سیستم های فازی و کاربردها
سال هفتم، شماره دوم (پائیز و زمستان ۱۴۰۳)
صص. ۲۰۱ تا ۲۲۴
شاپای چاپی: ۲۷۱۷-۴۴۰۹
شاپای الکترونیکی: ۲۷۱۷-۳۹۸۴
DOI:10.22034/JFSA.2025.483311.1246

خوشه‌بندی آگاه از انرژی با قابلیت تحمل‌پذیری خطا در مسیریابی سلسله‌مراتبی شبکه‌های حسگر بی‌سیم مبتنی بر منطق فازی

شایسته طباطبائی

گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه سراوان، سراوان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۲

نوع مقاله: علمی-پژوهشی

چکیده. شبکه‌های حسگر بی‌سیم (WSN) به دلیل کاربردهای گسترده در نظارت محیطی، نظامی، بهداشت و مدیریت وقایع، همچنان یک حوزه تحقیقاتی فعال به شمار می‌روند. یکی از چالش‌های اصلی در این شبکه‌ها، افزایش طول عمر برای عملیات طولانی‌مدت از طریق مدیریت بهینه مصرف انرژی گره‌های حسگر است، چرا که این گره‌ها تنها به باتری‌های داخلی متکی هستند. خوشه‌بندی، به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر برای سازماندهی توپولوژی سلسله‌مراتبی و متعادل‌سازی بار، به بهبود طول عمر شبکه کمک می‌کند. با این حال، بهینه‌سازی خوشه‌بندی یک مسئله $NP-hard$ است که نیازمند الگوریتم‌های هوشمند است. این مقاله یک تکنیک جدید خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی مبتنی بر منطق فازی با قابلیت تحمل‌پذیری خطا برای WSN ارائه می‌دهد. الگوریتم پیشنهادی به‌طور هم‌زمان انتخاب بهینه سرخوشه‌ها (CHs) و مسیرهای مناسب به مقصد را با در نظر گرفتن مکانیزم تحمل خطا انجام می‌دهد. در این روش، با استفاده از منطق فازی و دو پارامتر کلیدی، یعنی فاصله تا سینک و انرژی باقیمانده باتری، (ادامه دارد)

2010 *Mathematics Subject Classification.*
E-mail: shtabatabaey@yahoo.com.
عبارات و کلمات کلیدی. شبکه های WSN، مصرف انرژی، منطق فازی، پروتکل مسیریابی سلسله مراتبی، تحمل پذیری خطا، $DCRRP$.

© ۱۴۰۳ (انجمن سیستم‌های فازی)

احتمال CH شدن گره‌ها محاسبه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که روش پیشنهادی در مقایسه با پروتکل $DCRRP$ از نظر مصرف انرژی، تأخیر انتها به انتها، و نرخ گذردهی در شرایط مختلف، اعم از توپولوژی‌های خطادار و بدون خطا، عملکرد بهتری دارد.

۱. مقدمه

شبکه‌های شبکه‌های WSN در سال‌های اخیر به یکی از مهم‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی در شبکه‌های کامپیوتری تبدیل شده‌اند و در کاربردهایی مانند نظارت زیست‌محیطی، مراقبت‌های بهداشتی، نظامی و شناسایی آتش‌سوزی جنگل‌ها استفاده می‌شوند [۱]. این شبکه‌ها به‌عنوان یکی از فناوری‌های پیشرفته با تأثیر بالقوه بر زندگی انسان‌ها شناخته شده‌اند [۲]. حسگرها داده‌های جمع‌آوری‌شده را به گره مرکزی (سینک) منتقل می‌کنند؛ اما این فرآیند می‌تواند منجر به ازدحام شبکه و تخلیه سریع انرژی شود. خوشه‌بندی، به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر برای مدیریت مصرف انرژی و بهینه‌سازی طول عمر شبکه، از طریق متعادل‌سازی بار و برقراری ارتباطات سلسله‌مراتبی، نقش مهمی درکاهش هزینه‌های ارتباطی و استفاده بهینه از منابع دارد[۳، ۴]. در پروتکل‌های خوشه‌بندی، شبکه به گروه‌های گره‌ای (خوشه‌ها) تقسیم می‌شود که هر خوشه دارای یک CH برای مدیریت فعالیت‌ها و تجمیع داده‌های جمع‌آوری‌شده است [۶]. انتخاب بهینه CH، به دلیل تغییرات پویا در شرایط شبکه، چالشی اساسی و یک مسئله $NP-hard$محسوب می‌شود [۷]. روش‌های مختلفی برای خوشه‌بندی ارائه شده‌اند، اما بسیاری از آن‌ها با محدودیت‌هایی نظیر سازگاری پایین با پیکربندی‌های مختلف یا زمان‌بر بودن مواجه‌اند. مسیریابی در WSN به دو دسته اصلی تقسیم می‌شود: مسیریابی سلسله‌مراتبی و مسیریابی مسطح. در مسیریابی مسطح، گره‌ها وظایف مشابهی دارند و با همکاری یکدیگر، داده‌ها را به مناطق هدف ارسال می‌کنند. به‌دلیل تعداد زیاد گره‌ها و عدم امکان اختصاص شناسه منحصربه‌فرد به هر گره، ایستگاه پایه پرس‌وجوهایی را به مکان‌های مشخص ارسال کرده و منتظر پاسخ حسگرهای موجود می‌ماند. در مسیریابی سلسله‌مراتبی، شبکه به خوشه‌هایی تقسیم می‌شود که هر خوشه دارای یک CH برای دریافت، ترکیب و ارسال داده‌ها به ایستگاه پایه است. این روش با ساده‌سازی جداول مسیریابی، کاهش مصرف انرژی و بهبود مقیاس‌پذیری همراه است [۸] در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های هوشمند مختلفی برای خوشه‌بندی و مسیریابی در WSN با هدف بهینه‌سازی مصرف انرژی معرفی شده‌اند، از جمله الگوریتم $DCRRP$. با وجود مزایای این الگوریتم‌ها، چالش‌هایی مانند سرعت همگرایی پایین، هزینه‌های پردازشی بالا و پیچیدگی محاسباتی همچنان پابرجاست. این مقاله یک الگوریتم مسیریابی سلسله‌مراتبی مبتنی بر منطق فازی را برای

بهبود خوشه‌بندی و عملکرد شبکه‌های WSN با توپولوژی ۵۰ گره‌ای پیشنهاد می‌کند. الگوریتم پیشنهادی در شبیه‌ساز $OPNET$ اجرا شده و انتظار می‌رود با استفاده از منطق فازی، در مقایسه با $DCRRP$ که صرفاً بر خوشه‌بندی و سینک متحرک متکی است، CHها و مسیرهای بهینه‌تری را با حداقل هزینه سربار و مصرف انرژی انتخاب کند. مشارکت‌های اصلی این مقاله شامل موارد زیر است: • ارائه یک پروتکل تطبیق‌پذیر مبتنی بر سیستم‌های استنتاج فازی برای خوشه‌بندی نیمه آنلاین WSN . • انتخاب CH با توجه به دو معیار کلیدی: انرژی باقیمانده و فاصله تا سینک. • به‌کارگیری مکانیزم تحمل‌پذیری خطا برای جایگزینی CH در صورت بروز خطا، بدون نیاز به اجرای مجدد منطق فازی، که منجر به کاهش هزینه‌های پردازشی و صرفه‌جویی در انرژی می‌شود. • استفاده از مسیریابی سلسله‌مراتبی برای بهبود مقیاس‌پذیری و ساده‌سازی جداول مسیریابی. ساختار مقاله به شرح زیر است: بخش دوم به مرور پیشینه تحقیق و بررسی مطالعات مرتبط با بهبود مصرف انرژی در WSN اختصاص دارد. بخش سوم به توضیح الگوریتم پیشنهادی و کاربرد منطق فازی در خوشه‌بندی می‌پردازد. نتایج شبیه‌سازی در بخش چهارم ارائه می‌شود و بخش پنجم به نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

۲. کارهاي مرتبط

در [۹]، یک روش مسیریابی فرصت‌طلب (OR) با تأکید بر ویژگی‌های کیفیت سرویس (QoS) و نسبت دریافت بسته‌ها بررسی شده است. این مطالعه به مقایسه مسیریابی سلسله‌مراتبی با سایر روش‌ها و ارزیابی رویکردهای انتخاب گره‌های نزدیک به سینک پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد که خوشه‌بندی به دلیل زمان کوتاه‌تر مسیریابی، عملکرد بهتری دارد؛ اما عدم جایگزینی CH در صورت خرابی، یکی از محدودیت‌های این روش محسوب می‌شود. در [۱۰]، پروتکل مسیریابی آگاه از انرژی AFSRP با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ماهی‌ها (PSO) برای بهبود مصرف انرژی در شبکه‌های WSN معرفی شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که AFSRP از نظر مصرف انرژی، تأخیر و نرخ گذردهی عملکرد بهتری نسبت به پروتکل ERA دارد. با این حال، این روش در محیط‌های پویا کارایی کمتری دارد و فاقد قابلیت تحمل‌پذیری خطاست. در [۱۱]، پروتکل DCRRP مبتنی بر خوشه‌بندی و سینک متحرک معرفی شد که با انتخاب سرخوشه‌های جایگزین در صورت خرابی، طول عمر و قابلیت اطمینان شبکه را افزایش می‌دهد. این پروتکل عملکرد بهتری در تحمل خطا نسبت به پروتکل NODIC دارد، ولی اجرای مجدد الگوریتم خوشه‌بندی در هر دور جدید باعث افزایش هزینه پردازش می‌شود. در [۱۲]، الگوریتم مسیریابی EADC برای بهبود بهره‌وری انرژی در شبکه‌های WSN معرفی شد. در این روش، گره‌ها بر اساس میزان انرژی

