سیستم های فازی و کاربردها
سال هشتم، شماره اول (بهار و تابستان ۱۴۰۴)
صص. ۱۶۷ تا ۲۰۶
شاپای چاپی: ۲۷۱۷-۴۴۰۹
شاپای الکترونیکی: ۲۷۱۷-۳۹۸۴
DOI:10.22034/jfsa.2025.517396.1270

شبکه‌های حسگر بی‌سیم مبتنی بر اینترنت اشیاء: بررسی پروتکل‌های هوشمند فازی جهت مدیریت مصرف انرژی

احمد سعیدی[۱]، مرجان کوچکی رفسنجانی[۲*] و سمانه یزدانی[۱]

۱- گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران
۲- بخش علوم کامپیوتر، دانشکده ریاضی و کامپیوتر، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۴

نوع مقاله: علمی-مروری

چکیده. این تحقیق به بررسی شبکه‌های حسگر بی‌سیم در چارچوب معماری اینترنت اشیاء پرداخته و بر ارزیابی پروتکل‌های هوشمند مبتنی‌بر الگوریتم‌های ابتکاری، فراابتکاری و الگوریتم-های الهام‌گرفته‌از طبیعت و همچنین منطق فازی تمرکز دارد. شبکه‌های حسگر بی‌سیم به‌دلیل نقش مهم در جمع‌آوری داده‌ها و ارتباط آن‌ها با دیگر اجزای اینترنت اشیاء، به‌عنوان یکی‌از عوامل کلیدی این فناوری شناخته می‌شوند. از چالش‌های اساسی این شبکه‌ها می‌توان به محدودیت انرژی و کاهش طول‌عمر شبکه اشاره کرد که نیاز به تحقیق و بررسی روش‌های نوآورانه را ضروری می‌نماید. بنابراین، هدف اصلی این پژوهش، بررسی راهکارهای جدید برای بهبود مدیریت مصرف انرژی و افزایش طول‌عمر شبکه است. در این راستا، روش‌های توسعه‌یافته‌ای نظیر خوشه‌بندی گره‌ها، مسیریابی بهینه و استفاده‌از منطق فازی در آن‌ها، مورد مطالعه قرار گرفته که با درنظرگرفتن معیارهایی همچون توان باتری، فاصله‌از گره‌های مجاور و (ادامه دارد)

2010 *Mathematics Subject Classification.* 68M18; 03B52

*Corresponding author

E-mails: ahmadsaeedi1024@yahoo.com, kuchaki@uk.ac.ir, s_yazdani@iau.tnb.ac.ir.

عبارات و کلمات کلیدی. اینترنت اشیاء، شبکه‌های حسگر بی‌سیم، الگوریتم‌های هوشمند، خوشه‌بندی، مسیریابی، مصرف انرژی، منطق فازی .

© ۱۴۰۴ (انجمن سیستم‌های فازی)

کیفیت ارتباط، فرآیند تصمیم‌گیری بهبود می‌یابد. پروتکل‌هایی که از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و همچنین منطق فازی استفاده می‌کنند با دقت بیشتر می‌توانند به عنوان روش‌هایی مکمل برای مدیریت بهینه مصرف انرژی مورد استفاده قرار گیرند. در این مقاله، تعداد زیادی از روش‌های مطرح شده در این زمینه را بررسی و از نقطه نظر معیارهای متفاوت همچون رویکرد مورد استفاده، اهداف مدنظر، شبکه مورد استفاده، نوع پروتکل، پارامترهای طول عمر شبکه و دیگر پارامترهای مورد بررسی، مقایسه و همچنین ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم‌های استنتاج فازی بکار رفته در تعدادی از روش‌ها بطور دقیق مشخص گردیده است.

۱. سرآغاز

اینترنت اشیاء (IoT)[1]، ارتباطی بین دستگاه‌های محاسباتی ایجاد می‌کند که می‌توانند اطلاعات را از طریق اینترنت ارسال و دریافت کنند [۳]. از طرفی، شبکه‌های حسگر بی‌سیم (WSNs)[2]، جزء کلیدی اینترنت اشیاء محسوب می‌شوند [۱۹]. امروزه، ادغام IoT و WSN به طور فزاینده‌ای در بین برنامه‌های کاربردی متعدد، با تمرکز بر تقویت سیستم‌های ارتباطی قوی و قابل‌اعتماد رایج شده‌است [۱۲، ۶]. گره‌های حسگر شبکه، ظرفیت محاسباتی و ذخیره‌سازی محدودی دارند و باید داده‌های خود را به یک گره مرکزی به نام ایستگاه پایه (BS)[3] یا چاهک [4] منتقل کنند [۲۴]. همچنین، هر گره حسگر به عنوان یک گره بازپخش‌کننده [5] در ارسال داده‌های گره‌های همسایه به ایستگاه پایه عمل می‌کند. یکی از موضوعات مهم در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، بهبود مصرف انرژی است [۳۱، ۲۹، ۲۳، ۱۳، ۴]. گره‌های حسگر منبع انرژی محدودی دارند که معمولاً به شکل باتری است. از آنجایی‌که امکان شارژ یا تعویض باتری گره‌های حسگر در محیط‌های عملیاتی وجود ندارد، بهبود مصرف انرژی به یک موضوع چالش‌برانگیز تبدیل شده‌است [۳۹]. به منظور کاهش مصرف انرژی گره‌های حسگر، روش‌های زیادی ارائه شده‌است؛ یکی از این روش‌ها خوشه‌بندی [6] است. به این صورت که حسگرها به گروه‌ها یا به عبارتی خوشه‌هایی تقسیم می‌شوند که هر خوشه دارای یک سرخوشه (CH)[7] است و پس از وقوع یک رویداد یا به صورت دوره‌ای، حسگرهای هر خوشه

[1] Internet of Things (IoT)
[2] Wireless Sensor Networks (WSNs)
[3] Base Station (BS)
[4] Sink
[5] Relay node
[6] Clustering
[7] Cluster Head (CH)

اطلاعات خود را به سرخوشه‌ها و سپس سرخوشه‌ها این اطلاعات را به ایستگاه پایه ارسال می‌کنند. یک سرخوشه می‌تواند فعالیت‌های گره‌ها را در خوشه زمان‌بندی کند، بنابراین گره‌ها می‌توانند در بیشتر اوقات به حالت خواب با انرژی کمتر سوئیچ کنند و مصرف انرژی را کاهش دهند و همچنین اطلاعات جمع‌آوری شده توسط حسگرها را در خوشه‌ی خود تجمیع کرده و مقدار بسته‌های رها شده در شبکه را کاهش دهند [۲۱، ۱۷]. خوشه‌بندی می‌تواند به طور قابل توجهی در مقیاس‌پذیری شبکه، کارایی انرژی و افزایش طول عمر شبکه تأثیرگذار باشد و در کاربردهایی که صدها گره نیاز است، مؤثر واقع شود [۱]. ازاین‌رو، در اکثر شبکه‌های موجود در بستر محیط‌های هوشمند جهت کاهش مصرف انرژی از پروتکل‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد [۴۳، ۳۹، ۱۰]. علاوه بر شبکه‌های حسگر بی‌سیم، در شبکه‌های دیگر همچون شبکه‌های تعریف‌شده نرم‌افزاری (SDN)[1] و اینترنت اشیاء هم پروتکل‌هایی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی با هدف بهبود طول عمر شبکه مطرح شده‌اند که از حوزه کاری این مقاله خارج است [۳۵، ۱۱].

در این پژوهش سعی شده مقالات مهمی که در سال‌های اخیر به چاپ رسیده‌اند را از پایگاه‌های استنادی معتبر نظیر IEEE، Springer، ScienceDirect وWiley انتخاب کنیم. برای جستجوی مقالات از کلمات کلیدی «مصرف انرژی»، «بهینه‌سازی»، «شبکه حسگر بی‌سیم»، «اینترنت اشیاء» و «منطق فازی» استفاده شد و تلاش کردیم مقالاتی که بیشترین ارجاعات، ارتباط با حوزه کاری و تأثیر در حوزه‌های مورد نظر داشتند را انتخاب نماییم. از طرفی، در مقایسه با مقالات مروری مشابه، تمرکز اصلی این مقاله بر مقایسه روش‌های مبتنی بر منطق فازی و الگوریتم‌های هوشمند برای بهینه‌سازی انرژی است. همانطور که بیان شد، تمام گره‌های حسگر به باتری با انرژی محدود مجهز هستند که محاسبات، ارسال و دریافت داده‌ها را به یک چالش مهم تبدیل می‌کند. بهره‌گیری از روش‌های هوشمند و نظارت بر مصرف انرژی در زمان معین، منجر به بهینه‌سازی انرژی می‌شود. از نوآوری‌ها و اهداف این مقاله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ارائه طبقه‌بندی جدید شامل شبکه مورد استفاده و بکارگیری سیستم استنتاج فازی (FIS)[2]، با هدف بررسی و مقایسه روش‌های موجود (بهره‌گیری از منطق فازی در ۲۰ مقاله از ۳۰ مقاله مورد بررسی).
- مطالعه روش‌های کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم و اینترنت اشیاء با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند و منطق فازی.

[1] Software Defined Networking (SDN)

[2] Fuzzy Inference System (FIS)

- بررسی روش‌های گوناگون از دیدگاه خوشه‌بندی و مسیریابی با هدف بهینه‌سازی انتخاب سرخوشه‌ها، مسیرهای انتقال داده و همچنین توزیع متوازن بار بین حسگرها با روش‌های نوآورانه.

در ادامه این مقاله، در بخش ۲ به بررسی پیش‌نیازهای تحقیق شامل شبکه‌های حسگر بی‌سیم، اینترنت اشیاء و منطق فازی پرداخته می‌شود. در بخش ۳ پروتکل‌های مربوط به کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه در محیط‌های هوشمند مرور می‌شوند. در بخش ۴ مقایسه بین پروتکل‌ها از جوانب مختلف صورت می‌گیرد. در بخش ۵ بحث و بررسی روی پروتکل‌های مورد بحث را خواهیم داشت. در بخش ۶، چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده و در نهایت در بخش ۷ نتیجه‌گیری مقاله آورده شده است.

۲. پیش‌نیازهای تحقیق

۱.۲. شبکه‌های حسگر بی‌سیم. شبکه‌های حسگر بی‌سیم در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده و پیشرفت‌های چشمگیری داشته‌اند. این شبکه‌ها از مجموعه‌ای از گره‌های حسگر تشکیل شده‌اند که با استفاده از باتری‌ها و اتصالات رادیویی کار می‌کنند و هدف اصلی آن‌ها جمع‌آوری، پردازش و انتقال داده‌ها است. چالش‌های اصلی در این حوزه شامل استقرار، اتصال، مسیریابی و تجمیع اطلاعات است. با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجه، مدیریت انرژی همچنان به‌عنوان یک مسئله مهم باقی مانده است. بهینه‌سازی مصرف انرژی و افزایش عمر شبکه از اهداف اصلی تحقیقات در این زمینه است. این بهینه‌سازی‌ها در مراحل مختلف از استقرار تا بهره‌برداری اطلاعات انجام می‌شوند. تاکنون پروتکل‌های مختلفی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم به منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی طراحی شده‌اند؛ همان‌طور که اشاره شد این شبکه‌ها از نظر انرژی، ذخیره‌سازی داده‌ها و محاسبات دارای منابع محدودی هستند. گره‌های شبکه‌های حسگر بی‌سیم در محیط‌های عملیاتی مختلف مستقر می‌شوند و ممکن است به دلیل کمبود منابع انرژی یا عوامل محیطی دچار خرابی شوند. یکی از قابلیت‌های مهم این شبکه‌ها این است که می‌توانند در مکان‌هایی که حضور انسان ممکن نیست یا باعث تغییر رفتار محیط می‌شود، مستقر گردند و اطلاعات محیط را ارسال کنند. حسگرهای امروزی علاوه بر حس کردن پارامترهای محیطی مانند نور و دما، قادر به ذخیره‌سازی اطلاعات، انجام پردازش‌های اولیه و ارسال اطلاعات نیز می‌باشند [۳۷، ۴۲].

در ادامه به طور خلاصه وظایف هر یک از اجزاء گره‌های حسگر بیان می‌شود [۲۵]:

- **واحد حس‌کننده:** این واحد اصلی گره حسگر بی‌سیم است که برای جمع‌آوری اطلاعات از محیط، مثلاً اطلاعات فیزیکی مانند دما، رطوبت و نور می‌باشد. این واحد از دو

۱۷۱ ــ

بخش حسگر و مبدل آنالوگ به دیجیتال تشکیل شده است که سیگنال‌های آنالوگ را به دیجیتال تبدیل می‌کند و به واحد پردازش ارسال می‌کند.

- **واحد پردازش:** این واحد کنترل‌کننده گره حسگر است و مدیریت اجزاء حسگر، پردازش اطلاعات، مدیریت مصرف انرژی و هماهنگی با دیگر گره‌ها را بر عهده دارد. این واحد ممکن است دارای حافظه داخلی یا واحد ذخیره‌سازی باشد و وظیفه اجرای الگوریتم‌ها و مدیریت فعالیت‌های داخلی حسگر را برعهده دارد.
- **مولد انرژی:** به فناوری گفته می‌شود که انرژی مورد نیاز گره‌های حسگر را از منابع محیطی مانند نور خورشید، ارتعاشات مکانیکی، حرارت، یا امواج رادیویی جمع‌آوری و به برق تبدیل می‌کنند تا عمر شبکه افزایش یابد. برای افزایش طول عمر گره‌های حسگر، می توان از مولدهای انرژی اضافی استفاده نمود.
- **واحد فرستنده و گیرنده:** این واحدها ارتباط بین گره‌های حسگر را از طریق تبدیل بیت‌ها به امواج رادیویی و انتقال آنها ایجاد می کنند.
- **واحد انرژی (توان):** این واحد مهم‌ترین بخش گره حسگر است که از باتری یا منابع انرژی دیگر برای تغذیه گره استفاده می‌کند.
- **حافظه:** برای ذخیره‌سازی داده‌ها استفاده می‌شود.
- **سیستم مکان‌یاب:** برای آگاهی از موقعیت گره‌ها، ماژول (GPS)[1] یا الگوریتم‌های محلی‌سازی به‌کار می‌رود.
- **سیستم متحرک‌ساز:** برای حرکت گره‌ها و کنترل حرکت حسگرها استفاده می‌شود و نیاز به منابع انرژی فراوان دارد.

۱.۱.۲. خوشه‌بندی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم. خوشه‌بندی به عنوان یک روش مسیریابی سلسله‌مراتبی مطرح است. در این نوع مسیریابی گره‌ها در گروه‌هایی مجزا به نام خوشه قرار می‌گیرند و برای هر خوشه یک سرخوشه انتخاب می‌شود. گره‌هایی که به عضویت خوشه در آمده‌اند داده‌هایشان را به سرخوشه خود می‌فرستند، سرخوشه‌ها با دریافت و انجام عمل تجمیع بر روی داده‌ها آنها را به ایستگاه پایه ارسال می‌کنند. گره‌های سرخوشه معمولاً به عنوان دروازه‌هایی میان گره‌های حسگر و ایستگاه پایه عمل می‌کنند و ایستگاه پایه داده‌ها را پردازش می‌کند. سرخوشه‌ها معمولاً به‌صورت دوره‌ای تغییر می‌کنند تا از مصرف بیش‌ازحد انرژی یک گره خاص جلوگیری شود. این نوع مسیریابی باعث کاهش بار ارتباطی بین گره‌ها و بهینه‌سازی انتقال داده‌ها در شبکه می‌شود. خوشه‌بندی در

[1]Global Positioning System (GPS)

شبکه‌های هوشمند می‌تواند بطور قابل توجهی در مقیاس‌پذیری شبکه، کارآیی انرژی و طول عمر شبکه تأثیرگذار باشد. تاکنون روش‌های خوشه‌بندی متعددی ارائه شده که با توجه به شرایط مختلف کاربردهای متفاوتی داشته‌اند.

