



بهبود پروتکل مسیریابی اینترنت اشیاء مبتنی بر SDN با استفاده

از الگوریتم ژنتیک و معیار اتصال در خوشه‌ها

عصمت حیدری^(۱) حسن شاکری^{(۲)*} اسماعیل خیرخواه^(۳)

(۱) گروه مهندسی کامپیوتر، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

(۲) گروه مهندسی کامپیوتر، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران*

(۳) گروه مهندسی کامپیوتر، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵)

چکیده

با تکامل اینترنت اشیاء، حرکت گره‌ها به عنوان قابلیت جدید در این شبکه‌ها اضافه شده است. اما محدودیت‌ها در منابع، به کارگیری این شبکه‌ها را با مشکلاتی از جمله در مسیریابی مواجه کرده است. در این مقاله، پروتکل جدیدی برای مسیریابی در اینترنت اشیاء ارائه می‌شود که بهبود یافته پروتکل IERMIoT است. با اتکا به ویژگی‌های معماری SDN و رویکرد خوشه‌بندی، تغییرات پویا در توپولوژی را مدیریت می‌کند که باعث افزایش طول عمر شبکه و کاهش اتلاف انرژی می‌شود. کنترل یک الگوریتم تکاملی اجرا می‌کند تا تعداد خوشه‌های لازم و نحوه توزیع آن‌ها را تعیین کند. اما سربار عملیات مسیریابی و خوشه‌بندی در این پروتکل زیاد است. روش پیشنهادی ما بهبودهایی اعمال می‌کند تا دوام خوشه‌ها افزایش و تعداد دفعات اجرای الگوریتم خوشه‌بندی کاهش یابد. همچنین از مفهوم k-اتصال شبکه‌های اجتماعی و الگوریتم ژنتیک جهت انتخاب بهینه سرخوشه‌ها استفاده می‌شود و ضریب جریمه گره‌های سیار برای انتخاب شدن به عنوان سرخوشه با دو فاکتور احتمال و میزان جابجایی تنظیم می‌شود. ایده سرخوشه‌های جانشین نیز برای جایگزینی سرخوشه‌ها در صورت بروز قطعی در ارتباطات، مطرح شده است. نتایج ارزیابی پروتکل پیشنهادی نشان می‌دهد که این پروتکل به طور میانگین در سناریوهای مختلف از نظر معیارهای مصرف انرژی، پایداری شبکه، PDR و سربار مسیریابی، به ترتیب ۴۲ درصد، ۱۷۷ درصد، ۱۹۲ درصد و ۲۳ درصد بهتر از پروتکل‌های قبلی عمل می‌کند. کلمات کلیدی: مسیریابی، اینترنت اشیاء، شبکه‌های نرم‌افزار محور، خوشه‌بندی، اتصال، الگوریتم ژنتیک.

*عهده‌دار مکاتبات:

حسن شاکری

نشانی: گروه مهندسی کامپیوتر، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

پست الکترونیکی: hassanshakeri@iau.ac.ir

امروزه اینترنت اشیا از یک مفهوم نظری به یک واقعیت کاربردی تبدیل شده است. شبکه‌های IoT تشکیل شده از دستگاه‌های هوشمند سیار متنوع بخشی از زندگی روزمره شده‌اند. دستگاه‌های متنوعی برای جمع‌آوری و توزیع داده‌ها بدون دخالت انسان در شرایط و محیط‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند که از جمله می‌توان به دستگاه‌های انرژی، خودکارسازی صنعتی، مراقبت از سلامت، کشاورزی و بسیاری از کاربردهای دیگر اشاره کرد. اینترنت اشیا از فناوری‌های مختلفی شامل شناسایی فرکانس رادیویی^۱ (RFID)، ارتباطات بی‌سیم برد کوتاه و شبکه‌های حسگر استفاده می‌کند. شبکه‌های اینترنت اشیا با توان پایین از هزاران حسگر تشکیل می‌شوند که به دلیل هزینه پایین و استقرار آسان آن‌ها می‌توانند به صورت ساخت‌یافته یا بدون ساختار در یک محیط فیزیکی پویا پیاده‌سازی شوند تا در کاربردهای مختلف، شرایط پویای ناحیه را نظارت و کنترل کنند [1].

با وجود این، محدودیت‌ها در توان پردازشی، حافظه، مصرف برق و مواردی از این قبیل، استقرار و به‌کارگیری این شبکه‌ها را با مشکلات زیادی مواجه کرده است و از جمله در موضوعاتی مانند مسیریابی، مصرف انرژی، قابلیت اتکا و تأخیر چالش‌های زیادی وجود دارد. با گذشت زمان و تکامل برخی از خصوصیت‌های شبکه‌های با منابع محدود، حرکت به عنوان یک قابلیت جدید در این شبکه‌ها اضافه شده است به گونه‌ای که در یک شبکه سیار، گره‌ها می‌توانند آزادانه در محیط جابجا شوند، اطلاعات جمع‌آوری کنند، و با گره‌های دیگر ارتباط برقرار کنند. مسأله مطرح، محدودیت منابع است که تأمین نیازمندی‌های اینترنت اشیا را با چالش مواجه می‌کند. بنابراین برای مقابله با این گونه چالش‌ها به روش‌های کارآمدی نیاز داریم تا مقیاس‌پذیری، کیفیت سرویس، امنیت، و مسیریابی در توپولوژی‌های پویا تضمین گردد [2,3].

در سال ۲۰۱۲ یک پروتکل مسیریابی به نام RPL برای شبکه‌های کم‌توان و پر اتلاف ارائه شد که به صورتی اتکاپذیر و کارا یک توپولوژی مسیریابی شبه جنگلی^۲ شکل می‌دهد [4]. اما با گسترش کاربردهای محیط‌های پویا به نظر می‌رسد که RPL نمی‌تواند نیازهای شبکه‌های IoT سیار را برآورده کند زیرا اساساً برای توپولوژی شبکه ایستا طراحی شده است و به تغییرات توپولوژی واکنش حداقلی نشان می‌دهد. بنابراین تلاش‌های زیادی توسط محققان برای بهبود این پروتکل مسیریابی یا طراحی پروتکل‌های دیگر برای تأمین نیازمندی‌های اینترنت اشیا و الگوهای ارتباطی متنوع انجام شد.

^۱radio frequency identification

^۲quasi-forest routing topology

پروتکل IERMioT ارائه شده در [1] بر ویژگی‌های معماری SDN متکی است و سعی می‌کند تغییرات پویا در توپولوژی ناشی از حرکت گره‌های سیار را مدیریت کند و به این ترتیب طول عمر شبکه را افزایش دهد و همچنین از اتلاف انرژی جلوگیری کند. این رویکرد بر تقسیم شبکه به خوشه‌هایی متکی است که هر خوشه یک سرخوشه (CH) دارد و جریان ارتباطات در شبکه از طریق خوشه‌ها صورت می‌گیرد. برای این منظور با در نظر گرفتن محیط مورد نظر و تعداد گره‌ها یک کنترلر منفرد استقرار می‌یابد. کنترلر یک الگوریتم تکاملی را اجرا می‌کند تا تعداد خوشه‌های مورد نیاز در شبکه و همچنین نحوه توزیع آن‌ها در محیط پویا را تعیین کند. با وجود این، همچنان سربار عملیات مسیریابی و اجرای مکرر الگوریتم خوشه‌بندی در این پروتکل زیاد است و به همین دلیل لازم است بهبودهایی در پروتکل مسیریابی اعمال شود تا مدت زمان دوام خوشه‌ها افزایش یابد و در نتیجه، تعداد دفعات اجرای الگوریتم خوشه‌بندی کمتر شود. همچنین در پروتکل IERMioT گره‌ها فقط به دو دسته ثابت و سیار تقسیم می‌شوند تا به گره‌های سیار شانس کمتری برای انتخاب شدن به عنوان سرخوشه داشته باشند. اما فراوانی جابجایی‌های گره‌های سیار و مسافتی که به طور متوسط جابجا می‌شوند در ضریب جریمه اعمال نمی‌شود که از این جهت نیز نیاز به اصلاح پروتکل مذکور احساس می‌شود. با توجه به مشکلات مذکور در این مقاله یک پروتکل مسیریابی جدید برای بهبود پروتکل IERMioT و رفع مشکلات آن ارائه می‌شود. در پروتکل پیشنهادی، علاوه بر این که بعضی از گره‌ها ثابت و بعضی سیار در نظر گرفته می‌شوند، احتمال و میزان تحرک گره‌های سیار نیز یکسان در نظر گرفته نمی‌شود بلکه می‌تواند متفاوت باشد. این موضوع از آن جهت اهمیت دارد که برخلاف پروتکل پایه که به هر گره سیار برای انتخاب به عنوان سرخوشه، یک ضریب ثابت جریمه تعلق می‌گیرد در ایده پیشنهادی، گره‌هایی که مکرراً جابجا می‌شوند و مقدار جابجایی آنها زیاد است، بیشتر جریمه می‌شوند و احتمال انتخاب آنها به عنوان سرخوشه کمتر از بقیه گره‌های سیار است. همچنین با توجه به این که در محیط‌های SDN اغلب از پروتکل AODV^۱ برای مسیریابی استفاده می‌شود، در پروتکل پیشنهادی در این مقاله نیز فرض بر این است که این پروتکل برای مسیریابی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مهم‌ترین نوآوری‌های این مقاله عبارتند از:

- ۱- بهبود پروتکل مسیریابی IERMioT با استفاده از مفهوم k -اتصال^۲ جهت انتخاب بهینه سرخوشه‌ها
- ۲- تعریف و اعمال یک ضریب جریمه برای تنظیم احتمال سرخوشه شدن گره‌ها براساس دو فاکتور احتمال و میزان

جابجایی

^۱Ad hoc On-Demand Distance Vector

^۲K-connectivity

۳- معرفی و به‌کارگیری ایده سرخوشه‌های جانشین به منظور جایگزینی سرخوشه‌های اولیه در صورت بروز قطعی

در ارتباطات

۴- تعمیم و اصلاح مفهوم k -اتصال به صورتی که هم تعداد گره‌هایی که حذف آنها باعث ناهمبند شدن خوشه می‌شود و هم تعداد گره‌هایی که با حذف گره‌های مذکور ارتباطشان با سرخوشه قطع می‌شود در نظر گرفته شوند. ساختار این مقاله در ادامه به صورت زیر است: در بخش ۲، مرور ادبیات و پیشینه تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش ۳ پروتکل پیشنهادی ارائه و تشریح می‌گردد. بخش ۴ به ارزیابی پروتکل پیشنهادی و تحلیل نتایج آن و مقایسه با پروتکل‌های مشابه موجود اختصاص دارد و در بخش ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای کارهای آینده در این حوزه ارائه می‌شود.

