

یک الگوریتم مسیریابی مبتنی بر RPL برای داده‌های چندرسانه‌ای در اینترنت اشیا

فرزانه مرتضوی* محمد خوانساری**

* دانش آموخته دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

** دانشیار دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۷

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

با توجه به رشد روزافزون شبکه‌های ارتباطی، در آینده نزدیک داده‌های چندرسانه‌ای در اینترنت اشیا نقش قابل ملاحظه‌ای خواهند داشت. حجم بالای داده‌های چندرسانه‌ای باعث چالش‌هایی مانند کاهش طول عمر شبکه و ایجاد ازدحام در اینترنت اشیا می‌شود. در این مقاله تابع هدف جدیدی بر مبنای پروتکل مسیریابی RPL پیشنهاد شده است که ویژگی‌های داده‌های چندرسانه‌ای را در فرآیند مسیریابی، مورد نظر قرار می‌دهد. تابع هدف پیشنهادی ترکیب وزن دار دو معیار میزان انرژی باقیمانده و ظرفیت بافر گره‌ها را با توجه به حجم داده در مسیریابی در نظر می‌گیرد. به منظور ارزیابی این روش، داده‌ها بر اساس یک فایل اثر ویدئو (video trace) تولید شده و از سنجه‌های نرخ تحویل بسته، طول عمر شبکه، میزان دسترس‌پذیری گره‌ها در طول عمر شبکه، توزیع مصرف انرژی گره‌ها و تأخیر انتها به انتها برای ارزیابی روش پیشنهادی استفاده شده است. نتایج ارزیابی و مقایسه روش پیشنهادی با RPL پایه نشان می‌دهد که در روش پیشنهادی نرخ تحویل بسته نسبت به RPL پایه افزایش یافته است. همچنین این روش با توزیع انرژی بین گره‌ها طول عمر شبکه را نسبت به RPL استاندارد افزایش داده و با کاهش ازدحام شبکه میزان تأخیر انتها به انتها نسبت به RPL پایه کاهش یافته است.

واژگان کلیدی: اینترنت اشیا، چندرسانه‌ای، مسیریابی، پروتکل RPL، طول عمر شبکه

۱ مقدمه

دوربین گوشی‌های هوشمند و ... انتظار می‌رود در آینده نزدیک، بار ترافیکی اینترنت اشیاء روندی همانند بار ترافیکی اینترنت سنتی داشته باشد و به سمت جریان سازی داده‌های چندرسانه‌ای متمایل شود. اضافه شدن حسگرهایی از نوع دوربین به اینترنت اشیاء امکان جمع‌آوری داده‌های بصری از محیط را فراهم می‌کند و می‌تواند در محقق شدن پتانسیل اینترنت اشیاء برای خودکار سازی عملیات بر اساس تحلیل داده‌های کسب شده از محیط، مؤثر باشد. داده‌های چندرسانه‌ای دریافت شده توسط یک شیء می‌تواند در زمان مناسب با سایر اشیاء مبادله شوند و امکان واکنش مناسب اشیاء به شرایط محیطی پیش آمده را فراهم آورند. اضافه شدن قابلیت دریافت و انتقال داده‌های چندرسانه‌ای به اشیاء در اینترنت اشیاء، در محیط‌های محدود کار ساده‌ای نبوده و نیازمند اضافه کردن عملکردهای جدید و بازبینی عملکردهای فعلی اینترنت اشیاء است که موجب ایجاد زیرشاخه جدیدی از اینترنت اشیاء می‌شود که می‌توان آن را «اینترنت اشیاء چندرسانه‌ای» یا $IoMT^2$ نامید. می‌توان اینترنت اشیاء چندرسانه‌ای را به صورت یک شبکه سراسری از اشیاء چندرسانه‌ای که به طور منحصربه‌فرد قابل شناسایی و آدرس‌دهی باشند، تعریف کرد که این اشیاء می‌توانند داده‌های چندرسانه‌ای را از محیط جمع‌آوری کنند و همچنین قابلیت پردازش داده‌ها و تعامل با سایر دستگاه‌های چندرسانه‌ای را دارند [۳] و [۴].

در اینترنت اشیاء چندرسانه‌ای دستگاه‌های چندرسانه‌ای ناهمگن که محدودیت‌های هزینه و انرژی دارند با هم در تعامل هستند و با استفاده از آدرس‌های IP منحصربه‌فرد در دسترس کامپیوترها و دستگاه‌های شبکه دیگری که به اینترنت متصل هستند قرار دارند. از آنجایی که دستگاه‌های مورد استفاده در این شبکه‌ها محدودیت انرژی دارند، باید به صورت کارآمد به کار گرفته شوند تا عمر شبکه افزایش یابد؛ بنابراین لازم است از روش‌هایی که بهره‌وری انرژی را تضمین می‌کنند، استفاده شود. یکی دیگر از ویژگی‌های محتویات چندرسانه‌ای این است که برخلاف داده‌های اسکالر، داده‌های چندرسانه‌ای بسیار حجیم هستند. این حجم انبوه از اطلاعات می‌تواند منجر به ایجاد ازدحام در شبکه شود.

در شبکه‌های اینترنت اشیاء برای انتقال داده‌ها و پیام‌ها از گره مبدأ به گره مقصد، لازم است از سازوکاری برای مسیریابی استفاده شود. با توجه به الزامات و خصوصیات اینترنت اشیاء، کارگروهی در مؤسسه IETF برای طراحی لایه شبکه برای این نوع از شبکه‌ها تشکیل شد که نتیجه کار آن‌ها معرفی پروتکل مسیریابی RPL^3 برای لایه شبکه

اینترنت اشیاء شبکه‌ای است که در آن وسایل موجود در زندگی روزمره و محیط که «اشیاء» نامیده می‌شوند، به حسگرها، عملگرها و فناوری‌های ارتباطی و محاسباتی مجهز شده و به یک چارچوب ارتباطی متصل می‌شوند. این ماشین‌ها و اشیاء متصل شده کاربران جدید اینترنت خواهند بود و ترافیک داده تولید خواهند کرد. با توجه به اینکه بسیاری از اشیاء تشکیل‌دهنده اینترنت اشیاء دارای محدودیت‌هایی در منابع هستند، این شبکه‌ها نیازمندی‌های جدید و متفاوتی نسبت به شبکه‌های سنتی خواهند داشت. اینترنت اشیاء شبکه‌ای است که در «هر جا»، «هر زمان» و توسط «هر چیزی یا هر کسی» در دسترس باشد. یکی دیگر از الزامات این شبکه این است که در آن هر شیء یک هویت یکتا داشته باشد، به این منظور به هر شیء یک آدرس اینترنتی منحصربه‌فرد (IP^1) تعلق می‌گیرد و آن شیء از طریق این آدرس قابل شناسایی و کنترل است. بر طبق تعاریف ارائه شده از اینترنت اشیاء توسط مؤسسه‌هایی مانند IEEE، IETF و ITU مواردی مانند تعداد زیاد گره‌ها، تولید داده‌های کلان، تحرک گره‌ها و وجود سکوا از ملزومات اصلی اینترنت اشیاء نیستند و یک شبکه اینترنت اشیاء می‌تواند شامل این موارد باشد یا خیر، اما دو شرط هویت منحصر بفرد اشیاء و دسترسی در هر جا، هر زمان و توسط هر چیز جزء ملزومات اصلی یک شبکه اینترنت اشیاء هستند. تعریف «دسترس در هر جا، هر زمان و توسط هر چیز» توسط مؤسسه ITU پیشنهاد شده است. اینترنت اشیاء یک «شبکه فراگیر» است. منظور از شبکه فراگیر این است که شبکه‌ها و اتصالات در هر جا و هر زمان در دسترس باشند، به عبارتی دسترسی به آنها در هر ساعتی و از هر نقطه‌ای امکان‌پذیر باشد. مؤسسه ITU یک بعد جدید به نام هرچیز را نیز به اهداف شبکه‌سازی فراگیر اضافه کرد و به این ترتیب تعاملات شیء-با-شیء و ماشین-با-ماشین به تعاملات موجود شخص-با-شخص و شخص-با-ماشین اضافه شد [۱] و [۲].

در سال‌های اخیر با توجه به علاقه‌مندی عموم به توسعه و استفاده از برنامه‌های کاربردی و خدمات مبتنی بر چندرسانه‌ای، ترافیک چندرسانه‌ای (ویدئو، صوت و ...) در شبکه‌های جهانی رشد فراوانی داشته است. برنامه‌های کاربردی چندرسانه‌ای زمان واقعی، خدماتی مانند کنفرانس‌های ویدئویی، ارائه مطالب از راه دور، تحویل محتوا در زمان واقعی، بازی‌های درون خطی و غیره، موجب افزایش چشمگیر ترافیک چندرسانه‌ای اینترنتی شده‌اند. با توجه به پیشرفت‌های حاصل شده در ساخت دوربین‌های کوچک و ارزان با کاربردهای مختلف مانند دوربین‌های نظارتی، دوربین‌های پوشیدنی،

^۳ Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks

^۱ Internet Protocol

^۲ Internet of Multimedia Things

می‌پردازد، در بخش ۴ روش پیشنهادی این مقاله ارائه شده است، در بخش ۵ نحوه شبیه‌سازی روش پیشنهادی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی بررسی می‌شود و در نهایت در بخش ۶ نتیجه‌گیری و کارهای پیشنهادی برای آینده ارائه می‌گردد.

۲ پیشینه تحقیق

با توجه به نقش پروتکل RPL در مسیریابی داده‌ها در شبکه‌های کم‌توان و پراتلاف، از زمان معرفی این پروتکل (سال ۲۰۱۲) تاکنون روش‌های مسیریابی مبتنی بر این پروتکل برای کاربردهای اینترنت اشیا در منابع علمی پیشنهاد شده‌اند [۹] تا [۱۷]. پژوهشگران این حوزه، متناسب با کاربردهای گوناگون معیارهای متفاوتی برای تابع هدف مسیریابی پیشنهاد نموده‌اند. تعدادی از روش‌های پیشنهادی از یک معیار مسیریابی استفاده کرده‌اند و تعدادی از آن‌ها چند معیار مسیریابی را با هم ترکیب نموده‌اند. جدول ۱ خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام شده در حوزه مسیریابی مبتنی بر پروتکل RPL در اینترنت اشیا را نشان می‌دهد. در این جدول، سال انتشار مقاله، نام روش یا معیار پیشنهادی مقاله، ایده اصلی، بهبودهای حاصل شده در مقاله، مشکلات هر مقاله، نوع معیار پیشنهادی (یک معیار یا ترکیب چند معیار)، تعداد گره به کار رفته در شبیه‌سازی و شبیه‌ساز استفاده شده برای ارزیابی نتیجه مقاله بررسی شده است.

با توجه به این جدول روش‌های مسیریابی زیادی بر مبنای پروتکل RPL پیشنهاد شده است که همه این روش‌ها دارای تابع هدفی هستند که بر اساس نیازمندی‌ها، محدودیت‌ها و اهداف تعیین شده در هر پژوهش بهینه‌سازی می‌شود. تفاوت عمده این روش‌ها این است که هر یک هدف متفاوتی دارند و بر اساس هدف مورد نظر خود معیارهای متفاوتی ارائه نموده‌اند و تابع هدف را بر اساس این معیارها تشکیل داده‌اند. در میان روش‌های پیشنهادی در منابع تنها دو روش Green-RPL و PriNergy با هدف داده‌های چندرسانه‌ای ایجاد شده‌اند اما الزامات خاص ترافیک چندرسانه‌ای در آن‌ها در نظر گرفته نشده و در ارزیابی آن‌ها نیز از ترافیکی با الگوی داده‌های چندرسانه‌ای استفاده نشده است. بنابراین، موضوع مسیریابی داده‌های ویدئو یکی از موضوعاتی است که می‌تواند در کاربردهای اینترنت اشیا مورد توجه قرار بگیرد.

۳ مسیریابی در پروتکل RPL

پروتکل مسیریابی RPL بر مبنای ساخت یک گراف مسیریابی به نام گراف DODAG^۲ فرآیند مسیریابی را انجام می‌دهد. این گراف، بر اساس یک تابع هدف و مجموعه‌ای از معیارهای مسیریابی ساخته می‌شود. برای ساخت و به‌روزرسانی گراف DODAG مجموعه‌ای از

اینترنت اشیا بود. مسیریابی در پروتکل RPL بر اساس یک تابع هدف و معیارهای مسیریابی انجام می‌شود [۵]. برای انتقال داده‌های چندرسانه‌ای در اینترنت اشیا لازم است تابع هدف و معیارهای مسیریابی بر اساس ویژگی‌های این نوع از داده‌ها طراحی شوند. مسأله این پژوهش چگونگی طراحی و پیاده‌سازی تابع هدف و معیارهای مسیریابی RPL برای کاربرد انتقال داده‌های چندرسانه‌ای در اینترنت اشیا است.

