

ترکیب الگوریتم‌های جهش قورباغه‌یی و کرم شب‌تاب در توسعه الگوریتم مسیریابی چندگامی شبکه‌های حسگر بی‌سیم

امیرحسین برزین (دکتری)

پردیس آزادی، دانشگاه یزد

احمد صادقیه* (استاد)

حسن خادمی زارع (استاد)

محبوبه هنرور (استادیار)

گروه مهندسی صنایع، پردیس فنی و مهندسی، دانشگاه یزد

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، زمستان ۱۳۹۹
دوری ۱-۳۶، شماره ۲/۱، ص. ۳۳-۵۱

محدودیت توان و انرژی در گره‌های حسگر ساختار شبکه‌های حسگر بی‌سیم، طراحی پروتکل مسیریابی کارا - انرژی را برای انجام مؤثر وظایف ارتباطی و پردازشی در دامنه‌ی هدف و بهبود طول عمر، با اهمیت می‌کند. خوشه‌بندی روشی پذیرفته شده برای کارایی انرژی در این شبکه‌هاست. بیشینه‌سازی طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم مسئله‌ی NP-hard است. لذا به کمک فراابتکاری‌ها تحقیقات گسترده‌یی برای حل آن انجام شده است. در این نوشتار، الگوریتم مسیریابی چندگامی مبتنی بر خوشه‌بندی از ترکیب الگوریتم جهش قورباغه‌یی و الگوریتم کرم شب‌تاب به نام MOFSA پیشنهاد می‌شود. در این رویکرد ابتدا برای یافتن سرخوشه‌ها در فاز خوشه‌بندی و سپس برای یافتن گره‌های باز فرستنده در فاز مسیریابی چندگامی، دو تابع برازندگی چندهدفه ارائه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی و مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم با پروتکل‌های مسیریابی موجود افزایش شاخص‌های طول عمر شبکه را تا ۲۳٪ نسبت به LEACH، ۱۰۰٪ درصد نسبت به EAR، ۳۸٪ درصد نسبت به SIF و ۲۶٪ درصد نسبت به FSFLA در سناریوهای پیشنهادی نشان داد.

واژگان کلیدی: شبکه‌های حسگر بی‌سیم، خوشه‌بندی، مسیریابی چندگامی، الگوریتم جهش قورباغه‌یی، الگوریتم کرم شب‌تاب.

barzin@stu.yazd.ac.ir
sadegheih@yazd.ac.ir
hkhademiz@yazd.ac.ir
mhonarvar@yazd.ac.ir

۱. مقدمه

و شبکه است و وظیفه‌ی جمع‌آوری اطلاعات از گره‌ها را برعهده دارد. هر حسگر شامل واحد دریافت‌کننده، واحد پردازنده و واحد انتقال است. پردازنده‌ی داخلی حسگرها به صورت محلی داده‌های دریافتی را محاسبه کرده و برخی اطلاعات پس از یک مرحله‌ی پیش‌پردازش به چاهک انتقال می‌یابد.^[۱] ویژگی‌هایی نظیر سرعت، خودآگاهی^۳ و خودتنظیمی^۴ در حسگرها، زمینه‌ی کاربردهای فراوان شبکه‌های حسگر بی‌سیم را در زمینه‌های مختلف فراهم ساخته است. لذا بسیاری از تکنیک‌ها توسط محققین برای توسعه‌ی عملکرد آنها با توجه به نوع کاربرد ارائه می‌شود.^[۱] برای نمونه در برخی کاربردهای نظامی، از ویژگی سرعت انجام عملیات، میزان تحمل پذیری خطا،^۵ استقلال و کنترل، محاسبه و انتقال اطلاعات در شبکه‌های حسگر بی‌سیم برای شناسایی و ردیابی اهداف و موقعیت دشمن استفاده شده است.^[۲] همچنین کاربردهای زیادی از شبکه‌های حسگر بی‌سیم در سامانه‌های نظارت پزشکی و بهداشتی گزارش شده است.^[۳] استفاده از شبکه‌های حسگر بی‌سیم در کشاورزی

پیشرفت‌های اخیر در توسعه‌ی سامانه‌های میکرو الکترومکانیکی^۱ همگام با توسعه‌ی فناوری‌های نوین ارتباطات بی‌سیم، شبکه‌های حسگر بی‌سیم (WSN) را به طرز گسترده‌یی مورد توجه محققین قرار داده و به عنوان یکی از فناوری‌های کلیدی قرن حاضر معرفی کرده است.^[۱] این دسته از شبکه‌های بی‌سیم فاقد زیرساخت ارتباطی بوده، از تعدادی گره‌ی حسگر کم‌هزینه، با توان مصرفی پایین تشکیل شده‌اند که به طور تصادفی در ناحیه‌ی هدف در فضایی دور از دسترس انسان پراکنده می‌شوند.^[۱] با توجه به نوع حسگر نصب شده در گره، رخدادهایی نظیر دما، فشار و رطوبت توسط واحد حسگر به صورت سیگنال‌های الکتریکی حس می‌شود و از طریق واسطه رادیویی به چاهک^۲ (ایستگاه مبدا) ارسال می‌شود.^[۱] چاهک، واسطه بین کاربر

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۱۸/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۸/۸/۲۴، پذیرش ۱۳۹۸/۱۲/۱۰.

DOI:10.24200/J65.2020.52690.1960

نیز مؤثر بوده است. محققین معتقدند با استفاده از شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌توان فرایند اندازه‌گیری پارامترهای مختلف محیطی مؤثر در کشاورزی را تسهیل کرده و آن را بهبود بخشید. شبکه‌ی بی‌سیم از حسگرهای بی‌سیم را می‌توان به طور گسترده در مزرعه توزیع کرد و سپس اطلاعات لازم را از طریق آنها دریافت کرد.^[۴] ردیابی اشیاء متحرک از دیگر کاربردهای قابل توجه شبکه‌های حسگر بی‌سیم است. در این ایده گره‌های حسگر به صورت پویا به وظیفه‌ی ردیابی شیء خاصی اختصاص می‌یابند. سپس، شبکه‌ی حسگر با استفاده از تکنیک‌های ردیابی شیء متحرک، موقعیت آن را از نظر مختصات دکارتی به طور مداوم به‌گروه چاهک گزارش می‌کند.^[۵] بهینه‌سازی شبکه‌های حسگر بی‌سیم با چالش‌های زیادی از قبیل محدودیت انرژی، مسیریابی، امنیت، قابلیت اطمینان در ارتباطات و غیره مواجه است. زیرا اغلب ابعاد بهینه‌سازی در آنها با هم در تضادند و ایجاد تعادل بین این جنبه‌ها دشوار است.^[۶]

۱.۱. بیان اهمیت موضوع

امروزه زندگی بدون ارتباطات بی‌سیم قابل تصور نیست. پیشرفت در ساخت مدارهای کوچک باعث توسعه‌ی ریزحسگرها^۶ شده است. این ریزحسگرها برای انجام حسگرهای فراوان در کارهایی مانند تشخیص صدا برای حس کردن زلزله، جمع‌آوری اطلاعات در مناطق دور افتاده و مکان‌هایی که برای اکتشافات انسانی مناسب نیستند، را دارند. بر اساس گزارش اخیر محققین دانشگاه MIT شبکه‌های حسگر بی‌سیم در زمهره‌ی ۱۰ فناوری برتر و مورد توجه محققین در قرن حاضر خواهد بود. زیرا تأثیر شگرفی در شبکه‌های اطلاعاتی نسل بعدی^۷ مدل‌های کسب و کار آینده و ایجاد فضاهای کاری مجازی و زندگی هوشمند^۸ اینترنت اشیاء^۹، توسعه‌ی خودکارسازی فرایندها^{۱۰} و کاستن از دخالت عوامل انسانی خواهند داشت. از سویی، انجام وظایف ارتباطی و پردازشی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم همواره با افزایش مصرف انرژی همراه بوده و محدودیت انرژی را به مسئله‌ی کلیدی که کارایی این شبکه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد، تبدیل می‌کند. با وجود روش‌های متعددی که برای بهبود انرژی مصرفی در این شبکه‌ها پیشنهاد شده است، کماکان روشی کارا که برای بیشتر کاربردها مؤثر باشد، ارائه نشده است. بنابراین مدیریت انرژی محدود شبکه‌های حسگر برای بهینه‌سازی طول عمر شبکه به عمده‌ترین چالش طراحی پروتکل‌های مسیریابی تبدیل شده است.^[۶]

خوشه‌بندی^{۱۱} از محبوب‌ترین و رایج‌ترین روش‌های انرژی کارآمد^{۱۲} و مقیاس‌پذیر^{۱۳} برای بهبود مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم است.^[۷] در این طرح، حسگرها به گروه‌های بدون هم‌پوشانی موسوم به خوشه تقسیم می‌شوند که هریک دارای یک سرخوشه^{۱۴} است. حسگرهای هر خوشه ابتدا به‌طور دوره‌ی یا بعد از وقوع رویدادی خاص، اطلاعات جمع‌آوری شده را به سرخوشه‌ی مربوطه می‌فرستند. سپس هر سرخوشه اطلاعات دریافت شده را به‌طور مستقیم^{۱۵} یا طی چندگام^{۱۶} این اطلاعات را به چاهک ارسال می‌کند.^[۷] از مزایای شبکه‌های خوشه‌بندی شده می‌توان به مواردی نظیر: سهولت مدیریت شبکه، کاهش ترافیک، بهبود مصرف پهنای باند و کاهش سربار ارتباطی اشاره کرد. علاوه بر خوشه‌بندی طرح مسیریابی ارسال اطلاعات از گره‌های حسگر به سمت چاهک به صورت مستقیم یا در خلال چندگام نیز چالش برانگیز است. عموماً پروتکل‌های مسیریابی دو مرحله دارند. ۱. راه‌اندازی؛ ۲. پایداری.^[۷] در مرحله‌ی راه‌اندازی، خوشه‌بندی با تعیین سرخوشه‌ها تعیین می‌شود و هر گره حسگر به نزدیک‌ترین سرخوشه ملحق می‌شود. در مرحله‌ی پایداری سرخوشه‌ها اطلاعات جمع‌آوری شده‌ی خود و سایر حسگرهای عضو خوشه

را به‌طور مستقیم (در طرح تک‌گامی) یا از طریق سایر سرخوشه‌های فرستنده^{۱۷} (در طرح چندگامی)، به چاهک ارسال می‌کنند.^[۷] برخی از پارامترهای مؤثر در فرایند مسیریابی عبارت‌اند از: محدود بودن انرژی گره‌های حسگر، نقش هر حسگر در شبکه (سرخوشه، گره معمولی، گره فرستنده)، روش ادغام اطلاعات^{۱۸} در سرخوشه‌ها، روش انتخاب سرخوشه‌ها و شیوه تشکیل درخت‌واره مسیریابی به‌نحوی که در آن چاهک به‌عنوان ریشه درخت‌واره در نظر گرفته شود. در طرح مسیریابی چندگامی، مسئله‌ی اصلی یافتن مناسب‌ترین سطح دسترسی از هر سرخوشه به چاهک است.^[۷] الگوریتم‌های الهام از طبیعت مبتنی بر هوش ازدحامی^{۱۹} از روش‌های محبوب در شاخه محاسبات نرم^{۲۰} و فراابتکاری‌ها^{۲۱} هستند. این الگوریتم‌ها به شکل گسترده‌یی در حل مسائل بهینه‌سازی به کار می‌روند. خوشه‌بندی و مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم نیز در زمره مسائل بهینه‌سازی هستند. لذا پژوهش‌گران برای حل آنها مخصوصاً برای یافتن سرخوشه‌ها از آنها استفاده می‌کنند.^[۸] هدف از انتخاب بهینه‌ی سرخوشه‌ها متعادل ساختن مصرف انرژی در مسیریابی متمرکز شبکه‌های حسگر بی‌سیم است. زیرا با توجه به پیچیدگی زمانی اجرای الگوریتم، محاسبات آن در چاهک که معمولاً محدودیت منابع انرژی و محاسباتی کم‌تری دارد، صورت می‌پذیرد و نتایج حاصل از طریق سرخوشه‌ها و گره‌های باز فرستنده (در مسیریابی چندگامی) به حسگرها ارسال می‌شود.^[۸] اگرچه غالباً روش‌های مسیریابی مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری نسبت به روش‌های کلاسیک نتایج بهتری در پی دارند، لیکن نواقصی نیز بر آنها وارد است که در ادامه به برخی اشاره می‌شود. اولاً بیشتر این پروتکل‌های مسیریابی برای طرح تک‌گامی پیشنهاد شده‌اند که برای شبکه‌های در مقیاس بزرگ مفید نیستند. ثانیاً پیچیدگی زمانی الگوریتم مسیریابی به دلیل لزوم اجرای بخش تکاملی در هر گردش الگوریتم مسیریابی نسبت به روش‌های کلاسیک افزایش می‌یابد. در این شرایط روش‌هایی برای بهبود سرعت الگوریتم به کار می‌رود که خود باعث پیچیدگی بیشتر الگوریتم می‌شود. ثالثاً ناکافی بودن معیارهای ارزیابی انتخاب شده برای تشکیل تابع برازندگی^{۲۲} (انرژی، فاصله‌ی سرخوشه‌ها از چاهک، فواصل درون‌خوشه‌ی و برون‌خوشه‌ی) که برخی هم ملاک انتخاب سرخوشه‌ها در مرحله‌ی خوشه‌بندی بوده و هم معیار انتخاب گره‌های باز فرستنده در مسیریابی چندگامی هستند. رابعاً در نظر داشتن این موضوع که با وجود سودمندی این روش‌ها در بسیاری موارد، در برخی کاربردها با مشکلات اساسی مواجه‌اند. به موارد فوق باید عدم وجود راهبردی مشخص برای تنظیم دقیق پارامترهای متعدد کنترل‌کننده این الگوریتم‌ها را نیز اضافه کرد.^[۸،۷] بنابراین، انگیزه‌ی انجام این پژوهش پیشنهاد یک الگوریتم مسیریابی ترکیبی چندگامی الهام از طبیعت برای غلبه بر نارسایی‌های فوق است.