۲- مرور ادبیات و پیشینه تحقیق

شبکه‌های اینترنت اشیاء با توان پایین از هزاران حسگر تشکیل می‌شوند که به دلیل هزینه پایین و استقرار آسان آنها می‌توانند به صورت ساختیافته یا بدون ساختار در یک محیط فیزیکی پویا پیاده‌سازی شوند تا در کاربردهای مختلف، شرایط پویای ناحیه را نظارت و کنترل کنند [1].

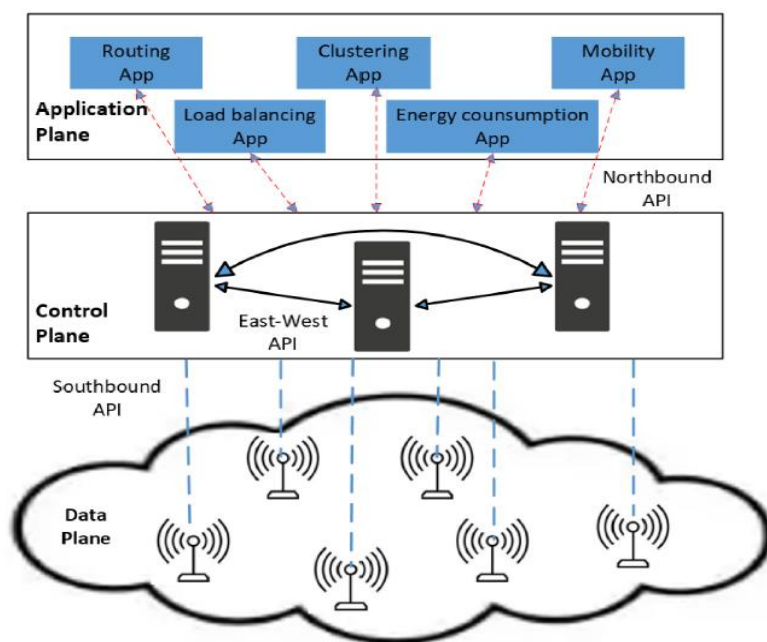
با وجود این، محدودیت‌ها در توان پردازشی، حافظه، مصرف برق و مواردی از این قبیل، استقرار و به‌کارگیری این شبکه‌ها را با مشکلات زیادی مواجه کرده است و ازجمله در موضوعاتی مانند مسیریابی، مصرف انرژی، قابلیت اتکا و تأخیر چالش‌های زیادی وجود دارد. با گذشت زمان و تکامل برخی از خصوصیت‌های شبکه‌های با منابع محدود، حرکت به عنوان یک قابلیت جدید در این شبکه‌ها اضافه شده است به گونه‌ای که در یک شبکه سیار، گره‌ها می‌توانند آزادانه در محیط جابجا شوند، اطلاعات جمع‌آوری کنند، و با گره‌های دیگر ارتباط برقرار کنند. مسأله مطرح، محدودیت منابع است که تأمین نیازمندی‌های اینترنت اشیاء را با چالش مواجه می‌کند. بنابراین برای مقابله با این گونه چالش‌ها به روش‌های کارآمدی نیاز داریم تا مقیاس‌پذیری، کیفیت سرویس، امنیت، و مسیریابی در توپولوژی‌های پویا تضمین گردد [۲، ۳].

در سال ۲۰۱۲ یک پروتکل مسیریابی به نام RPL برای شبکه‌های کم‌توان و پراتلاف ارائه شد که به صورتی اتکاپذیر و کارا یک توپولوژی مسیریابی شبه جنگلی شکل می‌دهد [4]. اما با گسترش کاربردهای محیط‌های پویا به نظر می‌رسد که RPL نمی‌تواند نیازهای شبکه‌های IoT سیار را برآورده کند زیرا اساساً برای توپولوژی شبکه ایستا طراحی شده است و به تغییرات توپولوژی واکنش حداقلی نشان می‌دهد. بنابراین تلاش‌های زیادی توسط محققان برای بهبود این

پروتکل مسیریابی یا طراحی پروتکل‌های دیگر برای تأمین نیازمندی‌های اینترنت اشیا و الگوهای ارتباطی متنوع انجام شد.

شبکه‌های مبتنی بر نرم‌افزار^۱ (SDN) از یک معماری شبکه‌ای استفاده می‌کنند که به صورت پیوسته و کامل، بر کل شبکه نظارت می‌کند. این کار با افزودن قابلیت‌های جدید به شبکه‌های کم‌توان و انتقال کارهای انرژی‌بر بر کنترل‌گر صورت می‌گیرد. به این ترتیب سربار ناشی از پردازش و محاسبات در گره‌ها کاهش می‌یابد.

شکل ۱ نمایی از معماری مبتنی بر SDN که در پروتکل ارائه‌شده در [1] (IERMIoT) در نظر گرفته شده است را نشان می‌دهد. صفحه داده^۲ از گره‌های ثابت و سیار شبکه تشکیل شده است. این صفحه با استفاده از رابط برنامه‌نویسی کاربردی جنوبی^۳ با صفحه کنترل^۴، ارتباط برقرار می‌کند. پروتکل‌های ارتباطی متنوعی برای این API در SDN وجود دارد که معروف‌ترین آن‌ها OpenFlow است. این پروتکل برای مدیریت شبکه‌های محلی و گسترده شامل مسیریاب‌های IP و سوئیچ‌های اترنت MPLS طراحی شده است و به عنوان یک واسطه ارتباطی بین کنترل‌گر و سوئیچ عمل می‌کند. بنابراین جوامع تحقیقاتی و صنعتی تلاش‌های زیادی صرف کرده‌اند تا معماری SDN را به ویژه از نظر کارآمدی آن در شبکه‌های بی‌سیم بررسی کنند و ارتقا دهند [5,6].



^۱Software-defined network

^۲data plane

^۳southbound application programming interface

^۴control plane

شکل ۱: نمای کلی پروتکل IERMIoT براساس معماری شبکه مبتنی بر نرم‌افزار [1]

علاوه بر این، صفحه کنترل، شبکه را مدیریت می‌کند و قوانین را در جدول‌های جریان، تعریف و نصب می‌کند. مهم‌ترین هدف شبکه‌های مبتنی بر SDN، متمرکز کردن هوش شبکه است. صفحه کنترل شامل یک یا چند کنترل‌گر است که می‌توانند به عنوان یک ماژول تعبیه شده در ایستگاه پایه متمرکز باشند یا این که به صورت ماژول‌های مستقل با توجه به مقیاس شبکه و چگالی گره‌ها توزیع شده باشند. کنترلر با داشتن دیدگاه سراسری از شبکه، کنترل توپولوژی را بهبود می‌دهد. همچنین برنامه‌ریزی ویژگی‌های کنترلر براساس نیازهای کاربرد، کارایی شبکه را بالا می‌برد. صفحه کنترل از طریق رابط برنامه‌نویسی کاربردی شمالی^۱ با صفحه کاربرد^۲ در ارتباط است [7].

پیاده‌سازی شبکه‌های اینترنت اشیاء کم‌توان با یک ساختار SDN به شبکه امکان می‌دهد که گره‌های حسگر کم‌توان فقط در جمع‌آوری داده‌ها به کار گرفته شوند و کارهایی که مصرف انرژی بالایی نیاز دارند مانند مسیریابی و پردازش داده‌ها، امنیت و کیفیت داده‌ها به کنترلر محول شود [9,8].

مؤلفان [10] از رویکرد فراابتکاری شاهین هریس (MOHHO) در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مبتنی بر SDN استفاده کرده‌اند. آن‌ها با معیارهایی از قبیل انرژی، فاصله و عدم توازن بار نسبی، به مسأله جابجایی بهینه گره‌های سرخوشه در شبکه خوشه‌ها پرداخته‌اند. اما در این روش، گره‌ها ایستا در نظر گرفته شده‌اند.

رویکرد ارائه شده در [11] یک طرح مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی ارشمیدس (IAOAC) برای خوشه‌بندی و الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر یاددهی-یادگیری (TLBO) با معیارهای فاصله و انرژی برای مسیریابی چندگامه در شبکه‌های حسگر بی‌سیم ایستا ارائه می‌کند.

همچنین روش EQRSRL [12] یک مکانیسم مسیریابی مبتنی بر یادگیری تقویتی پیشنهاد می‌کند که از طریق طبقه‌بندی ترافیک، سطح قابل قبولی از کیفیت سرویس را برای اینترنت اشیاء پزشکی (IoMT) تأمین می‌کند.