نوآوری‌های این مقاله به شرح زیر است:

– ارائه یک روش مسیریابی جدید برای داده‌های چندرسانه‌ای در اینترنت اشیا: علی‌رغم کارهای زیادی که در حوزه بهبود پروتکل مسیریابی RPL برای داده‌های اسکالر (مانند داده‌های دریافت‌شده توسط حسگرها) انجام شده است [۶] تا [۱۴] و پژوهش‌های محدودی به بهبود پروتکل RPL برای ارسال و مسیریابی داده‌های چندرسانه‌ای (مانند ویدئوی دریافت‌شده از دوربین) در اینترنت اشیا پرداخته‌اند. در این مقاله دو معیار مسیریابی با توجه به حجم بالای داده‌های چندرسانه‌ای معرفی شده و بر اساس این معیارها یک تابع هدف جدید برای پروتکل RPL پیشنهاد شده است. این تابع هدف به افزایش طول عمر شبکه و کاهش ازدحام کمک می‌کند.

– استفاده از ترافیک چندرسانه‌ای برای ارزیابی نتایج روش پیشنهادی: با توجه به مطالعات انجام شده تاکنون در بخش ارزیابی پژوهش‌های قبلی در حوزه مسیریابی مبتنی بر RPL برای داده‌های چندرسانه‌ای در اینترنت اشیا از ترافیک واقعی چندرسانه‌ای استفاده نشده است. نمونه‌ای از ترافیک واقعی چندرسانه‌ای، داده‌های ویدئوی ارسالی از دوربین یک گره چندرسانه‌ای برای مرکز کنترل است. یک راهکار برای ارسال داده‌های مشابه ترافیک واقعی استفاده از فایل‌های اثر ویدئو^۱ است. فایل اثر ویدئو معمولاً از نوع متنی بوده و شامل خصوصیات مهم جریان ویدئوی کد شده، اطلاعات مهر زمانی و اندازه (بر حسب بایت) برای هر فریم از ویدئو است. در ارزیابی روش پیشنهادی این مقاله ترافیک داده شده به هر گره با توجه به اطلاعات مهر زمانی و اندازه هر فریم در یک فایل اثر ویدئو تولید شده است.

ادامه مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است:

در بخش ۲ پیشینه‌ای از پژوهش‌های مسیریابی مبتنی بر پروتکل RPL ارائه می‌شود، بخش ۳ به بررسی چگونگی مسیریابی توسط پروتکل RPL و تابع هدف و معیار مسیریابی پایه در این پروتکل

^۲ Destination Oriented Directed Acyclic Graph

^۱ Video Trace

جدول ۱. مقایسه روش‌های مسیریابی مبتنی بر پروتکل RPL

مرجع/سال	نام	ایده اصلی	بهبودهای حاصل شده	محدودیت‌ها	نوع	تعداد گره شبکه	شبیه‌ساز
۲۰۱۳/[۹]	AVG_DEL	پیشنهاد معیار میانگین تأخیر و بهبود ContikiMAC با تعریف دوره های کاری متفاوت برای گره‌ها	کاهش قابل توجه میانگین تأخیر بخصوص برای گره هایی که در فاصله دورتری از ریشه قرار گرفته‌اند	- افزایش سربر پیام‌های کنترلی با اضافه کردن اطلاعات دوره - بیداری گره‌ها به پیام DIO - عدم کاهش میزان تأخیر در گره هایی که در مجاورت گره ریشه قرار دارند	تک معیار	۱۹	Cooja
۲۰۱۳، ۲۰۱۴/[۱۰]، [۱۱]	RA- و EED EEDEM	سازوکار تخمین تأخیر انتها به انتها و تغییر RPL برای بهبود تخمین تأخیر انتها به انتها	- کاهش خطای تخمین تأخیر	- کاهش درصد بسته‌های تحویل شده و افزایش تأخیر - عدم توضیح دقیق نحوه محاسبه تأخیر پیوندها - عدم مقایسه نتایج با روش RPL استاندارد	تک معیار	۱۷	Cooja
۲۰۱۵/[۱۲]	Green-RPL	مسیریابی سبز برای داده‌های چندرسانه‌ای	- افزایش تعداد بسته‌های تحویل شده و کاهش تأخیر - اولین مقاله مسیریابی اینترنت اشیا چندرسانه‌ای	- عدم استفاده از ترافیک چندرسانه‌ای در ارزیابی مقاله - عدم ارائه اطلاعات کافی در رابطه با نحوه محاسبه پارامترهای شبیه‌سازی - عدم ارزیابی میزان کربن مسیر (Carbon Footprint)	ترکیبی	۲۰ و ۳۰ و ۴۰ و ۵۰	Cooja
۲۰۱۶/[۱۳]	CA-OF	کنترل ازدحام با توجه به ظرفیت بافر گره‌ها	- در نظر گرفتن ظرفیت بافر در معیار پیشنهادی برای جلوگیری از ازدحام - کاهش تعداد بسته‌های از دست رفته و مصرف انرژی	- عدم بیان نحوه محاسبه معیار ظرفیت بافر - عدم بررسی نتایج در شرایط پر ازدحام در شبکه	ترکیبی	۱۹ و ۳۵	Cooja
۲۰۱۶/[۱۴]	RER _{BDI}	پیشنهاد معیارهای انرژی باقیمانده و شاخص باطری گره برای شبکه‌های دارای محدودیت انرژی	- افزایش طول عمر شبکه	- مشخص نبودن نحوه شبیه‌سازی باطری گره‌ها - پیچیدگی فرمول ارائه شده برای محاسبه معیار شاخص باطری گره	ترکیبی	-	Cooja
۲۰۱۸/[۱۵]	CLRPL	مسیریابی آگاه از محتوا و متوازن‌کننده بار شبکه	- کاهش مصرف انرژی و نرخ اتلاف بسته - افزایش طول عمر شبکه	- در نظر نگرفتن داده‌های چندرسانه‌ای - افزایش سربر پیام‌های کنترلی DIO	ترکیبی	۵۰ گره	Cooja
۲۰۱۹/[۱۶]	RDARPL	پیشنهاد معیار ترکیبی برای کاهش تأخیر و افزایش قابلیت اطمینان در مسیریابی RPL	- کاهش میانگین تأخیر و افزایش نرخ تحویل بسته‌ها و توان عملیاتی	- افزایش سربر پیام‌های کنترلی DIO - مشخص نبودن نحوه وزن‌دهی معیارها و عدم انجام تحلیل حساسیت برای انواع وزن‌دهی	ترکیبی	۳۰ گره	Cooja
۲۰۲۰/[۱۷]	PriNergy	اولویت‌بندی و زمان‌بندی ارسال بسته‌های متنی، صوتی و ویدئو در مسیریابی RPL	- افزایش استحکام مسیریابی و جلوگیری از ازدحام - کاهش سربر شبکه، تأخیر و مصرف انرژی	- عدم استفاده از ترافیک چندرسانه‌ای در ارزیابی مقاله - عدم مقایسه روش پیشنهادی با RPL پایه	-	-	NS۲

پیام‌های کنترلی بین گره‌ها تبادل می‌شود. این پیام‌ها عبارتند از:

- پیام^۱ DIO

این پیام به سمت پایین درخت مسیریابی، چندپخشی می‌شود. یک گره برای اینکه سایر گره‌ها را از وجود خود آگاه کند، این پیام را می‌فرستد و اطلاعات خود را با استفاده از آن منتشر می‌کند و همچنین به گره‌های دیگر اعلان می‌کند تا در صورت تمایل به آن ملحق شوند.

- پیام^۲ DIS

این پیام برای درخواست اطلاعات گراف از گره‌های همسایه استفاده می‌شود. زمانی که یک گره هیچ اعلانی را دریافت نکرده باشد و بخواهد به DODAG متصل شود، این پیام را ارسال می‌کند تا دریابد که آیا DODAG موجود است یا خیر.

- پیام^۳ DAO

این پیام درخواستی است که از سمت گره فرزند برای والد یا گره ریشه ارسال می‌شود. این پیام درخواست فرزند برای ملحق شدن به DODAG است.

- پیام DAO-ACK

این پیام یک پاسخ است که توسط والد یا ریشه برای فرزند ارسال می‌شود که این پاسخ می‌تواند بله یا خیر باشد [۵] و [۱۸].

۳-۱ ساخت گراف مسیریابی DODAG

برای ساخت گراف DODAG ابتدا گره‌ها با استفاده از پیام DIS اعلان می‌کنند که به دنبال گره‌ای برای اتصال به گراف مسیریابی می‌گردند، در همین زمان گره ریشه، شناسه و رتبه خود را با استفاده از پیام DIO اعلان می‌کند. رتبه هر گره نشان‌دهنده مختصات آن گره در سلسله مراتب گراف است. گره‌هایی که در همسایگی گره ریشه قرار دارند، پیام DIO را دریافت کرده و پردازش می‌کنند و بر اساس قوانین مشخصی (با توجه به تابع هدف و هزینه مسیر اعلان شده) تصمیم می‌گیرند که به گراف متصل شوند یا خیر. زمانی که اولین گره به گراف متصل می‌شود، ریشه گراف به عنوان «والد» آن گره قرار داده می‌شود. گره، رتبه خود در گراف را محاسبه می‌کند. اگر گره به عنوان یک مسیریاب پیکربندی شده باشد، اطلاعات گراف را از طریق پیام DIO به گره‌های همسایه‌اش می‌فرستد. اگر گره یک گره برگ باشد، به‌سادگی به گراف متصل می‌شود و پیام DIO

نمی‌فرستد. گره‌های همسایه این فرآیند را تکرار می‌کنند و با استفاده از پیام DIO فرآیند انتخاب والد، اضافه کردن مسیر و اعلان اطلاعات گراف را انجام می‌دهند. تکرار این فرآیند موجب ساخت یال‌های گراف از ریشه به سمت گره‌های برگ می‌شود. هر گره بعد از انتخاب والد، با استفاده از ارسال یک پیام DAO به گره والد خود، درخواست ملحق شدن به گراف را اعلام می‌کند. در صورتی که درخواست گره مورد پذیرش قرار بگیرد، گره والد یک پیام DAO-ACK برای آن گره ارسال می‌نماید.

