دوازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran
senaconf.ir

مروری بر حوزه ارتباطات اینترنت اشیاء (با تمرکز بر کاربردهای شهر هوشمند)

محسن مظفری وانانی*[1]، محمد حاجی حسنی[2]، حسین محسنی فر[3]، علیرضا فروزنده نژاد[4]

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

[2] گروه مهندسی هوش مصنوعی و رباتیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی واحد تهران، تهران، ایران،
Mohamadhajihasani74@gmail.com

[3] گروه مدیریت کسب و کار، دانشکده مدیریت، دانشگاه خوارزمی واحد تهران، تهران، ایران،
Hosseinmohsenifar@khu.ac.ir

[4] گروه هوش ماشین و رباتیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، ایران،
A.forouzandeh@ut.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر اینترنت اشیاء (**IoT**) پیشرفت‌های بی‌نظیر داشته و به یکی از مهم‌ترین فناوری‌های ارتباطی عصر کنونی تبدیل شده است. این شبکه‌ها بنابر قابلیت‌های گسترده که فراهم نموده در کاربردهای مختلفی استفاده شده و روز به روز به این کاربردها افزوده می‌شود. **IoT** به دلیل توزیع‌شدگی و از سوی دیگر به دلیل خصوصیات خاصی از جمله توپولوژی متغیر، تبادل چندگامی و بی‌سیم بودن مبادلات، به شدت در قبال حوزه ارتباطات چالش‌انگیز و پر مخاطره است. ازاین‌رو تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه مهم معرفی شده‌اند. اگرچه این تحقیقات هر یک به نحوی در بهبود ارتباطات **IoT** موفق بوده‌اند، اما مطالعات حاکی از وجود برخی چالش‌های کلیدی در این زمینه است. در این مقاله قصد بر آن بوده تا یک بررسی جامعی بر حوزه ارتباطات **IoT** (با تمرکز بر کاربردهای شهر هوشمند) انجام و ارائه شود. بدین جهت در ابتدا به بحث ارتباطات در **IoT** و به طور دقیق‌تر شهر هوشمند پرداخته شده و در ادامه انواع تکنیک‌های کاربردی برای این حوزه معرفی و بررسی خواهند شد. سپس تعدادی از مهم‌ترین تحقیقات گذشته معرفی و از دیدگاه‌های مختلف تحلیل و تشریح خواهیم نمود. در پایان مقاله نتیجه‌گیری شده، مهم‌ترین چالش‌های موجود معرفی و پیشنهاداتی برای رفع آن‌ها ارائه خواهد شد.

کلمات کلیدی

اینترنت اشیاء، کاربردهای شهر هوشمند، ارتباطات، قابلیت اطمینان.

۱. مقدمه

ایده‌ی اولیه شبکه‌های اینترنت اشیاء یا همان IoT، توسط فردی به نام کوین شتون (سال ۱۹۹۸) معرفی گردید. هدف این تکنولوژی ارتباطی فراهم‌سازی سازوکاری بوده که از طریق آن بتوان در هر زمان و هر مکان به اشیاء فیزیکی، پدیده‌ها و در مجموع هر موجودیت عضو شبکه، دسترسی داشته و آن‌ها را سازمان‌دهی و مدیریت کرد. بدین منظور از اطلاعات مربوط به گره‌های شبکه (شناسه و آدرس هر گره)، برای اتصال به اعضای شبکه و مدیریت آن‌ها استفاده می‌شود. شایان ذکر است که هر موجودیت عضو شبکه IoT، مجهز به حسگرها و آنتن‌های رادیویی بوده، و دارای آدرس الکترونیکی (هویت دیجیتال) منحصر به فردی هستند [۱و۲]. این هویت دیجیتال منحصر به فرد قابلیت تفکیک اشیاء از یکدیگر را فراهم نموده و می‌توان به کمک آن به هر شیء و عضو خاصی از شبکه دسترسی یافته و آن را مدیریت نمود. شبکه‌های IoT بنابر خصایص متمایز و ویژگی‌های خاص، مزایا و قابلیت‌های فراوانی را فراهم ساخته که تاکنون در هیچ شبکه دیگری چنین قابلیت‌هایی فراهم نشده است. از مهم‌ترین این خصوصیات می‌توان به مواردی اعم از توزیع‌شدگی کامل ساختار شبکه، مقیاس‌پذیری بالا، بی‌نیاز به قدرت کنترلرکننده مرکزی وزیرساخت‌های ثابت، توپولوژی پویا، هزینه‌های بسیار پایین و همبستگی عناصر ناهمگن را اشاره نمود. وجود این ویژگی‌های خاص در کنار سایر مزایای اینترنت اشیاء، باعث شده تا این شبکه‌ها در کاربردهای گسترده‌ای استفاده شده و روز به روز به کاربردها و اهمیت آن‌ها افزوده شود [۳و۴]. پیشرفت این تکنولوژی ارتباطی تا جایی بوده که در آینده‌ای بسیار نزدیک به عنوان یک بستر جهانی عرضه خواهند شد [۵]. اما در سمت مقابل همین خصوصیات منحصر به فرد، مشکلات و مسائل متعددی را نیز برای اینترنت اشیاء در پی داشته است. یکی از کلیدی‌ترین و حائز اهمیت‌ترین این مسائل در ارتباط با مبحث ارتباطات و پشتیبانی از قابلیت اطمینان ارتباطات می‌باشد. ارتباطات و بحث قابلیت اطمینان در IoT مفهومی بسیار متمایز از سایر شبکه‌های سیمی و بی‌سیم داشته و پشتیبانی از آن نیازمند ضرورت‌ها و نیازهایی متمایز است. اساس تمرکز مطالعات پژوهش جاری را بررسی این حوزه با رویکرد قابلیت اطمینان (به ویژه بحث قابلیت اطمینان ارتباطات در شهر هوشمند) تشکیل می‌دهد [۶و۷].

ادامه ساختار مقاله بدین شرح می‌باشد. در بخش دوم به معرفی شهر هوشمند به عنوان یکی از کاربردهای مهم IoT پرداخته خواهد شد. در بخش سوم مفهوم ارتباطات و انواع آن روش‌های مسیریابی معرفی خواهند گردید. در ادامه بحث قابلیت اطمینان به خصوص قابلیت اطمینان مسیریابی و ارتباطات در این کاربردها تشریح خواهد شد. سپس تعدادی از مهم‌ترین تحقیقات گذشته را معرفی نموده و یک دسته‌بندی جدیدی برای آن‌ها معرفی خواهیم نمود. در ادامه مهم‌ترین چالش‌های پیش‌روی حوزه ارتباطات شهر هوشمند معرفی شده و پیشنهاداتی به منظور رفع آن‌ها عنوان خواهد گردید. سرانجام در بخش پایانی مقاله نتیجه‌گیری و جمع‌بندی خواهد گردید.

