

روشی کارآمد جهت کاهش مصرف انرژی در مسیریابی اینترنت اشیا

مریم عسگری، محمود فتحی، محمد شاهوردی و محمود سهیلی نیر

گروه IETF^۳ یک مدل مسیریابی برای شبکه‌های کم‌توان و پراتلاف ارائه داده که موجب توسعه پروتکل IPv۶ مبتنی بر RPL^۴ شده است [۳]. RPL یک پروتکل مبتنی بر بردار فاصله توسعه‌یافته برای اینترنت اشیا است. محدودیت‌ها و چالش‌های مسیریابی یک شبکه حسگر به عنوان مهم‌ترین زیرمجموعه اینترنت اشیا، آن را از سایر سیستم‌های توزیع‌شده متمایز می‌نماید [۴]. این محدودیت‌ها تأثیراتی در طراحی شبکه‌های حسگر بی‌سیم شامل پروتکل‌ها و الگوریتم‌های مختلف از سایر دسته‌بندی‌های اینترنت اشیا نیز دارد. حوزه تحقیقاتی این مقاله بر روی مسیریابی اینترنت اشیا معطوف شده است [۵]، لذا برخی از مهم‌ترین محدودیت‌های مسیریابی شبکه‌های حسگر شامل الگوهای ترافیکی، کارآمدی انرژی، مقیاس‌پذیری، تحرک، دوسویه‌بودن لینک و نرخ استفاده از فرستنده رادیویی است [۶]. تا کنون معیارهای مختلفی جهت تحقق امر مسیریابی در شبکه‌های حسگر و اینترنت اشیا معرفی شده است اما نقطه مشترک بسیاری از این پروتکل‌های مسیریابی در سه عنوان انرژی، تجمع یا حذف افزونگی داده و تأخیر در رسیدن اطلاعات به کاربر خلاصه می‌شود [۷] تا [۱۰].

تعداد محدودیت‌های ذکرشده بسیار فراتر از این موارد بوده، اما اصولاً چالش‌های مسیریابی در شبکه‌های حسگر فقط تأثیرپذیر از موارد بالا می‌باشد. پروتکل RPL از یک گراف بدون دور با یک ریشه به ازای هر DODAG^۵ تشکیل شده است. در این گراف هر گره بسته به نیاز می‌تواند والد بوده یا به صورت فرزند گره والدی در دسترس باشد. استفاده از رویکرد چند نقطه به یک نقطه از دیگر ویژگی‌های این روش است که با کاربردهای شبکه‌های حسگر سازگاری دارد. بنابراین زیرساخت استاندارد ارائه‌شده و مقبول جامعه علمی برای اینترنت اشیا و شبکه‌های حسگر پروتکل RPL است. اما این پروتکل نیز از برخی جهات دارای نواقصی است که در صورت بروز خطای یک گره والد، اعضای آن تا زمان همگرایی^۶ و پیکربندی دوره‌ای، بدون والد مانده و بسته‌های آنها به دلیل گذشت زمان منقضی خواهند شد. این نقیصه وقتی بحرانی است که این گره والد در رتبه‌های پایین شبکه و به گره ریشه نزدیک باشد.

روش RPL یا نسخه‌های جدید آن بسته به نوع کاربرد تا حدی توانسته‌اند مشکلات مسیریابی را مرتفع سازند اما هر کدام از این نسخه‌ها، برخی دیگر از معیارهای کیفیت خدمات را در شبکه نادیده گرفته و حتی نقض نموده‌اند. این دید کلی که دستیابی به تمام معیارهای کیفیت خدمات در شبکه بدون صرف هزینه یا فدانمودن یک یا چند معیار در شبکه غیر ممکن به نظر می‌رسد کاملاً صحیح است [۱۱] اما رسیدن به حداکثر کیفیت مطلوب خدمات در همین ساختار درختی مد نظر این مقاله است. نوآوری کار ما در کاهش مصرف انرژی روش پایه RPL به عنوان یک الگوریتم مسیریابی کارا در حوزه اینترنت اشیا می‌باشد. ما دو فاز جهت

چکیده: اینترنت اشیا مفهوم جدیدی در عرصه انتقال اطلاعات، نظارت و کنترل از راه دور اشیا، موجودات و تجهیزات است که توانسته به راحتی خود را با صنایع و زیرساخت‌های مختلف سازگار سازد. انتقال اطلاعات با توجه به محیط ناهمگون اینترنت اشیا، امری چالش‌برانگیز بوده و استفاده از روش‌های مسیریابی با در نظر گرفتن محدودیت‌های پردازش، محاسبه، ذخیره‌سازی و ارتباط امری ضروری شناخته شده است. تا کنون الگوریتم‌های متنوعی با کاربردهای خاص در حوزه اینترنت اشیا و شبکه‌های حسگر بی‌سیم معرفی شده‌اند که هر یک به نحوی در رسیدن به اهداف مسیریابی موفق بوده‌اند. برخی از پروتکل‌های مطرح در این زمینه از ساختار درختی جهت جمع‌آوری اطلاعات شبکه استفاده کرده‌اند. این روش‌ها در انتخاب والد یا فرزندان گراف دچار چالش‌های مهمی وابسته به نوع کاربرد هستند. در این مقاله ابتدا یک دسته‌بندی کلی از مزایا و معایب این روش‌ها در حوزه مسیریابی اینترنت اشیا ارائه شده و سپس یک روش مسیریابی آگاه از کیفیت خدمات در مسیریابی مبتنی بر سیستم فازی پیشنهاد شده است. نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی حاکی از آن است که روش پیشنهادی ما در آزمون‌های بهره‌وری انرژی، نرخ تأخیر و نرخ تحویل بسته نسبت به روش پایه به ترتیب ۱۹٪، ۴۹/۵٪ و ۱۰٪ بهبود داشته است.

کلیدواژه: انرژی کارآمد، اینترنت اشیا، سیستم فازی، مسیریابی.

۱- مقدمه

اینترنت اشیا^۱ مفهومی جدید در دنیای فناوری و ارتباطات است. به صورت خلاصه اینترنت اشیا فناوری پیشرفته‌ای است که در آن برای هر موجودی (انسان، حیوان یا اشیا) قابلیت ارسال داده از طریق شبکه‌های ارتباطی، اعم از اینترنت یا اینترانت، فراهم می‌گردد. شبکه‌های حسگر بی‌سیم^۲ به عنوان یکی از بخش‌های پایه‌ای در اینترنت اشیا بوده که یک حوزه محبوب تحقیقاتی اعم از نظارت، کنترل محیط، مراقبت بدن و بسیاری کاربردهای نظامی است [۱]. این شبکه به دلیل ابعاد کوچک و ضعف توان عملیاتی سخت‌افزاری و ارتباطی، چالش‌های بسیاری را نیز دارد. بدیهی است که چالش‌های ذاتی این نوع شبکه، موجب ایجاد محدودیت در عملکردهای تجمع، انتقال و ارتباطات بین گره‌ها و مسیریابی آنها نیز شده است [۲]. تا کنون مدل‌ها و الگوهای مسیریابی متعددی در اینترنت اشیا و شبکه‌های حسگر بی‌سیم پیشنهاد شده است.

این مقاله در تاریخ ۱۴ دی ماه ۱۳۹۷ دریافت و در تاریخ ۲۲ تیر ماه ۱۳۹۸ بازنگری شد.

مریم عسگری، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد پرفسور حسابی، دانشگاه آزاد اسلامی، تفرش، ایران، (email: asgari_m28@yahoo.com).

محمود فتحی (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، (email: mahfathy@iust.ac.ir).

محمد شاهوردی، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، (email: m_shahverdy@cmpps2.iust.ac.ir).

محمود سهیلی نیر، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد پرفسور حسابی، دانشگاه آزاد اسلامی، تفرش، ایران، (email: mahmod.sohile3@gmail.com).