باقی‌مانده به رقابت برای تبدیل شدن به CH پرداخته و گره با بیشترین انرژی به عنوان CH انتخاب می‌شود. گره‌ها پس از انتخاب CH به آن می‌پیوندند و برای متعادل‌سازی مصرف انرژی، یک درخت مسیریابی ایجاد می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که این روش به تعادل انرژی در ارتباطات درون‌خوشه‌ای و بین‌خوشه‌ای کمک کرده و طول عمر شبکه را افزایش می‌دهد. با این حال، این روش تنها از معیار انرژی استفاده کرده و سایر عوامل مهم مانند فاصله تا سینک را در نظر نمی‌گیرد. در [۱۳]، یک پروتکل مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی چندمعیاره برای شبکه‌های WSN پیشنهاد شده است که به‌صورت غیرمتمرکز عمل کرده و هدف آن کاهش مصرف انرژی است. در این الگوریتم، انتخاب CH بر اساس معیارهایی چون انرژی باقی‌مانده، فاصله تا ایستگاه پایه و تعداد همسایگان انجام می‌شود تا مسیر بهینه‌ای به ایستگاه پایه ایجاد گردد. پس از تعیین سرخوشه‌ها، یک درخت مسیریابی ایجاد شده و داده‌ها از طریق آن به ایستگاه پایه منتقل می‌شوند. با این حال، هزینه بالای پردازش ناشی از اجرای مکرر الگوریتم برای یافتن سرخوشه‌های مناسب از محدودیت‌های این روش است. در [۱۴]، یک پروتکل جدید برای بهره‌وری انرژی در شبکه‌های WSN ارائه شده است که شامل تقسیم مناطق درونی خوشه به چندین سلول است. در هر سلول، گره‌ها داده‌ها را به گره سلول (CN) منتقل می‌کنند و سپس گره‌های CN اطلاعات را به CH ارسال می‌کنند. این روش مصرف انرژی را کاهش داده و طول عمر شبکه را افزایش می‌دهد. با این حال، معایب آن شامل زمان‌بر بودن فرآیند تقسیم‌بندی مناطق و افزایش هزینه پردازشی است. همچنین، این پروتکل قابلیت تحمل خطا ندارد و در صورت خرابی ،CN گره جایگزین برای ادامه عملکرد در نظر گرفته نشده است. در [۱۵]، یک روش خوشه‌بندی برای بهبود مصرف انرژی در شبکه‌های WSN پیشنهاد شده است که در آن برای انتخاب CH بهینه، معیارهایی مانند فاصله از ایستگاه پایه، انرژی باقی‌مانده و فاصله بین هاCH در نظر گرفته می‌شود. الگوریتم ترکیبی مبتنی بر الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی حرارت تلاش دارد تا طول عمر شبکه را بهبود دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این الگوریتم می‌تواند مصرف انرژی شبکه را متوازن کرده و طول عمر آن را افزایش دهد. با این حال، ترکیب این دو الگوریتم باعث افزایش هزینه پردازشی می‌شود. در [۱۶]، سه الگوریتم برای کاهش مصرف انرژی در شبکه‌های WSN پیشنهاد شده‌اند: خوشه‌بندی ناهمگن انرژی موثر توزیعی، مسیریابی نقاط k شکل بدون لینک، و مکانیزم نگهداری مسیر. در این روش‌ها، CH ها بر اساس انرژی باقی‌مانده با استفاده از تایمر ثانویه انتخاب و می‌شوند و سپس مسیرهای بدون لینک به ایستگاه پایه گزارش می‌شوند. همچنین، مکانیزم نگهداری مسیر امکان تغییر مسیرهای متقاطع را فراهم می‌آورد. با این حال، این روش تنها به انرژی مصرفی گره توجه می‌کند و سایر عوامل مهم مسیریابی را نادیده می‌گیرد. در [۱۷]، یک پروتکل مسیریابی انرژی‌کارآمد و تحمل‌پذیر

خطا برای بهینه‌سازی استفاده از کانال‌های ارتباطی و کاهش مصرف انرژی پیشنهاد شده است. این روش با استفاده از حسگرهای متحرک، فاصله انتقال پیام‌ها را کاهش داده و پوشش مناطق با اتصال ضعیف را بهبود می‌بخشد. در نتیجه، مسیریابی بهینه‌سازی شده و مصرف انرژی کاهش می‌یابد. اما تحرک حسگرها ممکن است منجر به مصرف بیشتر انرژی و کاهش طول عمر باتری گره‌ها شود. در [۱۸]، یک روش خوشه‌بندی جدید برای افزایش طول عمر شبکه WSN و بهبود مصرف انرژی با استفاده از الگوریتم گله شیرها و منطق فازی پیشنهاد شده است. در این روش، گره‌ها به‌عنوان CH بر اساس انرژی باتری و فاصله تا سینک انتخاب می‌شوند. پس از تشکیل خوشه‌ها، یک ستون فقرات مجازی برای مسیریابی به سینک ایجاد می‌شود که عملکرد شبکه را بهبود می‌بخشد. اما هزینه پردازشی بالای استفاده از این الگوریتم‌ها از معایب این روش است. در [۱۹]، روش CEMST برای پوشش شبکه در شبکه‌های WSN مبتنی بر خوشه‌بندی معرفی شده است. این روش شامل سه مرحله است: تشکیل خوشه، ساخت مسیر، و بازسازی. هاCH بر اساس انرژی باقی‌مانده و همپوشانی اعضا انتخاب می‌شوند. در صورت خرابی یا اتمام انرژی، مرحله بازسازی فعال می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که CEMST طول عمر شبکه را بهبود می‌بخشد، اما هزینه پردازشی بالا در مرحله ساخت مسیر از معایب آن است. در [۲۰]، یک روش خوشه‌بندی و مسیریابی سلسله‌مراتبی برای شبکه‌های WSN با هدف حداکثر بهره‌وری انرژی معرفی شده است. این روش هاCH را بر اساس الگوریتم جستجوی پروانه بید تعیین می‌کند و درون خوشه‌ها از مسیریابی تک‌گامه برای انتقال داده‌ها به سینک استفاده می‌شود. برای کاهش مصرف انرژی، مسیرهای طولانی جلوگیری و گره‌های همسایه با بیشترین انرژی انتخاب می‌شوند. همچنین، برای اطمینان از امنیت، از رمزنگاری استفاده می‌شود. با این حال، محدودیت‌های این روش شامل احتمال نرسیدن به جواب بهینه در تکرارهای محدود و هزینه پردازشی بالای رمزنگاری است. در [۲۱]، یک روش خوشه‌بندی فازی بهینه‌شده برای شبکه‌های WSN با استفاده از الگوریتم جستجوی سنجاب بهبود یافته (ISSA) معرفی شده است. این روش انتخاب هاCH را بر اساس پارامترهایی مانند کارایی انرژی و فاصله تا سینک بهینه می‌کند. شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده بهبودهای قابل توجه در مصرف انرژی، طول عمر شبکه و کارایی انتقال داده‌ها هستند. نتایج نشان می‌دهند که ISSA به‌طور مؤثر به چالش‌های رایج در WSN، از جمله تخلیه انرژی و عدم پایداری خوشه‌بندی، پاسخ می‌دهد و راه‌حلی قوی برای محیط‌های دینامیک ارائه می‌دهد. در [۲۲] چالش‌های مسیریابی در شبکه‌های WSN با تأکید بر امنیت و بهینه‌سازی مصرف انرژی بررسی شده است. این تحقیق پروتکلی سلسله‌مراتبی توسعه می‌دهد که ارزیابی اعتماد را به‌عنوان معیار اصلی در انتخاب مسیرها به کار می‌گیرد. پروتکل علاوه بر در نظر گرفتن انرژی باقی‌مانده گره‌ها، از اطلاعات اعتماد نیز

