یازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran
senaconf.ir

بررسی کیفیت سرویس دهی در اینترنت اشیاء با تمرکز بر حوزه مسیریابی

محسن مظفری وانانی[۱]، دکتر پویا خسرویان دهکردی[۲]

[۱] گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرکرد، شهرکرد، ایران، Mohsen3156@gmail.com

[۲] گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرکرد، شهرکرد، ایران، Khosravyan@gmail.com

چکیده

در سال‌های اخیر تکنولوژی بی‌سیم و به ویژه اینترنت اشیاء (IoT) پیشرفت‌های بی‌نظیر داشته و به یکی از مهم‌ترین شبکه‌های عصر کنونی تبدیل شده‌اند. IoT بنابر قابلیت‌های گسترده و مزایای متعددی که فراهم نموده در عرصه‌های مختلفی استفاده شده و روز به روز بر کاربردها و اهمیت این تکنولوژی نوین افزوده می‌شود. این شبکه‌ها از یک سو به دلیل محدودیت‌ها و معضل‌های گسترده در تأمین کیفیت سرویس‌دهی (QoS) نارکارآمد بوده و از طرف دیگر به دلیل کاربردهای حساس، به شدت نیازمند تمهیداتی به جهت پوشش نیازهای سرویس‌دهی هستند. وجود این مسئله باعث شده تا QoS به عنوان یکی از مهم‌ترین مباحث IoT معرفی شده و تأثیر مستقیم بر عملکرد و کارایی شبکه داشته باشد. ازاین‌رو تاکنون تحقیقات فراوانی به منظور بهبود جوانب حائز اهمیت این این مبحث حیاتی معرفی شده‌اند. اما اگرچه هر یک از این پژوهش‌ها با تمرکز بر روی جوانب مختلف حوزه QoS، سعی بر بهبود این مبحث حیاتی را داشته‌اند. ولی مطالعات حاکی از آن است که برخی مسائل اساسی در ارتباط با این حوزه به طور مؤثر مورد توجه قرار نگرفته‌اند. در این مقاله قصد بر آن است تا یک بررسی جامعی از حوزه مسیریابی IoT و به‌طور دقیق‌تر بحث QoS گردآوری و ارائه شود. برای این منظور در بخش‌های آغازین مقاله ابتدا مفهوم QoS در IoT بررسی خواهیم نمود. در ادامه انواع ارتباطات و تکنیک‌های مسیریابی کاربردی معرفی و بررسی خواهند شد. پس از آن به نقد و بررسی جایگاه QoS در ارتباط با حوزه مسیریابی و ارتباطات خواهیم پرداخت. سپس تعدادی از مهم‌ترین تحقیقات ارائه شده در این حوزه را معرفی کرده، و آن‌ها را از منظر اهداف، چالش‌ها و مزایا مورد بحث و بررسی قرار خواهیم داد. در پایان مقاله نتیجه‌گیری شده و در ارتباط با مهم‌ترین چالش‌های حوزه QoS اینترنت اشیا مباحثی ارائه خواهد گردید.

واژه‌های کلیدی

اینترنت اشیاء، پروتکل RPL، کیفیت، مسیریابی، ارتباطات.

۱. مقدمه

اینترنت اشیاء (IoT) از تعدادی گره حسگر معمولاً ثابت مجهز به فرستنده-گیرنده بی‌سیم تشکیل که قادرند با یکدیگر ارتباط رادیویی برقراری کرده و به مبادله داده بپردازند [۱]. این شبکه‌ها بنابر قابلیت‌هایی که فراهم می‌نمایند، در عرصه‌های متنوعی از قبیل حمل و نقل هوشمند، کاربردهای صنعتی، پزشکی، نظامی، و غیره مورد استفاده قرار گرفتند [۲-۴]. از بارزترین ویژگی این فناوری بی‌سیم می‌توان به توزیع‌شدگی ماهیت شبکه، مقیاس‌پذیری، تغییرات مکرر توپولوژی شبکه، خودمختاری و ارتباطات چندگامی را اشاره کرد [۵و۶]. این ویژگی‌های منحصر به فرد در کنار سایر خصوصیات و محدودیت‌ها اینترنت اشیاء باعث شده تا مسائل مطرح در سایر شبکه‌های موجود، به خصوص مقوله مسیریابی در این نوع شبکه‌ها متفاوت مطرح شوند.

در اینترنت اشیاء به علت نبود قدرت مرکزی و توزیع شدگی کامل ماهیت شبکه، مسیریابی و ارتباطات میان گره‌ها به کمک سایر گره‌های شبکه و به صورت چندپرشی انجام می‌شود. این مقوله، مسیریابی و مبادلات داده‌ها را به یکی از مباحث حیاتی اینترنت اشیاء مبدل نموده است [۱]. این امر از یک‌سو و از طرف دیگر همبندی متغیر شبکه، طراحی پروتکل‌ها و الگوریتم‌های مسیریابی مؤثر برای اینترنت اشیا را به عنوان یک مسئله اساسی معرفی می‌کند. وجود این معضل‌ها در کنار سایر خصوصیات و مسائل حاکم بر اینترنت اشیاء، ضرورت طراحی تکنیک‌هایی مؤثر با قابلیت تأمین نیازها و ضرورت‌های مسیریابی این شبکه‌های خاص را بیان‌گر است.

همان‌گونه که اشاره شد، اینترنت اشیاء بنابر مزایایی گسترده و قابلیت‌های متعددی که فراهم می‌کنند در دنیای امروزی اهمیتی بسیار زیاد یافته و توجه زمینه‌های کاربردی متعددی را به خود جلب نموده‌اند. از مهم‌ترین این عرصه‌ها می‌توان به کاربرد این فناوری ارتباطی در زمینه‌های امدادرسانی، پزشکی، موارد نظامی، کاربردهای اورژانسی و عرصه‌های صنعتی را اشاره نمود [۳و۴]. اما قابل توجه است که این شبکه‌های خاص به علت برخی خصوصیات منحصر به فرد و محدودیت‌های ذاتی، با چالش‌ها و مسائل متعددی نیز مواجه بوده که منجر به افت کارایی و عدم تحقق مؤثر اهداف این شبکه‌ها می‌گردد [۶]. یکی از اساسی‌ترین این مسائل، بحث مسیریابی و تعاملات، به خصوص پشتیبانی از QoS ارتباطات و تبادلات شبکه است [۷]. این مبحث و بررسی جوانب حائز اهمیت آن که در ادامه به طور تخصصی‌تر به آن پرداخته شده، به عنوان اساس کار این مقاله مطرح و مورد توجه می‌باشد.

مفهوم QoS در اینترنت اشیاء جایگاه بسیار ارزشمندی داشته و یکی از عامل‌های کلیدی در بهبود کارایی و کیفیت عملکرد شبکه است [۷]. در این مقاله تلاش بر آن بوده تا یک بررسی جامعی از این حوزه و به‌طور تخصصی‌ترین جدیدترین تحقیقات پیشنهادی برای بهبود QoS گردآوری و ارائه گردد.