۲. کاربردهای شهر هوشمند IoT

IoT بنابر قابلیت‌های بی‌نظیری که فراهم می‌سازند، در عرصه‌های کاربردی گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یکی از مهم‌ترین زمینه‌های کاربردی این تکنولوژی استفاده در شهر هوشمند می‌باشد. شهر هوشمند را می‌توان به عنوان فضایی خلاق تعریف نمود که هدف آن بهبود کیفیت زندگی انسان‌ها است. شهر هوشمند با ایده بهبود مدیریت و هوشمندسازی جوامع شهری مطرح گردیده است. مدیریت سیستم شهری فعلی با مسائل فراوانی از جمله کارایی پایین، عدم سازگاری با محیط زیست، امنیت پایین، عدم قابلیت اطمینان و صدها مسئله دیگر مواجه است. شهر هوشمند به دنبال افزایش کارایی و بهبود کیفیت خدمات شهری برای کاهش ضایعات به واسطه استفاده از فناوری اطلاعات و ارتباطات اینترنت اشیا است [۸].

شایان ذکر است که شهر هوشمند به دلیل کاربردهای حساس و مهم (استفاده در مسائل مالی، تراکنش‌های اقتصادی، تجاری و غیره) در قیاس با سایر کاربردهای IoT، بسیار بیشتر نیازمند تدابیری برای پشتیبانی از قابلیت اطمینان به خصوص اطمینان از مسیریابی و مبادلات است [۹].

در کاربردهای شهر هوشمند IoT هر موجودیت عضوی شبکه دارای یک شناسه دیجیتالی یکتا و منحصر به فرد است که از طریق آن از سایر گره‌ها متمایز شده و به صورت مجزا قابلیت مدیریت است. این مدیریت مجزا در کنار گستردگی و سایر مسائل مرتبط با کاربردهای شهر هوشمند اینترنت اشیا، باعث شده تا تمامی مفاهیم رایج در سایر شبکه‌های موجود (از قبیل امنیت، کیفیت سرویس‌دهی، قابلیت اطمینان، اعتماد، تحمل-پذیری خطا و غیره) نیز در این شبکه‌ها از جنبه‌ها و زوایای دیگر مطرح باشند [۱۰].

یکی از اساسی‌ترین این مسائل، در ارتباط با بحث قابلیت اطمینان و چگونگی پشتیبانی از قابلیت اطمینان مسیریابی و ارتباطات شبکه مطرح بوده که در ادامه به‌طور تخصصی‌تر تشریح شده است.

کاربردهای شهر هوشمند اینترنت اشیا بنابر ویژگی‌های متمایز و خاص خود، و همچنین با توجه به جدید بودن فناوری‌ها و تکمیل نبودن الگوریتم-ها و استانداردها، با مشکلات و مسائل متعددی مواجه است. وجود این مشکلات و چالش‌ها، باعث جلب توجه محققین بسیاری به این شبکه‌ها شده که هدف تمامی آن‌ها رفع این چالش‌ها و بهبود کارایی شبکه بوده است. از مهم‌ترین این چالش‌ها می‌توان به مسئله ارتباطات و تأمین قابلیت اطمینان ارتباطات بین گره‌های شبکه اشاره نمود. کاربردهای شهر هوشمند اینترنت اشیا از یک طرف به دلیل جدید بودن و تکمیل نبودن پروتکل‌ها و استانداردهای ارتباطی، و از سوی دیگر به دلیل خصایص خاص و محدودیت‌های فراوان، به شدت در ازاء پشتیبانی از قابلیت اطمینان ارتباطات چالش‌انگیز هستند. این در صورتی است که بخش عظیمی از کاربردهای اینترنت اشیا به ویژه شهر هوشمند، کاربردهای حساس و پر اهمیت هستند. ازاین‌رو اساسی‌ترین نیاز و ضرورت چنین کاربردی، تأمین قابلیت اطمینان از ارتباطات است تا در قبال آن پایداری و پیوستگی عملکرد شبکه تضمین گردد [۱۱و۱۲]. بر همین اساس می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که کاربردهای شهر هوشمند اینترنت اشیاء، از لحاظ ماهیت و ویژگی‌ها محدود بوده و از این نظر در تأمین قابلیت اطمینان ارتباطات ناکارآمدند. در سوی مقابل این عرصه کاربردی، عرصه‌ای بسیار حساس و حائز اهمیت بوده که می‌بایست تا حد امکان قابلیت اطمینان ارتباطات و تبادلات در این کاربردها تأمین شود. بررسی این دو مقوله، بر ضرورت نیاز به تمهیداتی هدفمند برای پشتیبانی از قابلیت اطمینان ارتباطات و پوشش چالش‌های این حوزه دلالت دارد. بر همین اساس و با توجه به جایگاه بسیار پر اهمیت بحث ارتباطات در کاربردهای شهرهوشمند، تاکنون مقالات متعددی در ارتباط با این مقوله و در راستای بهبود آن معرفی گردیده‌اند [۱۷-۱۳]. در این مقاله قصد بر گردآوری و مروری بر این حوزه می‌باشد با هدف شناسایی چالش‌های موجود و ارائه پیشنهاداتی به جهت رفع آن‌ها می‌باشد.

۳. ارتباطات در کاربردهای شهر هوشمند IoT

با توجه به آن‌که ارتباطات در شهر هوشمند، از ارتباطات در IoT پیروی می‌نماید، ازاین‌رو از ارتباطات حاکم بر IoT نیز می‌توان برای شهر هوشمند بهره برد. با توجه به این بحث ارتباطات در شهر هوشمند را می‌توان به سه صورت یک به یک، یک به چند، چند به یک به قرار زیر دسته بندی نمود [۱۸و۱۹].

- ارتباطات تک پخشی (ارتباطات یک به یک)

در این نوع ارتباط در دو سوی تبادل تنها یک گره قرار دارد. این نوع ارتباط زمانی استفاده شده که دو گره قصد مخابره داده با یکدیگر را دارند.

- ارتباطات چندتایی (چند به یک)

در این نوع ارتباط در یک سوی چند گره (گره‌های شبکه) و در سوی دیگر تبادل تنها یک گره قرار دارد (ریشه). این نوع ارتباط برای زمانی استفاده شده که چند گره قصد مخابره داده به یک گره خاص را دارند

- ارتباطات چندپخشی (یک به چند)

در این نوع ارتباط در یک سوی تبادل تنها یک (گره‌های شبکه) و در سوی دیگر تبادل تنها یک گره قرار دارد (گره ریشه). این نوع ارتباط برای زمانی استفاده شده که یک گره قصد مخابره داده به صورت همزمان برای چند گره را دارد.

از این سه نوع ارتباط ارتباطات چند به یک و یک به یک مستلزم مسیریابی بوده تا بر اساس آن بتوان چنین ارتباطاتی را محقق نمود. در بخش آتی بحث مسیریابی بحث و بررسی شده است.