برای تصمیم‌گیری در انتخاب مسیر استفاده می‌کند. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده بهبود در عملکرد انرژی و افزایش امنیت داده‌ها است و نویسندگان بر اهمیت این پروتکل در بهینه‌سازی انرژی و تقویت امنیت تأکید دارند. در [۲۳]، یک رویکرد نوین خوشه‌بندی در شبکه‌های WSN با استفاده از تکنیک‌های مدل‌سازی فازی و الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز مهاجم اصلاح‌شده (MIWO) معرفی شده است. این روش به‌ویژه برای بهینه‌سازی انتخاب هاCH با در نظر گرفتن عواملی مانند انرژی و کیفیت خدمات طراحی شده است. نتایج نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در مصرف انرژی و عملکرد شبکه نسبت به روش‌های سنتی خوشه‌بندی هستند. نویسندگان نتیجه‌گیری می‌کنند که ادغام مدل‌سازی فازی با MIWO کیفیت خوشه‌بندی آگاه از انرژی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد و این رویکرد را به‌عنوان یک راه‌حل مناسب برای بهبود کارایی هاWSN معرفی می‌کنند. در [۲۴]، یک طرح مسیریابی کارآمد و حساس به تأخیر برای شبکه‌های باWSN سینک‌های متحرک مسیر محدود (MS) ارائه شده است که چالش‌هایی مانند حفره‌های انرژی، تأخیر و سرریز بافر را برطرف می‌کند. این طرح با استفاده از مدل پیش‌بینی نزدیک‌ترین همسایه(KNN)، موقعیت سینک‌های متحرک را تخمین زده و سربار ناشی از به‌روزرسانی‌های مکرر موقعیت را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، با بهبود الگوریتم متاهیوریستیک گوزن ،(IRDA) خوشه‌بندی بهینه‌سازی شده وCHها به طور کارآمد انتخاب می‌شوند تا مسیریابی بهینه و پایدار تضمین گردد. برای افزایش قابلیت اطمینان، مکانیزم تحمل خطا و حذف افزونگی به کار گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده بهبود بهره‌وری انرژی، کاهش تأخیر و افزایش نسبت تحویل بسته‌ها در مقایسه با روش‌های موجود است. با این حال، این روش به دقت پیش‌بینی‌ها وابسته است و در محیط‌های بسیار پویا ممکن است با چالش‌هایی مواجه شود. در [۲۵]، یک پروتکل مسیریابی انرژی‌محور برای شبکه‌های WSN با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تطبیقی رمورا (AROA) ارائه شده است که با بهره‌گیری از خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی، مصرف انرژی را بهبود و طول عمر شبکه را افزایش می‌دهد. این پروتکل با حل یک تابع چندهدفه شامل پارامترهایی مانند مصرف انرژی، فاصله، توان عملیاتی، نسبت تحویل بسته (PDR) و تلفات مسیر، به انتخاب بهینه هاCH کمک می‌کند. استراتژی مسیریابی پویا مبتنی بر AROA با تطبیق‌پذیری بالا برای کاربردهایی در کشاورزی، اینترنت اشیا و مراقبت‌های بهداشتی طراحی شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که این روش در مقایسه با الگوریتم‌های سنتی بهره‌وری انرژی و عملکرد شبکه را بهبود می‌بخشد. با این حال، وابستگی به دقت پارامترها و پیچیدگی محاسباتی در محیط‌های متغیر می‌تواند چالش‌برانگیز باشد. در [۲۶]، یک سیستم احراز هویت دو فازی تصادفی (RBAS) برای بهبود امنیت در شبکه‌های حسگر بی‌سیم اینترنت اشیاء (WITSN) پیشنهاد شده است. این سیستم با استفاده از واترمارک دیجیتال، کدهای CRC،

رمزنگاری و هشینگ پیشرفته، اصالت داده‌ها، در دسترس بودن و شناسایی خطاها را تقویت و مصرف انرژی را بهینه می‌سازد. نتایج نشان می‌دهند که این روش مصرف انرژی را ۸٪ کاهش می‌دهد، طول عمر شبکه را ۷٪ افزایش می‌دهد و تأخیر و از دست دادن بسته‌ها را کاهش می‌دهد. با این حال، پیچیدگی محاسباتی آن بالا است. در [۲۷]، الگوریتم بهبود یافته Dingo و الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ بلوگا (IDBBWOA) برای افزایش کارایی انرژی و طول عمر شبکه در شبکه‌های WSN معرفی شده است. این الگوریتم از Dingo برای انتخاب CH بهینه و از نهنگ بلوگا برای تعیین موقعیت بهینه گره سینک به‌منظور کاهش ارتباط چندمرحله‌ای استفاده می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده بهبود ۱۸٫۹۲٪ در سرعت انتقال داده‌ها، افزایش ۳۴٫۲۸٪ در تعداد گره‌های زنده و کاهش ۲۹٫۳۴٪ در مصرف انرژی هستند. با این حال، پیچیدگی این الگوریتم ممکن است در محیط‌های پویا چالش‌برانگیز باشد.

۳. روش پیشنهادی

با توجه به چالش‌های مصرف انرژی در مسیریابی شبکه‌های حسگر، مقاله حاضر پروتکلی جدید به نام HCFBFRP را برای مسیریابی خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی با قابلیت تحمل خطا بر اساس منطق فازی پیشنهاد می‌کند. این الگوریتم شامل دو مرحله است: ابتدا، انتخاب CH با استفاده از منطق فازی بر اساس فاصله تا سینک، تعداد همسایگان و انرژی باقی‌مانده، و سپس انتخاب CH جایگزین به‌طور پویا در صورت شکست CH قبلی. در الگوریتم پیشنهادی این مقاله، خوشه‌بندی به صورت نیمه‌آنلاین انجام می‌شود، زیرا نیاز به به‌روزرسانی دوره‌ای خوشه‌ها وجود دارد، اما به دلیل عدم تحرک گره‌ها، مدیریت تغییرات لحظه‌ای پیچیدگی زیادی ندارد. در این رویکرد، در هر دوره زمانی مشخص، با استفاده از منطق فازی، تصمیم‌گیری برای انتخاب هاCH و تخصیص گره‌ها بر اساس شرایط فعلی شبکه صورت می‌گیرد، که به کاهش مصرف انرژی و افزایش کارایی شبکه کمک می‌کند. خوشه‌بندی نیمه‌آنلاین ترکیبی از روش‌های آفلاین و آنلاین است و تلاش می‌کند تا مزایای هر دو را به کار گیرد. در این روش، برخی از تصمیمات اولیه، مانند تعیین تعداد خوشه‌ها، از قبل مشخص می‌شوند، اما فرآیند اصلی خوشه‌بندی و انتخاب سرخوشه‌ها به صورت پویا و در طول زمان انجام می‌شود. این نوع خوشه‌بندی، نسبت به روش آفلاین انعطاف‌پذیری بیشتری دارد و در عین حال، پیچیدگی کمتری نسبت به خوشه‌بندی کاملاً آنلاین ایجاد می‌کند و تعادلی مناسب بین کارایی و پیچیدگی فراهم می‌آورد.

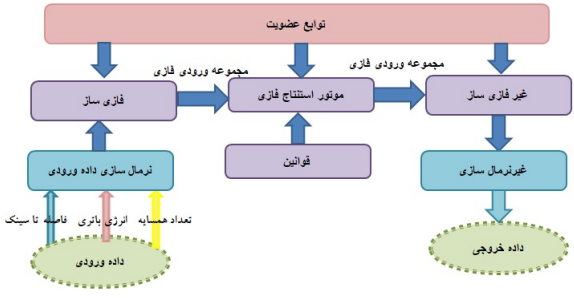
۱.۳. مرحله اول- فاز تشکیل خوشه¬ها. این فاز شامل خوشه‌بندی گره‌های حسگر و تعیین هاCH است. در فرآیند تشکیل خوشه‌ها، گره‌هایی با انرژی باقی‌مانده بالا، تعداد همسایگان بیشتر

و فاصله کمتر از سینک به‌عنوان CH انتخاب می‌شوند. گره‌هایی با انرژی کمتر به‌عنوان اعضای خوشه‌ها انتخاب شده و هر گره تنها متعلق به یک خوشه است. تمرکز بر هزینه‌های ارتباطی درون خوشه‌ای و بین خوشه‌ای است تا مصرف انرژی هاCH در فرآیند انتقال اطلاعات به حداقل برسد. اعضای خوشه سعی می‌کنند به نزدیک‌ترین CH با بالاترین انرژی متصل شوند. در صورت تساوی فاصله گره از دو سرخوشه با انرژی یکسان، گره به‌صورت تصادفی به یکی از هاCH می‌پیوندد. احتمال CH شدن هر گره به‌طور مستقل بر اساس سه معیار انرژی باقی‌مانده، تعداد همسایگان و فاصله تا سینک محاسبه می‌شود. برای محاسبه معیار فاصله گره تا سینک از رابطه ۱ استفاده می‌شود.

$$D_{is} = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + (y_i - y_s)^2} \qquad (۱.۳)$$

بطوریکه (x_i, y_i, z_i) موقعیت مکانی گره حسگر امi و (x_s, y_s, z_s) موقعیت مکانی سینک می باشد. برای محاسبه تعداد همسایگان، هر گره پیام hello را تولید و در محدوده خود پخش می‌کند. گره‌هایی که در همسایگی گره فرستنده قرار دارند، بسته ack شامل مشخصات و شناسه (ID) خود را به گره فرستنده ارسال می‌کنند. گره دریافت‌کننده بسته ack شناسه گره را استخراج و در لیست همسایگان خود ثبت می‌کند. احتمال CH شدن برای تمامی گره‌ها با استفاده از منطق فازی محاسبه می‌شود که توسط یک کنترل‌کننده تطبیقی انجام می‌گیرد. منطق فازی به دلیل توانایی در تصمیم‌گیری شفاف و ارائه نتایج بهینه، برای طراحی سیستم‌های کنترل مناسب است. برخلاف منطق کلاسیک که در آن عبارات به صورت دودویی بیان می‌شوند، منطق فازی با درجات مختلف دقت، گزاره‌ها را بیان می‌کند. سیستم فازی شامل ورودی‌ها، خروجی‌ها و قوانین است که روابط بین آنها را تعریف می‌کند. در مرحله اول، توابع عضویت فازی ورودی‌ها را به مقادیر عددی نگاشت می‌کنند. این توابع به‌وسیله منحنی‌هایی نشان می‌دهند که هر نقطه در فضای حالت چگونه به درجه عضویت نگاشت می‌شود. در مرحله دوم، موتور استنتاج قوانین فازی را پردازش کرده و نتایج آن را ارائه می‌دهد. در این مقاله، از مدل فازی سوگنو برای انتخاب احتمال CH شدن استفاده شده است.