به منظور تحقق آن‌چه عنوان شد، ادامه ساختار مقاله بدین شرح می‌باشد. در اغاز مقاله بحث QoS و چگونگی آن در اینترنت اشیاء مطرح و مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت. در ادامه به نقد و بررسی انواع تکنیک‌های ارتباطی کاربردی در اینترنت اشیا پرداخته شده و این حوزه نقد و بررسی خواهد گردید. پیرو همین بحث به تحلیل و تشریح روش‌های مسیریابی پیشنهادی برای اینترنت اشیاء خواهیم پرداخت، و مباحث حائز مرتبط با این روش‌ها را ارزیابی و تحلیل خواهیم نمود. سپس پروتکل RPL معرفی شده و در ادامه تعدادی از مهم‌ترین پژوهش‌های ارائه شده برای بهبود QoS این پروتکل RPL معرفی خواهند گردید. پس از آن این تحقیقات از منظر اهداف، قابلیت‌ها و محدودیت‌ها مورد بحث و بررسی قرار خواهند گرفت. در قسمت پایانی مهم‌ترین چالش‌های پیش‌روی RPL در حوزه کیفیت سرویس‌دهی معرفی شده و مباحثی در این حوزه تشریح خواهد شد. سرانجام در بخش پایانی مقاله نتیجه‌گیری و جمع‌بندی خواهد گردید.

۲. QoS در اینترنت اشیاء

نابر آن‌چه پیش‌تر در ارتباط با خصوصیات و شرایط حاکم بر اینترنت اشیاء بیان شد؛ مبحث کیفیت بنا بر ماهیت کاملاً توزیع شده و همچنین سایر محدودیت‌ها و شرایط حاکم بر این تکنولوژی ارتباطی، متفاوت از سایر شبکه‌های بی‌سیم بوده و بسیار چالش‌انگیزتر است.

بیشترین تمایز از یک سو مربوط به بحث توزیع شدگی شبکه و از سوی دیگر مربوط به محدودیت‌ها و خصوصیات حاکم بر اینترنت اشیاء می‌باشد [۷و۸].

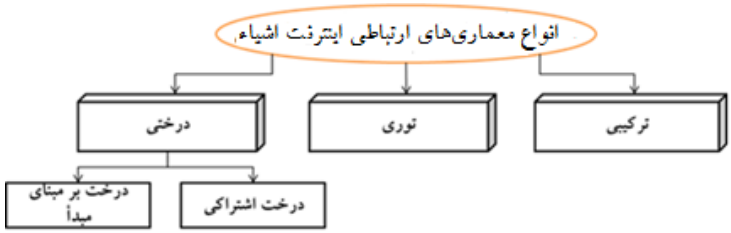
از دیدگاه توزیع‌شدگی شایان توجه است که اینترنت اشیاء هیچ‌گونه زیرساخت ثابتی نداشته و از این نظر تبادلات بین گره‌ها به واسطه مشارکت و به صورت چندگامی انجام می‌شود. این امر پیچیدگی و چالش‌های بحث کیفیت سرویس‌دهی را دوچندان می‌نماید. از دیدگاه محدودیت و خصوصیات حاکم بر اینترنت اشیا ذکر این نکته ضرورت دارد که از یک سو گره‌ها و در مجموع شبکه‌های اینترنت اشیاء در مقایسه با سایر شبکه‌های بی‌سیم و سیمی، از لحاظ منابع و انرژی بسیار محدودتر هستند [۹]. از سوی دیگر این شبکه‌ها، شبکه‌هایی با توپولوژی متغیر بوده که خود این مسئله بر چالش‌های QoS دامن زده و این بحث را بسیار چالش‌انگیز و پرمخاطره می‌نماید. وجود این مسائل باعث شده تا بحث QoS در اینترنت اشیاء به نسبت سایر شبکه‌های بی‌سیم ارزش و اهمیت بسیار بالاتری داشته باشد.

اینترنت اشیا شامل کاربردهای زیادی شده و شبکه‌های متنوعی را پوشش داده که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به چهار شبکه اقتضایی متحرک (MANET)، حسگر بی‌سیم (WSN) [۱۰]، اقتضایی خودرویی (VANET) [۱۱] و اقتضایی پروازی (FANET) را معرفی نمود نمود [۱۲]. بحث QoS در هر یک این شبکه‌ها بنابر خصوصیات مربوطه متفاوت و متمایز می‌باشد. اما آن‌چه در ارتباط با تمامی این شبکه‌ها مطرح و حائز اهمیت بوده، آن است که تمامی این شبکه‌ها محدود و دارای توپولوژی متغیر بوده و از طرفی دیگر این شبکه‌ها کاملاً توزیع شده بوده و مبادلات داده‌ها در آن‌ها به صورت چندگامی انجام می‌شود. این مسائل مهم‌ترین مباحث مرتبط با شبکه‌های مرتبط با اینترنت اشیاء و بحث QoS این شبکه‌ها می‌باشد که باعث اهمیت بالای این بحث در اینترنت اشیا گردیده است.

همان‌گونه که اشاره شد، عمده تفاوت بحث QoS در تنوع شبکه‌های مرتبط با اینترنت اشیاء در ارتباط با نحوه ارتباطات و مبادله داده در این شبکه‌ها می‌باشد. در ادامه و در بخش آتی به طور دقیق‌تر و تخصصی‌تر این مبحث نقد و بررسی شده است.

۳. معماری ارتباطی اینترنت اشیاء

در این بخش انواع معماری‌های ارتباطی کاربردی در شبکه‌های مرتبط با اینترنت اشیاء را بحث و بررسی خواهیم نمود. این معماری‌ها را می‌توان به سه دسته کلی به قرار شکل (۱) بخش‌بندی نمود. توجه شود منظور از معماری، چارچوب و بستر ارتباطی است که تحت آن مبادلات داده‌ها انجام می‌شود.



شکل ۱. انواع معماری ارتباطی کاربردی در تنوع کاربردها و شبکه‌های مرتبط با اینترنت اشیاء

جزئیات معماری‌های عنوان شده در شکل (۱) به قرار زیر می‌باشد [۱۳و۱۴]:

- معماری درختی

در این معماری یک ساختار درختی ایجاد شده، به‌طوری که مبدأ (گره ریشه) در رأس آن قرار داشته و مبادلات داده‌ها تحت این ساختار انجام می‌شود. این معماری را می‌توان به دو دسته کلی Source Tree و Shree Tree تقسیم‌بندی نمود. در نوع نخست هر گره مبدأ یک ساختار ارتباطی درختی در برای خود ایجاد و نگه‌داری می‌کند. در نوع دوم یک ساختار ارتباطی درختی کلی از شبکه (شامل تمامی مبدأها، مقصدها و اتصالات) ایجاد شده که توسط تمامی گره‌ها نگهداری می‌شود.

- معماری مش

در این ساختار ارتباطی یک معماری توری شکل در شبکه ایجاد شده، به‌طوری‌که بین هر مبدأ و مقصد بیش از یک مسیر برای برقراری ارتباط وجود خواهد داشت.

- ترکیبی (یا بی‌قاعده)

در این معماری ساختار مشخصی برای ارتباطات تعریف نشده و می‌تواند ترکیبی از دو نوع معماری قبلی بوده و یا از سایر ساختارهای ارتباط خاصی تبعیت نمی‌کند.

در ادامه و در جدول (۱) انواع معماری‌های ارتباطی معرفی شده بررسی گردیده و از منظر قابلیت‌ها و محدودیت‌ها ارزیابی و تحلیل شده‌اند.