1. Internet of Things

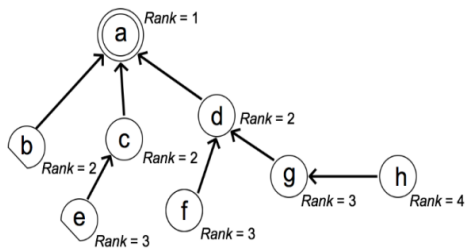
2. Wireless Sensor Networks

3. Internet Engineering Task Force

4. Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks

5. Destination Oriented Directed Acyclic Graph

6. Convergence



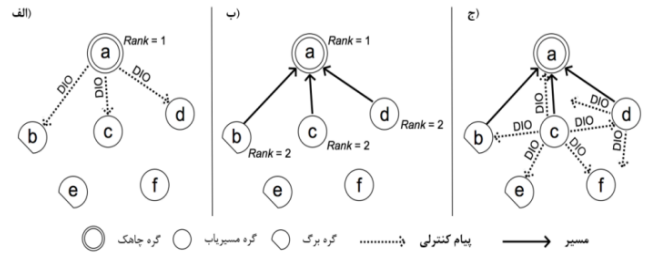
شکل ۲: مثالی از DODAG با تنها مسیرهای رو به بالا [۱۳].

DODAG را ادامه می‌دهد. این گره پس از به روز کردن پیام DIO با اطلاعات خود، پیام تغییر یافته را به گره‌های همسایه‌اش ارسال می‌کند. پس از تکمیل این فرایند، تمامی گره‌های شبکه حداقل یک ورودی مسیر به والد خود خواهند داشت که گام به گام به چاهک می‌رسد. این امر، یک مدل رو به جلوی چند نقطه به یک نقطه^۳ (MP۲P) را نشان می‌دهد که به آن مسیریابی رو به بالا نیز گفته می‌شود. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است هر گره می‌تواند به چاهک دسترسی داشته باشد. یک حالت دیگر، هنگامی رخ می‌دهد که یک گره جدید به یک شبکه که از قبل تعریف شده است بپیوندد. بدین منظور، گره یک پیام درخواست اطلاعات DODAG به نام پیغام^۴ (DIS) را ارسال می‌کند. پس از دریافت پیام‌های DIO، گره جدید یک یا چند گره والد را با استفاده از تابع هدف انتخاب می‌کند.

در الگوریتم QRPL برخی از روش‌های ذکر شده در الگوریتم RPL دچار تغییر اساسی شده است. گره‌های شبکه بر اساس میزان نرخ انرژی باقیمانده و نرخ تأخیر انتها به انتها تا ریشه، نسبت به تولید پیام DIO اقدام می‌کنند. این روش در قالب دیاگرام شکل ۳ نمایش داده شده است. هر گره والد نسبت به تولید و حفظ فرمون^۵ مسیر تلاش می‌نماید.

مشکل اساسی این روش ازدحام بیش از حد انتظار در مسیرهای کشف شده است که خود زمینه افزایش برخورد و افزایش نرخ دسترسی به رسانه گره برگ را نسبت به والد^۶ (ETX) فراهم می‌کند. از طرفی نرخ تبخیر فرمون نیز کارآمد نبوده و تا پیش از تبخیر مسیر بسیاری از گره‌های شبکه، دچار ازدحام گشته‌اند. در الگوریتم RPL و QRPL روشی جهت تشخیص ناپایداری در شبکه در نظر گرفته شده که به محض وجود ناپایداری، زمان بند قطره‌ای DIO مجدداً تنظیم گشته و شبکه از اول پیکربندی خواهد شد. حال اگر تا پیش از تنظیم مجدد زمان بند قطره DIO، ازدحامی در شبکه صورت گیرد، به دلیل محدود بودن فضای صف گره‌های شبکه، تعداد بسته‌های دریافتی به شدت افزایش خواهند یافت.

ما در این مقاله فقط به بهبود مصرف انرژی، نرخ تأخیر و نرخ تحویل داده پرداختیم اما الگوریتم RPL مشکلات زیادی دارد که در مقالات مختلف به آن پرداخته شده است. در سال ۲۰۱۴، لی و همکاران [۱۴] مهم‌ترین ضعف پروتکل پایه RPL را تک‌مسیره بودن آن بیان کرده‌اند. مدیریت و نوع همبندی گره‌ها در شبکه بر روی تشکیل مسیرها اثر مستقیم داشته و محدودیت‌های IPv۶ باعث شده تا قابلیت اطمینان نیز در روش RPL تأمین نشود. به منظور غلبه بر این مسئله، بسیاری از پژوهش‌های اخیر راه حل چندمسیره را برای پروتکل‌های مسیریابی مبتنی بر RPL پیشنهاد کرده‌اند.



شکل ۳: تشکیل مسیر رو به بالا، (الف) محاسبه گره چاهک و فرایند انتشار، (ب) محاسبه گره مسیریاب و فرایند انتشار و (ج) محاسبه گره برگ [۱۳].

بهبود نحوه همبندی و مسیریابی پروتکل RPL ارائه می‌دهیم. فاز اول شامل تشکیل گراف بهینه مبتنی بر منطق فازی است که با وزن‌دهی مناسب پارامترها انجام می‌گیرد. فاز دوم شامل مسیریابی بین گره مبدأ و گره ریشه در شبکه است که این رویکرد می‌تواند از سربارهای کنترلی ناشی از تبادل بسته‌های کنترلی بکاهد. افزایش بهره‌وری انرژی گره‌های اینترنت اشیا در دو فاز تشکیل گراف و در زمان ارتباط بین گره‌ها قابل کنترل است. روش ما با ارائه دو فاز تشکیل گراف بهینه مبتنی بر منطق فازی و مسیریابی جهت کاهش سربار، موجب کاهش مصرف انرژی در گره‌های اینترنت اشیا شده است.

مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است: در بخش ۲ به بررسی کارهای گذشته و ضعف‌های پروتکل‌های پایه RPL و QRPL^۱ می‌پردازیم. در بخش ۳ به معرفی الگوریتم پیشنهادی و در بخش ۴ به ارزیابی نتایج شبیه‌سازی می‌پردازیم. در بخش ۵ نتیجه‌گیری مقاله و در نهایت پیشنهاد کارهای آینده ارائه خواهد شد.

۲- مروری بر کارهای گذشته

الگوریتم‌های مسیریابی RPL و QRPL به عنوان دو الگوریتم کارآمد در زمینه مسیریابی اینترنت اشیا و شبکه‌های حسگر بی‌سیم تا کنون مطرح گردیده است [۱۱] تا [۱۳].

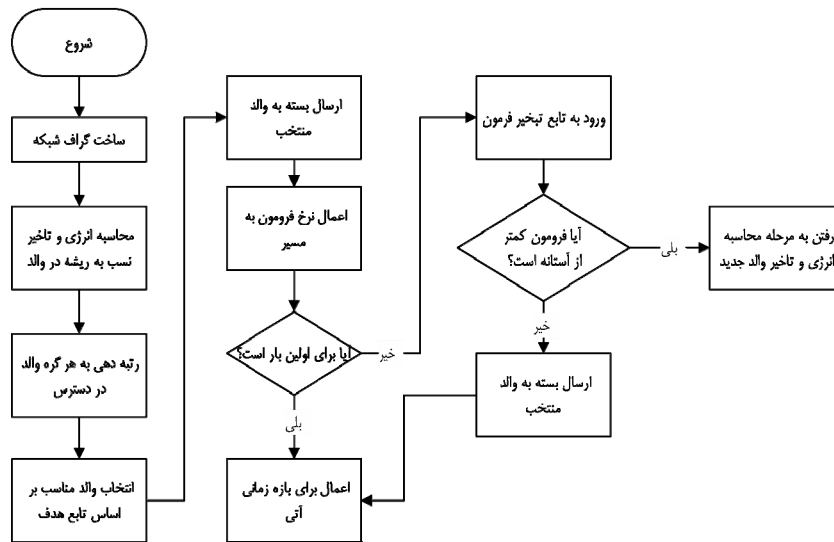
RPL به ازای هر گره چاهک حداقل یک DODAG را تشکیل داده و نگهداری می‌کند. این پروتکل، مسیرهای رو به بالا و رو به پایین را به صورت مستقل و طبق فرایندی که در بخش‌های بعدی شرح داده شده است محاسبه می‌کند.