در میان اهداف رویکرد خوشه‌بندی، تعدادی از آنها در طراحی و انگیزه اولیه استفاده از خوشه‌بندی از اهمیت بیشتری برخوردارند که در ادامه به مواردی از آنها اشاره شده است [۱، ۲۷]:

ترکیب / تجمیع داده‌ها، تعادل بار، تحمل خطا، افزایش ارتباط و کاهش تأخیر، کمترین تعداد خوشه، حداکثر طول عمر، پایداری توپولوژی شبکه، اجتناب از تصادم، استفاده از چرخه خواب.

۲.۲. اینترنت اشیاء. همزمان با پیشرفت‌های روزافزون علم و فناوری، از تکنولوژی‌های جدید و نوظهوری رونمایی می‌شود؛ یکی از این فناوری‌ها اینترنت اشیاء است. تعاریف زیادی از اینترنت اشیاء توسط انجمن‌های مختلف تحقیقاتی بر اساس نوع نگرش آن‌ها به نقاط قوت این ایده، ارائه شده است. دلیل چندوجهی بودن این مفهوم به نام‌گذاری آن یعنی اینترنت اشیاء برمی‌گردد. این نام از دو واژه تشکیل شده است، واژه نخست به دیدگاه شبکه‌گرایی این مفهوم تأکید دارد، درحالی که واژه دوم به اشیاء عمومی که در یک بسته مشترک قرار گرفته‌اند تأکید می‌کند. در واقع اینترنت اشیاء، یک شبکه جهانی از اشیاء مرتبط است که هر یک دارای آدرس مختص به خود بوده و براساس قراردادهای استاندارد شده‌ای با یکدیگر در ارتباط هستند.

۱.۲.۲. معماری اینترنت اشیاء. معماری اینترنت اشیاء از چهار لایه حسگر[1]، لایه شبکه[2]، لایه میانی[3] و لایه برنامه‌کاربردی[4] تشکیل شده است [۹]:

- **لایه حسگرها:** لایه حسگرها در پایین‌ترین سطح قرار دارد و شامل حسگرها، فعال‌کننده‌ها و تگ‌های (RFID)[5] است که اتصال حسگر و شبکه را فراهم می‌کنند.
- **لایه شبکه:** این لایه وظیفه فراهم کردن امکانات شبکه‌ای مورد نیاز را بر عهده دارد؛ به‌طوری‌که باید حجم بالای داده‌ها در اینترنت اشیاء را که توسط حسگرهای بی‌سیم و دستگاه‌های هوشمند تولید می‌شوند را پشتیبانی نماید.

---

[1] Sensor layer

[2] Network layer

[3] Middleware layer

[4] Application layer

[5] Radio Frequency Identification (RFID)

۱۷۳ ـــ

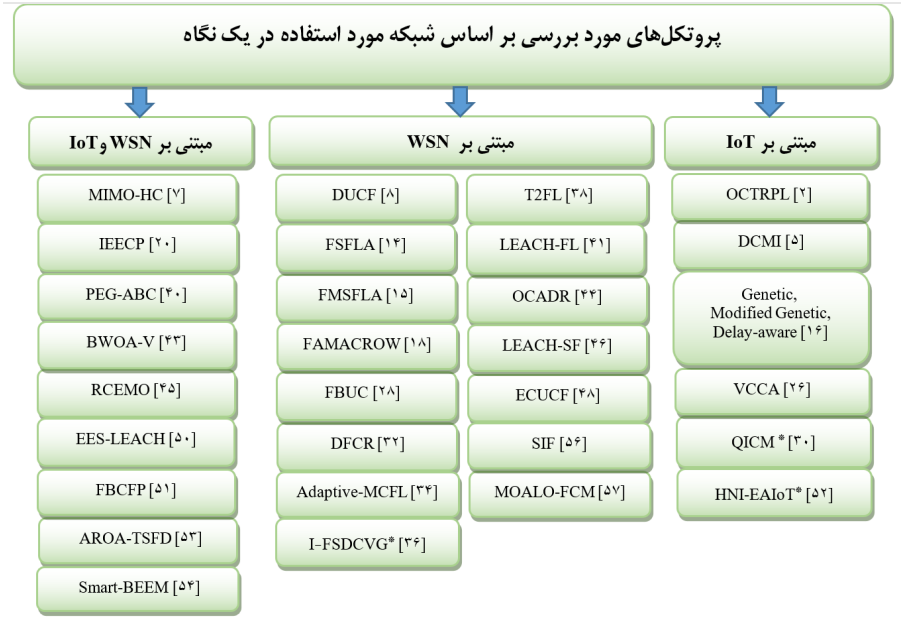
- **لایه میانی:** این لایه مسئولیت تجزیه و تحلیل اطلاعات، کنترل امنیت، مدل‌سازی فرآیندها و مدیریت دستگاه‌ها، مدیریت جریان داده‌ها و اطلاعات، یکپارچه‌سازی مکانیزم‌های دستیابی به اطلاعات را بر عهده دارد.
- **لایه برنامه‌کاربردی:** در آخرین لایه، خانواده‌ای بزرگ از برنامه‌های کاربردی وجود دارد که ممکن است مختص به یک صنعت بخصوص و یا چندین صنعت، طراحی و پیاده‌سازی شده باشند که قابلیت بهبود خدمات خود را با استفاده از برنامه‌های متنوع اینترنت اشیاء را دارا می‌باشند.

۳.۲. منطق فازی و نظریه مجموعه‌های فازی. تئوری مجموعه‌ها و منطق فازی را اولین‌بار پرفسور لطفی‌زاده در رساله‌ای به‌نام «مجموعه‌های فازی اطلاعات و کنترل» در سال ۱۹۶۵ معرفی نمود. هدف اولیه او در آن زمان، توسعه مدلی کارآمد برای توصیف فرآیند پردازش زبان‌های طبیعی بود. او مفاهیم و اصطلاحاتی همچون مجموعه‌های فازی، رویدادهای فازی، اعداد فازی و فازی‌سازی را به علوم، ریاضیات و مهندسی وارد نمود [۲۲]. بنیاد منطق فازی بر مبنای نظریه مجموعه‌های آن استوار است. این نظریه، تعمیمی از نظریه کلاسیک مجموعه‌ها در علم ریاضیات است، به‌طوری‌که یک عنصر یا عضو مجموعه هست یا نیست. در حقیقت، عضویت عناصر از یک الگوی صفر و یک باینری تبعیت می‌کند. اما تئوری مجموعه‌های فازی این مفهوم را ربط می‌دهد و عضویت درجه‌بندی‌شده را مطرح می‌کند. به‌این‌ترتیب که یک عنصر می‌تواند تا درجاتی و نه کاملاً، عضو یک مجموعه باشد. تابع عضویت، نحوه نگاشت هر نقطه در فضای ورودی را با مقدار عضویت (یا درجه عضویت) بین ۰ و ۱ مشخص می‌کند. از توابع عضویت می‌توان به توابع عضویت مثلثی، توابع عضویت ذوزنقه‌ای و توابع عضویت گاوسی اشاره کرد [۵۵] و سیستم‌های استنتاج فازی را با توجه به فرم قواعد T به سیستم‌های استنتاج فازی سوگنو[1]، تاکاگی-سوگنو-کانگ[2] و ممدانی[3] تقسیم نمود. در سیستم استنتاج فازی سوگنو، قواعد فازی در قسمت مقدم قرار دارند، اما قسمت تالی (نتیجه)، غیرفازی بوده و ترکیبی خطی از متغیرهای ورودی است. روش ممدانی یکی از نخستین سیستم‌های کنترلی بود که بر اساس تئوری مجموعه‌های فازی ساخته شد. در این سیستم، هم قسمت مقدم و هم قسمت تالی، به‌صورت مجموعه‌های فازی بیان می‌شوند [۴۷].

[1] Sugeno
[2] Takagi-Sugeno-Kang (TSK)
[3] Mamdani

۳. کارهای مرتبط در زمینه مدیریت و بهره‌وری انرژی در شبکه‌های WSN و IoT

در این بخش تعدادی از پروتکل‌هایی که از الگوریتم‌های مختلف همچون الگوریتم‌های ابتکاری، فرابتکاری، هوش جمعی و همچنین ترکیب آن‌ها با منطق فازی استفاده کرده‌اند و سعی در ایجاد محیط‌های هوشمند برای مدیریت مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه‌های ارتباطی داشته‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱، نمای کلی از طبقه‌بندی پروتکل‌های ارائه‌شده براساس نوع شبکه مورد استفاده آورده شده است و در شکل ۲، دسته‌بندی پروتکل‌ها براساس استفاده از منطق فازی و الگوریتم‌های هوشمند ارائه شده است.



* مخففهایی که برای مقالات با * مشخص شده‌اند، توسط نویسندگان این مقاله پیشنهاد گردیده‌اند.

شکل ۱: نمای کلی طبقه‌بندی پروتکل‌ها با توجه به شبکه مورد استفاده.

شکل ۲: طبقه‌بندی پروتکل‌ها بر اساس استفاده از منطق فازی و الگوریتم‌های هوشمند.

۱.۳. بهبود پروتکل LEACH با استفاده از منطق فازی (LEACH-FL)[1]

ران[2] و همکارانش [۴۱]، یک پروتکل بهبودیافته روی LEACH با استفاده از منطق فازی تحت عنوان LEACH-FL ارائه کردند. LEACH یک پروتکل خوشه‌بندی معروف است که سرخوشه‌ها را بر اساس یک مدل احتمال انتخاب می‌کند. با این‌حال، این مدل می‌تواند منجر به قرارگیری ناکارآمد سرخوشه شود، به‌طوری‌که برخی از سرخوشه‌ها خیلی نزدیک به یکدیگر قرار دارند، بنابراین نمی‌توانند

[1] Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy protocol using Fuzzy Logic (LEACH-FL)
[2] Ran

بازده انرژی را به حداکثر برسانند. روش LEACH-FL، از سه متغیر انرژی باقی‌مانده، فاصله از ایستگاه پایه، و چگالی گره، برای انتخاب سرخوشه‌ها استفاده می‌کند. فرآیند انتخاب سرخوشه متمرکز است و BS شانس تبدیل‌شدن هر گره به سرخوشه را محاسبه می‌کند. این روش به گره‌ها نیاز دارد تا محاسبات و ارتباطات اضافی را برای جمع‌آوری داده‌ها در مورد چگالی و فاصله گره انجام دهند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سطح انرژی به‌طور قابل‌توجهی بر انتخاب سرخوشه تأثیر می‌گذارد و از انتخاب سرخوشه بهتری برخوردار است.

۲.۳. الگوریتم خوشه‌بندی نابرابر بر اساس منطق فازی (FBUC)[۱]. لاگامبیگای[۲] و کنان[۳] [۲۸]، استفاده از منطق فازی برای خوشه‌بندی نابرابر در شبکه‌های حسگر بی‌سیم را مورد استفاده قرار دادند. در این روش، از منطق فازی برای تصمیم‌گیری در مورد انتخاب سرخوشه‌ها و تشکیل خوشه‌ها استفاده می‌شود. تصمیم‌گیری فازی برای انتخاب سرخوشه‌ها بر اساس معیارهای انرژی باقی‌مانده، درجه گره و فاصله از ایستگاه پایه، برای مشخص نمودن شعاع رقابتی انجام می‌گیرد. سپس با استفاده از معیارهای فاصله تا ایستگاه پایه و درجه سرخوشه به‌عنوان متغیرهای ورودی فازی و خروجی سیستم فازی، انتخاب سرخوشه صورت می‌گیرد. با این روش، خوشه‌هایی با اندازه‌های نابرابر تشکیل می‌شوند که این امر باعث توزیع بهتر بار انرژی در شبکه و جلوگیری از تخلیه سریع انرژی گره‌ها می‌گردد. بنابراین، سیستم استنتاج فازی با در نظر گرفتن و ترکیب متغیرهای مختلف درباره انتخاب سرخوشه‌ها تصمیم‌گیری می‌کند. درکل، این سیستم با ورودی‌های در نظر گرفته‌شده و با استفاده از قوانین فازی، معیار انتخاب سرخوشه را محاسبه می‌کند. گره‌هایی که بالاترین مقدار این معیار را دارند، به‌عنوان سرخوشه انتخاب می‌شوند. مزایای این روش شامل بهینه‌سازی مصرف انرژی، بهبود کارایی شبکه و افزایش طول عمر شبکه است.

۳.۳. الگوریتم خوشه‌بندی تعادل بار نابرابر توزیع‌شده با استفاده از منطق فازی(DUCF)[۴]. باراندهران[۵] و سنتی[۶] [۸]، الگوریتمی با نام DUCF برای شبکه‌های حسگر بیسیم ارائه کردند که مانند LEACH شامل دو مرحله کاری است: مرحله تشکیل خوشه و مرحله جمع‌آوری داده. در مرحله تشکیل خوشه، همه گره‌ها در شبکه واجد شرایط برای سرخوشه شدن هستند و هر گره با توجه

[1] Fuzzy-Based Unequal Clustering (FBUC)
[2] Lagambigai
[3] Kannan
[4] Distributed Unequal Clustering using Fuzzy logic (DUCF)
[5] Baranidharan
[6] Santhi

به ورودی‌های سیستم استنتاج فازی شامل انرژی باقی‌مانده، درجه گره و فاصله تا ایستگاه پایه، خروجی‌های شانس و اندازه را محاسبه می‌کند. شانس، نشان‌دهنده توانایی یک گره برای سرخوشه شدن و اندازه، نشان‌دهنده حداکثر تعداد گره‌هایی است که سرخوشه می‌تواند به عنوان اعضای خوشه خود بپذیرد. سپس همه گره‌ها برای رقابت به‌منظور سرخوشه شدن، یک اعلان شامل شناسه (ID)[۱] و شانس خود را در محدوده‌ای مشخص پخش می‌کنند. سرخوشه‌هایی که پیام اعلان را از سرخوشه‌های دیگر دریافت می‌کنند، چنانچه مقدار شانس‌شان بالاتر از بقیه سرخوشه‌های آن محدوده باشد، تبدیل به سرخوشه نهایی می‌شوند و یک پیام اعلان را برای آگاهی گره‌های شبکه در محدوده‌ای مشخص پخش می‌کنند. گره‌های غیرسرخوشه با توجه به دریافت پیام‌های اعلان از سرخوشه‌ها، درخواست عضویت خود را به نزدیک‌ترین سرخوشه ارسال می‌کنند و بعد از اینکه سرخوشه‌ای درخواست عضویت را از گره‌ای دریافت کرد، مقدار پارامتر اندازه را بررسی می‌کند و چنانچه تعداد عضوهای آن از این پارامتر کمتر باشد، درخواست گره را می‌پذیرد و در غیر این‌صورت آن‌را رد می‌کند. گره درخواست عضویت را به سرخوشه نزدیک‌تری که از آن اعلان دریافت کرده است ارسال می‌کند و چنانچه گره غیرسرخوشه، سرخوشه‌ای را برای اتصال به آن پیدا نکند، خودش را به عنوان سرخوشه معرفی می‌کند. این کار ادامه می‌یابد تا زمانی‌که تمام گره‌ها خوشه‌بندی شوند. DUCF از روش ممدانی برای استنتاج فازی و از روش مرکز ثقل[۲] برای غیرفازی‌سازی استفاده می‌کند.