۱.۳. مفهوم مسیریابی در شهر هوشمند

کاربردهای شهر هوشمند IoT اساساً ماهیتی توزیع شده دارند. ازاین‌رو روش‌های پیشنهادی برای پشتیبانی از ارتباطات گره‌های این شبکه‌ها نیز باید به نحوی طرح‌ریزی شده که عملکردی کاملاً توزیع شده داشته باشند. توجه شود که تمامی داده‌های گردآوری شده توسط گره‌های شبکه، بر خلاف سایر شبکه‌ها در کاربردهای شهر هوشمند تنها برای گره ریشه ارسال می‌شوند. اما شایان ذکر است تمامی اعضای شبکه قادر به برقراری ارتباط مستقیم با ریشه نیستند. ازاین‌رو مبادلات داده‌ها در IoT به صورت چندپرشی و با همکاری و مشارکت تمامی گره‌های شبکه انجام می‌شود. در چنین حالتی گره فرستنده به واسطه فرایند مسیریابی ابتدا مسیر مناسب را به گره ریشه شناسایی نموده و سپس از طریق مسیر مشخص شده مخابره داده‌ها انجام می‌شود. فرایند مخابره داده به این نحو است که گره مبدأ داده را برای گره همسایه خود در مسیر به ریشه ارسال نموده و این عمل توسط گره‌های همسایه نیز تکرار شده تا نهایتاً اطلاعت ارسالی توسط ریشه دریافت شوند [۲۰و۲۱].

همان‌گونه که اشاره شد، ارتباطات مستقیم بین گره‌های شبکه و ریشه امکان‌پذیر نمی‌باشد. این مسئله سه دلیل اساسی دارد. دلیل نخست این‌که برقراری ارتباط مستقیم بسیار مصرف انرژی بالایی دارد. این در حالی است که انرژی گره‌ها بسیار محدود است. دلیل دوم این‌که با افزایش فاصله بین فرستنده و گیرنده دید مستقیم بین دو گره وجود نداشته و از این نظر به هیچ وجه قابلیت مخابره مستقیم داده‌ها وجود نخواهد داشت. دلیل سوم این‌که افزایش قدرت انتقال برای ارسال مستقیم اطلاعات، باعث تأثیرات نامطلوب بر محیط شده که این تأثیرات اغلب مخرب بوده و قابل قبول نیستند. ازاین‌ور در کاربردهایی همچون کاربردهای شهر هوشمند IoT مبادلات به شکل چندپرشی انجام می‌شود [۲۲].

انواع روش‌های مسیریابی کاربردی در شهر هوشمند را از منظر استراتژی می‌توان به دو نوع جغرافیایی و مبنی بر همبندی بخش‌بندی نمود. شرح جزئیات این دو نوع استراتژی در ادامه ارائه شده است [۲۳و۲۴].

- جغرافیایی

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. انتخابات مسیریابی در این استراتژی با تمرکز بر موقعیت جغرافیایی گره‌ها انجام می‌شود. بزرگ‌ترین مزیت این استراتژی را می‌توان قابلیت اطمینان بالا و مقاومت در برابر تغییرات همبندی عنوان کرد.

- مبتنی بر همبندی

در این استراتژی مسیرها ابتدا به واسطه مبادلات داده‌های کنترلی شناسایی شده و در جداول ذخیره می‌شوند. در ادامه مخابره داده از طریق مسیرها شناسایی شده 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 (مبتنی بر تقاضا) و پیش فعال (جدول محور) به شرح زیر طبقه‌بندی می‌شوند [۲۵و۲۶].

- واکنشی (مبتنی بر تقاضا)

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.

- پیش‌فعال (جدول‌محور)

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

مباحث این بخش بررسی حوزه ارتباطات و بحث مسیریابی در IoT و شهر هوشمند را شامل می‌شود. در ادامه به بحث در ارتباط با قابلیت اطمینان مسیریابی و ارتباطات خواهیم پرداخت و این حوزه را بررسی خواهیم کرد.

۴. قابلیت اطمینان مسیریابی و ارتباطات

IoT بنابر قابلیت‌های گسترده‌ای که فراهم ساخته، امروزه در زمینه‌های مختلفی استفاده شده، به‌طوری‌که اغلب این کاربردها به ویژه شهر هوشمند، کاربردهایی حساس و پر اهمیتی هستند. استفاده از این تکنولوژی در چنین کاربردهای حساس و ارزشمندی باعث شده تا اهمیت اطلاعات ارسالی در این کابردها بسیار زیاد باشد. از سوی دیگر کمبودها و کاستی‌های درگیر با IoT، منجر به آن شده تا این شبکه‌ها در تأمین و حمایت از قابلیت اطمینان تبادلات آسیب‌پذیر و پر مخاطره باشند [۲۷و۲۸]. این در حالی است که مسائلی همچون ارتباطات چندگامی و تغییرات توپولوژی به این چالش‌ها دامن زده و مبحث قابلیت اطمینان را امری بسیار مهم و در عین حال بسیار پیچیده نموده است. در ادامه به طور تخصصی‌تر بحث قابلیت اطمینان مسیریابی و ارتباطات شهر هوشمند نقد و بررسی گردیده است.

۱.۴. حمایت از قابلیت اطمینان ارتباطات و نقش آن در شهر هوشمند

همان‌گونه که اشاره شد یکی از مهم‌ترین کاربردهای IoT، کاربردهای شهر هوشمند است. استفاده گسترده، اهمیت بالا و ماهیت متمایز (از قبیل تغییرات معماری شبکه، محدودیت‌های شدید منابع و انرژی، ارتباطات متفاوت)، منجر تمایز این کاربرد از سایر کاربردها گردیده، که بنابر قابلیت‌های بی‌نظیر خود در عصر کنونی بسیار جلب توجه نموده‌اند. شهر هوشمند یکی از ابزارهای بسیار مهم و مؤثر در حوزه مدیریت وضعیت شهرها محسوب شده و دنیای امروزی را متحول نموده‌اند. این فناوری شامل مجموعه‌ای گره‌های حسگر بوده که این عناصر به روزی اشیاء فیزیکی قرار می‌گیرند. وظیفه این عناصر بررسی و گزارش اطلاعات به امکان و مراکز مربوطه است. جدید بودن این فناوری خاص و حائز اهمیت (تکمیل نبودن تکنولوژی آن‌ها)، در کنار ماهیت و معماری منحصر به فرد، و محدودیت‌های شدید، چالش‌ها و معضل‌های فراوانی را برای این شبکه‌ها مطرح نموده است. یکی از اساسی‌ترین چالش‌های این فناوری جدید که به نوعی مهم‌ترین ضرورت آن نیز محسوب می‌شود، تأمین و تضمین قابلیت اطمینان از ارتباطات می‌باشد [۳۱-۲۹].