مسیر رو به بالا: اولین گام RPL متشکل از ایجاد یک گراف است که هر شبکه‌ای ممکن است آن را برای انتخاب مسیر مورد استفاده برای ارسال داده به گره چاهک (مسیر رو به بالا) به کار ببرد. سه فاز این فرایند در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

در ابتدا گره چاهک وجود خود را با همه‌پخش یک پیام شیء اطلاعاتی DODAG به نام DIO^۲ به همسایگانش اعلام می‌کند. سپس گره‌های همسایه این پیام را پردازش می‌کنند و نسبت به عضویت در گراف تصمیم می‌گیرند. در روش RPL پایه، تصمیم عضویت در گراف بر اساس رتبه گره گرفته می‌شود که یک مقدار افزایشی است که با استفاده از یک تابع هدف از پیش تعریف شده به عنوان مرجع، محاسبه می‌شود. گره‌های دارای رتبه پایین‌تر یا مساوی با مقدار فعلی به عضویت در گراف در نمی‌آیند. اگر گره برگ باشد، می‌تواند پس از به روز شدن رتبه‌اش بدون ارسال هیچ گونه اطلاعاتی عضو گراف شود. از سوی دیگر، گره‌ای که مسیریاب است و تصمیم به پیوستن به گراف می‌گیرد، فرایند ساخت

3. Multipoint-to-Point
4. DODAG Information Solicitation
5. Phormone
6. Expected Transmission Count

1. QoS Routing RPL
2. DODAG Information Object



شکل ۳: نمودار نحوه عملکرد الگوریتم مسیریابی QRPL [۱۱].

رتبه وابسته به فاصله گره از ریشه شبکه است و یک OF چگونگی انتخاب والد را نیز تعیین می‌نماید. تابع هدف پیش‌فرض در پروتکل RPL با نام OF_0^4 شناخته می‌شود که صرفاً به منزله پیدا کردن نزدیک‌ترین ریشه است. به عبارت دیگر OF_0 فقط تعداد گام را در تابع رتبه در نظر می‌گیرد و از سایر پارامترهای کیفی از جمله توازن بار، انرژی، تأخیر انتها به انتها و مواردی از این دست غافل است. در مرحله انتخاب والد، گره فرزند یک والد با کمترین میزان رتبه را به عنوان والد اصلی و در صورت وجود، یک والد را به عنوان جانشین برای خود برمی‌گزیند. تمام ترافیک شبکه رو به بالا و به سمت گره ریشه خواهد بود و هیچ گونه تلاشی برای توازن بار شبکه در OF_0 انجام نمی‌شود. اگر لینک جاری نتواند تبادلات داده را به سمت ریشه به هر دلیلی انجام دهد گره به ناچار خود را از لیست والد ضعیف خارج و به عضویت والد جایگزین یا پشتیبان درمی‌آید.

تابع هدف پیشنهادی با نام $Q-FRPL^5$ که یک پروتکل مسیریابی با انرژی کارآمد می‌باشد که به نام OF_2 معرفی گردیده است. در روش پیشنهادی از یک روش فازی جهت ارزش‌دهی به گره‌های شبکه استفاده شده که می‌تواند به صورت پویا محاسبه شده و در قالب پیام به روز رسانی DIO در شبکه به صورت توزیع شده عمل نماید. در این سیستم فازی پیشنهادی که به نوعی یک تابع هدف OF_2 محسوب می‌شود پارامترهای میزان انرژی باقیمانده، نرخ تأخیر و میزان نرخ دریافت مورد انتظار یا همان نرخ ETX که به نوعی تعداد تلاش‌های یک گره جهت برقراری ارتباط با والد خود است، در نظر گرفته شده است.

معیارهای عملکرد سیستم فازی پیشنهادی:

- انرژی باقیمانده گره (ورودی نخست سیستم فازی)
 - میانگین تأخیر انتها به انتها تا چاهک (ورودی دوم سیستم فازی)
 - نرخ تحقق انتقال مورد انتظار یا ETX (ورودی سوم سیستم فازی)
- در شکل ۴ نمودار فازی روش معرفی شده درج گردیده است.

۳-۱- فازی‌سازی پارامترها

بدین ترتیب هر گره در هر واحد زمانی یک وضعیت مشخص خواهد داشت که برگرفته از سه پارامتر ورودی فازی خواهد بود. همان طور که از منطق فازی و مدل مثلثی برمی‌آید، هر پارامتر ورودی در سیستم فازی

روشی که در مسیریابی RPL در سال ۲۰۱۴ پیشنهاد شده است، الگوریتم ORPL [۱۵] نام دارد که یک الگوی فرصت‌طلبانه بر روی پروتکل RPL در شبکه‌های بی‌سیم است. در این پروتکل از گره‌های رله برای بهبود قابلیت اطمینان در شبکه استفاده شده است. مراحل تشکیل DODAG در این روش نیز برگرفته از پروتکل پایه RPL بوده و هر گره یک والد منتخب دارد که از بین بهترین پیام‌های تبلیغ دریافتی انتخاب شده است. در این روش معیار تأخیر انتها به انتها به عنوان پارامتر اصلی در محاسبات در نظر گرفته نشده است.

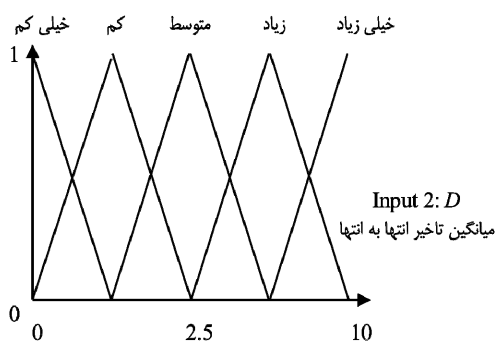
استفاده از الگوریتم‌های اکتشافی نظیر کلونی مورچه^۱ و موارد مشابه آن نیز توجه محققان را برای بهبود فرایند مسیریابی RPL به خود جلب کرده تا جایی که در سال ۲۰۱۵، بلقاچی و همکاران [۱۱] یک روش مسیریابی بر روی RPL با تابع هدفی که برگرفته از دو معیار انرژی باقیمانده و تأخیر مسیر است پیشنهاد داده‌اند. در این روش صرفاً مبحث اصلی، انتخاب والد از بین والدهای در دسترس یک گره برگ انجام شده و برخی از معیارهای مهم کیفیت خدمات مسیریابی از قلم افتاده است. به نوعی استانداردترین روش مسیریابی در اینترنت اشیا پروتکل RPL و QRPL می‌باشد، لذا ما در این مقاله بر روی این پروتکل‌ها کار کردیم و روش خود را با آنها مقایسه نمودیم.