۲.۱. جنبه‌های نوآوری تحقیق

در این نوشتار، یک الگوریتم چندهدفه مبتنی بر هوش ازدحامی بر اساس ترکیب الگوریتم‌های جهش قورباغه‌ی و کرم شب‌تاب به نام MOFSA، به عنوان الگوریتم مسیریابی چندگامی مبتنی بر خوشه‌بندی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم بر مبنای کاربرد^{۲۳} پیشنهاد می‌شود. هدف الگوریتم مسیریابی کمیته‌سازی مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم بر اساس نوع کاربرد این شبکه‌هاست. جنبه‌های نوآوری پژوهش عبارت است از:

- توسعه‌ی الگوریتم فراابتکاری ترکیبی چندهدفه (MOFSA) و به‌کارگیری آن در خوشه‌بندی و مسیریابی شبکه‌های حسگر بی‌سیم با هدف بهبود مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه؛

سیس سایرگره‌ها را به عنوان اعضای خوشه سازمان دهی می‌کند. انتساب گره به هر خوشه بر اساس فاصله از هر سرخوشه است. اطلاعات گره‌های معمولی در هر خوشه به گره سرخوشه انتقال می‌یابد.^[۱۰]

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p \times (r \bmod 1/p)}{1-p \times (r \bmod 1/p)} & \text{if } n \in G \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

در رابطه‌ی ۱، نماد p معرف درصد مورد نیاز از سرخوشه‌ها نسبت به کل گره‌های شبکه (به عنوان مثال ۱۰ درصد)، r نشانگر دور فعلی اجرا و G مجموعه‌ی از گره‌هاست که در $1/p$ دورهای اخیر به عنوان سرخوشه انتخاب نشده‌اند.^[۱۰] این الگوریتم برای جلوگیری از تخلیه‌ی زود هنگام انرژی سرخوشه‌ها، بارکاری گره‌های سرخوشه را میان همه‌ی گره‌های حسگر تقسیم می‌کند. این روش برای ایجاد تعادل بار در شبکه مفید است. بدین جهت، این الگوریتم در زمان ارائه به شکل چشم‌گیری عملکرد شبکه‌های حسگر را به لحاظ مصرف انرژی بهبود بخشید. با این حال، اشکال اصلی این جاست که در این الگوریتم به دلیل عدم توجه به انرژی باقی‌مانده‌ی^{۲۹} گره‌ها، اگر از ابتدا یک گره با مانده انرژی بسیار کم به عنوان گره سرخوشه انتخاب شود، به طور طبیعی به سرعت انرژی خود را تخلیه کرده، از بین می‌رود. این موضوع می‌تواند به افول کامل شبکه‌ی حسگر منجر شود. علاوه بر این، سرخوشه‌ها داده‌های خود را مستقیماً و به روش ارتباطات تک‌گامی به چاهک انتقال می‌دهند، که علاوه بر غیر واقع بینانه بودن، باعث مرگ سریع آنها مخصوصاً در شبکه‌های حسگر با اندازه بزرگ می‌شود. LEACH-EP^[۱۱] نسخه‌ی انرژی آگاه و متمرکز LEACH است. در LEACH-EP، گره با انرژی باقی‌مانده‌ی بالاتر، فرصتی برای تبدیل شدن به گره سرخوشه دارد. عملکرد این دو پروتکل به یکدیگر شبیه است. تنها تفاوت در تعیین آستانه‌ی مجاز برای سرخوشه شدن است که با استفاده از انرژی باقی‌مانده‌ی گره‌ها در دور کنونی و متوسط انرژی باقی‌مانده از تمام سرخوشه‌های دور قبل تعیین می‌شود. آستانه‌ی انرژی آگاهی برای گره n ، $T_{EP}(n)$ ، توسط معادله‌ی ۲ محاسبه می‌شود که در آن، p درصد مورد نظر از گره‌های سرخوشه، $E(n)$ سطح انرژی گره n و E_{ch-av} میانگین سطح انرژی سرخوشه‌های انتخاب شده در دور قبل است. این پروتکل نیز تک‌گامی است و شبکه‌های حسگر بی‌سیم در مقیاس بزرگ را پشتیبانی نمی‌کند.

$$T_{EP}(n) = \begin{cases} p \times \frac{E(n)}{E_{ch-av}} & \text{if } E(n) \geq 0.5 \times E_{ch-av} \\ 0 & \text{if } E(n) \leq 0.5 \times E_{ch-av} \end{cases} \quad (2)$$

الگوریتم مسیریابی انرژی آگاه (ERA)^[۱۲] شامل دو مرحله است: خوشه‌بندی و مسیریابی. در مرحله‌ی خوشه‌بندی، هر گره قبل از رقابت برای تبدیل شدن به سرخوشه، یک تایمر مستقل دارد. این تایمر حداکثر زمان تعیین شده برای انتخاب سرخوشه‌ها را نشان می‌دهد. هرچه سطح انرژی گره بالاتر باشد، دوره زمانی برای اخذ مجوز سرخوشه شدن گره کوتاه‌تر می‌شود. اگر تایمر منقضی شود و هیچ پیامی از سایر سرخوشه‌ها دریافت نشود، گره فعلی با انتشار یک پیام اعلان^{۳۰} در دامنه‌ی خاص به عنوان سرخوشه معرفی می‌شود. از سوی دیگر، اگر یک گره قبل از انقضای تایمر پیامی از یک سرخوشه دریافت کند، تبدیل به یک گره غیر سرخوشه می‌شود. تایمر گره n بر اساس معادله‌ی ۳ به دست آمده است؛ به طوری که TCH حداکثر زمان برای انتخاب سرخوشه است. علاوه بر این، $E_r(n)$ و $E_m(n)$ به ترتیب معرف انرژی اولیه و انرژی فعلی گره n هستند.

$$Timer(n) = \frac{E_m(n) - E_r(n)}{E_m(n)} \times TCH \quad (3)$$

- معرفی تابع برازندگی سازش‌پذیر چندهدفه‌ی کاربردی که پارامترهای آن را می‌توان با توجه به نوع کاربرد تنظیم کرد؛
- انتخاب معیارهای اساسی از جمله انرژی باقی‌مانده‌ی گره‌ها، فواصل درون خوشه‌ی و برون خوشه‌ی و تعادل بار برای انتخاب سرخوشه‌ها؛
- معرفی روشی جدید برای انتخاب گره‌های بازفرستنده^{۲۴} بر اساس معیارهای اساسی و ارائه‌ی الگوریتم مسیریابی چندگامی کارا برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم با مقیاس بزرگ؛
- اجرای الگوریتم پیشنهادی در سناریوهای مختلف و ارزیابی عملکرد این پروتکل مسیریابی در مقایسه با پروتکل‌های مسیریابی موجود.

در ادامه‌ی این نوشتار، تحقیقاتی مشابه شامل روش‌های کلاسیک، روش‌های فازی و روش‌های فراابتکاری در بخش ۲ ارائه شده است. مدل‌سازی سیستم، در بخش ۳ بیان شده و مرور کلی بر الگوریتم‌های پایه و شرح تغییرات هریک برای ادغام در بخش ۴ معرفی می‌شود. محاسبه‌ی تابع برازندگی، نحوه‌ی کدگذاری و الگوریتم خوشه‌بندی و مسیریابی ترکیبی پیشنهادی در بخش ۵ تبیین شده است. شبیه‌سازی و نتایج در بخش ۶ ارائه می‌شود.

۲. تحقیقاتی مشابه

اخیراً پژوهش‌های گسترده‌ی در زمینه‌ی الگوریتم‌های خوشه‌بندی و مسیریابی برای بهبود کارایی انرژی و افزایش طول عمر در شبکه‌های حسگر بی‌سیم پیشنهاد شده است. بررسی ادبیات این روش‌ها روشن می‌سازد که خوشه‌بندی شبکه‌های حسگر بی‌سیم یک مسئله NP-hard است.^[۸] بر این اساس، روش‌های یافتن راه حل برای این مسائل را می‌توان به تکنیک‌های کامل،^{۲۵} ابتکاری^{۲۶} و جست‌وجوی تصادفی^{۲۷} طبقه‌بندی کرد.^[۸] در روش‌های کامل، تمام راه حل‌های ممکن تولید و ارزیابی شده، سپس بهترین راه حل انتخاب می‌شود. اگر چه روش‌های کامل (دقیق) به بهترین راه حل دست می‌یابند، لیکن این راه حل‌ها را نمی‌توان با پیچیدگی زمانی چندجمله‌ی^{۲۸} یافت. این واقعیت برای مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با ماهیت NP-hard نیز صادق است. بر این اساس، محققین با استفاده از روش‌های جست‌وجوی ابتکاری و تصادفی به این مشکل می‌پردازند. به طور کلی، رویکردهای کلاسیک و فازی متعلق به دسته جست‌وجوی اکتشافی هستند، در حالی که الگوریتم‌های فراابتکاری الهام از طبیعت در زمره روش‌های جست‌وجوی تصادفی قرار می‌گیرند. از لحاظ پیچیدگی زمانی، تکنیک‌های مبتنی بر فازی و کلاسیک در زمان کم‌تری انجام می‌شوند، با این حال، روش‌های فراابتکاری می‌توانند عملکرد بهتری به دست دهند، زیرا به طور مؤثرتری کل فضای جواب را جست‌وجو می‌کنند.^[۸] این روش‌ها را همچنین می‌توان بر اساس نحوه‌ی انتخاب سرخوشه‌ها در هر دور اجرای الگوریتم خوشه‌بندی و نیز ثابت یا متحرک فرض کردن چاهک نیز دسته‌بندی کرد.^[۹] در این بخش، رویکردهای طراحی پروتکل‌های مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی در ادبیات، در سه دسته روش‌های کلاسیک، مبتنی بر فازی و مبتنی بر فراابتکاری‌ها بررسی می‌شوند.

۱.۲. رویکردهای کلاسیک

الگوریتم LEACH یکی از مشهورترین روش‌های خوشه‌بندی توزیع شده است.^[۱۰] این الگوریتم به طور تصادفی و با احتمال داده شده در معادله‌ی ۱، تعداد از پیش تعیین شده‌ی گره سرخوشه را در هر دوره از اجرای پروتکل مسیریابی انتخاب می‌کند.

در مرحله‌ی مسیریابی، ERA یک درخت ارتباطی چند منظوره است که با در نظر گرفتن چاهک در ریشه (سطح صفر) ساخته شده و پیامی را در محدوده‌ی شعاعی خاص منتشر می‌کند. سرخوشه‌های دریافت‌کننده‌ی این پیام به‌عنوان سرخوشه‌های سطح اول در نظر گرفته شده و به‌طور مستقیم با چاهک مرتبط اند. این سرخوشه‌ها نیز پیام اعلان خود را در محدوده‌ی مشابه ارسال می‌کنند. گیرندگان این پیام که در سطح یکسان نیستند، به‌عنوان سرخوشه‌های سطح بعدی در نظر گرفته می‌شوند. این روش ادامه می‌یابد تا همه‌ی مسیرها شکل گیرد. هر سرخوشه از سطح بالاتر ممکن است چندین گره باز فرستنده در سطوح پایین‌تر داشته باشد. در ابتدا، مجموعه‌ی گره‌های فرستنده برای هر سرخوشه انتخاب می‌شود، اگر انرژی باقی‌مانده‌ی هر یک از آنها نسبت به انرژی باقی‌مانده‌ی گره‌های نامزدهای ارسال مجدد بیشتر باشد، آنگاه، هر گره سرخوشه‌ی همه‌ی بسته‌های داده ورودی، از جمله داده‌های خود را، با نسبت‌های: $E_r(f_1) : E_r(f_2) : E_r(f_m)$ بین فرستنده‌های سطح بعد توزیع می‌کند. به‌طوری‌که f_i ، f_i نامین باز فرستنده‌ی انتخاب شده برای ارسال اطلاعات به گره u است.

۲.۲. رویکردهای مبتنی بر فازی

با توجه به عدم قطعیت موجود پیرامون شبکه‌های حسگر بی‌سیم و هم‌پوشانی پارامترهای تأثیرگذار بر نقش سرخوشه‌ها، در طراحی برخی از پروتکل‌های مسیریابی از منطق فازی استفاده می‌شود. با استفاده از متغیرهای فازی، عدم قطعیت ذاتی این شبکه‌ها را می‌توان بررسی کرد. علاوه بر این، استفاده از منطق فازی به جای فرمول‌های کلاسیک در انتخاب سرخوشه‌ها، انعطاف‌پذیری بیشتری دارد. برخی از این رویکردها در ادامه تشریح شده‌اند.

-- الگوریتم LEACH-FL^[۱۳]، نسخه‌ی فازی الگوریتم LEACH است که در آن از سیستم استنتاج فازی مددانی^{۳۱} برای انتخاب سرخوشه‌های مناسب استفاده می‌شود. در طراحی این سیستم استنتاج فازی، سه متغیر فازی به‌عنوان ورودی در نظر گرفته شده است: سطح انرژی، تراکم و فاصله از چاهک. در هر دور، گره‌ها از بالاترین خروجی فازی تا پایین‌ترین مرتب و سپس برخی از گره‌های دارای بیشینه‌ی خروجی به‌عنوان سرخوشه انتخاب می‌شود. تمام محاسبات برای انتخاب فازی سرخوشه‌ها در پردازنده‌ی متمرکز واقع در چاهک انجام می‌شود. CHEF یک پروتکل خوشه‌بندی فازی است که برای انتخاب سرخوشه‌ها از ساختاری کاملاً توزیع شده استفاده می‌کند.^[۱۴] در هر دور، هر گره به‌طور تصادفی یک عدد را در محدوده‌ی $[0, 1]$ تولید می‌کند. اگر این عدد کم‌تر از مقدار آستانه‌ی از پیش تعیین شده باشد، احتمال دارد که آن گره با استفاده از سیستم استنتاج فازی به گره سرخوشه تبدیل شود. در این سیستم فازی دو متغیر به‌عنوان ورودی استفاده می‌شود: سطح انرژی و فاصله‌ی محلی. هنگامی که یک گره به‌عنوان نامزد سرخوشه انتخاب می‌شود، پیام اعلان خود را که حاوی احتمال سرخوشه شدن خود است منتشر کرده، منتظر دریافت پاسخ از همسایگان می‌ماند. اگر این احتمال بالاتر از عدد احتمال همه‌ی همسایگان باشد، آن‌گاه به سرخوشه تبدیل می‌شود و به همه‌ی گره‌های مجاور اطلاع می‌دهد که در دور کنونی سرخوشه است.

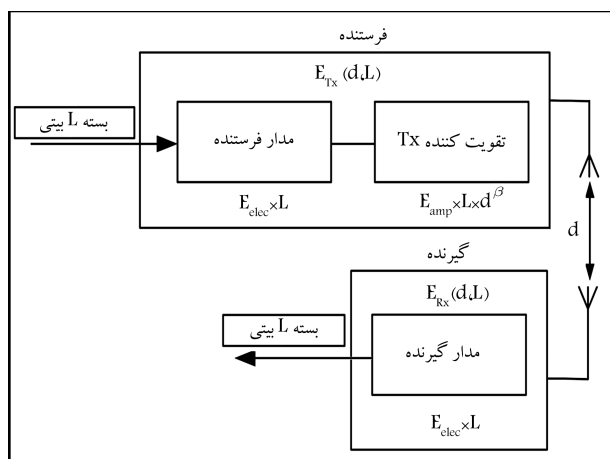
-- در الگوریتم خوشه‌بندی چندهدفه‌ی فازی MOFCA، سرخوشه‌ی مناسب از طریق رقابت فازی آگاه از انرژی بین مجموعه‌ی گره‌های نامزد که با استفاده از یک مدل احتمالی فیلتر شده‌اند، انتخاب می‌شود.^[۱۵] در این الگوریتم سه متغیر ورودی برای سیستم فازی تعریف شده است: سطح انرژی، تراکم و فاصله‌ی گره‌ها

از چاهک MOFCA سازوکاری توزیع شده برای انتخاب سرخوشه‌ها دارد. در نتیجه تصمیم‌گیری برای انتخاب سرخوشه‌ها از بین گره‌های نامزد، با محاسبه‌ی شعاع رقابت به‌طور محلی انجام می‌گیرد. الگوریتم خوشه‌بندی فازی مبتنی بر هوش ازدحامی فازی کشف اطلاعات (SIF) پروتکل خوشه‌بندی متمرکز است که از سیستم استنتاج فازی مددانی برای انتخاب سرخوشه‌ها در هر دور استفاده می‌کند.^[۱۶] SIF از سه متغیر ورودی استفاده می‌کند: سطح انرژی، فاصله تا چاهک و فاصله تا مرکزیت خوشه. در ابتدا، تمام گره‌ها از طریق الگوریتم فازی c-means خوشه‌بندی شده و سپس در هر خوشه یک گره به‌عنوان سرخوشه از طریق سیستم استنتاج فازی مددانی انتخاب می‌شود. در یکی از مطالعات انجام شده،^[۳۴] نویسندگان روشی مبتنی بر سیستم استنتاج فازی مددانی را برای خوشه‌بندی ارائه کردند که در آن از الگوریتم جهش قورباغه‌ی برای تنظیم و بهینه‌سازی جدول قوانین استنباط فازی^{۳۲} استفاده شده است. در این روش متغیرهای فازی انرژی باقی‌مانده‌ی گره‌ها، فاصله تا چاهک، تعداد همسایگان هر گره و سوابق سرخوشه بودن هر گره در نظر گرفته شده است.

