم‌گیری اضافه یا حذف کند. بنابراین بهترین مسیر ممکن با پارامترهای مختلف را می‌توان با هزینه کم انتخاب کرد.

گام دوم: پس از گام اول با توجه به فلوچارت در شکل (۱)، عملیات مسیریابی با پخش پیام RREQ توسط گره مبدا آغاز می‌شود. گره مبدا ارسال پیام RREQ را با مکانیزم پخش انجام می‌دهد. تمام همسایگان گره مبدا پیام RREQ را دریافت و برای همسایگان خود مجدداً ارسال می‌کنند. گاهی هر گره ممکن است از چند ارسال کننده متفاوت بسته RREQ یکسان دریافت می‌کنند. در این شرایط، با بررسی مسیرهای ارسال کننده RREQ، بهترین مسیر با توجه به رتبه‌بندی AT انتخاب، به عنوان بخشی از مسیر اصلی مشخص می‌شود و بسته RREQ دریافت شده از بهترین مسیر موجود، حفظ و سایر بسته‌ها حذف می‌شود. این عملیات پخش تا رسیدن به مقصد و انتخاب بهترین مسیر انجام می‌شود. برای پیش‌بینی شرایط مشابه هر گره برای یک زمان مشخص که در این پژوهش انتظار برای تأخیر تصادفی نامیده شده، منتظر می‌ماند تا اگر بسته مشابه دیگری رسید، مسیر را بررسی و در نهایت بهترین را انتخاب کند. تأخیر تصادفی در سایر پروتکل‌های مسیریابی واکنشی دیگر مانند LOADng و AODV نیز استفاده می‌شود. تأخیر تصادفی در LOADng-AT دو هدف به دنبال دارد: جلوگیری از برخورد در انتشار پیام‌های RREQ و جمع‌آوری اطلاعات از چندین مسیر برای بالا بردن احتمال انتخاب بهترین مسیر ممکن. به عبارت دیگر، این مکانیزم احتمال برخورد را کاهش می‌دهد و به LOADng-AT اجازه می‌دهد همه مسیرهای محتمل بررسی و بهترین مسیر ممکن را انتخاب کند. به دنبال استفاده از همین پارامتر، میانگین PDR نیز در شبکه بهبود می‌یابد. اگرچه این زمان انتظار باعث افزایش زمان انجام عملیات مسیریابی می‌شود، اما لازم به ذکر است LOADng-AT، تأخیر کمتری را نسبت به سایر روش‌های مطرح دارد. این عملیات تا زمانی که بسته RREQ به مقصد برسد ادامه پیدا می‌کند. در شرایطی که تنها یک مسیر از گره جاری به مقصد وجود دارد، نیازی به محاسبه بهترین مسیر ممکن و پیاده‌سازی الگوریتم نیست، در این حالت از

مکانیزم SmartRREQ استفاده می‌شود. در این بین اگر پس از انتخاب بهترین مسیر احتمال از دست رفتن لینک به هر دلیلی وجود دارد. در صورت از دست رفتن لینک که بخشی از مسیر اصلی است، بلافاصله بدون نیاز به محاسبات و عملیات مجدد مسیریابی مسیر جایگزین در بین مسیرهای رتبه‌بندی شده توسط AT انتخاب و جایگزین مسیر از دست رفته می‌شود. همین امر به شکل چشم‌گیری در جلوگیری از پخش پیام‌های کنترلی نقش بسزایی دارد و به بهبود کیفیت سرویس نقش مهمی دارد. در روش پیشنهادی که بهترین مسیر ممکن بر اساس پارامترهای QoS انتخاب می‌شود. همچنین، پروتکل پیشنهادی از پیوندها دوطرفه استفاده می‌کند و پیوندها یک طرفه اولویت کمتری در انتخاب مسیر دارند؛ زیرا پیچیدگی کمی برای انتخاب مسیرهای دو طرفه بین دو گره برای ارسال هر دو پیام RREP/RREQ وجود دارد. در صورت انتخاب مسیرهای یک طرفه یافتن مسیر برگشت و مسیریابی مجدد بار محاسباتی بیشتری دارد. گره مقصد پیام RREQ را از بهترین مسیر ممکن دریافت می‌کند و پیام RREP در گام سوم به گره مبدأ ارسال می‌شود.

گام سوم: گره مقصد به محض دریافت پیام RREQ، پیام RREP را تولید کرده و از طریق مسیر انتخاب شده به گره مبدأ ارسال می‌کند. در MLOADng-AT، اگر به هر دلیلی اولین (بهترین) مسیر انتخاب شده در دسترس نباشد، الگوریتم بلافاصله دومین مسیر رتبه‌بندی شده توسط AT را انتخاب می‌کند و RREP مستقیماً توسط مسیر جایگزین ارسال می‌کند. بنابراین، ارسال بسته همیشه تضمین شده است. بنابراین، نیازی به اجرای مجدد فرآیند مسیریابی نیست و در صورت بروز خرابی لینک، بهترین مسیر جایگزین موجود از قبل آماده است، بلافاصله بسته در مسیر جایگزین ارسال می‌گردد. این امر بسیار در بهبود زمان تاخیر، کاهش هزینه‌های مسیریابی از جمله سربار مسیریابی نقش موثری دارد. زیرا اجرای مجدد فرآیند مسیریابی خود شامل ارسال مجدد پیام‌های کنترلی و انتظار برای پاسخ است که هزینه مضاعفی خواهد داشت.