۴.۳. پروتکل مسیریابی و خوشه‌بندی لایه متقاطع نابرابر مبتنی بر فازی و بهینه‌سازی کلونی مورچه ترکیب‌شده با MAC، برای شبکه‌های حسگر بیسیم (FAMACROW)[۳].

گجار[۴] و همکارانش [۱۸]، پروتکلی با نام FAMACROW ارائه کردند که در ابتدا گره‌های شبکه را لایه‌بندی می‌کند و شامل مراحل انتخاب سرخوشه، خوشه‌بندی و مسیریابی بین‌خوشه‌ای است. این پروتکل از انرژی باقی‌مانده، تعداد گره‌های همسایه و کیفیت اتصال ارتباطی به عنوان ورودی‌های منطق فازی، به منظور انتخاب سرخوشه‌ها استفاده می‌کند. هر گره با توجه به این ورودی‌ها، سیستم استنتاج فازی ممدانی را اجرا می‌کند و خروجی فازی را محاسبه می‌کند و گره با بالاترین مقدار کارایی در محدوده تعیین‌شده، سرخوشه خواهد شد. در این پروتکل برای اجتناب از مسئله نقاط داغ، خوشه‌ها به‌صورت نابرابر شکل می‌گیرند به‌گونه‌ای که خوشه‌های نزدیک به ایستگاه پایه، بزرگ‌تر در نظر گرفته می‌شوند. این پروتکل برای مسیریابی اطلاعات در بین خوشه‌ها و ارسال اطلاعات به

---

[1] Identification (ID)

[2] Centroid method

[3] Fuzzy and Ant colony Optimization based combined MAC, Routing and unegual clustering cross – layer protocol for Wireless sensor networks (FAMACROW)

[4] Gajjar

BS از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان (ACO)[1] استفاده می‌کند. ورودی‌های درنظرگرفته‌شده برای الگوریتم ACO به منظور تعیین بهترین گره بازپخش‌کننده، فاصله سرخوشه جاری تا BS، انرژی باقی‌مانده گره، طول صف و احتمال تحویل بسته به BS در نظر گرفته شده است.

۵.۳. پروتکل مسیریابی فازی مبتنی بر هوش جمعی (SIF)[2]. مولای زاهدی و همکارانش [۵۶]، پروتکلی با نام SIF برای شبکه‌های حسگر بیسیم خوشه‌بندی‌شده ارائه کردند که از الگوریتم میانگین-C فازی (FCM)[3] برای خوشه‌بندی گره‌های حسگر در خوشه‌هایی متعادل استفاده می‌کند و سپس سرخوشه‌های مناسب را با استفاده از سیستم استنتاج فازی و با توجه به ورودی‌های انرژی باقی‌مانده، فاصله تا BS و فاصله از مرکز ثقل خوشه و با توجه به خروجی فازی از میان اعضای خوشه، انتخاب می‌کند. به عبارت دیگر، یک پروتکل مسیریابی مبتنی بر خوشه است که در آن مرحله تشکیل خوشه قبل از مرحله انتخاب سرخوشه اجرا می‌شود. در این پروتکل، جدول قوانین فازی ممدانی در سیستم استنتاج فازی، قبل از شروع عملیات شبکه بر اساس ترکیب الگوریتم‌های کرم‌شب‌تاب (FA)[4] و شبیه‌سازی تبرید (SA)[5] بر اساس تابع هدفی که مبتنی بر کاربرد تعریف شده است، بهینه می‌شود.

۶.۳. الگوریتم خوشه‌بندی چندگامی هوشمند و متوازن با بهره‌وری انرژی (Smart-BEEM)[6]. سو[7] و همکارانش [۵۴]، الگوریتم خوشه‌بندی هوشمند Smart-BEEM را برای افزایش طول عمر و پوشش شبکه ارائه کردند. برای این منظور، سرخوشه‌ها براساس مصرف انرژی و توزیع حسگرها انتخاب می‌شوند. نویسندگان پیشنهاد می‌کنند که مصرف انرژی به ازای هر واحد سطح متعادل شود تا توزیع بهتری از انرژی به‌دست آید. با ظهور اینترنت اشیاء که شامل توانایی‌های ارتباطی متنوع و سناریوهای کاربری مختلف است، نیاز به راه‌حل‌های پیشرفته خوشه‌بندی وجود دارد. الگوریتم Smart-BEEM آگاه از رفتار کاربر، به دستگاه‌های اینترنت اشیاء کمک می‌کند تا رابط‌های ارتباطی[8] و سرخوشه‌های بهینه را برای انتقال داده انتخاب کنند. نتایج تجربی نشان

[1] Ant Colony Optimization (ACO)
[2] Swarm Intelligence-based Fuzzy routing protocol (SIF)
[3] Fuzzy C-Means (FCM)
[4] Firefly Algorithm (FA)
[5] Simulated Annealing (SA)
[6] Smart Balanced Energy Efficient Multi-step clustering (Smart-BEEM)
[7] Su
[8] Communication interfaces

۱۷۹ ـــ"

از ورودی‌های فاصله تا ایستگاه پایه و انرژی باقی‌مانده شعاع رقابتی[1] خود را محاسبه می‌کند و سپس هر سرخوشه اولیه یک پیام در شعاع رقابتی خود پخش می‌کند هر گره سرخوشه اولیه که این پیام را دریافت کند اگر انرژی باقی‌مانده‌اش کمتر از انرژی باقی‌مانده گره پخش‌کننده باشد خود را از رقابت برای سرخوشه شدن حذف می‌کند اگر گره عادی این پیام را دریافت کند با توجه به ورودی‌های فازی فاصله و انرژی باقی‌مانده سرخوشه نهایی را انتخاب می‌کند و به آن سرخوشه می‌پیوندد.

۹.۳. الگوریتم چندخوشه‌بندی تطبیق‌پذیر با استفاده از منطق فازی (Adaptive MCFL)[2].

میرزایی و مزینانی [۳۴]، الگوریتمی را با نام Adaptive MCFL برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم ارائه کردند. در این مطالعه، سه الگوریتم خوشه‌بندی متفاوت برای خوشه‌بندی گره‌های حسگر استفاده شده است. در اولین الگوریتم خوشه‌بندی، پارامترهایی مانند انرژی باقی‌مانده و تعداد همسایگان هر گره به عنوان ورودی‌های فازی در نظر گرفته می‌شوند. انرژی مهم‌ترین پارامتر در شبکه حسگر بی‌سیم است و تعداد همسایگان به عنوان یک عامل تأثیرگذار در خوشه‌بندی محسوب می‌شود. پس از استنتاج و تعیین شانس، هر گره خروجی به‌دست‌آمده را به همسایگان خود ارسال می‌کند و در نهایت گرهی که بالاترین خروجی را دارد به عنوان سرخوشه آن گره انتخاب می‌شود. پس از انتخاب سرخوشه، گره‌ها داده‌های خود را به سرخوشه‌ها ارسال می‌کنند و سرخوشه‌ها پس از تجمیع داده‌ها، آن‌ها را به ایستگاه پایه ارسال می‌کنند. در پایان این مرحله، بهترین گره‌ها در شعاع همسایگی به عنوان سرخوشه انتخاب می‌شوند. از آنجایی‌که انرژی گره‌ها و تعداد همسایگان تغییر نکرده است، احتمال زیادی وجود دارد که در دوره بعدی نیز همان سرخوشه‌ها انتخاب شوند. امکان دارد که در دوره‌های مختلف گره‌ها در خوشه‌های مختلف باشند. گره‌هایی که انرژی سرخوشه‌هایشان در الگوریتم خوشه‌بندی دوم به حدآستانه نرسیده است، مجاز به ماندن در الگوریتم خوشه‌بندی دوم هستند، در حالی که گره‌هایی که به حدآستانه رسیده‌اند به خوشه‌بندی سوم منتقل می‌شوند. این روش بین سرخوشه‌ها تمایز قائل می‌شود. سرخوشه‌هایی که خروجی فازی بالاتری دارند باید حدآستانه کمتری داشته باشند زیرا مناسب‌تر هستند. بنابراین، در هنگام انتخاب مقدار آستانه، خروجی فازی هر سرخوشه باید مورد توجه قرار گیرد. الگوریتم Adaptive MCFL با استفاده از منطق فازی و پارامترهایی مانند انرژی باقی‌مانده و تعداد همسایگان برای انتخاب سرخوشه‌ها، به بهینه‌سازی مصرف انرژی پرداخته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این الگوریتم موفق به کاهش مصرف انرژی، کاهش تعداد

[1] Competition radius

[2] Adaptive Multi-Clustering algorithm using Fuzzy Logic (Adaptive MCFL)

گره‌های مرده[1]، افزایش طول عمر شبکه و افزایش تعداد بسته‌های داده دریافتی در ایستگاه پایه شده است.

۱۰.۳. الگوریتم خوشه‌بندی مبتنی بر فازی نوع ۲ (T2FL)[2]. نایاک[3] و واتاساوای[4] [۳۸]، یک الگوریتم خوشه‌بندی بهینه برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم چندگامی با استفاده از منطق فازی نوع ۲ ارائه کردند. این الگوریتم قادر است به عدم‌قطعیت‌های بیشتری پاسخ دهد و مدل‌سازی دقیق‌تری ارائه دهد. در این الگوریتم، انتخاب سرخوشه‌ها بر اساس معیارهای انرژی باقی‌مانده، تمرکز[5] و فاصله از BS انجام می‌شود و شبکه به خوشه‌های با اندازه‌های مختلف تقسیم می‌شود. این خوشه‌بندی چندسطحی باعث می‌شود که سرخوشه‌ها به‌طور مؤثرتری مدیریت انرژی گره‌ها را انجام دهند. این الگوریتم با توزیع متعادل بار انرژی در سراسر شبکه، از تخلیه سریع انرژی برخی گره‌ها جلوگیری می‌کند، همچنین این کار باعث افزایش عمر شبکه می‌شود. برای ارسال داده‌ها از گره‌ها به BS، این الگوریتم از مسیریابی چندگامی استفاده کرده که به کاهش مصرف انرژی کمک می‌کند. این رویکرد، مصرف انرژی را بهینه کرده و عمر شبکه حسگر بی‌سیم را افزایش می‌دهد که این امر بهبود کارایی و پایداری شبکه را به همراه دارد.

۱۱.۳. الگوریتم خوشه‌بندی طبقه‌بندی‌شده متغیر با استفاده از منطق فازی (VCCA)[6]. کووان[7] و همکارانش [۲۶]، الگوریتم VCCA را ارائه کردند که این الگوریتم از یک سیستم استنتاج فازی برای طبقه‌بندی متغیرهای خوشه‌ای و انتخاب سرخوشه با بالاترین ظرفیت شبکه استفاده می‌کند و از پیچیدگی کم و مقیاس‌پذیری بالا اطمینان می‌دهد. در این روش، هریک از گره‌های حسگر، یک مقدار سودمندی گره (NU)[8] را نگهداری می‌کنند که به ظرفیت شبکه‌ای آن‌ها اشاره دارد و مرحله انتخاب سرخوشه به‌صورت توزیع‌شده مبتنی بر مقدار NU برای ساخت شبکه خوشه‌ای اجرا می‌شود. بنابراین، عملیات در VCCA شامل دو مرحله اصلی است: (۱) مرحله محاسبه NU و (۲) مرحله خوشه‌بندی. در پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج، چهار الگوریتم خوشه‌بندی مورد مقایسه قرارگرفتند: الگوریتم VCCA، الگوریتم خوشه‌بندی مبتنی بر منطق فازی بدون طبقه‌بندی، الگوریتم

---

[1] Dead nodes

[2] Type 2 Fuzzy Logic clustering algorithm (T2FL)

[3] Nayak

[4] Vathasavai

[5] Concentration

[6] Variable Categorized Clustering Algorithm (VCCA)

[7] Kwon

[8] Node Utility (NU)

خوشه‌بندی فقط با در نظر گرفتن معیار «فاصله تا چاهک» و الگوریتم خوشه‌بندی فقط با در نظر گرفتن معیار «انرژی». بررسی نتایج نشان می‌دهد که این روش در مقایسه با الگوریتم خوشه‌بندی متمرکز بر معیار انرژی، عملکرد کمتری در طول عمر شبکه و مصرف انرژی نشان می‌دهد، اما به‌طور قابل‌توجهی توان عملیاتی و تأخیر را بهبود می‌بخشد و آن را به راه‌حل کارآمدتری برای کاربردهای متنوع اینترنت اشیاء تبدیل می‌کند.

۱۲.۳. پروتکل خوشه‌بندی فازی با الگوریتم جهش قورباغه (FSFLA)[1]. فانیان و کوچکی رفسنجانی [۱۴]، یک پروتکل خوشه‌بندی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم ارائه دادند که از الگوریتم جهش قورباغه (SFLA)[2] و منطق فازی استفاده می‌کند. این پروتکل علاوه‌بر تنظیم خودکار قوانین فازی، پنج پارامتر قابل‌کنترل مرتبط با ورودی‌ها به سیستم فازی را در یک روش آفلاین، قبل از راه‌اندازی شبکه، بهینه می‌کند. ورودی سیستم‌های فازی شامل انرژی باقی‌مانده، فاصله از ایستگاه پایه، تعداد گره‌های همسایه و تاریخچه گره است. در این الگوریتم، توزیع سرخوشه‌ها با توجه به دو پارامتر کنترلی حدآستانه فاصله درون‌خوشه‌ای و بین‌خوشه‌ای انجام می‌شود. پروتکل FSFLA با پروتکل‌های مختلف مانند LEACH، LEACH-DT[3]، SIF و ASLPR[4] از نظر طول عمر شبکه، انرژی باقی‌مانده، تعداد بسته‌های دریافت‌شده از ایستگاه پایه و فاصله درون‌خوشه‌ای مقایسه شده است و نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که پروتکل خوشه‌بندی FSFLA، به‌طور قابل‌توجهی، در همه موارد از پروتکل‌های دیگر بهتر عمل می‌کند.

۱۳.۳. الگوریتم مسیریابی و خوشه‌بندی نابرابر مبتنی بر منطق فازی توزیع‌شده (DFCR)[5]. مزومدار[6] و ام[7] [۳۲]، الگوریتمی با نام DFCR ارائه کردند که شامل چهار مرحله اشتراک اطلاعات، تشکیل خوشه، تشکیل ستون فقرات مجازی[8] و فرآیند مسیریابی است. هدف اصلی این روش، کاهش مصرف انرژی و افزایش عمر شبکه با توجه به محدودیت‌های انرژی در گره‌های حسگر است. در این روش، از منطق فازی برای خوشه‌بندی و تصمیم‌گیری درباره انتخاب سرخوشه‌ها استفاده می‌شود که به بهبود بهره‌وری انرژی کمک می‌کند. فرآیند خوشه‌بندی به‌گونه‌ای طراحی شده است

[1] Fuzzy Shuffled Frog Leaping Algorithm (FSFLA)
[2] Shuffled Frog Leaping Algorithm (SFLA)
[3] LEACH with Distance-based Thresholds (LEACH-DT)
[4] Application Specific Low Power Routing Protocol (ASLPR)
[5] Distributed Fuzzy logic-based unequal Clustering approach and Routing algorithm (DFCR)
[6] Mazumdar
[7] Om
[8] Virtual backbone formation

که سرخوشه‌ها در مناطق دورتر از BS، خوشه‌های کوچک‌تری و سرخوشه‌های نزدیک‌تر به BS، خوشه‌های بزرگ‌تری را تشکیل می‌دهند. این توزیع نابرابر، بار انرژی را به‌طور متعادل در سراسر شبکه توزیع می‌کند. استفاده از منطق فازی باعث می‌شود که معیارهای مختلفی نظیر سطح انرژی و فاصله تا ایستگاه پایه مورد ارزیابی قرار گیرند تا سرخوشه‌های بهینه انتخاب شوند. در این الگوریتم، با استفاده از داده‌های محلی گره‌های حسگر، فرآیند خوشه‌بندی و مسیریابی به‌صورت کاملاً توزیع‌شده انجام می‌شود.