در یک سیستم فازی، برای نگاشت صحیح ورودی به خروجی، ترکیبی از قوانین پایگاه قوانین به دست آمده و خروجی سیستم فازی بر اساس این ترکیب و وضعیت ورودی تعیین می‌شود. این فرآیند توسط موتور استنتاج فازی انجام می‌شود. از آنجا که ورودی و خروجی سیستم‌های فازی معمولاً اعداد واقعی هستند، برای تبدیل این ورودی‌ها به ورودی‌های فازی و برعکس، واسطه‌هایی به نام فازی‌ساز و غیر فازی‌ساز استفاده می‌شوند. در این مقاله، مدل فازی شامل سه متغیر ورودی است: انرژی باقی‌مانده، فاصله از سینک و تعداد همسایه‌ها. انرژی باقی‌مانده هر گره (ورودی

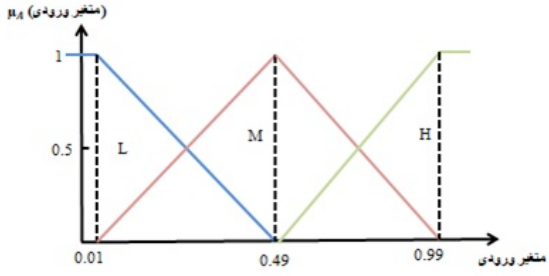


شکل ۱: بلوک دیاگرام سیستم منطق فازی

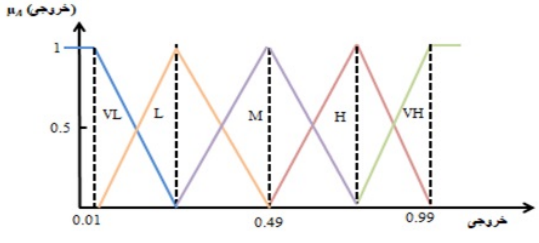
اول) بر طول عمر شبکه تأثیر می‌گذارد؛ فاصله از سینک (ورودی دوم) تأثیرگذار بر میزان انرژی مصرفی برای ارسال داده‌ها است؛ و تعداد همسایگان (ورودی سوم) بر ارتباطات شبکه و قابلیت تحمل خطا تأثیر دارد. متغیرهای ورودی فازی برای اجتناب از انتخاب گره‌های کم‌انرژی، به حداقل رساندن مصرف انرژی و افزایش تحمل خطا در نظر گرفته می‌شوند. یک قانون فازی سوگنو با سه ورودی x_1، x_2 و x_3، و یک خروجی y به صورت «اگر $a = x_1$ و $b = x_2$ و $c = x_3$، انگاه $f(x_1, x_2, x_3) = y$» نمایش داده می¬شود، در اینجا a، b و c توابع عضویت ورودی¬ها و y احتمال CH شدن یا خروجی است. عملکرد سیستم فازی شامل ۴ بخش است: نرمال سازی، فازي سازی ، موتور استنتاج فازی سوگنو و غیرفازی سازی. سه متغیر ورودی، انرژی باقیمانده: E(n)، فاصله از سینک: D(n) و تعداد همسایه: N(n) برای هر گره n در نظر گرفته می شود. برای هر متغیر ورودی، نرمال‌سازی باید طبق رابطه ۲ انجام شود تا مقادیر آن‌ها بین ۰ و ۱ قرار گیرد.

$$Normalized(X_i) = \frac{X_i - Min(X_i)}{MxaX - MinX}, \quad (۲.۳)$$

بطوریکه x_i مقدار متغیر ورودی x برای گره i است. همچنین min (x) و max (x) بیانگر حداقل و حداکثر مقدار متغیر در بین تمام گره‌های درون خوشه گره i هستند. فازی‌ساز با استفاده از توابع عضویت، ورودی‌های نرمال‌شده را به متغیرهای فازی زبانی تبدیل می‌کند. توابع عضویت مربوط به متغیرهای ورودی در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. مجموعه‌های فازی هر متغیر ورودی به سه تابع عضویت کم، زیاد و متوسط تقسیم می‌شوند. این مرحله شامل فازی‌سازی متغیرهای ورودی، مانند فاصله گره‌های حسگر از سینک، تعداد همسایگان و سطح انرژی باتری گره‌ها، و همچنین خروجی فازی که احتمال CH شدن است، می‌شود. توابع عضویت خروجی در شکل ۳ نمایش داده شده‌اند. پس از فازی‌سازی، موتور استنتاج فازی سوگنو قوانین فازی از پیش تعیین‌شده را پردازش



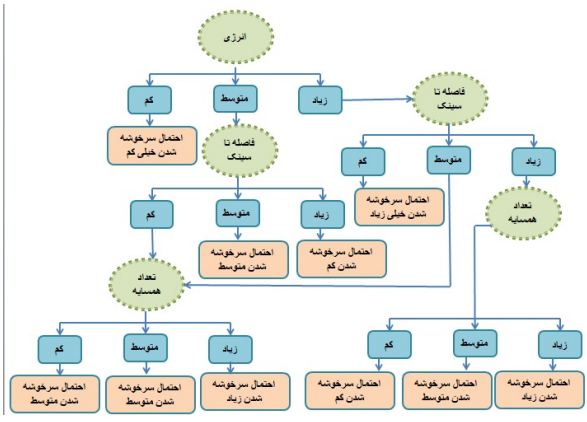
شکل ۲: توابع عضویت براي متغیرهای ورودی



شکل ۳: توابع عضویت براي متغیر خروجی

می‌کند. در مرحله استنتاج، احتمال CH شدن با استفاده از قواعد فازی و مقادیر پارامترهای در نظر گرفته‌شده محاسبه می‌شود. هر قاعده فازی شامل یک بخش مقدمه و یک بخش نتیجه است. برای مثال، بخش مقدمه به صورت ”اگر فاصله تا سینک زیاد، تعداد همسایه زیاد و انرژی باتری کم باشد“ و بخش نتیجه به شکل ”آن‌گاه احتمال CH شدن کاهش می‌یابد“ است. برای هر پارامتر ورودی، سه مجموعه فازی تعریف شده که به ۲۷ قاعده فازی منتهی می‌شود. برای کاهش تعداد قوانین غیرضروری، از درخت تصمیم فازی استفاده شده است. درخت تصمیم فازی با ترکیب مزایای درخت تصمیم و منطق فازی، تعداد قوانین را کاهش داده و پیچیدگی سیستم را کم می‌کند. این درخت به صورت سلسله‌مراتبی عمل می‌کند، به طوری که هر گره شامل یک شرط فازی و هر برگ نمایانگر یک خروجی فازی است. با استفاده از درخت تصمیم فازی، تعداد قوانین مؤثر از ۲۷ به ۱۳ کاهش یافته است که در جدول ۱ آمده است.

پس از فعال شدن هر قاعده فازی، خروجی فازی برای آن قاعده محاسبه می‌شود. سپس، غیر فازی‌ساز این خروجی‌ها را تجمیع کرده و آن‌ها را به یک مقدار عددی واحد، یعنی احتمال CH



شکل ۴: درخت تصمیم فازی در روش پیشنهادی

جدول۱. پایگاه قواعد فازی

قانون	شماره قانون
۱	اگر انرژی باتری کم باشد آنگاه احتمال سرخوشه شدن خیلی کم است.
۲	اگر انرژی باتری متوسط و فاصله تا سینک کم و تعداد همسایه کم باشد آنگاه احتمال سرخوشه شدن متوسط است.
۳	اگر انرژی باتری متوسط و فاصله تا سینک کم و تعداد همسایه متوسط باشد آنگاه احتمال سرخوشه شدن متوسط است.
۴	اگر انرژی باتری متوسط و فاصله تا سینک کم و تعداد همسایه زیاد باشد آنگاه احتمال سرخوشه شدن زیاد است.
۵	اگر انرژی باتری متوسط و فاصله تا سینک متوسط باشد آنگاه احتمال سرخوشه شدن متوسط است.
۶	اگر انرژی باتری متوسط و فاصله تا سینک زیاد باشد آنگاه احتمال سرخوشه شدن کم است.
۷	اگر انرژی باتری زیاد و فاصله تا سینک کم باشد آنگاه احتمال سرخوشه شدن خیلی زیاد است.
۸	اگر انرژی باتری زیاد و فاصله تا سینک متوسط و تعداد همسایه کم باشد آنگاه احتمال سرخوشه شدن متوسط است.
۹	اگر انرژی باتری زیاد و فاصله تا سینک متوسط و تعداد همسایه متوسط باشد آنگاه احتمال سرخوشه شدن متوسط است.
۱۰	اگر انرژی باتری زیاد و فاصله تا سینک متوسط و تعداد همسایه زیاد باشد آنگاه احتمال سرخوشه شدن زیاد است.
۱۱	اگر انرژی باتری زیاد و فاصله تا سینک زیاد و تعداد همسایه کم باشد آنگاه احتمال سرخوشه شدن کم است.
۱۲	اگر انرژی باتری زیاد و فاصله تا سینک زیاد و تعداد همسایه متوسط باشد آنگاه احتمال سرخوشه شدن متوسط است.
۱۳	اگر انرژی باتری زیاد و فاصله تا سینک زیاد و تعداد همسایه زیاد باشد آنگاه احتمال سرخوشه شدن زیاد است.