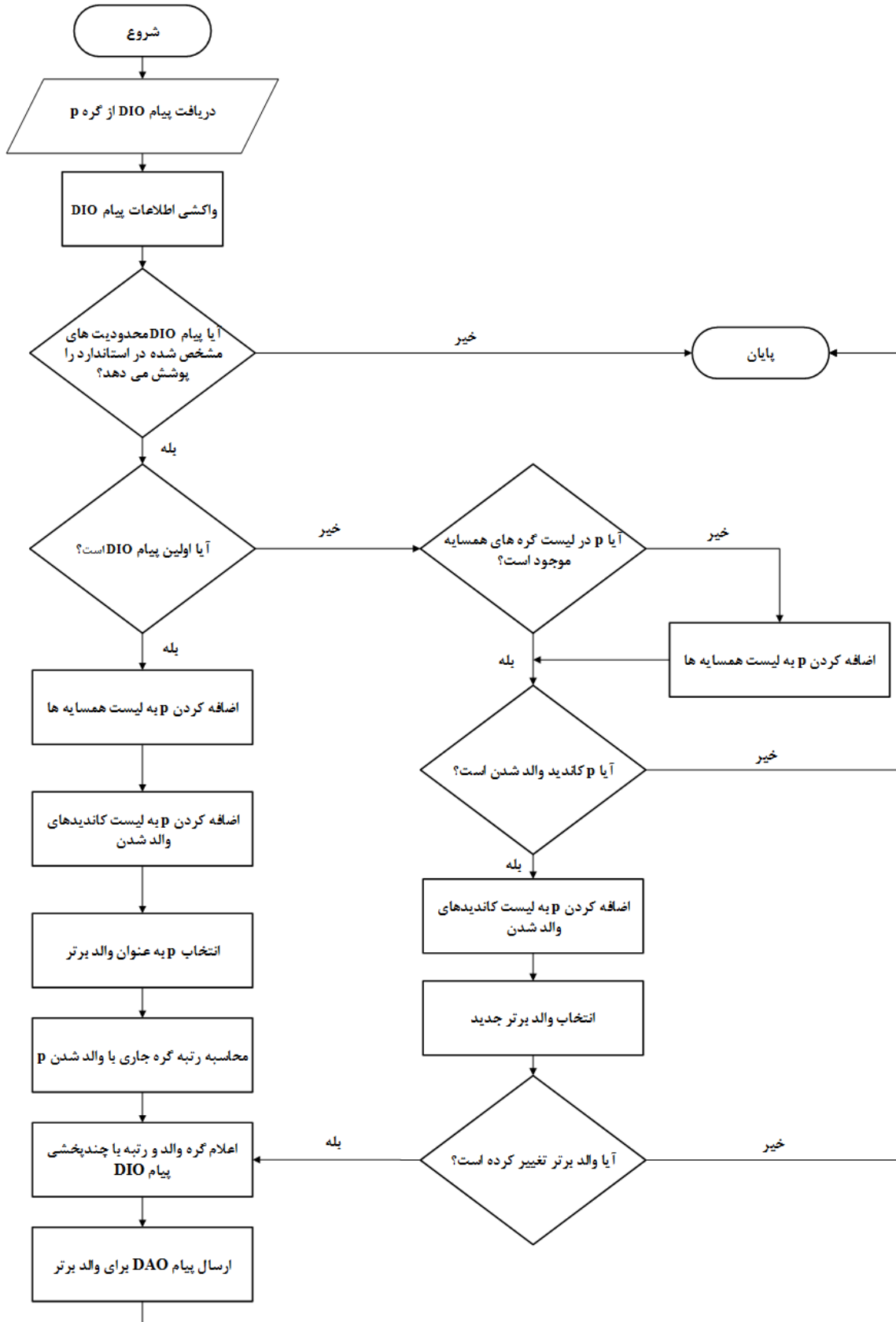
پس از ساخت گراف DODAG به صورت دوره‌ای فرآیند محاسبه رتبه گره‌ها انجام می‌شود و در صورت نیاز والد گره‌ها تغییر داده می‌شود و ساختار گراف به‌روزرسانی می‌گردد. روندنمای نحوه انتخاب والد برای گره‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. گره‌ها وجود خود و یا تغییر رتبه خود را از طریق پیام‌های DIO به گره‌های همسایه اعلام می‌کنند. زمانی که یک گره یک پیام DIO از گره p دریافت می‌کند، ابتدا پیام را پردازش کرده و اطلاعات گره p را واکنشی می‌کند. از آنجایی که پیام DIO به صورت چندپخشی و فقط برای گره‌های همسایه ارسال می‌شود، گره p همسایه گره جاری است، لذا گره بررسی می‌کند که آیا p در جدول گره‌های همسایه‌اش وجود دارد یا خیر. در صورتی که گره p در لیست همسایگان گره جاری موجود نباشد به این لیست اضافه می‌شود.

در تشکیل گراف DODAG زمانی که یک گره اولین پیغام DIO را دریافت می‌کند، گره ارسال‌کننده پیام DIO را به عنوان والد خود انتخاب می‌کند و در طول زمان با دریافت پیام‌های DIO از سایر گره‌ها در صورت پیدا کردن گره‌ای با رتبه بهتر، والد خود را تغییر می‌دهد. برای جلوگیری از ایجاد حلقه در گراف DODAG، فقط گره‌های همسایه‌ای که رتبه کمتری از گره جاری داشته باشند می‌توانند کاندید والد شدن برای آن گره باشند. بنابراین زمانی که گره از گره p پیام DIO دریافت می‌کند در صورتی که رتبه گره p از رتبه فعلی خودش کم‌تر باشد، گره p را در فهرست گره‌های کاندید والد شدن قرار می‌دهد. سپس بین گره‌های موجود در فهرست کاندیدها، گره‌ای که بهترین رتبه را داشته باشد به عنوان والد برتر انتخاب می‌شود. زمانی که والد یک گره تغییر کند به تناسب تغییر رتبه والد، رتبه گره جاری نیز تغییر می‌کند و گره این تغییرات را از طریق ارسال پیام DIO به گره‌های همسایه خود (شامل گره‌های فرزند، گره‌های هم‌سطح و گره‌های کاندید والد شدن) اعلان می‌کند [۵].

^۳ Destination Advertisement Object

^۱ DODAG Information Object

^۲ DODAG Information Solicitation



شکل ۱. روندنمای نحوه انتخاب والد یک گره در گراف مسیریابی DODAG

۳-۲ تابع هدف MRHOF^۱

تابع هدف، چگونگی انتخاب مسیرها توسط پروتکل RPL را مشخص می‌کند. برای مثال، اگر RPL از تابع هدفی استفاده کند که تعداد گام را کمینه کند، RPL مسیریابی را انتخاب خواهد کرد که کمترین تعداد گام را داشته باشند.

گره‌هایی که از پروتکل RPL برای مسیریابی استفاده می‌کنند، از مجموعه‌ای از معیارها برای انتخاب مسیر استفاده می‌کنند. این معیارها توسط پیام‌های DIO به گره‌های همسایه اعلان می‌شوند. یک تابع هدف از این معیارها برای انتخاب بهترین مسیر استفاده می‌کند.

پروتکل RPL از یک مقدار به نام رتبه برای ارزش‌دهی مسیرها استفاده می‌کند. رتبه، به طور کلی، بیان‌گر فاصله گره از ریشه از طریق مسیر انتخابی است. به عبارت دیگر، رتبه نشان‌دهنده مختصات گره در سلسله مراتب گراف است. در پروتکل RPL چگونگی تصمیم‌گیری گره‌ها برای انتخاب مسیر بر اساس رتبه انجام می‌شود. تابع هدف روش محاسبه رتبه گره‌ها را مشخص می‌کند. محاسبه رتبه یک گره می‌تواند بر اساس والد‌های کاندید، معیارها و مشخصات شبکه انجام شود.

یکی از توابع هدف پیشنهاد شده در IETF RFC ۶۷۱۹ برای RPL تابع هدف MRHOF است. این تابع هدف مسیریابی با کم‌ترین هزینه را پیدا می‌کند و در عین حال از ایجاد اختلال و آشفستگی در شبکه نیز جلوگیری می‌کند. به این منظور از دو سازوکار استفاده می‌کند: اول اینکه مسیر با کم‌ترین هزینه (رتبه) را پیدا می‌کند. دوم اینکه فقط در صورتی به مسیر با کم‌ترین هزینه تغییر مسیر می‌دهد که آن مسیر با در نظر گرفتن یک مقدار آستانه، کوتاه‌تر (از لحاظ هزینه مسیر) از مسیر جاری باشد. به مقدار آستانه در نظر گرفته شده، پسماند^۲ گفته می‌شود [۱۹].

۳-۳ معیار مسیریابی ETX^۳

تابع هدف MRHOF در RPL استاندارد از یک معیار افزایشده به نام معیار مسیریابی ETX (تعداد ارسال مورد انتظار) استفاده می‌کند. معیار ETX یک پیوند برابر با تعداد انتقال داده موردنیاز برای ارسال یک بسته بر روی آن پیوند است. مقدار ETX یک مسیر از جمع ETX‌های پیوندهای آن مسیر به دست می‌آید. برای مثال، ETX یک مسیر دارای سه گام با پیوندهای سالم و بی‌عیب برابر با ۳ و

ETX یک مسیر دارای یک گام با نرخ تحویل ۵۰٪ برابر با ۲ است. مقدار ETX یک پیوند با استفاده از نرخ تحویل روانه‌سازی^۴ و نرخ تحویل معکوس پیوند محاسبه می‌شود. نرخ تحویل روانه‌سازی یا df، احتمال رسیدن موفقیت‌آمیز یک بسته به گیرنده است. نرخ تحویل معکوس یا dr، احتمال دریافت موفقیت‌آمیز بسته ACK می‌باشد. احتمال ارسال موفق و دریافت تأییدیه دریافت یک بسته برابر با حاصلضرب دو پارامتر df و dr است. معیار ETX بر اساس معادله (۱) محاسبه می‌گردد:

$$ETX = \frac{1}{d_f \times d_r} \quad (1)$$

با توجه به فرمول (۱) می‌توان گفت معیار ETX عکس پارامتر نرخ دریافت بسته است. برای تخمین پارامترهای df و dr در شبکه، از بسته‌های ردیاب استفاده می‌شود. به این ترتیب که در دوره‌های زمانی مشخص بسته‌های ردیاب بر روی پیوندها ارسال می‌شود و نرخ ارسال‌ها و ارسال‌های مجدد اندازه‌گیری می‌شود و بر اساس اطلاعات به دست آمده این دو پارامتر محاسبه می‌گردد. هرچه پیوندها قوی‌تر باشند و نرخ ارسال بسته بهتری داشته باشند، مقدار ETX به عدد یک نزدیک‌تر می‌شود. هر چه مقدار ETX یک پیوند بزرگ‌تر باشد، آن پیوند ضعیف‌تر بوده و احتمال از دست دادن بسته در آن بیشتر است. استفاده از معیار ETX در مسیریابی باعث انتخاب مسیریابی با گذردهی بهتر می‌شود [۲۰].

۴ روش پیشنهادی

داده‌های چندرسانه‌ای دارای ویژگی‌های خاصی از جمله حجم بالا، نیاز به منابع پردازشگر قدرتمند و پهنای باند کافی برای انتقال هستند. بر اساس مطالعات صورت گرفته، امکان انتقال این داده‌ها در بستر اینترنت اشیا دارای محدودیت نیز وجود دارد [۲۱] و [۲۲]. به این منظور، لازم است پروتکل‌های اینترنت اشیا دارای محدودیت، مطابق ویژگی‌ها و نیازهای داده‌های چندرسانه‌ای تغییر داده شوند. یکی از مسائل مهم در انتقال داده‌های چندرسانه‌ای در اینترنت اشیا روش مسیریابی است. هدف ما در این پژوهش بهبود پروتکل مسیریابی RPL با توجه به ویژگی‌ها و چالش‌های داده‌های چندرسانه‌ای بخصوص ویژگی حجم بالای داده است. محدودیت انرژی و امکان ایجاد ازدحام در شبکه دو چالش مسیریابی داده‌های چندرسانه‌ای هستند. در روش پیشنهادی، دو معیار مسیریابی به نام‌های RE^۵ و BC^۶ برای مواجهه با این چالش‌ها طراحی شده

^۴ Forwarding

^۵ Remaining Energy

^۶ Buffer Capacity

^۱ Minimum Rank with Hysteresis Object Function

^۲ Hysteresis

^۳ Expected Transmission Count

مصرف انرژی گره تاکنون را نشان می‌دهد. $E_{consumption}$ را می‌توان بر اساس تعداد ارسال و دریافت بسته‌ها توسط گره محاسبه کرد.

در ادامه نحوه عملکرد معیار RE در یک شبکه نمونه را بررسی کرده و با حالتی که مسیریابی بر اساس انرژی باقیمانده گره انجام نشود، مقایسه می‌کنیم. فرض کنید شبکه‌ای مانند شبکه شکل ۲-الف ارائه شده است. در این شکل گره S گره فرستنده و گره R گره گیرنده است. گره S برای ارسال اطلاعات باید یکی از گره‌های A یا B را به عنوان والد برتر خود انتخاب کند. انرژی اولیه گره‌های A و B، ۱۰۰ واحد است و پیوندهای میان گره‌ها از نظر کیفیت یکسان هستند. فرض می‌کنیم گره S می‌خواهد یک فایل ویدئو را برای گره R بفرستد که برای روانه‌سازی داده‌های این فایل ۶۰ واحد انرژی مصرف می‌شود. در صورتی که گره‌ها برای مسیریابی از معیاری استفاده کنند که انرژی باقیمانده گره‌ها را در نظر نمی‌گیرد، در ابتدا گره S می‌تواند هر یک از گره‌های A یا B را انتخاب کند. فرض می‌کنیم که این گره، گره B را انتخاب می‌کند و فریم‌های ویدئو را از طریق آن برای گره R ارسال می‌کند. در پایان ارسال داده، گره B، ۶۰ واحد انرژی مصرف کرده و ۴۰ واحد از انرژی آن باقی می‌ماند، در حالی که گره A، ۱۰۰ واحد انرژی دارد (شکل ۲-ب). در حالت انتخاب معیار RE با توجه به اینکه انرژی اولیه دو گره A و B یکسان است، در ابتدا معیار RE برای هر دو گره برابر با مقدار ۱ است پس گره S به صورت تصادفی یکی از آن‌ها به عنوان والد انتخاب می‌کند (مثلاً گره A)، پس از ارسال بخشی از فایل توسط این گره با توجه به رابطه (۲) با کم شدن مقدار انرژی باقیمانده مقدار معیار RE برای گره A بیشتر از مقدار RE گره B می‌شود، در این حالت گره S والد خود را تغییر می‌دهد و این فرآیند به همین ترتیب ادامه می‌یابد. به این ترتیب بار ارسالی میان دو گره A و B تقسیم می‌شود و پس از ارسال ویدئو هر یک از آن‌ها تقریباً به مقدار مساوی (مثلاً هر کدام ۳۰ واحد) انرژی مصرف می‌کنند (شکل ۲-ج). به این ترتیب طول عمر گره‌های شبکه افزایش می‌یابد.