به‌طور خلاصه، پروتکل پیشنهادی به‌طور کلی هزینه‌های مسیریابی را در مقایسه با روش LOADng کاهش می‌دهد. مزایای پروتکل پیشنهادی نسبت به پروتکل LOADng در زیر به شکل خلاصه و جمع‌بندی شده لیست شده است:

- بهترین پارامترهای کیفیت لینک برای انتخاب بهترین مسیر ممکن در نظر گرفته می‌شود.
- پیوندها دو طرفه و پایدار برای انتخاب مسیر در نظر گرفته می‌شوند.
- هر گره از وضعیت همسایگان خود تا دو گام آگاه است.
- الگوریتم ترکیبی AT به تصمیم‌گیری بهینه برای یافتن بهترین مسیر ممکن در بین تمام مسیرهای موجود کمک می‌کند.
- جلوگیری از تکرار فرآیند مسیریابی در صورت خرابی که باعث کاهش سربار، هزینه و زمان می‌شود.
- با در نظر گرفتن پارامترهای متوسط سرعت و جهت حرکت گره‌های سیار در کنار سایر پارامترها، تلاش در بهبود کارایی پروتکل مسیریابی می‌شود.
- بهبود پارامترهای کیفی در سناریوهای گره‌های ثابت و سیار.

۵- شبیه‌سازی و نتایج

در این بخش ابتدا ابزارها و شرایط شبیه‌سازی معرفی شده، سپس معیارها و پارامترهای ارزیابی معرفی می‌گردد و در نهایت نتایج روش ارائه شده نمایش داده خواهد شد و مورد تحلیل و بحث قرار خواهد گرفت.

۵-۱- ابزار و پارامترهای شبیه‌سازی

این بخش ارزیابی عملکرد انجام شده برای ارزیابی رفتار پروتکل پیشنهادی را ارائه می‌دهد. برای شبیه‌سازی مکانیزم پیشنهادی از ابزار شبیه‌ساز^{۶۱} OMNET++ [۳۶] استفاده شده است. در ابتدا برخی فرضیه‌های لحاظ شده برای پیکربندی سناریوها معرفی گردیده و پس از آن به بحث در ارتباط با سناریوهای شبیه‌سازی خواهیم پرداخت. در آزمایش‌های انجام شده برخی فرضیات به قرار زیر در شبکه منظور گردیده‌اند.

- ارتباطات گره‌های عضو شبکه به صورت دوسویه و متقارن خواهد بود.
- گره‌های در نظر گرفته شده ثابت و سیار هستند.

- گره‌ها از لحاظ انرژی و ارتباطات رادیویی همگن^{۶۲} هستند.

- تغییرات توپولوژی شبکه از استاندارد IoT پیروی می‌کند.

جدول‌های (۲) و (۳) به ترتیب پارامترهای در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی و سناریوهای طراحی شده برای بررسی عملکرد پروتکل شبیه‌سازی نمایش می‌دهند. برای ارزیابی و تحلیل هرچه مؤثر روش‌های تحت مقایسه، سناریوهایی با اعمال تمام مقادیر پارامترهای ذکر شده در جدول (۲) از جمله اندازه شبکه، تعداد گره‌های شبکه، نرخ ارسال ترافیک روی شبکه و درصد گره‌های متحرک، تا بر این اساس آزمایشات در شرایط مختلفی انجام شود و عملکرد روش‌ها در قبال حالت‌ها و سناریوهای مختلف ارزیابی و بررسی گردد.

لازم به ذکر است تعداد گره سیار رو به عدد بالاتر گرد شده است. به عنوان مثال از ۲۵ گره موجود در سناریو یک و درحالتی که ۲۵ درصد گره‌ها سیار هستند، به جای عدد ۶/۲۵ عدد ۷ در نظر گرفته شده است. همچنین برای ارزیابی نتایج الگوریتم پیشنهادی در این قسمت نتایج شبیه‌سازی پارامتر میانگین نرخ تحویل بسته (PDR) و تأخیر انتها به انتها (EED) مورد بررسی قرار می‌گیرند.

- متوسط نرخ تحویل بسته: نسبت بسته‌های داده‌ای که با موفقیت به مقصد ارسال شده‌اند به تعداد کل بسته‌های ارسال شده از مبدأ است. این پارامتر نشان می‌دهد که پروتکل در انجام وظیفه خود، یعنی ارسال موفق داده‌ها تا چه حد خوب عمل کرده است. رابطه زیر نحوه محاسبه ذکر شده است. که در آن N_D تعداد بسته‌های رسیده به گره مقصد و N_S تعداد بسته‌های ارسالی توسط گره مبدا است.

$$PDR = \frac{N_D}{N_S} \quad (۱۶)$$

- متوسط تأخیر انتها به انتها: متوسط مجموع زمانی که طول می‌کشد تا هر بسته با موفقیت ارسال/دریافت شود. هدف بهبود QoS پروتکل مسیریابی اساس شبکه است که با به حداکثر رساندن PDR و حداقل رساندن میانگین تأخیر است. زمانی که بین پارامترهای مهم تعادل^{۶۳} ایجاد کنیم، می‌توان به این مهم دست پیدا کرد.

۲-۵- میانگین درصد نرخ انتقال بسته

مقدار PDR نرخ بسته‌های تحویل داده شده موفق به مقصد را نشان می‌دهد. هر چه مقدار PDR بیشتر باشد، شبکه کارآمدتر است. این معیار به طور مداوم تحت تأثیر عواملی مانند کیفیت لینک، درصد خرابی لینک، تداخل رادیویی و تصادم و از این قبیل قرار می‌گیرد. نتایج مربوط به متوسط PDR در سناریوهای ۱ تا ۲۴ در جدول (۴) نشان داده شده است.