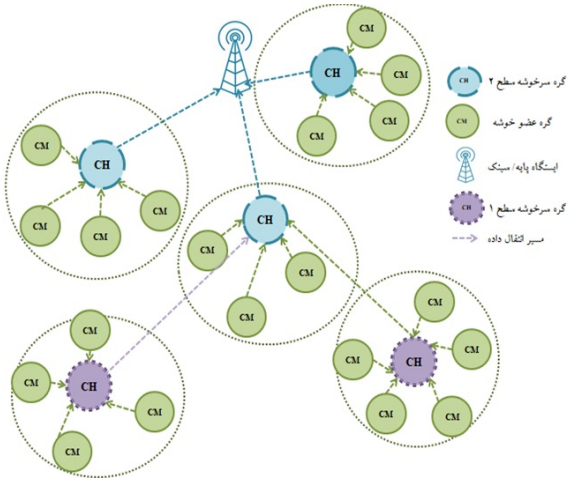
شدن ،P(n) تبدیل می‌کند. برای تبدیل به روش میانگین مراکز، از رابطه (۳) استفاده شده است که به‌طور خاص به محاسبه احتمال CH شدن گره‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم کمک می‌کند. این رابطه به‌طورکلی به نحوه انتخاب خوشه‌ها و گره‌های مناسب برای سرخوشه شدن پرداخته و به کمک منطق فازی انجام می‌شود.

$$p(i) = \frac{\sum_{l=1}^{m} y^{-1} \prod_{i=1}^{m} \mu A_i^l(X_i)}{\sum_{l=1}^{m} \prod_{i=1}^{m} \mu A_i^l(X_i)} \qquad (۳.۳)$$

بطوریکه پارامترهاي اين رابطه عبارتند از، :P(i) احتمال CH شدن گره ،i: i اندیس گره، :m تعداد قواعد فازي(در اينجا n،(۲۷ : تعداد توابع عضويت متغيرهاي ورودي (در اينجا ۳)، : مقدار

فازي توابع عضویت و وزن‌های تابع عضویت که به میزان تأثیر هر قاعده فازی اشاره دارند. در این رابطه، میانگین مراکز به‌طور ضمنی برای انتخاب گره‌ها به‌عنوان سرخوشه استفاده می‌شود. با توجه به توابع عضویت و وزن‌های داده شده به هر قاعده، احتمال سرخوشه شدن گره‌ها محاسبه می‌شود که این امر در بهینه‌سازی مصرف انرژی، کاهش تأخیر و افزایش پایداری شبکه مؤثر است. در سیستم فازی، بهترین گره به‌عنوان CH بر اساس سه معیار انتخاب می‌شود: فاصله کمتر به سینک، تعداد همسایه‌های بیشتر، و انرژی بیشتر. سیستم فازی احتمال CH شدن هر گره را محاسبه کرده و گره‌ها بر اساس این احتمال مرتب می‌شوند. از میان ۵۰ گره حسگر، ۵ گره با بالاترین احتمال به‌عنوان CH انتخاب می‌شوند. سپس، سینک یک پیام اعلان به این گره‌ها ارسال می‌کند تا به‌عنوان CH عمل کنند. هاCH پس از انتخاب، پیام تبلیغاتی (Advertisement) شامل شناسه، انرژی باقی‌مانده و موقعیت مکانی خود را به گره‌های همسایه ارسال می‌کنند. گره‌هایی که این پیام را دریافت می‌کنند، از رقابت برای CH شدن کنار رفته و به‌عنوان گره‌های عادی تا دور بعدی فعالیت می‌کنند. این گره‌ها همچنین "مجموعه سرخوشه‌های همسایه" را ذخیره می‌کنند. گره‌ها سپس به یکی از سرخوشه‌های موجود در این لیست می‌پیوندند، اولویت با CH ای است که بیشترین انرژی و کمترین فاصله را دارد. پس از شکل‌گیری خوشه‌ها، مسیرهای ارتباطی به‌صورت سلسله مراتبی برای ارتباط با سینک تعیین می‌شوند. سینک ابتدا پیام درخواست مسیر به هاCH ارسال می‌کند، شامل شناسه، سطح، و موقعیت مکانی خود. هاCH پس از دریافت این پیام، سطح خود را افزایش داده و سینک را به‌عنوان والد انتخاب می‌کنند. این فرآیند برای سایر هاCH نیز تکرار می‌شود تا ساختار DVB تکمیل شود و چندین مسیر ارتباطی به سینک شکل گیرد. پس از تشکیل خوشه‌ها، هاCH اطلاعات خود را به سینک ارسال کرده تا جدول مسیریابی سینک به‌روز شود. در فاز جمع‌آوری داده‌ها، سینک با توجه به این اطلاعات، هاCH را تغییر می‌دهد یا گره‌های جایگزین انتخاب می‌کند.

۲.۳. مرحله دوم- برقراری قابلیت اطمینان. در تشکیل ستون فقرات مجازی مستقیم، هر سرخوشه سطح n−۱ ممکن است چندین والد داشته باشد و خود نیز می‌تواند به‌عنوان والد سرخوشه‌های سطح n عمل کند. همچنین، هر سرخوشه شامل k گره حسگر است. در صورتی که ایCH در یک خوشه دچار خطا شود، گره‌های عضو آن خوشه هیچ پیامی (ACK) برای بسته‌های ارسالی خود دریافت نمی‌کنند. در این حالت، گره‌های عضو خوشه پیام HELP شامل اطلاعات سطح انرژی، شناسه (ID) خود، شناسه سرخوشه قبلی و فاصله آن‌ها تا سینک (BS) را در محدوده رادیویی R پخش می‌کنند و برای انتخاب سرخوشه جدید رقابت می‌کنند. برای هر گره حسگر که عضو خوشه‌ای است که سرخوشه‌اش دچار خطا شده و پیام HELP را دریافت کرده است، احتمال



شکل ۵: مدل سلسله مراتبی مبتنی بر خوشه بندی در روش پیشنهادی

CH شدن طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود و یکی از اعضای خوشه به‌عنوان CH جدید انتخاب می‌شود. پس از تعیین CH جدید، ارتباط خوشه و اعضای آن با سینک برقرار می‌شود. در صورتی که CH سطح n-۱ که به‌عنوان والد سرخوشه‌های سطح n عمل می‌کند، دچار خطا شود، هایCH سطح n می‌توانند این خطا را شناسایی کنند. هر گره‌ای که داده‌ای ارسال کند و هیچ ACK از سرخوشه والد خود دریافت نکند، متوجه خطای آن می‌شود. برای شناسایی سرخوشه جدید سطح n-۱ به‌عنوان والد، CH جدید سطح n-۱ پیغام "اعلام CH شدن" را در محدوده رادیویی ۲R پخش می‌کند. هاCH با مقایسه ID سرخوشه جدید با هایID موجود در لیست والدهای خود، مشخصات CH قبلی را از لیست والد حذف کرده و CH جدید را جایگزین می‌کنند. سپس، متوسط انرژی باقی‌مانده هاCH محاسبه می‌شود و لیست والد جدید شامل هاییCH با انرژی باقی‌مانده بیشتر یا مساوی متوسط انرژی باقی‌مانده تشکیل می‌شود. در مدل سلسله‌مراتبی پیشنهادی، گره سینک، هاCH و گره‌های عضو خوشه به‌عنوان سه عنصر اصلی عمل می‌کنند که در شکل ۵ نمایش داده شده است. گره سینک داده‌های جمع‌آوری‌شده از هاCH را دریافت می‌کند. گره‌های عضو خوشه، داده‌ها را از محیط حس کرده و به سرخوشه مربوطه ارسال می‌کنند. هاCH نیز پس از دریافت و پردازش داده‌های اعضای خوشه، آن‌ها را به سینک منتقل می‌کنند.

جدول (۲). پارامترهای شبیه سازی بکار گرفته شده در پروتکل پیشنهادی

مشخصات محیط شبیه سازی	مقادیر
تعداد گره های سیار	۵۰ گره
مدت زمان شبیه سازی	۲۰۰ ثانیه
فضای شبیه سازی شده	۱۰۰۰×۱۰۰۰ مترمربع
شعاع انتقال هر یک از گره ها	۲۵۰ متر
اندازه هر بسته داده	۱۰۲۴ بایت
نرخ ارسال بسته در شبکه	۳۰ بسته در هر ثانیه
مدل انتشاری	فضای آزاد
پروتکل دسترسی به واسط	IEEE802.11

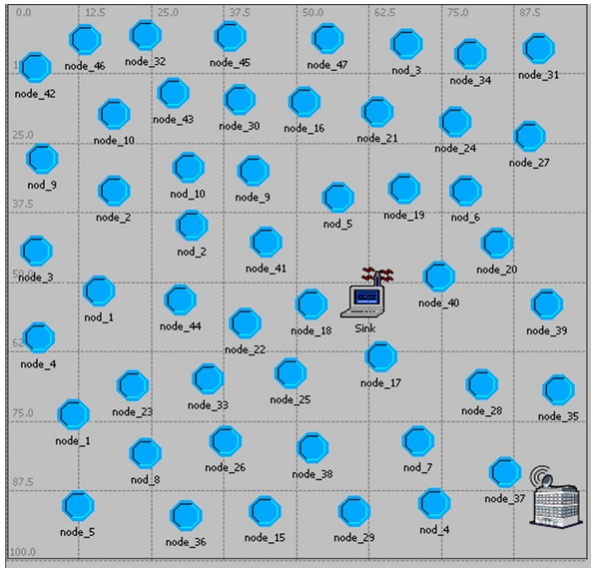
۴. نتایج شبیه سازی

۱.۴. محیط شبیه سازی. در این مقاله، شبیه‌سازی و مقایسه روش پیشنهادی با پروتکل DCRRP به منظور ارزیابی تأثیر سیستم فازی در بهبود هوشمندی الگوریتم خوشه‌بندی انجام شده است. برای این شبیه‌سازی از نرم‌افزار Modeler Opnet استفاده شده و دو الگوریتمHCFBFRP و DCRRP مقایسه شده‌اند. هر دو الگوریتم ساختاری مشابه دارند، اما تفاوت اصلی در استفاده روش پیشنهادی از منطق فازی است. جدول ۲ پارامترهای شبیه‌سازی را نمایش می‌دهد. در سناریوی اول، الگوریتمDCRRP با پراکندگی گره‌ها و مسیریابی مبتنی بر سینک سیار استفاده شده است. در سناریوی دوم، الگوریتمHCFBFRP با استفاده از منطق فازی و پراکندگی تصادفی گره‌ها اعمال شده است. در هر دو سناریو، توپولوژی شبکه شامل ۵۰ گره است که در شکل ۶ نمایش داده شده است. همچنین، شکل ۷ وضعیت توپولوژی را در شرایط وجود خطا در برخی گره‌ها نشان می‌دهد.