پشتیبانی از قابلیت اطمینان به خصوص در ارتباط با مقوله مسیریابی و مبادله اطلاعات، با توجه به اهمیت بسیار بالای اطلاعات ارسالی در این فناوری (اطلاعات حیاتی مرتبط با زندگی انسان‌ها)، مقوله‌ای بسیار حیاتی بوده که قابل پوشش توسط گره‌های شبکه و الگوریتم‌های موجود نمی‌باشد. پشتیبانی از قابلیت اطمینان در این فناوری ارتباطی از دو دیدگاه مختلف قابل نقد و بررسی است. دیدگاه نخست در ارتباط با اهمیت اطلاعات ارسالی مطرح می‌باشد. از آن‌جایی که اطلاعات ارسالی در این فناوری، شامل اطلاعات مرتبط با زندگی انسان‌ها می‌باشد، ازاین‌رو قابلیت اطمینان از مبادلات داده‌ها، جایگاه بسیار ارزشمندی داشته و به عنوان ضرورتی انکارناپذیر در این فناوری محسوب می‌شود [۳۲و۳۳]. دیدگاه دوم در ارتباط با ماهیت و خصوصیات این فناوری مطرح و مورد توجه می‌باشد. از این دیدگاه، قابل توجه است که در کاربردهای شهر هوشمند، بر خلاف سایر فناوری‌های موجود گره‌های بسیار محدود، منابع ناچیز و توپولوژی شبکه است. این خصوصیات رخداد خطا و ناپایداری را افزایش داده، و مبحث قابلیت اطمینان را پر مخاطره و چالش‌انگیز می‌نماید [۳۴و۳۵]. از طرفی عناصر شبکه (گره‌ها) با کمبودها و کاستی‌های فراوانی همراه بوده که این محدودیت‌ها در کنار مبادلات چندپرشی داده‌ها، منجر به تشدید چالش‌ها و معضل‌های مرتبط با تأمین قابلیت اطمینان شده است. ازاین‌رو و با توجه به دو دیدگاه نقد شده، یکی از مهم‌ترین مباحث این فناوری ارتباطی، مبحث قابلیت اطمینان به خصوص در ارتباط با مسیریابی و مبادلات اطلاعات شبکه می‌باشد [۳۱و۳۴]. بر اساس همین اهمیت و با توجه به وجود چالش‌های مختلف در این حوزه، تاکنون تحقیقات گسترده‌ای به ویژه در راستای بهبود اطمینان برای این کاربرد معرفی شده که به نوعی بر اهمیت بالای این حوزه تحقیقاتی اشاره دارد. اما مطالعات حاکی از آن است که همچنان برخی چالش‌های اساسی در این زمینه به قوت خود باقی بود که در بخش آتی به بحث در این باره پرداخته خواهد شد.

پیش از پرداختن به تحقیقات گذشته در ابتدا پروتکل RPL (به عنوان پر کاربردترین پروتکل مسیریابی کاربردی در IoT و شهر هوشمند) را معرفی و از دیدگاه قابلیت اطمینان ارزیابی خواهیم نمود. سپس به بحث در ارتباط با تحقیقات گذشته خواهیم پرداخت.

۵. پروتکل RPL و نقش قابلیت اطمینان بر عملکرد آن

بنابر آن‌چه در ارتباط با اهمیت بحث مسیریابی و تبادلات در شهر هوشمند ارائه و عنوان شد، تاکنون پروتکل‌ها متعددی برای بهبود این مقوله معرفی شده‌اند [۲۶و۳۶-۳۹]. هر یک از این پروتکل‌ها بنابر مزایای و ویژگی‌های منحصر به فرد خود، دارای معایب و قابلیت‌های منحصر به فردی هستند. اما در این میان تنها پروتکل RPL به عنوان پروتکل استاندارد مسیریابی برای IoT و کاربردهای شهر هوشمند 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 DIO (DODAG information object)، DIS (DODAG information solicitation) و DAO (Destination advertisement object)، استفاده کرده تا به واسطه ارسال و دریافت آن‌ها گراف ارتباطی DODAG ایجاد شود. RPL بر پایه اشتراک‌گذاری پیام‌های DIO و DAO گراف ارتباطی شبکه را ایجاد نموده و در ادامه با استفاده از بسته‌های DIS تغییرات گراف DODAG را مدیریت می‌کند [۱۳].

علاوه بر این RPL ارتباطات مختلف بین گره‌ها و گره ریشه را پشتیبانی کرده و برای کاربردهای 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 به عنوان استاندارد مسیریابی برای IoT پذیرفته شده و بر همین اساس پژوهش‌های گسترده‌ای بر اساس این پروتکل طراحی و معرفی شده‌اند. هدف بخش عمده‌ای از این تحقیقات بهبود قابلیت اطمینان مسیریابی و مبادلات داده‌ها تحت عملکرد RPL است. زیرا که این پروتکل هیچ‌گونه تدابیری را برای حمایت از قابلیت اطمینان فراهم نمی‌سازد. در ادامه به طور دقیق‌تر این تحقیقات بحث و بررسی شده‌اند.

۶. مروری بر تحقیقات پیشنهادی در حوزه بهبود قابلیت اطمینان ارتباطات

در این بخش تعدادی از مهم‌ترین روش‌های پیشنهادی در حوزه بهبود قابلیت اطمینان مسیریابی و ارتباطات IoT و شهر هوشمند، به خصوص روش‌های توسعه یافته بر پایه RPL معرفی و از لحاظ طراحی و عملکرد بررسی شده‌اند.

در [۴۱و۴۲]،Gormus و همکارانش یک نسخه بهبودیافته از RPL تحت عنوان ORPL (Opportunistic RPL) معرفی کردند. ایده پروتکل ORPL بر این اصل استوار است که از گره‌هایی که DIO دریافت شده به عنوان والد ذخیره شوند و در ادامه برای ارسال داده به سمت ریشه از تمامی آن‌ها با هدف افزایش قابلیت اطمینان استفاده شود. این روش در بهبود قابلیت اطمینان مؤثر بوده ولی سربارهای بالایی را به شبکه تحمیل می‌کند. در [۴۳] Nassar و همکارانش روشی را تحت عنوان MIQR-RPL (Multiple Instances QoS Routing in RPL) پیشنهاد کردند. این روش بر مبنای ارزیابی چندمعیاری توسعه یافته و هدف آن بهبود کیفیت تبادلات است. این روش در بهبود کیفیت موفق بوده ولی قابلیتی را بر تحمل‌پذیری خطا فراهم نمی‌کند. در [۴۴] Sebastian روش دیگری را تحت عنوان Ch-LBRPL (Child Count Based Load Balancing in Routing Protocol) پیشنهاد کردند. این روش با تمرکز بر تعادل ساختار گراف ارتباطی توسعه یافته است. بر همین اساس برترین مزیت آن را می‌توان کنترل ازدحام عنوان کرد. ولی در عین حال سربارهای بالایی را به شبکه تحمیل می‌کند. در [۴۵] Gs روشی را تحت عنوان DMRPL (Dual Objectives Mobile IPv6 routing protocol for Low Power Lossy Network) پیشنهاد کرد. DMRPL با هدف بهبود قابلیت اطمینان طراحی شده و قابلیت کاربرد در شبکه‌ها سیار را نیز فراهم می‌سازد. از برترین مزایای این روش می‌توان به کاربرد در شبکه‌های سیار را عنوان کرد. اما قابلیتی برای حمایت مؤثر از کیفیت پیش‌بینی نشده است. در [۵۴] نیز همین رویکرد دنبال شده است. در [۴۶] Mahmud و همکارن روشی را تحت عنوان IRPL (Improved RPL for IoT Applications) معرفی کردند.