۴-۲ معیار BC

یکی از کاربردهای شبکه اینترنت اشیا چندرسانه‌ای، پایش و نظارت محیطی است. در این حالت با وقوع یک اتفاق غیرمعمول (مثلاً عبور فردی از مرز کشور، دزدیدن و فرار یک مجرم و ...) باید به سرعت ویدئوی اتفاق رخ داده، ارسال شود. از یک طرف حجم بالای داده‌های چندرسانه‌ای و الگوی ترافیکی خاص این داده‌ها و از طرف دیگر محدودیت‌های گره‌های شبکه اینترنت اشیا چندرسانه‌ای، می‌تواند باعث رخ دادن ازدحام در شبکه شود. زمانی ازدحام در یک گره ایجاد

است، سپس نحوه ترکیب این معیارها و تابع هدف مورد استفاده برای مسیریابی معرفی شده است.

۴-۱ معیار RE

در اینترنت اشیا دستگاه‌هایی با محدودیت انرژی وجود دارند. پردازش و ارتباطات مهم‌ترین عوامل مصرف انرژی در گره‌های شبکه هستند که می‌توان گفت عمده مصرف انرژی گره‌ها مربوط به ارسال و دریافت داده‌ها است. برای حفظ انرژی گره‌های شبکه، معمولاً از سازوکار تعریف دوره کاری برای گره‌ها استفاده می‌شود. به عبارتی گره‌ها به طور معمول رادیوی خود را خاموش می‌کنند و در دوره‌های زمانی مشخص برای ارسال و دریافت اطلاعات رادیوی خود را روشن می‌کنند. این گونه روش‌ها برای سناریوهای ارسال و دریافت داده‌های اسکالر که با فواصل زمانی از محیط دریافت می‌شوند مناسب است، اما در کاربردهای ارسال و دریافت داده‌های چندرسانه‌ای، با توجه به حجیم بودن داده‌های چندرسانه‌ای لازم است گره‌های شبکه به طور مداوم داده‌ها را ارسال کنند و امکان خاموش کردن رادیوی گره بین ارسال داده‌ها وجود ندارد [۱۲]. در این کاربردها، با توجه به طولانی‌تر بودن زمان روشن ماندن رادیوی گره، مصرف انرژی گره‌ها بسیار بالاتر از کاربردهای ارسال داده‌های اسکالر است. بنابراین، توجه به مصرف انرژی در گره‌های چندرسانه‌ای اهمیت دوچندان دارد.

برای افزایش طول عمر شبکه چندرسانه‌ای می‌توان انرژی باقیمانده گره‌ها را به عنوان معیاری در مسیریابی در نظر گرفت. به این منظور معیار RE را مطابق (۲) تعریف می‌کنیم [۲۳]:

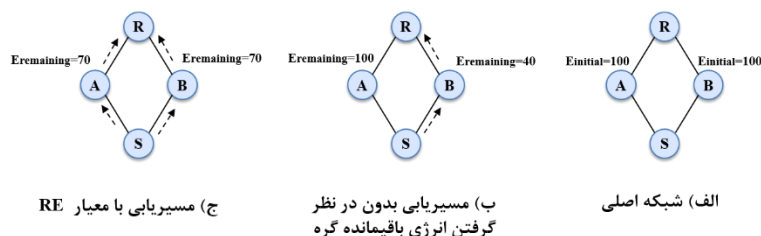
$$RE = \frac{E_{initial}}{E_{remaining}} \quad (2)$$

در معادله (۲) معیار انرژی باقیمانده، $E_{initial}$ مقدار انرژی اولیه گره و $E_{remaining}$ انرژی باقیمانده گره را نشان می‌دهند. در صورتی که گره تاکنون انرژی مصرف نکرده باشد مقدار این معیار برابر با یک خواهد بود و با کاهش مقدار انرژی باقیمانده گره مقدار این معیار افزایش خواهد یافت. برای جلوگیری از صفر شدن مخرج کسر در زمان اتمام انرژی یک گره، در این حالت مقدار $E_{remaining}$ را به جای صفر برابر با یک در نظر می‌گیریم. در مسیریابی، گره برای گره‌های همسایه خود که کاندید والد شدن هستند، مقدار این معیار را محاسبه می‌کند. گره‌ای که کم‌ترین میزان RE را داشته باشد گزینه مناسب‌تری بر روانه‌سازی اطلاعات است.

برای محاسبه $E_{remaining}$ از فرمول (۳) استفاده می‌کنیم:

$$E_{remaining} = E_{initial} - E_{consumption} \quad (3)$$

در معادله (۳) $E_{initial}$ مقدار انرژی اولیه گره و $E_{consumption}$ مقدار



شکل ۲. بررسی نحوه عملکرد معیار RE در یک شبکه نمونه [۲۳]

برای مشخص شدن نحوه عملکرد معیار BC، مثالی در شکل ۳ نشان داده شده است. در شکل ۳-الف، یک شبکه نمونه ارائه شده است. در این شبکه گره S گره فرستنده و گره R گره گیرنده است. گره S برای ارسال اطلاعات باید یکی از گره‌های A یا B را انتخاب کند. گره‌های A و B با فری به ظرفیت ۸ بسته دارند. پیوندهای میان گره‌ها از نظر کیفیت یکسان هستند. در صورتی که گره‌ها برای مسیریابی از معیاری استفاده کنند که ظرفیت باقیمانده بافر گره را در نظر نمی‌گیرد، گره S می‌تواند هر یک از گره‌های A یا B را انتخاب کند. فرض می‌کنیم که این گره، گره B را انتخاب می‌کند و فریم‌های ویدئو را از طریق آن برای گره R ارسال می‌کند. در این حالت بدون توجه به تعداد جای خالی در بافر گره B، بسته‌ها همواره برای آن ارسال می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۳-ب نشان داده شده است، این روش ارسال باعث می‌شود که بسته‌ها در بافر گره B منتظر بمانند درحالی‌که بافر گره A کاملاً خالی است. پس از مدتی با توجه به نرخ بالای شبکه ظرفیت بافر گره B پر می‌شود و بسته‌ها دور ریخته می‌شوند. با انتخاب معیار BC، همواره ظرفیت باقیمانده بافر گره‌های A و B مورد توجه قرار می‌گیرد و بسته‌ها بین دو گره تقسیم می‌شوند (شکل ۳-ج)، در نتیجه احتمال سرریز بافر و ایجاد ازدحام کاهش می‌یابد.

۴-۳ تابع هدف

هر گره در شبکه بعد از دریافت پیام DIO از یکی از گره‌های همسایه، هزینه مسیر بین خود و گره ریشه که از آن گره همسایه بگذرد را محاسبه می‌کند. اگر هزینه مسیر جدید کمتر از آخرین مسیر انتخاب شده باشد، آن گره همسایه را به عنوان والد برتر خود انتخاب کرده و برای انتقال بسته‌ها به مقصد از مسیر گذرنده از آن گره، استفاده می‌کند. تابع هدف، تابعی است که مناسب‌ترین مسیر با توجه به معیارهای انتخاب شده را پیدا می‌کند. در ادامه تابع هدفی که بر مبنای تابع هدف MRHOF برای کاربرد اینترنت اشیا چندرسانه‌ای دارای محدودیت طراحی شده است، معرفی می‌شود.

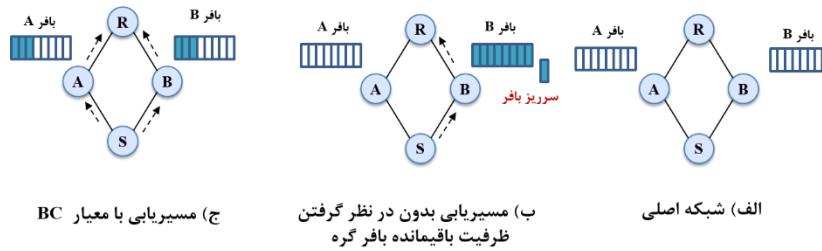
می‌شود که مجموع نرخ داده ورودی به گره بیش از نرخ خروجی آن گره باشد [۲۴].

هر یک از گره‌های مسیریاب در شبکه اینترنت اشیا صفی برای دریافت و ارسال داده دارد که این صف را بافر می‌نامیم. زمانی که بسته‌ای برای گره مسیریاب ارسال می‌شود، در بافر گره قرار می‌گیرد. در صورتی که از قبل داده‌ای در بافر موجود نباشد، داده دریافتی به سمت مقصد روانه‌سازی می‌شود و در غیراینصورت بسته در بافر منتظر می‌ماند تا بسته‌های قبلی ارسال شوند. یکی از عوامل ایجاد ازدحام در شبکه، سرریز بافر است. اگر نرخ ورود بسته‌ها به گره بیش از نرخ ارسال و خالی شدن بافر باشد، پس از مدتی بافر گره پر می‌شود و در این حالت بسته‌های جدید که به گره ارسال می‌شوند با توجه به پر بودن بافر دور ریخته می‌شوند.

یکی از راه‌های اجتناب از ازدحام و سرریز بافر در نظر گرفتن ظرفیت بافر به عنوان معیار مسیریابی است. به این منظور معیار BC مطابق رابطه (۴) تعریف شده است.

$$BC = \frac{B_{size}}{B_{empty}} \quad (4)$$

در رابطه (۴) معیار ظرفیت بافر، Bsize اندازه بافر گره و Bempty میزان ظرفیت خالی بافر را نشان می‌دهند. در صورتی که بسته‌ای در بافر گره وجود نداشته باشد، مقدار Bempty برابر با Bsize شده و مقدار معیار برابر با یک می‌گردد. با افزایش تعداد بسته‌های در حال انتظار در بافر گره، مقدار معیار BC بزرگ‌تر می‌شود. در زمانی که بافر گره کاملاً پر شده باشد، BC بیشترین مقدار خود را خواهد داشت. در این حالت برای جلوگیری از صفر شدن مخرج کسر مقدار Bempty به جای صفر، یک در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که معیار BC به عنوان معیار مسیریابی انتخاب شود، گره فرستنده برای گره‌های همسایه خود که کاندید والد شدن هستند، مقدار معیار BC را محاسبه می‌کند. گره‌ای که کمترین میزان BC را داشته باشد به عنوان والد برتر و گزینه مناسب برای روانه‌سازی اطلاعات انتخاب می‌شود.



شکل ۳. بررسی نحوه عملکرد معیار BC در یک شبکه نمونه

مطابق (۶) محاسبه می‌کند. به عبارتی تابع هدف $OF(RE, BC)$ هزینه مسیر بین S و R را با تمام گره‌های همسایه کاندید والد شدن، محاسبه کرده و کم‌هزینه‌ترین مسیر را انتخاب می‌کند.