۳- ساختار مسیریابی پیشنهادی

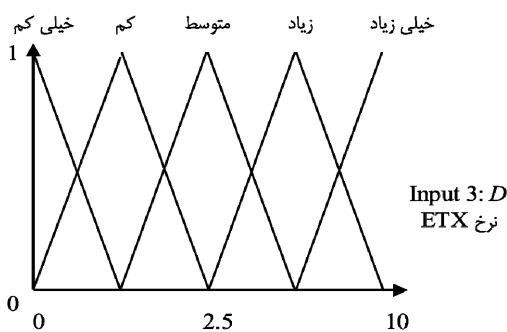
در پروتکل RPL بنا به نوع کاربرد شبکه و الزامات انتقال اطلاعات می‌بایست یک معیار ارزیابی را لحاظ نمود که به اصطلاح به آن تابع هدف^۲ (OF) می‌گویند. این تابع چندین پارامتر مهم شبکه را که عموماً پارامترهای کیفیت خدمات در مسیریابی هستند شامل می‌شود [۳]، [۱۶] و [۱۷]. بسته به نوع اهداف شبکه وزن پارامترها و معیارهای عملکرد در این تابع متغیر خواهد بود. در واقع تابع هدف موجود در RPL، چگونگی انتخاب مسیر بهینه را در شبکه تعریف می‌کند. هر تابع هدف توسط OCP^3 موجود در پیام DIO جهت پیکربندی شبکه استفاده می‌شود. در واقع یک OF ، محدودیت‌ها و معیارهای عملکرد گره را مطابق استاندارد RFC۶۵۵۱ در یک ارزش که به آن رتبه گفته می‌شود قرار می‌دهد. این

1. Ant Colony
2. Objective Function
3. Optimal Coverage Problem

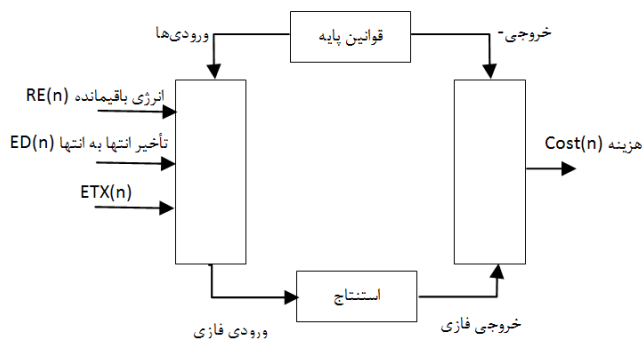
4. Objective Function Zero
5. QoS-Fuzzy Version of RPL



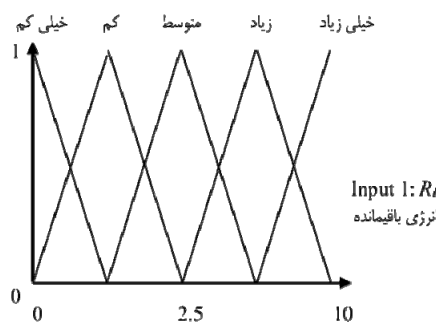
شکل ۶: نمودار تأخیر انتها به انتهای گره.



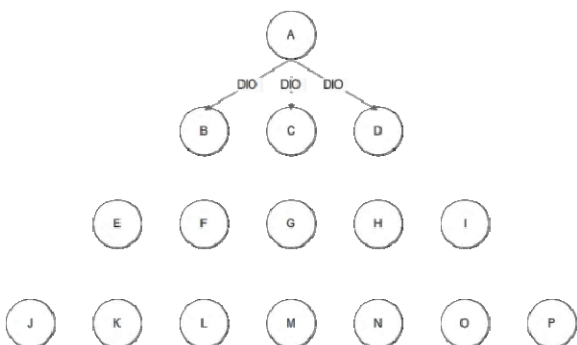
شکل ۷: نمودار نرخ ETX گره.



شکل ۴: نمودار سیستم فازی پیشنهادی.



شکل ۵: نمودار فازی سازی پارامتر انرژی.



شکل ۸: نمودار فازی تشکیل گراف شبکه در RPL و روش پیشنهادی.

باعث بی ثباتی شبکه باشد، لذا نرخ تحویل بسته یک متغیر تصادفی است. برای ارزیابی بهتر کیفیت مسیرهای انتخابی مورد استفاده پروتکل RPL، از معیار ETX استفاده می شود. بر اساس مستندات، در ترافیک پایین تقریباً نیمی از مسیرها دارای نرخ ETX برابر ۲ هستند و این رقم بین ۲ و ۳ در نوسان است. نرخ ETX مسیر، نیز وابسته به ترافیک شبکه است و با افزایش ترافیک به صورت قابل توجهی افزایش خواهد یافت. در ترافیک بالا، نرخ ETX نیمی از مسیرها برابر ۳ یا بیشتر بوده و حتی ۱۰٪ از مسیرها، نرخ ETX بالاتر از ۴ خواهند داشت. یکی دیگر از تأثیرات ترافیک بالا، افزایش تعداد مسیرهای اشتباه است که باعث کاهش نرخ تحویل بسته خواهد شد. در شکل ۷ نمودار فازی سازی پارامتر ETX لحاظ شده است.

۲-۳ تشکیل درخت شبکه مبتنی بر فازی

در روش پیشنهادی، ساختار تشکیل درخت شبکه RPL از ساختار ثابت به متغیر تغییر کرده است. در این روش گره های شبکه که از ریشه A مطابق شکل ۸ آغاز می شود پیام DIO خود را در مرحله اول، همه پخش می نمایند. در روش RPL پایه، گره های دریافت کننده DIO در صورتی که هیچ پیام دیگری را که رتبه ارسال کننده آن پایین تر از پیام مذکور باشد اخیراً دریافت نکرده باشند، در قالب پیام DAO درخواست خود را به آن

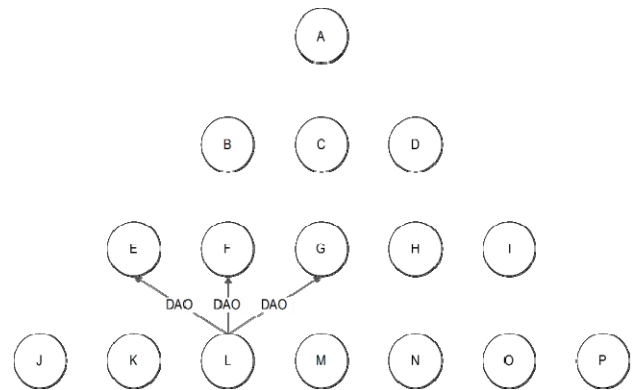
شامل یک نمودار مثلث بندی است. در هر نمودار با توجه به مثلث های مشخص و یکسان می توان به رفتار یک پارامتر در مقادیر متغیر محور x ، مقادیری دیگر را در محور y نسبت داد. هر نقطه از محور x دارای دو مقدار در محور y است. یکی از نمودارها، نمودار انرژی باقیمانده است. در شکل ۵ در ابتدای شبکه مقدار انرژی باقیمانده ۱۰ واحد و برای حداقل ترین حالت، میزان صفر در نظر گرفته شده است. این میزان انرژی باقیمانده می تواند در پنج سطح قرار گیرد که از خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تشکیل شده است. میزان انرژی باقیمانده می تواند در یکی از این سطوح یا نهایتاً در دو سطح متوالی قرار گیرد. نکته مهم این است که هر قدر میزان انرژی باقیمانده بالاتر باشد نشان دهنده پرارزش بودن گره مورد نظر است.

پارامتر دیگری که در سیستم فازی پیشنهادی به آن اشاره می کنیم میزان میانگین نرخ تأخیر انتها به انتهای گره در بازه اخیر است. لذا در شکل ۶ نمودار فازی این پارامتر نمایش داده شده است. این نرخ بر اساس مدت زمان تولید بسته DIO در گره ریشه و دریافت در هر گره، به صورت میانگین محاسبه می گردد. به عنوان مثال ممکن است در ۱۰ ثانیه اخیر به تعداد ۶ بار پیام DIO از جانب ریشه، به صورت تک گامی یا چندگامی در گره برگ دریافت گردد. این گره میانگین میزان تأخیر بر حسب برچسب زمانی بسته DIO را محاسبه کرده و به فرزند خود اعلان خواهد داشت. هر قدر این نرخ میزان پایین تری را داشته باشد گره امتیاز بالاتری در تبلیغات بین فرزند خود خواهد داشت.