جدول ۱. انواع معماری‌های ارتباطی کاربرد در شبکه‌های اقتضایی

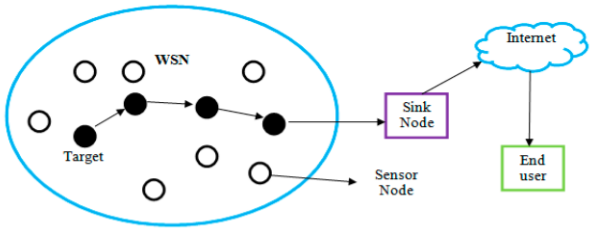
معماری	توضیحات	قابلیت	محدودیت	انواع
درختی	در این ساختار تنها یک مسیر بین هر مبدأ و مقصد وجود دارد.	کارایی بالا در مبادلات داده‌ها	عدم مقاومت در برابر تغییرات توپولوژی	Source Tree و Shree Tree
مش	در این ساختار بین هر مبدأ و مقصد بیش از یک مسیر در دسترس است	مقاوم در برابر تغییرات توپولوژی	سربارهای بالا	-
ترکیبی (بدون قاعده)	ترکیبی از خصوصیات سایر معماری‌ها	وابسته به کاربرد	وابسته به کاربرد	-

آن‌چه در این بخش ارائه شد، بررسی انواع روش‌های ارتباطی کاربردی در شبکه‌های مرتبط با اینترنت اشیاء از منظر معماری ارتباطات و نوع آن را شامل می‌شود. در بخش بعدی این روش‌ها از لحاظ استراتژی و نحوه عملکرد مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۴. مسیریابی در اینترنت اشیاء

مسیریابی و سرویس‌دهی در اینترنت اشیاء به علت توزیع شدگی شبکه به صورت چندگامی و با مشارکت تمامی گره‌های شبکه انجام می‌شود. بر همین اساس پیچیدگی و معضل‌ها در ازاء تبادلات چندگامی بسیار بیشتر و چش چشم‌گیرتر است. توجه شود که در IoT توپولوژی شبکه متغیر بوده که تغییرات آن پیش‌بینی نشده و کاملاً تصادفی است [۱۴].

در اغلب زمینه‌های کاربردی اینترنت اشیا امکان برقراری ارتباط مستقیم میان تمامی گره‌های شبکه با یکدیگر وجود ندارد. بر همین اساس در این شبکه‌ها، معمولاً مبادلات داده‌ها به شکل چندپرشی و با همکاری سایر گره‌های شبکه انجام می‌شود [۱]. در شکل (۲) کلیاتی از تعاملات چندپرشی در اینترنت اشیاء IoT نمایش داده شده است.



شکل ۲. مسیریابی و تعاملات در شبکه‌های اقتضایی [۱۵]

در این بخش انواع روش‌های مسیریابی کاربردی در اینترنت اشیا را از منظر استراتژی می‌توان به دو نوع فرصت‌طلبانه و تک مسیری بخش‌بندی نمود. شرح جزئیات این دو نوع استراتژی در ادامه ارائه شده است [۱۶و۱۷].

- فرصت‌طلبانه

در این استراتژی، مسیریابی و مبادلات داده‌ها به صورت گام به گام انجام شده تا نهایتاً داده‌های ارسالی توسط مقصد نهایی یا همان گره ریشه دریافت شوند. بزرگ‌ترین مزیت این استراتژی را می‌توان قابلیت اطمینان بالا و مقاومت در برابر تغییرات همبندی عنوان کرد.

- تک مسیری

در این استراتژی پیش از مخابره داده‌ها ابتدا یک مسیر انتها به انتها (از مبدأ به مقصد نهایی) مشخص شده و سپس از مسیر مورد نظر مخابره داده‌ها انجام می‌شود. این روش پاسخ‌گوی شرایط مختلف بوده، ولی در سوی مقابل قابلیت اطمینان پایینی داشته، و همچنین سربارها و حافظه زیادی نیاز دارد.

از دیدگاه عملکرد روش‌های مسیریابی به دو نوع واکنشی و جدول محور به شرح زیر طبقه‌بندی می‌شوند [۱۳و۱۸].

- واکنشی

در این استراتژی، پروسه مسیریابی تنها بر حسب تقاضا انجام می‌شود. در واقع در این استراتژی تنها زمانی که گره‌ای تقاضای ارسال داده دارد، فرایند مسیریابی و جستجوی مسیرهای میانی را انجام می‌دهد.

- جدول‌محور

در این استراتژی در هر حالت، گره‌های شبکه به یکدیگر مسیر دارند. برای این منظور اطلاعات مسیرهای شبکه به صورت دوره‌ای برای گره‌ها منتشر شده و به واسطه آن‌ها اطلاعات جداول مسیریابی گره‌ها به‌روزرسانی می‌شود. در این حلت چنان‌چه گره‌ای قصد مخابره داده داشته باشد، بلادرنگ مسیر در دسترس است. ترکیبی

از دیدگاه دیگر از لحاظ نوع برقراری ارتباط، روش‌های مسیریابی کاربردی در اینترنت اشیا را می‌توان به دو شیوع تک‌پخشی و چندپخشی به قرار زیر بخش‌بندی نمود [۱۹].

- تک‌پخشی

در این شیوه در دو سوی ارتباط تنها یک گره حضور داشته و مبادلات داده‌ها بین این دو گره انجام می‌شود.

- چندپخشی

در این شیوه در یک سوی ارتباط تنها یک گره حضور داشته به عنوان مبدأ، ولی در سوی دیگر چندین گره به عنوان مقصد حضور دارند.

از دیدگاه دیگر و از منظر انرژی، روش‌های مسیریابی را نیز می‌توان تفکیک و بخش‌بندی نمود. از این نظر روش‌های مسیریابی به طور کلی به سه دسته به قرار زیر تقسیم‌بندی می‌شوند [۲۰و۲۱].

- مبتنی بر بخش‌بندی

در این معماری سعی بر تفکیک و مجزاسازی محیط تحت پوشش شبکه است.

- مبتنی بر خوشه

در این معماری تمرکز بر خوشه‌بندی حسگرها و مدیریت آن‌ها در قالب خوشه‌ها می‌باشد.

- مبتنی بر بهینه‌سازی

در این معماری تمرکز بر بهینه‌سازی مسیرها و مبادلات داده‌ها می‌باشد و بر این اساس تلاش بر بهبود مسائل مرتبط با حوزه انرژی است.

آن‌چه در این قسمت بحث شد، بررسی انوع پروتکل‌های مسیریابی و تکنیک‌های مسیریابی کاربردی در اینترنت اشیا را در برمی‌گیرد. در ادامه به بحث در ارتباط با بحث QoS و روش‌های کیفیت محور خواهیم پرداخته و این حوزه را نقد و بررسی خواهیم کرد..