رابطه (۶) نحوه محاسبه هزینه مسیر گذرنده از گره همسایه p را نشان می‌دهد.

$$Cost_{spr}(p) = \sum_{k \in spr} (w_1 RE_k + w_2 BC_k) \quad (6)$$

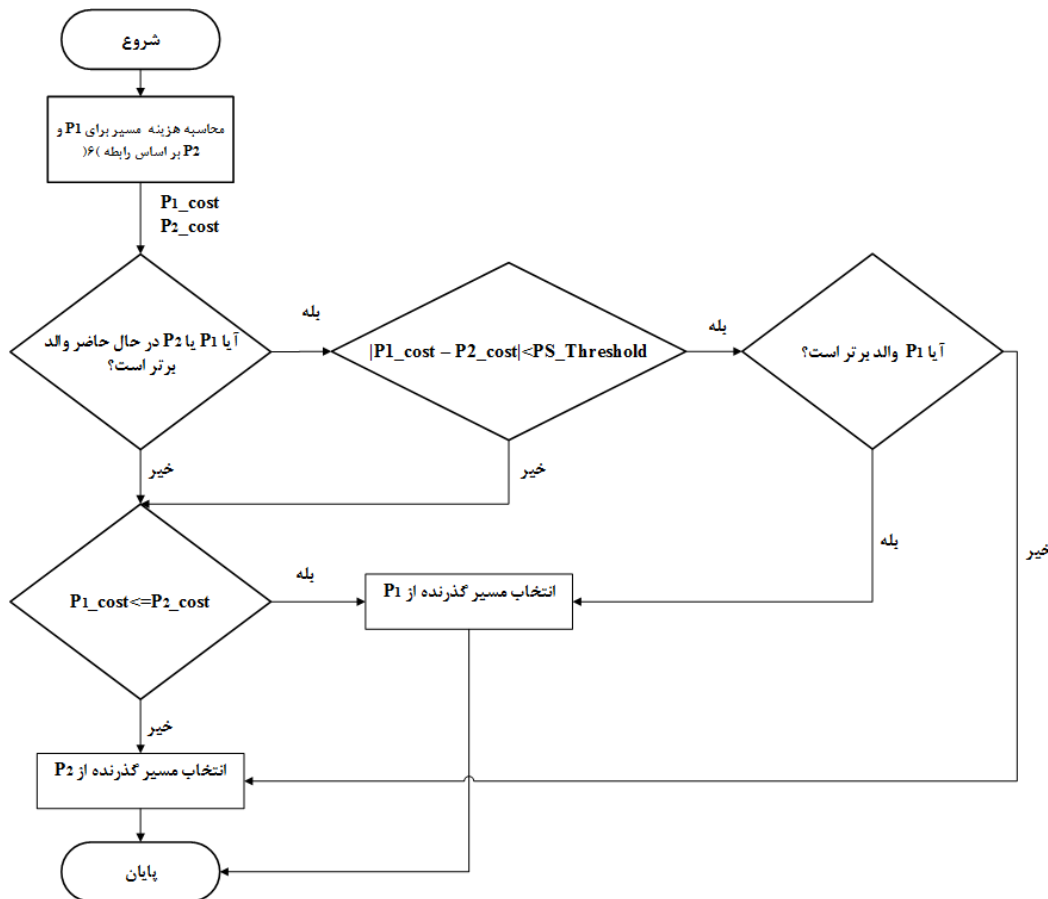
, where $(0 \leq w_1, w_2 \leq 1)$ and $(w_1 + w_2 = 1)$

در این رابطه معرف مسیری از مبدأ S به مقصد R است که از گره p می‌گذرد. به ازاء هر گره k در این مسیر، جمع وزن دار RE و BC آن گره در نظر گرفته می‌شود.

همان‌طور که در بخش‌های ۲-۴ و ۳-۴ بررسی شد، دو معیار انرژی باقیمانده گره‌ها (RE) و ظرفیت بافر (BC) معیارهایی هستند که با توجه به نیازهای شبکه اینترنت اشیاء چندرسانه‌ای طراحی شده‌اند و می‌توانند به بهبود کارایی شبکه اینترنت اشیاء برای مسیریابی داده‌های چندرسانه‌ای کمک کنند. به این منظور لازم است تابع هدفی طراحی کنیم که از ترکیب این دو معیار برای انتخاب مسیر مناسب استفاده کند. برای انتخاب مسیر مناسب بین گره مبدأ و گره مقصد، تابع هدفی مطابق رابطه (۵) تعریف می‌کنیم.

$$OF(RE, BC) = \min\{Cost_{spr}(p)\}, \forall p \in N_s \quad (5)$$

در رابطه (۵) N_s مجموعه گره‌های همسایه گره مبدأ S که کاندید والد شدن برای گره S هستند را نشان می‌دهد و $Cost_{spr}(p)$ تابعی است که هزینه مسیر بین مبدأ S و مقصد R که از p می‌گذرد، را



شکل ۴. روندنمای مسیریابی با استفاده از تابع هدف پیشنهادی برای دو کاندید P_1 و P_2

از گره‌های اینترنت اشیا موجود در دنیای واقعی تعریف شده است که این گره‌ها همگی از منابع بسیار محدودی برخوردارند برای مثال sky mote دارای ۱۰K RAM و ۴۸K Flash است، این گره‌ها برای ارسال داده‌هایی مانند داده‌های حسگرها (مثلاً دما) مناسب هستند و برای ارسال داده‌های ویدئو که حجیم‌تر بوده و الگوی متفاوتی دارند نامناسبند، در حالی که در دنیای واقعی گره‌های اینترنت اشیا که منابع کافی برای ارسال داده‌های ویدئو را نیز فراهم می‌کنند، وجود دارند. از آنجایی که در مقالات پیشین از ترافیک ویدئو استفاده نشده و ارزیابی همه آنها با داده‌های اسکالر صورت گرفته است، اغلب از sky mote استفاده کرده‌اند. در Cooja نوعی گره مجازی با نام Cooja mote وجود دارد که منابع آن محدود نیست و در ارزیابی این پژوهش برای ارسال ترافیک چندرسانه‌ای با الگوی فایل اثر ویدئو از این نوع گره استفاده شد، اما با توجه به اینکه Cooja mote در نسخه‌های جدیدتر به این امولاتور اضافه شده و هنوز بلوغ کافی نیافته است، مشکلاتی را در فرآیند شبیه‌سازی ایجاد نمود. برای مثال افزایش تعداد این نوع گره منجر به از کار افتادن شبیه‌ساز می‌شد، لذا در این پژوهش شبیه‌سازی با ۱۳ گره انجام شد.

یکی از سناریوهای کاربردی محتمل برای روش پیشنهادی، استفاده از آن در نظارت از راه دور بر سیستم‌های زیست‌محیطی است. برای مثال در یک منطقه حفاظت شده می‌خواهیم در صورت خروج یکی از گونه‌های حفاظت‌شده از محدوده، به مرکز کنترل اطلاع‌رسانی شود. به این منظور در اطراف محدوده حفاظت‌شده گره‌های اینترنت اشیا که به دوربین مجهز شده‌اند قرار می‌گیرند و در صورت خروج حیوانات، ویدئوی کوتاهی را برای مرکز کنترل ارسال می‌کنند. با توجه به فاصله بین مرکز کنترل و گره‌های مجهز به دوربین، لازم است گره‌هایی برای مسیریابی داده‌های ویدئو در نظر گرفته شوند. این گره‌ها داده‌های چندرسانه‌ای را به گره مسیریاب مرزی انتقال می‌دهند و گره مسیریاب مرزی این داده‌ها را بر روی اینترنت منتشر می‌کند. در مرکز کنترل با اتصال به اینترنت می‌توان از وضعیت محدوده حفاظت‌شده مطلع شد. برای شبیه‌سازی این سناریو، توپولوژی بر مبنای نمونه‌های مشابه تنظیم شده است [۹] تا [۱۱] و شبکه‌ای شامل ۱۳ گره که به صورت گرید به هم متصل شده‌اند مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۵).

در شکل ۵ گره ۱ گره گیرنده (چاهک) است که می‌تواند مسیریاب مرزی باشد. گره‌های ۲ تا ۹ گره‌های مسیریاب و گره‌های ۱۰ تا ۱۳ گره‌های فرستنده ویدئو هستند.

مقادیر RE_k و BC_k بر اساس رابطه‌های (۲) و (۴) برای گره k محاسبه شده و پیش از اینکه در رابطه (۶) استفاده شوند نرمال‌سازی می‌گردند. w_1 و w_2 وزن تأثیر معیارهای RE و BC گره‌های مسیر هستند که در حالت پیش‌فرض برابر با ۰.۵ در نظر گرفته شده‌اند تا هر دو معیار تأثیر یکسانی در رابطه داشته باشند.

استفاده از تابع هدف (۵) باعث می‌شود که همواره برای هر گره، والدی انتخاب شود که مسیر گذرنده از آن کم‌هزینه‌ترین مسیر باشد. یکی از مسائلی که این تابع هدف ایجاد می‌کند، امکان تغییر مسیر مکرر و تغییر سریع والدها است که این مسأله می‌تواند موجب ایجاد اختلال در شکل‌گیری توپولوژی شبکه شود. راهکاری که در تابع هدف MRHOF برای این مسأله ارائه شده است، تعریف یک مقدار آستانه برای جابجایی بین مسیرها و تغییر والد است [۱۷]. بنابراین، در روش پیشنهادی یک مقدار آستانه به نام $PS_Threshold$ تعریف کرده و در صورتی که اختلاف هزینه مسیر جدید از هزینه مسیر قبلی بیشتر این مقدار باشد، مسیر جدید را به عنوان مسیر بهتر انتخاب می‌کنیم. نحوه انتخاب مسیر و تغییر والد در روش پیشنهادی در روندنمای شکل ۴ نشان داده شده است.

۵ شبیه‌سازی

روش پیشنهادی در سیستم عامل ۳،۱ Contiki [۲۵] پیاده‌سازی شده و توسط امولاتور Cooja ارزیابی شده و نتایج با ContikiRPL مقایسه شده است.

به منظور شبیه‌سازی سیستمی که راهکار پیشنهادی توسط آن آزمون شود، لازم است گره فرستنده ترافیکی از نوع ویدئو را برای گره گیرنده از طریق گره‌های مسیریاب ارسال کند. از آنجایی که در امولاتور Cooja راهکاری برای ارسال ترافیک ویدئو در نظر گرفته نشده است، یکی از چالش‌های این پژوهش پیاده‌سازی راهکار مناسب برای شبیه‌سازی ترافیک ویدئو بوده است. به این منظور برای شبیه‌سازی ترافیک ویدئو از فایل‌های اثر ویدئو استفاده شده است. فایل اثر ویدئو، یک فایل متنی است که معمولاً از دو بخش سرآیند و بخش جدول اثر ویدئو تشکیل شده است. بخش سرآیند، اطلاعات کلی شامل مواردی همچون عنوان ویدئو، میزان تفکیک‌پذیری، تعداد فریم، نوع کدگذاری ویدئو و الگوی GoP^1 در رابطه با فایل ویدئو ارائه می‌دهد. در هر سطر از بخش جدول ویدئو، اطلاعات یک فریم شامل شماره فریم، زمان فریم، نوع فریم، اندازه فریم (بر حسب بایت) و خصوصیات کیفی دیگر ارائه می‌شود.

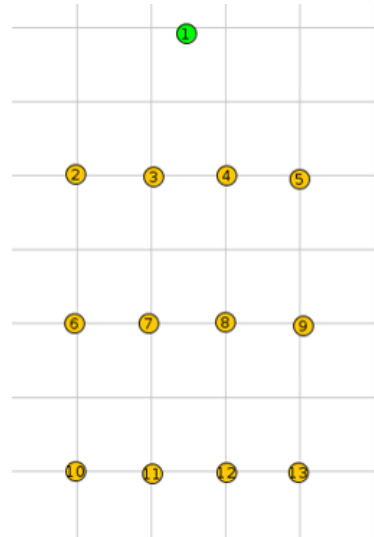
یکی دیگر از چالش‌های این پژوهش این مسئله بوده است که در امولاتور Cooja چند نوع گره شامل sky mote، wisemote و z_1

^۱ Group of Picture

نمودارها بر اساس میانگین نتایج ترسیم شده‌اند.