۳.۲. رویکردهای فراابتکاری

چنان‌که پیش‌تر اشاره شد، مسئله‌ی افزایش طول عمر در شبکه‌های حسگر بی‌سیم از طریق خوشه‌بندی، یک مسئله‌ی NP-hard است. بر این اساس، بسیاری از محققین راه حل این مسائل را استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری ملهم از طبیعت دانسته و روش‌های فراابتکاری موفقی ارائه داده‌اند. در زیر، برخی روش‌های موجود مبتنی بر این الگوریتم‌ها معرفی شده است. LEACH-C نسخه‌ی مبتنی بر فراابتکاری، انرژی آگاه و متمرکز پروتکل مسیریابی LEACH است.^[۱۷] در مرحله‌ی راه‌اندازی، هر گره نسبت به ارسال اطلاعاتی در مورد انرژی باقی‌مانده و مکان خود، افزون بر داده‌های حس شده به چاهک ارسال می‌کند. در فاز راه‌اندازی دور بعدی، چاهک با استفاده از شبیه‌سازی تیریدی^{۳۳} برخی از گره‌ها را به‌عنوان سرخوشه‌ی دور فعلی انتخاب می‌کند. در این روش گره‌های نامزدی که سطح انرژی آنها بالاتر از میانگین انرژی باقی‌مانده‌ی تمام گره‌های زنده است، از طریق شبیه‌سازی تیریدی به‌عنوان سرخوشه‌های نهایی انتخاب می‌شوند. پس از انجام فرایند خوشه‌بندی، چاهک شناسه سرخوشه‌های انتخاب شده را در شبکه منتشر می‌کند تا سایر گره‌ها از سرخوشه‌های منتخب دور جاری مطلع شوند. سایر عملیات LEACH-C بسیار شبیه LEACH است. پروتکل مسیریابی سلسله مراتبی سازش‌پذیر مبتنی بر الگوریتم ژنتیک (GAEEP) برای بیشینه‌سازی طول عمر و بهبود دوره‌ی پایداری شبکه‌های حسگر بی‌سیم پیشنهاد شد.^[۱۸] هدف این پروتکل افزایش طول عمر شبکه با به دست آوردن تعداد مطلوب سرخوشه‌ها و مکان آنها براساس کمینه کردن مصرف انرژی گره‌های حسگر با استفاده از الگوریتم ژنتیک است.^[۱۸] روش خوشه‌بندی SBCA یک پروتکل مبتنی بر الگوریتم جهش قورباغه‌ی^{۳۴} است که توانایی یافتن سرخوشه‌های بهینه یا نزدیک به بهینه را برای مدیریت منابع شبکه دارد.^[۱۹] در این روش، مرحله‌ی تکامل کمپلکس‌ها در الگوریتم SFLA اصلی با عملگر تقاطع تک‌نقطه‌ی^{۳۵} جایگزین شده است. در SFLA ترکیبی ارائه شده در^[۲۰] برای خوشه‌بندی شبکه‌های حسگر بی‌سیم از قابلیت شکارگری^{۳۶} برای جلوگیری از افتادن الگوریتم در دام بهینه‌های محلی پیشنهاد شده است. نتایج نشان می‌دهد اجتناب از راه حل‌های غیر بهینه در این روش در مقایسه با SFLA و بهینه‌سازی ذرات^{۳۷} در حل خوشه‌بندی شبکه‌های حسگر بی‌سیم بهبود یافته است.

در یکی از مطالعات انجام شده^[۲۱] یک روش خوشه‌بندی مبتنی بر الگوریتم کرم



شکل ۱. مدل تخلیه انرژی رادیویی. [۲۳]

(fs) برای محاسبه‌ی تخلیه‌ی انرژی استفاده خواهد شد. در غیر این صورت از مدل چندمسیری (mp) به این منظور استفاده می‌شود. بنابراین، برای انتقال یک پیام L بیتی به فاصله‌ی d ، توان مصرفی رادیو عبارت است از:

$$E_{Tx}(L, d) = E_{Tx_{elec}} + E_{Tx_{amp}} = \begin{cases} L \times E_{elec} + \epsilon mp \times L \times d^\alpha, & \text{if } d \succ d_0 \\ L \times E_{elec} + \epsilon fs \times L \times d^\alpha, & \text{if } d \prec d_0 \end{cases} \quad (4)$$

علاوه بر این، برای دریافت پیام L بیتی، انرژی مورد استفاده‌ی رادیو مطابق رابطه‌ی ۵ محاسبه می‌شود:

$$E_{Rx}(L, d) = L \times E_{elec} \quad (5)$$

که در آن $d_0 = \sqrt{\epsilon fs / \epsilon mp}$ معرف فاصله‌ی آستانه است و عواملی همچون نحوه‌ی کدگذاری دیجیتال، نوع مدولاسیون^{۴۱} و همچنین روش فیلترینگ و پخش اثر سیگنال بر E_{elec} (انرژی الکترونیکی) بر آن مؤثر است. انرژی آمپلی‌فایر، ϵmp یا ϵfs یا بستگی به فاصله‌ی فرستنده تا گیرنده و نرخ پذیرش عاری از خطای بیتی قابل قبول داشته و β مبین میزان تخلیه‌ی انرژی برحسب فاصله است. [۲۴]

۲.۳. مدل شبکه

مدل‌سازی شبکه‌های حسگر بی‌سیم در این پژوهش با در نظر گرفتن مفروضات مرتبط با هم‌بندی به قرار زیر انجام شده است: [۲۵، ۱۵]

- تمام گره‌های حسگر به طور تصادفی با چند سرخوشه‌ی محدود در میدان حسگری پراکنده شده و پس از استقرار محل‌شان بدون تغییر در نظر گرفته می‌شود. گره‌های حسگر همگی انرژی اولیه‌ی یکسان دارند و شارژ مجدد یا تعویض باتری طی عملیات تقریباً غیرممکن است.
- محل چاهک ثابت است و می‌تواند با توجه به سناریوی شبکه در داخل یا خارج از حوزه‌ی حسگری قرار گیرد.
- تمام گره‌های حسگر با استفاده از دستگاه‌های جاسازی شده برای تعیین موقعیت (مانند GPS) از موقعیت مکانی خود مطلع‌اند. گره‌ها می‌توانند در حالت غیر فعال یا حالت خواب قرار داده شوند. ضمن این که بین دو دور اجرای الگوریتم مسیریابی پشت سر هم، تمام گره‌ها قادرند رادیوهای خود را برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی خاموش کنند.

شب‌تاب پیشنهاد شده است. این روش شامل یک مرحله خوشه‌بندی خرد است که طی آن گره‌ها خود را در قالب خوشه‌ها سازمان‌دهی می‌کنند. سپس همین خوشه‌ها در یک مرحله‌ی خوشه‌بندی کلان، برای یک پارچه‌سازی خوشه‌های کوچک همسایه رقابت می‌کنند. شبیه‌سازی نتایج، نشان‌گر نتایج امیدوارکننده‌ی هستند، به‌طوری که در آن تعداد بهینه‌ی خوشه‌ها مستقل از تراکم شبکه و محدوده‌ی ارتباطی حسگرها تثبیت می‌شود. محققین در بررسی‌ها [۲۲] رویکرد خوشه‌بندی فراابتکاری ترکیبی با استفاده از الگوریتم‌های کرم شب‌تاب و شبیه‌سازی تبرید را ارائه کرده‌اند. هدف این الگوریتم بهینه‌سازی طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم ناهمگون^{۳۸} از طریق کاهش مصرف انرژی کل شبکه است. در این روش، الگوریتم کرم شب‌تاب برای یافتن خوشه‌بندی بهینه و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای یافتن بهترین زنجیره بین خوشه‌ها به کار رفته است.

۴.۲. جمع‌بندی

در پروتکل‌های مسیریابی کلاسیک، انتخاب سرخوشه‌ها با استفاده از روابط کلاسیک و بر اساس پارامترهای مختلف گره‌های حسگر، صورت می‌گیرد. اگرچه پیاده‌سازی این روش‌ها ساده است، لیکن در لحاظ کردن معیارهای اساسی انتخاب سرخوشه‌ها، عملکرد خوبی ندارند. در مقابل روش‌های مبتنی بر فازی، سیستم استنتاج فازی به دلیل روشن کردن ارتباط بین پارامترهای ورودی و خروجی عملکرد بهتری در انتخاب سرخوشه‌ها از خود نشان می‌دهد. روش‌های مبتنی بر فراابتکاری‌ها از دودسته قبل عملکرد بهتری دارند. لیکن این روش‌ها نیز دارای اشکال بالا بودن پیچیدگی زمانی به دلیل ماهیت گردش‌های زیاد الگوریتم هستند. اشکال دیگر هر سه روش این است که هیچکدام مبتنی بر کاربرد نیستند. به عبارت دیگر به هیچ طریق نمی‌توان پارامترهای کنترل‌کننده الگوریتم را به‌گونه‌ی سازش‌پذیر تنظیم کرد تا برای همه کاربردها منتج به نتایج مطلوب شود. لذا در کاربردی تنظیم این پارامترها عملکرد مناسبی نتیجه می‌دهد، لیکن در سایر کاربردها نقایص خود را آشکار می‌سازد. به‌علاوه در بیشتر این روش‌ها، برای انتخاب سرخوشه‌ها (طرح تک‌گامی) و بازفرستنده‌ها (طرح چندگامی) از معیارهای ناکافی استفاده شده است. الگوریتم MOFSA برای غلبه بر نقایص فوق در فصل ۴ ارائه می‌شود.

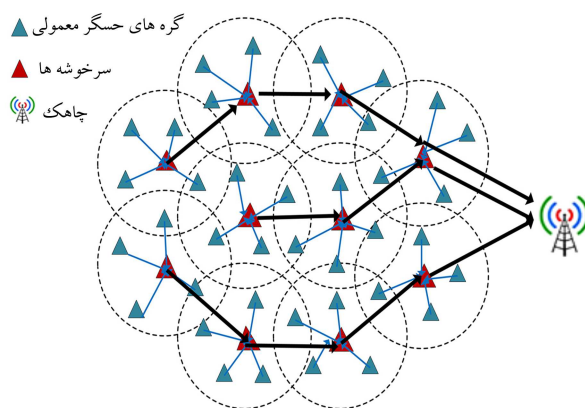
۳. مدل‌سازی سیستم

۳.۱. مدل انرژی

در این نوشتار از مدل تخلیه انرژی رادیویی برای مدل‌سازی انرژی استفاده می‌شود. در این طرح، فرستنده‌ی انرژی $E_{Tx}(L, d)$ را برای مدیریت تخلیه‌ی انرژی بخش فرستنده رادیویی الکترونیکی و تقویت‌کننده توان به کار می‌برد. از طرف دیگر بخش گیرنده، انرژی $E_{Rx}(L, d)$ را در هنگام مدیریت انرژی الکترونیک رادیویی در نظر می‌گیرد. [۲۳] همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، بسته به فاصله‌ی d بین فرستنده و گیرنده، مدل فضای آزاد^{۳۹} (که در آن میزان تخلیه‌ی انرژی با مجذور فاصله (d^2) متناسب است) به اختصار fs یا مدل محو کانال‌های چندمسیری^{۴۰} (که در آن میزان تخلیه‌ی انرژی با توان چهارم فاصله d^4 متناسب است) به اختصار mp برای تمام آزمایش‌ها استفاده شده است.

در این مدل، تقویت‌کننده‌ی توان به درستی مدیریت می‌شود، به‌طوری‌که اگر فاصله‌ی بین گیرنده و فرستنده کم‌تر از فاصله‌ی آستانه (d_0) باشد، مدل فضای آزاد

جبرانی ایجاد کند. در حالی که در بعضی موارد، طول عمر شبکه به‌عنوان دوری زمانی در نظر گرفته می‌شود که کل منطقه‌ی مورد نظارت تحت پوشش قرار دارد. در شبکه‌های حسگر بی‌سیم همگن، افول برخی از گره‌های غیرحساس به دلیل وجود همبستگی داده‌های حس شده، حیاتی نبوده و شبکه تا وقتی که حداقل تعداد مشخصی از گره‌ها زنده‌اند همچنان قابل اعتماد است. در این نوشتار برای ارزیابی عملکرد MOFSA، شاخص‌های مختلفی از طول عمر شبکه مانند مرگ اولین گره، مرگ نیمی از گره‌ها (HND)،^{۴۵} مرگ آخرین گره (LND)،^{۴۶} ترافیک عبوری به چاهک، حداقل و متوسط انرژی شبکه در برابر دورهای اجرا استفاده می‌شود.



شکل ۲. مدل مسیریابی چندگامی شبکه‌های حسگر بی‌سیم.

۴. بررسی الگوریتم‌های پایه

در این بند، الگوریتم‌های خوشه‌بندی الهام از طبیعت و مبتنی بر جمعیتی که به‌عنوان الگوریتم‌های پایه برای ترکیب و ایجاد الگوریتم خوشه‌بندی ترکیبی استفاده شده است، شرح داده می‌شود.

۱.۴. الگوریتم کرم شب‌تاب

الگوریتم کرم شب‌تاب (FFA) اولین بار توسط یانگ و همکاران (۲۰۰۸) با الهام از رفتار طبیعی کرم‌های شب‌تاب معرفی شد.^[۲۷] ایده این الگوریتم بر اساس پدیده‌ی فسفرافکنی^{۴۷} است. فسفرافکنی فرایندی است که طی آن کرم‌های شب‌تاب برای مدت کوتاهی از خود نور ساطع^{۴۸} می‌کنند.^[۲۷] شدت نور ساطع شده پارامتر حیاتی الگوریتم است. بر این اساس سه قانون اصلی برای عملکرد کرم‌های شب‌تاب وجود دارد: نخست آن که، جذابیت هر کرم شب‌تاب مستقل از جنسیت آن است. دوم این که، تمایل به جذب یک کرم شب‌تاب به سمت کرم شب‌تاب دیگر، بستگی به شدت روشنایی نور ساطع شده دارد. سوم این که، تابع هدف کمک می‌کند تا شدت روشنایی کرم شب‌تاب تعیین شود. در اغلب موارد، متغیرهای این الگوریتم، عامل جذابیت و شدت نور هستند.^[۲۷] در FFA، ابتدا جمعیت کرم شب‌تاب به طور تصادفی تولید می‌شود. سپس، ارزیابی میزان برازندگی و به‌روزرسانی جمعیت به طور پیوسته انجام می‌شود تا بیشترین تعداد تکرار فرا رسد. در مرحله‌ی به‌روزرسانی جمعیت، حرکت کرم شب‌تاب i به سمت کرم شب‌تاب جذاب‌تر (روشن‌تر) j از طریق رابطه‌ی ۶ انجام می‌شود:

$$x_i = x_i + \beta \cdot e^{(-\gamma \cdot \text{dir}^j)} (x_i - x_j) + \alpha \varepsilon_i \quad (6)$$

به‌طوری که اولین بخش، مکان فعلی کرم شب‌تاب i و دومین بخش معرف نقش عامل جذابیت در میزان جابه‌جایی کرم شب‌تاب است. سومین بخش یک بردار تصادفی با متغیر تصادفی ε_i است که از توزیع‌های مختلف مانند توزیع یکنواخت، گاوسی و پرواز لوی^{۴۹} قابل محاسبه است. α پارامتری پویاگر است که اندازه‌ی گام را کنترل می‌کند و باید با منافع و ماهیت مسئله مرتبط باشد.^[۲۸]

۲.۴. الگوریتم جهش قورباغه‌ای

الگوریتم SFLA، فراابتکاری مهم از طبیعت دیگری است که ابتدا توسط Eu-Lansley و suff (۲۰۰۶) تحت عنوان الگوریتم جهش قورباغه‌ای^[۲۹] معرفی شد SFLA از دسته الگوریتم‌های ممتیک^{۵۰} است و هدف آن مدل‌سازی رفتار

۴. گره‌هایی که به یکدیگر نزدیک‌اند، داده‌های همبسته دارند.

۵. کانال ارتباطی متقارن فرض می‌شود. بنابراین انرژی مورد نیاز برای انتقال داده‌ها از گره حسگر s_1 به گره حسگر s_2 برابر انرژی مورد نیاز برای ارسال پیام از گره s_2 به گره s_1 در ازای نسبت معینی از سیگنال به نویز (SNR) است.

۶. این طرح از پروتکل TDMA^{۴۲} برای ارائه‌ی ارتباط بین گره‌های حسگر و سرخوشه‌ها در لایه‌ی MAC پشتیبانی می‌کند. همچنین برای برقراری ارتباط از سرخوشه‌ها تا چاهک از پروتکل CSMA^{۴۳} در لایه‌ی MAC استفاده می‌کند.

۷. در پروتکل ترکیبی مورد استفاده از روش مورد استفاده‌ی محققین^[۱۵] برای فشرده‌سازی و تجمیع داده‌ها استفاده می‌شود. در این روش فرض می‌شود که سرخوشه‌ها، داده‌ها را از گره‌های عضو خوشه خود جمع‌آوری کرده و آن را تنها به صورت یک بسته با طول ثابت و بدون در نظر گرفتن تعداد بسته‌های دریافت شده به چاهک ارسال می‌کنند.