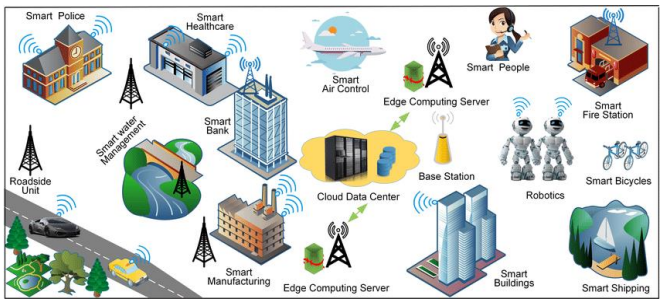
۵. کیفیت سرویس‌دهی در اینترنت اشیاء

شبکه‌های اینترنت اشیاء بنابر قابلیت‌هایی که فراهم می‌سازند، امروزه در زمینه‌های مختلفی استفاده شده و روز به روز به کاربردهای این تکنولوژی افزوده می‌شود. قابل توجه است که اغلب این عرصه‌های کاربردی، کاربردهایی حساس و پر اهمیت می‌باشند. استفاده از این تکنولوژی در چنین کاربردهای حساس و ارزشمندی باعث شده تا اهمیت اطلاعات ارسالی در این کابردها بسیار بیشتر از سایر شبکه‌های بی‌سیم باشد. از سوی دیگر کمبودها و کاستی‌های درگیر با شبکه‌های اینترنت اشیاء، منجر به آن شده تا این شبکه‌ها در تأمین QoS و حمایت از قابلیت اطمینان تبادلات آسیب‌پذیر و پر مخاطره باشند [۲و۴]. این در حالی است که مسائلی همچون ارتباطات چندگامی و تغییرات توپولوژی به این چالش‌ها دامن زده و مبحث QoS را امری بسیار مهم و در عین حال بسیار پیچیده نموده است [۷]. در مجموع وجود این چالش‌ها برای شبکه‌های اینترنت اشیاء، باعث ایجاد تمایزها و پیچیدگی‌های خاصی در حوزه کیفیت تبادلات و پشتیبانی از قابلیت اطمینان ارتباطات این شبکه‌ها گردیده است.

در ادامه برخی مباحث حائز اهمیت و کلیدی مرتبط با حوزه QoS مورد بحث و بررسی قرار گرفته و پس از آن به طور تخصصی‌تر تحقیقات مرتبط با این زمینه نقد و بررسی گردیده‌اند.

۱،۵. کیفیت سرویس‌دهی و نقش آن در کاربردهای اینترنت اشیاء

همان‌گونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، اینترنت اشیاء دارای خصوصیات منحصر به فرد و ویژگی‌های خاص و یکتایی هستند. وجود این ویژگی‌ها مزایای گسترده‌ای را برای این شبکه‌ها فراهم نموده و باعث کاربرد این فناوری در زمینه‌ها و عرصه‌های مختلفی گردیده است. از مهم‌ترین این برنامه‌های کاربردی می‌توان به مواردی از قبیل برنامه‌های نظارتی، عرصه‌های نظامی، نظارت بر کشتیرانی، بررسی و تحلیل سطح آلودگی آب، بررسی معادن و موارد زیست محیطی (بررسی گونه‌های جانوری زیرآب و ارزیابی وضعیت آن) را اشاره نمود [۲-۴]. در شکل (۳) نیز تعدادی از مهم‌ترین کاربردهای IoT به تصویر کشیده شده است. همان‌گونه که در شکل نیز مشهود و مشخص است، اغلب عرصه‌های کاربردی IoT، کاربردهایی حساس و پر اهمیت هستند. ازاین‌رو اغلب داده‌هایی که در این کاربردها ارسال می‌شوند، حاوی اطلاعات حساس و پر اهمیت هستند. شایان ذکر است که مهم‌ترین نیاز و ضرورت مبادله این اطلاعات حساس، وجود تدابیری برای حمایت از کیفیت سرویس‌های ارسالی می‌باشد. ازاین‌رو می‌توان عملکرد صحیح شبکه را در گرو حمایت از کیفیت سرویس‌دهی دانست.



شکل ۳. تعدادی از کاربردهای مهم اینترنت اشیاء [۲۱]

۲،۵. انرژی و نقش آن در مسیریابی و کیفیت سرویس‌دهی

بنابر مباحث ارائه شده شبکه‌های اینترنت اشیاء دارای خصوصیات خاص و ویژگی‌های متعددی هستند. این ویژگی‌ها قابلیت‌های بی‌نظیری را برای اینترنت اشیاء فراهم نموده، اما در سوی مقابل منجر به مطرح شدن چالش‌ها و معضل‌های گسترده‌ای نیز برای این شبکه‌ها گردیده است. یکی از مهم‌ترین این مسائل در ارتباط با بحث انرژی و مدیریت این عامل کلیدی مطرح است [۲۲]. این مسئله از محدودیت منابع و به ویژه مسئله باتری محدود حسگرها ناشی می‌شود. وجود این مسئله باعث شده تا تحقیقات زیادی در ارتباط با این حوزه اساسی معرفی شده که بخش عمده‌ای از این تحقیقات بر بحث بهبود QoS با تمرکز بر بهینه‌سازی و مدیریت انرژی پرداخته‌اند.

گره‌های اینترنت اشیاء در مقایسه با سایر شبکه‌های موجود، از لحاظ منابع و به ویژه انرژی بسیار محدودتر هستند [۲۳]. وجود این محدودیت‌های گسترده به خصوص در ارتباط با بحث انرژی، باعث شده تا این عامل در اینترنت اشیاء ارزش و اهمیت بالاتری به نسبت سایر شبکه‌ها داشته باشد.

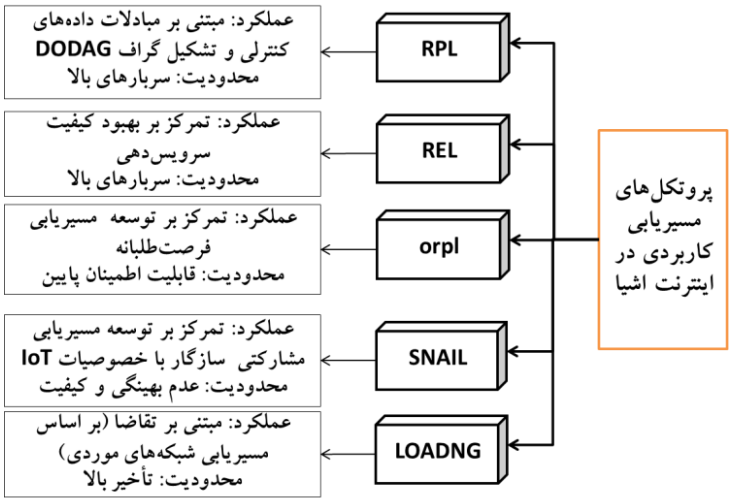
انرژی در اینترنت اشیاء وابسته به شش عمل کلی هزینه می‌شود. این فعالیت‌ها عبارتند از حس اطلاعات، ارسال داده‌ها، دریافت داده‌ها، پردازش داده‌ها، حالت خواب و حال بیکار (گره فعال ولی عملیات خاصی انجام نمی‌دهد) [۲۴]. در میان انواع این فعالیت‌ها بالاترین مصرف انرژی مرتبط با حالت ارسال و دریافت داده‌ها می‌باشد. در واقع مسیریابی و تبادلات داده‌ها (ارسال و دریافت‌ها) انرژی بسیار بیشتری به نسبت سایر فعالیت‌ها شبکه نیاز دارند. این مسئله به وضوح بر ضرورت ارائه روش‌هایی برای مدیریت مصرف انرژی مرتبط با بحث مسیریابی و تبادلات داده‌ها اشاره دارد.

