Journal of Soft Computing and Information Technology (JSCIT)
Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
Journal Homepage: jscit.nit.ac.ir
Volume 12, Number 4, Winter 2023, pp. 23-38
Received: 11/22/2020, Revised: 10/08/2023, Accepted: 05/02/2024

Routing and Determining the Modulation Level of Nodes in Dynamic Modulation Scaling-Enabled WSNs using Genetic Algorithm

Farnaz Kheiri [1], Leili Farzinvash[2*], Hadi S. Aghdasi[3]
1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
*2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
[1]f_kheiri96@ms.tabrizu.ac.ir, [2*]l.farzinvash@tabrizu.ac.ir, [3]aghdasi@tabrizu.ac.ir

Corresponding author's address: Leili Farzinvash, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, 29 Bahman Boulevard, Tabriz, Iran.

Abstract- A critical issue in designing Wireless Sensor Networks (WSNs) is to prolong their lifetime considering the limited energy resources of the nodes. One approach to mitigate this problem is to apply Dynamic Modulation Scaling (DMS) technique. By adjusting the modulation level of the nodes, the amount of energy exhausted and the required time for data transmission are balanced. Accordingly, the energy consumption throughout the network reduces substantially. The routing problem should be considered along with modulation level adjustment to enhance performance. The existing DMS-based algorithms either did not concern the routing problem or proposed greedy and low-quality solutions. Hence, we propose an effective algorithm which comprises two phases, namely routing and determining the modulation level of nodes. The proposed scheme exploits genetic algorithm to improve performance. Simulation results demonstrate that the proposed algorithm improves the average exhausted energy by sensors, the standard deviation of consumed energy by sensors, and the network lifetime, by 72%, 88%, and 112%, respectively.

Keywords- Wireless sensor networks, Network lifetime, Dynamic modulation scaling, Routing, Genetic algorithm.

مجله علمی پژوهشی رایانش نرم و فناوری اطلاعات
دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
صفحه مجله: jscit.nit.ac.ir
جلد ۱۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۲ ، صفحه ۲۳-۳۸
دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۰۲، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۳

مسیریابی و تعیین سطح مدولاسیون گره‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مبتنی بر مقیاس بندی پویای مدولاسیون با استفاده از الگوریتم ژنتیک

فرناز خیری[۱]، لیلی فرزین‌وش[۲*]، و سیدهادی اقدسی[۳]
۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
*۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
[1]f_kheiri96@ms.tabrizu.ac.ir, [2*]l.farzinvash@tabrizu.ac.ir, [3]aghdasi@tabrizu.ac.ir

* نشانی نویسنده مسئول: لیلی فرزین‌وش، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، بلوار ۲۹ بهمن، تبریز، ایران.

چکیده- یک چالش اساسی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، افزایش طول عمر آنها با توجه به انرژی محدود گره‌ها است. برای حل این مشکل، راهکارهای مختلفی پیشنهاد شده که از آن جمله می‌توان به مکانیسم مقیاس بندی پویای مدولاسیون (DMS) اشاره نمود. با تنظیم سطح مدولاسیون گره‌ها، می‌توان بین پارامترهای انرژی مصرفی و زمان ارسال داده توازن برقرار کرده و میزان انرژی مصرفی را تا حد قابل توجهی کاهش داد. برای بیشینه نمودن کارایی شبکه‌های حسگر مبتنی بر DMS، هر دو مسئله مسیریابی و تعیین سطح مدولاسیون گره‌ها باید بررسی شوند. مقالات موجود یا مسئله مسیریابی را بررسی نکرده‌اند و یا روش‌هایی حریصانه و با کارایی پایین ارائه داده‌اند. با توجه به کاستی‌های روش‌های پیشین، در این مقاله روشی کارا مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای مسیریابی و تعیین سطح مدولاسیون گره‌ها ارائه شده که این مسائل را در دو مرحله مطالعه کرده است. براساس نتایج شبیه سازی، الگوریتم پیشنهادی به طور متوسط میانگین انرژی مصرفی گره‌ها، انحراف از معیار انرژی مصرفی گره‌ها، و طول عمر شبکه را، به ترتیب ۷۲ ٪، ۸۸ ٪، و ۱۱۲ ٪ نسبت به روش‌های پیشین بهبود داده است.

واژه‌های کلیدی: شبکه حسگر بی‌سیم، طول عمر شبکه، تعیین سطح مدولاسیون گره‌ها، مسیریابی، الگوریتم ژنتیک.

۱- مقدمه

شبکه‌های حسگر از تعداد زیادی گره‌های حسگر تشکیل شده‌اند که در محیط مستقر شده و اطلاعات محیط اطراف خود مانند دما و رطوبت را جمع‌آوری می‌کنند. اطلاعات جمع‌آوری شده توسط حسگرها به صورت مستقیم و یا از طریق گره‌های دیگر به چاهک تحویل داده می‌شود. چاهک یک ایستگاه مرکزی است که اطلاعات جمع‌آوری شده از حسگرها در آنجا پردازش شده و برای مدیریت محیط استفاده می‌شوند. شبکه‌های حسگر بستری مناسب برای مدیریت و کنترل شهرها، خانه‌ها، و محیط‌های پیرامون، فراهم می‌کنند. علاوه بر این، این شبکه‌ها در مسائل دفاعی و نظامی، مانند بررسی امکانات دشمن و نظارت بر اعمال آن‌ها نیز کاربردهای فراوانی دارند [۱].

مصرف بهینه انرژی و افزایش طول عمر شبکه یکی از اهداف مهم در توسعه شبکه‌های حسگر بی‌سیم محسوب می‌شود [۲]. انجام عملیاتی چون سنجش محیط، پردازش داده‌ها، و ارتباطات بی‌سیم، نیازمند مصرف انرژی است. با توجه به محدودیت انرژی ذخیره شده در باتری، گره‌های حسگر به خصوص گره‌های نزدیک چاهک طول عمر کوتاهی دارند. تکنیک‌های مختلفی برای افزایش طول عمر شبکه‌های حسگر معرفی شده که از آن جمله می‌توان به تجمیع داده‌های حس شده [۳]، خوشه بندی [۴-۶]، و تنظیم زمان خواب

و بیداری گره‌ها [۶، ۷]، اشاره کرد. یک روش دیگر برای کاهش مصرف انرژی حسگرها و در نتیجه افزایش طول عمر شبکه، استفاده از مکانیسم مقیاس بندی پویای مدولاسیون (DMS[1]) است. این تکنیک با تغییر سطح مدولاسیون، مدت زمان و میزان انرژی مصرفی برای ارسال داده‌ها را تنظیم می‌کند. در صورت کاهش کنترل نشده سطح مدولاسیون، ممکن است حجم ترافیک ارسالی در برخی نواحی بیش از حد ظرفیت شبکه شده و بسته‌ها دچار تداخل شوند.

مسئله کاهش مصرف انرژی با استفاده از تکنیک DMS در مراجع بسیاری بررسی شده است. روش کلی این مقالات برای تنظیم سطح مدولاسیون، کاهش سطح مدولاسیون گره‌های با انرژی کمتر با استفاده از یک روش حریصانه است. در الگوریتم‌های پیشنهادی در [۸-۱۲] فرض شده که گره‌ها به صورت مستقیم به چاهک متصل هستند. بنابراین، روش‌های ذکر شده در حالت کلی - که گره‌ها به صورت چند گامی به چاهک متصل هستند - قابل استفاده نیستند. مراجع [۱۳-۱۷] نحوه اعمال تکنیک DMS را در حالت کلی بررسی کرده‌اند. این الگوریتم‌ها هر دو مسئله ساخت مسیر و تعیین سطح مدولاسیون را مد نظر قرار داده‌اند.