Table (2): Simulation parameters

جدول (۲): پارامترهای شبیه‌سازی

پارامتر	مقادیر	پارامتر	مقادیر
اندازه شبکه (تعداد گره‌ها)	۲۰۰×۴۰۰ متر مربع (۳۲، ۲۵) / ۴۰۰×۸۰۰ متر مربع (۶۴، ۸۰)	مدل تداخل	افزودنی
نرخ ارسال ترافیک داده در شبکه	هر ۱/۵ و ۳ ثانیه	مدل تحرک گره‌ها	نقطه راه تصادفی
نرخ گره‌های سیار	۲۵ درصد از همه گره‌ها ۶۰ درصد از همه گره‌ها	مدل انتشار	دیسک یونی
زمان شبیه‌سازی	۶۰۰ ثانیه	طول پیام داده	۱۷۲ بایت
رادیو	CSMA/CA ۸۰۲/۱۱ گیگ ۵۴ مگابیت بر ثانیه	الگوی ترافیک	همتا به همتا
محدوده انتقال	۱۰۰ متر	منطقه تحرک	چشم‌انداز
محدوده تداخل	۱۵۰ متر	حداقل سرعت	یک متر بر ثانیه
الگوی شبکه	همتا به همتا	زمان انتظار	بین صفر تا ۶۰ ثانیه تصادفی

Table (3): Simulated scenarios
جدول (۳): سناریوهای پیاده‌سازی شده

شماره سناریو	اندازه شبکه	تعداد کل گره‌ها	نرخ تزریق بسته	درصد گره‌های سیار / تعداد گره‌های سیار	شماره سناریو	اندازه شبکه	تعداد کل گره‌ها	نرخ تزریق بسته	درصد گره‌های سیار / تعداد گره‌های سیار
۱	۴۰۰×۲۰۰	۲۵	۰/۵	۲۵٪ ۱۶	۱۳	۸۰۰×۴۰۰	۶۴	۰/۵	۲۵٪ ۱۶
۲	۴۰۰×۲۰۰	۲۵	۱	۲۵٪ ۱۶	۱۴	۸۰۰×۴۰۰	۶۴	۱	۲۵٪ ۱۶
۳	۴۰۰×۲۰۰	۲۵	۳	۲۵٪ ۱۶	۱۵	۸۰۰×۴۰۰	۶۴	۳	۲۵٪ ۱۶
۴	۴۰۰×۲۰۰	۳۲	۰/۵	۲۵٪ ۲۰	۱۶	۸۰۰×۴۰۰	۸۰	۰/۵	۲۵٪ ۲۰
۵	۴۰۰×۲۰۰	۳۲	۱	۲۵٪ ۲۰	۱۷	۸۰۰×۴۰۰	۸۰	۱	۲۵٪ ۲۰
۶	۴۰۰×۲۰۰	۳۲	۳	۲۵٪ ۲۰	۱۸	۸۰۰×۴۰۰	۸۰	۳	۲۵٪ ۲۰
۷	۴۰۰×۲۰۰	۲۵	۰/۵	۶۰٪ ۳۹	۱۹	۸۰۰×۴۰۰	۶۴	۰/۵	۶۰٪ ۳۹
۸	۴۰۰×۲۰۰	۲۵	۱	۶۰٪ ۳۹	۲۰	۸۰۰×۴۰۰	۶۴	۱	۶۰٪ ۳۹
۹	۴۰۰×۲۰۰	۲۵	۳	۶۰٪ ۳۹	۲۱	۸۰۰×۴۰۰	۶۴	۳	۶۰٪ ۳۹
۱۰	۴۰۰×۲۰۰	۳۲	۰/۵	۶۰٪ ۴۸	۲۲	۸۰۰×۴۰۰	۸۰	۰/۵	۶۰٪ ۴۸
۱۱	۴۰۰×۲۰۰	۳۲	۱	۶۰٪ ۴۸	۲۳	۸۰۰×۴۰۰	۸۰	۱	۶۰٪ ۴۸
۱۲	۴۰۰×۲۰۰	۳۲	۳	۶۰٪ ۴۸	۲۴	۸۰۰×۴۰۰	۸۰	۳	۶۰٪ ۴۸

۳-۵- متوسط تأخیر انتها به انتها

تأخیر انتها به انتها به میانگین زمان انتقال یک بسته از یک گره به عنوان مبدا به گره دیگر به عنوان مقصد و بالعکس اشاره دارد. EED مانند زمان رفت و برگشت^{۶۴} (RTT) است که مسیر دو جهته از مبدا به مقصد اندازه‌گیری می‌شود. EED یک بسته با پارامترهایی مانند تأخیر ارسال، تأخیر در صف، تأخیر انتقال و زمان انتشار مرتبط تعیین می‌شود. نتایج مربوط به متوسط EED در بین سناریوهای ۱ تا ۲۴ در جدول (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که از مقادیر نمایش داده شده مشخص است، MLOADng-AT بهترین نتایج را در بین سایر روش‌های مورد مقایسه کسب کرده است. سناریوهای پیاده‌سازی شده با هدف پوشش دادن شرایط مختلف شبکه و نزدیک به دنیای واقعی با تراکم گره‌های نرمال و تراکم به نسبت کمتر در نظر گرفته شده است. در فضای با ابعاد کوچکتر با تعداد گره‌های ۲۵ و ۳۲ عدد، کمترین تأخیر و همزمان بالاترین میزان نرخ تحویل بسته را تقریباً در تمام سناریوها به دست آورده است. از سناریو ۱ تا ۱۲ که مربوط به این ابعاد است بهبود حدود دو درصدی در نرخ تحویل بسته و تأخیر انتها به انتها بدست آورده است. همچنین در سناریوهایی که برای فضای با ابعاد بزرگتر ۸۰۰ در ۴۰۰ متر مربع تعریف شده‌اند، با وجود تراکم کمتر بین گره‌ها و تنوع پایین‌تر مسیرهای موجود، پروتکل پیشنهادی همچنان توانسته بالاترین نرخ PDR را به دست آورد. در تأخیر انتها به انتها، نتایج با فاصله کمتری برتری خود را به نسبت ابعاد کوچکتر حفظ کرده است. دلیل نزدیک بودن مقادیر در این پارامتر، تراکم پایین در نظر گرفته شده در این سناریوهاست. با این وجود