این روش به بررسی قابلیت اطمینان گره‌ها بر حسب کیفیت سیگنال پرداخته و از این نظر در ایجاد گرافی با پیوندهای با کیفیت مثمرثمر بوده است. در [۴۷] Rafea و همکارنش روشی را تحت عنوان ETRPL (Energy Threshold RPL) معرفی کردند. ETRPL یک روش انرژی محور بوده و برترین مزیت آن افزایش طول عمر شبکه است. اما در عین حال قابلیتی را برای حمایت از کیفیت سرویس‌دهی فراهم نمی‌سازد. در [۴۸] و [۴۹] به ترتیب Aslani و همکارن، Singh و همکارن روش‌هایی را تحت عنوان Coop-RPL (Cooperative Approach to RPL-based Routing in Smart Grid AMI Networks) و E-RPL (Enhanced RPL base on objective function for efficient routing) معرفی کردند. این روش‌ها بر حسب ارزیابی چندمعیاری توسعه یافته و از این نظر در بهبود قابلیت اطمینان از ارتباطات موفق بوده است. اما روش‌های بهینه‌ای نیستند. در [۵۰] kaviani و همکارنش و در [۵۱] Aissal و همکارنش مکانیزمی را با نام CQARPL (Congetion and QoS Aware RPL for IoT Applications Under Heavy Traffic) به منظور بهبود مدیریت ترافیک پیشنهاد دادند. انتخابات مسیریابی در CQARPL با تمرکز بر ارزیابی معیارهای مختلف با بهره‌وری از تکنیک تاپسیس انجام می‌شود. در [۵۲] و [۵۳] به ترتیب Kheaksong و همکارن و Elappiala و همکارنش روش‌هایی با نام MCPSCR (Multicriteria Parent Selection Using Cognitive Radio) و SPRPL (SPR adapted RPL) پیشنهاد کردند. نتایج حاکی از بهبود قابلیت اطمینان و افزایش دریافت‌های موفق است. اما از معایب آن‌ها می‌توان به سربارهای بالا و عدم تحمل‌پذیری خطا را اشاره نمود. Sankar و همکارانش [۵۵]، Acevedo و همکاران [۵۶] و Lalani و همکارانش [۵۷]، به ترتیب روش‌هایی به نام EGDASRPL (Energy-aware Grid-based Data Aggregation Scheme in Routing)، WRFRPL (Weighted Random Forward RPL for High Traffic And Energy Demanding Scenarios) و PEARL (Power and Delay-Aware Learning-based Routing Policy for IoT Applications) معرفی شده است. این روش‌ها به ترتیب بر اساس بخش‌بندی، توازن ترافیک و الگوریتم یادگیری Q طراحی شده و هدف آن‌ها مدیریت مصرف انرژی می‌باشد. Hassani و همکارانش در [۵۸] و [۵۹] به ترتیب روش‌هایی با نام FTCOF (Forwarding Traffic Consciousness Objective Function for RPL Routing Protocol) و IRHOF (QoS-Centric Fault-Resilient Routing Protocol for Mobile-WSN Based Low Power Lossy Networks) با تمرکز بر بهینه‌سازی تابع هدف RPL معرفی نمودند. در این روش‌ها به چالش‌های ناشی از تک پارامتری بودن تابع هدف پروتکل RPL پرداخته شده و تلاش بر بهبود بر پایه ارزیابی چندپارمتری بوده است. در [۶۰]، [۶۱]، [۶۲] و [۶۳] نیز همین رویکرد دنبال شده است. در [۶۴] Homaei و همکارانش، در [۶۵] Fatemifar و همکارانش، در [۶۶] Charles و همکاران و در [۶۷] Fazli و همکاران به ترتیب روش‌هایی با نام DDSLARPL (Dynamic Decision System Based on Learning Automata in the RPL Protocol for Achieving QoS)، QURPL (queue-based routing protocol)، RLQRPL (reliable link quality-based RPL routing) و V-RPL (An effective routing algorithm for low power and lossy networks using multi-criteria decision-making techniques) پیشنهاد شده است. هدف این روش‌ها بهبود کیفیت سرویس‌دهی بوده و در قبال این حوزه موفق بوده‌اند. اما اغلب عملکرد این روش‌ها باعث افزایش سربارهای کنترلی می‌شود.

۷. دسته‌بندی و ارزیابی تحقیقات مطالعه شده

بنابر آن‌چه در بخش قبل ارائه شد، تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در راستای بهبود قابلیت اطمینان و کیفیت مسیریابی و مبادلات داده تحت پروتکل RPL پیشنهاد شده‌اند. در این بخش این تحقیقات را در یک طرح پیشنهادی به قرار زیر طبقه‌بندی و ارزیابی خواهیم نمود.

- روش‌های متمرکز بر انرژی

از مهم‌ترین پژوهش‌های مرتبط با این حوزه می‌توان به [۴۷و۵۵و۵۷] 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 اغلب عملکردشان باعث افزایش تأخیر مبادلات داده‌ها می‌شود.

- روش‌های متمرکز بر پایداری

از راه‌کارهای مهم مرتبط با این حوزه می‌توان تحقیقات پیشنهادی در [۴۵و۴۶و۵۴] 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 اساسی‌ترین محدودیت‌های پیش‌روی این تحقیقات می‌توان به تأخیر بالا اشاره نمود.

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

تحقیقات معرفی شده در [۵۲و۵۳و۶۶] از تحقیقات مهمی بوده که با تمرکز بر ارزیابی کیفیت پیوندها 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 [۴۴و۵۰و۵۱و۵۶و۶۵] از پژوهش‌های مهمی بوده که با تمرکز بر بهبود مدیریت ترافیک و ازدحام طراحی و گسترش یافته‌اند. 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 چندمعیاری

از روش‌های مهم این حوزه می‌توان به [۴۳و۴۸و۴۹و۵۸-۶۲] 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 متمرکز بر هوش مصنوعی

تحقیقات پیشنهادی در [۳۲و۵۰و۶۳و۶۴و۶۷]، از جمله تحقیقاتی بوده که بر پایه توسعه 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)، منطق فازی، الگوریتم‌های یادگیری و سایر تکنیک‌های هوش مصنوعی انجام شده تا بر پایه بهره‌وری از قابلیت‌های این روش‌ها، کارایی و کیفیت مسیریابی را بهبود بخشید. نتایج حاصل از بررسی عملکرد این روش‌ها، بر بهبود QoS و بهینه‌سازی سربارهای 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.