در این مقاله، مسئله مسیریابی و تعیین سطح مدولاسیون گره‌ها در شبکه‌های حسگر مبتنی بر DMS مطالعه شده است. ایراد عمده الگوریتم‌های قبلی که در [۱۳-۱۷] معرفی شده‌اند، کارایی پایین به دلیل استفاده از روش‌های حریصانه برای مسیریابی و تعیین سطح مدولاسیون است. بنابراین، در اینجا روشی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای مسیریابی و تعیین سطح مدولاسیون گره‌ها ارائه شده است. الگوریتم ژنتیک از روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر هوش مصنوعی است. الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلفی وجود دارند که از آن جمله می‌توان به روش بهینه سازی ازدحام ذرات و الگوریتم بهینه سازی کلونی مورچگان اشاره کرد. این الگوریتم‌ها برای حل مسائل مختلف در شبکه‌های حسگر مانند خوشه‌بندی و مسیریابی استفاده شده‌اند [۱۸-۲۱].

الگوریتم پیشنهادی مسئله مورد نظر را در دو مرحله حل می‌کند. در مرحله اول، با استفاده از الگوریتم ژنتیک، یک درخت پوشا بر روی گره‌ها ساخته می‌شود. درخت پوشا، درختی است که همه گره‌های شبکه را شامل شده و ریشه آن چاهک است. با ساخت این درخت هر گره مسیری برای ارسال داده به چاهک خواهد داشت. در روش ارائه شده، هر کروموزوم[2] نشان دهنده یک درخت پوشا بر روی شبکه است. همچنین هر درایه یک کروموزوم مفروض، مشخص کننده پدر گره متناظر با آن بر روی درخت است. معیارهای استفاده شده در تابع برازندگی[3] الگوریتم ساخت درخت، شامل میانگین و انحراف از معیار طول عمر گره‌ها است. در الگوریتم ژنتیک، تابع برازندگی برای سنجش کیفیت کروموزوم‌ها و انتخاب کروموزوم‌های باکیفیت‌تر به‌کار می‌رود.

پس از ساخت درخت، در مرحله دوم سطح مدولاسیون برای ارسال داده از هر گره به گره پدرش با استفاده از الگوریتم ژنتیک مشخص می‌شود. سطوح مدولاسیون باید به گونه‌ای تعریف شود که ضمن جلوگیری از ایجاد تداخل، طول عمر گره‌ها بیشینه شود. برای این منظور، متوسط و انحراف از معیار طول عمر گره‌ها برای تعریف تابع برازندگی استفاده شده‌اند. با ترکیب دو معیار فوق، علاوه بر افزایش طول عمر متوسط شبکه، میزان مصرف انرژی در گره‌های مختلف متعادل خواهد شد. در اینجا یک کروموزوم مشخص کننده سطح مدولاسیون گره‌ها است. به بیان دیگر، مقدار هر درایه از یک کروموزوم مفروض معادل سطح مدولاسیون گره متناظر با آن است. همچنین در ساخت کروموزوم‌ها مسئله مدیریت تداخل نیز مدنظر قرار گرفته است.

ادامه مقاله به صورت زیر سازمان‌دهی شده است. در بخش ۲ مقالات مرتبط بررسی شده‌اند. در ادامه مدل شبکه در بخش ۳ معرفی شده است. در بخش ۴ الگوریتم ژنتیک به صورت اجمالی مطالعه شده است. الگوریتم پیشنهادی در بخش ۵ بررسی شده است. کارایی این الگوریتم در بخش ۶ مورد مطالعه قرار گرفته است. در نهایت، مقاله در بخش ۷ جمع بندی شده است.

۲- مروری بر کارهای قبلی

مقالات مرتبط با الگوریتم پیشنهادی در دو دسته قرار دارند. یک دسته روش‌هایی هستند که مسئله مدولاسیون را بررسی کرده‌اند. برخی مراجع شرایط مختلف را مطالعه کرده و مدولاسیون مناسب برای شبکه مورد مطالعه را مشخص کرده‌اند [۲۲-۲۶]. در مقابل در [۸-۱۷، ۲۷]، نوع مدولاسیون ثابت در نظر گرفته شده و از DMS برای کاهش انرژی مصرفی استفاده شده است. در دسته دوم از مقالات مرتبط، از الگوریتم‌های بهینه سازی هوشمند برای ساخت درخت استفاده شده است [۱۸-۲۱، ۲۸-۳۴]. این دو دسته روش در ادامه بررسی شده‌اند.

مراجع [۲۲-۲۶] به بررسی روش‌های مدولاسیون مختلف پرداخته و کارایی آنها در شرایط مختلف را با هم مقایسه کرده‌اند. مقالات [۲۳، ۲۴] گره‌های قابل شارژ را مطالعه کرده‌اند. طبق نتایج به‌دست آمده، مناسب‌ترین نوع مدولاسیون در این شبکه‌ها BPSK[4]است. در شبکه مفروض در [۲۵] انتقال داده و انرژی به گره‌ها به صورت هم‌زمان انجام شده است. همچنین مسئله محو شدگی کانال[5] هم

مدنظر قرار گرفته است. براساس نتایج شبیه‌سازی، بهترین مدولاسیون برای انتقال داده و انرژی به ترتیب QAM[6] و PAM[7] هستند. در [۲۶]، گره‌ها خوشه‌بندی شده و سرخوشه‌ها داده را به صورت مستقیم به چاهک ارسال می‌کند. در این مقاله تاثیر استفاده از دو مدولاسیون QAM و BPSK در ارسال داده از سرخوشه‌ها به چاهک بررسی شده است. طبق نتایج شبیه‌سازی، در این ارسال‌ها که فاصله فرستنده و گیرنده زیاد است BPSK بهتر عمل می‌کند.

در شبکه‌های مبتنی بر DMS، با تعیین سطح مدولاسیون مناسب برای هر گره می‌توان انرژی بیشتری را ذخیره کرد. در [۸، ۹] فرض شده که گره‌ها به صورت تک گامی با چاهک در ارتباط بوده و به هر گره تعداد مشخصی شیار زمانی[8] برای ارسال داده اختصاص داده شده است. همچنین داده‌ها باید در محدوده زمانی مشخصی به چاهک برسند. مرجع [۸] یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح برای مشخص کردن سطح مدولاسیون بهینه به هر گره ارائه داده است. در [۹] فرض شده که داده ارسالی گره‌ها متغیر است. در این روش سطح مدولاسیون اولیه گره‌ها با استفاده از مدل ارائه شده در [۸] مشخص می‌شود. سپس سطح مدولاسیون گره‌ها به صورت برخط و با توجه نرخ انرژی مصرفی آنها و محدودیت زمانی ارسال بسته‌ها، کاهش داده می‌شود. در [۱۰] نیز مقدار داده ارسالی توسط گره‌ها متغیر و نامعلوم در نظر گرفته شده است. در هر دور ارسال داده، بسته‌های اولیه با سطح مدولاسیون پایین ارسال می‌شوند. در صورت وجود بسته‌های بیشتر، سطح مدولاسیون افزایش داده می‌شود.