در [13] یک الگوریتم مسیریابی فراابتکاری در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مبتنی بر SDN معرفی شده است. این الگوریتم از روش بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO) برای بهبود مسیریابی بر مبنای وضعیت شبکه با در نظر گرفتن میانگین فاصله بین خوشه‌ها، میانگین انرژی باقی‌مانده، اندازه خوشه، و میانگین فاصله سرخوشه‌ها از کنترلر استفاده می‌کند. روش مذکور فرض می‌کند که شبکه ایستا و گره‌ها همگن^۳ هستند.

^۱northbound application programming interface

^۲application plane

^۳homogeneous

راهکار پیشنهاد شده در [14] از الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ^۱ (WOA) برای کشف حمله‌ها قبل از وقوع آنها در شبکه‌های مبتنی بر SDN استفاده می‌کند. این الگوریتم، حمله‌ها را با خوشه‌بندی داده‌ها دسته‌بندی می‌کند و به کنترلر امکان می‌دهد که جدول جریان آن را برای شناسایی حمله‌ها قبل از ارسال درخواست‌هایشان به صفحه داده بررسی کند. پروتکل ارائه شده در [15] از یک معماری مبتنی بر SDN استفاده می‌کند تا یک دید متمرکز شبکه‌ای به دست آورد. سپس یک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بر روی یک شبکه عصبی (NN-PSO) برای شناسایی و طبقه‌بندی ترافیک پیاده‌سازی می‌شود تا کیفیت سرویس در کاربردهای IoT بهبود یابد.

پروتکل معرفی شده در [16] برای به حداقل رساندن تأخیر شبکه، از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری با جایگذاری کنترلر با ظرفیت (CCPGWO) استفاده می‌کند که در آن، الگوریتم گرگ خاکستری بهترین موقعیت را برای جایابی کنترلرها در شبکه جستجو می‌کند. در همین زمینه، مؤلفان [17] تعداد بهینه کنترلرها در شبکه‌های با مقیاس بزرگ را ارزیابی و تأخیر و اتکاپذیری را در شبکه با به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی سالپ^۲ (SSOA) بهبود می‌دهند. تحقیق [18] یک پروتکل مسیریابی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم سیار ارائه می‌کند که MGAHP نامیده شده است. در این راه‌کار از الگوریتم ژنتیک برای یافتن موقعیت بهینه سرخوشه‌ها و تعداد بهینه آنها استفاده شده است. مؤلفان مقاله مذکور در ادامه همان کار در مرجع [19] با بهبود دادن کار قبلی پروتکل IMGHP را برای شبکه‌های MWSN ارائه کرده‌اند که سرخوشه‌های بهینه را با جایابی مجدد گره‌های سیاری که خوشه را ترک کرده‌اند انجام می‌دهد و نرخ تحویل بسته و مصرف انرژی در شبکه را بهبود می‌بخشد.

کار تحقیقاتی ارائه شده در [20]، بهبودهایی را در مسیریابی مبتنی بر خوشه تطبیقی پویا برای کاهش تصمیمات غیربهینه در VANET‌ها پیشنهاد می‌دهد که EDBC-DACBR نامیده شده است. راه‌کاری ارائه شده از معیارهای انرژی و فاصله بین وسایل نقلیه و مراکز خوشه یا واحدهای کنار جاده (RSU) برای تشکیل خوشه استفاده می‌کند. یک مدل برازش، سرخوشه‌ها (CH) را بر اساس گره‌هایی با بالاترین مقادیر برازش شناسایی می‌کند و از طرف دیگر یک الگوریتم C-Means فازی مبتنی بر مکان (LBFCM) تشکیل خوشه بهینه را تضمین می‌کند. CH حاصل، که بر اساس بهره‌وری انرژی، پایداری و پویایی انتخاب شده است، با ترکیب LBFCM با مدل برازش استخراج می‌شود. علاوه بر این، روش مذکور با تغییرات شبکه، مانند سطوح انرژی، فواصل ارتباطی و ازدحام وسایل نقلیه، سازگار می‌شود تا کوتاه‌ترین مسیر را تعریف کند. ارزیابی‌های مبتنی بر شبیه‌سازی، اثربخشی رویکرد پیشنهادی را نشان داده است و از

^۱ Whale Optimization Algorithm

^۲ Salp Swarm Optimization Algorithm

نظر توان عملیاتی، سربار، از دست دادن بسته، تأخیر، پایداری و طول عمر شبکه، از روش‌های موجود عملکرد بهتری دارد.

راه‌کار ارائه‌شده در مرجع [21] دو هدف تحقیقاتی را دنبال می‌کند: i) توسعه یک تکنیک مسیریابی کارآمد از نظر انرژی برای شبکه‌های I-IoT در مقیاس بزرگ در یک سیستم SDN مبتنی بر ابر ii) بهینه‌سازی مقیاس‌پذیری شبکه، مسیریابی سطح پایین‌تر و متعادل‌سازی بار با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و کلونی زنبور مصنوعی (ABC). هدف اصلی SDN مبتنی بر ابر با هوش مصنوعی تعیین موارد زیر است:

- مسیریابی سطح پایین‌تر در لایه ادراک
- جدول خوشه‌بندی (CT) متعادل‌کننده بار
- نقاط ODG بهینه
- مسیرهای بهینه

مرجع [22] یک رویکرد مسیریابی و خوشه‌بندی مبتنی بر SDN آگاه از انرژی برای شبکه‌های IoT موبایل به منظور کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه معرفی می‌کند. در این رویکرد که EDEN نامیده شده است، افزایش قابلیت اطمینان در شبکه از نظر نسبت تحویل بسته (PDR). برای تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها و اطمینان از توزیع متعادل مورد توجه قرار گرفته است. EDEN از یک الگوریتم ژنتیک پویا برای تعیین تطبیقی نرخ جهش و تقاطع استفاده می‌کند. راه‌کار مذکور در انتخاب سرخوشه‌ها، پارامترهای تابع هدف متعددی، از جمله مرکزیت گره، انرژی باقی‌مانده و فاصله را برای بهینه‌سازی بهره‌وری انرژی در نظر می‌گیرد. علاوه بر این، EDEN از یک الگوریتم پیش‌بینی مسیر مبتنی بر شبکه عصبی LSTM برای پیش‌بینی مسیر گره‌های موبایل برای حفظ پایداری خوشه و کاهش فرکانس خوشه‌بندی مجدد استفاده می‌کند و در نتیجه هم بهره‌وری انرژی و هم قابلیت اطمینان را افزایش می‌دهد.

در [23]، یک مدل خوشه‌بندی جدید مبتنی بر SDN-WSN ارائه شده است که از الگوریتم بهینه‌سازی COOT و الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده می‌کند. GA در مدل پیشنهادی برای بهبود COOT استفاده شده است. COOT-GA در کنترل‌کننده SDN تعبیه شده و مسئول تشکیل خوشه‌هایی با ساختارهای بهینه است. کنترل‌کننده SDN دستوراتی را به گره‌های حسگر ارسال می‌کند و با عملیات مکرر، بهترین حالت خوشه‌بندی و مصرف انرژی را پیدا می‌کند.

در مرجع [24] یک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات مبتنی بر رویکرد ژنتیکی خود-تطبیق‌پذیر (SAGA-PSO) به عنوان یک مسیریابی مبتنی بر خوشه برای بهینه‌سازی گره‌های کنترلی (CN) در SDN پیشنهاد شده است. مدل ترکیبی پیشنهادی از الگوریتم‌های فراابتکاری و جهش ژنتیکی استفاده می‌کند که در آن PSO بومی با وزن‌های اینرسی

خود-تطبیق‌پذیر و عملیات جهش ژنتیکی اصلاح می‌شود تا CNها را بر اساس تنوع ژنتیکی به صورت پویا شناسایی کند. علاوه بر این، یک تابع برازش جدید برای متعادل کردن اندازه خوشه با در نظر گرفتن پارامترهای مهم مانند انرژی و فاصله دستگاه‌های شبکه پیشنهاد شده است.

کارهای تحقیقاتی فوق جنبه‌های مختلف شبکه‌های اینترنت اشیاء کم‌توان را در نظر گرفته و مفهوم معماری SDN را برای کنترل پیچیدگی و مدیریت شبکه مورد استفاده قرار داده‌اند. با وجود این در این تحقیقات، موضوعاتی مانند نحوه پیاده‌سازی کنترلر و چگونگی ارتباط آن با گره‌ها به منظور کاهش سربار پیام‌های کنترلی و نیز تأثیر حرکت گره‌ها در شبکه‌های پویا به اندازه کافی مورد توجه قرار نگرفته است.

۳- پروتکل پیشنهادی

در این تحقیق یک پروتکل بهبودیافته برای مسیریابی هوشمند آگاه از انرژی در اینترنت اشیاء طراحی شده است. در این بخش، به معرفی و توصیف پروتکل پیشنهادی می‌پردازیم. ابتدا در زیربخش ۳-۱ توصیف کلی پروتکل ارائه می‌گردد و سپس در زیربخش ۳-۲ جزئیات و مراحل مختلف آن به تفصیل تبیین و تشریح می‌شود.

۳-۱- توصیف کلی روش پیشنهادی

از آنجا که گره‌های اینترنت اشیاء به طور معمول توان پردازشی کمی دارند و از طرف دیگر مصرف انرژی آنها یک چالش مهم محسوب می‌شود، راه‌کار پیشنهادی از ایده شبکه مبتنی بر نرم‌افزار یا شبکه تعریف‌شده توسط نرم‌افزار (SDN) استفاده می‌کند تا به این طریق، هزینه‌های سربار دستگاه‌های ناشی از پردازش و محاسبات را کاهش دهد. این تکنیک، کارهای انرژی‌بر را به کنترلر مرکزی منتقل می‌کند که تغییرات توپولوژی شبکه در محیط‌های پویا را مدیریت می‌کند. به این ترتیب، طول عمر شبکه افزایش می‌یابد و از هدررفت انرژی جلوگیری می‌شود. پروتکل پیشنهادی بر مبنای پروتکل معرفی‌شده در مرجع [1] موسوم به IERMIoT و با اعمال اصلاحات و بهبودهایی بر روی آن طراحی شده است. در این روش گره‌ها خوشه‌بندی می‌شوند و از الگوریتم ژنتیک برای تعیین تعداد خوشه‌های مورد نیاز در شبکه و نیز توزیع متوازن آنها در محیط پویا استفاده می‌شود. همچنین سازوکاری برای کاهش سربار بسته‌های کنترلی و بسته‌های مسیریابی در نظر گرفته شده است که بر مصرف انرژی در گره‌ها اثر قابل ملاحظه‌ای دارد.