جدول ۳. پارامترهای شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
سیستم‌عامل	Contiki ۳,۱
شبیه‌ساز	Cooja
نوع گره	CoojaMote
انرژی اولیه گره مسیریاب	۲۵۰ واحد
اندازه بافر گره	۱۶ بسته
اندازه بسته	۶۴ بایت
نرخ Tx	٪۱۰۰
نرخ Rx	٪۱۰۰
محدوده انتقال	۵۰ متر
محدوده تداخل	۱۰۰ متر



شکل ۵. شبکه شبیه‌سازی شده برای ارزیابی روش پیشنهادی

گره‌های فرستنده داده‌ها را با استفاده از پروتکل UDP ارسال می‌کنند. مسیریابی بر اساس پروتکل RPL (با تابع هدف و معیارهای پایه و تابع هدف و معیارهای پی‌شده) انجام می‌شود. در لایه MAC از پروتکل CSMA^۱ و در لایه فیزیکی از پروتکل IEEE ۸۰۲,۱۵,۴ استفاده شده است. پشته پروتکلی مورد استفاده در شبیه‌سازی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. پروتکل‌های ارتباطی مورد استفاده در شبیه‌سازی

پروتکل شبکه	لایه
UDP	لایه انتقال
uIPv۶, RPL	لایه شبکه
LoWPAN	لایه تطبیق‌دهنده
CSMA (MAC Layer)	لایه پیوند
NullRDC (RDC Layer)	
IEEE ۸۰۲,۱۵,۴	لایه فیزیکی

ترافیک ویدئو در گره‌های فرستنده بر اساس فایل اثر ویدئوی Sony (Demo) [۲۶] ایجاد شده که مشخصات این فایل در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. مشخصات فایل اثر ویدئوی استفاده شده در شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
نام فایل اثر ویدئو	Sony
استاندارد کدگذاری	H.۲۶۴
تفکیک‌پذیری	۳۵۲X۲۸۸ (CIF)
نرخ فریم	۳۰
طول GoP	۱۶
الگوی GoP	G۱۶B۳

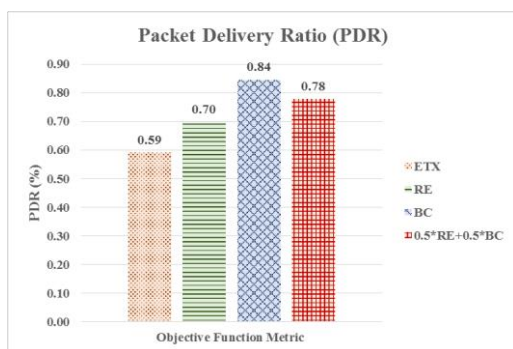
با توجه به [۲۱] و [۲۲] استاندارد کدگذاری ویدئو H.۲۶۴ برای کاربردهای اینترنت اشیا مناسب است. بنابراین در این پژوهش، ترافیک ورودی بر اساس الگوی فایل اثر ویدئو از نوع H.۲۶۴ ایجاد شده است. نحوه شبیه‌سازی سامانه ارزیابی به این ترتیب است که گره فرستنده در فاصله‌های زمانی مشخص کارهای زیر را انجام می‌دهد:

در شبیه‌سازی از گره‌های نوع Coojamote استفاده شده و مدل رادیویی شبیه‌سازی مدل^۲ UDGM است. اندازه بافر هر گره Coojamote، ۱۶ بسته می‌باشد. تنظیمات شبیه‌سازی در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به مصرف بالای انرژی برای پردازش ویدئو، در گیرنده و فرستنده محدودیت انرژی اعمال نشده است و گره‌های میانی که عملیات مسیریابی را انجام می‌دهند دارای محدودیت انرژی هستند. تمام شبیه‌سازی‌ها ۱۰ بار اجرا شده‌اند و

^۲ Unit Disk Graph Medium

^۱ Carrier-Sense Multiple Access

در شکل ۶ نمودار مقایسه نرخ تحویل بسته در RPL پایه با معیار ETX و روش پیشنهادی ارائه شده است. با توجه به اینکه نرخ تحویل بسته بر اساس نسبت تعداد بسته‌های رسیده به مقصد به تعداد کل بسته‌های ارسالی محاسبه می‌شود، با نمودار اتلاف بسته نسبت عکس دارد. بر اساس این نمودار، نرخ تحویل بسته در RPL مبتنی بر ETX، ۵۹٪ و با استفاده از روش پیشنهادی با معیار RE ۷۰٪، با معیار BC ۸۴٪ و با ترکیب RE و BC ۷۸٪ بوده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، معیار BC بیشترین و معیار ETX کم‌ترین نرخ تحویل بسته را دارند. در معیار BC با توجه به اینکه انتخاب مسیر بر اساس میزان خالی بودن صف ارسال بسته، صورت می‌گیرد با پر شدن صف گره مسیریاب و امکان سرریز بسته‌ها، مسیر به سرعت تغییر داده می‌شود و از ازدحام و سرریز بافر جلوگیری می‌شود. با توجه به اینکه در روش پیشنهادی همواره بار بسته‌ها بر اساس معیارهای انتخابی بین گره‌ها توزیع می‌شود امکان سرریز بافر کمتر بوده و در هر سه حالت میزان نرخ تحویل بسته نسبت به معیار ETX بیشتر است.



شکل ۶. مقایسه نرخ تحویل بسته در RPL پایه و روش پیشنهادی

۵-۱-۲ طول عمر شبکه

شکل ۷ نمودار طول عمر شبکه را برای چهار معیار ETX, RE, BC و ترکیب RE و BC با وزن مساوی را نشان می‌دهد. برای ترسیم این نمودار شبیه‌سازی با هر یک از معیارها ۱۰ بار اجرا شده و در هر اجرا ارسال فریم توسط گره‌های فرستنده تا زمانی که تمام گره‌های مسیریاب شبکه از کار بیفتند، انجام شده است. این شکل میانگین نتایج این اجراها را نشان می‌دهد. در این شکل محور عمودی تعداد گره‌های زنده را نشان می‌دهد و محور افقی زمان را مشخص می‌کند. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، بیشترین طول عمر شبکه با استفاده از معیار RE حاصل می‌شود. زیرا در معیار RE گره مسیریابی انتخاب می‌شود که انرژی باقیمانده بیشتری داشته باشد. پس از RE، معیار ترکیبی بهترین نتیجه را می‌دهد. با توجه به اینکه در هر سه معیار پیشنهادی، توزیع بسته‌ها بین گره‌ها صورت می‌گیرد، هر سه در افزایش طول عمر شبکه نسبت به معیار ETX بهتر عمل می‌کنند.

- اطلاعات مربوط به فریمی که می‌خواهد ارسال کند را می‌خواند و بر اساس اندازه فریم، آن را به تعدادی بسته با اندازه ۶۴ بایت تقسیم می‌کند.

- به هر بسته شناسه منحصر به فردی اختصاص می‌دهد. این شناسه از ترکیب شناسه گره فرستنده، شماره فریم، شماره بسته در فریم و نوع فریم ایجاد می‌شود.

- بسته‌های فریم را همزمان با استفاده از پیام UDP برای گره مقصد ارسال می‌کند.

- شناسه فریم ارسالی را در خروجی چاپ می‌کند.

در گره مقصد به ازاء هر فریم دریافت شده، شناسه گره دریافتی چاپ می‌شود. در طی شبیه‌سازی، اطلاعات مهم مانند انرژی باقیمانده گره‌ها، زمان از بین رفتن گره و ... در خروجی چاپ می‌شود. پس از پایان شبیه‌سازی، فایل خروجی که یک فایل متنی است، ذخیره‌سازی می‌شود. اطلاعات لازم برای ارزیابی با استفاده از برنامه‌ای که به زبان C#.net نوشته شده است از این فایل متنی استخراج شده و سنجش‌های ارزیابی محاسبه می‌گردد، سپس نمودارهای نتایج شبیه‌سازی در محیط Excel ترسیم می‌شوند.

۵-۱ نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج مقایسه پروتکل RPL پایه با معیار ETX و روش پیشنهادی با دو معیار RE و BC ارائه شده است. همان‌طور که در بخش ۴-۳ اشاره شد، تابع هدف پیشنهادی از ترکیب دو معیار RE با وزن w_1 و معیار BC با وزن w_2 استفاده می‌کند. به منظور ارزیابی، پروتکل پیشنهادی با سه وزن‌دهی مختلف اجرا شده است:

- $w_1=1, w_2=0$: در این حالت روش پیشنهادی فقط از معیار RE استفاده می‌کند.

- $w_1=0, w_2=1$: در این حالت روش پیشنهادی فقط از معیار BC استفاده می‌کند.

- $w_1=0.5, w_2=0.5$: در این حالت هر دو معیار RE و BC با وزن مساوی در تابع هدف به کار می‌روند.

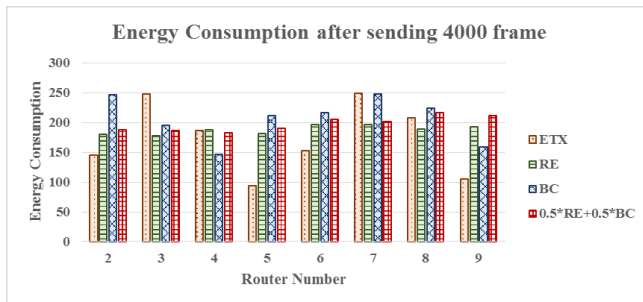
در ادامه نتایج ارزیابی بر اساس سنجش‌های نرخ تحویل بسته، طول عمر شبکه، میزان دسترس‌پذیری گره‌ها، مصرف انرژی و تأخیر انتها به انتها ارائه شده است.

۵-۱-۱ نرخ تحویل بسته

به منظور محاسبه میزان از دست رفتن فریم‌ها و نرخ تحویل بسته در شبکه، شبیه‌سازی با ارسال ۴۰۰۰ فریم (۷۲۵۶ بسته) توسط گره‌های فرستنده به مدت ۱۰ بار با استفاده از چهار معیار ETX, RE, BC و ترکیب RE و BC با وزن مساوی اجرا شده است.

با گذشتن از آستانه‌های قابل قبول این پارامترها، گره‌های مسیریاب تغییر داده می‌شوند و در نتیجه بار شبکه بین گره‌ها تقسیم می‌شود و به عبارتی توزیع انرژی بین گره‌ها صورت می‌گیرد. شکل ۸ نمونه‌ای از توزیع انرژی در یکی از اجراهای شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در معیارهای RE و ترکیب BC و RE که به میزان انرژی باقیمانده گره‌ها توجه دارند، توزیع انرژی مصرفی بین گره‌های مسیریاب یکنواخت‌تر از معیارهای ETX و BC است.

به منظور بیان کمی این موضوع، از شاخص واریانس مصرف انرژی گره‌های مسیریاب استفاده شده است. برای محاسبه این شاخص، شبیه‌سازی ۱۰ مرتبه اجرا شده و در هر اجرا بعد از ارسال ۴۰۰۰ فریم، واریانس انرژی مصرفی بر اساس رابطه (۸) محاسبه شده است.



شکل ۸. نمودار نحوه توزیع مصرف انرژی بین گره‌های مسیریاب در RPL پایه و روش پیشنهادی

$$\text{ConsumptionVar} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n} \quad (8)$$

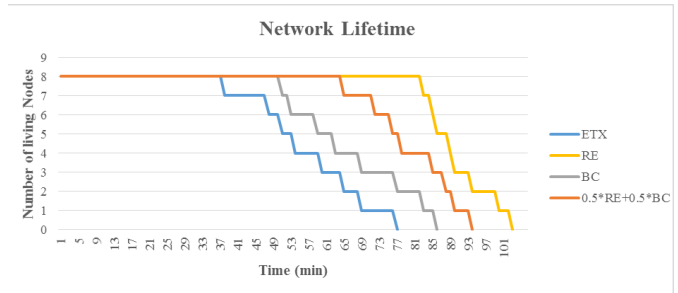
در این رابطه ConsumptionVar شاخص واریانس انرژی مصرفی، n تعداد گره‌های مسیریاب، X_i انرژی مصرفی گره iام و \bar{X} میانگین مصرف انرژی گره‌های مسیریاب را نشان می‌دهد.

جدول ۶ میانگین این شاخص در ۱۰ اجرا را نشان می‌دهد. در این جدول میانگین مصرف انرژی در هر روش مشخص شده و پراکندگی مصرف نسبت به این نقطه میانگین، محاسبه شده است.

جدول ۶. مقایسه واریانس مصرف انرژی گره‌های مسیریاب

نام روش	RE	0.5*RE*0.5*BC	BC	ETX
پراکندگی مصرف	۴۱,۶	۱۲۲,۱۷	۱۱۶۷,۳۵	۲۹۳۳,۷۶
میانگین مصرف	۱۸۷,۹۲	۱۹۸,۳۶	۲۰۶,۱۹	۱۷۵,۵۵

با توجه به نتایج ارائه شده در این جدول، میزان پراکندگی مصرف انرژی حول میانگین در روش مبتنی بر ETX (RPL پایه) به طور چشمگیری بیشتر از روش‌های مبتنی بر RE و ترکیب BC و RE



شکل ۷. نمودار مقایسه طول عمر شبکه RPL پایه و روش پیشنهادی

۵-۱-۳ شاخص دسترس پذیری گره‌ها

یکی از پارامترهای مهم در اینترنت اشیاء چندرسانه‌ای، میزان دسترس بودن گره‌های شبکه است. در صورتی که تعداد گره‌های دسترس زیاد باشد، امکان انتقال اطلاعات افزایش می‌یابد. در جدول ۵ شاخص دسترس بودن گره‌های شبکه بر اساس رابطه (۷) محاسبه شده است.

$$\text{Nodes Availability Index} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n \times \text{NetworkLifetime}} \quad (7)$$

رابطه (۷) میانگین درصد زمانی که گره‌های مسیریاب شبکه در طول عمر شبکه دسترس هستند، را مشخص می‌کند. در این فرمول n تعداد گره‌های مسیریاب، D_i زمان از کار افتادن گره i و NetworkLifetime زمان از کار افتادن آخرین گره شبکه است.