در [۱۱] فرض شده است که گره‌ها قابل شارژ بوده و همچنین به صورت تک گامی به چاهک متصل هستند. به هر گره یک یا چند شیار زمانی برای ارسال داده به چاهک تخصیص داده می‌شود. هدف مقاله کمینه کردن مقدار انرژی مصرفی ضمن رعایت محدودیت تاخیر است. برای این منظور، ابتدا سطح مدولاسیون کمینه قابل قبول برای هر گره با توجه به مقدار انرژی آن تعیین می‌شود. در ادامه روشی حریصانه برای مدیریت تداخل در سطح شبکه پیشنهاد شده است. در این روش، در هر دور سطح مدولاسیون یکی از گره‌های پر انرژی یک واحد افزایش می‌یابد تا میزان بار در شعاع تداخل آن متناسب با ظرفیت لینک‌ها شود. الگوریتم ارائه شده در [۱۱] در مرجع [۱۲] گسترش داده شده است. در این روش برای تنظیم میزان انرژی گره‌ها، محدودیتی در نحوه تغییر سطح مدولاسیون گره‌ها در نظر گرفته نشده است. در نتیجه می‌توان سطح مدولاسیون گره‌هایی که مقدار انرژی بسیار پایینی دارند را چند واحد تغییر داده و میزان انرژی گره‌های مختلف را متعادل نمود. در [۲۷] نیز مسئله مدیریت مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر کم قدرت[9] با استفاده از DMS بررسی شده است.

مراجع [۱۳-۱۷] مسئله تعیین سطح مدولاسیون را در حالت کلی - که گره‌ها به صورت چند گامی به چاهک متصل هستند - بررسی کرده‌اند. البته [۱۳-۱۵] فرض کرده‌اند که مسیرها از پیش ساخته شده هستند. در [۱۳] گرهی که بیشترین مقدار انرژی ذخیره شده به ازای یک واحد کاهش سطح مدولاسیون را داشته باشد، انتخاب شده و سطح مدولاسیون آن به‌روزرسانی می‌شود. روش پیشنهادی محدودیت تاخیر در تحویل داده به چاهک را نیز مد نظر داشته است. در الگوریتم ارائه شده در [۱۴] سطوح مدولاسیون گره‌ها به صورت پویا مشخص می‌شود. در این روش سطوح مدولاسیون اولیه با استفاده از [۱۳] تعیین می‌شوند. در طول زمان فعالیت شبکه، داده‌های حس شده تکراری توسط گره‌های مجاور حذف شده و زمان به دست آمده برای کاهش سطح مدولاسیون گره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. مرجع [۱۵] ابتدا مسئله تعیین سطح مدولاسیون گره‌ها را به صورت یک مسئله بهینه‌سازی مدل کرده است. سپس یک روش حریصانه با توجه به مدل ارائه شده طراحی شده است. در این روش برای کاهش مقدار انرژی مصرف شده، سطح مدولاسیون گره‌هایی که انرژی کم‌تری دارند در چندین دور کاهش داده می‌شود. ایراد عمده الگوریتم‌های ارائه شده در [۱۳-۱۵] استفاده از روش‌های حریصانه برای تعیین سطح مدولاسیون و درخت‌های مسیریابی از پیش ساخته شده است. همچنین فرض شده که تداخل فقط بین فرزندان یک گره در درخت وجود دارد که در حالت کلی فرض درستی نیست.

الگوریتم پیشنهادی در [۱۶] از هر دو تکنیک DMS و DVS برای مدیریت مصرف انرژی استفاده کرده است. ابتدا یک گراف از روی درخت مسیریابی - که به عنوان ورودی به الگوریتم داده می‌شود - تشکیل می‌شود. این گراف در بر گیرنده قیود مسئله شامل تداخل، محدودیت زمانی، و روابط پیش‌نیازی، است. در ادامه اجرای کارها بر روی پردازنده و ارسال پیام‌ها، با استفاده از گراف مذکور زمان‌بندی می‌شوند. در نهایت سطح مدولاسیون و ولتاژ پردازنده گره‌ها با توجه به میزان زمان آزاد موجود کاهش داده می‌شود. در روش ارائه شده در [۱۷]، هدف کاهش سطح مدولاسیون با رعایت قید محدودیت زمان ارسال انتها به انتها است. ابتدا کوتاه‌ترین مسیر با کم‌ترین تاخیر بین هر گره با چاهک با استفاده از الگوریتم دایجسترا به دست می‌آید. سپس زمان بندی ارسال داده‌ها توسط گره‌های مختلف مشخص می‌شود. در این مرحله تاخیر ارسال از هر گره به چاهک به صورت دقیق تعیین می‌شود. در نهایت سطح مدولاسیون گره‌های کم انرژی کاهش داده می‌شود.

در ادامه الگوریتم‌های مسیریابی مبتنی بر روش‌های بهینه سازی هوشمند به صورت اجمالی بررسی شده است. این الگوریتم‌ها از

روش‌های بهینه سازی مختلفی مانند الگوریتم ژنتیک [۲۰، ۲۱، ۲۸]، روش بهینه سازی ازدحام ذرات [۲۹]، الگوریتم بهینه سازی کلونی مورچگان [۳۰، ۳۱]، کرم شب تاب [۲۱]، آموزش گروهی [۳۲]، شیر مورچه [۳۳]، و جستجوی هارمونی [۳۴]، استفاده کرده‌اند. مرجع [۲۰] از الگوریتم ژنتیک برای ساخت مسیر استفاده کرده است. در این الگوریتم، هر کروموزوم نمایش دهنده یک مسیر بین گره مفروض و چاهک است. در [۲۱] برای خوشه بندی ابتدا سرخوشه‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک مشخص شده و سپس نتایج با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب بهبود داده شده‌اند. همچنین برای مسیریابی از الگوریتم دایجسترا استفاده شده است. مرجع [۲۸] از یادگیری ماشین برای خوشه‌بندی استفاده کرده است. ورودی این سیستم تعدادی شبکه کلاستر بندی شده است که با استفاده از الگوریتم ژنتیک ساخته شده‌اند.

مراجع [۳۰، ۳۱] از الگوریتم کلونی مورچه‌ها برای ساخت مسیر استفاده کرده‌اند. در [۳۰] فرض شده گره‌ها از قبل خوشه بندی شده و مسیرها بین سرخوشه‌ها و چاهک ساخته می‌شود. روش پیشنهادی در [۳۱] از معیارهای انرژی باقی مانده گره‌ها، فاصله بین گره‌ها، و تعداد همسایه‌های هر گره، برای ساخت مسیر استفاده کرده است. مرجع [۳۲] ابتدا با استفاده از الگوریتم k-means گره‌ها را خوشه‌بندی کرده است. سپس سرخوشه‌ها با استفاده از الگوریتم آموزش گروهی مشخص شده‌اند. در نهایت یک درخت پوشا بر روی سرخوشه‌ها با استفاده از الگوریتم جستجوی شکار ساخته شده است. روش ارائه شده در [۳۳] دو الگوریتم بهینه سازی نهنگ و شیر مورچه را با هم ترکیب کرده و روش بهینه سازی جدیدی به‌دست آورده است. روش مذکور برای ساخت سرخوشه‌ها و مسیریابی استفاده شده است. معیارهای بررسی شده در این دو مقاله انرژی گره‌ها و فاصله بین گره‌های فرستنده و گیرنده است.

۳- مدل سیستم

در این بخش ابتدا مدل شبکه در بخش ۳-۱ توضیح داده شده است. در ادامه نحوه محاسبه انرژی مصرفی در شبکه‌های مبتنی بر تکنیک DMS در بخش ۳-۲ بیان شده است.