پارامتر سوم سیستم فازی پیشنهادی، نرخ تعداد انتقال مورد انتظار جهت دریافت بسته است که آن را معیار ETX می نامند و جهت پیدا کردن مسیرهایی با راندمان بالا مورد استفاده قرار می گیرد. این معیار بر اساس تخمین تعداد انتقال مورد نیاز پیش از رسیدن بسته در مقصد به صورت صحیح محاسبه می شود. پارامتر ETX از طریق رابطه معین برای لینک مبدأ s به مقصد d ($s \rightarrow d$) محاسبه می شود. پارامتر $DR_{s \rightarrow d}$ تخمین نرخ تحویل بسته بر لینک $s \rightarrow d$ است. از آنجا که ETX همواره به دنبال جستجوی لینک با کیفیت بالاتر در واحد زمان است، ممکن است

جدول ۱: شرایط محیط و پارامترهای شبیه‌سازی.

| پارامتر | مقدار |
|--------------------|------------------|
| پهنای باند کانال | ۲۵۰ کیلوهرتز |
| حامل فرکانس | ۲٫۴ گیگاهرتز |
| سایز بسته داده | ۱۶۰۰ بیت |
| Hello بسته | ۱۲۰ بیت |
| زمان همگرایی شبکه | ۱۰۰۰ میلی‌ثانیه |
| تعداد گره‌های شبکه | ۲۰ گره |
| محیط شبکه | ۸۰ متر در ۸۰ متر |
| برد رادیویی گره | ۵ متر |
| حداکثر طول صف | ۲ بسته |
| انرژی اولیه گره | ۵ ژول |
| زمان شبیه‌سازی | ۳۲۴ ثانیه |



شکل ۹: ارسال پیام DAO به تمامی والدهای در دسترس گره برگ در روش پیشنهادی.

گره ارسال خواهند کرد. سپس گره دریافت‌کننده DAO بر حسب تابع هدف تعریف‌شده، تصمیم می‌گیرد که درخواست آن را پذیرش یا رد نماید. اگر پذیرش صورت گیرد در قالب پیام DAO-Ack به وی ابلاغ می‌گردد و از آن به بعد گره فرزند می‌تواند مقادیر DIO خود را به روز نموده و به روش والد خود همه‌پختی و فرایند عضوگیری را انجام دهد. اما در روش پیشنهادی به دلیل ثابت‌نبودن والدها و امکان داشتن چندین والد برای یک فرزند این روش تغییر یافته است. مثلاً در شکل ۸ گره A پیام DIO خود را به گره‌های B, C و D ابلاغ می‌نماید. این گره‌ها طی DAO خود، درخواست را به A ارسال و وی DAO-Ack را صادر خواهد نمود.

در روش RPL، مکانیسم مطابق شکل ۸ ادامه می‌یابد تا آماده‌شدن شبکه پایان پذیرد. اما در روش پیشنهادی هر گره فرزند همانند L در شکل ۹، درخواست DAO خود را همه‌پختی نموده و از گره‌های E, F و G پیام DAO-Ack را دریافت می‌کند. در واقع گره‌های والد مذکور در لیست خود گره L را به عنوان فرزند بالقوه برای خود در نظر خواهند داشت تا در صورت نیاز بتوانند بسته‌های آن را منتقل نمایند. در روش پیشنهادی پیام دریافتی گره‌های والد برای L یعنی E, F و G، شناسه L را در لیست خود دارند تا در زمان مسیریابی، بتوانند مدیریت را لحاظ نمایند.

۳-۳ فاز مسیریابی

پس از تشکیل جداول همسایگی در گره‌های شبکه که والد را از وجود فرزندان بالقوه آگاه ساخته و همچنین کاندیدای والد جهت انتقال بسته را برای فرزند مشخص می‌نماید، حال می‌بایست شبکه به تولید داده پرداخته و مکانیسم انتقال بسته در شبکه آغاز گردد. در روش پیشنهادی هر گره فرزند از بین والدهای در دسترس می‌بایست مناسب‌ترین گزینه را به لحاظ پارامترهای تأخیر، انرژی و در دسترس بودن انتخاب نماید. لذا هر گره بر اساس (۱) نسبت به انتخاب مذکور، عمل می‌نماید

$$Rank_n = Rank_C + \frac{1}{Fuzzy(RE, D, ETX)} \quad (1)$$

در (۱)، $Rank_C$ برابر است با رتبه جاری گره والد مورد ارزیابی، $Fuzzy(RE, D, ETX)$ برابر است با مقدار محاسبه‌شده فازی هر گره والد که در قالب پیام DIO به فرزندان ابلاغ شده است و $Rank_n$ نیز برابر با رتبه ارزش‌دهی هر گره والد است تا از بروز دور یا هدایت بسته به سمتی دورتر از ریشه جلوگیری نماید. در نهایت گره برگ، پایین‌ترین رتبه را به عنوان گزینه انتقال، انتخاب خواهد نمود.

1. Warm-up

در شکل ۱۰ دیاگرام حالت اجرای روش پیشنهادی Q-FRPL برای مسیریابی گره‌های اینترنت اشیا نمایش داده شده است. با توجه به این که پارامترهای وابسته به مکانیسم مسیریابی در ساختار درختی را در شبکه در نظر گرفته‌ایم، لذا مصرف انرژی و میزان طول عمر در شبکه از اهداف کلی این تحقیق به شمار می‌آیند. در این آزمون‌ها تعداد مشخصی گره حسگر را به صورت تصادفی در محیط شبیه‌سازی‌ها توزیع کرده و بررسی خواهد شد که روش پیشنهادی و روش پایه مشابه آن، تا چه میزان می‌توانند در تشکیل درخت شبکه با انرژی کارآمد موفق بوده و تا چه میزان در انتخاب مسیر بهینه شبکه از مبدأ تا مقصد موفق بوده‌اند.

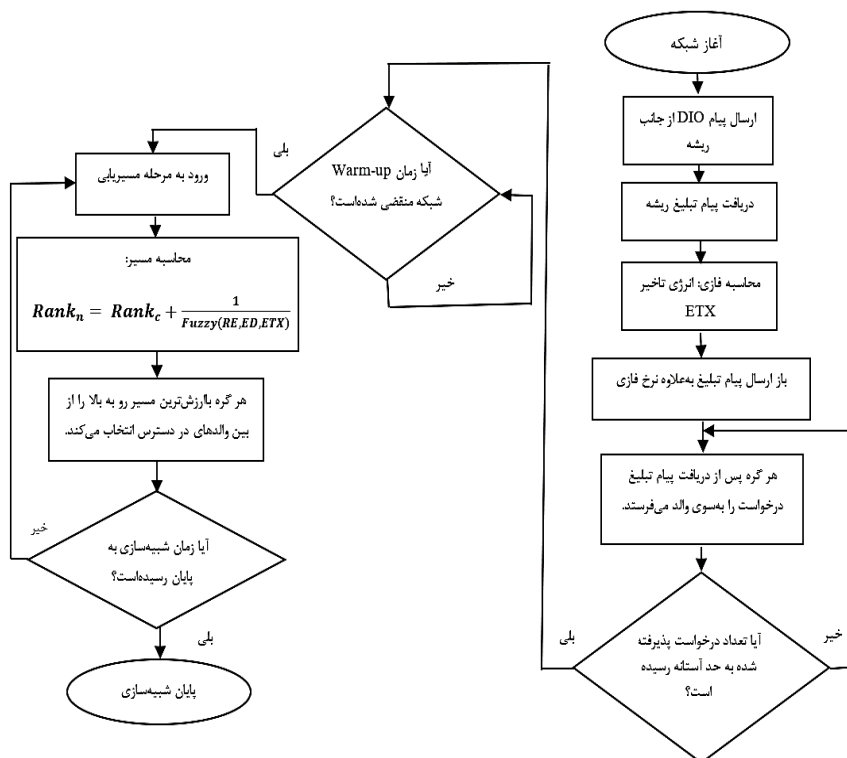
در جدول ۱ شرایط شبیه‌سازی در شبکه پیشنهادی معرفی می‌شود. برای ارزیابی دقیق‌تر می‌بایست برای پروتکل پایه و روش پیشنهادی تمامی موارد یکسان در نظر گرفته شده باشد. با توجه به این که محیط شبیه‌سازی در روش پیشنهادی Q-FRPL، با الگوریتم متفاوت QRPL است، لذا یکی از معیارهای شبیه‌سازی که زمان شبیه‌سازی است تغییر یافته است. در مراحل شبیه‌سازی، نرخ ترافیک و جریان اطلاعات تولیدی در شبکه یکسان در نظر گرفته شده است. مطابق جدول ۱ در این آزمون‌ها، تعداد ۲۰ گره حسگر را به صورت تصادفی در محیط شبیه‌سازی توزیع کرده و بررسی خواهد شد که روش پیشنهادی و روش‌های پایه مشابه آن تا چه میزان می‌توانند در کارآمدی انرژی موفقیت‌آمیز بوده و مسیریابی پویایی را نتیجه دهند.