پروتکل پیشنهادی در این تحقیق از چند جهت، با پروتکل IERMioT متفاوت است. یکی از موارد اصلاح و بهبود بر روی پروتکل پایه مذکور این است که در تابع برازش الگوریتم ژنتیک که در پروتکل پایه براساس سه معیار محاسبه می‌شد، یک پارامتر جدید به نام k -اتصال وارد شده است. مفهوم k -اتصال اساساً در حوزه مدل‌سازی و تحلیل شبکه‌های اجتماعی تعریف شده و استفاده می‌شود و به عنوان یکی از معیارهای قوی بودن جامعه در مبحث شناسایی جوامع مورد استفاده قرار می‌گیرد. در عین حال در این تحقیق، مفهوم k -اتصال نیز تعمیم یافته و اصلاح شده است به طوری که برای اهداف مسیریابی در اینترنت اشیا کارآمدتر باشد. در ادامه، در این مورد توضیحات تکمیلی ارائه خواهد شد.

ایده اصلاحی دیگر بر روی پروتکل پایه IERMioT که در پروتکل پیشنهادی ارائه شده است این است که زمانی که در مرحله خوشه‌بندی الگوریتم ژنتیک اجرا می‌شود، به جای بهترین جواب که به صورت کروموزوم یا فردی از جمعیت که بهترین برازش را دارد نشان داده می‌شود، یک و یا چند جواب بعدی نیز شناسایی و ذخیره شوند. این کار هزینه اضافی در الگوریتم ژنتیک ندارد زیرا الگوریتم، در آخرین نسل، همه افراد جمعیت آن نسل را تعیین کرده است و کافی است از بین آن‌ها به جای یک فرد برتر، چند فرد برتر مشخص و اطلاعات آن‌ها نگهداری شود. اهمیت این موضوع این است که در صورتی که شبکه به دلیل مرگ تعدادی از گره‌ها یا جابجایی تعدادی از گره‌های سیار با قطعی مواجه شد، بدون نیاز به سربار اضافی و خوشه‌بندی مجدد، اولین فرد (جواب) جانشین بعدی به عنوان لیست جدید سرخوشه‌ها تعیین می‌شود.

۳-۲- جزئیات و مراحل پروتکل پیشنهادی

در پروتکل پیشنهادی سه ایده اصلی برای بهبود مسیریابی پیشنهاد و استفاده شده است:

- ۱- خوشه‌بندی بهینه به کمک الگوریتم ژنتیک
 - ۲- کاهش احتمال انتخاب گره‌های سیار به عنوان سرخوشه
 - ۳- در نظر گرفتن سازوکار وفاداری برای کاهش نیاز به خوشه‌بندی مجدد
- در ادامه هریک از این سه ایده توصیف و تشریح می‌گردد.

۳-۲-۱- خوشه‌بندی به کمک الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک با کدگذاری هر گره شبکه به عنوان یک ژن و در نظر گرفتن مجموعه k گره به عنوان یک کروموزوم یا یک فرد از جمعیت تعریف می‌شود.

کدگذاری کدها به صورت کروموزوم: در کاربرد ما یک کروموزوم به صورت یک ماتریس دوبعدی $k \times 2$ در نظر گرفته می‌شود به این ترتیب که k گره به صورت تصادفی از بین N گره زنده انتخاب می‌شوند و گره‌های اول تا k م برای پرکردن ماتریس مورد استفاده قرار می‌گیرند. سطر اول ماتریس به موقعیت x گره و سطر دوم آن به موقعیت y آن اشاره دارد. k تعداد خوشه‌های در نظر گرفته شده است. به عنوان مثال ممکن است $k=8$ در نظر گرفته شود از بین $N=100$ گره موجود گره‌های $[4, 11, 26, 31, 46, 55, 69, 70]$ به صورت تصادفی انتخاب شوند. در این صورت، یک کروموزوم یا یک فرد از جمعیت به صورت زیر خواهد بود:

10	60	23	71	45	29	71	92
47	4	64	80	11	33	87	26

به طوری که به عنوان نمونه، مختصات گره شماره ۴ به صورت $(10, 47)$ است برای تعیین جمعیت اولیه، راه‌کار پیشنهادی از یک روش هوشمند به جای رویکرد تصادفی برای تشکیل نسل اولیه استفاده می‌کند. برای این منظور پس از جمع‌آوری اطلاعات شبکه، کنترلر کروموزوم‌ها را براساس موقعیت گره‌ها و تعداد خوشه‌های بهینه مقداردهی می‌کند.

تابع برازش: تابع برازش یک تابع هزینه است که برای هر فرد تولید می‌شود. خروجی الگوریتم ژنتیک به این تابع بستگی دارد و در خلال الگوریتم تکرار می‌شود. به این ترتیب افرادی که شایستگی کمتری دارند از جمعیت حذف می‌شوند و با ارزش‌ترین افراد شناسایی می‌شوند. الگوریتم پیشنهادی چهار ملاک مختلف را برای تشکیل خوشه‌ها به صورت همزمان در نظر می‌گیرد:

۱- اولین پارامتر تابع برازش، مرکزیت سرخوشه است. این تابع از معیار مربع خطا براساس رابطه زیر استفاده می‌کند. هدف کلی این معیار کمینه‌کردن مجموع مربعات خطا برای یک تعداد مشخص از خوشه‌ها است به طوری که تضمین شود که سرخوشه‌ها در مرکز خوشه واقع هستند [۱].

$$Fit_1 = \min \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^N a_{i,j} \| (x_i - C_j) \|^2 \quad (1)$$

N تعداد گره‌ها در محیط و k تعداد خوشه‌ها است. C_j مرکز خوشه را نشان می‌دهد و با کمینه کردن فاصله هر گره خوشه از مرکز خوشه تعیین می‌شود.

۲- پارامتر دوم، ملاک متوازن بودن خوشه است که برای آن تعداد اعضای خوشه j محاسبه می‌شود و تفاوت بین بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین خوشه به عنوان تابع هدف در رابطه ۲ در نظر گرفته می‌شود [1].

$$Fit_2 = \min(\text{std}(\#NE_j)) \quad (2)$$

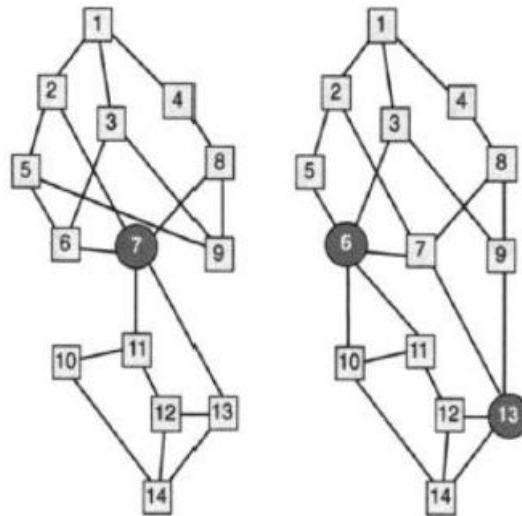
std انحراف معیار بین اعضای خوشه را نشان می‌دهد.

۳- سومین پارامتر برای کاهش تعداد گره‌های ایزوله است. منظور گره‌هایی است که در هیچ خوشه‌ای عضو نشده‌اند. این گره‌ها ناچارند داده‌های خود را یا مستقیماً و یا این که از طریق یکی از سرخوشه‌های موجود به ایستگاه پایه بفرستند که به دلیل فاصله طولانی‌ترین نیاز به مصرف انرژی بیشتری خواهد داشت. بنابراین هدف رابطه ۳ این است که تعداد این گره‌های پوشش داده نشده کم شود [1].

$$Fit_3 = \min\left(\frac{N_{\text{uncovered}}}{N_{\text{alive}} - N_{\text{uncovered}}}\right) \quad (3)$$

$N_{\text{uncovered}}$ و N_{alive} به ترتیب تعداد گره‌های پوشش داده نشده و تعداد کل گره‌های زنده موجود در شبکه را نشان می‌دهد.

۴- پارامتر دیگری که در راه کار پیشنهادی اضافه شده است، معیار k -اتصال اصلاح شده است. معیار k -اتصال، یک معیار برای ارزیابی میزان قوی بودن یک جامعه در مبحث مدل سازی و تحلیل شبکه اجتماعی و به صورت عمومی تر میزان قوی بودن یک خوشه در مباحث خوشه بندی است. این معیار در یک گراف همبند (جامعه یا خوشه) حداقل تعداد رأس‌هایی است که با حذف آن‌ها گراف ناهمبند و به دو یا چند بخش تقسیم می‌شود. از نظر خوشه‌های تعریف شده در شبکه اینترنت اشیاء، این معیار نشان می‌دهد که خوشه با حذف (مرگ یا جابجایی) حداقل چند گره، ناهمبند خواهند شد که پیامد آن قطع ارتباط برخی از گره‌ها از سرخوشه خواهد بود. به عنوان نمونه در شکل زیر مقدار k -اتصال برای گراف سمت چپ برابر با ۱ و برای گراف سمت راست برابر با ۲ است.