۱۴.۳. الگوریتم مسیریابی انرژی آگاه مبتنی بر خوشه و سیستم عصبی-فازی (FBCFP)[1]. تانگارامیا[2] و همکارانش [۵۱]، الگوریتم مسیریابی کارآمد FBCFP را برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم و اینترنت اشیاء ارائه کردند. این کار یک رویکرد مبتنی بر یادگیری عمیق یکپارچه با سیستم استنتاج عصبی-فازی (NFIS)[3] با هدف افزایش طول عمر شبکه بود. در این الگوریتم، برای تشکیل خوشه از مدل‌سازی انرژی برای مسیریابی کارآمد بسته‌ها از طریق کاربرد یادگیری ماشین با استفاده از شبکه عصبی کانولوشن (CNN)[4] و قوانین فازی برای تنظیم وزن استفاده شده و در نتیجه طول عمر شبکه طولانی‌تر می‌شود. چهار مؤلفه‌ی انرژی باقی‌مانده سرخوشه، فضای بین سرخوشه و ایستگاه پایه، فضای بین گره حسگر و سرخوشه و درجه سرخوشه به عنوان ورودی‌های سیستم استنتاج عصبی-فازی در نظر گرفته شدند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، پروتکل FBCFP در مقایسه با سایر پروتکل‌ها از نظر بهره‌وری انرژی و طول عمر سیستم به دلیل استفاده از قوانین عصبی-فازی به‌دست‌آمده از طریق یادگیری بهتر عمل می‌کند.

۱۵.۳. پروتکل خوشه‌بندی کارآمد انرژی بهبودیافته (IEECP)[5]. حسن[6] و همکارانش [۲۰]، پروتکل خوشه‌بندی IEECP را برای بهبود طول عمر اینترنت اشیاء مبتنی بر شبکه‌های حسگر بی‌سیم ارائه دادند. روش آن‌ها از سه بخش تشکیل شده است، ابتدا تعداد بهینه‌ای از خوشه‌ها برای خوشه‌های متعادل هم‌پوشان تعیین و سپس خوشه‌های ایستای متعادل براساس الگوریتم میانگین-C فازی اصلاح‌شده (M-FCM)[7] با ترکیب این الگوریتم با مکانیزمی برای کاهش و متعادل‌سازی مصرف انرژی گره‌های حسگر تشکیل می‌شوند. در نهایت، سرخوشه‌ها در

[1] Fuzzy Based Cluster Formation Protocol (FBCFP)

[2] Thangaramya

[3] Neuro-Fuzzy Inference System (NFIS)

[4] Convolutional Neural Network (CNN)

[5] Improved Energy Efficient Clustering Protocol (IEECP)

[6] Hassan

[7] Modified Fuzzy C-Means (M-FCM)

مکان‌های بهینه با تابع چرخش سرخوشه در بین اعضای خوشه براساس یک الگوریتم جدید انتخاب–چرخش (CHESRA)[1] و با ادغام یک زمان‌سنج برگشتی[2] انتخاب می‌شوند. این پروتکل با بهبود ساختار خوشه‌بندی، مصرف انرژی گره‌ها را کاهش و متعادل می‌کند، همچنین برای شبکه‌هایی که به طول عمر بیشتری نیاز دارند مناسب است.

۱۶.۳. پروتکل خوشه‌بندی با الگوریتم جهش قورباغهٔ چندگامی فازی (FMSFLA)[3].

فانیان و کوچکی‌رفسنجانی [۱۵]، با استفاده از الگوریتم جهش قورباغه، یک پروتکل خوشه‌بندی چندگامی فازی تحت عنوان FMSFLA ارائه کردند. این الگوریتم برای پیکربندی و بهینه‌سازی خودکار جدول قوانین پایه در سیستم استنتاج فازی و پنج پارامتر قابل تنظیم در دو مرحله، یعنی انتخاب سرخوشه و انتخاب والدین، بر اساس ویژگی‌های کاربرد استفاده می‌شود. پروتکل FMS–FLA پارامترهای مؤثری از جمله انرژی، فاصله از ایستگاه پایه، تعداد گره‌های همسایه، فاصلهٔ واقعی گره از ایستگاه پایه، میانگین بار مسیر، تأخیر، هم‌پوشانی و مشکل نقاط داغ را به‌منظور دستیابی به بهترین عملکرد مبتنی بر کاربرد در نظر می‌گیرد. FMSFLA شامل دورهایی است که در هر دور، مراحل انتخاب سرخوشه، انتخاب والدین، تشکیل خوشه و حالت پایدار انجام می‌شود. در مرحلهٔ انتخاب سرخوشه، سرخوشه‌ها از گره‌های کاندید براساس خروجی فازی و حدآستانهٔ انرژی با توجه به نرخ هم‌پوشانی سرخوشه‌های مجاور انتخاب می‌شوند. در این پروتکل، مرحله انتخاب والدین با تعیین سطوح سرخوشه‌ها در شبکه آغاز می‌شود. در پایان این مرحله، والدین هر سرخوشه براساس بزرگ‌ترین مقدار خروجی فازی مبتنی بر کاربرد تعیین می‌گردد. در مرحله تشکیل خوشه، خوشه‌ها براساس سرخوشه‌های تعیین‌شده تشکیل می‌شوند. در نهایت، اطلاعات دریافتی توسط سرخوشه‌ها در مرحله حالت پایدار از طریق والدین آن‌ها به BS ارسال می‌شود. پروتکل FMSFLA در مقابل پروتکل‌های LEACH، LEACH-EP[4]، LEACH-FL، ASLPR، SIF و ERA[5] از نظر تعداد گره‌های زنده، بسته‌های دریافتی و سرخوشه‌ها و همچنین نرخ توزیع مناسب آن‌ها و دیگر پارامترهای مربوط به طول عمر شبکه و مقیاس‌پذیری پروتکل، با استفاده از سه سناریوی مبتنی بر کاربرد ارزیابی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که FMSFLA در تمامی سناریوها با توجه به اهداف و ویژگی‌های کاربرد بهتر از سایر پروتکل‌ها عمل کرده است.

---

[1] Cluster Head Election and Rotation Algorithm (CHESRA)

[2] Back-off timer

[3] Fuzzy Multihop Shuffled Frog Leaping Algorithm (FMSFLA)

[4] LEACH with Energy Prediction (LEACH-EP)

[5] Energy-aware Routing Algorithm (ERA)

۱۷.۳. پروتکل مسیریابی ترکیبی ورودی و خروجی چندگانه با بازده انرژی (MIMO-HC)[1]. بانیاتا[2] و همکارانش [۷]، یک رویکرد متمرکز را برای سازماندهی موجودیت‌های ارتباطی اینترنت اشیاء با هدف حفظ شبکه اینترنت اشیاء در برابر مشکلات نقاط داغ و افزایش طول عمر شبکه تحت محیط 5G مطرح کردند. این روش به‌منظور بهبود کارایی انرژی سیستم‌های ارتباطی IoT در شرایط 5G معرفی شد. پروتکل MIMO-HC از سه مرحله تشکیل شده است: (۱) انتخاب سرخوشه، (۲) ایجاد خوشه ترکیبی و (۳) جمع‌آوری و انتشار داده. این پروتکل مبتنی بر تقسیم شبکه به خوشه‌های نابرابر سلسله‌مراتبی برای توازن مصرف انرژی بین سرخوشه‌ها است. MIMO-HC برای ارتباطات درون‌خوشه‌ای به‌صورت چندگامی و برای ارتباطات بین‌خوشه‌ای به‌صورت تک‌گامی عمل می‌کند. ارزیابی نتایج نشان می‌دهد که این پروتکل نسبت به پروتکل‌های موجود عملکرد بهتری دارد، طول عمر شبکه را افزایش می‌دهد و مصرف انرژی سرخوشه‌ها را نیز کاهش می‌دهد.

۱۸.۳. پروتکل مسیریابی و خوشه‌بندی انرژی‌آگاه، با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه (RCEMO)[3]. صدیقی‌منش و همکارانش [۴۵]، در مطالعه خود، مهم‌ترین هدف را در به حداقل رساندن مصرف انرژی حسگرها و افزایش طول عمر شبکه اینترنت اشیاء با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه، با انتخاب سرخوشه‌ها و مسیریابی بین سرخوشه‌ها برای انتقال داده‌ها به ایستگاه پایه دنبال کردند. در این روش، از الگوریتم فازی نوع دوم برای خوشه‌بندی و از الگوریتم ژنتیک (GA)[4] برای بهینه‌سازی مسیریابی استفاده شده است. با توجه به آزمایش‌هایی که انجام گرفت، این الگوریتم، مصرف انرژی و طول عمر شبکه اینترنت اشیاء را بهبود بخشیده و همچنین با این روش، تعداد داده‌های ارسالی به ایستگاه پایه نسبت به روش‌های قبلی افزایش چشم‌گیری داشته است.

۱۹.۳. روش خوشه‌بندی با الهام از کوانتوم جهت کاهش مصرف انرژی (QICM)[5]. محمودی و همکارانش [۳۰]، به بررسی بهینه‌سازی مصرف انرژی در شبکه‌های اینترنت اشیاء با استفاده از یک الگوریتم فراابتکاری جدید الهام‌گرفته از کوانتوم می‌پردازند. این الگوریتم، براساس ترکیب الگوریتم‌های کرم شب‌تاب FA و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)[6] طراحی شده است.

[1] Multiple-Input Multiple-Output Hybrid Clustering (MIMO-HC)

[2] Baniata

[3] Routing and Clustering Energy aware using Multi-objective Optimization algorithms (RCEMO)

[4] Genetic Algorithm (GA)

[5] Quantum Inspired Clustering Method (QICM)

[6] Particle Swarm Optimization (PSO)

هدف اصلی این روش، بهبود بهره‌وری انرژی و افزایش عمر شبکه‌های IoT از طریق خوشه‌بندی بهینه است. روش ارائه‌شده شامل استفاده از الگوریتم‌های الهام‌گرفته از منطق کوانتومی برای تشکیل خوشه‌ها و انتخاب سرخوشه‌ها می‌باشد. راه‌حل آن‌ها استفاده از یک الگوریتم فرعی به‌نام (CBS)[1] می‌باشد که یک راه‌حل دودویی را از راه‌حل کوانتومی به‌دست می‌آورد. انگیزه این رویکرد، بهره‌برداری از قدرت و سرعت ارائه‌شده توسط الگوریتم‌های کوانتومی و الهام‌گرفته از کوانتوم برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و درعین‌حال بهره‌برداری از مزایای ترکیبی الگوریتم کرم شب‌تاب و حرکات PSO هنگام مرور دامنه راه‌حل است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که این روش می‌تواند مصرف انرژی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد و عملکرد بهتری نسبت به روش‌های خوشه‌بندی موجود داشته باشد. ارزیابی نتایج حاکی از آن است که بهبودهای قابل‌توجهی در کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری شبکه‌های IoT ایجاد شده است.

۲۰.۳. رویکرد خوشه‌بندی پویا با استفاده از بهینه‌ساز چندگانه برای دستگاه‌های اینترنت اشیاء (DCMI)[2]

آریکومار[3] و همکارانش [۵]، روشی را ارائه دادند که به بررسی مشکلات موجود در دستگاه‌های اینترنت اشیاء پرداخته است، از جمله مصرف نامتعادل انرژی و نرخ بالای از دست دادن بسته. برای رفع این مشکلات، آن‌ها یک الگوریتم جدید با استفاده از MVO[4] به نام DCMI معرفی کردند که برای خوشه‌بندی پویای دستگاه‌های اینترنت اشیاء استفاده می‌شود. این الگوریتم، به‌کمک گره‌های مه[5]، داده‌ها را با حداقل تأخیر منتقل می‌کند که منجر به بهبود طول عمر شبکه و کاهش نسبت از دست دادن بسته‌ها می‌شود. این روش، به تولید خوشه‌های پایدارتر و بهینه‌تر کمک می‌کند. گره‌های مه نیز در این طرح نقش مهمی ایفا می‌کنند و به کاهش تأخیر در انتقال داده‌ها کمک می‌نمایند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش DCMI، در مقایسه با روش‌های خوشه‌بندی موجود، عملکرد بهتری دارد. این عملکرد بهبودیافته شامل افزایش طول عمر شبکه، کاهش تأخیر، کاهش نسبت از دست دادن بسته‌ها، افزایش توان عملیاتی، بهبود نسبت تحویل بسته‌ها و کاهش مصرف انرژی است.

---

[1] Construct Binary Solution (CBS)

[2] Dynamic Clustering approach using Multi-verse optimizer for fog-assisted IoT devices (DCMI)

[3] Arikumar

[4] Multi-Verse Optimization (MVO)

[5] Fog nodes

۲۱.۳. طرح مسیریابی امن بااستفاده از پروتکل LEACH با کارآیی انرژی (EES-LEACH)

سورشند[۲] و پراساد[۳] [۵۰]، به بررسی استفاده از پروتکل LEACH برای بهبود مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم برای شبکه‌های اینترنت اشیاء پرداختند[۱]. این پروتکل با استفاده از اعداد تصادفی تولیدشده توسط هر گره حسگر، گروهی از گره‌ها را به‌عنوان سرخوشه انتخاب می‌کند. در این طرح، نسخه بهبودیافته‌ای از پروتکل LEACH به‌نام EES-LEACH معرفی شده است که با استفاده از انتخاب سرخوشه‌ها براساس پوشش گره، نرخ مصرف انرژی و فاصله از ایستگاه پایه، به بهبود پایداری و کارایی انرژی کمک می‌کند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که این روش به‌طور قابل‌توجهی عملکرد شبکه‌های حسگر بی‌سیم برای کاربردهای اینترنت اشیاء را از نظر کارایی انرژی، طول عمر شبکه و کیفیت ارتباطات بهبود می‌بخشد، همچنین، این پروتکل برای استفاده در شبکه‌های حسگر برای اینترنت اشیاء که نیاز به تحلیل داده‌های بزرگ دارند، مناسب است.

۲۲.۳. طرح خوشه‌بندی- مسیریابی انتشار ناهمسانگرد محدود بهینه (OCADR)[۴].

صالح و نقابی [۴۴]، یک پروتکل خوشه‌بندی مسیریابی انرژی-آگاه بر اساس یادگیری عمیق درختی[۵] برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم ارائه کردند. در این روش، انرژی باقی‌مانده هر گره حسگر برای دستیابی به یک شبکه متعادل محاسبه و گره حسگر با بالاترین انرژی باقی‌مانده به عنوان گره بهینه برای سرخوشه انتخاب می‌شود. در نتیجه، انرژی بیشتری ذخیره می‌شود و طول عمر شبکه افزایش و در عین حال پیچیدگی محاسباتی کاهش پیدا می‌یابد. در این روش با به‌کارگیری الگوریتم خوشه‌بندی چرخشی درخت DAVL[۶]، یک حالت غالب ایجاد می‌شود که به عنوان ستون فقرات شبکه عمل می‌کند. پیاده‌سازی این روش، تأخیر انتقال داده با اطمینان از انتقال داده را به حداقل می‌رساند. پیام‌ها با سرعت بالا به کاربر نهایی تحویل داده شده و در ضمن دقت، بهره‌وری انرژی و اطمینان لازم را نیز شامل می‌شود. قابل ذکر است که این نوآوری‌ها در شبکه حسگر بی‌سیم با استفاده از روش زمان‌بندی خواب-بیداری اجرا می‌گردد.