در ارتباط با بحث انرژی ذکر این نکته شایان توجه است که اینترنت اشیا به نوعی شبکه بی‌سیم غیرساخت‌یافته است. در این شبکه مبادلات داده‌ها به واسطه مسیریابی و از طریق خود گره‌ها انجام می‌شود. این‌که کدام گره در پروسه ارسال شرکت کرده و چه حسگرهایی شرکت ننمایند، وظیفه الگوریتم‌های مسیریابی است. در چنین شرایطی نحوه مسیریابی افزون بر تأثیر مستقیم بر عملکرد شبکه، ارزش بسیار بالایی در بهینه‌سازی و مدیریت مصرف انرژی حسگرهای شبکه دارد [۲۵].

در سوی مقابل انرژی نیز تأثیر مستقیم بر بحث مسیریابی و تبادلات و به ویژه بحث QoS دارد. هر چه گره‌ای از لحاظ انرژی دارای انرژی باقیمانده بیشتری بوده و مسیری از لحاظ انرژی کاراتر باشد، در سوی مقابل اطمینان و کیفیت مسیریابی و تبادلات بهبود یافته و بلعکس. این مقوله باعث شده تا تحقیقات زیادی با تمرکز بر انرژی در راستای بهبود مسیریابی و تبادلات معرفی شوند. همان‌گونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، این تحقیقات را می‌توان در قالب سه دسته کلی شامل مبتنی بر بخش‌بندی، مبتنی بر خوشه‌بندی و مبتنی بر بهینه‌سازی تقسیم‌بندی نمود.

۶. پروتکل RPL و نقش QoS بر عملکرد آن

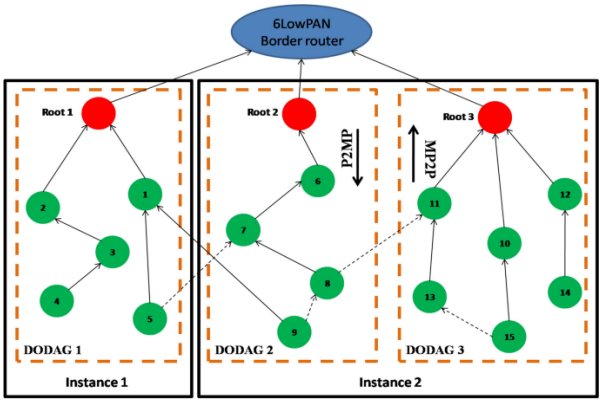
بنابر آن‌چه در ارتباط با اهمیت بحث مسیریابی و تبادلات در اینترنت اشیاء ارائه و عنوان شد، تاکنون پروتکل‌ها و روش‌های گسترده‌ای در راستای فرایندی مسیریابی این شبکه‌ها معرفی شده‌اند [۱۳و۲۶-۲۹]. در شکل (۴) یک دسته‌بندی جدیدی از انواع پروتکل‌های مسیریابی کاربردی در اینترنت اشیاء ارائه شده است.



شکل ۴. انواع پروتکل‌های پایه مسیریابی در اینترنت اشیاء

هر یک از این پروتکل‌ها بنابر مزایای و ویژگی‌های منحصر به فرد خود، دارای محدودیت‌ها و قابلیت‌های منحصر به فردی هستند. اما در این میان تنها پروتکل RPL به عنوان پروتکل استاندارد مسیریابی برای IoT پذیرفته شده است.

RPL یک پروتکل IPV6 بوده که برای کاربرد در شبکه‌های کم توان و با اتلاف بالا معرفی گردیده است. RPL به کمک LoWPAN6 به روی استاندارد MAC، IEEE 802.15.4 توسعه یافته و قابلیت اجرا دارد. این پروتکل برای نخستین بار توسط گروه کاری RoLL معرفی گردید و مهم‌ترین هدف از معرفی آن فراهم‌سازی مسیریابی برای شبکه‌های LLN (low-power and lossy networks) می‌باشد. این پروتکل اساساً برای مسیریابی و ارتباطات یک توپولوژی سلسله مراتبی را فراهم نموده که تمامی مبادلات و ارتباطات گره‌های شبکه با یکدیگر و با گره ریشه به واسطه این گراف محقق می‌شود. به منظور ایجاد این گراف RPL از اشتراک‌گذاری پیام‌های کنترلی با نام DIO، DIS و DAO، استفاده کرده تا به واسطه ارسال و دریافت آن‌ها گراف ارتباطی DODAG ایجاد شود. RPL بر پایه اشتراک‌گذاری پیام-های DIO و DAO گراف ارتباطی شبکه را ایجاد نموده و در ادامه بر مبنای ارسال و دریافت بسته‌های DIS تغییرات گراف DODAG را مدیریت می‌نماید [۱۳]. کلیاتی از گراف سلسله‌مراتب ایجاد شده توسط RPL در شکل (۵) نمایش داده شده است.



شکل ۵. پیام‌های کنترلی کاربردی در RPL [۳۰]

علاوه بر این RPL ارتباطات مختلف بین حسگرها و گره ریشه را پشتیبانی کرده و برای مبادلات داده در شرایط مختلف بسیار مطلوب است. این پروتکل ارتباطات یک به چند، چند به یک، و یک به یک را همروند با یکدیگر پشتیبانی نموده و قابلیت پوشش نیازهای تمامی این ارتباطات را دارد.

پروتکل RPL همان‌گونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، به عنوان استاندارد مسیریابی برای IoT پذیرفته شده و مورد استفاده است. بر همین اساس پژوهش‌های گسترده‌ای بر اساس این پروتکل طراحی و معرفی شده‌اند. هدف بخش عمده‌ای از این تحقیقات بهبود کیفیت سرویس‌دهی RPL است. زیرا که این پروتکل هیچ‌گونه تدابیری را برای پوشش نیازهای QoS فراهم نمی‌سازد. در ادامه و در بخش بعدی به معرفی تحقیقات مرتبط با این حوزه پرداخته و آن‌ها را از دیدگاه‌های مختلف دسته‌بندی و ارزیابی خواهیم نمود.

۱،۶. بررسی و ارزیابی روش‌های کیفیت محور متمرکز بر RPL

کیفیت سرویس‌دهی یکی از مهم‌ترین نیازهای کاربردهای اینترنت اشیاء و پروتکل RPL است. ازاین‌رو و با توجه به اهمیت بالای QoS برای اینترنت اشیاء و بهبود عملکرد پروتکل RPL، تاکنون مقالات متعددی در راستای بهبود این زمینه مهم معرفی گردیده‌اند. در یک دسته‌بندی کلی این پژوهش‌ها را می‌توان به قرار زیر بخش‌بندی و ارزیابی کرد. این تحقیقات از لحاظ طراحی و عملکرد ارزیابی شده و از منظر شاخص‌های کاربردی و اهداف تحلیل گردیده‌اند.

- راه‌کارهای متمرکز بر انرژی

از مهم‌ترین پژوهش‌های مرتبط با این حوزه می‌توان به [۳۱-۳۳] اشاره کرد. هدف این پژوهش‌ها بهینه‌سازی و مدیریت مصرف انرژی گره‌های شبکه است. در این روش‌ها اغلب مسیریابی با تمرکز بر انرژی انجام می‌شود. اما از اساسی‌ترین مسائل مهم این روش‌ها می‌توان به افت کیفیت در قبال بی‌توجهی به سایر معیارهای کیفی اشاره نمود.