شکل ۲: مقدار k -اتصال در دو گراف (خوشه) نمونه [25]

از طرف دیگر ممکن است در یک گراف با k -اتصال برابر با k ، بیش از یک دسته k تایی از رأس‌ها وجود داشته باشد که حذف عناصر دسته باعث ناهمبندی گراف می‌شود. اگر تعداد این دسته‌ها m باشد هرچه مقدار m بیشتر باشد به این معنی است که احتمال قطعی ارتباطات در خوشه بیشتر خواهد بود. همچنین در یک خوشه با یک مقدار k -اتصال مشخص، تعداد گره‌هایی از خوشه که با حذف k گره مورد نظر ارتباطشان با سرخوشه قطع می‌شود اهمیت دارد و هرچه این تعداد بیشتر باشد، به این معنی است که در صورتی که حذف تعدادی از گره‌های خوشه در اثر مرگ یا جابجایی باعث قطع ارتباط شود، تعداد بیشتری از گره‌های خوشه ارتباط خود با سرخوشه را از دست خواهند داد. بر این اساس، ما یک معیار تعمیم‌یافته از k -اتصال را به صورت زیر تعریف می‌کنیم که همه فاکتورهای ذکر شده را منعکس کنیم و این معیار را به عنوان چهارمین و آخرین پارامتر تابع برازش الگوریتم ژنتیک در نظر می‌گیریم:

$$Fit_4 = \frac{mN_{dc}}{k} \quad (4)$$

که در رابطه فوق، k معیار k -اتصال و m تعداد دسته‌های k -تایی از گره‌ها که باعث قطع بخشی از شبکه از سرخوشه می‌شوند نشان می‌دهد و N_{dc} بیانگر تعداد گره‌هایی است که با حذف k گره مذکور، ارتباطشان با سرخوشه قطع می‌شود.

مقدار کلی تابع برازش براساس رابطه زیر با ترکیب توابع هدف معرفی شده در روابط قبلی محاسبه می‌شود:

$$\text{Fitness} = \frac{1}{w_1 \text{Fit}_1 + w_2 \text{Fit}_2 + w_3 \text{Fit}_3 + w_4 \text{Fit}_4} \quad (5)$$

ضرایب w_i ($i=1, \dots, 4$) برای اعمال وزن (میزان تأثیر) هر یک از چهار تابع هدف استفاده می‌شود.

عملگر انتخاب: در سازوکار چرخ رولت^۱، هریک از کروموزوم‌ها براساس میزان مناسب بودنشان (برمبنای تابع برازش) احتمال مشخصی برای انتخاب دارند. یعنی احتمال انتخاب گره i برابر است با نسبت مقدار برازش کروموزوم i به مجموع مقادیر برازش همه کروموزوم‌ها. به عبارت دیگر یک کروموزوم بهتر با احتمال بیشتر برای تولید نسل بعدی انتخاب خواهد شد.

عملگرهای ترکیب و جهش: بعد از انتخاب کروموزوم‌ها، جواب‌های جدید با ترکیب آن‌ها به عنوان والدین ایجاد می‌شوند چراکه گره‌های انتخاب‌شده به عنوان والدین بهترین مقادیر برازش را داشته‌اند و احتمال بهبود جواب‌ها افزایش می‌یابد. همچنین جهش تصادفی بر روی جواب‌های ایجادشده انجام می‌شود تا از گرفتادن در بهینه محلی جلوگیری شود. و تنوع جمعیت حفظ شود.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، در راهکار پیشنهادی زمانی که الگوریتم ژنتیک همگرا می‌شود یا شرط توقف آن برقرار می‌شود، به جای یک جواب که بهترین مقدار برازش را دارد، چند جواب برتر شناسایی و به صورت یک لیست ذخیره می‌شوند. در اولین مرحله کار شبکه، خوشه‌ها و سرخوشه‌ها براساس اولین جواب در این لیست (بهترین جواب پیداشده) تعیین می‌شود. بعداً در صورتی که شبکه به دلیل مرگ تعدادی از گره‌ها یا جابجایی تعدادی از گره‌های سیار با قطعی مواجه شد، بدون نیاز به خوشه‌بندی دوباره، جواب جانشین بعدی مبنای خوشه‌بندی جدید قرار می‌گیرد.

۳-۲-۲- کاهش احتمال انتخاب گره‌های سیار به عنوان سرخوشه

به دلیل حضور گره‌های سیار در شبکه، تغییرات توپولوژیکی به صورت پیوسته رخ می‌دهد. بنابراین تشکیل خوشه‌های پایدار با استفاده از سرخوشه‌های مناسب برای انتقال داده‌ها به عنوان یکی از چالش‌های شبکه‌های کم‌توان اینترنت اشیاء تلقی می‌شود. برای مدیریت حرکت و جلوگیری از قطع شبکه، کنترلر با تعریف تابع هزینه، احتمال انتخاب گره‌های سیار به عنوان سرخوشه را کاهش می‌دهد و به این ترتیب ثبات و پایداری خوشه‌ها را بالا می‌برد. در فاز انتخاب سرخوشه‌ها به هر یک از اعضای خوشه براساس رابطه ۶ یک رتبه اختصاص می‌یابد و گرهی که بهترین رتبه

^۱ roulette wheel

را دارد به عنوان سرخوشه انتخاب می‌شود. ما برای رتبه‌بندی، بیشترین انرژی باقی‌مانده گره و کم‌ترین فاصله از مرکز خوشه را مبنا قرار می‌دهیم [1].

$$\text{rank} = \begin{cases} \frac{d_i^c}{E_i} & \text{if } N_i \text{ is fixed node} \\ \frac{d_i^c}{E_i} \times \alpha & \text{if } N_i \text{ is mobile node} \end{cases} \quad (6)$$

که d_i^c فاصله گره i از مرکز خوشه، E_i انرژی گره و α ضریب جریمه گره سیار را نشان می‌دهد. برای مدیریت حرکت و جلوگیری از شکست شبکه، در دومین بخش رابطه فوق، گره‌های سیار با یک ضریب α جریمه می‌شوند به طوری که انتخاب یک گره سیار به عنوان سرخوشه کمتر از یک گره ثابت است. دلیل این موضوع این است که با انتخاب گره سیار به عنوان سرخوشه، احتمال ازدست‌رفتن ارتباطات داخل خوشه‌ای و از دست رفتن داده‌ها افزایش می‌یابد. یکی از نوآوری‌های پروتکل پیشنهادی و تفاوت‌های آن با پروتکل پایه این است که احتمال و مقدار جابجایی گره‌های سیار را در ضریب α اعمال می‌کند. به عبارت دیگر در پروتکل پایه، به هر گره سیار بدون توجه به احتمال و میزان جابجایی آن یک ضریب ثابت α جریمه تعلق می‌گیرد در حالی که پیشنهاد ما این است که مقدار α با در نظر گرفتن این دو فاکتور تعیین شود به طوری که گره‌هایی که مکرراً جابجا می‌شوند و مقدار جابجایی آن‌ها زیاد است، بیشتر جریمه شوند و احتمال انتخاب آن‌ها به عنوان سرخوشه کمتر باشد.

۳-۲-۳- در نظر گرفتن سازوکار وفاداری برای کاهش نیاز به خوشه‌بندی مجدد

در این مرحله، سرخوشه‌ها اطلاعات خود را به گره‌های غیرخوشه‌ای ارسال می‌کنند. گره‌ها پس از دریافت این اطلاعات، به نزدیک‌ترین سرخوشه متصل می‌شوند و به این ترتیب خوشه‌ها شکل می‌گیرند. در فاز پایداری، گره‌ها محیط را حس می‌کنند و اطلاعات حس شده را به سرخوشه خود می‌فرستند و سرخوشه اطلاعات را به مقصد ارسال می‌کند.

در اغلب پژوهش‌ها در هر دور یک الگوریتم خوشه‌بندی اجرا می‌شود تا سرخوشه‌های جدید انتخاب شوند. اما خوشه‌بندی سربار زیادی دارد و باعث مصرف انرژی به مقدار زیاد می‌شود. در الگوریتم پیشنهادی، افزایش زمان پایداری خوشه‌ها در نظر گرفته شده است و فقط در دو حالت، فاز خوشه‌بندی مجدداً اجرا خواهد شد. اول زمانی که انرژی

سرخوشه از مقدار آستانه تعریف شده در رابطه ۷ کمتر شده باشد و دوم وقتی که توپولوژی شبکه به دلیل مرگ گره‌ها و یا جابجایی گره‌های سیار تغییر کند [1].

$$\lambda(E_{avg} - \frac{E_{std}}{\gamma}) \text{thr} = \quad (7)$$

λ و γ مقادیر عددی در بازه [0, 1] هستند و E_{avg} میانگین انرژی گره‌های عضو خوشه را نشان می‌دهد. E_{std} انحراف معیار انرژی بین گره‌های عضو خوشه را نشان می‌دهد. اما با حرکت گره‌ها موقعیت آنها تغییر می‌کند و به همین دلیل جدول‌های مسیریابی باید مجدداً ساخته شوند که نیاز به مصرف انرژی بالایی دارد. این مقاله فرض می‌کند که گره‌های سیار از مفهوم وفاداری^۱ به سرخوشه استفاده می‌کنند. به این معنی که تا زمانی که در محدوده رادیویی سرخوشه فعلی باشند، یک سرخوشه جدید انتخاب نخواهند کرد. در این حالت، پایداری خوشه‌ها به مدت طولانی‌تری حفظ خواهد شد و پیام‌های کمتری در سطح خوشه و شبکه مبادله خواهد شد. در میان مدت اگر گره سرخوشه پس از دو دور متوالی پیامی از گره سیار دریافت نکند، فرض می‌کند که گره مورد نظر خوشه را ترک کرده است. بنابراین سرخوشه یک پیام به کنترلر می‌فرستد تا توپولوژی را بروزرسانی کند و گره سیار با ارسال یک پیام به نزدیک‌ترین خوشه بعدی متصل می‌شود.