۳-۱- فرضیات و مدل شبکه

در مدل در نظر گرفته شده، n گره به صورت تصادفی در شبکه مستقر شده‌اند. گره‌ها همگون در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین انرژی اولیه همه گره‌ها برابر بوده که با e_{init} نمایش داده می‌شود. مقدار انرژی کنونی گره v_i با er_i نشان داده می‌شود. همچنین شعاع ارسال و شعاع تداخل همه گره‌ها یکسان است. مجموعه همسایگان گره v_i شامل گره‌هایی است که در شعاع ارسال آن قرار دارند. مجموعه همسایگان v_i که به چاهک نزدیک‌تر هستند با نماد P_i نشان داده می‌شود. مجموعه INT_i شامل گره‌های مستقر در شعاع تداخل گره v_i است. نرخ جمع‌آوری داده همه گره‌ها یکسان فرض شده است. نماد pk تعداد بسته‌های تولید شده توسط هر گره در یک دور، و lاندازه بسته‌ها را نشان می‌دهند. لیست متغیرهای استفاده شده در جدول ۱ آورده شده است.

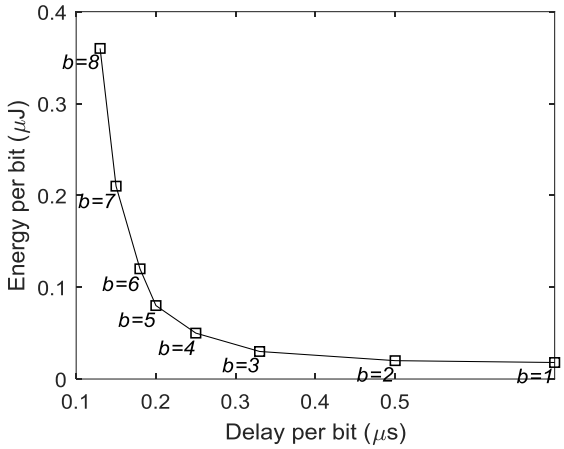
جدول ۱: متغیرهای استفاده شده.

متغیر	مفهوم
n	تعداد گره‌ها
e_{init}	انرژی اولیه گره‌ها
er_i	انرژی باقی مانده گره v_i
P_i	همسایه‌های گره v_i که نسبت به آن به چاهک نزدیک‌تر هستند
INT_i	مجموعه گره‌های متداخل با گره v_i
pk	تعداد بسته‌های تولید شده توسط هر گره در یک دور
l	اندازه هر بسته

۳-۲- مدل مصرف انرژی در شبکه‌های مبتنی بر تکنیک DMS

در شبکه‌های مبتنی بر تکنیک DMS، حسگرها از چند سطح مدولاسیون برای ارسال داده پشتیبانی می‌کنند. هر چه سطح مدولاسیون تخصیص داده شده به یک حسگر بیشتر باشد، انرژی مصرفی آن برای ارسال داده بیشتر خواهد شد. البته تعداد بیت‌های کد شده و میزان انرژی مصرفی به روش مدولاسیون استفاده شده نیز بستگی دارد. روش مدولاسیون استفاده شده در این پژوهش QAM است. در این روش از هر دو مولفه دامنه و فاز سیگنال برای کد کردن داده‌ها استفاده می‌شود. رابطه بین انرژی مصرفی و زمان لازم برای ارسال یک بیت داده با استفاده از QAM به ازای سطوح مدولاسیون مختلف در شکل ۱ نمایش داده شده است [۳۵]. در اینجا پهنای باند کانال ۱ MHz در نظر گرفته شده است. همچنین پارامتر b نمایش دهنده سطح مدولاسیون است و مقدار آن در بازه $\{۱،۲،....،۸\}$ قرار دارد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، با فرض مقدار مشخص احتمال خطا، افزایش سطح مدولاسیون میزان انرژی مصرفی را شدیدا افزایش داده و زمان ارسال را کاهش می‌دهد. بنابراین کاهش سطح مدولاسیون حسگرها طول عمر شبکه را به نحو مطلوبی افزایش خواهد داد. از طرف دیگر کم کردن سطح مدولاسیون گره‌ها باعث بروز تداخل در شبکه خواهد شد.

برای محاسبه میزان انرژی مصرفی برای ارسال داده از مدل ارائه شده در [۱۳] استفاده شده است. بر اساس مدل مذکور، مقدار انرژی مصرفی توسط گره v_i برای ارسال یک بسته l بیتی به گره v_j از (۱)



شکل ۱: میزان انرژی مصرفی برای ارسال یک بیت داده در سطوح مدولاسیون مختلف در مدل QAM [۳۵].

به دست می‌آید. در این رابطه et_i مقدار انرژی مصرفی گره v_i برای ارسال بسته، d_{ij} فاصله بین گره‌های v_i و v_j، d_0 یک مقدار ثابت، α توان نسبت داده شده به d_{ij}، N_0 چگالی طیفی توان نویز[۱۰]، و BER نرخ خطای بیت[۱۱] را نشان می‌دهند. در گره v_i خود مدار فرستنده نیز انرژی مصرف می‌کند که مقدار آن با استفاده از (۲) قابل محاسبه است. همان‌طور که در این رابطه دیده می‌شود، مقدار انرژی مصرفی - که با نماد eu_i نشان داده می‌شود - به اندازه بسته ارسالی، سطح مدولاسیون، و یک مقدار ثابت β_1 بستگی دارد. به صورت مشابه در مدار گره گیرنده v_j نیز مقداری انرژی برای دریافت بسته مصرف می‌شود. نحوه محاسبه انرژی مصرفی که با ec_j نمایش داده می‌شود، در (۳) آورده شده است.

$$et_i = \left(\frac{d_{ij}}{d_0}\right)^{\alpha} \frac{l\,(2^{b_i}-1)}{6\,b_i}\,\frac{N_0}{BER} \qquad (۱)$$

$$eu_i = \frac{\beta_1\, l}{b_i} \qquad (۲)$$

$$ec_j = \frac{\beta_2\, l}{b_i} \qquad (۳)$$

مقادیر پارامترهای به کار رفته در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: مقادیر پارامترهای استفاده شده در مدل انرژی [۱۴، ۳۵].

پارامتر	مقدار
سطح مدولاسیون	$\{۱،۲،...،۸\}$
d_0	۵m
α	۲
N_0	۴×۱۰^{-۱۳}J
BER	$۱۰^{-۵}$
β_1	۵۰nJ
β_2	۸۰nJ

۴- الگوریتم ژنتیک

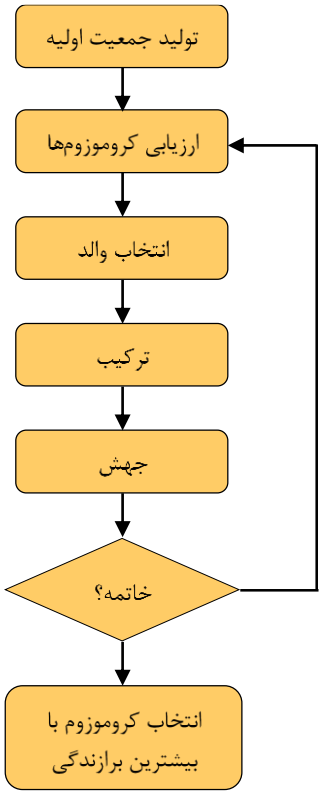
الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های بهینه سازی کارا و پرکاربرد است [۳۶]. این الگوریتم که مبتنی بر هوش مصنوعی و در دسته روش های تکاملی قرار دارد، از نحوه تکامل موجودات الهام گرفته است. به صورت دقیق‌تر، الگوریتم ژنتیک بر پایه قانون بقای اصلح که برای اولین بار توسط داروین مطرح شد، کار می‌کند. این قانون بیان می‌کند که در طبیعت، رقابت میان موجودات زنده برای دستیابی به منابع کمیاب، منجر به غلبه اصلح‌ترین موجودات بر موجودات ضعیف‌تر می‌شود. به صورت متناظر، در الگوریتم ژنتیک نیز در نهایت، جواب‌های دارای برازندگی بیشتر (یا کم هزینه‌تر) باقی خواهند ماند.