۸. بسته‌های کنترل نسبت به بسته‌های داده کوچک‌اند. لذا انرژی مصرفی در انتقال فریم‌های کنترل در مقایسه با انرژی مصرفی در انتقال فریم‌های داده ناچیز است و از این رو، نادیده گرفته می‌شود. در شکل ۲ مدل مسیریابی چندگامی با مفروضات فوق نشان داده شده است.

۳.۳. مدل طول عمر

طول عمر شبکه شاید مهم‌ترین شاخص برای ارزیابی عملکرد شبکه‌های حسگر بی‌سیم است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد مسئله‌ی افزایش طول عمر در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مسئله‌ی NP-hard است.^[۲۶] لذا استفاده از فراابتکاری‌های رویکردی مناسب برای مواجهه با آن است.^[۲۶] صرف نظر از این که طول عمر در این شبکه‌ها چگونه تعیین شود، طول عمر کل شبکه به شدت به طول عمر تک‌تک گره‌هایی که شبکه را ایجاد می‌کنند، بستگی دارد. مدل‌سازی طول عمر یک گره حسگر به دو عامل وابسته است: میزان مصرف انرژی در طول زمان و میزان انرژی باقی‌مانده برای استفاده در ادامه.^[۲۶] تعاریف مختلفی برای طول عمر شبکه در ادبیات داده شده است. مهم است که توجه شود، طول عمر شبکه بر اساس نوع کاربرد تعریف می‌شود و تعریف خاصی که برای همه کاربردها مناسب باشد، وجود ندارد.^[۲۶] به‌عنوان مثال، در یک شبکه‌ی کنترل و نظارت پزشکی، طول عمر بر اساس شاخص مرگ اولین گره‌های گره (FND)^{۴۴} تعیین می‌شود، زیرا با توجه به اهمیت اطلاعات گره‌های حسگر، در این حالت از بین رفتن یک گره حسگر ممکن است آسیب‌های غیر قابل

اصلی مشاهده نشود. در الگوریتم اصلی برای پیشرفت الگوریتم، یک قورباغه به طور تصادفی با توزیع یکنواخت جایگزین قورباغه‌ی فعلی می‌شود. ولی در رویکرد جدید، با استفاده از مزایای توزیع لوی^{۵۲} از جمله وجود انحراف معیار بی‌نهایت و انعکاس این ویژگی در گسترش گام‌های جست‌وجوی محلی، سبب بهبود عملکرد پرواز لوی در کشف جواب‌های بهتر می‌شود. لذا برای انتخاب تصادفی قورباغه جدید از پرواز لوی برای جست‌وجو در فضای جواب استفاده می‌شود.^[۳۰]

۵. پروتکل مسیریابی پیشنهادی

طبق شکل ۳، در هر دور اجرا و در فاز راه‌اندازی، پروتکل مسیریابی MOFSA اجرا می‌شود. سایر عملیات در مرحله‌ی پایداری شبیه به LEACH است. در طول مرحله‌ی راه‌اندازی هر دور، چاهک یک پیام کوتاه برای بیدار کردن گره‌های حسگر و درخواست شناسه، موقعیت و سطح انرژی آنها در شبکه پخش می‌کند. در این‌جا برخلاف LEACH، انتخاب سرخوشه‌ها (در خوشه‌بندی) و انتخاب فرستنده‌ها (در مسیریابی چندگامی) به طور متمرکز و در چاهک انجام می‌شود.^[۳۱]

در هر دور، پس از تعیین گره‌های سرخوشه و فرستنده‌های مربوطه با استفاده از الگوریتم MOFSA چاهک اعلانی را برای هر سرخوشه‌ی انتخاب شده، حاوی شناسه‌ی گره‌های عضو و همچنین فرستنده‌ی آن در مسیریابی چندگامی ارسال می‌کند. سپس هر سرخوشه برنامه‌ی زمان‌بندی بر اساس TDMA را برای اطلاع هر گره عضو از برش زمانی برای ارسال بسته اطلاعاتی خود به سرخوشه‌ی متناظر، تدوین می‌کند. در مرحله‌ی پایداری، هر گره غیر سرخوشه انتقال اطلاعات خود را به سرخوشه‌ی مربوطه انجام می‌دهد. سپس، هر سرخوشه داده‌ها را ادغام کرده به گره فرستنده خود و یا مستقیماً به چاهک ارسال می‌کند. در بخش‌های زیر طرح رمزگذاری، محاسبه تابع برازندگی، الگوریتم خوشه‌بندی ترکیب MOFSA و روش مسیریابی چندگامی به جزئیات ارائه شده است.

۱.۵. طرح رمزگذاری

در رویکرد پیشنهادی، هر فرد از جمعیت را می‌توان به عنوان رشته‌ی دودویی با طول N نمایش داد، جایی که N تعداد گره‌های زنده است. مقدار «صفر» معرف گره عضو غیر سرخوشه است و مقدار ۱ گره سرخوشه را نشان می‌دهد.^[۳۲،۳۱] این ساختار برای نشان دادن راه حل‌های قابل اجرا در SFLA و FFA استفاده می‌شود. نمونه‌ی از رمزگذاری یک راه حل ممکن در شکل ۴ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است، به دلیل ویژگی پیوستگی به‌روزرسانی جمعیت در هر دو الگوریتم پایه، راه حل‌ها اساساً مقادیری پیوسته بین صفر و ۱ دارند. لذا تنها در مرحله‌ی ارزیابی برازندگی به منظور محاسبه‌ی تابع هدف، راه حل‌ها به ساختارهای دودویی گسسته شده و با احتساب مقدار آستانه‌ی ۰/۵ گرد می‌شوند. سپس در ادامه‌ی روند اجرای الگوریتم مسیریابی، راه حل‌ها مجدداً در ساختارهای پیوسته رمزگشایی و به‌روزرسانی می‌شوند.

۲.۵. محاسبه‌ی تابع برازندگی

برای بیشینه‌سازی طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم خوشه‌بندی شده، اکثر سرخوشه‌های واجد شرایط باید بر اساس میزان تناسب محاسبه شده توسط یک تابع هدف برای هر گره انتخاب شوند.^[۳۳،۳۱] در الگوریتم‌های خوشه‌بندی مبتنی بر

قورباغه‌هایی است که در جست‌وجوی مواد غذایی به طور تصادفی روی سنگ‌های حاشیه‌ی حوضچه‌ی قرار دارند.^[۲۹] این الگوریتم جواب بهینه‌ی سراسری را با انجام یک سلسله جست‌وجوی اکتشافی دنبال می‌کند.^[۲۹] SFLA مزایای یک الگوریتم مبتنی بر ژن (MA) و الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO) را بر اساس رفتار اجتماعی قورباغه‌ها ترکیب می‌کند. SFLA از جمعیت مجازی قورباغه‌ها استفاده می‌کند که در آن قورباغه‌های مختلف مجموعه‌ی راه حل‌ها را نشان می‌دهند.^[۲۹] SFLA در مراحل زیر خلاصه می‌شود:^[۲۹]

۱. مقداردهی اولیه: انتخاب m و n ، به طوری که m تعداد ممپلکس‌ها و n تعداد قورباغه‌ها در هر ممپلکس است. بنابراین، جمعیت کل نمونه در حوضچه (F) ، عبارت خواهد بود از: $F = m \times n$.

۲. ایجاد جمعیت مجازی: جمعیت اولیه‌ی (F) قورباغه‌ها به طور تصادفی ایجاد می‌شود. در یک مسئله‌ی S بعدی، هر قورباغه توسط متغیرهای S به صورت $F_i = f(f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{is})$ نشان داده می‌شود.

۳. مرتب‌سازی و توزیع: قورباغه‌ها بر اساس ارزش برازندگی به ترتیب نزولی مرتب شده، سپس کل جمعیت به m ممپلکس تقسیم شده و هر ممپلکس حاوی n قورباغه است. در این فرایند اولین قورباغه از فهرست مرتب شده در اولین ممپلکس قرار می‌گیرد، قورباغه دوم به ممپلکس دوم و به همین ترتیب قورباغه‌ی m ام به ممپلکس m می‌رود. قورباغه‌ی $m+1$ ام مجدداً به اولین ممپلکس می‌رود. این روال تا انتقال همه‌ی قورباغه‌ها در ممپلکس مربوطه ادامه می‌یابد.

۴. تکامل ممپلکس‌ها: این مرحله مبتنی بر جست‌وجوی محلی است. در هر ممپلکس، قورباغه‌های با بهترین و بدترین ارزش برازندگی به عنوان F_b و F_w شناخته شده و قورباغه با بهترین ارزش برازندگی سراسری به عنوان F_g شناخته می‌شود. سپس، روند تکاملی تنها برای بهبود موقعیت قورباغه با بدترین برازندگی استفاده می‌شود. موقعیت جدید قورباغه با بدترین ارزش برازندگی در رابطه‌ی ۷ چنین تنظیم می‌شود:

$$D_i = rand() \times (F_b - F_w) \quad (7)$$

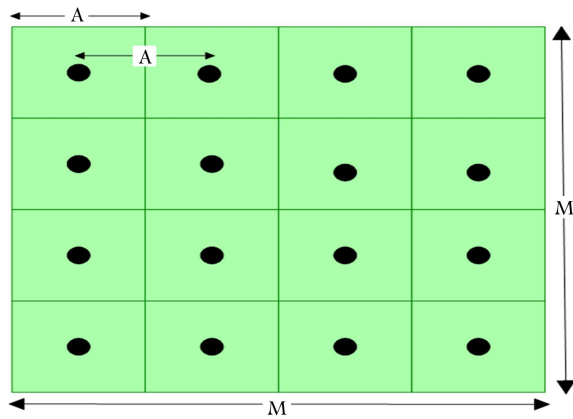
$$F_{w_{new}} = F_{w_{old}} + D_i, (D_{min} \leq D_i \leq D_{max}) \quad (8)$$

به طوری که $rand()$ یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ است D_{min} کمینه و D_{max} بیشینه تغییر مکان مجاز قورباغه است. اگر این فرایند یک راه حل بهتر را ایجاد کند، آن را با بدترین قورباغه‌ی فعلی جایگزین می‌کند. اگر معادلات ۷ و ۸ بدترین راه حل را بهبود ندهند، F_b در معادله‌ی ۷ با F_g جایگزین می‌شود و با معادله‌ی ۹ تنظیم خواهد شد:

$$D_i = rand() \times (F_g - F_w) \quad (9)$$

۵. مخلوط کردن:^{۵۱} پس از انجام تعداد از پیش تعیین شده‌ی مراحل تکامل ممپلکسی، تمام قورباغه‌ها از ممپلکس‌ها جمع‌آوری شده، جمعیت جدید با توجه به برازندگی به ترتیب نزولی مرتب می‌شوند.

۶. شرط خاتمه: اگر یک راه حل سراسری یا تعداد ثابت تکرار به دست آید، الگوریتم متوقف شود. در غیر این صورت، به مرحله‌ی ۲ برو و مراحل دوباره تکرار شود.^[۲۹] در روش پیشنهادی و در بخش جست‌وجوی محلی الگوریتم اصلی SFLA، اصلاح صورت گرفته است. این اصلاح در صورتی انجام می‌شود که هیچ بهبودی در جواب‌ها پس از اجرای مراحل مربوط به روابط ۷ تا ۹ الگوریتم



شکل ۵. محدوده‌ی شبکه‌ی حسگر بی‌سیم با ابعاد $M \times M$.

مثال، با فرض $M = ۱۰۰$ و $C = ۱۶$ ، مقدار A برابر $۲۵ = ۱۰۰/۴$ محاسبه می‌شود. بنابراین، هر سرخوشه تقریباً منطقه‌ی به وسعت ۲۵×۲۵ را پوشش می‌دهد.

۳.۵. الگوریتم فراابتکاری ترکیبی

در این بخش ابتدا به انگیزه‌ی انتخاب الگوریتم‌های جهش قورباغه‌یی و کرم شب تاب برای ترکیب در مدل پیشنهادی می‌پردازیم. به طور کلی، SFLA یک الگوریتم مبتنی بر هوش ازدحامی با راندمان بالای محاسباتی و قابلیت جست‌وجوی سراسری مطلوب است. این الگوریتم، یک الگوریتم فراابتکاری هوشمند مبتنی بر جمعیت است که مزایای الگوریتم ازدحام ذرات ۵۳ و الگوریتم‌های ممتیک ۵۴ را ترکیب می‌کند. SFLA یک الگوریتم فراابتکاری مشارکتی با کارایی محاسباتی بالا و توانایی جست‌وجوی سراسری خوب است. این الگوریتم قادر است مسائل بهینه‌سازی گسسته و پیوسته را حل کند. این الگوریتم هر دو راهبرد قطعی و تصادفی را هم‌زمان به کار می‌گیرد. راهبرد قطعی در هنگام انجام جست‌وجوی سراسری کارا و تقویت تمرکز و راهبرد تصادفی برای تضمین تنوع در جواب‌ها، قوی بودن و انعطاف‌پذیری فرایند جست‌وجوی محلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این الگوریتم قادر است هر دو دسته مسائل بهینه‌سازی پیوسته و گسسته را حل کند.^[۳۹] از سوی دیگر، FFA متعلق به گروه الگوریتم‌های احتمالی است و بر روی تولید راه حل‌ها در پایین‌ترین سطح بر فضای جست‌وجو تمرکز می‌کند.^[۲۷] FFA دارای مزایای زیادی نسبت به سایر الگوریتم‌های فراابتکاری است. این الگوریتم مبتنی بر درجه‌ی جذب و درخشندگی است که باعث می‌شود کل جمعیت افراد به طور خودکار به زیرگروه‌هایی با میانگین بازه‌یی تقسیم شوند و کمک کند تا هرگروه در اطراف یک پاسخ بهینه‌ی محلی تجمع یابند. این الگوریتم نسبت به تعداد تکرار اجرا قابل تنظیم است و احتمال هم‌گرایی با استفاده از این پارامتر قابل افزایش است. این مزایا و طیف گسترده‌ی از مسائل قابل حل با ماهیت پیوسته، خوشه‌بندی، طبقه‌بندی و بهینه‌سازی ترکیبی از سایر مزایای این الگوریتم است.^[۲۸] در این نوشتار الگوریتم‌های SFLA و FFA به صورت موازی^[۳۳] و در شرایطی که هم‌زمان تلاش می‌شود از مزایای هر دو الگوریتم استفاده شود، الگوریتم ترکیبی جدید مبتنی بر هوش ازدحامی ارائه شده است. علاوه بر این، استراتژی انتخاب چرخ رولت (RWS)^{۵۵} برای جبران کمبود احتمالی قابلیت اکتشاف و ایجاد تنوع در جواب و اجتناب از نخبه‌گرایی صرف مورد استفاده قرار می‌گیرد. شبه کد الگوریتم ترکیبی پیشنهادی برای خوشه‌بندی در طرح تک‌گامی MOFSA در شکل ۶ ارائه شده است.