---

[1] Energy Efficient Secure – Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (EES-LEACH)

[2] Sureshand

[3] Prasad

[4] Optimized Constrained Anisotropic Data Routing (OCADR)

[5] Deep tree learning

[6] Deep Adelson-Velskii and Landis (DAVL)

۲۳.۳. پروتکل مسیریابی مبتنی بر درخت خوشه‌ای بهینه (OCTRPL)[۱]. اجی[۲] و همکاران [۲]، پروتکل OCTRPL را به عنوان یک سیستم انتقال انرژی محاسباتی پیشرفته برای شبکه‌های بین خودرویی (VANETs)[۳] در اینترنت اشیاء با استفاده از درخت بی‌سیم کارآمد ارائه دادند. در این معماری، گره‌های شبکه، خودروها هستند و ایستگاه‌های ترافیک به عنوان مسیریاب‌ها عمل می‌کنند. در این روش، استراتژی اجرای کوتاه‌ترین مسیر به صورتی کارآمد تضمین شده و انتقال داده بین گره‌های شبکه کاهش یافته و طول‌عمر شبکه افزایش می‌یابد. فاصله اقلیدسی، توسعه یک خوشه ایده‌آل را تسهیل می‌کند و امکان انتخاب سرخوشه‌ها را با استفاده از یک روش نظریه بازی‌ها فراهم می‌سازد. به دنبال آن، معیارهایی همچون تعداد انتقال مورد انتظار، نسبت بهره‌وری صف، و نسبت انرژی باقی‌مانده در فرآیند انتخاب مسیر در نظر گرفته می‌شوند. این مجموعه معیارها که به عنوان ETC[۴] شناخته می‌شوند، به انتخاب بهترین مسیر برای انتقال انرژی به صورتی کارآمد در سراسر شبکه کمک می‌کنند. با شبیه‌سازی‌های متعدد، سودمندی روش ارائه‌شده، در غلبه بر تخلیه اولیه باتری و بسته‌های انتقال داده از دست‌رفته در گره چاهک، نشان داده شد.

۲۴.۳. روش مسیریابی بین خوشه‌ای ترکیبی مبتنی بر ANFIS[۵] و الگوریتم بهینه‌سازی خزندگان (AROA-TSFD)[۶]. وازوتی[۷] و همکارانش [۵۳]، یک روش جدید برای افزایش بهره‌وری انرژی و مدیریت خطا ارائه کردند. رویکرد اصلی، معرفی و توسعه یک الگوریتم ترکیبی ANFIS (سیستم استنتاج عصبی فازی انطباقی) و الگوریتم بهینه‌سازی خزندگان[۸] برای مسیریابی بین خوشه‌ای با بهره‌وری انرژی و بهبود کیفیت خدمات (QoS)[۹] در شبکه‌های حسگر بی‌سیم برای اینترنت اشیا است. این الگوریتم ترکیبی، مسیر بهینه از خوشه تا چاهک را مشخص می‌کند. این روش، برای ارائه راه‌حل‌های مناسب برای محدودیت‌های مربوط به انرژی و خطا توسعه داده شد و در دو مرحله انجام می‌گیرد. ابتدا بهترین مسیر بین خوشه‌ای تعیین می‌شود و در مرحله دوم، الگوریتم TSFD[۱۰] برای تشخیص خطاهای مختلف همچون خطای حس کردن، خطای انرژی باقی‌مانده و

---

[1] Optimized Cluster Tree-based Routing Protocol for VANETs (OCTRPL)

[2] Ajay

[3] Vehicular Ad-Hoc Networks (VANETs)

[4] Expected Transmission Count

[5] Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS)

[6] Reptile Optimization Algorithm- Tuned Supervision-based Fault Diagnosis algorithm (AROA-TSFD)

[7] Vazhuthi

[8] Reptile Optimization Algorithm

[9] Quality of Service (QoS)

[10] Tuned Supervision-based Fault Diagnosis algorithm (TSFD)

خطای ارتباطی به کار گرفته می‌شود، به طوری که یک مسیر بدون خطا بین رهبر خوشه (CL)[1] و چاهک ایجاد گردد. این رویکرد، نه تنها انرژی مصرفی را کاهش می‌دهد، بلکه به افزایش پایداری و کارایی شبکه نیز کمک می‌کند.

۲۵.۳. روش مسیریابی کارآمد با استفاده از کلونی زنبور عسل و الگوریتم خوشه‌بندی زنجیره‌ای سلسله‌مراتبی(PEG-ABC)[2]. روش مسیریابی PEG-ABC توسط رمضان‌زاده و شکرزاده [۴۰] برای شبکه‌های اینترنت اشیاء ارائه شد. در این رویکرد، یک سیستم مسیریابی زنجیره‌ای سلسله‌مراتبی دو سطحی مبتنی بر الگوریتم کلونی زنبور عسل طراحی شده تا کارایی شبکه حسگر را با کاهش تأخیر انتقال داده‌ها و مزایای ارتباط زنجیره‌ای، بهبود بخشد. معیارهایی نظیر انرژی باقی‌مانده، فاصله اقلیدسی بین حسگرها، و فاصله اقلیدسی بین حسگرها و ایستگاه پایه به‌طور هم‌زمان با تابع شایستگی الگوریتم کلونی زنبور عسل در سطح اول این روش تنظیم می‌شوند، و در سطح دوم، مسیرهای انتها–به–انتها بین رهبران خوشه تا ایستگاه پایه تشکیل می‌گردد. تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها در زنجیره ارتباطی سلسله‌مراتبی باعث کاهش مصرف انرژی برای جمع‌آوری اطلاعات در هر مرحله می‌شود. با بررسی نتایج شبیه‌سازی، بهبود نسبی در تأخیر انتقال، به‌دلیل انتخاب رهبران نزدیک به ایستگاه پایه در هر خوشه و توازن بین تأخیر و انرژی بین رهبران خوشه، مشاهده می‌شود.

۲۶.۳. الگوریتم چندهدفه شیرمورچه با خوشه‌بندی میانگین فازی (MOALO-FCM)[3]. ژانگ[4] و همکارانش [۵۷]، الگوریتم جدیدی ارائه کردند که برای بهبود استقرار گره‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم طراحی شده است. آن‌ها در این تحقیق، به معرفی یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای حل مسئله استقرار سرخوشه‌ها با محدودیت‌های متعدد و اهداف متفاوت پرداختند. این الگوریتم، که ترکیبی از ویژگی‌های خوشه‌بندی فازی و الگوریتم هوش جمعی چندهدفه است، برای دستیابی به تعادل بهتر بین اهداف بهینه‌سازی مختلف توسعه داده شده است. در این رویکرد، از یک استراتژی بازنگری تطبیقی تابع عضویت استفاده می‌شود تا تعادل انرژی در سرخوشه‌ها بهبود یابد. نتایج آزمایش‌های چندبعدی نشان می‌دهد که این رویکرد قادر است راه‌حل‌های بهینه پارتو را در محیط‌های شبیه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی به‌دست آورد و عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌های موجود داشته باشد. مزایای این روش شامل کاهش مصرف انرژی شبکه، افزایش طول‌عمر شبکه

[1] Cluster Leader (CL)

[2] Power Efficient Grouping with Artificial Bee Colony (PEG-ABC)

[3] Multi-Objective Ant Lion optimization with Fuzzy C-Means (MOALO-FCM)

[4] Zhang

است. همچنین، این الگوریتم در مقایسه با سایر روش‌ها، زمان اجرای کمتری دارد و بهبود تعادل انرژی را در سناریوهای مختلف فراهم می‌کند.

۲۷.۳. الگوریتم خوشه‌بندی کارآمد انرژی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ باینری و سیستم استنتاج فازی (BWOA-V)[1]. سعیدی و همکارانش [۴۳]، با پرداختن به چالش‌های مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مبتنی بر اینترنت اشیاء، یک پروتکل مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی کارآمد را مطرح کردند. این پروتکل از الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ باینری (BWOA)[2] برای انتخاب بهینه سرخوشه، با در نظر گرفتن پارامترهای انرژی باقی‌مانده سرخوشه، درجه همسایگی سرخوشه و فاصله بین گره حسگر تا سرخوشه استفاده می‌کند. علاوه‌بر این، یک سیستم استنتاج فازی از نوع ممدانی برای تشکیل خوشه به‌منظور افزایش کارایی انرژی استفاده شده است. در این الگوریتم، یک فرآیند مسیریابی چندگامی بر اساس کوتاه‌ترین مسیر برای انتقال بسته داده اجرا می‌شود. این پروتکل، چندین مزیت را نسبت به روش‌های موجود ارائه می‌کند که به عملکرد بهبودیافته آن در خوشه‌بندی کارآمد انرژی کمک می‌کند: (۱) انتخاب سرخوشه بهینه: BWOA با یک تابع شایستگی چندهدفه، سرخوشه‌ها را با در نظر گرفتن پارامترهای مهم مانند انرژی، درجه گره و فاصله، به‌طور مؤثر انتخاب می‌کند. (۲) تشکیل خوشه کارآمد: سیستم استنتاج فازی نوع ممدانی، تصمیم‌گیری هوشمندانه را در طول تشکیل خوشه امکان‌پذیر می‌کند و سازماندهی و عملکرد شبکه را بهبود می‌بخشد. (۳) مسیریابی چندگامی برای بهره‌وری انرژی: با تمرکز بر یافتن کوتاه‌ترین مسیر به سرخوشه مربوطه در هر خوشه، مصرف انرژی را کاهش داده و طول عمر شبکه را افزایش می‌دهد. (۴) سازگاری با سناریوهای مختلف: نشان‌دهنده سازگاری آن با پیکربندی‌های مختلف شبکه و موقعیت‌های دنیای واقعی است.

۲۸.۳. الگوریتم خوشه‌بندی مبتنی بر گرید با استفاده از سیستم فازی نوع (I-FSDCVG)[3]. مظفری و همکاران [۳۶]، در این تحقیق، به بررسی مدیریت بهینه انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم پرداخته‌اند و الگوریتم خوشه‌بندی I-FSDCVG را معرفی کردند. از چالش‌های کلیدی در این حوزه، عدم‌قطعیت‌های اولیه ناشی از اندازه‌گیری مقادیر شبکه و مکان‌یابی گره‌ها است که به‌دلیل GPS، گرایش به عدم‌قطعیت‌های ثانویه‌ای مانند انرژی باقی‌مانده گره‌ها، مرکزیت خوشه‌ها و فاصله آن‌ها تا ایستگاه پایه در لایه‌های بالاتر شبکه منجر می‌شود. در راستای حل این چالش‌ها، آن‌ها پنج بهبود اساسی بر روی الگوریتم خوشه‌بندی شبه‌توزیع‌شده با استفاده از گرید مجازی FSCVG ارائه کردند.

[1] V-shaped Binary Whale Optimization Algorithm (BWOA-V)

[2] Binary Whale Optimization Algorithm (BWOA)

[3] Improvements on Fuzzy Semi-Distributed Clustering using Virtual Grids (I-FSDCVG)

نخست، عدم‌قطعیت‌ها را به دو دسته اولیه و ثانویه طبقه‌بندی کردند. سپس، با بهره‌گیری از سیستم فازی نوع ۳، مدیریت دقیق‌تری بر عدم‌قطعیت‌های ثانویه اعمال گردید. بعد از آن، شبکه مجازی تطبیقی برای ایجاد خوشه‌های نامتوازن و توزیع بار براساس موقعیت ایستگاه پایه مورد استفاده قرار گرفت. سپس، خوشه‌بندی متمرکز و غیرمتمرکز بر پایه به‌روزرسانی‌های شبکه مجازی تطبیقی به‌کار گرفته شد و در نهایت، سطح آستانه خوشه‌ها به‌صورت متناسب با انرژی گره‌های موجود در هر خوشه تعیین گردید. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اعمال این بهبودها موجب افزایش طول عمر شبکه در مقایسه با روش‌های مشابه شده است.

۲۹.۳. الگوریتم مسیریابی کارآمد انرژی با استفاده از الگوریتم‌های الهام‌گرفته از طبیعت (HNI-EAIoT)[1]. ادین[2] و همکاران [۵۲]، روشی مبتنی‌بر الگوریتم‌های تطبیقی، با هدف بهبود عملکرد شبکه همچون بهینه‌سازی مسیریابی، بهبود مصرف انرژی، پایداری و امنیت اینترنت اشیاء ارائه کردند. از چالش‌های اساسی IoT، پیش‌بینی دقیق فعالیت گره‌ها، بهینه‌سازی مسیرها، تخمین پایداری اتصال، مدیریت منابع و کاهش زمان پاسخ‌گویی سیستم است. در این روش، برای برطرف‌کردن این مشکلات، از الگوریتم‌های تطبیقی استفاده کردند و کارایی سیستم را به‌طور چشمگیری افزایش دادند. این روش شامل: الگوریتم کشف مسیر تطبیقی با استفاده‌از ACO، الگوریتم مدل‌سازی پیش‌بینی رفتار گره، الگوریتم پیش‌بینی پایداری اتصال و الگوریتم تخصیص پویای منابع است. از داده‌های واقعی برای ساخت محیط شبیه‌سازی به‌منظور بررسی و تحلیل کارایی الگوریتم‌های ارائه‌شده استفاده گردید. در بخشی از آزمایش‌ها، مشخص گردید که الگوریتم کشف مسیر تطبیقی، تأثیر زیادی بر کاهش زمان مسیریابی و عملکرد شبکه دارد. همچنین، مدل‌سازی پیش‌بینی رفتار گره‌ها نیز توانسته دقت پیش‌بینی را افزایش دهد، درحالی‌که قادر است تغییرات مداوم جریان داده‌ها را مدیریت کند. بااین‌حال، وابستگی به داده‌های ورودی دقیق و دوره‌ای، از نقاط ضعف این روش محسوب می‌شود. در سناریوهای واقعی اینترنت اشیاء، ممکن است داده‌ها ناقص باشند یا ارتباطات با تأخیر انجام شوند که این موضوع می‌تواند نتایج محاسبات را تحت تأثیر قرار دهد.