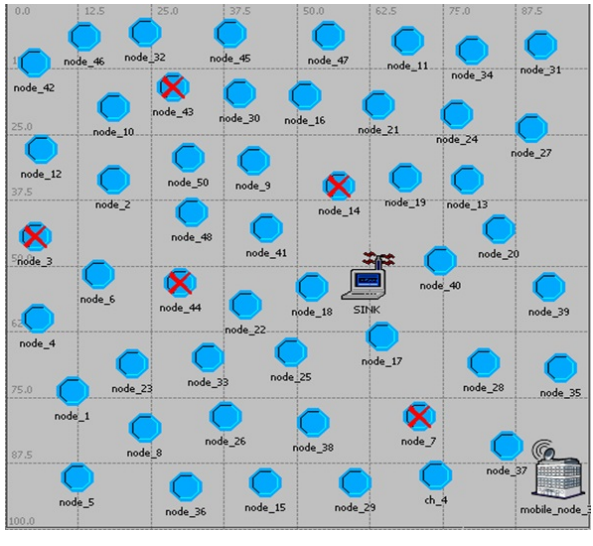
۵. معیارهای بررسی کارایی

برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی، از معیارهای زیر استفاده شده است.

۱.۵. تأخیر انتها به انتها. ین معیار به میانگین زمان تحویل بسته از مبدأ به مقصد اشاره دارد. شکل‌های (۸) و (۹) تأخیر انتها به انتها را برای الگوریتم پیشنهادی و پروتکل DCRRP مقایسه می‌کنند. محور عمودی تأخیر انتها به انتها و محور افقی زمان شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

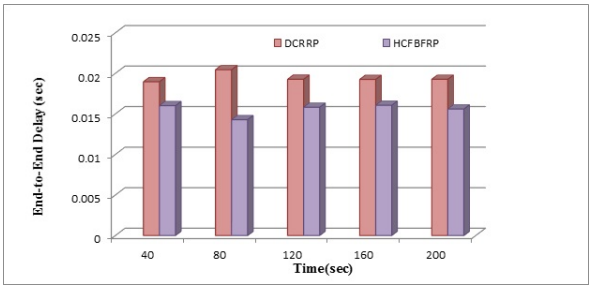


شکل ۶: توپولوژی شبکه با تعداد ۵۰ گره حسگر برای حالت بدون خطا



شکل ۷: توپولوژی شبکه با تعداد ۵۰ گره حسگر برای حالت خطادار

نتایج حاکی از آن است که استفاده از الگوریتم پیشنهادی منجر به کاهش تأخیر انتها به انتها در شبکه‌ای با ۵۰ گره شده است. به‌طوری‌که در حالت بدون خطا، بهبود ۹۹.۱۹ درصدی و در حالت

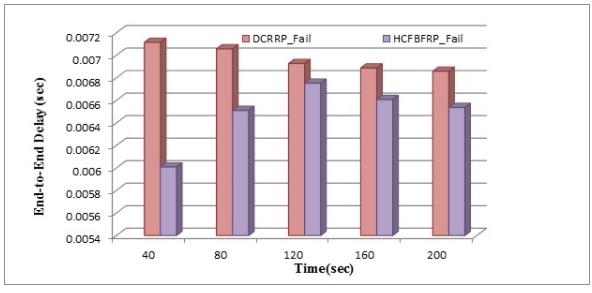


شکل ۸: تأخیر انتها به انتها در حالت بدون خطا

خطادار، بهبود ۹۷.۶ درصدی نسبت به پروتکل DCRRP مشاهده می‌شود. این کاهش در تأخیر به‌واسطه بهبود کارایی در فرآیند خوشه‌بندی و مسیریابی داده‌ها در الگوریتم پیشنهادی است. در پروتکلDCRRP، فرآیند خوشه‌بندی بر اساس انتخاب گره‌های با انرژی بیشتر و فاصله کمتر به سینک متحرک انجام می‌شود، اما تحرک سینک می‌تواند باعث بروز مشکلاتی در ارسال داده‌ها شود. زمانی که سینک به گره جایگزین دورتر منتقل می‌شود، این تغییر می‌تواند منجر به خاموشی زودهنگام گره‌های میانی و از دست رفتن داده‌ها گردد. این امر نه تنها باعث کاهش نرخ گذردهی می‌شود، بلکه تأخیر انتها به انتها را نیز افزایش می‌دهد.

برخلاف پروتکلDCRRP، الگوریتم پیشنهادی با استفاده از منطق فازی برای انتخاب هاCH و مسیریابی داده‌ها، توانسته است تا حد زیادی این مشکلات را برطرف کند. انتخاب هوشمند هاCH به‌وسیله منطق فازی، که به فاکتورهایی همچون انرژی و نزدیکی به سینک توجه می‌کند، به کاهش تأخیر در ارسال داده‌ها کمک کرده است. علاوه بر این، این الگوریتم با مدیریت هوشمند تغییرات توپولوژی و تحرک سینک، قادر است تا در شرایط مختلف، از جمله وجود خطاهای تصادفی و تغییرات محیطی، تأخیر شبکه را به حداقل برساند و کارایی کلی شبکه را افزایش دهد. به‌طور کلی، این ویژگی‌ها موجب می‌شود که الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با پروتکل DCRRP عملکرد بهتری در کاهش تأخیر انتها به انتها داشته باشد.

۲.۵. تاخیر دسترسی به رسانه. این معیار به مدت زمان بین دریافت بسته توسط لایه MAC و بارگیری کامل آن روی رسانه اشاره دارد. شکل‌های (۱۰) و (۱۱) تأخیر دسترسی به رسانه را برای سناریوهای الگوریتم پیشنهادی و پروتکل DCRRP مقایسه می‌کنند. نتایج نشان می‌دهند که در پروتکلDCRRP، تأخیر دسترسی به رسانه در توپولوژی شبکه با ۵۰ گره در حالت بدون خطا ۰۵.۲ درصد کمتر و در حالت خطادار ۷۳.۲۲ درصد بهتر از الگوریتم پیشنهادی است.

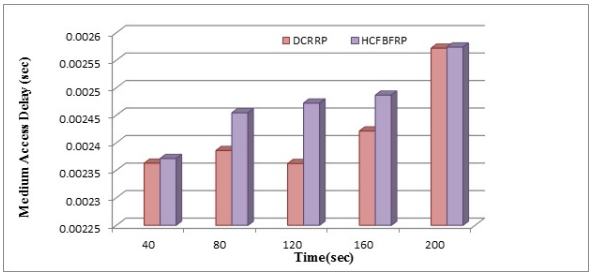


شکل ۹: تأخیر انتها به انتها در حالت خطادار

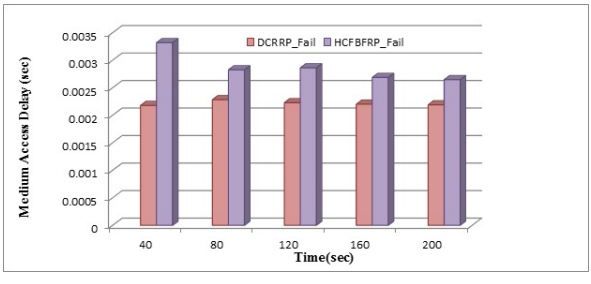
ین تفاوت عمدتاً ناشی از ویژگی‌های لایه MAC در شبکه‌های WSN است که فرآیندهای مدیریت دسترسی به کانال و آدرس‌دهی را کنترل می‌کند. در پروتکلDCRRP، لایه MAC به‌طور مؤثری زمان‌بندی دسترسی هر گره به رسانه را مدیریت کرده و فرآیند ارسال و دریافت داده‌ها را بهینه می‌کند. ویژگی‌های لایه MAC در پروتکل DCRRP به‌ویژه زمانی که سینک به‌طور مداوم در حال حرکت است و نزدیکی آن به هاCH که داده‌ها را جمع‌آوری کرده‌اند، از اهمیت بیشتری برخوردار است. این ویژگی باعث می‌شود که فرآیند جمع‌آوری داده‌ها و انتقال آن‌ها به سینک به‌صورت کارآمدتری انجام شود و در نتیجه تأخیر دسترسی به رسانه کاهش یابد. به‌عبارت دیگر، سینک در پروتکل DCRRP با استفاده از مکانیزم‌های خاص لایه MAC قادر است به‌طور مؤثری مدیریت زمان‌بندی دسترسی به کانال را انجام دهد، که باعث کاهش تأخیر در مقایسه با پروتکل پیشنهادی می‌شود. با این حال، اگرچه پروتکل DCRRP در برخی سناریوها تأخیر دسترسی به رسانه کمتری دارد، پروتکل پیشنهادی با بهره‌گیری از منطق فازی، مزایای دیگری به همراه دارد. این الگوریتم با انتخاب هوشمندانه هاCH و مسیرهای بهینه برای ارسال داده‌ها، تأخیر انتها به انتها را بهبود می‌بخشد و در نتیجه به‌طور کلی عملکرد شبکه را در زمینه مصرف انرژی و پایداری ارتقا می‌دهد. این موضوع به‌ویژه در شرایطی که شبکه با تعداد بالای گره‌ها یا خطاهای تصادفی مواجه می‌شود، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در چنین شرایطی، استفاده از منطق فازی و الگوریتم پیشنهادی می‌تواند به بهینه‌سازی مصرف انرژی و بهبود پایداری شبکه کمک کند، حتی اگر این امر به قیمت افزایش اندکی در تأخیر دسترسی به رسانه تمام شود.