که در آن w_{c1} تا w_{c4} ، به ترتیب چهار وزن ثابت برای تنظیم اهمیت نسبی چهار هدف f_{c1} تا f_{c4} است. جمع جبری این وزن‌ها باید برابر ۱ باشد. هر هدف به نحوی تنظیم می‌شود که اطراف ۱ نرمال شود. بنابراین، هرچه عدد هر وزن بالاتر باشد، اهمیت نسبی بیشتری برای مدت زمان معین خواهد داشت. یک منطقه به مساحت $M \times M$ را در نظر بگیرید که در آن N گره به طور تصادفی توزیع شده است. اگر تعداد C خوشه وجود داشته باشد و هر خوشه دارای z گره با نماد $|Cz|$ باشد و $(z = ۱, ۲, \dots, C)$ ، اولین هدف، f_{c1} را می‌توان برای بیشینه‌سازی انرژی باقی‌مانده‌ی سرخوشه‌ها با معادله‌ی ۱۱ تعریف کرد، که در آن E_i انرژی نسبی گره i و $E-CH_j$ انرژی نسبی سرخوشه j در نظر گرفته می‌شود:

$$f_{c1} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i}{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^C E-CH_j} \quad (۱۱)$$

هدف دوم f_{c2} برای کمینه‌سازی فاصله‌ی متوسط بین سرخوشه‌ها تا چاهک انتخاب شده است. این هدف طبق معادله‌ی ۱۲ تعریف می‌شود:

$$f_{c2} = \frac{\frac{1}{C} \sum_{j=1}^C d(CH_j, Sink)}{\frac{M}{T}} \quad (۱۲)$$

که در آن $d(CH_j, Sink)$ معرف فاصله‌ی اقلیدسی بین سرخوشه‌ی j از چاهک است. از اصطلاح $M/2$ برای نرمال کردن تابع هدف f_{c2} در محدوده‌ی ۱ استفاده می‌شود. سومین هدف f_{c3} برای کمینه‌سازی فاصله‌ی میان خوشه‌یی بین گره‌ها تا سرخوشه‌ی مربوط به همان خوشه است. این هدف را می‌توان تحت معادله‌ی ۱۳ مدل کرد:

$$f_{c3} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^C d(n_i, CH_j) x_{ij}}{\frac{A}{T}} \quad (۱۳)$$

که در آن x_{ij} یک پارامتر باینری است به نحوی که اگر گره i به CH_j متصل شده برابر ۱ باشد، مقدار آن ۱ است، در غیر این صورت مقدار آن صفر خواهد بود. اصطلاح $A/2$ برای نرمال کردن f_{c3} در حوالی ۱ استفاده می‌شود، به قسمی که مقدار A در معادله شرح داده شده است (رجوع کنید به شکل ۵).

در نهایت، هدف چهارم f_{c4} برای بیشینه‌سازی میانگین فاصله‌ی بین خوشه‌یی بین سرخوشه‌ها بوده و به صورت معادله‌ی ۱۴ بیان می‌شود، به نحوی که CH_k نزدیک‌ترین سرخوشه به CH_j است، و از اصطلاح A به طور مشابه برای نرمال کردن f_{c4} استفاده می‌شود.

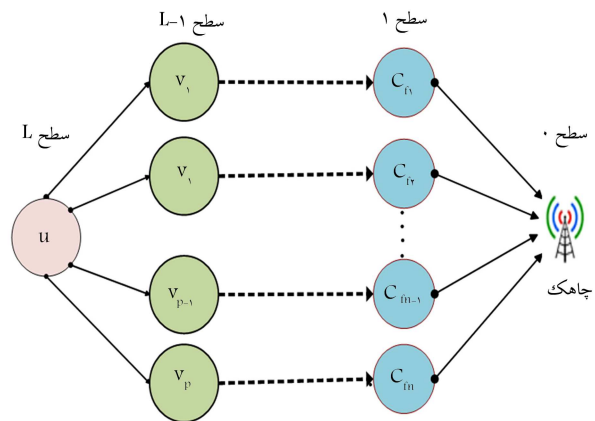
$$f_{c4} = \frac{A}{\frac{1}{C} \sum_{j=1}^C d(CH_j, CH_k)} \quad (۱۴)$$

در این جا، اصطلاحاتی را که برای نرمال‌سازی اهداف f_{c2} ، f_{c3} و f_{c4} به معادلات افزوده شده، با یک مثال توضیح می‌دهیم. فرض کنید شبکه‌یی در ناحیه‌یی با ابعاد $M \times M$ با تعداد خوشه‌های C در اختیار باشد. فرض توزیع متوازن گره‌ها در شکل ۵ دیده می‌شود. اگر A متوسط فاصله‌ی دو سرخوشه‌ی مجاور باشد، فاصله‌های درون خوشه‌یی و میان خوشه‌یی در معادلات ۱۳ و ۱۴ را می‌توان به ترتیب با اصطلاح $A/2$ و A نرمال کرد. علاوه بر این، میانگین فواصل سرخوشه‌ها تا چاهک را می‌توان با اصطلاح $M/2$ نرمال کرد. مقدار پارامتر A را می‌توان به طور تقریب به صورت $A = \frac{M}{\sqrt{C}}$ محاسبه کرد. به عنوان

الگوریتم ۱ شبه کد الگوریتم خوشه بندی ترکیبی پیشنهادی

Begin;
 Divide the initial population P_0 into two sub-populations: P_1 and P_2 ;
 Initialize the populations P_1 and P_2 ;
 Evaluate the fitness value of each individual according to Eq. (5-1);
Repeat in parallel
Do
 Perform FFA Evolution on P_1 ;
 Perform SFL Evolution on P_2 ;
End Do
 Update the global best in the whole population; Shuffle the two sub-population and regroup them randomly into new sub-populations: P_1 and P_2 by means of a Roulette Wheel Selection (RWS);
Until a terminate-condition is met;
End;
 Post-process results and visualization;

شکل ۶. شبه کد الگوریتم مسیریابی پیشنهادی.



شکل ۷. زیرساخت پسر در مسیریابی پیشنهادی.

چنان که ملاحظه می‌شود، در ابتدا جمعیت اولیه‌ی ذرات P_0 به شکل تصادفی تولید و به دو زیرجمعیت P_1 و P_2 تقسیم می‌شود. در هر تکرار MOFSA به شکل موازی، جمعیت FFA و SFLA (P_1 و P_2) را از طریق تابع برازندگی چندهدفی معادله‌ی ۱۰ مورد ارزیابی قرار می‌دهد. سپس، دو جمعیت تکامل یافته از مرحله قبل مجدداً با هم مخلوط شده و دوباره به P_1 و P_2 جدید تبدیل می‌شود و ذرات به صورت تصادفی با استفاده از چرخه‌ی رولت انتخاب می‌شود. الگوریتم تا حداکثر تعداد تکرارها تکرار می‌شود.

۴.۵. مسیریابی

در هر دور اجرای الگوریتم مسیریابی MOFSA، برای انتقال داده‌های جمع‌آوری شده از سرخوشه‌های انتخاب شده در مرحله‌ی خوشه‌بندی به سمت چاهک، یک زیرساخت پسر^{۵۶} به نام BDB ایجاد می‌شود به طوری که چاهک در ریشه‌ی ساختار قرار می‌گیرد. این ساختار در شکل ۷ نشان داده شده است.

در زیرساخت BDB چاهک در سطح صفر تنظیم می‌شود، به عبارت دیگر $Level(Sink) = 0$. به منظور تکمیل BDB، چاهک پیامی به سرخوشه‌های واقع در محدوده‌ی R_m ارسال می‌کند، به طوری که در آن $d_{mul} \times d$ ، $R_m = d_{mul} \times d$ ، فاصله آستانه‌یی در مدل رادیویی (رجوع کنید به بند ۱۰.۳) بوده و پارامتری ثابت با مقداری نزدیک ۱ است. همه‌ی سرخوشه‌ها پس از دریافت این پیام سطح خود را به یک واحد بالاتر از سطح چاهک به روز می‌کنند و داریم: $Level(n_q) = 1$.

این سرخوشه‌ها چاهک را به عنوان بازفرستنده‌ی خود در نظر می‌گیرند، یعنی داریم $PN(n_q) = Sink$. سپس، سرخوشه‌های با حداکثر سطح به نوبه‌ی خود پیامی به سایر سرخوشه‌های واقع در محدوده‌ی R_m پخش می‌کنند. این روش به طور پیوسته تکرار می‌شود تا زمانی که ساختار BDB کامل شود. پیام ارسالی توسط سرخوشه‌ها شامل شناسه، سطح انرژی باقی‌مانده و اطلاعات مکان گره‌هاست. زمانی که سرخوشه‌یی خارج از ساختار BDB حداقل یک پیام را از سایر سرخوشه‌ها دریافت می‌کند سطح خود و گره بازفرستنده‌ی خود را به ترتیب زیر به روزرسانی می‌کند. اگر سرخوشه‌ی u تنها یک پیام از سرخوشه‌ی v که در ساختار BDB قرار دارد دریافت کند ابتدا با رابطه‌ی ۱ $Level(u) = Level(v) + 1$ سطح خود و در ادامه با رابطه‌ی $PN(u) = v$ سطح گره بازفرستنده‌ی خود را به روزرسانی می‌کند و سطح خود را به یک سطح بالاتر از سطح سرخوشه‌ی v افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، اگر سرخوشه‌ی مورد نظر طبق شکل ۷ پیام‌هایی را از مجموعه‌یی از سرخوشه‌ها به صورت $\{v_1, v_2, \dots, v_p\}$ دریافت کند، آن‌گاه گره مناسب را به عنوان گره بازفرستنده‌ی خود با استفاده از تابع برازندگی چندهدفی معادله‌ی ۱۵ انتخاب خواهد کرد. عملکرد تابع برازندگی چندهدفی مسیریابی در MOFSA به این نحو است که باید متوسط وزنی چهار توابع هدف را به حداقل رساند، تا گره u از میان مجموعه‌یی از گره‌های نامزد برای بازفرستنده شدن، مانند شکل ۷، مثلاً گره v_1 را که تابع برازندگی را کمینه می‌کند، به عنوان گره‌ی بازفرستنده انتخاب کند. لذا همانند فاز خوشه‌بندی، در مسیریابی چندگامی نیز برای انتخاب گره بازفرستنده از تابع برازندگی چندهدفه استفاده می‌شود که در آن اهداف در محدوده‌ی مقدار ۱ نرمال می‌شود.

$$OF_{Routing}(v) =$$

$$\text{Min} \{w_{r1} f_{r1}(v) + w_{r2} f_{r2}(v) + w_{r3} f_{r3}(v) + w_{r4} f_{r4}(v)\} \quad (15)$$

بنابراین اگر بنا باشد گره v به عنوان بازفرستنده‌ی گره u در نظر گرفته شود، آن‌گاه به ترتیب هدف اول $f_{r1}(v)$ ، بیانگر انتخاب گره نامزد با بیشینه‌ی سطح انرژی (E_v) است و سایر اهداف به ترتیب، $f_{r2}(v)$ مبین انتخاب گره‌یی با کمترین فاصله‌ی سراسری در ساختار BDB از گره مبدا u تا چاهک ($Dist_v$)، $f_{r3}(v)$ برای کمینه‌سازی کل بار سرخوشه‌ها در مسیر از طریق گره v به چاهک ($Load_v$)، $f_{r4}(v)$ معرف تخمین کم‌ترین میزان انرژی مصرفی کل شبکه (EC_v) است. این اهداف را می‌توان چنین بیان کرد:

$$f_{r1}(v) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N E_j}{E_v} \quad (16)$$

$$f_{r2}(v) = \frac{Dist_v}{\frac{1}{p} \sum_{j=1}^p Dist_j} \quad (17)$$

$$f_{r3}(v) = \frac{Load_v}{\frac{1}{p} \sum_{j=1}^p Load_j} \quad (18)$$

$$f_{r4}(v) = \frac{EC_v}{\frac{1}{p} \sum_{j=1}^p EC_j} \quad (19)$$

زمان‌بندی برای دریافت و ارسال داده‌ها در ساختار BDB مسیریابی چندگامی را می‌توان در شکل ۸ مشاهده کرد. در این ساختار، ابتدا سرخوشه‌های بالاترین سطح، داده‌های خود را به سرخوشه‌های یک سطح پایین‌تر ارسال می‌کنند. سپس

جدول ۱. پیچیدگی زمانی مراحل مختلف الگوریتم مسیریابی پیشنهادی.

مرحله‌ی اجرایی الگوریتم	پیچیدگی زمانی
خوشه‌بندی با SFLA	$O(MaxIter \times Pop_{SFLA} \times N \times C)$
خوشه‌بندی با FFA	$O(MaxIter \times Pop_{FFA} \times N \times C)$
خوشه‌بندی با MOFSA	$O(MaxIter \times (Pop_{SFLA} + Pop_{FFA}) \times N \times C)$
مسیریابی با MOFSA	$O(M \times C^2)$

شده و جمعیت $nPop$ یکسان برای الگوریتم SFLA و FFA استفاده می‌شود در این حال $nPop/2$ برای اندازه جمعیت SFLA و FFA در MOFSA در نظر گرفته می‌شود.

۶. ارزیابی عملکرد الگوریتم ترکیبی

در این بخش، شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار متلب، نسخه‌ی ۲۰۱۷، برای تحلیل و ارزیابی عملکرد پروتکل MOFSA پیشنهادی ارائه می‌شود. با این هدف، عملکرد MOFSA در مقابل پروتکل‌های LEACH اصلی، پروتکل کلاسیک انرژی آگاه (ERA)، رویکرد مبتنی بر فازی (SIF) (رجوع کنید به بند ۲) و یک پروتکل مبتنی بر فراپیکاری (FSFLA) [۲۴] مقایسه می‌شود. سازوکار مسیریابی در LEACH، SIF و FSFLA تک‌گامی است، به طوری که همه‌ی سرخوشه‌ها به طور مستقیم به چاهک متصل می‌شود. ولی در الگوریتم مسیریابی MOFSA و همچنین ERA توانایی مسیریابی چندگامی را دارد. بنابراین برای شبیه‌سازی شبکه‌های حسگر بی‌سیم مقیاس بزرگ، ساختار مسیریابی چندگامی مورد استفاده در پروتکل ERA برای الگوریتم‌های LEACH، SIF و FSFLA نیز به کار می‌رود.

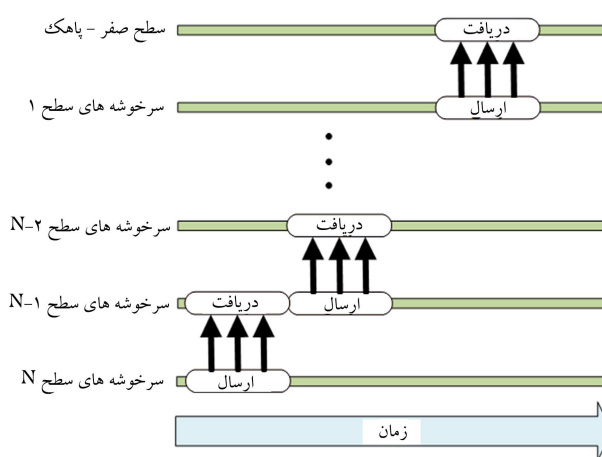
۱.۶. تعیین شاخص‌های عملکردی

برای تعیین کارایی پروتکل‌های مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، شاخص‌های متعددی برای ارزیابی بهره‌وری انرژی و عمر طول عمر شبکه ارائه شده است. [۲۴] در میان شاخص‌های مختلف، آنهایی که در این نوشتار استفاده می‌شوند، در جدول ۲ آمده است.

۲.۶. تنظیمات شبیه‌سازی

تنظیم پارامترهای قابل کنترل در الگوریتم‌های فراپیکاری قبل از آزمایش این تکنیک‌ها بسیار مهم است. برای دستیابی به این هدف، مقادیر متعددی مورد بررسی و آزمون قرار گرفت و در نهایت بهترین گزینه برای هر پارامتر انتخاب شد. [۲۵] تنظیمات پارامتر برای پروتکل MOFSA از جمله پارامترهای FFA و SFLA اصلاح شده و پارامترهای توابع چندهدفه خوشه‌بندی و مسیریابی چندگامی در جدول ۳ خلاصه شده است. وزن توابع چندهدفه برای خوشه‌بندی و مسیریابی در معادله‌ی ۱۰ برای بیشینه‌سازی FND تنظیم شده است، زیرا در اکثر کاربردهای شبکه‌های حسگر بی‌سیم، FND مهم‌ترین شاخص ارزیابی است. با وجود این، همان‌طور که در بالا ذکر شد، MOFSA پیشنهادی یک پروتکل مبتنی بر کاربرد ۵۷ است که می‌توان آن را تنها با تنظیم ۵ وزن معادله‌ی ۱۶ با سایر کاربردها نیز سازگار کرد.

در این مرحله شبیه‌سازی برای تعداد ۱۵ شبکه‌ی حسگر بی‌سیم در سه مرحله



شکل ۸. زمان‌بندی دریافت و ارسال بسته‌ها در زیرساخت پسر.