یک مسئله مدل شده با الگوریتم ژنتیک شامل تعریف کروموزوم، تولید جمعیت اولیه، تابع برازندگی (هزینه[۱۲])، و عملگرهای مختلف شامل انتخاب، ترکیب[۱۳]، و جهش[۱۴]، است. در این الگوریتم ابتدا جمعیت اولیه تولید می‌شود. این جمعیت شامل تعدادی کروموزوم است که به صورت تصادفی تولید شده‌اند. هر کروموزوم یک جواب امکان پذیر است که قیود مسئله در آن رعایت شده است. در ادامه جمعیت اولیه در چندین دور با استفاده از عملگرهای ژنتیک تکامل پیدا می‌کنند. در هر دور پس از اعمال عملگرها، کروموزوم‌هایی که برازندگی بیشتری (هزینه کمتری) دارند به عنوان نسل بعدی جمعیت انتخاب می‌شوند. این کار تا زمانی‌که شرط خاتمه محقق شود ادامه پیدا می‌کند. مراحل الگوریتم ژنتیک در شکل ۲ نشان داده شده است. در ادامه اجزای الگوریتم ژنتیک به صورت دقیق‌تر بررسی شده‌اند.

نمایش کروموزوم: یک کروموزوم معادل یک جواب امکان پذیر مسئله است. روش‌های مختلفی برای نمایش کروموزوم وجود دارد. یکی از روش‌های معمول، نمایش کروموزوم به صورت باینری است. در این حالت هر کروموزوم به صورت یک رشته از ژن‌ها تعریف شده و هر ژن برابر یکی از دو مقدار صفر یا یک است. در حالت کلی هر ژن می‌تواند چند مقدار مختلف داشته باشد.

تابع برازندگی (هزینه): کیفیت جواب‌ها با استفاده از یک تابع سنجیده می‌شود. در صورتی که این تابع، مقدار هزینه جواب را نشان دهد اصطلاحاً به آن تابع کمینه سازی یا تابع هزینه گفته می‌شود. همچنین اگر تابع میزان برازندگی مشخص کند، تابع بیشینه سازی یا تابع برازندگی نامیده می‌شود.

عملگر انتخاب: این عملگر کروموزوم‌های والد[۱۵] برای ترکیب را مشخص می‌کند. کروموزوم‌های والد با توجه به میزان برازندگی‌شان (هزینه‌شان) انتخاب می‌شوند. کروموزوم‌های دارای برازندگی بیشتر



شکل ۲: مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک.

(کم هزینه‌تر)، شانس بیشتری برای انتخاب شدن خواهند داشت. از جمله عملگرهای انتخاب می‌توان به انتخاب چرخ رولت[۱۶] و انتخاب مسابقه‌ای دودویی[۱۷] اشاره کرد.

عملگر ترکیب: این عملگر وظیفه استخراج[۱۸] نواحی اطراف جواب‌های موجود را به عهده دارد. این کار برای تولید جواب‌های بهتر با استفاده از اطلاعات جواب‌های فعلی انجام می‌شود. در عملگر ترکیب جواب‌های فعلی و جواب‌های تولید شده به ترتیب والد و فرزندان[۱۹] نامیده می‌شوند. یک عملگر ترکیب متداول، ترکیب تک نقطه‌ای است. در این روش یک نقطه به طور تصادفی بر روی کروموزوم‌ها انتخاب شده و ژن‌های سمت راست آن نقطه بین دو کروموزوم والد تعویض می‌شوند. این فرآیند منجر به تولید دو کروموزوم فرزند می‌شود که هر کدام بخشی از اطلاعات ژنتیکی والدین را به ارث می‌برند.

عملگر جهش: این عملگر وظیفه اکتشاف[۲۰] فضای حالت را برعهده دارد. اکتشاف به معنای جستجوی سراسری فضای حالت برای یافتن جواب‌های مناسب است. برای این منظور، عملگر جهش برخی از کروموزوم‌ها را به صورت تصادفی انتخاب کرده و ساختار آنها را تغییر می‌دهد. روش معمول اعمال جهش، انتخاب چند ژن از کروموزوم مفروض و تغییر مقدار هر کدام از آنها به یک مقدار مجاز دیگر به صورت تصادفی است.

شرط خاتمه: اجرای الگوریتم تا هنگام محقق شدن شرط خاتمه ادامه می‌یابد. از جمله شرایط خاتمه متداول می‌توان به رسیدن به یک مقدار بهینه مشخص، تکرار الگوریتم به تعداد دور مشخص، و یا سپری شدن مقدار زمان مشخص، اشاره کرد.

۵- الگوریتم پیشنهادی

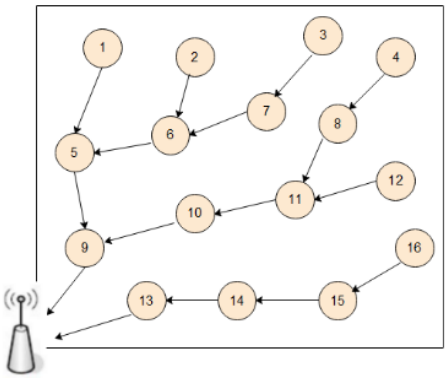
مدیریت مصرف انرژی یک چالش اساسی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم است. در این مقاله برای مقابله با این مشکل از دو روش مسیریابی انرژی آگاه و تکنیک DMS استفاده شده است. الگوریتم پیشنهادی شامل دو مرحله ساخت درخت پوشا و تعیین سطح مدولاسیون گره‌ها است که هر دو مرحله با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شده‌اند. مراحل الگوریتم در ادامه در بخش‌های ۵-۱ و ۵-۲ توضیح داده شده‌اند.

۵-۱- ساخت درخت پوشا

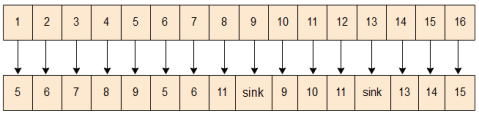
در این بخش، الگوریتم ساخت درخت پوشا مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای انتقال داده گره‌ها به چاهک معرفی شده است. هدف روش پیشنهادی، مدیریت تداخل و افزایش طول عمر گره‌ها است. بنابراین تابع برازندگی براساس میانگین و انحراف از معیار طول عمر گره‌ها تعریف شده است. برای ساخت درخت پوشا، باید پدر هر گره مشخص شود. بر این اساس، کروموزوم متناظر با یک درخت پوشا آرایه‌ای به طول n خواهد بود. در این آرایه مقدار هر ژن برابر پدر گره متناظر با آن در درخت پوشا است. در ادامه اجزای الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، شامل نحوه نمایش کروموزوم، تولید جمعیت اولیه، تابع ارزیابی، و عملگرهای انتخاب، ترکیب، و جهش، توضیح داده شده‌اند.

نمایش کروموزوم: کروموزوم X_i^T آرایه‌ای متشکل از n ژن است که در آن، ژن g_{ij}^T نشان دهنده شناسه پدر انتخاب شده برای گره v_j است. بنابراین، هر کروموزوم معادل یک درخت پوشا بر روی گره‌ها خواهد بود. شکل ۳ یک درخت پوشا بر روی شبکه مفروض و همچنین کروموزوم متناظر با آن را نشان داده است. شبکه نمایش داده شده ۱۶ گره دارد و بنابراین طول کروموزوم X_i^T نیز برابر ۱۶ خواهد بود. همچنین هر ژن g_{ij}^T نشان دهنده پدر گره v_j در درخت متناظر با X_i^T است. به عنوان مثال، گره v_{11} پدر گره v_8 در درخت پوشا است و بنابراین مقدار g_{i8}^T برابر ۱۱ خواهد شد.