۳۰.۳. الگوریتم‌های مدیریت منابع کارآمد انرژی برای کاربردهای زمان‌واقعی (بلادرنگ) اینترنت اشیاء. فریرا[3] و همکاران [۱۶]، در روش‌های ارائه‌شده در این تحقیق، به بررسی راهکارهای

[1] Harnessing Nature-Inspired Algorithms for Energy-Efficient Artificial Intelligence of Things (HNI-EAIoT)
[2] Ud Din
[3] Fereira

بهینه‌سازی مصرف انرژی در پردازش درخواست‌های اینترنت اشیاء در معماری لبه–مه–ابر[1] می‌پردازند. سه روش مبتنی‌بر الگوریتم‌های ژنتیک[2]، ژنتیک اصلاح‌شده[3] و تأخیر–آگاه[4] برای انتخاب گره‌های پردازشی پیشنهاد دادند که با رعایت ملزومات کیفیت خدمات شبکه و برنامه، درخواست‌های متنوع را با بهره‌وری انرژی بالا اجرا کنند. این روش‌ها نه‌تنها پردازش زمان‌واقعی درخواست‌ها را در نظر گرفته‌اند، بلکه تأثیر ظرفیت منابع، تأخیر، اتصال، در دسترس بودن و فعال‌سازی سرویس‌دهنده‌ها و گره‌ها را نیز ارزیابی کرده‌اند. بررسی عملکرد این رویکردها در سناریوها و کاربردهای مختلف اینترنت اشیاء نشان داده که در مقایسه با روش‌های سنتی، زمان پردازش به شکل قابل‌توجهی بهبود یافته است. بااین‌حال، این بهبود عملکرد با چالش توازن میان مصرف انرژی و کاهش تأخیر همراه است، به‌ویژه برای کاربردهایی که بر کاهش تأخیر تأکید دارند. این تحلیل همچنین تأثیر اندازه شبکه بر هزینه‌های انرژی و زمان حل مسئله را روشن کرده و بینش‌های ارزشمندی درباره شرایط بهینه عملکرد هر روش ارائه داده است. این تحقیق نشان می‌دهد که پردازش کارآمد و بلادرنگ سیستم‌های اینترنت اشیاء، درعین‌حال که مقیاس‌پذیری و کاربردپذیری بالایی دارد، چالش‌هایی را نیز در مصرف انرژی ایجاد می‌کند.

۴. مقایسه روش‌های بحث‌شده

در این بخش، در جدول ۱، پروتکل‌های بررسی‌شده از نظر روش‌ها و رویکردهای مورد استفاده، اهداف، شبکه به‌کاررفته، معیارهای ارزیابی، به‌ویژه پارامترهای طول عمر شبکه، استفاده از منطق فازی، نوع پروتکل از نظر خوشه‌بندی و مسیریابی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همچنین در جدول ۲، روش‌هایی که از منطق فازی استفاده کرده‌اند، از نظر ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم استنتاج فازی، به‌صورت مقایسه‌ای مورد بررسی واقع شده‌اند.

---

[1] Edge–fog–cloud

[2] Genetic-based mechanism

[3] Modified genetic-based mechanism

[4] Delay-aware algorithm

جدول ۱. مقایسه روش‌ها و پروتکل‌های مورد بحث در زمینه بهینه‌سازی مصرف انرژی.

مرجع	نام پروتکل / سال	رویکرد	معیارهای بررسی شده	اهداف	نوع شبکه	نرم افزار مورد استفاده	استفاده از منطق فازی	LND[3]	HND[2]	FND[1]	نوع پروتکل، خوشه‌بندی / مسیریابی
ران و همکاران [۴۱]	LEACH-FL / ۲۰۱۰	بهبود پروتکل LEACH با منطق فازی	مصرف انرژی، تعداد گره‌های زنده	افزایش بهره‌وری انرژی و طول عمر شبکه، بهبود عملکرد شبکه	WSN	متلب	✓	–	–	–	خوشه‌بندی
لاگامبیگای و کنان [۲۸]	FBUC / ۲۰۱۶	خوشه‌بندی نابرابر مبتنی بر منطق فازی	تعداد گره‌های زنده، تعداد خوشه‌ها، انرژی باقی‌مانده، طول عمر شبکه	کاهش تأخیر انتقال، کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه	WSN	متلب	✓	✓	–	✓	خوشه‌بندی
باراندهران و سنتی [۸]	DUCF / ۲۰۱۶	خوشه‌بندی نابرابر مبتنی بر منطق فازی	میانگین مصرف انرژی، تعداد ارسال پیام، طول عمر شبکه	بهبود طول عمر شبکه با متعادل‌سازی مصرف انرژی بین خوشه‌ها	WSN	متلب	✓	–	✓	✓	خوشه‌بندی
گجار و همکاران [۱۸]	FAMACROW / ۲۰۱۶	ترکیبی از MAC، مسیریابی، خوشه‌بندی نابرابر، کلونی مورچه و منطق فازی	میانگین مصرف انرژی سرخوشه‌ها، مجموع انرژی باقی‌مانده، تعداد گره‌های مرده، داده‌های دریافتی در ایستگاه پایه، تأخیر، مصرف انرژی هر گره، مقیاس‌پذیری، توان عملیاتی	افزایش بهره‌وری انرژی، طول عمر شبکه، اجتناب از نقاط داغ (با چالش تأخیر و انرژی در گره‌ها)	WSN	متلب	✓	✓	✓	✓	ترکیبی
مولای زاهدی و همکارانش [۵۶]	SIF/ ۲۰۱۶	پروتکل مسیریابی فازی مبتنی بر هوش جمعی ترکیبی (FA-SA) و الگوریتم میانگین–C فازی	طول عمر شبکه، نرخ تحویل داده‌ها، تعداد گره‌های زنده، تعداد بسته‌های دریافتی، انحراف معیار فواصل درون خوشه‌ای، زمان اجرا	تشکیل خوشه‌های متعادل، افزایش طول عمر شبکه، حداکثرسازی تعداد بسته‌های دریافتی در ایستگاه پایه	WSN	متلب	✓	✓	✓	✓	ترکیبی
سو و همکاران [۵۴]	Smart-BEEM / ۲۰۱۷	الگوریتم خوشه‌بندی چندگامی هوشمند و متوازن	تعداد حسگرهای زنده، پوشش شبکه، طول عمر شبکه	افزایش کیفیت تجربه کاربر (QoE)[4]، کاهش مصرف انرژی، افزایش طول عمر شبکه	IoT و WSN	متلب	–	–	–	–	ترکیبی

[1] First Node Dead (FND)
[2] Half Node Dead (HND)
[3] Last Node Dead (LND)
[4] Quality of user Experience (QoE)

ادامه جدول ۱.

مرجع	نام پروتکل / سال	رویکرد	معیارهای بررسی شده	اهداف	نوع شبکه	نرم افزار مورد استفاده	استفاده از منطق فازی	LND	HND	FND	نوع پروتکل، خوشه‌بندی / مسیریابی
شکوهی‌فر و جلالی [۴۶]	LEACH-SF / ۲۰۱۷	خوشه‌بندی فازی تطبیقی مبتنی بر FCM، سیستم استنتاج فازی سوگنو و الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی (ABC)	تعداد گره‌های حسگر زنده، طول عمر شبکه، تاریخچه گره‌های مرده، کل بسته‌های دریافتی در چاهک، حداکثر و انحراف معیار فواصل خوشه‌ای، زمان اجرای CPU، تأثیر ابعاد، تعداد گره‌ها و جایگاه چاهک روی FND	افزایش طول عمر شبکه با قابلیت استفاده در کاربردهای مختلف	WSN	–	✓	✓	✓	✓	ترکیبی
سانداران و همکارانش [۴۸]	ECUCF / ۲۰۱۷	الگوریتم جدید خوشه‌بندی نابرابر مبتنی بر منطق فازی	تعداد گره‌های زنده در هر دور، تعداد خوشه‌ها در هر دور، انرژی باقی‌مانده گره‌ها	افزایش تعداد خوشه‌ها، افزایش تعداد گره‌های زنده، افزایش طول عمر گره‌ها	WSN	متلب	✓	–	–	–	خوشه‌بندی
میرزایی و مزینانی [۳۴]	Adaptive-MCFL / ۲۰۱۷	الگوریتم خوشه‌بندی چندگانه تطبیقی مبتنی بر منطق فازی	میانگین انرژی باقی‌مانده، تعداد گره‌های مرده، تعداد سرخوشه‌ها، فاصله حسگرها تا سرخوشه‌ها	کاهش مصرف انرژی، کاهش بار ترافیک شبکه، افزایش ذخیره انرژی	WSN	–	✓	✓	✓	✓	خوشه‌بندی
نایاک و واتاساوای [۳۸]	T2FL / ۲۰۱۷	روش مبتنی بر منطق فازی نوع ۲	طول عمر شبکه (تعداد گره‌های زنده)، میانگین اتلاف انرژی[1]، توان عملیاتی، مرگ اولین گره، تعداد کل سیگنال‌های تحویلی به BS، میانگین مصرف انرژی، تعداد کل بسته‌های ارسالی	مقیاس‌پذیری بهتر، افزایش طول عمر شبکه	WSN	متلب	✓	–	–	✓	ترکیبی
فانیان و کوچکی رفسنجانی [۱۴]	FSFLA/ ۲۰۱۸	ارائه پروتکل خوشه‌بندی مبتنی بر منطق فازی و استفاده از الگوریتم جهش قورباغه	تعداد گره‌های زنده، میانگین کل انرژی باقی‌مانده، میانگین حداکثر فواصل درون خوشه‌ای، انحراف معیار، تعداد بسته‌های دریافتی	افزایش طول عمر شبکه و تعداد بسته‌های دریافتی مبتنی بر کاربرد	WSN	متلب	✓	✓	✓	✓	ترکیبی
مزومدار و ام [۳۲]	DFCR / ۲۰۱۸	الگوریتم خوشه‌بندی و مسیریابی نابرابر توزیع‌شده مبتنی بر منطق فازی	میانگین انرژی باقی‌مانده، تعداد گره حسگر زنده	بهره‌وری انرژی، حل مشکل نقاط داغ، تعادل بارکاری و مقیاس‌پذیری	WSN	متلب	✓	–	✓	✓	ترکیبی

[1] Average energy dissipation

ادامه جدول ۱.

مرجع	نام پروتکل / سال	رویکرد	معیارهای بررسی شده	اهداف	نوع شبکه	نرم افزار مورد استفاده	استفاده از منطق فازی	LND	HND	FND	نوع پروتکل، خوشه‌بندی / مسیریابی
کووان و همکاران [۲۶]	VCCA / ۲۰۱۹	یک الگوریتم خوشه‌بندی دسته‌بندی متغیر با استفاده از منطق فازی	توان عملیاتی، تأخیر ارتباطی (انتها به چاهک)[1]، طول عمر شبکه، مصرف انرژی	بهبود بهره‌وری انرژی، افزایش طول عمر شبکه	IoT	متلب	✓	–	–	–	خوشه‌بندی
تانگارامیا و همکارانش [۵۱]	FBCFP / ۲۰۱۹	ارائه روشی مبتنی بر یادگیری عمیق با سیستم استنتاج عصبی–فازی	تعداد گره‌های زنده، متوسط انرژی مصرف‌شده، طول عمر شبکه، انرژی باقی‌مانده، تعداد اعضا در یک خوشه	بهبود طول عمر شبکه	WSN و IoT	متلب	✓	–	–	✓	ترکیبی
حسن و همکاران [۲۰]	IEECP / ۲۰۲۰	استفاده از الگوریتم M-FCM برای تشکیل خوشه و الگوریتم CHESRA برای انتخاب و چرخش سرخوشه	انرژی اولیه برای گره، مصرف انرژی گره‌ها، تعداد پیام‌های دریافت‌شده توسط BS، اتلاف انرژی، تعداد گره‌های زنده، مصرف انرژی سرخوشه‌های انتخاب‌شده	کاهش مصرف انرژی، افزایش طول عمر شبکه	WSN و IoT	متلب	✓	✓	✓	✓	ترکیبی
فانیان و کوچکی رفسنجانی [۱۵]	FMSFLA / ۲۰۲۰	یک پروتکل خوشه‌بندی چندگامی فازی مبتنی بر الگوریتم SFLA	تعداد گره‌های زنده، تاریخچه گره‌های مرده، تعداد بسته‌های رسیده به BS تا FND، تعداد بسته‌های رسیده به BS تا HND، طول عمر شبکه، میانگین تعداد سرخوشه‌های تولیدشده، مقدار تابع شایستگی، تأخیر	افزایش طول عمر شبکه و تعداد بسته‌های دریافتی براساس ویژگی‌های هر کاربرد	WSN	متلب	✓	✓	✓	✓	ترکیبی
بانیاتا و همکاران [۷]	MIMO-HC / ۲۰۲۱	ارائه یک روش خوشه‌بندی جدید برای سیستم‌های آنتن چند ورودی چند خروجی (MIMO)	تعداد خوشه‌های تولیدشده در شبکه، تأخیر، مصرف انرژی سرخوشه‌ها، طول عمر شبکه (زمان مرگ اولین و آخرین گره)	توازن مصرف انرژی بین سرخوشه‌ها، اجتناب از مشکلات نقاط داغ	WSN و IoT	متلب	–	✓	–	✓	ترکیبی
صدیقی‌منش و همکاران [۴۵]	RCEMO / ۲۰۲۲	به‌کارگیری فازی نوع ۲ برای خوشه‌بندی و استفاده از الگوریتم ژنتیک برای مسیریابی از سرخوشه‌ها به ایستگاه پایه	تعداد بسته‌های ارسال‌شده به ایستگاه پایه، انرژی باقی‌مانده و مصرف انرژی، تعداد گره‌های زنده	بهبود مصرف انرژی، افزایش طول عمر شبکه	WSN و IoT	متلب	✓	✓	–	✓	ترکیبی

[1] End-to-sink latency

ادامه جدول ۱.

مرجع	نام پروتکل / سال	رویکرد	معیارهای بررسی شده	اهداف	نوع شبکه	نرم افزار مورد استفاده	استفاده از منطق فازی	LND	HND	FND	نوع پروتکل، خوشه‌بندی / مسیریابی
محمودی و همکاران [۳۰]	QICM / ۲۰۲۲	استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب و بهینه‌سازی ازدحام ذرات	ذخیره انرژی، میانگین زمان اجرا، انرژی مصرف‌شده در هر دور	کاهش مصرف انرژی در شبکه‌های اینترنت اشیاء	IoT	متلب	–	–	–	–	خوشه‌بندی
آریکومار و همکاران [۵]	DCMI / ۲۰۲۲	خوشه‌بندی پویا با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندگانه (MVO)	طول عمر شبکه، تأخیر انتها–به–انتها، نسبت از دست دادن بسته، توان عملیاتی خروجی، نسبت تحویل بسته، مصرف انرژی	بهبود طول عمر شبکه، کاهش مصرف انرژی، حداقل کردن نسبت از دست دادن بسته	IoT	متلب	–	–	–	–	خوشه‌بندی
سورشند و پراساد [۵۰]	EES- LEACH / ۲۰۲۳	پروتکلی مبتنی بر پروتکل LEACH	نسبت تحویل بسته، طول عمر شبکه، تأخیر انتها به انتها، مصرف انرژی، توان عملیاتی	افزایش عملکرد سیستم برحسب ذخیره انرژی، طول عمر شبکه، انتقال امن داده، کیفیت ارتباطات	WSN و IoT	۲NS	–	–	–	–	ترکیبی
صالح و نقابی [۴۴]	OCADR / ۲۰۲۳	استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی چرخشی درخت DAVL و زمان‌بندی خواب–بیداری	مصرف انرژی، نرخ انتقال بسته‌ها به ایستگاه پایه از طریق سرخوشه‌ها، گره‌های بیدار، گره‌های خواب	کاهش مصرف انرژی، کیفیت خدمات	WSN	متلب	–	–	–	–	ترکیبی
اجی و همکاران [۲]	OCTRPL / ۲۰۲۳	پروتکل مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی و نظریه بازی‌ها	مصرف انرژی گره‌ها، شناسایی کوتاه‌ترین مسیر	افزایش طول عمر شبکه، بهینه‌سازی مسیرهای ارتباطی، کاهش ترافیک داده بین گره‌های شبکه	IoT	۲NS	–	–	–	–	ترکیبی
وازوتی و همکاران [۵۳]	AROA-TSFD / ۲۰۲۳	الگوریتم ترکیبی مبتنی بر ANFIS و الگوریتم بهینه‌سازی خزنده، توسعه الگوریتم TFSD	میانگین مصرف انرژی، طول عمر شبکه، پایداری شبکه، میانگین زمان ارسال، نرخ دقت تشخیص، نرخ تأخیر تشخیص	بهره‌وری انرژی، مدیریت خطا، پایداری شبکه و کیفیت خدمات	WSN و IoT	متلب	✓	–	–	–	ترکیبی
مضان‌زاده و شکرزاده [۴۰]	PEG-ABC / ۲۰۲۴	تجمع الگوریتم کلونی زنبور عسل (ABC) با یک طرح مسیریابی زنجیره‌ای سلسله‌مراتبی دوسطحی	مصرف انرژی، تعداد گره‌های زنده، کل انرژی باقی‌مانده، تعداد پیام‌های رسیده به ایستگاه پایه، حداکثر تأخیر	کاهش مصرف انرژی، افزایش طول عمر شبکه	WSN و IoT	متلب	–	–	–	✓	ترکیبی

۱۹۷ ـــ

ادامه جدول ۱.