سرخوشه‌ی سطح L منتظر دریافت اطلاعات از سرخوشه‌های سطوح پایین‌تر می‌ماند تا پس از دریافت به همراه داده‌های خود آن را به گره بازفرستنده‌ی خود ارسال کند. این فرایند تا ارسال اطلاعات همه‌ی گره‌ها به چاهک ادامه می‌یابد.

۵.۵. تجزیه و تحلیل پیچیدگی زمانی

تجزیه و تحلیل پیچیدگی زمانی مراحل مختلف الگوریتم خوشه‌بندی MOFSA در جدول ۱ ارائه شده است. برای مرحله‌ی انتخاب سرخوشه‌ها با استفاده از MOFSA، پیچیدگی زمانی از مرتبه $O(MaxIter \times PopSize \times N \times C)$ خواهد بود، به نحوی که N تعداد کل گره‌های حسگر در شبکه، C تعداد دلخواه خوشه‌ها و $MaxIter$ تعداد تکرارهای الگوریتم را نشان می‌دهد. علاوه بر این، $PopSize$ جمعیت کل ذرات الگوریتم است و می‌توان آن را به صورت $PopSize = PopSFLA + PopFFA$ محاسبه کرد، به قسمی که $PopSFLA$ و $PopFFA$ به ترتیب جمعیت ذرات در SFLA و FFA هستند. از سوی دیگر، پیچیدگی زمانی برای ارزیابی میزان برازندگی هر راه حل می‌توان به صورت $TC_{Fitness} = N \times C$ بیان کرد. در فرایند مسیریابی برای هر سرخوشه، باید از بین سایر سرخوشه‌ها گره والد انتخاب کرد. پیچیدگی زمانی آن معادل $O(M \times C^2)$ است، که در آن، M بعد منطقه‌ی شبکه است. هرچه M بزرگ‌تر باشد، تعداد سطوح و گام‌های بیشتری برای مسیریابی لازم است. انتخاب گره والد برای تمام C سرخوشه در شبکه لازم است و در روش مسیریابی تکرار می‌شود. لذا در هر دور پیچیدگی زمانی برابر $O(M \times C^2)$ است.

از منظر پیچیدگی زمانی، الگوریتم ترکیبی تنها در صورتی ترجیح داده می‌شود، که عملکرد بهتری را از دو الگوریتم پایه در شرایط یکسان نتیجه دهد. براین اساس، تمام شبیه‌سازی‌های SFLA، FFA و MOFSA از نظر پیچیدگی زمانی در شرایط یکسان انجام می‌شود. به طور خاص، همان تعداد تکرار برای هر سه روش استفاده

جدول ۲. شاخص‌های ارزیابی شبکه‌های حسگر بی‌سیم برای بهبود طول عمر.

شاخص عملکردی	شرح شاخص
ترافیک عبوری کل (Throughput)	میزان کل داده‌ها را که به طور موفقیت‌آمیزی در چاهک در برابر دورها دریافت می‌شود مشخص می‌کند.
مرگ اولین گره حسگر (FND)	تعداد دورهای اجرای الگوریتم که پس از آن نخستین گره حسگر می‌میرد.
مرگ نیمی از گره‌های حسگر (HND)	تعداد دورهای اجرای الگوریتم که پس از آن نیمی از گره‌های حسگر از کار می‌افتد.
مرگ آخرین گره شبکه (LND)	تعداد دورهای اجرای الگوریتم که پس از آن آخرین گره حسگر می‌میرد.
مقدار انرژی گره‌ها در هر دور (TREPR)	مقدار انرژی باقی‌مانده‌ی گره‌های حسگر در هر دور از اجرای الگوریتم.
تعداد گره‌های زنده در هر دور (NANPR)	تعداد گره‌های حسگر زنده پس از هر دور اجرا.

جدول ۳. تنظیم پارامترهای الگوریتم مسیریابی پیشنهادی.

نام پارامتر	شرح پارامتر	مقدار
MaxIter	بیشینه‌ی تعداد تکرار الگوریتم	۵۰
PopSize (PopSFLA + PopFFA)	اندازه‌ی جمعیت افراد	۲۰ (۱۰ + ۱۰)
α in Eq. (۶)	ضریب تغییرات تصادفی FFA در (Eq. 6)	۰/۱
β in Eq. (۶)	ضریب جذب نور برای FFA در (Eq. 6)	۰/۵
γ in Eq. (۶)	ضریب جذابیت برای FFA در (Eq. 6)	۰/۰۵
nMemeplex	دامنه‌ی جهش یکنواخت برای SFLA	۲
nPopMemeplex	استاندارد نلدر - مید برای SFLA	۵
d_{mul}	مسافت آستانه برای اجرای مسیریابی چندگامی	۱
$w_{c1}, w_{c2}, w_{c3}, w_{c4}$	اوزان انتخاب شده برای تابع برازندگی چندهدفه رابطه‌ی ۱۰	۰/۴, ۰/۲۵, ۰/۱۵, ۰/۲
$w_{r1}, w_{r2}, w_{r3}, w_{r4}$	اوزان انتخاب شده برای تابع برازندگی چندهدفه رابطه‌ی ۱۰	۰/۳, ۰/۲۵, ۰/۲, ۰/۲۵

برابر ۰/۲ در نظر گرفته شود. پارامترهای مربوطه به هم‌بندی شبکه در جدول ۴ دیده می‌شود.

۳.۶. شبیه‌سازی و نتایج

در این بخش شبیه‌سازی و ارائه نتایج در دو مرحله انجام می‌شود. ابتدا شبیه‌سازی برای مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم‌های پایه انجام شده و در مرحله‌ی

انجام می‌شود: تعداد ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ گره حسگر به طور تصادفی در نواحی به ترتیب به ابعاد $m(100 \times 100)$ ، $m(200 \times 200)$ و $m(300 \times 300)$ استقرار یافته‌اند. برای حذف خطای آزمایشی ناشی از ماهیت تصادفی الگوریتم، هر آزمایش برای هر سناریوی WSN پنج مرتبه تکرار شد. چاهک در مرکز شبکه واقع شده است. تمام گره‌ها دارای انرژی اولیه‌ی ۰/۵ ژول هستند. مدل انرژی رادیویی برای همه‌ی ارتباطات فرض شده است. ادغام داده‌ها با توجه به مدل ادغام ارائه شده در بند ۲.۳ انجام می‌شود، با این فرض که ضریب ادغام داده‌ها (R_{agg}) در ارتباطات

جدول ۴. پارامترهای شبکه در سناریوهای مختلف.

ردیف	پارامترهای شبکه	مقدار
۱	مساحت ناحیه اول برای WSN های ۱ تا ۵	$(100m \times 100m)$
۲	مساحت ناحیه دوم برای WSN های ۶ تا ۱۰	$(200m \times 200m)$
۳	مساحت ناحیه سوم برای WSN های ۱۱ تا ۱۵	$(300m \times 300m)$
۴	تعداد گره های حسگر برای WSN های ۱ تا ۵	۱۰۰
۵	تعداد گره های حسگر برای WSN های ۶ تا ۱۰	۱۵۰
۶	تعداد گره های حسگر برای WSN های ۱۱ تا ۱۵	۲۰۰
۷	تعداد خوشه ها C	$1 \times N$
۸	درصد انتخاب سرخوشه ها P_c	۰٫۲
۱۰	انرژی اولیه گره های حسگر E_0	$5J$
۱۱	مصرف انرژی در مدارهای الکترونیک E_{elec}	$50nJ/bit$
۱۲	مصرف انرژی در مدل فضای آزاد E_{fs}	$100pJ/bit/m^2$
۱۳	مصرف انرژی در مدل چند مسیری E_{mp}	$0.113pJ/bit/m^2$
۱۴	فاصله ای آستانه d_0	$87/m$
۱۵	ضریب ادغام R_{agg}	۰٫۲

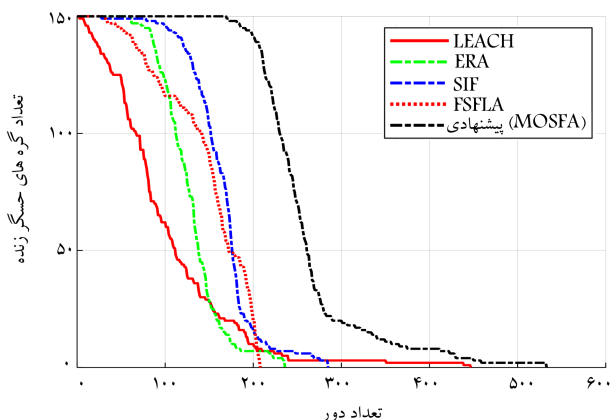
جدول ۵. مقایسه ای عملکرد الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم های پایه از لحاظ شاخص های اصلی طول عمر در پنج شبکه ای حسگر سناریوی ۱.

شماره	MOFSA			FFA			SFLA			WSN
	LND	HND	FND	LND	HND	FND	LND	HND	FND	
۱	۴۰۷	۵۳۱	۸۱۱	۳۶۷	۵۱۷	۸۰۹	۳۳۷	۵۲۴	۷۳۱	
۲	۴۰۸	۵۲۶	۷۹۳	۳۷۸	۵۳۹	۸۰۳	۳۳۵	۵۲۵	۷۲۷	
۳	۳۹۷	۵۲۹	۷۸۰	۳۶۴	۵۲۸	۷۹۰	۳۲۱	۵۰۶	۷۳۶	
۴	۴۱۱	۵۲۴	۸۱۱	۴۰۶	۵۳۷	۷۹۳	۳۴۱	۵۰۹	۷۴۱	
۵	۳۹۸	۵۲۸	۸۱۰	۳۸۱	۵۲۹	۷۸۶	۳۳۸	۵۱۱	۷۳۳	
میانگین	۴۰۴٫۲	۵۲۷٫۶	۸۰۱	۳۷۹٫۲	۵۳۰	۷۹۶٫۲	۳۳۸٫۵	۵۱۵	۷۳۳٫۶	

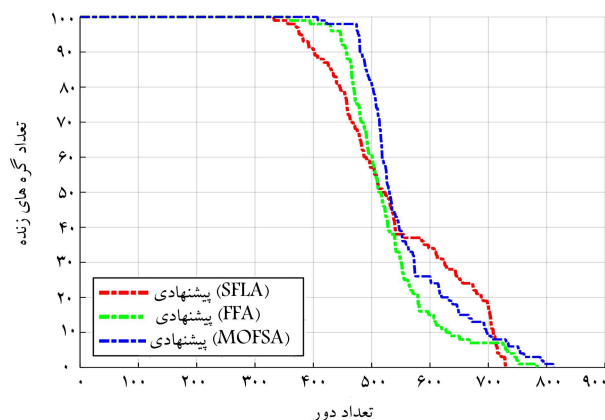
شکل ۹ مقایسه ای عملکرد آنها را برای شاخص NANPR و شکل ۱۰ نمودار مقایسه ای تعداد بسته های دریافتی در چاهک را (به طور متوسط برای پنج شبکه ای حسگر) نشان می دهد. بر اساس نتایج به دست آمده، می توان نتیجه گرفت که الگوریتم ترکیبی عملکرد الگوریتم های SFLA و FFA را به خصوص در مورد شاخص FND بهبود داده است.

در ادامه ای این قسمت، سه سناریوی جدید با تعداد متفاوتی از گره های حسگر برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی و مقایسه با پروتکل های مسیریابی موجود شبیه سازی می شود. در سناریوهای این بخش اندازه ای شبکه های حسگر بی سیم در سه مقیاس کوچک، متوسط و بزرگ در نظر گرفته شده است تا اطمینان نتایج افزایش یابد. برای مطالعه دقیق تر عملکرد الگوریتم پیشنهادی MOFSA، پروتکل های LEACH، EAR، SIF و FSLFA در نظر گرفته شده اند. شکل های ۱۱ تا ۱۳ مقایسه عملکرد الگوریتم پیشنهادی از نقطه نظر شاخص NANPR را برای سه

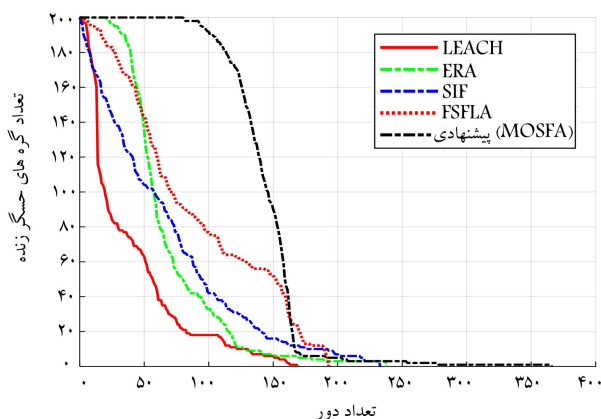
بعد عملکرد این الگوریتم ترکیبی با عملکرد پروتکل های موجود و اشاره شده در ابتدای بند ۶ مد نظر خواهد بود. لذا از آن جا که روش خوشه بندی ترکیبی پیشنهادی MOFSA، حاصل ترکیب الگوریتم های SFLA و FFA است، عملکرد آن باید با الگوریتم های پایه ای SFLA و FFA به طور جداگانه از نظر شاخص FND، HND و LND بررسی شود. هر سه الگوریتم فراابتکاری از فرایند خوشه بندی مشابه با پارامترهای مشابه در جدول ۳ استفاده می کنند. اندازه جمعیت در SFLA و FFA مقدار ۲۰ در نظر گرفته شده است. لذا به منظور انجام مقایسه ای منصفانه بین روش های مختلف با پیچیدگی زمانی مشابه اندازه جمعیت در نیز MOFSA $(20 = 10 + 10)$ است. بدیهی است برای WSN های ۱ تا ۵ با اندازه ای کوچک، این الگوریتم ها تنها در خوشه بندی و برای انتخاب گره های سرخوشه به کار می رود و الگوریتم مسیریابی چندگامی در این سناریو تأثیری ندارد. نتایج شبیه سازی انجام شده روی پنج WSN سناریوی ۱ در جدول ۵ خلاصه شده است. علاوه بر این،



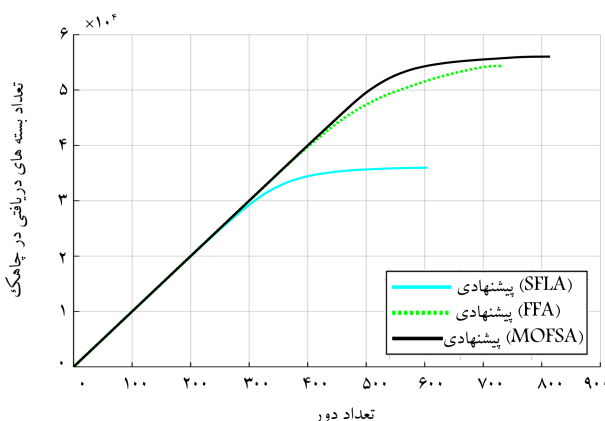
شکل ۱۲. مقایسه میانگین شاخص تعداد گره‌های زنده برحسب دور سناریوی ۲.



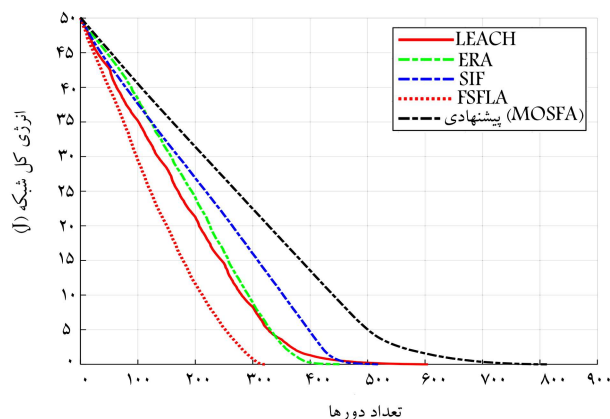
شکل ۹. مقایسه میانگین شاخص تعداد گره‌های زنده برحسب دور سناریوی (الگوریتم‌های پایه).