در روش پیشنهادی برای ساخت کروموزوم، پدر گره v_j تنها از بین همسایگان آن که به چاهک نزدیک‌تر هستند - گره‌های مجموعه P_j - انتخاب می‌شود. همچنین در صورتی‌که فاصله گره v_j و چاهک کمتر از شعاع ارسال باشد، خود چاهک به عنوان گره پدر انتخاب



(الف)



(ب)

شکل ۳: یک نمونه کروموزوم متناظر با مسئله ساخت درخت پوشا. (الف) درخت پوشا. (ب) ساختار کروموزوم.

می‌شود. به عنوان مثال در شکل ۳، $P_7 = \{v_6, v_{10}, v_{11}\}$ است و بنابراین پدر گره v_7 از این مجموعه انتخاب خواهد شد. انتخاب پدر از گره‌های نزدیک‌تر به چاهک، از تشکیل حلقه جلوگیری می‌کند. بنابراین کروموزوم نامعتبر ساخته نخواهد شد. این مسئله کارایی الگوریتم ژنتیک ارائه شده را به نحو قابل قبولی افزایش می‌دهد. همچنین روش ارائه شده تعداد گام‌های بین گره‌ها و چاهک را کم می‌کند. بنابراین میزان مصرف انرژی برای انتقال داده کاهش می‌یابد. در نهایت با کاهش تعداد گام، میزان داده ارسالی توسط گره‌ها کاهش یافته و بنابراین احتمال بروز تداخل کم می‌شود.

تولید جمعیت اولیه: جمعیت اولیه یک مجموعه n_{pop}^T تایی از کروموزوم‌های معتبر است. این کروموزوم‌ها با استفاده از دو روش تصادفی و مبتنی بر انتخاب چرخ رولت ساخته می‌شوند. نیمی از جمعیت به صورت تصادفی ساخته می‌شود. در این حالت مقدار ژن g_{ij}^T به صورت تصادفی از مجموعه P_j انتخاب می‌شود. استفاده از روش تصادفی کیفیت جستجو و اکتشاف در فضای حالت را افزایش می‌دهد. برای تولید نیمه دوم جمعیت اولیه، از چرخ رولت استفاده شده است. معیار استفاده شده برای انتخاب پدر، میزان انرژی باقی مانده است. بنابراین احتمال انتخاب گره $v_k \in P_j$ به عنوان پدر گره v_j به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$ps_j^k = \frac{er_k}{\sum_{v_m \in P_j} er_m} \qquad (۴)$$

که در آن ps_j^k احتمال انتخاب گره v_k به عنوان پدر گره v_j است. با استفاده از (۴) احتمال انتخاب گره‌های پرانرژی‌تر افزایش می‌یابد. بنابراین، در درخت‌های تولید شده میزان مصرف انرژی بین گره‌های مختلف متعادل‌تر خواهد بود.

بعد از تولید هر کروموزوم، باید معتبر بودن آن از لحاظ وجود تداخل در شبکه بررسی شود. در صورت نامعتبر بودن کروموزوم، کروموزوم دیگری به جای آن ساخته می‌شود. این فرآیند تا زمانی ادامه می‌یابد که کروموزوم تولید شده معتبر باشد.

تابع برازندگی: هدف اصلی در ساخت درخت پوشا، افزایش طول عمر شبکه است. طول عمر هر گره با توجه به میزان انرژی مصرفی در دور کنونی و مقدار انرژی باقی مانده آن مشخص می‌شود. به عبارت دقیق‌تر، طول عمر گره v_j به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$lt_i^j = \frac{er_j}{ex_i^j} \qquad (۵)$$

که در آن lt_i^j طول عمر گره v_j در صورت استفاده از درخت متناظر با X_i^T است. همچنین نماد ex_i^j نشان دهنده میزان انرژی مصرفی گره v_j در درخت متناظر با X_i^T است. مقدار این متغیر برابر مجموع میزان انرژی مصرفی برای دریافت داده از فرزندان، و ارسال داده‌های دریافتی و داده‌های حس شده به گره پدر است. با استفاده از (۱) تا (۳)، مقدار ex_i^j به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$ex_i^j = pk\ l\left(nd_i^j + 1\right)\left(\left(\frac{d_{j,p_i^j}}{d_0}\right)^{\alpha}\frac{\left(2^{b_i^j}-1\right)}{6\,b_i^j}\frac{N_0}{BER} + \frac{\beta_1}{b_i^j}\right) + pk\ l\ nd_i^j\frac{\beta_2}{b_i^j} \qquad (۶)$$

که در آن p_i^j نشان دهنده پدر گره v_j در درخت پوشای متناظر با X_i^T است. تعداد نوادگان گره v_j بر روی درخت پوشا متناظر با X_i^T با نماد nd_i^j مشخص شده است. همچنین، b_i^j سطح مدولاسیون گره v_j در کروموزوم X_i^T را نمایش می‌دهد. مقدار سطح مدولاسیون گره‌ها در مرحله اول برابر مقدار بیشینه یعنی هشت در نظر گرفته شده است.

میزان برازندگی کروموزوم X_i^T - که با F_i^T نمایش داده می‌شود – براساس معیار طول عمر تعریف شده است. هدف افزایش میانگین طول عمر گره‌ها و کاهش انحراف از معیار طول عمر آنها است. کاهش انحراف از معیار طول عمر گره‌ها، مصرف انرژی گره‌ها را متعادل‌تر کرده و مانع از مرگ زود هنگام آنها می‌شود. با توجه به مطالب بیان شده، F_i^T به صورت زیر تعریف شده است:

$$F_i^T = w_1\, avg\left(lt_i^j\right) - (1 - w_1)\, std\left(lt_i^j\right) \qquad (۷)$$

که در آن avg و std به ترتیب نشان دهنده توابع متوسط و انحراف از معیار هستند. همچنین پارامتر w_1 میزان اهمیت متوسط نسبت به انحراف از معیار را مشخص می‌کند.

عملگر انتخاب: در اینجا از عملگر انتخاب چرخ رولت برای مشخص نمودن کروموزوم‌های والد استفاده شده است.