- روش‌های متمرکز بر اطمینان و پایداری

از راه‌کارهای مهم مرتبط با این حوزه می‌توان تحقیقات پیشنهادی در [۳۴-۳۶] را اشاره نمود. مهم‌ترین هدف این تحقیقات بهبود پایداری در ازاء مدیریت پویایی گره‌های شبکه است. در این روش‌ها مسیریابی با تمرکز بر بررسی شرایط پایداری پیوندها انجام می‌شود. از اساسی-ترین محدودیت‌های پیش‌روی این تحقیقات می‌توان به تأخیر بالا اشاره نمود.

- روش‌های مبتنی بر اتصال (متمرکز بر ارزیابی وضعیت پیوندها)

پژوهش‌های معرفی شده در [۳۷-۳۹] از تحقیقات مهمی بوده که با تمرکز بر ارزیابی کیفیت اتصالات طراحی و توسعه یافته‌اند. مهم‌ترین هدف این تحقیقات بهبود کیفیت سرویس‌دهی است. برای این منظور در طی فرایندهای مسیریابی وضعیت اتصالات از لحاظ کیفی سنجیده شده و سپس بر مبنای این سنجش انتخابات مسیریابی انجام می‌شود. از مسائل مهم مرتبط با این روش‌ها می‌توان به سربارهای کنترلی بالا اشاره نمود.

- روش‌های متمرکز بر ازدحام

راه‌کارهای معرفی شده در [۴۰-۴۲] از پژوهش‌های مهمی بوده که با تمرکز بر بهبود مدیریت ترافیک و ازدحام طراحی و گسترش یافته-اند. مهم‌ترین هدف این پژوهش‌ها کنترل ازدحام و مدیریت بار ترافیکی گره‌ها و مسیرها است. برای این منظور مسیریابی و انتخابات مسیریابی با تمرکز بر ازدحام انجام می‌شود. از مسائل مهم پیش‌روی این تحقیقات می‌توان به افزایش طول مسیرهای میانی و عدم بهینگی مسیریابی‌ها را اشاره نمود.

- روش‌های میان‌لایه‌ای

از راه‌کارهای مهم مرتبط با این حوزه می‌توان به پژوهش‌های پیشنهادی در [۴۳-۴۵] اشاره کرد. مهم‌ترین هدف این تحقیقات بهبود مسیریابی و ارتقاء کیفیت است. برای این منظور روش‌های پیشنهادی در این حوزه بر پایه معیارهای مرتبط با چند لایه به جای یک لایه طراحی و توسعه یافته‌اند. از اساسی‌ترین محدودیت‌های پیش‌روی این تحقیقات می‌توان به پیچیدگی بالا و عدم قابلیت کاربرد در برخی شرایط شبکه را اشاره نمود.

- روش‌های چندپارامتری

از راه‌کارهای مهم مرتبط با این حوزه می‌توان به پژوهش‌های پیشنهادی در [۴۶-۴۸] اشاره کرد. مهم‌ترین هدف این تحقیقات بهبود معضل‌های مرتبط با مسیریابی تک‌پارامتری است. برای این منظور روش‌های پیشنهادی در این حوزه بر پایه ارزیابی عامل‌های مختلف مرتبط با مسیریابی (به جای تک عاملی) طراحی و توسعه یافته‌اند. از اساسی‌ترین محدودیت‌های پیش‌روی این روش‌ها می‌توان به افزایش سربارهای کنترلی و مصرف انرژی شبکه را اشاره نمود.

- روش‌های غیرخطی

تعدادی از تحقیقات نیز بر پایه بهره‌وری از روش‌های غیرخطی توسعه یافته و بر این اساس طراحی شده‌اند [۴۹-۵۱]. در این پژوهش‌ها ارزیابی‌ها و انتخابات مسیرهای میانی مبتنی بر خروجی مدل‌های غیرخطی مانند منطق فازی انجام می‌شود. بدین منظور پارامترهای مسیریابی پس از ارزیابی به عنوان ورودی به فازی فرستاده شده و نتیجه (خروجی فازی) انتخابات مسیرهای میانی را مشخص می‌سازد. هدف اکثر این تحقیقات افزایش دقت ارزیابی و رفع مسائل مرتبط با تصمیم‌گیری چندعاملی است. نتایج بررسی عملکرد این روش‌ها بر بهبود دقت تصمیم‌گیری‌ها و پیرو آن ارتقاء QoS دلالت دارد. اما در سوی مقابل این روش‌ها بهینه نبوده و اغلب پیچیدگی بالایی دارند.

- روش‌های چندمسیری

راه‌کارهای معرفی شده در [۵۲-۵۴] از جمله مقالات مهمی بوده که بر پایه مسیریابی چندمسیری طراحی و عمل می‌نمایند. در این روش‌ها ابتدا وضعیت کلی مسیرهای میانی سنجیده شده و سپس بر اساس نتیجه این ارزیابی‌ها انتخابات مسیریابی اتخاذ می‌شود. این روش‌ها در بهبود قابلیت اطمینان تبادلات داده‌ها و بهبود دریافت‌های موفق بسیار مؤثر هستند. اما اغلب این روش‌ها تأخیر و سربارهای بالای دارند. افزون بر این عملکرد اکثر مقالات مرتبط با این حوزه با افزایش حافظه مصرفی و رخداد مسائلی همچون ازدحام همراه هستند.

- روش‌های متمرکز بر هوش مصنوعی

راه‌کارهای پیشنهادی در [۵۵-۵۷]، از جمله تحقیقاتی بوده که بر پایه توسعه الگوریتم‌های فرامکاشفه‌ای و تکنیک‌های هوش مصنوعی پیشنهاد شده‌اند. در این مقالات، پروسه‌های مسیریابی بر مبنای قابلیت‌های روش‌های فرامکاشفه‌ای (همچون الگوریتم کلونی مورچگان، الگوریتم زنبور عسل و الگوریتم گرگ خاکستری) انجام شده تا بر پایه بهره‌وری از قابلیت‌های این الگوریتم‌ها، کارایی و کیفیت مسیریابی را بهبود بخشید. نتایج حاصل از بررسی عملکرد این روش‌ها، بر بهبود QoS و بهینه‌سازی پیام‌های کنترلی دلالت دارد. اما در سوی مقابل از مسائل و محدودیت‌های این مقالات می‌توان به عدم پاسخ‌گویی در شرایط مختلف شبکه و پیچیدگی پیاده‌سازی را اشاره نمود.

آن‌چه در این بخش ارائه شد، بررسی روش‌های گذشته در حوزه بهبود مسیریابی و کیفیت پروتکل RPL را شامل می‌شوند. در قسمت بعدی مهم‌ترین چالش‌های پیش‌روی QoS اینترنت اشیاء به ویژه پروتکل RPL معرفی شده و مباحثی به تفصیل در این باره بحث و بررسی شده است.