۴- ارزیابی پروتکل پیشنهادی

برای ارزیابی کارآمدی و کارایی پروتکل پیشنهادی، این پروتکل، شبیه‌سازی شده و تحت سناریوهای مختلف و براساس معیارهای مطرح در این حوزه که در ادامه به شرح آنها خواهیم پرداخت، ارزیابی صورت گرفته و همچنین نتایج با چند راه‌کار شاخص که اخیراً در این زمینه ارائه شده‌اند مقایسه شده است.

۴-۱- روش‌ها و پروتکل‌های مورد مقایسه

از آنجا که پروتکل پیشنهادی از معماری SDN برای مدیریت یکپارچه و متمرکز شبکه و یک الگوریتم فراابتکاری برای حل مسأله استفاده می‌کند، پروتکل‌های مختلف در این حوزه برای مقایسه کارایی در نظر گرفته شده‌اند:

- پروتکل مسیریابی مبتنی بر SDN و الگوریتم ژنتیک برای شبکه IoT سیار (IERMIoT) [1]

^۱loyalty

- پروتکل GA-SDN مبتنی بر معماری SDN و الگوریتم ژنتیک برای شبکه‌های IoT کم‌توان [9]
 - پروتکل مسیریابی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ (WOA) [10]
 - پروتکل مسیریابی مبتنی بر الگوریتم‌های بهینه‌سازی سنجاقک و کلونی مورچه‌ها (BFA-ACO) [11]
 - خوشه‌بندی متوازن مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری (ICA) [12]
- دلیل انتخاب این روش‌ها این است که آن‌ها هم هدف مشابهی را دنبال می‌کنند و برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم و یا شبکه‌های اینترنت اشیاء تعریف شده‌اند تا مصرف انرژی را کاهش و کارایی شبکه در محیط همگن را افزایش دهند.

۲-۴- محیط شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی از محیط Mininet استفاده شده است. این محیط جزو ابزارهای متداول برای شبیه‌سازی محیط اینترنت اشیاء و شبکه‌های نرم‌افزار محور است.

۳-۴- معیارهای ارزیابی و مقایسه

ملاک‌های مورد استفاده برای ارزیابی کارایی شامل موارد زیر است:

- میزان مصرف انرژی: کل انرژی مصرفی توسط گره‌هایی که بسته‌های داده ارسال و دریافت می‌کنند.
- طول عمر شبکه: زمانی که ۷۵ درصد از گره‌ها انرژی خود را از دست بدهند.
- مرگ اولین گره: زمانی که انرژی اولین گره تمام شود.
- نرخ تحویل بسته: تعداد بسته‌های دریافتی توسط ایستگاه پایه
- سربار مسیریابی: نسبت کل بسته‌های دریافت شده توسط ایستگاه پایه (BS) به تعداد کل بسته‌های تولید شده.

۴-۴- سناریوهای شبیه‌سازی

براساس روال مورد استفاده در کارهای مشابه به ویژه مرجع [1] الگوریتم‌های فوق‌الذکر برای سه سناریوی مختلف تحت شرایط و پارامترهای شبیه‌سازی یکسان مطابق جدول ۱ مورد ارزیابی و مقایسه قرار خواهند گرفت.

فرض می‌شود که گره‌ها به صورت تصادفی در محیط پخش شده‌اند و یک ترافیک با نرخ بیتی ثابت برای همه الگوریتم‌ها با نرخ ارسال یکسان در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که ۴۰ درصد گره‌ها در هر سناریو از نوع سیار در نظر گرفته شده می‌شوند. برای مدل‌سازی جهت حرکت گره‌ها از مدل راه رفتن تصادفی^۱ استفاده می‌شود به این ترتیب که هر گره یک جهت را به صورت تصادفی انتخاب می‌کند. جدول ۲ سناریوهای مختلف را که براساس آن کارایی پروتکل پیشنهادی با بقیه روش‌ها مقایسه می‌شود نشان می‌دهد.

جدول ۱: پارامترهای شبیه‌سازی

VALUES	PARAMETER
Initial energy	0.5 J
E_{fs}	10 pJ/bit/m ²
E_{mp}	0.0013 pJ/bit/m ⁴
E_{DA}	5 nJ/bit
ETx	50 nJ/bit
ERx	50 nJ/bit
Data Pack size	4000 bits
Hello Pack size	256 bits
Node mobility speed	0.5 m/s

جدول ۲: سناریوهای شبیه‌سازی

SCENARIO	NETWORK AREA	BS LOCATION	NUMBER OF NODES
First	200 * 200 m ²	(100,210)	100
Second	300 * 300 m ²	(150,310)	150
Third	400 * 400 m ²	(250,410)	200

۴-۵- ارائه، مقایسه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

پروتکل پیشنهادی براساس چهار معیار میزان مصرف انرژی، پایداری شبکه، نرخ تحویل بسته، و سربار مسیریابی در سناریوهای سه‌گانه که قبلاً اشاره شد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در اغلب موارد پروتکل پیشنهادی نسبت به سایر پروتکل‌های مورد مقایسه، بهبود قابل توجهی در این معیارها فراهم آورده است. درصد بهبود

^۱Random Walk

هر معیار به طور خلاصه در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج مفصل تر در قالب نمودارها همراه با تحلیل در ادامه ارائه می گردد.

جدول ۳: درصد بهبود معیارهای ارزیابی در پروتکل پیشنهادی نسبت به پروتکل های مورد مقایسه در سناریوهای مختلف

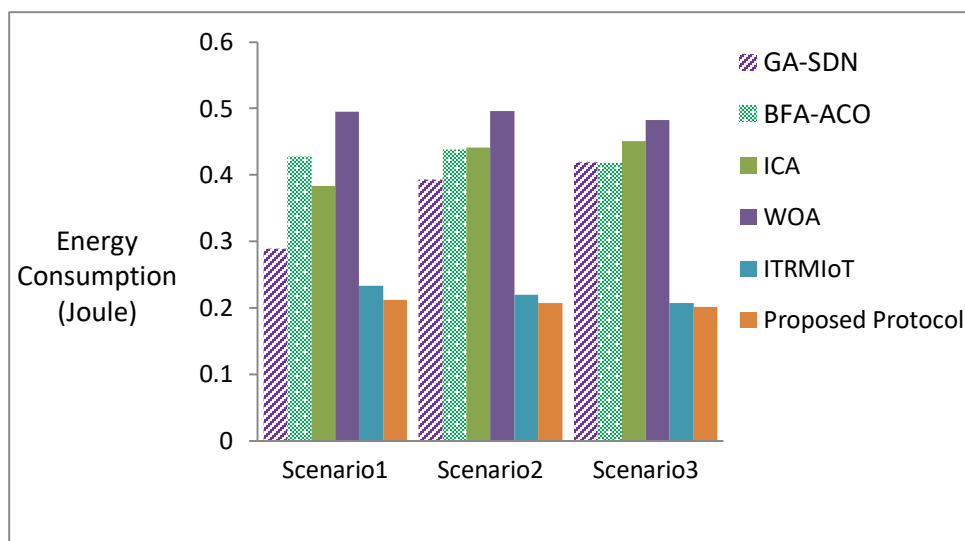
پروتکل	سناریوی ۱				سناریوی ۲				سناریوی ۳			
	مصرف انرژی	پایداری شبکه	PDR	سربار مسیریابی	مصرف انرژی	پایداری شبکه	PDR	سربار مسیریابی	مصرف انرژی	پایداری شبکه	PDR	سربار مسیریابی
GA-SDN [۹]	۲۷	۲۷	۳۶	-۲۷۵	۴۷	۳۲	۳۵	-۶۵	۵۲	۱۶۰	۱۶۹	۰
BFA-ACO [۱۱]	۵۰	۵۲	۶۰	۷۰	۵۳	۲۰۶	۲۱۳	۷۲	۵۱	۸۹۹	۹۴۰	۷۰
ICA [۱۲]	۴۵	۵۰	۶۲	۷۴	۵۳	۱۴۰	۱۵۵	۷۲	۵۵	۶۳۴	۶۲۳	۶۷
WOA [۱۰]	۵۷	۱۵۳	۱۶۱	۶۸	۵۸	۱۴۱	۱۵۵	۷۲	۵۸	۲۹۹	۲۴۸	۶۴
IERMIoT [۱]	۹	۳	۱۰	۱۹	۶	۳	۸	۲۲	۳	۳	۹	۱۳

۴-۵-۱- میزان مصرف انرژی

یکی از مهم ترین چالش ها برای پیاده سازی شبکه های IOT کم توان، مسأله انرژی است. بنابراین با کاهش مصرف انرژی گره ها کارایی و طول عمر شبکه افزایش می یابد. در اولین آزمایش انجام شده، میانگین مصرف انرژی پروتکل پیشنهادی در سه سناریوی ذکر شده ارزیابی و با پروتکل های موجود قبلی مقایسه شده است. نتایج در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، به عنوان نمونه در اولین سناریو میانگین مصرف انرژی در پروتکل پیشنهادی ۲۷ درصد نسبت به GA-SDN، ۵۰ درصد نسبت به BFA-ACO، ۴۵ درصد نسبت به ICA، ۵۷ درصد نسبت به WOA و ۹ درصد نسبت به IERMIoT بهبود داشته است. نتایج سناریوهای دیگر در جدول ۳ ارائه شده است.