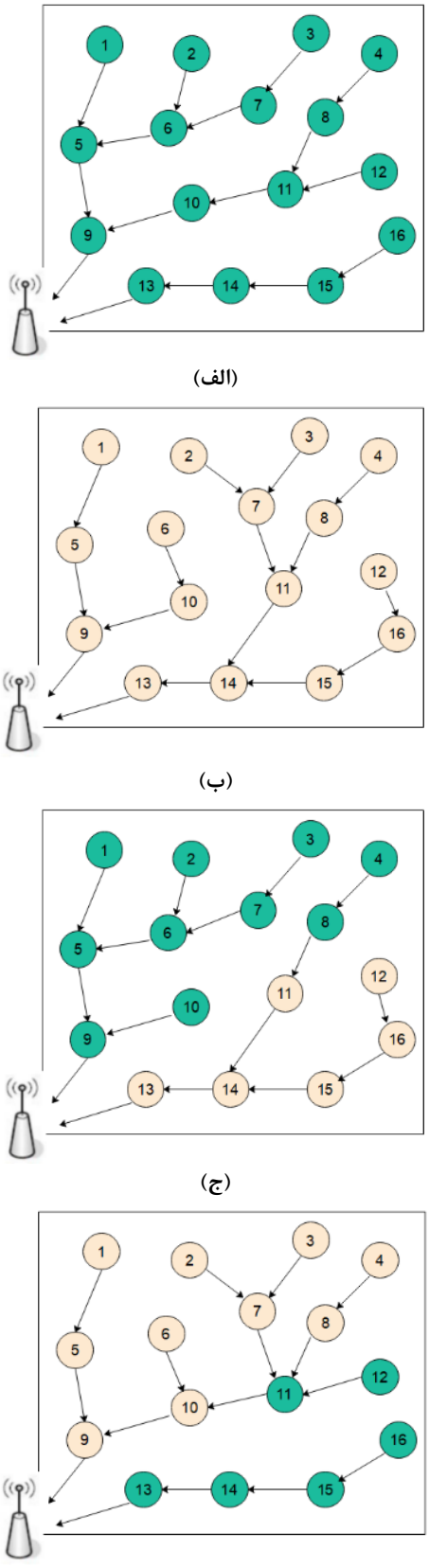
عملگر ترکیب: در روش پیشنهادی از عملگر ترکیب تک نقطه‌ای استفاده شده است. برای ترکیب کروموزوم‌های والد، یک نقطه به صورت تصادفی بر روی آنها انتخاب می‌شود. سپس هر والد از محل نقطه انتخاب شده به دو قسمت تقسیم شده، و تکه‌های والدها با هم ترکیب شده تا فرزندان تولید شوند. کروموزوم‌های تولید شده، بعد از تولید اعتبارسنجی می‌شوند. در صورت نامعتبر بودن، مرحله انتخاب و ترکیب دوباره تکرار شده و کروموزوم‌های فرزند جدیدی تولید می‌شوند. شکل ۴ نحوه اعمال عملگر ترکیب روی دو کروموزوم والد و تولید فرزندان را نشان می‌دهد. در این مثال، گره v_{10} به عنوان نقطه ترکیب در نظر گرفته شده است. عملگر ترکیب بر روی pc^T درصد از جمعیت فعلی انجام می‌شود.

عملگر جهش: این عملگر با هدف فرار از بهینه محلی، روی pm^T درصد از جمعیت اعمال می‌شود. در عملگر پیشنهادی، جهش با نرخ ثابت mu^T بر روی ژن‌های کروموزوم مفروض X_i^T اعمال می‌شود. برای جهش ژن g_{ij}^T، پدر گره v_j به صورت تصادفی از گره‌های P_j تعیین می‌شود. پس از اعمال جهش روی کروموزوم X_i^T، اعتبار آن بررسی می‌شود. شکل ۵ نمونه‌ای از اعمال جهش بر روی یک کروموزوم مفروض را نشان می‌دهد. در این مثال پس از جهش کروموزوم، پدر گره v_{12} تغییر داده شده است.

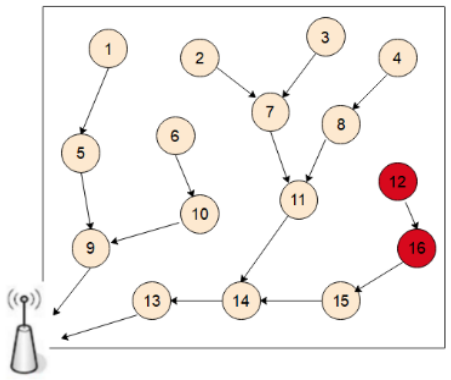
بررسی اعتبار کروموزوم: در هر کروموزوم معتبر، میزان بار در شعاع تداخل گره v_j باید کمتر از یک باشد تا تداخل در شبکه رخ ندهد [۳۷]. بنابراین در صورت معتبر بودن کروموزوم X_i^T، رابطه زیر برای هر گره v_j برقرار خواهد بود:

$$ld_i^j = \sum_{k \in INT_j} \frac{dr_i^k}{cp_i^k} \leq 1 \qquad 1 \leq j \leq n \qquad (۸)$$

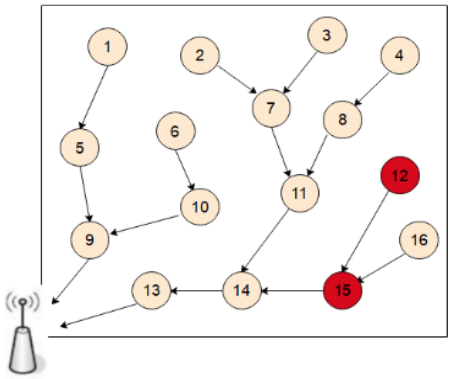
که در آن ld_i^j میزان بار در شعاع تداخل گره v_j در صورت استفاده از پیکربندی متناظر با کروموزوم X_i^T است. همچنین dr_i^k نرخ ارسالی از گره v_k به گره p_i^k (که پدر v_k براساس پیکربندی متناظر با کروموزوم X_i^T است) را نمایش می‌دهد. در اینجا با توجه به استفاده از ساختار درختی برای ارسال داده، هر گره فقط به پدر خود داده ارسال می‌کند. بنابراین فقط متغیرهای dr_i^k $(1 \leq k \leq n)$ برای محاسبه میزان بار مد نظر قرار گرفته‌اند. مقدار dr_i^k به صورت زیر محاسبه می‌شود:



شکل ۴: اعمال عملگر ترکیب بر روی دو کروموزوم متناظر با مسئله ساخت درخت پوشا. (الف) پدر اول. (ب) پدر دوم. (ج) فرزند اول. (د) فرزند دوم.



(الف)



(ب)

شکل ۵: اعمال عملگر جهش بر روی یک کروموزوم متناظر با مسئله ساخت درخت پوشا. (الف) کروموزوم اولیه. (ب) کروموزوم جهش یافته.

$$dr_i^k = \frac{\left(pk\ l\left(nd_i^k+1\right)\right)}{t} \qquad (۹)$$

که در آن t نمایش دهنده مدت زمان یک دور است. همچنین، عبارت $pk\ l\left(nd_i^k+1\right)$ بیان کننده تعداد بیت‌های تولید شده توسط گره v_k و نوادگان آن بر روی درخت پوشا متناظر با X_i^T است. این داده توسط گره v_k به گره p_i^k منتقل می‌شود.

پارامتر cp_i^k در (۹) ظرفیت لینک بین دو گره v_k به گره p_i^k را نشان می‌دهد. مقدار این پارامتر وابسته به سطح مدولاسیون گره v_k بوده و از (۱۰) به دست می‌آید [۱۴]. پارامتر W نمایش دهنده پهنای باند کانال بوده و مقدار آن برابر ۱ MHz است.

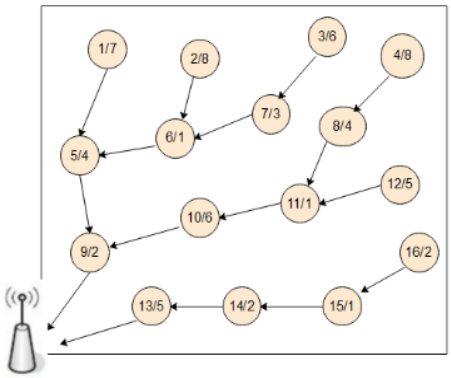
$$cp_i^k = b_i^k W \qquad (۱۰)$$

در صورتی که درخت پوشا معتبر نباشد باید دوباره ساخته شود.