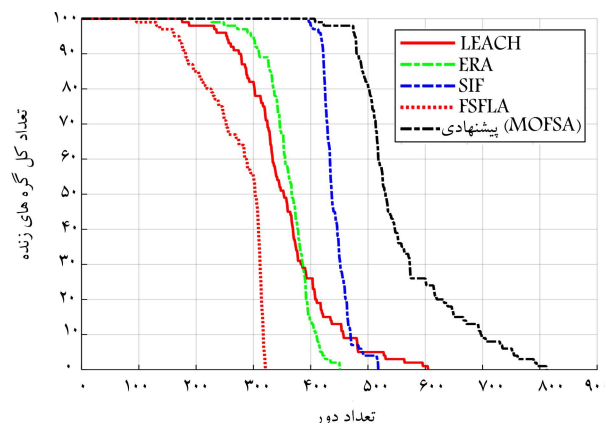
شکل ۱۳. مقایسه میانگین شاخص تعداد گره‌های زنده برحسب دور سناریوی ۳.



شکل ۱۰. نمودار مقایسه تعداد بسته‌های دریافتی در چاهک سناریوی ۱ (الگوریتم‌های پایه).



شکل ۱۴. مقایسه میانگین شاخص انرژی باقی‌مانده کل در سناریوی ۱.

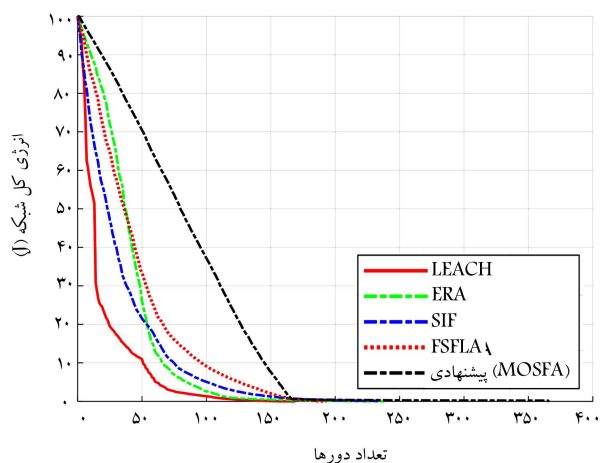


شکل ۱۱. مقایسه میانگین شاخص تعداد گره‌های زنده برحسب دور سناریوی ۱.

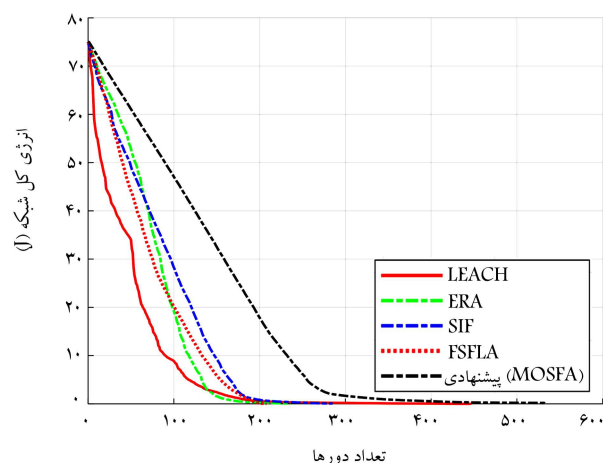
۴.۶. بررسی پارامترهای مدل

به منظور آگاهی از تأثیر تغییر پارامترهای ورودی بر عملکرد مدل پیشنهادی، محققین علاوه بر بررسی تأثیر پارامترهای ورودی الگوریتم ترکیبی شامل تعداد ذرات و تعداد گردش‌های الگوریتم، سایر پارامترهای شبکه از جمله تعداد خوشه‌ها، انرژی اولیه هرگره حسگر، طول بسته‌های داده‌ای ارسالی و میزان تجمع داده‌ها را آزموده نتایج را ارائه کرده‌اند. در این بررسی بازه‌های اولیه برای شروع کار الگوریتم از نظر خبرگان

سناریو نشان می‌دهد. علاوه بر این نتایج محاسبه‌ی شاخص‌های FND، HND و LND در جداول شماره ۶ تا ۸ بیان‌گر بهبود این شاخص‌ها در سناریوهای مورد بررسی هستند. در جدول‌های ۹ تا ۱۱ میزان ترافیک عبوری کل از شبکه و ترافیک دریافت شده در چاهک ثبت شده است. نهایتاً در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ نیز میانگین انرژی باقی‌مانده‌ی کل در شبکه‌ها (TREPR) برای این سناریوها نشان داده شده است.



شکل ۱۶. مقایسه شاخص میانگین انرژی باقی مانده کل در سناریوی ۳.



شکل ۱۵. مقایسه میانگین شاخص انرژی باقی مانده کل در سناریوی ۲.

جدول ۶. مقایسه شاخص های طول عمر برای سناریوی ۱.

WSN#	LEACH			ERA			SIF			FSFLA			الگوریتم (MOFSA)		
	LND	HND	FND	LND	HND	FND	LND	HND	FND	LND	HND	FND	LND	HND	FND
۱	۱۷۵	۳۵۴	۶۰۶	۲۲۶	۳۶۷	۴۵۲	۳۹۶	۴۳۷	۵۱۹	۹۵	۳۰۴	۳۲۲	۴۰۷	۵۳۱	۸۱۳
۲	۱۷۰	۳۵۰	۵۹۱	۲۲۰	۳۷۰	۴۲۷	۳۹۳	۴۳۵	۵۱۶	۱۲۱	۳۱۵	۳۳۰	۴۰۲	۵۲۸	۸۱۰
۳	۱۷۷	۳۴۸	۵۷۸	۲۲۷	۳۷۵	۴۵۹	۴۰۱	۴۴۱	۵۲۱	۱۳۸	۳۰۵	۳۳۱	۴۱۱	۵۳۸	۸۱۵
۴	۱۷۲	۳۶۰	۵۹۲	۲۱۹	۳۶۴	۴۱۴	۳۹۷	۴۴۰	۵۰۷	۱۳۵	۳۰۶	۳۴۰	۴۰۴	۵۳۰	۸۰۴
۵	۱۶۸	۳۴۹	۵۹۴	۲۲۴	۳۶۲	۴۲۱	۳۸۹	۴۳۱	۳۹۱	۵۰۱	۲۹۴	۳۲۰	۳۹۸	۵۲۸	۷۹۸
میانگین	۱۷۲٫۴	۳۵۲٫۲	۵۹۲٫۲	۲۲۳٫۲	۳۶۷٫۶	۴۳۴٫۶	۳۹۵٫۲	۴۲۸٫۸	۵۱۲٫۸	۱۲۲٫۶	۳۰۴٫۸	۳۲۸٫۶	۴۰۴٫۴	۵۳۱	۸۰۸

جدول ۷. مقایسه شاخص های طول عمر برای سناریوی ۲.

WSN#	LEACH			ERA			SIF			FSFLA			الگوریتم (MOFSA)		
	LND	HND	FND	LND	HND	FND	LND	HND	FND	LND	HND	FND	LND	HND	FND
۱	۷	۹۰	۴۴۸	۶۰	۱۲۸	۲۲۷	۲۷	۱۷۰	۲۸۶	۲۹	۱۵۸	۲۰۹	۱۶۹	۲۴۸	۵۳۴
۲	۸	۸۹	۴۴۰	۶۵	۱۳۰	۲۴۱	۵۷	۱۷۵	۲۸۰	۳۵	۱۵۱	۲۰۵	۱۶۴	۲۴۳	۵۳۰
۳	۱۱	۹۵	۴۶۵	۵۹	۱۳۷	۲۲۹	۳۹	۱۶۸	۲۸۵	۴۳	۱۵۹	۲۱۲	۱۷۱	۲۵۳	۵۴۱
۴	۱۰	۹۷	۴۶۲	۷۱	۱۳۵	۲۳۶	۴۳	۱۸۱	۲۸۶	۴۷	۱۶۱	۲۲۱	۱۷۳	۲۵۸	۵۴۶
۵	۱۴	۱۰۱	۴۷۰	۷۷	۱۳۸	۲۴۰	۵۰	۱۷۴	۲۹۱	۵۱	۱۶۳	۲۲۶	۱۷۸	۲۶۱	۵۴۹
میانگین	۱۰	۹۴٫۴	۴۵۷	۶۶٫۴	۱۳۳٫۶	۲۳۶٫۶	۴۳٫۲	۱۷۳٫۶	۲۸۵٫۶	۴۱	۱۵۸٫۴	۲۱۴٫۶	۱۷۱	۲۵۲٫۶	۵۴۰

جدول ۸. مقایسه شاخص‌های طول عمر برای سناریوی ۳.

الگوریتم (MOFSA)			FSFLA			SIF			ERA			LEACH			WSN#
LND	HND	FND	LND	HND	FND	LND	HND	FND	LND	HND	FND	LND	HND	FND	
۹۲۲	۱۳۶	۳۱	۳۱۹	۸۵	۶	۳۶۸	۷۸	۲	۲۳۸	۷۹	۱۳	۶۰۵	۳۵	۴	۱
۸۷۸	۱۴۳	۳۳	۳۳۳	۸۲	۴	۳۵۷	۸۲	۴	۲۳۲	۸۳	۱۱	۵۸۲	۳۴	۴	۲
۹۴۶	۱۳۴	۳۲	۳۲۲	۸۱	۶	۳۷۳	۸۰	۱	۲۴۶	۷۶	۱۲	۶۱۰	۳۳	۲	۳
۹۱۹	۱۳۷	۳۴	۳۰۴	۸۱	۵	۳۶۷	۷۴	۳	۲۴۳	۸۳	۱۳	۶۳۰	۳۵	۲	۴
۸۸۵	۱۴۰	۳۱	۳۲۰	۸۴	۶	۳۶۱	۸۱	۲	۲۳۹	۸۱	۱۴	۶۳۱	۳۷	۴	۵
۹۱۰	۱۳۸	۳۲,۲	۳۱۹,۶	۸۲,۶	۵,۲۵	۳۶۵,۲	۷۹	۲,۴	۲۳۹,۴	۸۰,۴	۱۲,۶	۶۱۱,۶	۳۴,۸	۳	میانگین

جدول ۹. مقایسه شاخص میزان ترافیک دریافتی در چاهک برای سناریوی ۱.

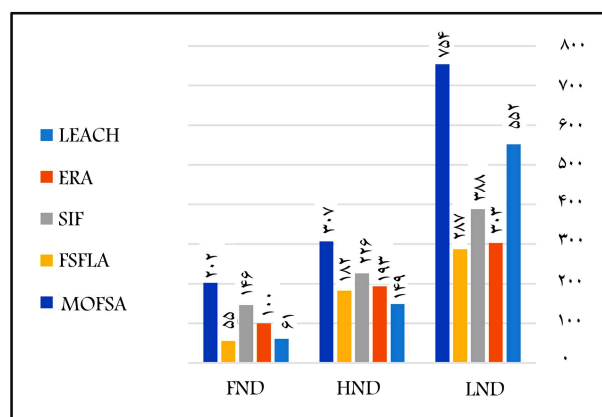
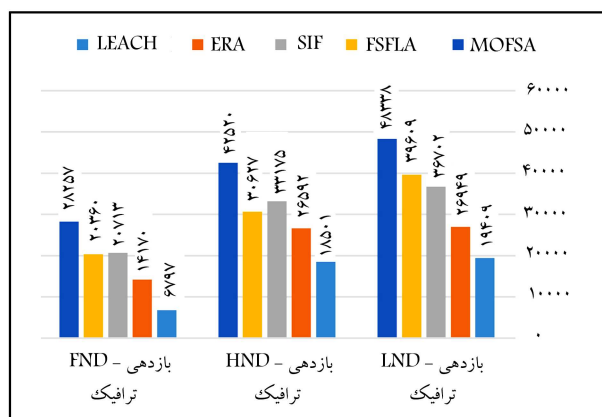
الگوریتم (MOFSA)			FSFLA			SIF			ERA			LEACH			WSN#
LND	HND	FND	LND	HND	FND	LND	HND	FND	LND	HND	FND	LND	HND	FND	
۵۶۱۱۹	۵۱۵۲۹	۴۰۷۰۰	۴۷۳۴۹	۲۶۸۲۷	۹۵۰۰	۴۴۴۰۴	۴۳۱۱۷	۳۹۶۰۰	۳۶۴۱۴	۳۵۰۰۶	۲۲۶۰۰	۳۵۹۷۶	۳۲۷۶۷	۱۷۵۰۰	۱
۵۵۸۹۰	۵۱۲۱۶	۴۰۲۰۰	۴۸۵۵۰	۲۷۷۲۰	۱۲۱۰۰	۴۴۳۷۳	۴۲۶۳۹	۳۹۳۰۰	۳۶۲۹۵	۳۵۱۵۰	۲۲۰۰۰	۳۵۴۶۰	۳۲۵۵۰	۱۷۰۰۰	۲
۵۶۲۳۵	۵۲۷۲۴	۴۱۱۰۰	۴۸۹۹۸	۲۶۸۴۰	۱۳۸۰۰	۴۴۸۰۶	۴۳۲۱۸	۴۰۱۰۰	۳۶۷۲۰	۳۵۶۲۵	۲۲۷۰۰	۳۴۶۸۰	۳۲۳۶۴	۱۷۷۰۰	۳
۵۵۰۶۲	۵۱۷۴۴	۳۹۸۰۰	۴۷۰۴۰	۲۵۸۷۲	۱۲۴۰۰	۴۳۰۸۶	۴۳۶۰۲	۳۸۹۰۰	۳۵۷۸۵	۳۴۳۹۰	۲۲۴۰۰	۳۵۶۴۰	۳۲۴۵۷	۱۶۸۰۰	۵
۵۵۷۵۶	۵۱۸۳۰	۴۰۴۴۰	۴۸۳۸۳	۲۶۸۳۷	۱۲۲۶۰	۴۴۰۵۴	۴۳۱۳۹	۳۹۵۲۰	۳۶۰۸۰	۳۴۹۵۰	۲۲۳۲۰	۳۵۴۵۵	۳۲۷۸۳	۱۷۲۴۰	میانگین

جدول ۱۰. مقایسه شاخص میزان ترافیک دریافتی در چاهک برای سناریوی ۲.

الگوریتم (MOFSA)			FSFLA			SIF			ERA			LEACH			WSN#
LND	HND	FND	LND	HND	FND	LND	HND	FND	LND	HND	FND	LND	HND	FND	
۳۸۷۰۹	۳۵۰۷۸	۲۵۳۵۰	۲۲۲۶۸	۲۰۰۵۶	۴۳۵۰	۲۴۹۳۲	۲۳۲۰۴	۴۰۵۰	۲۴۹۳۲	۱۷۳۳۰	۹۰۰۰	۱۴۹۹۱	۱۰۰۸۷	۱۰۵۰	۱
۳۸۴۱۹	۳۴۳۷۰	۲۴۴۵۰	۲۱۸۴۱	۱۹۱۶۸	۵۲۵۰	۲۴۴۰۸	۲۳۸۸۶	۸۵۵۰	۲۵۳۵۲	۱۷۵۵۰	۹۷۵۰	۱۴۷۲۳	۱۰۵۷۴۹	۱۲۰۰	۲
۳۹۲۱۶	۳۵۷۸۵	۲۵۶۵۰	۲۲۱۵۵	۲۰۱۸۲	۶۴۵۰	۲۴۷۹۵	۲۲۹۳۱	۵۸۵۰	۲۴۰۴۵	۱۸۴۹۵	۸۸۵۰	۱۵۵۷۷	۱۰۶۴۰	۱۶۵۰	۳
۳۹۵۷۸	۳۶۴۹۲	۲۵۹۵۰	۲۳۰۹۵	۲۰۴۳۶	۷۰۵۰	۲۴۸۸۱	۲۴۷۰۵	۶۴۵۰	۲۴۷۸۰	۱۸۲۲۵	۱۰۶۵۰	۱۵۴۷۷	۱۰۸۶۴	۱۵۰۰	۴
۳۹۷۹۶	۳۶۹۱۶	۲۶۷۰۰	۲۳۵۰۴	۲۰۶۸۹	۷۶۵۰	۲۵۳۱۷	۲۳۶۶۵	۷۵۰۰	۲۵۲۰۰	۱۸۶۳۰	۱۱۵۵۰	۱۵۷۴۵	۱۱۳۱۲	۲۱۰۰	۵
۳۹۱۴۳	۳۵۷۲۸	۲۵۶۲۰	۲۲۵۷۲	۲۰۱۰۶	۶۱۵۰	۲۴۸۶۶۶	۲۳۶۷۸	۶۴۸۰	۲۴۸۶۱	۱۸۰۴۶	۹۹۶۰	۱۵۳۰۲	۱۰۵۷۴	۱۵۰۰	میانگین

جدول ۱۱. مقایسه شاخص میزان ترافیک دریافتی در چاهک برای سناریوی ۳.