از آنجا که میزان مصرف انرژی با مربع فاصله نسبت مستقیم دارد، مرکزیت سرخوشه ها با کاهش فاصله ارتباطات با گره های عضو خوشه به کاهش مصرف انرژی منجر می شود. همچنین این رویکرد از مسیرهای شناسایی شده در فاز مسیریابی برای ارسال بسته های کنترلی استفاده می کند که باعث کاهش سربار ناشی از انتقال بسته ها می شود. در مقابل، الگوریتم GA-SDN خوشه بندی مجدد را به صورت محلی انجام می دهد و داده ها را در کنترلر به صورت دوره ای و در زمان های معینی جمع آوری می کند تا سربار بسته های کنترلی را مدیریت کند. روش های ICA و BFA نیاز به

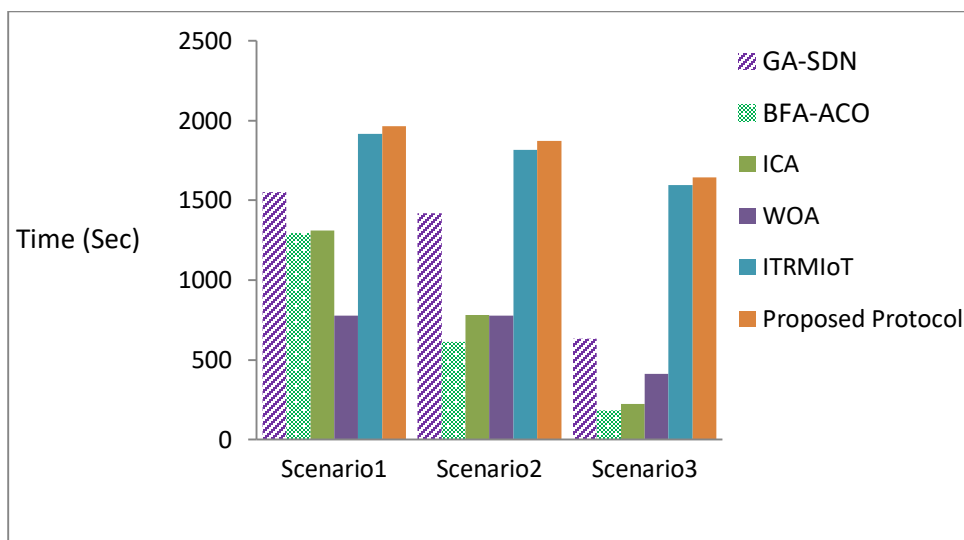
جمع‌آوری اطلاعات از دستگاه‌های IoT در هر دور دارند و خوشه‌بندی به صورت متمرکز در ایستگاه پایه صورت می‌گیرد. اما این روش‌ها سازوکاری برای مدیریت سربار بسته‌های کنترلی در نظر نمی‌گیرند. WOA نیز سربار بسته‌های کنترلی را با افزایش دوره فاز پایداری کاهش می‌دهد. با این که ICA و BFA در اولین سناریو بهتر از WOA عمل می‌کنند، مصرف انرژی آن‌ها با افزایش مقیاس شبکه به صورت معناداری افزایش می‌یابد.



شکل ۳: مقایسه میانگین مصرف انرژی شبکه در پروتکل پیشنهادی با چند پروتکل موجود

۴-۵-۲- پایداری شبکه

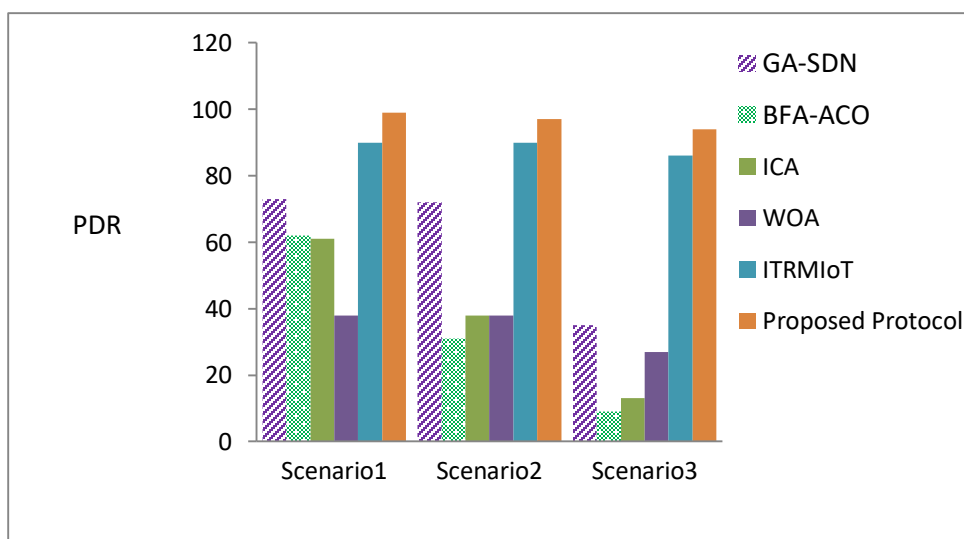
بالا بردن پایداری شبکه یکی دیگر از چالش‌های شبکه‌های اینترنت اشیاء کم‌توان است که مستقیماً به میزان مصرف انرژی وابسته است. با مرگ تعدادی از گره‌ها شبکه‌ها پیوستگی و ارتباط خود را از دست می‌دهد. تعاریف متعددی برای ارزیابی پایداری شبکه ارائه شده‌اند. به عنوان نمونه، برخی از پژوهش‌ها مرگ اولین گره و برخی دیگر مرگ آخرین گره شبکه را ملاک قرار می‌دهند. همچنین در بسیاری از تحقیقات، زمان مرگ نیمی از گره‌ها و مرگ ۷۵ درصد گره‌ها برای ارزیابی پایداری شبکه استفاده شده است. در این تحقیق، به منظور مقایسه با پروتکل‌های قبلی، زمان مرگ ۷۵ درصد از گره‌ها مورد اندازه‌گیری و بررسی قرار گرفته است. بعد از مرگ ۷۵ درصد گره‌ها شبیه‌سازی پایان یافته است زیرا در این زمان، شبکه عملاً پایداری خود را به صورت کامل از دست می‌دهد. شکل ۴ نتایج حاصل از این آزمایش را نشان می‌دهد. براساس این شکل، معیار مذکور در سناریوهای مختلف نسبت به پروتکل‌های مورد مقایسه بهبود یافته است. میزان کمی این بهبودها در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۴: مقایسه پایداری شبکه برحسب زمان مرگ ۷۵ درصد گره‌ها در پروتکل پیشنهادی با چند پروتکل موجود

۴-۵-۳- نرخ تحویل بسته

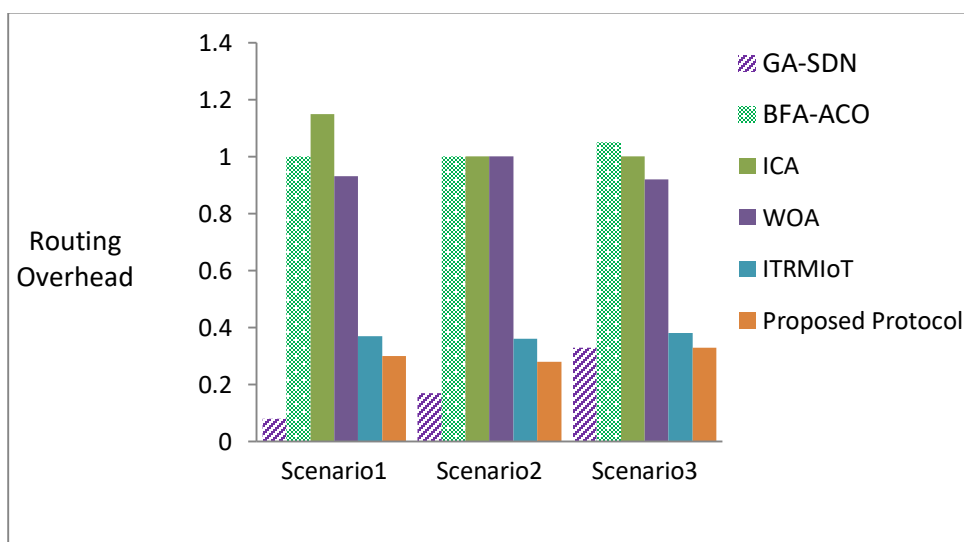
نرخ تحویل بسته به عنوان نسبت بسته‌های داده‌ای که ایستگاه پایه با موفقیت دریافت می‌کند به تعداد کل بسته‌هایی که توسط گره‌ها ارسال شده است در نظر گرفته می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، پروتکل پیشنهادی این معیار را در سناریوی اول ۳۶ درصد نسبت به GA-SDN، ۶۰ درصد نسبت به BFA-ACO، ۶۲ درصد نسبت به ICA، ۱۶۱ درصد نسبت به WOA و ۱۰ درصد نسبت به ITRMIoT بهبود داده است. نتایج سناریوهای دیگر در جدول ۳ قابل مشاهده است.