جدول ۵. مقایسه شاخص دسترس پذیری گره‌ها در طول عمر شبکه

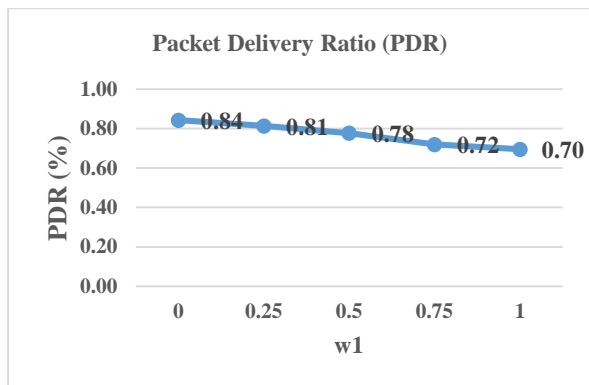
نام روش	RE	0.5*RE*0.5*BC	BC	ETX
درصد دسترس پذیری	٪۸۹	٪۸۶	٪۷۸	٪۷۲

مطابق جدول ۵ شاخص دسترس پذیری گره‌ها برای معیار ETX برابر ٪۷۲، برای معیار BC ٪۷۸، برای RE برابر ٪۸۹ و برای ترکیب RE و BC برابر ٪۸۶ است. به عبارت دیگر، روش پیشنهادی در دسترس بودن گره‌ها را به طور متوسط ۱۴ درصد افزایش داده است. در نظر گرفتن انرژی باقیمانده گره‌ها در تابع هدف پیشنهادی باعث می‌شود که اگر گره‌های انرژی باقیمانده کمتری نسبت به گره مسیر جایگزین داشته باشد، گره مسیر جایگزین به جای آن انتخاب شود، در نتیجه زمان از کار افتادن گره‌ها تا جای ممکن به تعویق می‌افتد.

۵-۱-۴ نحوه توزیع انرژی بین گره‌ها

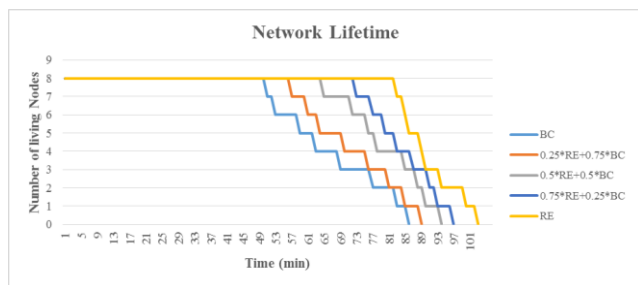
شکل ۸ مصرف انرژی گره‌های مسیریاب بعد از ارسال ۴۰۰۰ فریم را نشان می‌دهد. هدف این شکل بررسی نحوه توزیع انرژی بین گره‌های مسیریاب با معیارهای مختلف است. در روش پیشنهادی گره‌های مسیریاب با در نظر گرفتن پارامترهای مقدار انرژی باقیمانده و میزان خالی بودن بافر گره‌های کاندید، محاسبه می‌شوند. بنابراین، همواره

کاهش پارامتر w_2 (وزن معیار BC) نرخ تحویل بسته کم می‌شود و به عبارت دیگر میانگین اتلاف بسته افزایش می‌یابد. علت این رویداد این است که در معیار RE به مسئله سرریز بافر توجه نمی‌شود، در نتیجه هرچقدر وزن RE بیشتر باشد، میزان اتلاف بسته افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰. نمودار حساسیت نرخ تحویل بسته نسبت به وزن معیارهای BC و RE

نمودار شکل ۱۱ میزان حساسیت سنجه طول عمر شبکه نسبت به تغییرات پارامترهای w_1 و w_2 (وزن معیارهای RE و BC) را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار مشخص می‌شود که با افزایش پارامتر w_1 (کاهش پارامتر w_2) طول عمر شبکه افزایش می‌یابد. علت این رویداد این است که با افزایش وزن معیار RE در تصمیم‌گیری مسیریابی توجه بیشتری به میزان انرژی باقیمانده گره‌ها می‌شود که این امر باعث افزایش طول عمر شبکه می‌گردد.



شکل ۱۱. نمودار حساسیت طول عمر شبکه نسبت به وزن معیارهای RE و BC

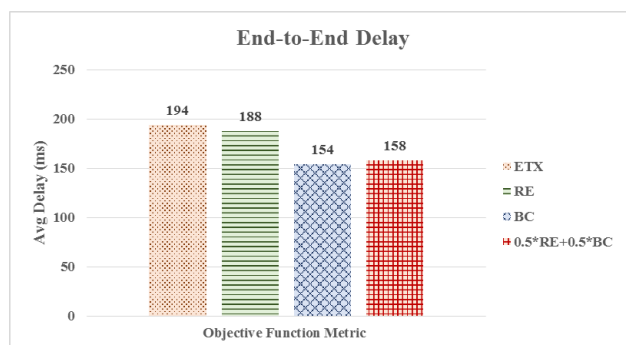
میزان حساسیت سنجه تأخیر انتها به انتها نسبت به تغییرات وزن معیارهای RE و BC در تابع هدف در نمودار شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، با افزایش مقدار وزن RE (پارامتر w_1) میزان تأخیر انتها به انتها افزایش می‌یابد. افزایش مقدار پارامتر w_1 معادل کاهش پارامتر w_2 است؛ به عبارتی، با افزایش وزن معیار RE و کاهش وزن معیار BC، میزان در نظر گرفتن امکان سرریز بافر کم می‌شود در نتیجه با افزایش نرخ اتلاف بسته، ازدحام در شبکه افزایش یافته و بسته‌ها با تأخیر بیشتری دریافت می‌شوند.

با توجه به نتایج به دست آمده از بررسی حساسیت سنجه‌های ارزیابی

است. روش مبتنی بر BC نیز پراکندگی مصرف انرژی بالایی دارد زیرا میزان انرژی باقیمانده گره‌ها در آن در نظر گرفته نمی‌شود.

۵-۱-۵ تأخیر انتها به انتها

شکل ۹ نتیجه ارزیابی تأخیر انتها به انتها در شبکه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در روش‌های مبتنی بر معیار ETX و RE میزان تأخیر بسته‌ها نسبت به روش‌های BC و ترکیب BC و RE بیشتر است. در روش‌های مبتنی بر معیار ETX و RE با توجه به اینکه به اندازه بافر گره‌ها توجه نمی‌شود، میزان سرریز بافر بیشتر از دو روش دیگر است. در نتیجه در این دو روش ازدحام بیشتری در شبکه وجود دارد و این مسأله باعث ایجاد تأخیر بیشتر در رسیدن بسته‌ها می‌شود.



شکل ۹. نمودار مقایسه تأخیر انتها به انتها در RPL پایه و روش پیشنهادی

۵-۲ تحلیل حساسیت نسبت به پارامترهای وزن‌دهی

با توجه به بخش ۳-۴، تابع هدف پیشنهادی از ترکیب دو معیار RE با وزن w_1 و معیار BC با وزن w_2 استفاده می‌کند. از آنجایی که پارامترهای مورد استفاده در تابع هدف وزن‌های w_1 و w_2 هستند، لازم است میزان حساسیت روش به تغییرات این دو پارامتر را بررسی کنیم. همان‌طور که قبلاً اشاره شد w_1 و w_2 اعدادی بین صفر و یک هستند که مجموع آن‌ها برابر با یک است. به منظور تحلیل حساسیت نتایج ارزیابی را با وزن‌دهی‌های مختلف مطابق جدول ۷ بررسی می‌کنیم.

جدول ۷. مقادیر استفاده شده برای تحلیل حساسیت نسبت به پارامترهای w_1 و w_2

پارامتر	مقدار
w_1	۰, ۰,۲۵, ۰,۵, ۰,۷۵, ۱
w_2	۰, ۰,۲۵, ۰,۵, ۰,۷۵, ۱

نتیجه بررسی حساسیت سنجه‌های میانگین اتلاف بسته و نرخ تحویل بسته نسبت به تغییرات w_1 و w_2 در شکل ۱۰ ارائه شده است. بر اساس شکل ۱۰ با افزایش پارامتر w_1 (وزن معیار RE) و متعاقباً

- طول عمر شبکه در روش پیشنهادی نسبت به RPL پایه افزایش یافته است. از آنجایی که در روش پیشنهادی توزیع بار شبکه بین گره‌های صورت می‌گیرد، مصرف انرژی بین گره‌های توزیع می‌شود و در نتیجه طول عمر شبکه نسبت به RPL پایه افزایش می‌یابد. در مواردی که وزن معیار RE بیشتر است، افزایش طول عمر شبکه بیشتر است زیرا معیار RE با در نظر گرفتن میزان انرژی باقیمانده گره‌ها مسیریابی را انجام می‌دهد و از انتخاب گره‌هایی که انرژی باقیمانده کمی دارند اجتناب می‌کند.

- در روش پیشنهادی دسترس‌پذیری گره‌ها در طول عمر شبکه نسبت به RPL پایه بهبود یافته است، زیرا در روش پیشنهادی توزیع بار بر اساس میزان انرژی باقیمانده و فضای باقیمانده در بافر گره‌ها انجام می‌شود که با توجه به این توزیع، دسترسی به گره‌ها در طول عمر شبکه افزایش می‌یابد.

- واریانس مصرف انرژی نسبت به RPL پایه کاهش یافته است، زیرا در روش پیشنهادی برخلاف RPL پایه بسته‌ها بین گره‌های مسیریاب توزیع می‌شوند، در نتیجه پراکندگی توزیع مصرف انرژی بین گره‌های مسیریاب کاهش چشمگیری داشته است.

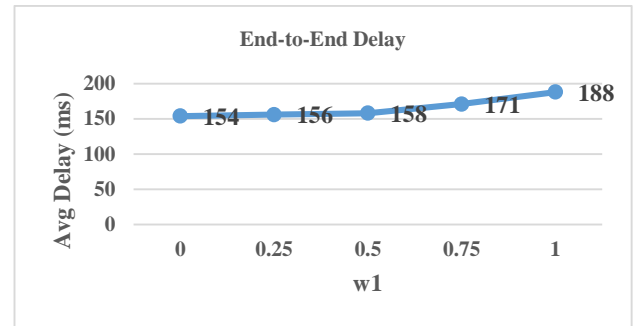
- تأخیر انتها به انتها کاهش یافته است، زیرا با توجه به توزیع بسته‌ها بین گره‌های مسیریاب در روش پیشنهادی، میزان ازدحام در شبکه کمتر بوده در نتیجه تأخیر انتها به انتها کاهش یافته است.

به منظور تحلیل حساسیت روش پیشنهادی نسبت به ترکیب‌های متفاوت دو معیار RE و BC (ترکیب با وزندهی‌های مختلف)، سنج‌های ارزیابی با طیفی از مقادیر وزن‌ها ارزیابی شدند. نتیجه این ارزیابی نشان می‌دهد که در سناریوهای کاربردی که طول عمر شبکه اهمیت بیشتری داشته باشد، بهتر است مقدار پارامتر w_1 (وزن معیار RE) افزایش یابد و در سناریوهای کاربردی که میزان نرخ تحویل بسته و تأخیر انتها به انتها اهمیت بیشتری دارد، افزایش مقدار پارامتر w_2 (وزن معیار BC) نتیجه بهتری ایجاد می‌کند.

از آنجایی که هیچ کار پژوهشی عاری از اشکال نیست، در کار پژوهشی حاضر نیز اشکال‌هایی وجود دارد که در کارهای آتی می‌توان آن‌ها را مرتفع ساخت:

- در این پژوهش از دو معیار مسیریابی در تصمیم‌گیری مسیریابی استفاده شده است، درحالی‌که در RPL پایه یک معیار مسیریابی تعریف شده است. بنابراین با توجه به اضافه کردن معیار دوم به پیام‌های کنترلی DIO، سربار کوچکی (یک بایت) به آن‌ها اضافه شده است که با توجه به ناچیز بودن آن در مقابل

نسبت به وزن معیارهای RE و BC (پارامترهای w_1 و w_2) می‌توان نتیجه گرفت که در سناریوهای کاربردی که طول عمر شبکه اهمیت بیشتری داشته باشد، بهتر است مقدار پارامتر w_1 افزایش یابد و در سناریوهای کاربردی که میزان نرخ تحویل بسته و تأخیر انتها به انتها اهمیت بیشتری دارد، افزایش مقدار پارامتر w_2 نتیجه بهتری ایجاد می‌کند.