۷. جمع‌بندی

در این مقاله، یک بررسی جامعی بر الگوریتم‌ها و روش‌های مسیریابی کاربردی در IoT انجام و ارائه شد. بدین منظور، در ابتدای مقاله و پس از معرفی کلیاتی در ارتباط با اینترنت اشیا، انواع تکنیک‌های ارتباطی و روش‌های تبادلات در این تکنولوژی معرفی شده و از لحاظ عملکرد و سایر جزئیات بحث و بررسی گردیدند. در ادامه به تحلیل حوزه مسیریابی پرداخته شد. در یک بررسی کلی انواع استراتژی‌ها و تکنیک مسیریابی در اینترنت اشیا را از لحاظ ماهیت می‌توان به دو نوع موقعیت‌محور و همبندی‌محور، از لحاظ عملکرد می‌توان به دو نوع تقاضا محور و جدول‌محور و از لحاظ ارتباط می‌توان به دو نوع تک‌پخشی و چندپخشی بخش‌بندی نمود. از دیدگاه دیگر و از لحاظ آغازگر ارتباط انواع تکنیک‌های مسیریابی را می‌توان به دو نوع مبتنی بر گره و مبتنی بر ریشه بخش‌بندی کرد. در ادامه این مفاهیم به طور تخصصی‌تر به بحث QoS پرداخته شد و مباحث حائز اهمیت در ارتباط با این حوزه نقد و بررسی شد. در ادامه و در بخش پایانی مقاله نیز تعدادی از مهم‌ترین تحقیقات پیشنهادی برای حوزه QoS اینترنت اشیاء معرفی شده و این تحقیقات از منظر اهداف، شاخص‌ها، مزایا و معایب تحلیل و تشریح شدند. مطالعات پیرامون حوزه QoS اینترنت اشیا، حاکی از آن است که می‌توان با بهره‌وری از تکنیک‌هایی مانند تئوری بازی، روش‌های چندمعیاری، الگوریتم‌های فرااکتشافی و سایر راه‌کارهای مشابه، QoS مسیریابی و مبادلات داده‌ها را به خوبی بهبود بخشید. همچنین استفاده از روش‌های یادگیری و روش‌های مرتبط با حوزه هوش مصنوعی نیز می‌توانند برای بهینه‌سازی مسائل درگیر با این حوزه به ویژه کاهش سربارهای کنترلی و بهینه‌سازی انرژی مؤثر باشند. افزون بر این روش‌هایی همچون تکنیک‌های پیش-بینی به منظور بهبود پایداری ارتباطات و افزایش قابلیت اطمینان مبادلات بسیار موفق خواهند بود. اما شایان ذکر است که با توجه به جدید بودن IoT، هم‌چنان باید کارهای تحقیقاتی زیادی انجام شده تا بتواند نیازهای QoS این شبکه‌ها را بر طرف نمود. علاوه بر این تفاوت‌ها و شرایط خاص حاکم بر بحث QoS، بیان‌گر ضرورت طراحی تکنیک‌هایی متفاوت با قابلیت پوشش چالش‌ها و معضل‌ها مرتبط با این حیطه است.

منابع

[1] Marietta, J., and B. Chandra Mohan. "A review on routing in internet of things." *Wireless Personal Communications* 111.1 (2020): 209-233.

[2] Kassab, Wafa'A., and Khalid A. Darabkh. "A–Z survey of Internet of Things: Architectures, protocols, applications, recent advances, future directions and recommendations." *Journal of Network and Computer Applications* 163 (2020): 102663.
[3] Mishra, Kanderp Narayan, Shishir Kumar, and Nileshkumar R. Patel. "Survey on Internet of Things and its Application in Agriculture." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1714. No. 1. IOP Publishing, 2021.
[4] Qadri, Yazdan Ahmad, et al. "The future of healthcare internet of things: a survey of emerging technologies." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 22.2 (2020): 1121-1167.
[5] Wang, Jianxin, et al. "The evolution of the Internet of Things (IoT) over the past 20 years." *Computers & Industrial Engineering* 155 (2021): 107174.
[6] Samizadeh Nikoui, Tina, et al. "Internet of Things architecture challenges: A systematic review." *International Journal of Communication Systems* 34.4 (2021): e4678.
[7] Subash, K., D. Janet Ramya, and L. Arockiam. "Quality of Service in the Internet of Things (IoT)–A Survey." *TIRUCHIRAPPALLI-620 002, TAMIL NADU, INDIA*.
[8] Singh, Manisha, and Gaurav Baranwal. "Quality of service (qos) in internet of things." *2018 3rd International Conference On Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU)*. IEEE, 2018.
[9] Sobin, C. C. "A survey on architecture, protocols and challenges in IoT." *Wireless Personal Communications* 112.3 (2020): 1383-1429.
[10] Quy, Vu Khanh, et al. "A Survey of QoS-aware Routing Protocols for the MANET-WSN Convergence Scenarios in IoT Networks." *Wireless Personal Communications* (2021): 1-14.
[11] Zhang, Hong, and Xinxin Lu. "Vehicle communication network in intelligent transportation system based on internet of things." *Computer Communications* 160 (2020): 799-806.
[12] Motlagh, Naser Hossein, Tarik Taleb, and Osama Arouk. "Low-altitude unmanned aerial vehicles-based internet of things services: Comprehensive survey and future perspectives." *IEEE Internet of Things Journal* 3.6 (2016): 899-922.
[13] Gaddour, Olfa, and Anis Koubâa. "RPL in a nutshell: A survey." *Computer Networks* 56.14 (2012): 3163-3178.
[14] Dey, Amlan Jyoti, and Hiren Kumar Deva Sarma. "Routing techniques in internet of things: a review." *Trends in Communication, Cloud, and Big Data* (2020): 41-50.
[15] Manuel, Asha Jerlin, et al. "Optimization of routing-based clustering approaches in wireless sensor network: Review and open research issues." *Electronics* 9.10 (2020): 1630.
[16] Thyagarajan, Jayavignesh, and Suganthi Kulanthaivelu. "A joint hybrid corona based opportunistic routing design with quasi mobile sink for IoT based wireless sensor network." *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* 12.1 (2021): 991-1009.
[17] Singh, Fateh, J. K. Vijeth, and C. Siva Ram Murthy. "Parallel opportunistic routing in IoT networks." *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. IEEE, 2016.
[18] Sharifian, Zakieh, et al. "LOADng-AT: a novel practical implementation of hybrid AHP-TOPSIS algorithm in reactive routing protocol for intelligent IoT-based networks." *The Journal of Supercomputing* (2022): 1-49.
[19] Kothandaraman, D., et al. "Design of an optimized multicast routing algorithm for internet of things." *Int J Recent Technol Eng* 8.2 (2019): 4048-4053.
[20] Gulati, Kamal, et al. "A review paper on wireless sensor network techniques in Internet of Things (IoT)." *Materials Today: Proceedings* (2021).
[21] Rafique, Wajid, et al. "Complementing IoT services through software defined networking and edge computing: A comprehensive survey." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 22.3 (2020): 1761-1804.