مرجع	نام پروتکل / سال	رویکرد	معیارهای بررسی شده	اهداف	نوع شبکه	نرم افزار مورد استفاده	استفاده از منطق فازی	LND[3]	HND[2]	FND[1]	نوع پروتکل، خوشه‌بندی / مسیریابی
ژانگ و همکاران [۵۷]	MOALO-FCM / ۲۰۲۴	استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز چندهدفه شیرمورچه (MOALO) و الگوریتم FCM	مصرف انرژی گره‌های بازپخش‌کننده، تعداد گره‌های زنده، انحراف معیار مصرف انرژی، انرژی باقی‌مانده گره‌های حسگر، انحراف معیار مصرف انرژی گره‌های بازپخش‌کننده، زمان اجرا، زمان مرگ گره حسگر	کاهش مصرف انرژی شبکه، افزایش طول عمر شبکه	WSN	متلب	✓	–	–	✓	خوشه‌بندی
سعیدی و همکاران [۴۳]	BWOA-V / ۲۰۲۴	روشی مبتنی بر استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ باینری و سیستم استنتاج فازی	میانگین مصرف انرژی، تعداد گره‌های زنده، تعداد کل بسته‌های ارسال‌شده	بهبود بهره‌وری انرژی، بهبود طول عمر شبکه، ایجاد کوتاه‌ترین مسیر به سرخوشه مورد نظر	WSN و IoT	متلب	✓	✓	✓	✓	ترکیبی
مظفری و همکاران [۳۶]	I-FSCVG / ۲۰۲۵	به‌کارگیری سیستم فازی نوع۳ و استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی شبه‌توزیع‌شده با استفاده از گرید مجازی (FSCVG)	تعداد گره‌های مرده، انرژی باقی‌مانده، طول عمر شبکه	بهبود طول عمر شبکه، مدیریت بهینه انرژی، بهبود فرآیند خوشه‌بندی، ترکیب خوشه‌بندی متمرکز و غیرمتمرکز	WSN	متلب	✓	✓	✓	✓	خوشه‌بندی
ادین و همکاران [۵۲]	HNI-EAIoT / ۲۰۲۵	استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری الهام‌گرفته از طبیعت (ACO)	متوسط زمان مسیریابی، دقت، کارایی بهره‌وری منابع، دقت پیش‌بینی پایداری اتصال، زمان پاسخ شبکه، مصرف انرژی	بهبود مصرف انرژی، بهینه‌سازی مسیریابی (مسیرهای امن و هوشمند)، پایداری شبکه، مدیریت منابع	IoT	–	–	–	–	–	مسیریابی
فریرا و همکاران [۱۶]	Genetic, Modified-Genetic, Delay-aware / ۲۰۲۵	ارائه روش‌هایی مبتنی بر استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک، ژنتیک اصلاح‌شده و تأخیر–آگاه، استفاده از معماری اینترنت اشیاء (لبه–مه–ابر)	احتمال جهش، احتمال تقاطع، اندازه جمعیت، تعداد نسل، زمان پردازش، مصرف انرژی، مقایسه روش‌های ارائه‌شده از نظر تعداد درخواست‌های شبکه برحسب زمان و هزینه	بهبود عملکرد انرژی با درنظرگرفتن ملزومات کیفیت خدمات، پایداری شبکه	IoT	Python	–	–	–	–	–

جدول ۲. ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم استنتاج فازی در پروتکل‌های مورد بحث.

مرجع	نام پروتکل / سال	ورودی‌های سیستم فازی	خروجی‌های سیستم فازی
ران و همکارانش [۴۱]	LEACH-FL / ۲۰۱۰	سطح باتری، چگالی گره‌ها و فاصله از ایستگاه پایه	احتمال انتخاب یک گره حسگر به عنوان سرخوشه
لاگامبیگای و کنان [۲۸]	FBUC / ۲۰۱۶	ـ انرژی باقی‌مانده، درجه گره و فاصله تا ایستگاه پایه ـ فاصله، درجه گره‌ـسرخوشه	ـ شعاع رقابتی ـ انتخاب سرخوشه
باراندهران و سنتی [۸]	DUCF / ۲۰۱۶	انرژی باقی‌مانده، درجه گره (تعداد همسایه‌ها) و فاصله تا ایستگاه پایه	شانس سرخوشه شدن و اندازه خوشه
گجار و همکارانش [۱۸]	FAMACROW / ۲۰۱۶	انرژی باقی‌مانده، تعداد گره‌های همسایه و کیفیت ارتباط	احتمال انتخاب سرخوشه
شکوهی‌فر و جلالی [۴۶]	LEACH-SF / ۲۰۱۷	انرژی باقی‌مانده، فاصله گره تا چاهک، فاصله گره تا مرکز خوشه	احتمال انتخاب به‌عنوان سرخوشه
ساندران و همکارانش [۴۸]	ECUCF / ۲۰۱۷	انرژی باقی‌مانده، فاصله تا ایستگاه پایه، درجه همسایگی	موقعیت بخش، شعاع رقابتی و انتخاب سرخوشه
میرزایی و مزینانی [۳۴]	Adaptive-MCFL / ۲۰۱۷	اولین خوشه‌بندی: انرژی باقی‌مانده، درجه همسایگی دومین خوشه‌بندی: انرژی باقی‌مانده، فاصله تا سرخوشه	ـ شانس (سرخوشه شدن) ـ شانس (سرخوشه شدن)
نایاک و واتاساوای [۳۸]	T2FL / ۲۰۱۷	انرژی باقی‌مانده، فاصله تا ایستگاه پایه، تمرکز	شانس سرخوشه شدن (معیار اطمینان)[1]
فانیان و کوچکی رفسنجانی [۱۴]	FSFLA / ۲۰۱۸	انرژی باقی‌مانده، فاصله تا ایستگاه پایه، تعداد گره‌های همسایه و تاریخچه گره‌ها	احتمال انتخاب سرخوشه
مزومدار و ام [۳۲]	DFCR / ۲۰۱۸	ـ سطح انرژی، فاصله تا ایستگاه پایه ـ درجه همسایگی، هزینه همسایگی ـ شایستگی ۱ و شایستگی ۲	ـ شایستگی ۱ ـ شایستگی ۲ ـ شعاع خوشه
کووان و همکاران [۲۶]	VCCA / ۲۰۱۹	مقدار پراکندگی هر متغیر خوشه‌ای	وزن متغیر خوشه‌ای
تانگارامیا و همکارانش [۵۱]	FBCFP / ۲۰۱۹	سطح انرژی فعلی سرخوشه، فاصله بین سرخوشه و ایستگاه پایه، فاصله بین گره و سرخوشه و درجه سرخوشه	انتخاب سرخوشه
حسن و همکاران [۲۰]	IEECP / ۲۰۲۰	انرژی باقی‌مانده سرخوشه، فاصله تا ایستگاه پایه، درجه خوشه، تعداد گره‌های همسایه	انتخاب سرخوشه و اندازه خوشه
فانیان و کوچکی‌رفسنجانی [۱۵]	FMSFLA / ۲۰۲۰	ـ انرژی باقی‌مانده گره، فاصله تا ایستگاه پایه، تعداد گره‌های همسایه ـ انرژی باقی‌مانده سرخوشه، فاصله واقعی بین یک گره و ایستگاه پایه، میانگین بار مسیر	ـ انتخاب سرخوشه ـ انتخاب والد
صدیقی‌منش و همکاران [۴۵]	RCEMO / ۲۰۲۲	انرژی باقی‌مانده، چگالی و مرکزیت	احتمال انتخاب سرخوشه
وازوتی و همکاران [۵۳]	AROA-TSFD / ۲۰۲۳	انرژی باتری باقی‌مانده (RBE)[2]، رهبر خوشه فعلی، میانگین زمان پاسخ (ART)[3]، تعداد گره‌های فعال (NAN)[4]	نمره
ژانگ و همکاران [۵۷]	MOALO-FCM / ۲۰۲۴	انرژی باقی‌مانده گره‌های حسگر، انرژی گره‌های بازپخش‌کننده و تعداد گره‌های حسگر	موقعیت مرکز خوشه
سعیدی و همکاران [۴۳]	BWOA-V / ۲۰۲۴	انرژی باقی‌مانده سرخوشه، درجه همسایگی سرخوشه و فاصله بین گره حسگر و سرخوشه	شانس اتصال گره حسگر به سرخوشه
مظفری و همکاران [۳۶]	I-FSCVG / ۲۰۲۵	انرژی باقی‌مانده گره‌ها، مرکزیت خوشه و فاصله خوشه تا ایستگاه پایه	شانس سرخوشه شدن

[1] Confidence factor
[2] Residual Battery Energy (RBE)
[3] Average Response Time (ART)
[4] Number of Active Nodes (NAN)

۵. بحث

در این مقاله، روش‌ها و پروتکل‌های متعددی برای بهره‌وری انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم و اینترنت اشیاء بررسی شدند، به‌طوری‌که استفاده از الگوریتم‌های هوشمند و منطق فازی در پروتکل‌های مسیریابی و خوشه‌بندی می‌تواند تأثیر بسزایی در افزایش طول عمر شبکه و کاهش مصرف انرژی داشته باشد. ویژگی تطبیقی و انعطاف‌پذیر منطق فازی سبب می‌شود که فرآیند تصمیم‌گیری در انتخاب سرخوشه‌ها و مسیریابی داده‌ها بهینه‌تر انجام شده و در نهایت پایداری شبکه افزایش یابد. بررسی پروتکل‌هایی که از سیستم استنتاج فازی استفاده کرده‌اند نشان می‌دهد که این پروتکل‌ها، در شرایط شبکه‌های پویا و با درنظر گرفتن چندین معیار به‌صورت هم‌زمان، می‌توانند تصمیم‌گیری دقیق‌تر و عملکرد مطلوب‌تری داشته باشند. در مقابل، پروتکل‌های غیرفازی که براساس الگوریتم‌های هوشمند (ابتکاری، فراابتکاری، هوش جمعی و الهام‌گرفته از طبیعت) طراحی شده‌اند، هرچند از نظر محاسباتی سریع‌تر هستند، اما در برخی موارد از انعطاف‌پذیری محدودتری برخوردار هستند و ممکن است در شرایط پیچیده شبکه، عملکرد ضعیف‌تری داشته باشند. بر این اساس، یکی از چالش‌های اصلی استفاده از منطق فازی، پیچیدگی محاسباتی آن است که می‌تواند در شبکه‌های با منابع محدود مشکل‌ساز شود. بنابراین، ترکیب روش‌های فازی با الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند مانند بهینه‌سازی ازدحام ذرات، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم زنبور عسل، الگوریتم کلونی مورچگان، الگوریتم جهش قورباغه، الگوریتم وال، الگوریتم کرم شب‌تاب و شبیه‌سازی تبرید، در پروتکل‌های خوشه‌بندی و مسیریابی، می‌تواند به کاهش هزینه‌های محاسباتی و افزایش کارایی سیستم کمک کند. در مجموع، یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از پروتکل‌های هوشمند فازی، بهینه‌سازی مصرف انرژی، افزایش طول عمر شبکه، کاهش تأخیر ارتباطی و بهبود پایداری سیستم را ممکن می‌سازد. در این مقاله، تمامی روش‌های بررسی‌شده، به‌جز روش آخر [۱۶]، بر پروتکل‌های خوشه‌بندی و مسیریابی برای مدیریت و بهبود انرژی کار کردند.

۶. مسائل باز، چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده

در این قسمت، به تعدادی از چالش‌ها و راهکارهای پیشنهادی اشاره می‌شود:

- **طراحی الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه:** بسیاری از روش‌های موجود بر روی بهبود مصرف انرژی تمرکز دارند، اما هم‌زمان معیارهایی همچون تأخیر، توان عملیاتی و بار محاسباتی را بهینه نمی‌کنند. از این‌رو یکی از چالش‌ها، طراحی الگوریتم‌هایی است که بتوانند به‌صورت چندهدفه عمل کنند.
- **انعطاف‌پذیری روش‌های فازی:** افزایش پایداری شبکه در شرایط پویا، به‌ویژه در محیط‌های کاربردی واقعی، باعث تغییر دائمی وضعیت حسگرها می‌شود. در این شرایط، سیستم‌های استنتاج فازی می‌توانند انعطاف‌پذیری و عملکرد مطلوبی را ارائه دهند.
- **افزایش دقت خوشه‌بندی و مسیریابی با ادغام فناوری‌های جدید هوش مصنوعی و منطق فازی:** استفاده از فناوری‌های جدید می‌تواند منجر به تصمیم‌گیری‌های هوشمندتر و دقیق‌تر در شبکه شود. برخی راهکارهای پیشنهادی به شرح زیر هستند:
  - توسعه الگوریتم‌های ترکیبی مانند به‌کارگیری انواع روش‌های یادگیری ماشین (یادگیری عمیق، تقویتی، فدرالی و ترکیب آن‌ها) همراه با سیستم‌های استنتاج فازی.

- ارزیابی عملی این روش‌ها بر روی سناریوها و کاربردهای واقعی.
- استفاده از تعمیم‌های فازی (مانند فازی شهودی[1]) به‌جای منطق فازی کلاسیک، که محاسبات آن‌ها پیچیده‌تر است اما می‌توانند نتایج دقیق‌تری ارائه دهند.