شکل ۱۲. نمودار حساسیت تأخیر انتها به انتها نسبت به وزن معیارهای RE و BC

۶ نتیجه‌گیری و کارهای آینده

در این مقاله، تابع هدف پروتکل مسیریابی RPL که پروتکل استاندارد شبکه‌های اینترنت اشیاء است، متناسب با نیازهای داده‌های چندرسانه‌ای تغییر داده شده است. به این منظور دو معیار مسیریابی به نام‌های RE و BC معرفی شده‌اند که معیار RE میزان انرژی باقیمانده گره‌ها را در مسیریابی در نظر می‌گیرد و معیار BC میزان ظرفیت باقیمانده بافر گره را مشخص می‌کند. در تابع هدف پیشنهادی از ترکیب وزن‌دار این دو معیار استفاده شده است. شبیه‌سازی روش پیشنهادی در سیستم‌عامل Contiki که یکی از معروف‌ترین سیستم‌عامل‌های مورد استفاده در این حوزه است، انجام شده و برای ارزیابی از امولاتور Cooja استفاده شده است. برای شبیه‌سازی ترافیک چندرسانه‌ای از فایل اثر ویدئو استفاده شده است. ارزیابی روش پیشنهادی بر اساس سنج‌های نرخ تحویل بسته، طول عمر شبکه، میزان دسترس‌پذیری گره‌ها در طول عمر شبکه، توزیع مصرف انرژی گره‌ها و تأخیر انتها به انتها انجام شده است. به منظور ارزیابی روش پیشنهادی تابع هدف در سه حالت مبتنی بر معیار RE، مبتنی بر معیار BC و $0.5*RE+0.5*BC$ اجرا شده است. نتایج ارزیابی نشان می‌دهد که:

- نرخ تحویل بسته در روش پیشنهادی نسبت به RPL پایه بهبود یافته است. بهبود حاصل شده به این علت بوده است که در روش پیشنهادی همواره بسته‌ها بین گره‌های مسیریاب توزیع می‌شوند. در مواردی که وزن معیار BC بیشتر است، نرخ تحویل بسته افزایش بیشتری داشته، زیرا معیار BC با در نظر گرفتن میزان فضای خالی بافر از سرریز بافر و در نتیجه ایجاد ازدحام جلوگیری می‌کند.

- حجم کل بسته‌های ارسالی در محاسبات انرژی از آن صرفنظر شده است. در کارهای آینده برای افزایش دقت محاسبات می‌توان این سربار را نیز در ارزیابی مدنظر قرار داد.
- در ارزیابی این پژوهش از شبکه‌ای با ۱۳ گره استفاده شده است که همان‌طور که در بخش شبیه‌سازی اشاره شد، به علت چالش‌های مرتبط با نوع گره Cooja mote در امولاتور بوده است. در کارهای آتی می‌توان در صورت حل مشکلات Cooja mote و یا اضافه شدن نوع گره مناسب برای شبیه‌سازی کاربردهای چندرسانه‌ای، شبیه‌سازی را با تعداد بیشتری گره انجام داد و نتایج را با افزایش مقیاس شبکه مورد بررسی قرار داد. همچنین می‌توان از توپولوژی رندوم به جای توپولوژی گرید استفاده کرد.
- در نتایج ارزیابی مشاهده می‌شود که تابع هدف ترکیبی پیشنهادی (با ضرایب وزنی ۰.۵) در مقایسه با استفاده از یک معیار (RE یا BC) همواره بهترین نتیجه را نمی‌دهد، زیرا میانگین این دو معیار است. به عبارتی روش پیشنهادی نقطه بهینه را مشخص نمی‌کند بلکه نقطه‌ای نزدیک به بهینه است.
- علاوه بر موارد فوق، برای بهبود روش پیشنهادی می‌توان کارهای تحقیقاتی جدیدی انجام داد که این کارها در دو دسته قرار می‌گیرند: دسته اول کارهایی است که در جهت بهبود امولاتور Cooja قابل انجام هستند و دسته دوم کارهای قابل انجام برای بهبود روش پیشنهادی می‌باشند. برای بهبود Cooja موارد زیر پیشنهاد می‌شود:
- در امولاتور Cooja انواع محدودی از گره‌های اینترنت اشیا پیاده‌سازی شده است که با توجه به محدودیت زیاد منابع، این گره‌ها برای ارسال ترافیک ویدئو مناسب نیستند. پیشنهاد می‌شود نمونه‌هایی از گره‌های اینترنت اشیا که بتوانند از داده‌های چندرسانه‌ای پشتیبانی کنند نیز در این امولاتور پیاده‌سازی شود.
- یکی از مشکلات امولاتور Cooja کمبود افزونه‌های کاربردی است که در اغلب شبیه‌سازها وجود دارد. پیشنهاد می‌شود افزونه‌های کاربردی لازم در شبیه‌سازی مانند افزونه‌هایی برای ترسیم نمودار، ارسال داده چندرسانه‌ای و ... برای Cooja پیاده‌سازی شود.
- فرآیند اسکرپت‌نویسی در Cooja بسیار دشوار است و هیچ مرجعی برای دستورات و پارامترهای قابل استفاده در اسکرپت آن وجود ندارد. پیشنهاد می‌شود راهنمای مناسبی برای این بخش از Cooja تهیه شود.
- در راستای بهبود روش ارائه شده در این مقاله موارد زیر برای کارهای آینده پیشنهاد می‌گردد:

- مسیریابی چندمسیره برای کم کردن تأخیر و کاهش بیشتر ازدحام در شبکه
- بهبود تابع هدف با استفاده از معیارهای دیگری که در مسیریابی ترافیک چندرسانه‌ای تأثیر دارند (مانند معیار تغییر تأخیر (جیتر) شبکه)
- در نظر گرفتن محتوای داده چندرسانه‌ای و نوع فریم‌های ویدئو در فرآیند مسیریابی

مراجع

- [۱] H. Chaouchi, "The Internet of Things Connecting Objects to the Web", Wiley, ۲۰۱۰.
- [۲] R. Minerva, A. Biru, and D. Rotondi, "Towards a Definition of the Internet of Things (IoT)", IEEE Internet Initiative, ۲۰۱۵.
- [۳] S. A. Alvi, B. Afzal, G. A. Shah, L. Atzori, and W. Mahmood, "Internet of Multimedia Things: Vision and Challenges," *Ad Hoc Networks*, vol. ۳۳, pp. ۸۷-۱۱۱, ۲۰۱۵.
- [۴] A. Nauman, Y. A. Qadri, M. Amjad, Y. Zikria, M. K. Afzal, S. W. Kim, "Multimedia Internet of Things: a Comprehensive Survey," *IEEE Access*, vol. ۸, pp. ۸۲۰۲-۸۲۵۰, ۲۰۲۰.
- [۵] T. Winter, P. Thubert, A. Brandt, J. Hui, and R. Kelsey, "RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks," RFC ۶۵۵۰, Internet Engineering Task Force, Mar. ۲۰۱۲, [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc6550>.
- [۶] J. V. V. Sobral, J. Rodrigues, R. Rabêlo, K. Saleem, V. Furtado, "LOADng-IoT: An Enhanced Routing Protocol for Internet of Things Applications over LowPower Networks," *Sensors*, vol. ۱۹, ۲۰۱۹.
- [۷] Z. Aslani, H. Sargolzaey, "Improving the Performance of RPL Routing Protocol for Internet of Things," *Journal of Computers and Robotics*, ۲۰۱۷.
- [۸] A. Zier, A. Abouaissa and P. Lorenz, "E-RPL: A Routing Protocol for IoT Networks," ۲۰۱۸ *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, ۲۰۱۸.
- [۹] P. Gonizzi, R. Monica, and G. Ferrari, "Design and Evaluation of a Delay-efficient

- [۱۸] J. Vasseur, N. Agarwal, J. Hui, Z. Shelby, P. Bertrand, and C. Chauvenet, "RPL: The IP Routing Protocol Designed for Low-power and Lossy Networks," Internet Protocol for Smart Objects (IPSO) Alliance, Apr. ۲۰۱۱.
- [۱۹] O. Gnawali and P. Levis, "The Minimum Rank with Hysteresis Objective Function," RFC ۶۷۱۹, Internet Engineering Task Force, Sep. ۲۰۱۲, [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc6719>.
- [۲۰] D. S. J. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, "A High-throughput Path Metric for Multi-hop Wireless Routing," In Proc. the ۹th annual international conference on Mobile computing and networking, San Diego, CA, USA, pp. ۱۳۴-۱۴۶, Sept. ۲۰۰۳.
- [۲۱] E. G. Pereira and R. Pereira, "Video Encoding and Streaming Mechanisms in IoT Low Power Networks," In Proc. ۳rd International Conference on Future Internet of Things and Cloud, Rome, Italy, pp. ۳۵۷-۳۶۲, Aug. ۲۰۱۵.
- [۲۲] R. Pereira and E. G. Pereira, "Video Streaming Considerations for Internet of Things," In Proc. ۲۰۱۴ International Conference on Future Internet of Things and Cloud, Barcelona, Spain, pp. ۴۸-۵۲, Aug. ۲۰۱۴.
- [۲۳] F. Mortazavi, M. Khansari, "An Energy-Aware RPL Routing Protocol for Internet of Multimedia Things", International Conference on Smart Cities and IoT (SCIOT), Mashhad, Iran, Sep. ۲۰۱۸.
- [۲۴] B. M. Acharya and A. K. Nayak "LBCC: Load Balanced and Congestion Controlled Routing Protocol for Wireless Multimedia Sensor Network," International Journal of Applied Engineering Research, vol. ۱۲, ۲۰۱۷.
- [۲۵] Contiki OS. [Online]. Available: <http://www.contiki-os.org/>
- [۲۶] Sony Demo Video Trace File. [Online] Available: http://trace.eas.asu.edu/videotraces2/svc_single/index.php
- RPL Routing Metric," In Proc. ۲۰۱۳ ۹th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Sardinia, Italy, pp. ۱۵۷۳-۱۵۷۷, Jul. ۲۰۱۳.
- [۱۰] P. Pinto, A. Pinto, and M. Ricardo, "RPL Modifications to Improve the End-to-end Delay Estimation in WSN," In Proc. ۲۰۱۴ ۱۱th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS), Barcelona, Spain, pp. ۸۶۸-۸۷۲, Aug. ۲۰۱۴.
- [۱۱] P. Pinto, A. Pinto, and M. Ricardo, "End-to-end Delay Estimation Using RPL Metrics in WSN," In ۲۰۱۳ IFIP Wireless Days (WD), Valencia, Spain, pp. ۱-۶, Nov. ۲۰۱۳.
- [۱۲] S. A. Alvi, G. A. Shah, and W. Mahmood, "Energy Efficient Green Routing Protocol for Internet of Multimedia Things," In Proc. ۲۰۱۵ IEEE Tenth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), Singapore, Apr. ۲۰۱۵.
- [۱۳] H. A. A. Al-Kashoash, Y. Al-Nidawi, and A. H. Kemp, "Congestion-aware RPL for ۶L-WPAN Networks," In Proc. ۲۰۱۶ Wireless Telecommunications Symposium (WTS), London, UK, Apr. ۲۰۱۶.
- [۱۴] A. Hassan, S. Alshomrani, A. Altalhi, and S. Ahsan, "Improved Routing Metrics for Energy Constrained Interconnected Devices in Low-power and Lossy Networks," Journal of Communications and Networks, vol. ۱۸, pp. ۳۲۷-۳۳۲, ۲۰۱۶.
- [۱۵] S. Taghizadeh, H. Bobarshad, and H. Elbiaze, "CLRPL: Context-Aware and Load Balancing RPL for Iot Networks Under Heavy and Highly Dynamic Load," IEEE Access, vol. ۶, pp. ۲۳۲۷۷-۲۳۲۹۱, ۲۰۱۸.
- [۱۶] N. Nobakht, S. Sedighian Kashi, S. Zokaei, "A Reliable and Delay-Aware Routing in RPL," in ۵th Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation, Tehran, Iran, Feb. ۲۰۱۹.
- [۱۷] F. Safara, A. Souri, T. Baker, I. Ridhawi, M. Aloqaily, "PriNergy: a Priority-based Energy-efficient Routing Method for IoT Systems," The Journal of Supercomputing, Springer, pp. ۱-۱۸, ۲۰۲۰.

یک الگوریتم مسیریابی مبتنی بر RPL برای داده‌های چندرسانه‌ای در اینترنت اشیا