WSN#	LEACH			ERA			SIF			FSFLA			الگوریتم (MOFSA)		
	LND	HND	FND	LND	HND	FND	LND	HND	FND	LND	HND	FND	LND	HND	FND
۱	۱۱۵۰۶	۵۳۸۶	۶۰۰	۱۷۴۱۲	۱۳۶۷۰	۴۰۰	۱۸۶۵۵	۱۲۲۲۷	۴۰۰	۲۳۵۶۷	۱۳۳۲۳	۶۰۰	۲۲۸۵۷	۲۲۸۵۷	۲۹۶۴۶
۲	۱۱۰۶۳	۵۱۶۴	۸۰۰	۱۷۸۸۱	۱۳۲۴۱	۸۰۰	۱۸۷۵۳	۱۲۴۶۲	۸۰۰	۲۳۲۷۴	۱۳۵۰۶	۲۰۰	۲۲۶۶۷	۲۲۶۶۷	۲۸۴۷۳
۳	۱۱۴۶۰	۵۴۰۱	۴۰۰	۱۷۲۵۹	۱۴۲۰۲	۲۴۰۰	۱۸۶۴۹	۱۲۷۰۶	۲۰۰	۲۳۷۰۱	۱۲۷۶۴	۲۰۰	۲۲۹۲۵	۲۲۹۲۵	۳۱۰۲۰
۴	۱۱۹۱۶	۵۵۷۹	۴۰۰	۱۶۵۶۶	۱۳۶۸۲	۲۶۰۰	۱۸۲۷۳	۱۱۷۵۶	۶۰۰	۲۴۴۴۷	۱۳۰۵۰	۱۰۰۰	۲۲۵۷۰	۲۲۵۷۰	۲۹۹۴۱
۵	۱۱۸۳۴	۵۳۶۸	۸۰۰	۱۸۱۲۴	۱۴۳۳۵	۲۸۰۰	۱۸۳۰۹	۱۲۲۷۲	۴۰۰	۲۲۶۵۳	۱۳۴۱۴	۶۰۰	۲۳۸۷۱	۲۳۸۷۱	۳۱۰۵۱
میانگین	۱۱۵۵۶	۵۳۸۰	۶۰۰	۱۷۴۴۸	۱۳۸۲۶	۲۵۲۰	۱۸۵۲۸	۱۲۲۸۵	۴۸۰	۲۳۵۳۰	۱۳۲۱۱	۵۲۰	۲۲۹۸۰	۲۲۹۸۰	۳۰۰۲۶



شکل ۱۷. مقایسه‌ی مقادیر میانگین شاخص FND برای همه‌ی شبکه‌های حسگر.

شکل ۱۸. مقایسه‌ی میانگین شاخص بازدهی ترافیک دریافتی در چاهک برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم.

و متخصصین اخذ شده است. لذا در این جا به حکم ایجاز از ذکر آن‌ها خودداری می‌شود.

۷. نتیجه‌گیری

در این نوشتار یک الگوریتم فراابتکاری ملهم از طبیعت ترکیبی جدید به نام MOFSA به‌عنوان پروتکل مسیریابی خوشه‌بندی شده مبتنی بر کاربرد برای WSN ها ارائه شد. این الگوریتم از ترکیب دو الگوریتم فراابتکاری شامل الگوریتم کرم شب‌تاب (FFA) و الگوریتم جهش قورباغه (SFLA) را به طور موازی با هدف به‌کارگیری هم‌زمان مزایای هر دو الگوریتم باز طراحی شد. همچنین دو تابع چندهدفه‌ی جدید برای خوشه‌بندی انرژی کارآمد و مسیریابی چندگامی پیشنهاد شده‌اند که پارامترهای مختلف شبکه را در نظر می‌گیرد. پارامترهای قابل کنترل پروتکل پیشنهادی را می‌توان برای رسیدن به بهترین عملکرد بر اساس الزامات کاربرد^{۵۸} و تعریف طول عمر، سازگارانه^{۵۹} تنظیم کرد. شبیه‌سازی برای تعداد ۱۵ شبکه حسگر بی‌سیم در اندازه‌ها و در سناریوهای مختلف انجام شده است. نتایج حاصله بهبود عملکرد معنی‌دار پروتکل MOFSA را از لحاظ انرژی مصرفی، طول عمر شبکه و بهره‌وری ترافیک ارسالی به چاهک را در مقایسه با روش‌های LEACH، ERA، SIF و FSFLA تأیید کرد. این بهبود به‌خصوص با افزایش ابعاد فضای شبکه به دلیل استفاده از روش مسیریابی چندگامی و

۵.۶. بحث و جمع‌بندی نتایج

در انتهای این بخش، مقادیر میانگین شاخص‌های طول عمر شبکه‌ی شکل ۱۷ و ترافیک دریافتی در چاهک شکل ۱۸ برای تمام ۱۵ شبکه‌ی حسگر مقایسه می‌شود. با توجه به مقادیر میانگین در شکل ۱۷، الگوریتم پیشنهادی MOFSA توانسته است شاخص FND را ۲۳٪ نسبت به LEACH، ۱۰٪ در مقایسه با ERA، ۳۸٪ در مقایسه با SIF و ۲۶٪ در مقایسه با FSFLA، طولانی‌تر کند. علاوه بر این، MOFSA میانگین مقادیر HND را ۱۰۶٪ نسبت به LEACH، ۵۹٪ در مقایسه با ERA، ۳۵٪ در مقایسه با SIF و ۶۸٪ در مقایسه با FSFLA بهبود می‌دهد. به طور مشابه، شاخص LND تا ۳۶٪ در مقایسه با LEACH، ۱۴۸٪ در مقایسه با ERA، ۹۴٪ در مقایسه با SIF و ۱۶۲٪ در مقایسه با FSFLA، بهبود می‌بخشد. با مشاهده‌ی میانگین بازده ترافیک ارسالی کل به چاهک در شکل ۱۸ و براساس نتایج به دست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که MOFSA می‌تواند به طور مؤثر مصرف انرژی گره‌ها را کمینه کند و در نتیجه، طول عمر شبکه و همچنین توان مصرفی کل شبکه را بهبود بخشد.

تقدیر و تشکر

لازم است از پیگیری و همکاری اساتید محترم بخش مهندسی صنایع و کامپیوتر پردیس فنی مهندسی دانشگاه یزد که این پژوهش نتیجه‌ی همکاری آنها به‌عنوان بخشی از پروژه‌ی دکتراست، قدردانی به عمل آید.

برای شاخص طول عمر FND چشم‌گیر است. اگرچه MOFSA، قادر به تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده برای سازگاری با کاربردهای جدید است، این پارامترها باید به‌صورت دستی تنظیم شود. لذا به‌عنوان کار آتی، قصد داریم یک روش خودکار برای تنظیم پارامترهای قابل کنترل MOFSA با توجه به کاربرد خاص ارائه کنیم.

پانوشتها

1. micro-electro-mechanical systems (MEMS)
2. sink (base-station)
3. self awareness
4. self configurability
5. fault tolerant
6. micro-sensors
7. next generation networks (NGN)
8. smart living
9. internet of things (IoT)
10. process automation
11. clustering
12. energy efficeint
13. scalable
14. cluster head
15. single - hop
16. multi - hop
17. forwarders
18. data aggrigation
19. swarm intelligence
20. soft computing
21. metaheuristics
22. fitness function
23. application specific
24. forwarder node
25. complete(Exact) search
26. heuristic search
27. random search
28. polynomial time complexity
29. residual energy
30. advertisment message
31. mamdani fuzzy inference system
32. fuzzy rule- base table
33. simulated annealing
34. Frog Leaping Algorithm
35. single-point crossover
36. anti-predator
37. particle swarm optimization (PSO)
38. hetogeneous networks
39. free space model
40. multipath fading channels
41. modulation
42. time divition multiple access (TDMA)
43. carrier sense multiple access (CSMA)
44. first node dies
45. half nodes die
46. last node dies
47. bioluminescence
48. flashing
49. Lévy Flight

50. memetic algorithms
51. shuffling
52. Lévy Distribution
53. particle swarm optimization (PSO)
54. memetic algorithms
55. rollette wheel selection (RWS)
56. backward directed backbone (BDB)
57. application spesific
58. application requirments
59. adaptively

منابع (References)

1. Sohraby, K., Minoli, D. and Znati, T., *Wireless Sensor Networks Technology, Protocols, and Applications*, ISBN 978-0-471-74300-2, John Wiley & Sons Ltd (2007).
2. Khakestani, F. and balochian, S. "A Survey of military application of wireless sensor networks for soldiers", *Int. J. of Engineering and Computer Science*, **4**(7) , pp.13205-13210 (2015).
3. Minaie, A. and Sanati-Mehrzy, A. "Application of wireless sensor networks in health care system", *120th Annual Conference & Exposition* (2013).
4. Priyanka, P.K., Deepali, V.G., Sneha, R.K. and et al. "Wireless sensor network application in agriculture for monitoring agriculture production process", *Int. J. of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)*, **5**(5) , pp.1302-1305(2016).
5. Tsai, H.W., Chu, CH.P. and Chen, TZ.Sh. "Mobile object tracking in wireless sensor networks", *Int. J. of Computer Communications*, **30**(8), pp.1811-1825 (2007).
6. Barzin, A., Sadeghieh, A., Khademi Zare, H. and et al. "Hybrid bio-inspired clustering algorithm for energy efficient wireless sensor networks", *Journal of Information Technology Management*, **11**(1), pp. 76-101 (2019). DOI:10. 22059/jitm. 2019. 280639. 2354
7. Abbasi, A.A. and Younis, M. "A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks", *Computer Communications*, **30**, pp. 2826-2841 (2007).
8. Curry, R.M. and Smith J.C. "A survey of optimization algorithms for wireless sensor network lifetime maximization", *Int. J. of Computers & Industrial Engineering*, **101**, pp. 145-166 (2016).
9. Bahadorani, M. and Jamali, Sh. "An energy-efficient routing protocol for mobile sinks in wireless sensor net-

- works by using the radio range,” *Sharif Journal of Industrial Engineering and Management*, (In Persian) (2018).
10. Heinzelman, W., Chandrakasan, A. and Balakrishnan, H. “Energy-efficient communication protocol for wireless micro sensor networks”, *In Proceeding of the Hawaii International Conference on Systems Science*, **8** (2000).
11. Jia, J., He, Z., Kuang, J. and et al. “An Energy Consumption balanced clustering algorithm for wireless sensor network”, *In Proceedings of the IEEE International Conferences* (2010).
12. Amgoth, T. and Jana, P.K. “Energy-aware routing algorithms for wireless sensor networks”, *Computers & Electrical Engineering*, **41**, pp. 357-367 (2015).
13. Ran, G., Zhang, H. and Gong, S. “Improving on LEACH protocol of wireless sensor networks using fuzzy logic”, *Journal of information and Computational Science*, **7** (2010).
14. Kim, J.M., Park, S.H., Han, Y.J. and et al. “CHEF: cluster head election mechanism using fuzzy logic in wireless sensor networks”, *In Proceeding of the 10th International Conference on Advanced Communication Technology*, pp. 654-659 (2008).
15. Sert, S.A, Bagci, H. and Yazici, A. ” MOFCA: multi-objective fuzzy clustering algorithm for wireless sensor networks”, *Applied Soft Computing*, **30**, pp. 151-165 (2015).
16. Zahedi, Z.M., Akbari, R., Shokouhifar, M. and et al. “Swarm intelligence based fuzzy routing protocol for clustered wireless sensor networks”, *Expert Systems with Applications*, **55**, pp. 313-328 (2016).
17. Tripathi, M., Gaur, M.S, Laxmi, V. and et al. “Energy efficient LEACH-C protocol for wireless sensor networks”, *Third International Conference on Computational Intelligence and Information Technology (CIIT)* (2013).
18. Abo-Zahhad, M., Ahmed, S.M., Nabil, S. and et al. “A New energy-efficient adaptive clustering protocol based on genetic algorithm for improving the lifetime and the stable period of wireless sensor networks”, *International Journal of Energy, Information and Communications*, **5**(3), pp. 47-72 (2014).
19. Ramezani, F. and khodaei, Sh. “Shuffled frog leaping algorithm based clustering algorithm for mobile Ad hoc networks”, *Semantic scholar* (2013).
20. Anandamurugan, S. and Abirami, T. “Antipredator adaptation shuffled frog leaping algorithm to improve network life time in wireless sensor network”, *Wireless Personal Communications*, **94**(4), pp. 2031-2042 June (2017).
21. Jabeura, N. “A firefly-inspired micro and macro clustering approach for wireless sensor networks”, *The seventh International Conference on Emerging Ubiquitous Systems and Pervasive Networks (EUSPN)* (2016).
22. Boutekkouk, F., Taibi, F. and Meziani, Kh. “A hybrid approach to extend the lifetime of heterogeneous wireless sensor networks”, *The Sixth International Conference on Emerging Ubiquitous Systems and Pervasive Networks* (2015).
23. Heinzelman, W. , Chandrakasan, A. and Balakrishnan, H. “An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks”, *IEEE Transactions on Wireless Communication*, **1**(4), Oct (2002).
24. Oladimeji, M.O., Turkey, M. and Dudley, S. “HACH: heuristic algorithm for clustering hierarchy protocol in wireless sensor networks”, *Applied Soft Computing*, **55**, pp. 452-461 (2017).
25. Gupta, G. and Jha, S. “Integrated clustering and routing protocol for wireless sensor networks using cuckoo and harmony search based metaheuristic techniques”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **68**, pp 101-109 (2018).
26. Dietrich, I. and Dressler, F. “On the lifetime of wireless sensor networks”, *ACM Transactions on Sensor Networks*, **5**, pp. 1-38 (2009).
27. Yang, X. Sh., *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*, Second Edition. , Luniver press, University of Cambridge, UK. (2010).
28. Fister, I., Fister Jr., Yang, X.-S. and et al. “A comprehensive review of firefly algorithms”, *Swarm and Evolutionary Computation*, **13**, pp. 34-46 (2013).
29. Eusuff, H., Lansey, M.K. and Pasha, F. “Shuffled frog-leaping algorithm: a memetic meta-heuristic for discrete optimization”, *Int. J. of Engineering Optimization*, **38**(2), pp. 129-154 (2006).
30. Tang, D., Yang, J., Dong, Sh. and et al. “A levy flight-based shuffled frog-leaping algorithm and its applications for continuous optimization problems”, *Int. J. of Applied Soft Computing* (2016).
31. Xunli, F.A.N and Feiefi, D.U. “Shuffled frog leaping algorithm based unequal clustering strategy for wireless sensor networks”, *Int. J. of Applied Mathematics*, **9**(3), pp. 1415-1426 (2015).
32. Mukhdeep, S.M. and Singh, S.B. “Firefly algorithm based clustering technique for wireless sensor networks”, *Int. Conf. of WiSPNET*, IEEE Press (2016).
33. Zhang, L., Liu, L., Yang, Xi-She. and et al. “A novel hybrid firefly algorithm for global optimization”, *Plosone — DOI:10. 1371/Journal. Pone. 0163230* (2016).
34. Fanian, F. and Rafsanjani, M.K. “Memetic fuzzy clustering protocol for wireless sensor networks: shuffled frog leaping algorithm”, *Applied Soft Computing*, **71**, pp. 568-590 (2018).
35. Zenga, B. and Dong, Y. ” An improved harmony search based energy-efficient routing algorithm for wireless sensor networks”, *Int. J. of Applied Soft Computing*, **41**, pp. 135-147 (2016).
36. Barzin, A., Sadeghieh, A., Khademi Zareh, H. and et al. “Hybrid swarm intelligence-based clustering algorithm for energy management in wireless sensor networks”’ *Journal of Industrial and Systems Engineering*, **12**(3), pp. 78-106 (2019).