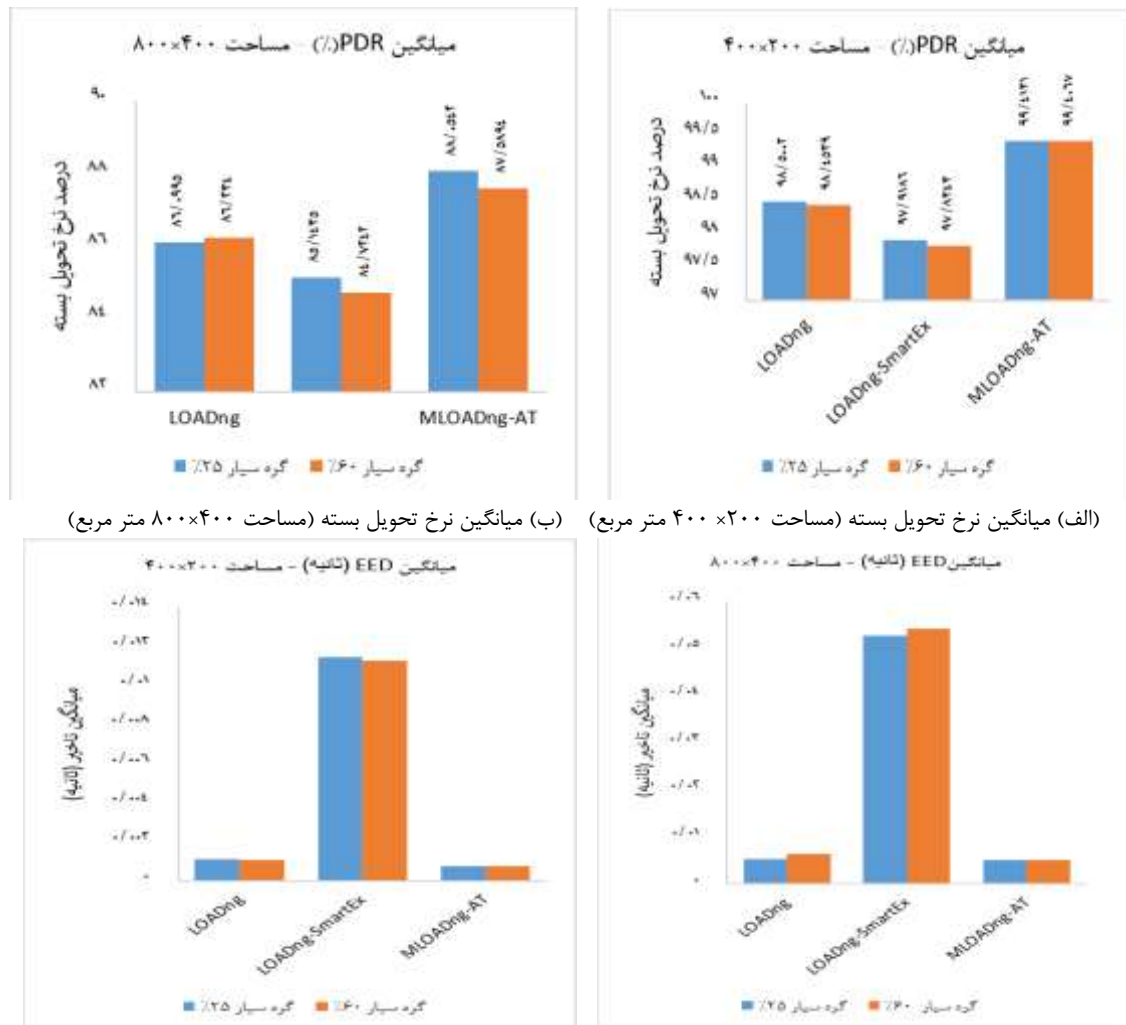
MLOADng-AT عملکرد قابل قبولی را نمایش داده است. در ادامه برای جمع‌بندی نتایج متوسط PDR و EED با تفکیک درصد گره‌های سیار در شکل (۲) نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل (۲) مشهود، عملکرد برتر پروتکل پیشنهادی در کسب بهترین مقادیر در دو پارامتر کیفی، مدیون بکارگیری روش‌های محاسباتی سبک‌وزن و در نظر گرفتن پارامترهای کیفی لینک است که در نهایت به دنبال رتبه‌بندی مسیرهای موجود است. همچنین MLOADng-AT با بکارگیری مکانیزم‌هایی برای جلوگیری از ازدحام و تداخل و پیش‌بینی هرگونه احتمال از دست رفتن لینک، توانسته میزان مقادیر حاصل برای پارامترهای PDR و EED را حفظ و بهبود دهد. پروتکل پیشنهادی در فضای با ابعاد کمتر و تجمع نرمال گره‌ها در شبکه عملکرد بهتری نسبت فضای بزرگتر با گره‌هایی با فاصله‌های بیشتر و تجمع کمتر از خود نشان می‌دهد.