۷. نتیجه‌گیری

این مقاله به بررسی و ارزیابی پروتکل‌های فازی و غیرفازی در زمینه بهبود مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم و اینترنت اشیاء می‌پردازد. با توجه به محدودیت‌های انرژی در گره‌های حسگر و ملزومات کیفیت خدمات در شبکه، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی ضروری است تا عمر شبکه افزایش یابد و در ضمن کارایی عملکرد کل سیستم بهبود یابد. امروزه با توجه به لزوم استفاده از شبکه‌های مختلف، به‌ویژه فراگیر شدن شبکه‌های اینترنت اشیاء مبتنی بر شبکه‌های حسگر بی‌سیم، چالش‌های متعددی مطرح است که مدیریت مصرف انرژی یکی از مسائل مهم در این زمینه محسوب می‌شود. استفاده از الگوریتم‌های هوشمند، منطق فازی و همچنین ترکیب آن‌ها به‌عنوان رویکردی مؤثر جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی در سیستم‌های مورد بحث حائز اهمیت است. به‌منظور کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه‌ها، می‌توان از پروتکل‌های مختلف، همچون پروتکل‌های مسیریابی و خوشه‌بندی، در بستر محیط‌های هوشمند استفاده نمود. پروتکل‌هایی که از منطق فازی بهره می‌گیرند، با دقت بیشتر و پروتکل‌های غیرفازی با الگوریتم‌های بهینه‌سازی قوی‌تر، می‌توانند به‌عنوان روش‌های مکمل برای بهره‌وری انرژی مورد استفاده قرار گیرند. ازاین‌رو، به‌کارگیری منطق فازی، علاوه بر بهبود کارایی انرژی، می‌تواند در بهینه‌سازی تصمیم‌گیری پیرامون دیگر پارامترها نیز مورد توجه باشد. مقایسه پروتکل‌های بررسی‌شده از جنبه‌های مختلف نشان می‌دهد که تمرکز بیشتر روش‌هایی که از منطق فازی استفاده کرده‌اند، بر انتخاب سرخوشه‌های مناسب جهت مسیریابی بهینه و در نهایت افزایش طول عمر شبکه، کاهش مصرف انرژی و پایداری آن در مواردی هم تجمیع و امنیت داده‌ها در شبکه است. این امر می‌تواند گامی مؤثر در راستای تحقق اهداف موردنظر در عصر دیجیتال باشد. نتیجتاً این‌که، مقاله مروری حاضر با بررسی روش‌های متعدد در زمینه بهبود مصرف انرژی در شبکه‌های مورد بحث، می‌تواند اطلاعات مفیدی را جهت ارتقاء و یا کاربردی‌کردن رویکردهای بررسی‌شده در مسائل مطرح در زندگی واقعی همچون شهرهای هوشمند، پزشکی و سلامت هوشمند، کشاورزی هوشمند، صنعت هوشمند، ناوبری هوشمند و موارد دیگر در اختیار پژوهشگران قرار دهد.

مراجع

[1] Afsar, M.M. and Tayarani-Najaran, M.H. (2014). Clustering in sensor networks: literature survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 46, 198–226. https://doi.org/10.1016/j.jnca.2014.09.005

[2] Ajay, P., Nagaraj, B., Arunkumar, R. and Huang, R. (2023). Enhancing computational energy transportation in IoT systems with an efficient wireless tree-based routing protocol. *Results in Physics*, 51, 106747. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2023.106747

[1] Intuitionistic Fuzzy

[3] Alazab, M., Lakshmanna, K., Reddy, T., Pham, Q.V. and Maddikunta, P.K.R. (2021). Multi-objective cluster head selection using fitness averaged rider optimization algorithm for IoT networks in smart cities. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 43. https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100973

[4] Alrabea, A., Alzubi, O.A. and Alzubi, J.A. (2022). A task-based model for minimizing energy consumption in WSNs. *Energy Systems*, 13, 671–688. https://doi.org/10.1007/s12667-019-00372-w

[5] Arikumar, K.S., Natarajan, V., Satapathy, S.C. and Prathiba, S.B. (2022). DCMI: Dynamic clustering approach using multi-verse optimizer for fog-assisted IoT devices. *Soft Computing*. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-698256/v1

[6] Aruchamy, P., Gnanaselvi, S., Sowndarya, D. and Naveenkumar, P. (2023). An artificial intelligence approach for energy-aware intrusion detection and secure routing in internet of things-enabled wireless sensor networks. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 35(23). https://doi.org/10.1002/cpe.7818

[7] Baniata, M., Reda, H.T., Chilamkurti, N. and Abuadbba, A. (2021). Energy-Efficient Hybrid Routing Protocol for IoT Communication Systems in 5G and Beyond. *Intelligent Sensors*, 21. https://doi.org/10.3390/s21020537

[8] Baranidharan, B. and Santhi, B. (2016). DUFC: Distributed Load balancing unequal clustering in wireless sensor network using fuzzy approach. *Applied Soft Computing*, 40, 495–506. http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2015.11.044

[9] Chahid, Y., Benabdellah, M. and Azizi, A. (2017). Internet of things security. In *Proceedings of the International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*.

[10] Daanoune, I., Baghdad, A. and Ballouk, A. (2020). An enhanced energy-efficient routing protocol for wireless sensor network. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 10(5), 5462–5469. https://doi.org/10.11591/ijece.v10i5.pp5462-5469

[11] Dhandapani, A., Venkateswarib, P., Sivakumarc, T., Rameshd, C. and Vanitha, P. (2022). Cooperative self-scheduling routing protocol based IOT communication for improving life time duty cycled energy efficient protocol in SDN controlled embedded network. *Measurement: Sensors*, 24. https://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100475

[12] Dowlatshahi, M.B., Kuchaki Rafsanjani, M. and Gupta, B.B. (2021). An energy aware grouping memetic algorithm to schedule the sensing activity in WSNs-based IoT for smart cities. *Applied Soft Computing*, 108. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107473

[13] Elhoseny, M. and Hassanien, A.E. (2019). Extending homogeneous WSN lifetime in dynamic environments using the clustering model. *Dynamic Wireless Sensor Networks*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92807-4_4

[14] Fanian, F. and Kuchaki Rafsanjani, M. (2018). Memetic fuzzy clustering protocol for wireless sensor networks: Shuffled frog leaping algorithm. *Applied Soft Computing*, 71, 568–590. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.07.012

[15] Fanian, F. and Kuchaki Rafsanjani, M. (2020). A new fuzzy multi-hop clustering protocol with automatic rule tuning for wireless sensor networks. *Applied Soft Computing*, 89. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106115

[16] Fereira, R.J., Ranaweera, C., Lee, K. and Schneider, J.G. (2025). Energy efficient resource management for real-time IoT applications. *Internet of Things*, 30, 101515. https://doi.org/10.1016/j.iot.2025.101515

[17] Fouladlou, M. and Khademzadeh, A. (2017). An energy efficient clustering algorithm for wireless sensor devices in Internet of Things. *Artificial Intelligence and Robotics*, 39–44. https://doi.org/10.1109/RIOS.2017.7956441

[18] Gajjar, S., Sarkar, M. and Dasgupta, K. (2016). FAMACROW: Fuzzy and colony optimization based combined MAC, routing, and unequal clustering cross-layer protocol for wireless sensor networks. *Applied Soft Computing*, 43, 235–247. http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2016.02.019

[19] Gulati, K., Boddu, R.S.K., Kapila, D., Bangare, S.L., Chandnani, N. and Saravanan, G. (2022). A review on wireless sensor network techniques in Internet of Things (IoT). *Materials Today: Proceedings*, 51(1), 161–165. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.067

[20] Hassan, A.A.H., Shah, W.M., Hussien Hassan Habeb, A., Othman, M. and Al Mhiqani, M.N. (2020). An improved energy-efficient clustering protocol to prolong the lifetime of the WSN-based IoT. *IEEE Access*, 8, 200500–200517. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3035624

[21] Heinzelman, W.B., Chandrakasan, A.P. and Balakrishnan, H. (2002). An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 1(4), 660–670. https://doi.org/10.1109/TWC.2002.804190

[22] Klir, G.J. and Bo, Y. (1996). *Fuzzy Logic and Fuzzy System: Selected Papers by Lotfi A. Zadeh*. World Scientific.

[23] Kooshari, A., Fartash, M., Mihannezhad, P., Chahardoli, M., AkbariTorkestani, J. and Nazari, S. (2024). An optimization method in wireless sensor network routing and IoT with water strider

algorithm and ant colony optimization algorithm. *Evolutionary Intelligence*, 17(3), 1527–1545. https://doi.org/10.1007/s12065-023-00847-x

[24] Kuila, P., Gupta, S.K. and Jana, P.K. (2013). A novel evolutionary approach for load balanced clustering problem for wireless sensor networks. *Swarm and Evolutionary Computation*, 12, 48–56. https://doi.org/10.1016/j.swevo.2013.04.002

[25] Kuila, P. and Jana, P.K. (2017). *Clustering and Routing Algorithms for Wireless Sensor Networks: Energy Efficiency Approaches*. New York: Chapman and Hall/CRC.

[26] Kwon, J.H., Cha, M., Lee, S.-B. and Kim, E.J. (2017). Variable-categorized clustering algorithm using fuzzy logic for internet of things local networks. *Multimedia Tools and Applications*, 78, 2963–2982. https://doi.org/10.1007/s11042-017-5176-x

[27] Liu, X. (2012). A survey on clustering routing protocols in wireless sensor networks. *Sensors*, 12, 11113–11153. https://doi.org/10.3390/s120811113

[28] Logambigai, R. and Kannan, A. (2016). Fuzzy logic based unequal clustering for wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 22(3), 945–957. https://doi.org/10.1007/s11276-015-1013-1

[29] Lounis, M., Bounceur, A., Euler, R. and Pottier, B. (2017). Estimation of energy consumption through parallel computing in wireless sensor networks. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 15, 1339–1351. https://doi.org/10.1007/s12652-017-0582-5

[30] Mahmoudi, Y., Zioui, N. and Belbachir, H. (2022). A new quantum-inspired clustering method for reducing energy consumption in IoT network. *Internet of Things*, 20. https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100622

[31] Manikandan, S. and Chinnadurai, M. (2021). Effective energy adaptive and consumption in wireless sensor network using distributed source coding and sampling techniques. *Wireless Personal Communications*, 118(2), 1393–1404. https://doi.org/10.1007/s11277-021-08081-3

[32] Mazumdar, N. and Om, H. (2018). Distributed fuzzy approach to unequal clustering and routing algorithm for wireless sensor networks. *International Journal of Communication Systems*, 31(12), 1–23. https://doi.org/10.1002/dac.3709

[33] Mittal, N., Singh, U. and Sohi, B.S. (2019). An energy-aware cluster-based stable protocol for wireless sensor networks. *Neural Computing and Applications*, 31, 7269–7286. https://doi.org/10.1007/s00521-018-3542-x

[34] Mirzaie, M. and Mazinani, S.M. (2017). Adaptive MCFL: An adaptive multi-clustering algorithm using fuzzy logic in wireless sensor network. *Computer Communications*, 111(1), 56–67. http://dx.doi.org/10.1016/j.comcom.2017.07.005

[35] Mohammadi, R., Akleylek, S. and Ghaffari, A. (2023). SDN-IoT: SDN-based efficient clustering scheme for IoT using improved Sailfish optimization algorithm. *PeerJ Computer Science*. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1424

[36] Mozaffari, M., Mazinani, S.M. and Khazaei, A.A. (2025). An energy efficient grid-based clustering algorithm using type-3 fuzzy system in wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 31, 109–125. https://doi.org/10.1007/s11276-024-03737-x

[37] Naji, H.R., Earl Wells, B. and Etzkorn, L. (2004). Creating an adaptive embedded system by applying multi-agent techniques to reconfigurable hardware. *Future Generation Computer Systems*, 20, 1055–1081. https://doi.org/10.1016/j.future.2004.02.002

[38] Nayak, P. and Vathasavai, B. (2017). Energy efficient clustering algorithm for multi-hop wireless sensor network using type-2 fuzzy logic. *IEEE Sensors Journal*, 17, 4492–4499. https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2711432

[39] Oudenhoven, J.F.M., Vullers, R.J.M. and Schaijk, R. (2012). A review of the present situation and future developments of micro-batteries for wireless autonomous sensor systems. *International Journal of Energy Research*, 36(12), 1139–1150. https://doi.org/10.1002/er.2949

[40] Ramezanzadeh, F. and Shokrzadeh, H. (2024). Efficient routing method for IoT networks using bee colony and hierarchical chain clustering algorithm. *E-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 7. https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100424

[41] Ran, G., Zhang, H. and Gong, S. (2010). Improving on LEACH protocol of wireless sensor networks using fuzzy logic. *Journal of Information & Computational Science*, 7(3), 767–775.

[42] Rajaravivarma, V., Yang, Y. and Yang, T. (2003). A noverviwe of wireless sensor network and applications. In *Proceedings of the Southeastern Symposium on System Theory (SSST)*, 17, 432–436. https://doi.org/10.11591/ijeecs.v17.i3

[43] Saeedi, A., Kuchaki Rafsanjani, M. and Yazdani, S. (2024). Energy efficient clustering in IOT-based wireless sensor networks using binary whale optimization algorithm and fuzzy inference system. *The Journal of Supercomputing*, 81(209). https://doi.org/10.1007/s11227-024-06556-1

[44] Saleh, B. and Neghabi, A.A. (2023). Optimal routing-clustering aware of energy consumption in wireless sensor networks based on deep tree learning. *Transactions on Machine Intelligence*, 6(4), 236–247. http://dx.doi.org/10.47176/TMI.2023.236

[45] Sedighimanesh, M., Zandhessami, H., Alborzi, M. and Khayyatian, M. (2022). Reducing energy consumption in sensor-based internet of things networks based on multi-objective optimization algorithms. *Journal of Information Systems and Telecommunication (JIST)*, 10(3), 180–190. https://doi.org/10.52547/jist.15639.10.39.180

[46] Shokouhifar, M. and Jalali, A. (2017). Optimized Sugeno fuzzy clustering algorithm for wireless sensor networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 60, 16–25. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2017.01.007

[47] Sugeno, M. (1977). Fuzzy measures and fuzzy integrals: a survey. In Gupta, M.M., Saridis, G.N. and Gaines, B.R. (Eds.), *Fuzzy Automata and Decision Processes*, pp. 89–102. North-Holland: New York.

[48] Sundaran, K., Ganapathy, V. and Sudhakara, P. (2017). Fuzzy logic based unequal clustering in wireless sensor network for minimizing energy consumption. In *International Computing and Communications Technologies (ICCCT)*, pp. 304–309. https://doi.org/10.1109/ICCCT2.2017.7972283

[49] Suryadevara, N.K. (2021). Energy and latency reductions at the fog gateway using a machine learning classifier. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 31. https://doi.org/10.1016/j.suscom.2021.100582

[50] Sureshand, B. and Prasad, S.C. (2023). An energy efficient secure routing scheme using LEACH protocol in WSNs for IoT networks. *Measurement: Sensors*, 30. https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100883

[51] Thangaramya, K., Kulothungan, K., Logambigai, R., Selvi, M., Ganapathy, S. and Kannan, S.A. (2019). Energy aware cluster and neuro-fuzzy based routing algorithm for wireless sensor networks in IoT. *Computer Networks*, 151, 211–223. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.01.024

[52] Ud Din, I., Khan, K.H., Almogren, A. and Guizani, M. (2025). Harnessing nature-inspired algorithms for energy-efficient artificial intelligence of things. *IEEE Internet of Things Journal*, 12(9), 12433–12445. https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3520714

[53] Vazhuthi, P.P.I., Prasanth, A., Manikandan, S.P. and Devi Sowndarya, K.K. (2023). A hybrid ANFIS reptile optimization algorithm for energy-efficient inter-cluster routing in internet of things-enabled wireless sensor networks. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 16, 1049–1068. https://doi.org/10.1007/s12083-023-01458-0

[54] Xu, L., O'Hare, G.M.P. and Collier, R. (2017). A Smart and balanced Energy-Efficient Multi-hop clustering algorithm (Smart-BEEM) for MIMO IoT systems in future networks. *Sensors*, 17. https://doi.org/10.3390/s17071574

[55] Zadeh, L.A. and Berkele, C. (2002). *Fuzzy Logic Toolbox, User Guide*. MathWorks.

[56] Zahedi, Z.M., Akbari, R., Shokouhifar, M., Safaei, F. and Jalali, A. (2016). Swarm intelligence based fuzzy routing protocol for clustered wireless sensor network. *Expert Systems with Applications*, 55, 313–328. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.02.016

[57] Zhang, H., Zhang, M., Qin, T., Wei, W., Fan, Y. and Yang, J. (2024). An energy consumption optimization strategy for wireless sensor networks via multi-objective algorithm. *Journal of King Saud University–Computer and Information Sciences*, 36(1). https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2024.101919