- روش‌های چندمسیری

تحقیقات [۴۱و۴۲] از جمله روش‌هایی بوده که بر پایه مسیریابی چندمسیری یا در اصطلاح چندوالدی طراحی شده‌اند. در این روش‌ها به جای یک والد چندین والد انتخاب شده، به‌طوری‌که مهم‌ترین هدف از این انتخاب تضمین اطمینان از مخابره داده‌ها می‌باشد. 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 است.

در جدول (۱) دسته‌بندی‌های معرفی شده جمع‌بندی و از دیدگاه‌های مختلف ارزیابی گردیده‌اند.

جدول ۱. جزئیات دسته‌بندی انواع روش‌های مسیریابی

روش	مرجع	مهم‌ترین معیار تصمیم‌گیری	قابلیت	محدودیت
روش‌های متمرکز بر انرژی	[۴۷] [۵۵] [۵۷]	انرژی	بهینه‌سازی انرژی	عدم بهینگی مسیرهای مبادله داده، افزایش تأخیر
روش‌های متمرکز بر پایداری	[۴۵] [۴۶] [۵۴]	پایداری پیوند	بهبود پایداری مسیریابی و تبادلات داده‌ها	افزایش طول مسیرهای میانی
روش‌های مبتنی بر پیوند	[۵۲] [۵۳] [۶۶]	کیفیت اتصال	بهبود کیفیت سرویس‌دهی	افزایش سربارها و مصرف انرژی
روش‌های متمرکز بر ازدحام	[۴۴] [۵۰] [۵۱] [۵۶] [۶۵]	وضعیت ازدحام	کنترل و مدیریت ترافیک	ناکارآمدی در کاربرد با ترافیک پایین، سربار بالا
روش‌های چند پارامتری	[۴۳] [۴۸] [۴۹] [۵۸-۶۲]	میعار ترکیبی (برآیندی از چند شاخص)	افزایش کیفیت مسیریابی و مبادلات داده‌ها	افزایش مصرف انرژی و سربارهای کنترلی
روش‌های متمرکز بر هوش مصنوعی	[۳۲] [۵۰] [۶۳] [۶۴] [۶۷]	معیار حاصل از خروجی تکنیک هوش مصنوعی کاربردی	بهینه‌سازی و بهبود دقت در انتخابات مسیریابی	عدم همگرایی در برخی شرایط، پیچیدگی پیاده‌سازی
روش‌های چند مسیری	[۴۱] [۴۲]	اطمینان از ارسال	تضمین قابلیت اطمینان از ارسال داده‌ها	افزایش ترافیک زائد شبکه و مصرف انرژی

۸. مهم‌ترین مسائل پیش‌روی تحقیقات گذشته

بنابر آن‌چه تشریح شد، تحقیقات بسیاری در راستای بهبود قابلیت اطمینان مسیریابی و مبادلات معرفی شده‌اند. اما بررسی‌های انجام شده، حاکی از وجود برخی مسائل مهم حل نشده در ارتباط با این حوزه است. در یک بررسی کلی این چالش‌ها را می‌توان به سه دسته اصلی به شرح زیر معرفی نمود:

۱- نبود تدابیری برای تضمین تحمل‌پذیری خطا

با توجه به ماهیت کاربردهای شهر هوشمند و ارتباطات این شبکه‌ها، رخداد خطا در این ارتباطات اجتناب‌ناپذیر است. رخداد خطا تأثیرات مخرب زیادی بر عملکرد شبکه و به خصوص ارتباطات و مبادلات داده‌ها خواهد داشت. بر همین اساس نیاز به تدابیری بوده که حتی در صورت رخداد خطا پایداری و پیوستگی ارتباطات حفظ شود. این قابلیت در کارهای گذشته به خوبی مورد توجه قرار نگرفته است.

۲- سربارها و هزینه‌های بالا

اغلب روش‌های گذشته به منظور پیشبرد عملکردشان شبکه را با هزینه‌های بالای انرژی و سربارها همراه نموده که این مسئله باعث افت کارایی و کیفیت عملکرد آن‌ها می‌گردد. ازاین‌رو زمانی یک روش را موفق خواهد بود که علاوه بر حمایت مؤثر از قابلیت اطمینان تا حد امکان بهینه نیز باشد.

۳- نبود تدابیری برای پشتیبانی از قابلیت اطمینان انتها به انتها

در اغلب تحقیقات گذشته، ارزیابی قابلیت اطمینان و پیرو آن انتخابات مسیریابی به صورت گام به گام انجام می‌شود. به بیانی دیگر تنها شرایط گره‌های گام بعد ملاک انتخاب بوده و تدابیری برای بررسی وضعیت و قابلیت اطمینان مسیرها پیش‌بینی نشده است. این امر ممکن است در برخی شرایط منجر به انتخاب گره‌هایی گردیده که مسیرهای عبوری از آن‌ها مسیرهای نامناسبی باشند. رخداد چنین مسئله‌ای افزایش خطا و از دست رفتن داده و نهایتاً کاهش دریافت‌های موفق شبکه را در پی خواهد داشت. ازاین‌رو پیش‌بینی تدابیری به جهت ارزیابی شرایط مسیرها نیز الزامی می‌باشد.