Table (4): Average PDR according to designed scenarios
جدول (۴): متوسط PDR به تفکیک سناریوهای طراحی شده

شماره سناریو پروتکل	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
LOADng	۹۵/۸۷۵۲	۹۸/۲۹۹۰	۹۸/۴۸۱۴	۹۹/۶۳۵۱	۹۹/۱۱۵۷	۹۹/۵۹۵۰	۹۶/۶۴۵۵	۹۸/۰۷۱۳
MLOADng-AT	۹۸/۴۷۷۶	۹۹/۹۴۸۳	۹۸/۳۸۵۸	۹۹/۹۳۳۰	۹۹/۸۷۶۲	۹۹/۸۵۷۵	۹۸/۶۶۷۶	۹۹/۹۵۱۶
LOADng-SmartEx	۹۵/۸۵۴۹	۹۸/۲۲۹۲	۹۶/۹۸۹۶	۹۹/۷۵۲۹	۹۷/۹۹۶۶	۹۸/۶۸۸۶	۹۶/۶۸۶۹	۹۷/۸۶۳۴
شماره سناریو پروتکل	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
LOADng	۹۸/۰۹۶۶	۹۹/۸۲۹۱۹	۹۸/۴۹۲۶۴	۹۹/۵۸۸۲۴	۸۲/۹۰۹۱۴	۸۲/۹۸۱۲۵	۷۹/۳۰۰۳	۸۸/۴۵۴۷۳
MLOADng-AT	۹۸/۲۸۹۹۷	۹۹/۹۳۳	۹۹/۸۵۶۵۵	۹۹/۷۴۱۶۴	۸۲/۹۸۲۰۲	۸۷/۹۸۹۰۶	۸۰/۴۰۸۸۵	۹۱/۳۲۵۸۹
LOADng-SmartEx	۹۶/۱۵۶۵۶	۹۹/۷۵۱۵۹	۹۸/۰۰۸۲۲	۹۸/۵۳۹۵۸	۸۱/۷۵۰۴۳	۸۲/۵۰۳۸۸	۷۶/۶۴۳۱۸	۸۹/۲۷۰۳
شماره سناریو پروتکل	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
LOADng	۹۱/۴۱۲۷۸	۹۱/۵۳۸۹۸	۸۲/۲۴۷	۸۲/۳۴۷۴۶	۷۹/۰۷۸۷۲	۸۸/۱۰۶۰۲	۹۲/۶۳۹۳۸	۹۲/۹۸۵۵۹
MLOADng-AT	۹۳/۶۶۰۲۳	۹۱/۹۵۹۲	۸۴/۲۶۰۲	۸۴/۴۲۱۵۵	۷۹/۲۴۵۰۳	۸۹/۶۰۷۷۱	۹۵/۲۳۷۷۵	۹۲/۷۶۴۰۴
LOADng-SmartEx	۹۰/۱۹۶۴۱	۹۰/۴۹۶۷۸	۸۰/۶۲۱۵۱	۸۰/۰۳۸۸۱	۷۶/۴۵۰۳۹	۸۸/۹۲۰۱۳	۹۱/۵۷۴۷۳	۹۰/۷۳۹۷۴

Table (5): Average EED according to designed scenarios
جدول (۵): متوسط EED به تفکیک سناریوهای طراحی شده

شماره سناریو پروتکل	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
LOADng	۰/۰۰۰۷۱۶	۰/۰۰۰۸۵۸	۰/۰۰۱۵۸۴	۰/۰۰۰۷۴۳	۰/۰۰۰۸۶۲	۰/۰۰۱۸۴۰	۰/۰۰۰۵۲۸	۰/۰۰۰۷۶۱
MLOADng-AT	۰/۰۰۰۵۲۷	۰/۰۰۰۷۱۴	۰/۰۰۱۰۶۸	۰/۰۰۰۵۱۳	۰/۰۰۰۶۲۶	۰/۰۰۱۰۹۰	۰/۰۰۰۴۹۸	۰/۰۰۰۷۱۴
LOADng-SmartEx	۰/۰۰۴۱۵۸	۰/۰۰۷۰۰۴	۰/۰۰۲۴۱۳۲	۰/۰۰۴۱۸۷	۰/۰۰۶۶۵۳	۰/۰۰۲۲۶۳۴	۰/۰۰۴۰۳۵	۰/۰۰۶۹۰۶
شماره سناریو پروتکل	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
LOADng	۰/۰۰۲۰۲۲	۰/۰۰۰۵۸۷	۰/۰۰۰۷۳۰	۰/۰۰۱۶۷۲	۰/۰۰۲۰۸۳	۰/۰۰۳۱۴۰	۰/۰۰۱۰۲۴۹	۰/۰۰۲۱۹۹
MLOADng-AT	۰/۰۰۱۱۷۰	۰/۰۰۰۵۱۳	۰/۰۰۰۵۸۱	۰/۰۰۱۱۰۳	۰/۰۰۱۹۵۷	۰/۰۰۳۱۰۲	۰/۰۰۹۹۰۷	۰/۰۰۱۸۱۹
LOADng-SmartEx	۰/۰۰۲۴۱۳۲	۰/۰۰۴۱۸۷	۰/۰۰۶۶۵۳	۰/۰۰۲۱۷۱۹	۰/۰۰۲۴۵۰۹	۰/۰۰۱۴۱۲۷	۰/۰۰۱۱۶۴۱۳	۰/۰۰۲۰۴۵۷
شماره سناریو پروتکل	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
LOADng	۰/۰۰۳۴۷۹	۰/۰۰۱۱۱۳۶	۰/۰۰۲۰۶۸	۰/۰۰۳۰۱۶	۰/۰۰۱۶۵۱۶	۰/۰۰۲۱۰۱	۰/۰۰۳۸۴۱	۰/۰۰۱۰۹۵۸
MLOADng-AT	۰/۰۰۳۳۳۶	۰/۰۰۱۰۸۳۵	۰/۰۰۱۸۲۷	۰/۰۰۳۳۱۰	۰/۰۰۹۹۸۳	۰/۰۰۱۸۷۵	۰/۰۰۲۶۰۲	۰/۰۰۱۱۰۰۴
LOADng-SmartEx	۰/۰۰۲۹۵۳۵	۰/۰۰۱۱۷۸۵	۰/۰۰۱۸۸۲۶	۰/۰۰۱۵۷۶۰	۰/۰۰۱۲۶۵۶۸	۰/۰۰۲۰۴۱۴	۰/۰۰۳۰۷۱۷	۰/۰۰۱۱۳۴۱۹