۴- نتایج

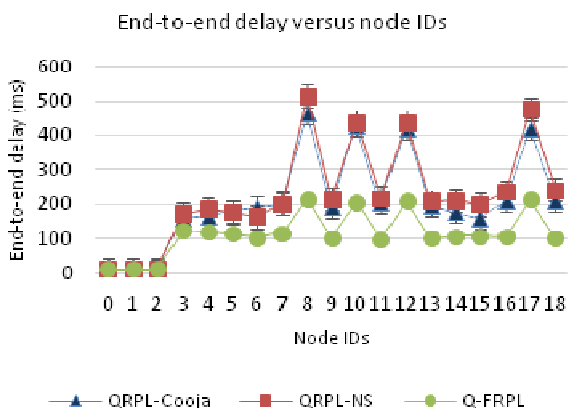
۴-۱ آزمون میانگین مصرف انرژی

آزمون میانگین مصرف انرژی در شبکه به جهت اندازه‌گیری میزان اثربخشی الگوی مسیریابی در کارآمدی انرژی شبکه، پیشنهاد شده است. در شکل ۱۱ نتایج این آزمون مشاهده می‌شود که الگوریتم پیشنهادی به دلیل در نظر گرفتن انرژی باقیمانده گره، میزان ترافیک موجود در مسیرهای گره والد (که موجب تأخیر پردازش صف، انتقال و انتشار می‌شود) و همچنین میزان دسترسی والد سطح بالاتر، توانسته است نسبت به روش QRPL نتایج بهتری را ارائه نماید.

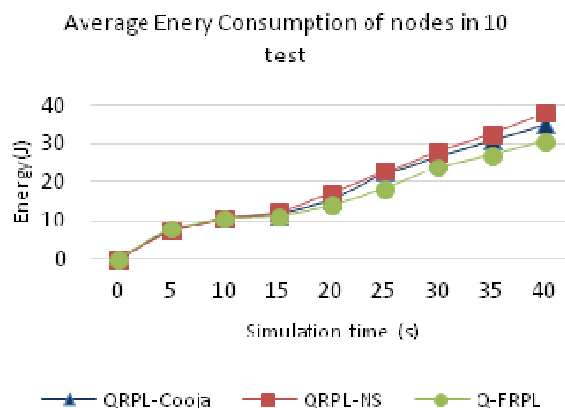
میانگین انرژی مصرفی گره‌ها در بازه‌های زمانی شبکه لحاظ شده که نشان از آگاهی روش پیشنهادی به انرژی و وضعیت شبکه داشته و با گذشت زمان شبیه‌سازی، روند مصرف انرژی در شبکه پیشنهادی کاهش خواهد یافت. در آزمون مذکور اختلاف نتایج شبیه‌سازی NS۲ و Cooja را نشان داده تا در مقایسه‌ها شرایط عادلانه در نظر گرفته شده باشد.



شکل ۱۰: دیاگرام روش پیشنهادی Q-FRPL برای مسیریابی گره‌های اینترنت اشیا.



شکل ۱۲: نتایج ارزیابی تأخیر انتها به انتها و درصد خطای شبیه‌سازی.



شکل ۱۱: نتایج ارزیابی نرخ مصرف انرژی و درصد خطای شبیه‌سازی.

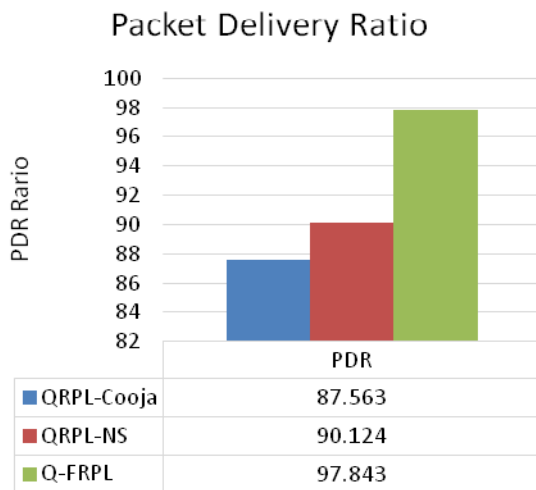
والد اقدام نموده است ولی در روش QRPL هر گره، والد‌های مناسبی را مانند روش پیشنهادی لیست نموده و با روش کلونی مورچه مسیر بهینه را یافته است. مشکل روش QRPL در این است که مسیرهای پرتراфик ناشی از کلونی مورچه به سرعت کیفیت خود را از دست داده و تا زمان محاسبه مجدد فرمون شبکه و مسیریابی، تعدادی از گره‌ها بسته‌های خود را از دست داده یا با ازدحام روبه‌رو شده‌اند.

همانند مصرف انرژی گره‌های شبکه، آزمون میانگین نرخ تأخیر انتها به انتها بسته‌های بسته‌های مسیریابی مورد ارزیابی بوده و درصد خطای شبیه‌سازی در محیط Cooja و NS۲ و همچنین نتایج روش پیشنهادی و پایه در محیط یکسان مورد نظر بوده است. در شکل ۱۲ نتایج شبیه‌سازی و مقایسه آن با مجموعه داده‌های موجود در [۱۳] نمایش داده شده است. نرخ تأخیر انتها به انتها به انتهای شبکه به صورت میانگین برای همه گره‌ها در روش پیشنهادی نسبت به روش پایه (که در NS۲ شبیه‌سازی شده است) ۴۹٫۵٪ بهبود داشته که این بهبود به دلیل انتخاب مسیرهای کم‌ترافیک اتفاق افتاده است.

در شکل ۱۱ نتایج، اختلاف و درصد خطای خروجی‌ها لحاظ شده است. با وجود خطای در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی، روش پیشنهادی نسبت به روش پایه عملکرد بهتری به لحاظ انرژی مصرفی شبکه داشته است. لازم به ذکر است نتایج این آزمون به صورت واریانس ۱۰ بار تکرار آزمون صورت گرفته است. نرخ مصرف انرژی روش ما نسبت به روش QRPL (که در NS۲ شبیه‌سازی شده است) در انتهای زمان شبیه‌سازی به صورت متوسط ۱۹٪ بهبود داشته است.

۴-۲ آزمون میانگین نرخ تأخیر انتها به انتهای شبکه

آزمون میانگین تأخیر انتها به انتها شبکه را در شکل ۱۲ نمایش داده‌ایم که روش پیشنهادی دارای نرخ تأخیر کمتری نسبت به روش پایه می‌باشد زیرا به صورت دوره‌ای و در قالب بسته DIO وضعیت فازی خود را به اطلاع فرزندان رسانده و آنها نیز با آگاهی لازم والد مناسب را انتخاب نموده‌اند. عدم تشکیل مسیرهای پرتراфик در شبکه، از ویژگی‌های روش پیشنهادی است که توانسته به اهداف مورد نظر دست یابد. روش RPL صرفاً بر اساس رتبه، نسبت به انتخاب ثابت والد برای هر



شکل ۱۵: نمودار نرخ تحویل بسته پس از زمان ۳۲۴ ثانیه شبیه‌سازی.