۶. نرخ گذردهی

این معیار به‌عنوان نسبت کل بسته‌های دریافت‌شده توسط گیرنده‌ها به زمان بین دریافت اولین و آخرین بسته تعریف می‌شود. نرخ گذردهی برای سناریوهای مختلف در شکل‌های (۱۲) و (۱۳)

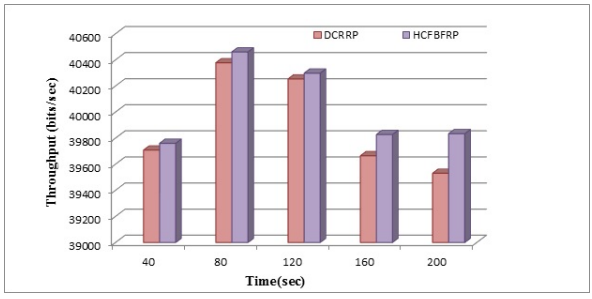


شکل ۱۰: تأخیر دسترسي به رسانه در حالت بدون خطا

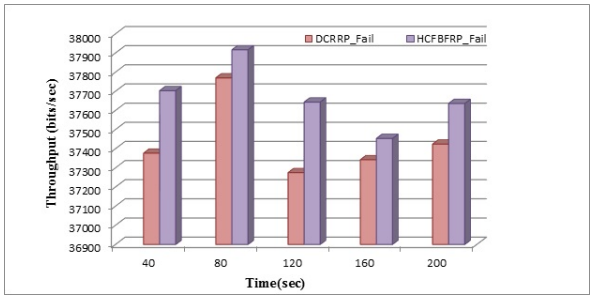


شکل ۱۱: تأخیر دسترسي به رسانه در حالت خطادار

نمایش داده شده است؛ محور افقی زمان شبیه‌سازی و محور عمودی نرخ گذردهی را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پروتکل پیشنهادی به‌طور قابل توجهی نرخ گذردهی را در شبکه‌ای با ۵۰ گره بهبود بخشیده است. در حالت بدون خطا، نرخ گذردهی ۳۲.۰ درصد و در حالت خطادار ۶۲.۰ درصد نسبت به پروتکل DCRRP بهبود یافته است. این بهبود قابل توجه به دلیل استفاده از منطق فازی برای انتخاب بهینه هاCH است که موجب هدایت داده‌ها به‌صورت کارآمدتر و با تأخیر کمتر در شبکه می‌شود. در پروتکلDCRRP، علی‌رغم استفاده از سینک متحرک و تلاش برای انتخاب سرخوشه‌هایی که به سینک نزدیک‌تر هستند، محدودیت‌های زمانی ناشی از تایمرها می‌تواند منجر به انتخاب نادرست هاCH شود. این مشکل به ویژه زمانی خود را نشان می‌دهد که هاCH نتوانند در زمان مناسب داده‌های خود را ارسال کنند و در نتیجه ممکن است پیش از تکمیل فرآیند ارسال، خاموش شوند. این وضعیت نه تنها باعث کاهش نرخ گذردهی می‌شود، بلکه می‌تواند عملکرد شبکه را تحت تأثیر قرار دهد و موجب از دست رفتن داده‌ها شود. برخلاف این محدودیت‌ها، پروتکل پیشنهادی با تکیه بر منطق فازی، انتخاب هاCH را به‌صورت هوشمندانه‌تری انجام می‌دهد. این انتخاب‌ها باعث می‌شود که هاCH هم از نظر انرژی و هم از نظر موقعیت به‌طور بهینه انتخاب



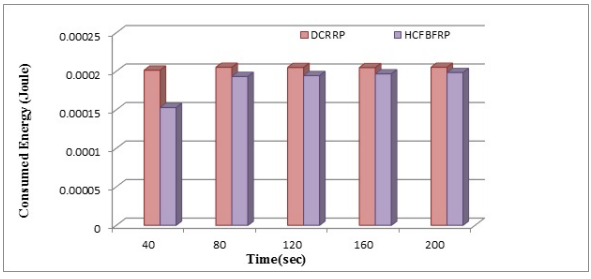
شکل ۱۲: نرخ گذردهي در حالت بدون خطا



شکل ۱۳: نرخ گذردهي در حالت خطادار

شوند. همچنین، پروتکل پیشنهادی با هدایت داده‌ها از طریق مسیرهای بهینه و جلوگیری از خاموشی زودهنگام ،هاCH نرخ گذردهی را در شرایط مختلف بهبود می‌بخشد. این ویژگی به‌ویژه در شرایط خطادار و تحت فشار شبکه، نقش کلیدی در حفظ عملکرد بالای شبکه ایفا می‌کند و به افزایش کارایی و پایداری کلی شبکه کمک می‌کند.

۱.۶. میانگین انرژی مصرفی باتری گره‌های شبکه. این معیار به مجموع انرژی مصرف‌شده توسط گره‌های شبکه برای ارتباطات، شامل انتقال داده و زمان انتظار، اشاره دارد. شکل‌های (۱۴) و (۱۵) مقایسه میانگین انرژی مصرفی باتری را برای سناریوهای الگوریتم پیشنهادی و پروتکل DCRRP در حالت‌های خطادار و بدون خطا نشان می‌دهند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با استفاده از پروتکل پیشنهادی، میانگین انرژی مصرفی باتری در شبکه با ۵۰ گره در حالت بدون خطا به میزان ۴۲.۸ درصد و در حالت خطادار به میزان ۰۰.۷ درصد نسبت به پروتکل DCRRP بهبود یافته است.

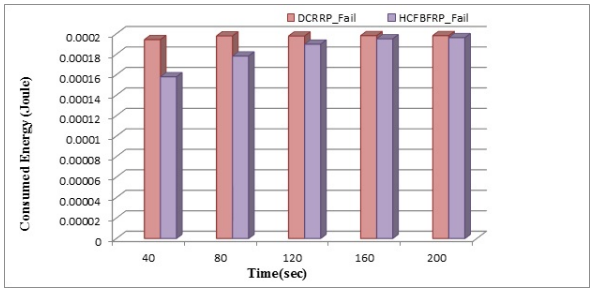


شکل ۱۴: انرژی مصرفی در حالت بدون خطا

با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها، پروتکل پیشنهادی در مقایسه با پروتکل DCRRP به‌طور قابل توجهی عملکرد بهتری از نظر مصرف انرژی ارائه می‌دهد. در پروتکل DCRRP، انتخاب هایCH و نحوه ارسال داده‌ها به سینک به‌طور مستقیم باعث می‌شود که هاCH به‌ویژه در شرایط با حجم بالای داده‌ها و فاصله زیاد از سینک، مجبور به مصرف انرژی بیشتری برای ارسال اطلاعات شوند. این فرآیند نه تنها منجر به کاهش سریع انرژی هاCH و ایجاد مشکلاتی در پایداری شبکه می‌شود، بلکه می‌تواند باعث خاموشی ناگهانی گره‌ها شود که در نهایت بر عملکرد کلی شبکه تأثیر منفی می‌گذارد. در مقایسه، پروتکل پیشنهادی با استفاده از منطق فازی برای خوشه‌بندی، هاییCH را انتخاب می‌کند که بهینه‌تر از نظر مصرف انرژی هستند. این انتخاب‌ها باعث می‌شود که هاCH از لحاظ انرژی در وضعیت بهتری قرار داشته باشند، چرا که آن‌ها علاوه بر داشتن انرژی بیشتر، تعداد همسایگان بیشتری دارند و فاصله کوتاه‌تری با سینک دارند. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که گره‌های عضو نیز بر اساس نزدیکی فیزیکی به هاCH متصل شوند و نیاز به مصرف انرژی زیاد برای ارسال داده به هاCH نباشد. این رویکرد در نهایت منجر به کاهش مصرف انرژی در شبکه و افزایش عمر باتری گره‌ها می‌شود. علاوه بر این، انتخاب هوشمندانه هاCH و گره‌های عضو در پروتکل پیشنهادی موجب جلوگیری از خاموشی سریع گره‌ها می‌شود، که در نتیجه ثبات شبکه افزایش یافته و عمر کلی شبکه طولانی‌تر می‌شود. این ویژگی‌ها به‌ویژه در شبکه‌های WSN که در آن‌ها مصرف انرژی یک چالش اساسی است، بسیار حیاتی است. از این رو، پروتکل پیشنهادی نه تنها عملکرد بهتری از نظر مصرف انرژی دارد، بلکه به بهبود پایداری و کارایی شبکه نیز کمک می‌کند.

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مسئله مصرف انرژی به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی در WSN مورد بررسی قرار گرفت و پروتکل HCFBFRP به‌منظور بهبود کارایی انرژی در این شبکه‌ها پیشنهاد شد.



شکل ۱۵: انرژی مصرفی در حالت خطا دار

پروتکل پیشنهادی از الگوریتم منطق فازی برای انتخاب سرخوشه‌های بهینه بهره می‌برد، که باعث بهبود بهره‌وری انرژی و افزایش پایداری شبکه می‌شود. برای ارزیابی عملکرد پروتکل پیشنهادی، شبیه‌سازی‌هایی با استفاده از نرم‌افزار OPNET انجام شد و نتایج آن با پروتکل DCRRP مقایسه گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که پروتکل HCFBFRP در مقایسه با DCRRP عملکرد بهتری در معیارهای مختلف نظیر مصرف انرژی، تأخیر انتها به انتها، تأخیر دسترسی به رسانه و نرخ گذردهی دارد. به‌طور خاص، پروتکل پیشنهادی توانست تأخیر انتها به انتها را کاهش دهد و نرخ گذردهی را در هر دو حالت خطا و بدون خطا بهبود بخشد. این نتایج نشان‌دهنده انتخاب بهینه گره‌ها به‌عنوان سرخوشه و مسیرهای پایدارتر برای ارسال داده است که موجب افزایش کارایی و کاهش مصرف انرژی شبکه می‌شود.