(الف) میانگین نرخ تحویل بسته (مساحت 400 × 200 متر مربع) (ب) میانگین نرخ تحویل بسته (مساحت 800 × 400 متر مربع)

(ج) میانگین تاخیر انتها به انتها (مساحت 400 × 200 متر مربع) (د) میانگین تاخیر انتها به انتها (مساحت 800 × 400 متر مربع)

شکل (۲) میانگین نرخ تحویل بسته و تاخیر انتها به انتها به تفکیک درصد گره‌های سیار و اندازه شبکه شامل ۲۵ درصد و ۶۰ درصد گره سیار

Figure (2): Average PDR and EED by percentage of mobile nodes and network size including 25 and 60 percent mobile nodes.

دلیل این امر کاملاً روشن است به‌طوری که در فضاهای بزرگتر با تراکم کمتر، تعداد کمتری مسیر ممکن بین گره‌ها وجود دارد. با این حال در هر دو دسته سناریوها با ابعاد و تراکم متفاوت، روش پیشنهادی همچنان بهترین نتایج به دست آورده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به معرفی پروتکل MLOADng-AT برای شبکه‌های با گره‌های سیار پرداخته شد. پروتکل پیشنهادی پیش‌رو، با استفاده از پروتکل پیام سلام و الگوریتم ترکیبی AT به نتایج قابل توجهی دست پیدا کرده است. در MLOADng-AT هر گره اطلاعات دو گام از همسایگان خود را توسط پروتکل پیام سلام جمع‌آوری می‌کند. سپس، مسیرهای موجود برای انتخاب بهترین مسیر بر اساس پارامترهای کیفیت لینک و AT رتبه‌بندی می‌شوند. نتایج به‌دست آمده، نشان از عملکرد مناسب MLOADng-AT بر اساس پارامترهای PDR و EED نسبت به سایر روش‌ها دارد. دو پارامتری که نقش کلیدی در تأمین کیفیت سرویس شبکه‌های اینترنت اشیا ایفا می‌کند. روش پیشنهادی تعادل قابل قبولی بین دو معیار مهم QoS فراهم کرده است. بهبود ایجاد شده در نتایج پروتکل پیشنهادی به دلیل بهره‌بردن از تکنیک ترکیبی AT است که تنها بهترین مسیر را برای مسیریابی انتخاب می‌کند بلکه با رتبه‌بندی مسیرهای موجود، در صورت ایجاد خرابی در لینک‌های مسیرهای انتخاب

شده، بلافاصله و بدون هزینه‌های مسیریابی مجدد، مسیر جایگزین را از لیست رتبه‌بندی شده توسط AT انتخاب و جایگزین می‌کند. پیش‌بینی خطرات احتمالی مانند خرابی لینک در بهبود کیفیت سرویس در شبکه کمک شایانی می‌کند. همچنین با در نظر گرفتن زمان انتظار از ازدحام و تصادم در شبکه تا حد قابل قبولی جلوگیری کرده، و با بررسی مسیرهای موجود بیشتری، احتمال انتخاب بهترین مسیر موجود بیشتر خواهد شد. به عنوان پیشنهاد برای ادامه تحقیق با گسترش دادن شبکه در فضای بزرگتر و تعداد گره‌های متفاوت با توجه به تراکم گره‌ها، به دنبال کاهش سربار تحمیل شده خواهیم بود. پارامترهای دیگری نیز می‌توانند به ماتریس رتبه‌بندی اضافه شوند تا بهبود بیشتری در پارامترهای PDR و EED ایجاد شود. در واقع، با بررسی سایر پارامترها، به دنبال حفظ و بهبود کارایی کلی شبکه در شرایط مختلف خواهیم بود.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از رساله دکتری در دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از همکاران حوزه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی، داوران محترم و مرکز تحقیقات کلان داده، اعلام نمایند.