۹. نتیجه گیری

در این مقاله، یک مطالعه جامعی بر تکنیک‌ها و روش‌های مسیریابی کاربردی در IoT و شهر هوشمند انجام و ارائه گردید. برای این منظور در ابتدا شهر هوشمند و بحث ارتباطات در این کاربردها نقد و بررسی گردید. در ادامه به تحلیل حوزه مسیریابی و انواع پروتکل‌های کاربردی برای این حوزه پرداخته شد. در یک تقسیم‌بندی کلی انواع استراتژی‌ها مسیریابی را از لحاظ ماهیت می‌توان به دو نوع موقعیت‌محور و مبتنی بر همبندی، از لحاظ عملکرد می‌توان به دو نوع مبتنی بر تقاضا و مبتنی بر جدول بخش‌بندی نمود. در ادامه ماله به طور تخصصی‌تر به بحث در ارتباط با قابلیت اطمینان و به خصوص قابلیت اطمینان مسیریابی و مبادلات داده‌ها پرداختند شد. پس از آن نیز تعدادی از مهم‌ترین تحقیقات پیشنهادی برای بهبود کیفیت و قابلیت اطمینان مسیریابی و مبادلات داده‌ها معرفی شده و این تحقیقات از دیدگاه‌های مختلف تحلیل و تشریح شدند. مطالعات پیرامون حوزه قابلیت اطمینان ارتباطات IoT و شهر هوشمند، حاکی از آن است که می‌توان با استفاده از روش‌هایی همچون تئوری بازی‌ها، تکنیک‌های چندمعیاری و الگوریتم‌های فرااکتشافی، قابلیت اطمینان مسیریابی و مبادلات داده‌ها را به طور قابل قبولی بهبود بخشید. از طرفی استفاده از روش‌های یادگیری و سایر تکنیک‌های هوش مصنوعی نیز می‌توانند برای بهینه‌سازی مسائل همچون سربارهای کنترلی و انرژی مؤثر باشند. این در حالی است که استفاده از تکنیک‌های پیش‌بینی می‌تواند در بهبود پایداری ارتباطات و افزایش قابلیت اطمینان مبادلات بسیار موثر باشد. اما در عین حال شایان ذکر است که با توجه به جدید بودن IoT و کاربردهای شهر هوشمند، هم‌چنان باید کارهای تحقیقاتی گسترده‌ای انجام شده تا بتواند نیازهای قابلیت اطمینام این شبکه‌ها را بر طرف کرد. علاوه بر این تفاوت‌ها و شرایط خاص حاکم بر بحث قابلیت اطمینان مسیریابی و ارتباطات، بیان‌گر ضرورت طراحی روش‌هایی متفاوت با قابلیت پوشش چالش‌ها و معضل‌ها مرتبط با این حیطه است.

مراجع

[1] Dey, A.J. and Sarma, H.K.D., 2020. Routing techniques in internet of things: a review. *Trends in Communication, Cloud, and Big Data*, pp.41-50.
[2] Marietta, J. and Mohan, B.C., 2020. A review on routing in internet of things. *Wireless Personal Communications*, *111*(1), pp.209-233.
[3] Silva, Bhagya Nathali, Murad Khan, and Kijun Han. "Internet of things: A comprehensive review of enabling technologies, architecture, and challenges." *IETE Technical review* 35.2 (2018): 205-220.
[4] Čolaković, A. and Hadžialić, M., 2018. Internet of Things (IoT): A review of enabling technologies, challenges, and open research issues. *Computer Networks*, *144*, pp.17-39.
[5] Asghari, P., Rahmani, A.M. and Javadi, H.H.S., 2019. Internet of Things applications: A systematic review. *Computer Networks*, *148*, pp.241-261.
[6] Alferidah, D.K. and Jhanjhi, N.Z., 2020. A Review on Security and Privacy Issues and Challenges in Internet of Things. *International Journal of Computer Science and Network Security IJCSNS*, *20*(4), pp.263-286.
[7] Ogonji, M.M., Okeyo, G. and Wafula, J.M., 2020. A survey on privacy and security of Internet of Things. *Computer Science Review*, *38*, p.100312.
[8] Talari, S., Shafie-Khah, M., Siano, P., Loia, V., Tommasetti, A. and Catalão, J.P., 2017. A review of smart cities based on the internet of things concept. *Energies*, *10*(4), p.421.
[9] Sharma, V., You, I., Andersson, K., Palmieri, F., Rehmani, M.H. and Lim, J., 2020. Security, privacy and trust for smart mobile-Internet of Things (M-IoT): A survey. *IEEE Access*, *8*, pp.167123-167163.
[10] Bhuiyan, Mohammad Nuruzzaman, et al. "Internet of things (IoT): a review of its enabling technologies in healthcare applications, standards protocols, security, and market opportunities." *IEEE Internet of Things Journal* 8.13 (2021): 10474-10498.
[11] Gulati, Kamal, et al. "A review paper on wireless sensor network techniques in Internet of Things (IoT)." *Materials Today: Proceedings* (2021).
[12] Zikria, Yousaf Bin, et al. "Next-generation internet of things (iot): Opportunities, challenges, and solutions." *Sensors* 21.4 (2021): 1174.
[13] Mohammadsalehi, Aliasghar, et al. "ARMOR: a reliable and mobility-aware RPL for mobile Internet of Things infrastructures." *IEEE Internet of Things Journal* 9.2 (2021): 1503-1516.
[14] Mo, Wen, et al. "A cloud-assisted reliable trust computing scheme for data collection in Internet of Things." *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 18.7 (2021): 4969-4980.
[15] Djamaa, Badis, et al. "Efficient and stateless P2P routing mechanisms for the Internet of Things." *IEEE Internet of Things Journal* 8.14 (2021): 11400-11414.
[16] Adil, Muhammad. "Congestion free opportunistic multipath routing load balancing scheme for Internet of Things (IoT)." *Computer Networks* 184 (2021): 107707.
[17] Zhang, Wenbo, et al. "SFPAG-R: A reliable routing algorithm based on sealed first-price auction games for industrial internet of things networks."*IEEE Transactions on Vehicular Technology* 70.5 (2021): 5016-5027.
[18] Raza, Naeem, et al. "Study of smart grid communication network architectures and technologies." *Journal of Computer and Communications* 7.03 (2019): 19.
[19] Zaidan, Aws Alaa, et al. "A survey on communication components for IoT-based technologies in smart homes." *Telecommunication Systems* 69.1 (2018): 1-25.

[20] Sinche, Soraya, et al. "A survey of IoT management protocols and frameworks." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 22.2 (2019): 1168-1190.
[21] Kabalci, Ersan, and Yasin Kabalci. "Introduction to smart grid architecture." *Smart grids and their communication systems*. Springer, Singapore, 2019. 3-45.
[22] Shah, Zawar, et al. "Routing protocols for mobile Internet of things (IoT): A survey on challenges and solutions." *Electronics* 10.19 (2021): 2320.
[23] 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.
[24] 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.
[25] 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.
[26] Gaddour, Olfa, and Anis Koubâa. "RPL in a nutshell: A survey." *Computer Networks* 56.14 (2012): 3163-3178.
[27] Pancaroglu, Doruk, and Sevil Sen. "Load balancing for RPL-based Internet of Things: A review." *Ad Hoc Networks* 116 (2021): 102491.
[28] Nayagi, D. Salangai, et al. "REERS: Reliable and energy-efficient route selection algorithm for heterogeneous Internet of things applications." *International Journal of Communication Systems* 34.13 (2021): e4900.
[29] Sinha, Bam Bahadur, and R. Dhanalakshmi. "Recent advancements and challenges of Internet of Things in smart agriculture: A survey." *Future Generation Computer Systems* 126 (2022): 169-184.
[30] Quy, Vu Khanh, et al. "A survey of QoS-aware routing protocols for the MANET-WSN convergence scenarios in IoT networks." *Wireless Personal Communications* 120.1 (2021): 49-62.
[31] Gopika, D., and Rukmani Panjanathan. "Energy efficient routing protocols for WSN based IoT applications: A review." *Materials Today: Proceedings* (2020).
[32] Rajawat, Anand Singh, et al. "Reliability Analysis in Cyber-Physical System Using Deep Learning for Smart Cities Industrial IoT Network Node." *AI and IoT for Smart City Applications*, 2022. 157-169.
[33] Haseeb, Khalid, et al. "Trust management with fault-tolerant supervised routing for smart cities using internet of things." *IEEE Internet of Things Journal* (2022).
[34] Biswal, Anil Kumar, et al. "Adaptive fault-tolerant system and optimal power allocation for smart vehicles in smart cities using controller area network." *Security and Communication Networks* 2021 (2021).
[35] Shamsi, Jawwad A. "Resilience in Smart City Applications: Faults, Failures, and Solutions." *IT Professional* 22.6 (2020): 74-81.
[36] 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.
[37] 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.
[38] 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).