شبیه‌سازی ثابت شده است. در این آزمون هر گره با نرخ تولید بسته مشابه نسبت به سایرین، اقدام به تولید و انتقال آنها به سوی ریشه نموده است. روش RPL پایه دارای مسیرهای ثابت بوده و در صورت بروز خطا یا از بین رفتن ارتباط بین گره‌های والد و فرزند در هر سطحی باعث از دست رفتن بسته‌های داده خواهد شد. در زمان ترمیم مسیر که عموماً با ارسال پیام DIS از جانب فرزندهای بی‌والد همراه است، منجر به تنظیم مجدد زمان بند DIO می‌گردد. تا زمان عضوگیری جدید، گره‌های شبکه ممکن است بسته‌های داده بی‌شماری را از دست بدهند. اگر گره شکست‌خورده در رتبه پایین (نزدیک به چاهک) باشد وضعیت بحرانی خواهد بود. لذا در QRPL به دلیل وجود مسیرهای جایگزین و محاسبه‌شده، این روند بهبود یافته و در روش پیشنهادی Q-FRPL با پویاسازی کامل مسیر و امکان ترمیم سریع‌تر در شبکه بهبود چشم‌گیری حاصل گشته است.

۴-۵ آزمون نرخ تحویل بسته در شبکه

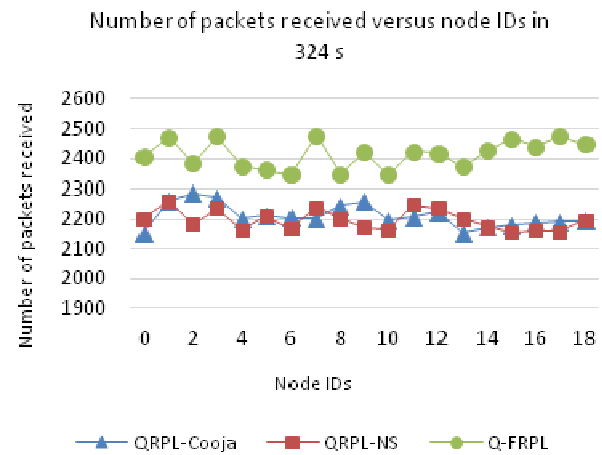
نرخ تحویل بسته آزمون دیگری است که در این شبیه‌سازی به آن اشاره شده است. این مقدار برحسب درصد و بر اساس (۲) محاسبه می‌گردد [۱۸]

$$PDR = \frac{\sum Recieved\ Packets}{\sum Send\ Packets} \times 100 \quad (2)$$

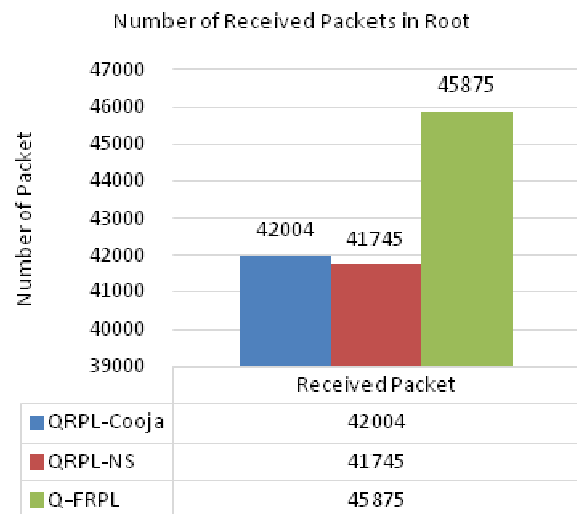
به عبارتی نسبت بسته‌های اطلاعاتی دریافت‌شده بر تعداد بسته‌های ارسال‌شده در شبکه بر حسب درصد است. شکل ۱۵ نرخ تحویل بسته در شبکه را پس از ۳۲۴ ثانیه شبیه‌سازی نشان داده است. مسلماً هرچه این میزان درصد بالاتر باشد راندمان شبکه بهتر است. نرخ تحویل بسته پس از اتمام زمان شبیه‌سازی ۹۷٫۸۴٪ شده که نسبت به روش پایه (که در NS۲ شبیه‌سازی شده است) ۷٫۷۲٪ بهبود داشته است. بنابراین روش پیشنهادی ما به دلایل ذکرشده در آزمون‌ها، نسبت به روش پایه کارایی بهتری را دارد.

۵- نتیجه‌گیری

نظر به اهمیت همبندی و نحوه انتقال بسته‌های داده در شبکه‌های بی‌سیم و به‌خصوص اینترنت اشیا، این مقاله به بررسی موارد ذکرشده پرداخت. بررسی‌ها نشان داد مسیریابی در اینترنت اشیا ابعاد بسیار گسترده‌ای دارد که به دلیل وابستگی بالای آن به سخت‌افزار، نرم‌افزار و سیستم عامل درونه‌سازی شده، چالش‌های متنوعی را نیز رقم زده است.



شکل ۱۳: آزمون تعداد بسته‌های دریافتی در ریشه با در نظر گرفتن خطای شبیه‌سازی.



شکل ۱۴: نمودار تعداد بسته‌های ارسالی و دریافتی شبکه در زمان ۳۲۴ ثانیه شبیه‌سازی.

۴-۳ آزمون تعداد بسته‌های دریافتی در ریشه

در مسیریابی شبکه هر قدر فرایند مسیریابی در انتقال بسته‌های اطلاعاتی موفق عمل کند تعداد بسته‌های از دست رفته در شبیه‌سازی کاهش خواهد یافت. دلایل متعددی موجب از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی شبکه می‌گردد که برخی از مهم‌ترین دلایل آن شامل شکست لینک، اتمام انرژی گره واسط، تأخیر بیش از آستانه، ازدحام و مواردی از این قبیل که در روش پیشنهادی موارد مذکور در نظر گرفته شده است. در شبکه پیشنهادی، توانسته‌ایم سربار کنترلی ناشی از ازدحام صورت‌گرفته در مسیریابی را کاهش داده و از بروز تصادم در شبکه نیز جلوگیری نماییم. در روش پیشنهادی به دلیل مدیریت بهتر در انتخاب والد برای گره‌های شبکه و تشخیص مسیرهایی با کیفیت بالاتر، نتایج بهتری نسبت به روش پایه به دست آمده که در شکل ۱۳ به وضوح مشهود است. تعداد بسته‌های دریافتی به صورت متوسط برای همه گره‌ها در روش پیشنهادی نسبت به روش پایه (که در NS۲ شبیه‌سازی شده است) ۱۰٪ بهبود داشته که این بهبود به دلیل انتخاب مسیرهای کم‌ترافیک و با کیفیت بالاتر اتفاق افتاده است.