References

مراجع

- [1] A. Khanna, S. Kaur, "Evolution of internet of things (IoT) and its significant impact in the field of precision agriculture", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 157, pp. 218–231, Feb. 2019 (doi: 10.1016/j.compag.2018.12.039).
- [2] L. Portilla, K. Loganathan, H. Faber, A. Eid, J.G.D. Hester, M.M. Tentzeris, M. Fattori, E. Cantatore, CH. Jiang, A. Nathan, G. Fiori, T. Ibn-Mohammed, T.D. Anthopoulos, V. Pecunia, "Wirelessly powered large-area electronics for the internet of things", *Nature Electronics*, vol. 6, no. 1, pp. 10–17, Dec. 2022 (doi: 10.1038/s41928-022-00898-5).
- [3] Z.A. Almusaylim, A. Alhumam, N.Z. Jhanjhi, "Proposing a secure RPL based internet of things routing protocol: A review", *Ad Hoc Networks*, vol. 101, Article Number: 102096, Apr. 2020 (doi: 10.1016/j.adhoc.2020.102096).
- [4] JJ. Marietta, B.C. Mohan, "A review on routing in internet of things", *Wireless Personal Communications*, vol. 111, pp. 209–233, Oct. 2019 (doi: 10.1007/s11277-019-06853-6).
- [5] X. Yang, R. Feng, P. Xu, X. Wang, M. Qi, "Internet-of-things-augmented dynamic route planning approach to the airport baggage handling system", *Computers and Industrial Engineering*, vol. 175, Article Number: 108802, Jan. 2023 (doi: 10.1016/j.cie.2022.108802).
- [6] J.V.V. Sobral, J.J. Rodrigues, R.A.L. Rabêlo, K. Saleem, V. Furtado, "LOADng-IoT: An enhanced routing protocol for internet of things applications over low power networks", *Sensors*, vol. 19, no. 1, Article Number: 150, Jan. 2019 (doi: 10.3390/s19010150).
- [7] J. Tripathi, J.C.D. Oliveira, J.P. Vasseur, "Proactive versus reactive routing in low power and lossy networks: Performance analysis and scalability improvements", *Ad Hoc Networks*, vol. 23, pp. 121–144, Dec. 2014 (doi: 10.1016/j.adhoc.2014.06.007).
- [8] P. Singh, "Comparative study between unicast and multicast routing protocols in different data rates using vanet", *Proceeding of the IEEE/ICICT*, pp. 278–284, Ghaziabad, India, Feb. 2014 (doi: 10.1109/ICICT.2014.6781293).
- [9] D.B. Johnson, D.A. Maltz, J. Broch, "DSR: The dynamic source routing protocol for multi-hop wireless ad hoc networks", *Ad Hoc Networking*, vol. 5, no. 1, pp. 139–172, Mar. 2001.
- [10] C. Perkins, E. Belding-Royer, S. Das, "On-demand distance vector (AODV) routing", *Proceeding of the IEEE/WMCSA*, pp. 90–100, New Orleans, LA, USA, Feb. 1999 (doi: 10.16309/j.cnki.issn.1007-1776.200-3.03.004).
- [11] V.D. Park, M.S. Corson, "A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks", *Proceedings of IEEE/INFOCOM'97*, vol. 3, pp. 1405–1413, Washington, DC, USA, Aug. 2002 (doi: 10.1109/INFOCOM.1997.631180).
- [12] N. Gupta, R.S. Yadav, R.K. Nagaria, D. Gupta, A. Tripathi, O. Pandey, "Anchor-based void detouring routing protocol in three dimensional IoT networks", *Computer Networks*, vol. 227, Article Number: 109691, May 2023 (doi: 10.1016/j.comnet.2023.109691).
- [13] J.L. Fendji, C. Thron, A. Förster, "A multi-objective approach for wireless heterogeneous router placement in rural wireless mesh networks", *Proceeding of the ICISDC*, pp. 43–55, Ebène City, Mauritius, Dec. 2020 (doi: 10.1007/978-3-030-70572-5_3).