شکل ۵: مقایسه نرخ تحویل بسته (PDR) در پروتکل پیشنهادی با چند پروتکل موجود

۴-۵-۴- سربار مسیریابی

سربار مسیریابی مشخص می‌کند که به ازای هر بسته داده چه تعداد بسته مسیریابی ارسال می‌شود. هرچه تعداد بسته‌های مسیریابی کمتر باشد، مصرف انرژی، کمتر و مسیرها پایدارتر خواهند بود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که سربار مسیریابی در GA-SDN نسبت به پروتکل‌های دیگر از جمله پروتکل پیشنهادی پایین‌تر است. علت این موضوع، مدت‌زمان حالت پایدار و خوشه‌بندی محلی است. با وجود این پروتکل پیشنهادی در مقایسه با سایر پروتکل‌ها از نظر این معیار هم نتایج بهتری ارائه کرده است که علت آن طول عمر بیشتر شبکه و نرخ بالاتر ارسال بسته است. شکل ۶ نتایج ارزیابی سربار مسیریابی در پروتکل‌های مورد مقایسه در سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد. همچنین میزان بهبود مثبت یا منفی پروتکل پیشنهادی نسبت به پروتکل‌های دیگر در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۶: مقایسه سربار مسیریابی در پروتکل پیشنهادی با چند پروتکل موجود

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای کارهای آینده

در این مقاله پروتکل جدیدی برای مسیریابی در اینترنت اشیاء معرفی شد که از معماری SDN برای مدیریت تغییرات توپولوژی شبکه ناشی از حرکت گره‌های سیار استفاده می‌کند. رویکرد ارائه شده مشابه برخی از پروتکل‌های قبلی از خوشه‌بندی گره‌ها استفاده می‌کند اما بهبودهایی در پروتکل مسیریابی اعمال می‌کند تا مدت زمان دوام خوشه‌ها افزایش و در نتیجه، تعداد دفعات اجرای الگوریتم خوشه‌بندی کاهش یابد. همچنین گره‌ها به دو دسته ثابت و سیار تقسیم می‌شوند تا به گره‌های سیار شانس کمتری برای انتخاب‌شدن به عنوان سرخوشه داده شود. ضریب جریمه گره‌های

سیار برای انتخاب شدن به عنوان سرخوشه با اعمال دو فاکتور احتمال و میزان جابجایی تنظیم می شود و از طرف دیگر ایده سرخوشه های جانشین به منظور جایگزینی سرخوشه های اولیه در صورت بروز قطعی در ارتباطات، مطرح شده است. همچنین در پروتکل پیشنهادی از الگوریتم ژنتیک و نیز مفهوم k-اتصال بر گرفته از مدل سازی شبکه های اجتماعی جهت انتخاب بهینه سرخوشه ها استفاده می شود. پروتکل پیشنهادی با رویکرد شبیه سازی مورد ارزیابی قرار گرفته و عملکرد آن در سناریوهای مختلف با چند پروتکل موجود مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج ارزیابی نشان می دهد که پروتکل پیشنهادی از نظر معیارهای میزان مصرف انرژی، پایداری شبکه، نرخ تحویل بسته و سربار مسیریابی، عملکرد بهتری نسبت به پروتکل های قبلی ارائه می کند.

برای ادامه تحقیقات در این حوزه در آینده ایده های مختلفی قابل طرح است. از جمله می توان با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی تکاملی و الهام گرفته از طبیعت، پارامترهای پروتکل مسیریابی را بهینه کرد. همچنین معیارهای دیگری بجز k-اتصال برای بررسی میزان قوی بودن خوشه ها یا جوامع قابل استفاده هستند.

منابع

- [1] R. Samadi, A. Nazari, J. Seitz., "Intelligent energy-aware routing protocol in mobile IoT networks based on SDN," IEEE Transactions on Green Communications and Networking, vol. 7, no. 4, 2023.
- [2] C. Worlu, A. A. Jamal, and N. A. Mahiddin, "Wireless sensor networks, Internet of Things, and their challenges," Int. J. Innov. Technol. Exploring Eng., vol. 8, no. 12S2, pp. 556–566, 2019.
- [3] B. B. Gupta and M. Quamara, "An overview of Internet of Things (IoT): Architectural aspects, challenges, and protocols," Concurrency Comput. Pract. Exp., vol. 32, no. 21, p. e4946, 2020.
- [4] T. Winter et al., "RPL: IPv6 routing protocol for low-power and lossy networks," Internet Eng. Task Force, RFC 6550, 2012.
- [5] R. Friedman and D. Sainz, "An architecture for SDN based sensor networks," in Proc. 18th Int. Conf. Distrib. Comput. Netw., 2017, pp. 1–10.
- [6] L. Galluccio, S. Milardo, G. Morabito, and S. Palazzo, "SDN-WISE: Design, prototyping and experimentation of a stateful SDN solution for WIRELESS SENSOR networks," in Proc. IEEE Conf. Comput. Commun. (INFOCOM), 2015, pp. 513–521.

- [7] F. F. Jurado-Lasso, L. Marchegiani, J. F. Jurado, A. M. Abu-Mahfouz, and X. Fafoutis, "A survey on machine learning software-defined wireless sensor networks (ML-SDWSNs): Current status and major challenges," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 23560–23592, 2022.
- [8] I. Farris, T. Taleb, Y. Khettab, and J. Song, "A survey on emerging SDN and NFV security mechanisms for IoT systems," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 1, pp. 812–837, 1st Quart., 2019.
- [9] V. K. Quy, V. H. Nam, D. M. Linh, N. T. Ban, and N. D. Han, "A survey of QoS-aware routing protocols for the MANET-WSN convergence scenarios in IoT networks," *Wireless Pers. Commun.*, vol. 120, no. 1, pp. 49–62, 2021. SAMADI et al.: INTELLIGENT ENERGY-AWARE ROUTING PROTOCOL IN MOBILE IoT NETWORKS BASED ON SDN 2013.
- [10] R. Chaudhry and N. Kumar, "A multi-objective Meta-heuristic solution for green computing in software-defined wireless sensor networks," *IEEE Trans. Green Commun. Netw.*, vol. 6, no. 3, pp. 1231–1241, Jun. 2022.
- [11] K. Lakshmana, N. Subramani, Y. Alotaibi, S. Alghamdi, O. I. Khalafand, and A. K. Nanda, "Improved metaheuristic-driven energy-aware cluster-based routing scheme for IoT-assisted wireless sensor networks," *Sustainability*, vol. 14, no. 13, p. 7712, 2022.
- [12] A. Nazari, M. Kordabadi, R. Mohammadi, and C. Lal, "EQRSL: An energy-aware and QoS-based routing schema using reinforcement learning in IoMT," *Wireless Netw.*, to be published.
- [13] P. Mishra, N. Kumar, and W. W. Godfrey, "A meta-heuristic-based greenrouting algorithm in software-defined wireless sensor network," in *Proc. 6th Int. Conf. Inventive Comput. Technol. (ICICT)*, Coimbatore, India, Jan. 2021, pp. 36–41.
- [14] M. Shakil, A. F. Y. Mohammed, R. Arul, A. K. Bashir, and J. K. Choi, "A novel dynamic framework to detect DDoS in SDN using metaheuristic clustering," *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol. 33, no. 3, p. e3622, 2022.
- [15] B. Pradhan, G. Srivastava, D. S. Roy, K. H. K. Reddy, and J. C.-W. Lin, "Traffic classification in underwater networks using SDN and data-driven hybrid metaheuristics," *ACM Trans. Sens. Netw.*, vol. 18, no. 3, pp. 1–15, 2022.
- [16] K. Kanodia, S. Mohanty, K. Kurroliya, and B. Sahoo, "CCPGWO: A meta-heuristic strategy for link failure aware placement of controller in SDN," in *Proc. Int. Conf. Inventive Comput. Technol. (ICICT)*, Coimbatore, India, Feb. 2020, pp. 859–863.
- [17] A. A. Ateya et al., "Chaotic salp swarm algorithm for SDN multicontroller networks," *Eng. Sci. Technol. Int. J.*, vol. 22, no. 4, pp. 1001–1012, 2019.

- [18] A. A. Rady, N. Sabor, M. Shokair, and E.-S. M. El-Rabaie, "Mobility based genetic algorithm hierarchical routing protocol in mobile wireless sensor networks," in Proc. Int. Jpn. Afr. Conf. Electron. Commun. Comput. (JAC-ECC), Alexandria, Egypt, Dec. 2018, pp. 83–86.
- [19] A. A. Rady, N. Sabor, M. Shokair, and E.-S. M. El-Rabaie, "Efficient clustering based genetic algorithm in mobile wireless sensor networks," Menoufia J. Electron. Eng. Res., vol. 30, no. 1, pp. 1–12, 2021.
- [20] A. Sajithabegam and T. Menakadevi, "An enhanced energy and distance based optimized clustering and dynamic adaptive cluster-based routing in software defined vehicular network," Telecommun Syst 87, 917–937, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11235-024-01194-7>.
- [21] P. K. Udayaprasad et al., "Energy Efficient Optimized Routing Technique With Distributed SDN-AI to Large Scale I-IoT Networks, " in IEEE Access, vol. 12, pp. 2742-2759, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3346679.
- [22] N. J. No, H. Taghizadeh, M. P. Sedighi, B. Safaei and J. Henkel, "EDEN: Energy-aware Dynamic Genetic and Neural Network-based Path Predictive Routing and Clustering for Mobile SD-IoT Networks, " 2025 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2025, pp. 1513-1518, doi: 10.1109/IWCMC65282.2025.11059536.
- [23] A. V. Hanafi, N. İbrahimoglu, and A. Ghaffari, "Hybrid of COOT Optimization Algorithm with Genetic Algorithm for Sensor Nodes Clustering Using Software Defined Network, " Wireless Pers Commun 138, 1615–1647, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11277-024-11563-9>.
- [24] V. Tyagi and S. Singh, "A novel energy efficient routing technique for SDN-enabled underwater WSNs using free-space optical communication," Journal of Optical Communications, vol. 45, no. s1, 2024, pp. s777-s790. <https://doi.org/10.1515/joc-2022-0204>.
- [25] Z. A. Dagdeviren, V. K. Akram, O. Dagdeviren, B. Tavli and H. Yanikomeroglu, "k-Connectivity in Wireless Sensor Networks: Overview and Future Research Directions," in IEEE Network, vol. 37, no. 3, pp. 140-145, May/June 2023, doi: 10.1109/MNET.124.2100767.