یکی از نکات برجسته این تحقیق، تأثیر مثبت منطق فازی در انتخاب سرخوشه‌های بهینه است. این روش باعث انتخاب گره‌هایی با انرژی بیشتر، تعداد همسایگان بیشتر و فاصله کمتری نسبت به سینک می‌شود که به‌طور مستقیم در بهبود بهره‌وری انرژی و عملکرد کلی شبکه تأثیرگذار است. در مقایسه با پروتکلDCRRP، که ممکن است به دلیل تحرک سینک و انتخاب نادرست هاCH در برخی موارد انرژی بیشتری مصرف کند، پروتکل HCFBFRP با بهره‌گیری از منطق فازی توانست مصرف انرژی را کاهش داده و پایداری شبکه را افزایش دهد. در نهایت، پروتکل پیشنهادی HCFBFRP علاوه بر بهبود عملکرد انرژی، موفق به افزایش قابلیت اطمینان در تحویل بسته‌ها نیز شد. این ویژگی به‌ویژه در شبکه‌های WSN که معمولاً با چالش‌هایی مانند کاهش انرژی و تحرک گره‌ها مواجه هستند، اهمیت ویژه‌ای دارد. به‌طور کلی، نتایج این تحقیق نشان‌دهنده برتری روش پیشنهادی در بهبود کارایی و پایداری شبکه‌های WSN است و می‌تواند به‌عنوان یک راه‌حل مؤثر برای چالش‌های موجود در این شبکه‌ها در نظر گرفته شود. لازم بذکر است که در روش پیشنهادی، گره‌های حسگر به‌عنوان گره‌های ثابت و بدون تحرک در نظر گرفته شده‌اند. این فرض در شبیه‌سازی‌ها

به‌منظور ساده‌سازی مدل و بررسی عملکرد الگوریتم در شرایط ثابت اعمال شده است. با این حال، در شبکه‌های حسگر بی‌سیم واقعی، تحرک گره‌ها می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر کارایی شبکه بگذارد. تحرک گره‌ها می‌تواند بر پارامترهای مختلفی همچون تأخیر انتها به انتها، نرخ گذردهی، مصرف انرژی و پایداری شبکه تأثیرگذار باشد. زمانی که گره‌ها به‌طور مداوم جابجا می‌شوند، توپولوژی شبکه تغییر کرده و این تغییرات می‌تواند موجب افزایش تأخیر، کاهش نرخ گذردهی و مصرف انرژی بیشتر گردد. به‌علاوه، تغییرات در موقعیت گره‌ها ممکن است منجر به بی‌ثباتی در انتخاب سرخوشه‌ها و مسیرهای مسیریابی شود و کارایی شبکه را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، توجه به تحرک گره‌ها در طراحی و پیاده‌سازی پروتکل‌ها برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم، به‌ویژه در محیط‌های پویا و متغیر، امری ضروری است. به‌عنوان یک گام آینده، الگوریتم پیشنهادی می‌تواند به‌گونه‌ای توسعه یابد که قابلیت مدیریت تحرک گره‌ها را نیز داشته باشد و به‌طور هوشمندانه‌ای به تغییرات توپولوژی شبکه واکنش نشان دهد. این کار می‌تواند به بهبود بیشتر عملکرد شبکه در شرایط مختلف تحرک، از جمله بهینه‌سازی مصرف انرژی، کاهش تأخیر و افزایش نرخ گذردهی در محیط‌های پویا کمک کند.

مراجع

[1] Arjunan, S., & Pothula, S. (2019). A survey on unequal clustering protocols in wireless sensor networks. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 31(3), 304-317.

[2] Mirjalili, S. (2015). Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm. Knowledge-based systems, 89, 228-249.

[3] Shokouhifar, M., & Hassanzadeh, A. (2014). An energy efficient routing protocol in wireless sensor networks using genetic algorithm. Advances in Environmental Biology, 8(21), 86-93.

[4] Xiuwu, Y., Qin, L., Yong, L., Mufang, H., Ke, Z., & Renrong, X. (2019). Uneven clustering routing algorithm based on glowworm swarm optimization. Ad Hoc Networks, 93, 101923.

[5] Rawat, P., & Chauhan, S. (2018, April). Energy efficient clustering in heterogeneous environment. In 2018 Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT) (pp. 388-392). IEEE.

[6] Massad, Y. E., Goyeneche, M., Astrain, J. J., & Villadangos, J. (2008, April). Data aggregation in wireless sensor networks. In 2008 3rd International Conference on Information and Communication Technologies: From Theory to Applications (pp. 1-6). IEEE.

[7] Mansour, R. F., Alsuhibany, S. A., Abdel-Khalek, S., Alharbi, R., Vaiyapuri, T., Obaid, A. J., & Gupta, D. (2022). Energy aware fault tolerant clustering with routing protocol for improved survivability in wireless sensor networks. Computer Networks, 212, 109049.

[8] Yadav, R. K., & Mahapatra, R. P. (2021). Energy aware optimized clustering for hierarchical routing in wireless sensor network. Computer Science Review, 41, 100417.

[9] Arafath, M. S., Khan, K. U. R., & Sunitha, K. V. N. (2017, December). Pithy review on routing protocols in wireless sensor networks and least routing time opportunistic technique in WSN. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 933, No. 1, p. 012016). IOP Publishing.

[10] Gorgich, S., & Tabatabaei, S. (2021). Proposing an energy-aware routing protocol by using fish swarm optimization algorithm in WSN (wireless sensor networks). Wireless Personal Communications, 119(3), 1935-1955.

[11] Tabatabaei, S., & Rigi, A. M. (2019). Reliable routing algorithm based on clustering and mobile sink in wireless sensor networks. Wireless Personal Communications, 108(4), 2541-2558.

[12] Yu, J., Qi, Y., Wang, G., & Gu, X. (2012). A cluster-based routing protocol for wireless sensor networks with nonuniform node distribution. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 66(1), 54-61.

[13] Sabet, M., & Naji, H. R. (2015). A decentralized energy efficient hierarchical cluster-based routing algorithm for wireless sensor networks. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 69(5), 790-799.

[14] Xiao, G., Sun, N., Lv, L., Ma, J., & Chen, Y. (2015). An HEED-based study of cell-clustered algorithm in wireless sensor network for energy efficiency. Wireless Personal Communications, 81, 373-386.

[15] Shokouhifar, M., & Jalali, A. (2015). A new evolutionary based application specific routing protocol for clustered wireless sensor networks. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 69(1), 432-441.

[16] Chanak, P., Banerjee, I., & Sherratt, R. S. (2017). Energy-aware distributed routing algorithm to tolerate network failure in wireless sensor networks. Ad Hoc Networks, 56, 158-172.

[17] Myoupo, J. F., Nana, B. P., & Tchendji, V. K. (2018). Fault-tolerant and energy-efficient routing protocols for a virtual three-dimensional wireless sensor network. Computers & Electrical Engineering, 72, 949-964.

[18] Tabatabaei, S., Rajaei, A., & Rigi, A. M. (2019). A novel energy-aware clustering method via Lion Pride Optimizer Algorithm (LPO) and fuzzy logic in wireless sensor networks (WSNs). Wireless Personal Communications, 108, 1803-1825.

[19] Chen, D. R., Chen, L. C., Chen, M. Y., & Hsu, M. Y. (2019). A coverage-aware and energy-efficient protocol for the distributed wireless sensor networks. Computer Communications, 137, 15-31.

[20] Allahverdi Mamaghani, A., Ebrahimi Dishabi, M. R., Tabatabaei, S., & Abdollahi Azgomi, M. (2021). A novel clustering protocol based on willow butterfly algorithm for diffusing data in wireless sensor networks. Wireless Personal Communications, 121(4), 3425-3450.

[21] Le-Ngoc, K. K., Tho, Q. T., Bui, T. H., Rahmani, A. M., & Hosseinzadeh, M. (2022). Optimized fuzzy clustering in wireless sensor networks using improved squirrel search algorithm. Fuzzy Sets and Systems, 438, 121-147.

[22] Prasad, V., & Roopashree, H. R. (2024). Energy aware and secure routing for hierarchical cluster through trust evaluation. Measurement: Sensors, 33, 101132.

[23] Sharma, R., Vashisht, V., & Singh, U. (2022). Fuzzy modelling based energy aware clustering in wireless sensor networks using modified invasive weed optimization. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 34(5), 1884-1894.

[24] Jiao, W., Tang, R., & Zhou, W. (2024). Delay-sensitive energy-efficient routing scheme for the Wireless Sensor Network with path-constrained mobile sink. Ad Hoc Networks, 158, 103479.

[25] Kaviarasan, S., & Srinivasan, R. (2024). Developing a novel energy efficient routing protocol in WSN using adaptive remora optimization algorithm. Expert Systems with Applications, 244, 122873.

[26] Phalaagae, P., Zungeru, A. M., Sigweni, B., Rajalakshmi, S., Batte, H., & Eyobu, O. S. (2024). An Energy Efficient Authentication Scheme for Cluster-based Wireless IoT Sensor Networks. Scientific African, e02287.

[27] Sahayaraj, J. M., Gunasekaran, K., Verma, S. K., & Dhurgadevi, M. (2024). Energy Efficient Clustering and Sink Mobility Protocol using Improved Dingo and Boosted Beluga Whale Optimization Algorithm for Extending Network Lifetime in WSNs. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 101008.