[22] Bedi, Guneet, et al. "Review of Internet of Things (IoT) in electric power and energy systems." *IEEE Internet of Things Journal* 5.2 (2018): 847-870.
[23] Zanaj, Eljona, et al. "Energy Efficiency in Short and Wide-Area IoT Technologies—A Survey." *Technologies* 9.1 (2021): 22.
[24] Ma, Dong, et al. "Sensing, computing, and communications for energy harvesting IoTs: A survey." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 22.2 (2019): 1222-1250.
[25] Gopika, D., and Rukmani Panjanathan. "Energy efficient routing protocols for WSN based IoT applications: A review." *Materials Today: Proceedings* (2020).
[26] Clausen T, Yi J, Herberg U. Lightweight on-demand ad hoc distance-vector routing-next generation (LOADng): protocol, extension, and applicability. Computer Networks. 2017 Oct 24;126:125-40.
[27] Machado K, Rosário D, Cerqueira E, Loureiro AA, Neto A, De Souza JN. A routing protocol based on energy and link quality for internet of things applications. sensors. 2013 Feb;13(2):1942-64.
[28] Duquennoy S, Landsiedel O, Voigt T. Let the tree bloom: Scalable opportunistic routing with orpl. InProceedings of the 11th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems 2013 Nov 11 (pp. 1-14).
[29] Hong S, Kim D, Ha M, Bae S, Park SJ, Jung W, Kim JE. SNAIL: an IP-based wireless sensor network approach to the internet of things. IEEE Wireless Communications. 2010 Dec 23;17(6):34-42.
[30] Eloudrhiri Hassani, Abdelhadi, Aicha Sahel, and Abdelmajid Badri. "IRH-OF: A New Objective Function for RPL Routing Protocol in IoT Applications." *Wireless Personal Communications* 119.1 (2021): 673-689.
[31] Raj, Jennifer S., and Abul Basar. "QoS optimization of energy efficient routing in IoT wireless sensor networks." *Journal of ISMAC* 1.01 (2019): 12-23.
[32] Debroy, Saptarshi, et al. "SpEED-IoT: Spectrum aware energy efficient routing for device-to-device IoT communication." *Future Generation Computer Systems* 93 (2019): 833-848.
[33] Shukla, Anurag, and Sarsij Tripathi. "An effective relay node selection technique for energy efficient WSN-assisted IoT." *Wireless Personal Communications* 112.4 (2020): 2611-2641.
[34] Fotouhi H, Moreira D, Alves M. mRPL: Boosting mobility in the Internet of Things. Ad Hoc Networks. 2015 Mar 1;26:17-35.
[35] Sharma, Pratibha, Vinod Kumar Jain, and Avesh Kumar Uprawal. "EMAEER: Enhanced Mobility Aware Energy Efficient Routing Protocol for Internet of Things." *2018 Conference on Information and Communication Technology (CICT)*. IEEE, 2018.
[36] Serhani, Abdellatif, Najib Naja, and Abdellah Jamali. "AQ-Routing: mobility-, stability-aware adaptive routing protocol for data routing in MANET–IoT systems." *Cluster Computing* 23.1 (2020): 13-27.
[37] Saha, Niloy, Samaresh Bera, and Sudip Misra. "Sway: Traffic-aware QoS routing in software-defined IoT." *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing* 9.1 (2018): 390-401.
[38] Arat, Ferhat, and Sercan Demirci. "Energy and QoS aware analysis and classification of routing protocols for IoT and WSN." *2020 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE)*. IEEE, 2020.
[39] Kumar, Prashant, et al. "fybrrLink: Efficient QoS-aware Routing in SDN enabled Future Satellite Networks." *IEEE Transactions on Network and Service Management* (2021).
[40] Wang, Feng, Eduard Babulak, and Yongning Tang. "SL-RPL: Stability-aware load balancing for RPL." *Transactions on Machine Learning and Data Mining* 13.1 (2020): 27-39.

[41] Farag, Hossam, and Cedomir Stefanovic. "Congestion-Aware Routing in Dynamic IoT Networks: A Reinforcement Learning Approach." *arXiv preprint arXiv:2105.09678* (2021).
[42] Praveen, K. V., and P. M. Prathap. "Energy Efficient Congestion Aware Resource Allocation and Routing Protocol for IoT Network using Hybrid Optimization Techniques." *Wireless Personal Communications* 117.2 (2021): 1187-1207.
[43] Mahajan, Hemant B., Anil Badarla, and Aparna A. Junnarkar. "CL-IoT: cross-layer Internet of Things protocol for intelligent manufacturing of smart farming." *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* 12.7 (2021): 7777-7791.
[44] Mahajan, Hemant B., and Anil Badarla. "Cross-layer protocol for WSN-assisted IoT smart farming applications using nature inspired algorithm." *Wireless Personal Communications* 121.4 (2021): 3125-3149.
[45] Kalyani, G., and Shilpa Chaudhari. "Cross Layer Security MAC Aware Routing Protocol for IoT Networks." *Wireless Personal Communications* (2021): 1-23.
[46] Hoghooghi, Samaneh, and Ramin Nasr Esfahani. "Mobility-Aware Parent Selection for Routing Protocol in Wireless Sensor Networks using RPL." *2019 5th International Conference on Web Research (ICWR)*, pp. 79-84, 2019.
[47] Singh, Parmod, and Yaw-Chung Chen. "RPL Enhancement for a Parent Selection Mechanism and an Efficient Objective Function." *IEEE Sensors Journal* 19.21 (2019): 10054-10066.
[48] Thubert, P., and M. C. Richardson. "Routing for RPL (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks) Leaves." *Work in Progress, Internet-Draft, draft-ietfroll-unaware-leaves-30* 22 (2021).
[49] Preeth, S. K., et al. "An adaptive fuzzy rule based energy efficient clustering and immune-inspired routing protocol for WSN-assisted IoT system." *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* (2018): 1-13.
[50] Aimtongkham, Phet, Paramate Horkaew, and Chakchai So-In. "Multistage fuzzy logic congestion-aware routing using dual-stage notification and the relative barring distance in wireless sensor networks." *Wireless Networks* 27.2 (2021): 1287-1308.
[51] Chithaluru, Premkumar, et al. "An energy-efficient routing scheduling based on fuzzy ranking scheme for internet of things (IoT)." *IEEE Internet of Things Journal* (2021).
[52] Jaiswal, Kavita, and Veena Anand. "EOMR: An energy-efficient optimal multi-path routing protocol to improve QoS in wireless sensor network for IoT applications." *Wireless Personal Communications* 111.4 (2020): 2493-2515.
[53] Adil, Muhammad. "Congestion free opportunistic multipath routing load balancing scheme for Internet of Things (IoT)." *Computer Networks* 184 (2021): 107707.
[54] Khaleghnasab, Rogayye, et al. "A new energy-efficient multipath routing in internet of things based on gray theory." *International Journal of Information Technology & Decision Making* 19.06 (2020): 1581-1617.
[55] Guo, Xuancheng, et al. "Deep-reinforcement-learning-based QoS-aware secure routing for SDN-IoT." *IEEE Internet of things journal* 7.7 (2019): 6242-6251.
[56] Muthanna, Mohammed Saleh Ali, et al. "Deep reinforcement learning based transmission policy enforcement and multi-hop routing in QoS aware LoRa IoT networks." *Computer Communications* 183 (2022): 33-50.
[57] Magadum, Ashish A., Aatish Ranjan, and D. G. Narayan. "DeepQoSR: A Deep Reinforcement Learning based QoS-Aware Routing for Software Defined Data Center Networks." *2021 12th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*. IEEE, 2021.