[39] 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.
[40] Fathallah, Karim, Mohamed Amine Abid, and Nejib Ben Hadj-Alouane. "Enhancing energy saving in smart farming through aggregation and partition aware IoT routing protocol." *Sensors* 20.10 (2020): 2760.
[41] Gormus, S., Tosato, F., Fan, Z., Bocus, Z., & Kulkarni, P. (2014). Opportunistic RPL for reliable AMI mesh networks. *Wireless networks*, *20*(8), 2147-2164.
[42] Gormus, S., Fan, Z., Bocus, Z., & Kulkarni, P. (2011, December). Opportunistic communications to improve reliability of AMI mesh networks. In *2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies* (pp. 1-8). IEEE.
[43] Nassar, Jad, et al. "Multiple instances QoS routing in RPL: Application to smart grids." *Sensors* 18.8 (2018): 2472.
[44] Sebastian, A. (2020). Child Count Based Load Balancing in Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks (Ch-LBRPL). In *Smart Systems and IoT: Innovations in Computing* (pp. 141-157). Springer, Singapore.
[45] Kunal, G., & Hosahalli, D. (2018, September). Dual-Objectives Mobile-RPL Routing Protocol Based QoS Data Gathering over Low Power Lossy Networks for Smart City Applications: DMRPL. In *International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)* (pp. 1938-1946). IEEE.
[46] Mahmud, M. A., Abdelgawad, A., & Yelamarthi, K. (2018, August). Improved RPL for IoT Applications. In *2018 IEEE 61st International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)* (pp. 988-991).
[47] Rafea, S. A., & Kadhim, A. A. (2019). Routing with energy threshold for WSN-IoT based on RPL protocol. *Iraqi J. Comput. Commun. Control Syst. Eng*, *19*, 71-81.
[48] Aslani, Z., & Aijaz, A. (2017). COOP-RPL: a cooperative approach to RPL-based routing in smart grid AMI networks. *arXiv preprint arXiv:1706.05134*.
[49] Singh, P., & Chen, Y. C. (2019). RPL Enhancement for a Parent Selection Mechanism and an Efficient Objective Function. *IEEE Sensors Journal*, *19*(21), 10054-10066.
[50] Kaviani, Farzaneh, and Mohammadreza Soltanaghaei. "CQARPL: Congestion and QoS-aware RPL for IoT applications under heavy traffic." *The Journal of Supercomputing* (2022): 1-31.
[51] Aissa, Y. B., Grichi, H., Khalgui, M., Koubâa, A., & Bachir, A. (2019, July). QCOF: New RPL Extension for QoS and Congestion-Aware in Low Power and Lossy Network. In *14th International Conference on Software Technologies* (pp. 560-569).
[52] Kheaksong, A., Srisomboon, K., Prayote, A., & Lee, W. (2018). Multicriteria parent selection using cognitive radio for RPL in smart grid network. *Wireless Communications and Mobile Computing*.
[53] Elappila, M., Mishra, S. N., & Chinara, S. (2019). RPL Adaptation with Survivable Path Routing for IoT Applications. *INFOCOMP Journal of Computer Science*, *18*(1), 26-31.
[54] Vaezian, A., & Darmani, Y. (2022). MSE-RPL: Mobility Support Enhancement in RPL for IoT Mobile Applications. *IEEE Access*.
[55] Sankar, S., et al. "Energy-aware grid-based data aggregation scheme in routing protocol for agricultural internet of things." *Sustainable Computing: Informatics and Systems* 28 (2020): 100422.
[56] Acevedo, Pedro David, et al. "WRF-RPL: Weighted Random Forward RPL for High Traffic and Energy Demanding Scenarios." *IEEE Access* 9 (2021): 60163-60174.

[57] Lalani, Sahar Rezagholi, et al. "PEARL: Power and Delay-Aware Learning-based Routing Policy for IoT Applications."
[58] Hassani, Abdelhadi Eloudrhiri, Aïcha Sahel, and Abdelmajid Badri. "Towards an Enhanced Minimum Rank Hysteresis Objective Function for RPL IoT Routing Protocol.", 2022. 483-493.
[59] Hassani, Abdelhadi Eloudrhiri, Aicha Sahel, and Abdelmajid Badri. "FTC-OF: Forwarding Traffic Consciousness Objective Function for RPL Routing Protocol, 2020."
[60] Hassani, Abdelhadi Eloudrhiri, Aicha Sahel, and Abdelmajid Badri. "IRH-OF: A New Objective Function for RPL Routing Protocol in IoT Applications." *Wireless Personal Communications* (2021): 1-17.
[61] Hadaya, N. N., & Alabady, S. A. (2022). New RPL Protocol for IoT Applications. *Journal of Communications Software and Systems*, *18*(1), 72-79.
[62] Srividhya, S., & Sankaranarayanan, S. (2022). IoT Enabled Energy Efficient Routing in Forest Fire. In *ICCCE 2021* (pp. 29-35). Springer, Singapore.
[63] Darabkh, Khalid A., et al. "An Innovative RPL Objective Function for Broad Range of IoT Domains Utilizing Fuzzy Logic and Multiple Metrics." *Expert Systems with Applications* (2022): 117593.
[64] Homaei, Mohammad Hossein, et al. "DDSLA-RPL: Dynamic Decision System based on Learning Automata in the RPL protocol for achieving QoS." *IEEE Access* (2021).
[65] Fatemifar, Seyed Ali, and Reza Javidan. "A new load balancing clustering method for the RPL protocol." *Telecommunication Systems* (2021): 1-19.
[66] Charles, A. S., and P. Kalavathi. "A reliable link quality-based RPL routing for Internet of Things." *Soft Computing* 26.1 (2022): 123-135.
[67] Fazli, Forough, and Maisam Mansubbassiri. "V-RPL: An effective routing algorithm for low power and lossy networks using multi-criteria decision-making techniques." *Ad Hoc Networks* 132 (2022): 102868.