۴-۴ آزمون تعداد بسته‌های مسیریابی

در آزمون دیگری، همان طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است نرخ تعداد بسته‌های دریافتی شبکه به صورت مجموع پس از ۳۲۴ ثانیه

- [8] G. S. Rapat and N. C. Naveen, "A survey on routing protocols of internet of things," *International J. of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 6, no. 5, pp. 5892-5898, May 2018.
- [9] R. K. Poluru and S. Naseera, "A literature review on routing strategy in the internet of things," *J. of Engineering Science and Technology Review*, vol. 10, no. 5, pp. 50-60, Sept. 2017.
- [10] D. Airehrour, J. Gutierrez, and S. K. Ray, "Secure routing for internet of things: Aa survey," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 66, pp. 198-213, May 2016.
- [11] B. Mohamed and F. Mohamed, "QoS routing RPL for low power and lossy networks," *International J. of Distributed Sensor Networks*, vol. 11, no. 11, pp. 1-10, Nov. 2015.
- [12] J. Wang and H. Li, "Researching and hardware implementation of RPL routing protocol based on the contiki operating system," *International J. of Future Computer and Communication*, vol. 3, no. 6, pp. 411-414, Dec. 2014.
- [13] O. Gaddour and A. Koubaa, "RPL in a nutshell: a survey," *Computer Networks*, vol. 56, no. 14, pp. 3163-3178, Sep. 2012.
- [14] Q. Le, T. Ngo-Quynh, and T. Magedanz, "RPL-based multipath routing protocols for internet of things on wireless sensor networks," in *Proc. Int. Conf. on Advanced Technologies for Communications, ATC'14*, pp. 424-429, Hanoi, Vietnam, 15-17 Oct. 2014.
- [15] S. Gormus, F. Tosato, Z. Fan, Z. Bocus, and P. Kulkarni, "Opportunistic RPL for reliable AMI mesh networks," *Wireless Networks*, vol. 20, no. 8, pp. 2147-2164, Nov. 2014.
- [16] T. Winter, et al., "RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks," IETF RFC 6550 Standards Track, 2012.
- [17] J. Vasseur, M. Kim, K. Pister, N. Dejean, and D. Barthel, *Routing Metrics Used for Path Calculation in Low-Power and Lossy Networks*, IETF RFC 6551 Standards Track, 2012.
- [18] O. Iova, F. Theoleyre, and T. Noel, "Using multiparent routing in RPL to increase the stability and the lifetime of the network," *Ad Hoc Networks*, vol. 29, pp. 45-62, Jun. 2015.

مریم عسگری تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر گرایش نرم افزار به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۹۰ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک به پایان رسانده است و هم‌اکنون در مقطع دکتری رشته مهندسی کامپیوتر گرایش نرم افزار دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک در حال تحصیل است. ایشان از سال ۱۳۸۳ تاکنون عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد پروفیسور حساسی تفرش می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: شبکه‌های کامپیوتری، الگوریتم‌های تکاملی.

محمود فتحی در سال ۱۳۶۳ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه علم و صنعت ایران، در سال ۱۳۶۵ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی میکروپروسسور خود را از دانشگاه بردفورد انگلستان و در سال ۱۳۷۰ در رشته معماری کامپیوتر و پردازش تصویر سیستم‌های حمل و نقل هوشمند از دانشگاه منچستر مدرک دکتری را دریافت نمود. هم‌اکنون استاد دانشکده مهندسی کامپیوتر دانشگاه علم و صنعت ایران می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: سیستم‌های حمل و نقل هوشمند، پردازش تصویر در سیستم‌های حمل و نقل هوشمند، یادگیری ماشین و یادگیری عمیق.

محمد شاهرودی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر گرایش سخت افزار به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۸ در دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشجوی دکتری رشته مهندسی کامپیوتر گرایش معماری کامپیوتر دانشگاه علم و صنعت ایران تحت راهنمایی آقای دکتر محمود فتحی می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: سیستم‌های حمل و نقل هوشمند، یادگیری ماشین و یادگیری عمیق.

محمود سهیلی نیر تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی فناوری اطلاعات- طراحی صفحات وب در جهاد دانشگاهی همدان در سال ۱۳۹۲ و کارشناسی ارشد مهندسی فناوری اطلاعات- شبکه‌های کامپیوتری در دانشگاه آزاد اسلامی واحد پروفیسور حساسی تفرش در سال ۱۳۹۶ به پایان رسانده است. از سال ۱۳۸۵ تاکنون در دانشگاه فنی و حرفه‌ای شهیدفتح همدان مشغول به فعالیت می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه‌ی ایشان شبکه‌های کامپیوتری می‌باشد.

مواردی چون سربار محاسباتی، پیچیدگی‌های الگوریتمیک، امنیت، قابلیت اطمینان، تحمل‌پذیری خطای سخت‌افزاری، خطای داده و بسیاری از چالش‌های دیگر تأثیرات خود را در مسیریابی و انتقال داده از مبدأ تا مقصد پیام خواهد گذاشت. به دلیل گستردگی موضوعات ذکر شده هدف مقاله را معطوف به کیفیت خدمات مسیریابی در اینترنت اشیا، به خصوص روش RPL ساخته و بر اساس پارامترهای مؤثر در تأمین کیفیت خدمات، ارزیابی خود را با معیارهای شاخص ساختار شبکه و کیفیت خدمات مسیریابی در قالب جداول مقایسه‌ای ارائه دادیم. چالش‌هایی که در تأمین کیفیت خدمات مسیریابی اینترنت اشیا مطرح شده، اکثراً ناشی از عدم توازن، عدالت، هوشمندی در مسیریابی و کنترل توپولوژی است. الگوریتم‌های معرفی شده در سال‌های اخیر در حوزه اینترنت اشیا زمانی کاربرد اصلی خود را نمایش می‌دهند که در قالب پلتفرم یکپارچه‌ای قرار گیرند که با توجه به تلاش‌های صورت گرفته امید است تا سال ۲۰۲۰ این امر محقق گردد.

نتایج شبیه‌سازی‌ها و ارزیابی مقاله حاضر حاکی از آن بود که روش پیشنهادی در آزمون‌های بهره‌وری انرژی، نرخ تأخیر و نرخ تحویل داده نسبت به روش‌های اخیر عملکرد بهتری داشته است.

۶- کارهای آینده

روند بررسی کارهای گذشته و نتایج این مقاله ما را به سوی استفاده از یک رویکرد پویا در مسیریابی اینترنت اشیا با ساختار فازی سوق می‌دهد. الزامات این ساختار به عنوان مثال: نرخ از دست رفتن ارتباطات، شکست لینک و از دست رفتن بسته، افزایش نرخ تأخیر انتها به انتها و افزایش زمان روشن‌بودن گره‌ها در شبکه را منتج می‌شود که به عبارتی یک تعریف جدید از کیفیت خدمات را معرفی خواهد کرد. هدف بعدی به عنوان کار پژوهشی آتی امکان‌سنجی ترکیب الگوی نقشه ادراکی فازی با ساختار پروتکل RPL است که بتواند معیارهای عملکرد مورد ارزیابی در کیفیت خدمات را بهبود ببخشد.

مراجع

- [1] S. Umamaheswari and A. Negi, "Internet of things and RPL routing protocol: a study and evaluation," in *Proc. Int. Conf. on Computer Communication and Informatics, ICCCI'17*, 7 pp., Coimbatore, India, 5-7 Jan. 2017.
- [2] H. M. Xin and K. Yang, "Routing protocols analysis for internet of things," in *Proc. 2nd Int. Conf. on Information Science and Control Engineering, ICISCE'15*, pp. 447-450, Shanghai, China 24-26 Apr. 2015.
- [3] Z. Sheng, S. Yang, Y. Yu, A. Vasilakos, J. McCann, and K. Leung, "A survey on the IETF protocol suite for the internet of things: standards, challenges, and opportunities," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 20, no. 6, pp. 91-98, Dec. 2013.
- [4] T. Zhang and X. Li, "Evaluating and analyzing the performance of RPL in contiki," in *Proc. 1st Int. Workshop on Mobile Sensing, Computing and Communication*, pp. 19-24, Philadelphia, PA, USA, 11-11 Aug. 2014.
- [5] X. Vilajosana, P. Tuset, T. Watteyne, and K. Pister, "OpenMote: open-source prototyping platform for the industrial IoT," *Ad Hoc Networks*, pp. 211-222, San Remo, Italy, 1-2 Sept. 2015.
- [6] D. Han and O. Gnawali, "Performance of RPL under wireless interference," *Commun. Mag. IEEE*, vol. 51, no. 12, pp. 137-143, Dec. 2013.
- [7] A. Dhumane, R. Prasad, and J. Prasad, "Routing issues in internet of things: a survey," in *Proc. Int. Multi Conf. of Engineers and Computer Scientists, IMECS'16*, vol. 1, pp. 404-412, Hong Kong, China, 16-18, Mar. 2016.