- [14] A. Bang, U.P. Rao, "Impact analysis of rank attack on RPL-based 6LoWPAN networks in internet of things and aftermaths", *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 48, pp. 2489-2505, Oct. 2022 (doi: 10.1007/s13369-022-07342-y).
- [15] T. Clausen, J. Yi, U. Herberg, "Lightweight on-demand ad hoc distance-vector routing-next generation (LOADng): protocol, extension, and applicability", *Computer Networks*, vol. 126, pp. 125-140, Oct. 2017 (doi: 10.1016/j.comnet.2017.06.025).
- [16] J. Yi, T. Clausen, Y. Igarashi, "Evaluation of routing protocol for low power and lossy networks: LOADng and RPL", *Proceeding of the IEEE/ICWISE*, pp. 19-24, Subang, Malaysia, Jan. 2014 (doi: 10.1109/ICWISE.2013.6728773).
- [17] J. Huang, Q. Duan, Y. Zhao, Z. Zheng, W. Wang, "Multicast routing for multimedia communications in the internet of things", *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 215-224, Feb. 2017 (doi: 10.1109/JIOT.2016.2642643).
- [18] J. Yi, T. Clausen, A. Bas, "Smart route request for on-demand route discovery in constrained environments", *Proceeding of the IEEE/ICWITS*, pp. 1-4, Maui, HI, USA, Nov. 2012 (doi: 10.1109/ICWITS.2012.6417755).
- [19] A. Bas, J. Yi, T. Clausen, "Expanding ring search for route discovery in loadng routing protocol", *Proceedings of the IWSTEIC*, Sendai, Japan, Apr. 2019.
- [20] J. Yi, T. Clausen, "Collection tree extension of reactive routing protocol for low-power and lossy networks", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 10, no. 3, Article Number: 352421, Feb. 2014 (doi: 10.1155/2014/352421).
- [21] Z. Sharifian, B. Barekatin, A. Ariza Quintana, Z. Beheshti, F. Safi-Esfahani, "LOADng-AT: a novel practical implementation of hybrid AHP-TOPSIS algorithm in reactive routing protocol for intelligent IoT-based networks", *The Journal of Supercomputing*, vol. 78, no. 7, pp. 9521-9569, Jan. 2022 (doi: 10.1007/s11227-021-04256-8).
- [22] M.E. Al-Sadoon, A. Jedidi, H. Al-Raweshidy, "Dual-tier cluster-based routing in mobile wireless sensor network for IoT application", *IEEE Access*, vol. 11, pp. 4079-4094, Jan. 2023 (doi: 10.1109/ACCESS.2023.3235200).
- [23] R.M. Estepa Alonso, A.J. Estepa Alonso, G.M. Luque, E. García, "RPL cross-layer scheme for IEEE 802.15. 4 IoT devices with adjustable transmit power", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 120689-120703, Aug. 2021 (doi: 10.1109/ACCESS.2021.3107981).
- [24] G. Sharma, J. Grover, A. Verma, "Performance evaluation of mobile RPL-based IoT networks under version number attack", *Computer Communications*, vol. 197, pp. 12-22, Jan. 2023 (doi: 10.1016/j.comcom.2022.10.014).
- [25] D. Sasidharan, L. Jacob, "Improving network lifetime and reliability for machine type communications based on LOADng routing protocol", *Ad Hoc Networks*, vol. 73, pp. 27-39, May 2018 (doi: 10.1016/j.adhoc.2018.02.007).
- [26] J.V.V. Sobral, J.J. Rodrigues, K. Saleem, J. Al-Muhtadi, "Performance evaluation of LOADng routing protocol in IoT P2P and MP2P applications", *Proceeding of the IEEE/IMCCES*, pp. 1-6, Split, Croatia, Sept. 2016 (doi: 10.1109/SpliTech.2016.7555943).
- [27] S. Elyengui, R. Bouhouchi, T. Ezzedine, "A comparative performance study of the routing protocols RPL, LOADng and LOADng-CTP with bidirectional traffic for AMI scenario", *Proceeding of the IEEE/ICSGCE*, pp. 43-49, Chengdu, China, Apr. 2016 (doi: 10.1109/ICSGCE.2015.7454267).
- [28] J.V.V. Sobral, J.J. Rodrigues, N. Kumar, C. Zhu, R.W. Ahmad, "Performance evaluation of routing metrics in the LOADng routing protocol", *Journal of Communications Software and Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 87-95, Jun. 2017 (doi: 10.1109/SpliTech.2016.7555943).
- [29] J.V.V. Sobral, J.J. Rodrigues, R.A.L. Rabêlo, J. Al-Muhtadi, "Multicast improvement for LOADng in internet of things networks", *Measurement*, vol. 148, Article Number: 106931, Dec. 2019 (doi: 10.1016/j.measurement.2019.106931).
- [30] J.V.V. Sobral, J.J.P.C. Rodrigues, R.A.L. Rabêlo, K. Saleem, S.A. Kozlov, "Improving the performance of LOADng routing protocol in mobile IoT scenarios", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 107032-107046, Aug. 2019 (doi: 10.1109/ACCESS.2019.2932718).
- [31] A.J.R. Gonçalves, R.A.L. Rabêlo, J.J. Rodrigues, L.M.L. Oliveira, "A mobility solution for low power and lossy networks using the LOADng protocol", *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 31, no. 12, Article Number: e3878, Jan. 2020 (doi: 10.1002/ett.3878).
- [32] S. Anwar, "Transmission of aggregated data in LOADng-Based IoT networks", *Proceedings of Springer/CIPR*, pp. 67-76, June 2022 (doi: 10.1007/978-981-19-3089-8_7).
- [33] K. Li, T. Duan, Z. Li, X. Xiahou, N. Zeng, Q. Li, "Development path of construction industry internet platform: an AHP-TOPSIS integrated approach", *Buildings*, vol. 11, no. 4, Article Number: 441, Apr. 2022 (doi: 10.3390/buildings12040441).

- [34] M. Behzadian, S.K. Otaghsara, M. Yazdani, J. Ignatius, "A state-of the-art survey of TOPSIS applications", *Expert Systems with Applications*, vol. 39, no. 17, pp. 13051–13069, Dec. 2012 (doi: 10.1016/j.eswa.2012.05.056).
- [35] M. Cagalj, S. Ganeriwal, I. Aad, J.P. Hubaux, "On selfish behavior in CSMA/CA networks", *Proceeding of the IEEE/INFCOM*, vol. 4, pp. 2513–2524, Miami, FL, USA, Aug. 2005 (doi: 10.1109/INFCOM.2005.1498536).
- [36] A. Ariza-Quintana, E. Casilari, A.T. Cabrera, "An architecture for the implementation of mesh networks in OMNeT++", *Proceedings of the ICST2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques*, Brussels, Belgium, Mar. 2009 (doi: 10.4108/ICST.SIMUTOOLS2009.5549).

زیرنویس‌ها

1. Internet of things
2. Decentralize
3. Self-configuration
4. Parameters
5. Low power and lossy networks
6. Device
7. Reactive
8. Proactive
9. Overhead
10. Dynamic source routing
11. Ad hoc on-demand distance vector routing
12. Temporally ordered routing algorithm
13. Routing protocol for low power and lossy networks
14. Lightweight on-demand ad hoc distance vector routing protocol, next generation
15. Point to point
16. Multi point to point
17. Broadcast
18. Route request
19. Expanding ring flooding
20. Analytic hierarchy process
21. Technique for order of preference by similarity to ideal solution
22. End to end delay
23. Packet delivery ratio
24. Analytic hierarchy process- Technique for order of preference by similarity to ideal solution
25. Collision
26. LOADng collection tree protocol
27. Advanced metering infrastructure
28. Live route
29. Residual energy
30. Hop count
31. Gateway
32. Routing cache mechanism
33. Anycast
34. Expanding ring
35. Received signal strength indicator
36. Kalman filter
37. Data aggregation
38. Quality of service
39. Route reply
40. Route error
41. Flag
42. Header
43. Unicast
44. Hello
45. Open shortest path first
46. Multicast
47. Multi criteria decision making

48. Multiple objective decision making
49. Multiple attribute decision making
50. Carrier sense multiple access with collision avoidance
51. Number of neighbors
52. Hop count
53. Received power
54. Signal to interference noise ratio
55. Expected transmission count
56. Delivery ratio of reverse
57. Delivery ratio of forward
58. Bidirectional
59. Unidirectional
60. Expected transmission time
61. Objective modular network testbed in C++
62. Homogeneous
63. Trade-off
64. Round-trip time