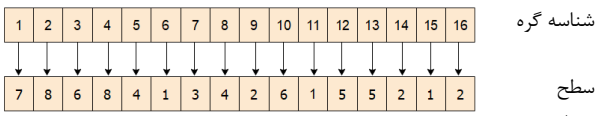
۵-۲- تعیین سطح مدولاسیون گره‌ها

پس از ساخت درخت پوشا، سطح مدولاسیون گره‌ها مشخص می‌شوند. در این مرحله، هدف تعیین بهترین سطح مدولاسیون برای هر کدام از گره‌ها است. با تخصیص سطح مدولاسیون پایین‌تر به یک گره، مقدار انرژی مصرفی کاهش یافته ولی در مقابل مدت زمان ارسال داده به گره پدر آن زیاد می‌شود. در نتیجه ممکن است در برخی نواحی تداخل بروز کند. برای تعیین سطح مدولاسیون مناسب برای هر گره، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در ادامه اجزای الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، شامل نحوه نمایش کروموزوم، تولید جمعیت اولیه، تابع ارزیابی، و عملگرهای انتخاب، ترکیب، و جهش، بررسی شده‌اند.

نمایش کروموزوم: کروموزوم X_i^M یک آرایه شامل n ژن است. ژن g_{ij}^M برابر سطح مدولاسیون گره v_j بوده و بنابراین مقدار آن عددی در بازه $\{۸،...،۲،۱\}$ است. شکل ۶ یک نمونه کروموزوم و جواب معادل آن را نمایش داده است. در اینجا از درخت پوشای ارائه شده در شکل ۳ برای مشخص کردن مسیر ارسال داده استفاده شده است. در کروموزوم ارائه شده، هر ژن سطح مدولاسیون گره متناظرش را مشخص می‌کند. به عنوان مثال، با توجه به اینکه مقدار g_{i6}^M برابر یک است، سطح مدولاسیون گره v_6 برابر یک خواهد بود.



(الف)



(ب)

شکل ۶: یک نمونه کروموزوم متناظر با مسئله تعیین سطح مدولاسیون. (الف) سطوح مدولاسیون تعیین شده برای گره‌ها. (ب) ساختار کروموزوم.

تولید جمعیت اولیه: جمعیت اولیه یک مجموعه n_{pop}^M تایی از کروموزوم‌های معتبر است. کروموزوم‌های اولیه به دو شکل تولید می‌شوند. نیمی از آنها به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. بنابراین برای ساخت کروموزوم X_i^M، به هر ژن g_{ij}^M یک مقدار تصادفی در بازه $\{۸،...،۲،۱\}$ نسبت داده می‌شود. برای تولید نیمه دوم کروموزوم‌ها، سطح مدولاسیون گره‌ها به نحوی تعیین می‌شود که میزان مصرف انرژی در گره‌های مختلف متعادل شده و طول عمر شبکه افزایش یابد. میزان مصرف انرژی توسط گره v_j متناسب با

مقدار داده عبوری آن و انرژی مصرفی برای عبور داده‌ها است. با توجه به اینکه همه گره‌ها با نرخ ثابتی داده تولید می‌کنند، میزان داده عبوری از گره v_j متناسب با تعداد نوادگان آن در درخت پوشا (nd_j) خواهد بود. همچنین با توجه با (۱) تا (۳)، میزان انرژی مصرفی گره v_j برای عبور داده‌ها متناسب با سطح مدولاسیون آن است. با توجه به بحث فوق، گره‌هایی که تعداد نوادگان بیشتری دارند باید سطح مدولاسیون پایین‌تری داشته باشند.

بر این اساس، بازه $\{۱،۲،...،۸\}$ به سه قسمت تقسیم شده است. بازه مناسب برای تعیین سطح مدولاسیون گره v_j با توجه مقدار nd_j مطابق (۱۱) مشخص می‌شود. در نهایت مقدار ژن g_{ij}^M به صورت تصادفی از بازه مشخص شده انتخاب می‌شود.

$$ML_j = \begin{cases} \{1,2,3\} & 0.12n \le nd_j \\ \{4,5,6\} & 0.02n < nd_j < 0.12n \\ \{7,8\} & nd_j \le 0.02n \end{cases} \qquad (۱۱)$$

که در آن ML_j بازه متناسب با گره v_j برای تعیین سطح مدولاسیون است.

نکته حائز اهمیت در تولید کروموزوم‌های جدید، بررسی اعتبار آنها است. ممکن است با کاهش سطح مدولاسیون گره‌ها، میزان بار در شعاع تداخل برخی از آنها افزایش زیادی یافته و تداخل رخ دهد. بنابراین بعد از تولید هر کروموزوم باید اعتبار آن بررسی شده و در صورت لزوم اصلاح شود.

تابع برازندگی: سطوح مدولاسیون گره‌ها باید به نحوی تعیین شوند که طول عمر شبکه بیشینه شود. برای این منظور متوسط طول عمر گره‌ها را باید افزایش داد. همچنین برای جلوگیری از مرگ زود هنگام گره‌ها، انحراف از معیار طول عمر آنها باید کاهش داده شود. توجه به انحراف از معیار طول عمر گره‌ها، باعث می‌شود سطح مدولاسیون پایین‌تری برای حسگرهای کم انرژی در نظر گرفته شده و در نتیجه انرژی آنها دیرتر تخلیه شود. با استفاده از دو معیار متوسط و انحراف از معیار طول عمر گره‌ها، تابع برازندگی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_i^M = w_2\, avg\left(lt_i^j\right) - (1 - w_2)\, std\left(lt_i^j\right) \qquad (۱۲)$$

که در آن F_i^M و w_2 به ترتیب نمایش دهنده برازندگی کروموزوم X_i^M و میزان اهمیت معیار میانگین نسبت به انحراف معیار هستند. برای محاسبه lt_i^j - که در (۵) تعریف شده است – مقادیر انرژی فعلی گره v_j (er_j) و انرژی مصرفی گره در دور فعلی (ex_i^j) مورد نیاز هستند. مطابق (۶)، برای محاسبه ex_i^j، تعداد نوادگان گره v_j و سطح مدولاسیون آن باید مشخص باشد. تعداد نوادگان گره v_j با استفاده از درخت پوشای تولید شده در مرحله اول تعیین می‌شود. سطح مدولاسیون آن نیز برابر g_{ij}^M است.

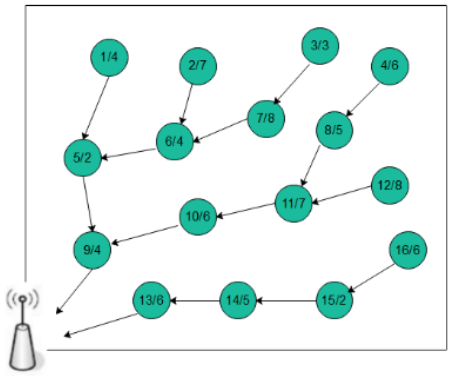
عملگر انتخاب: در روش پیشنهادی از عملگر انتخاب چرخ رولت برای انتخاب کرموزوم‌های والد استفاده شده است.

عملگر ترکیب: این عملگر سطح مدولاسیون گره‌ها در کروموزوم‌های فرزند را بر اساس اطلاعات موجود در والدین مشخص می‌کند. در اینجا برای ترکیب دو والد از عملگر ترکیب تک نقطه‌ای استفاده شده است. شکل ۷ مثالی از نحوه اعمال عملگر ترکیب را ارائه داده است. در این مثال، گره v_{10} به عنوان نقطه ترکیب در نظر گرفته شده است. بعد از تولید کروموزوم‌های فرزند، اعتبار آنها بررسی شده و فرزندان نامعتبر تصحیح می‌شوند. همچنین pc^M درصد از کروموزوم‌ها برای اعمال عملگر ترکیب انتخاب می‌شوند.

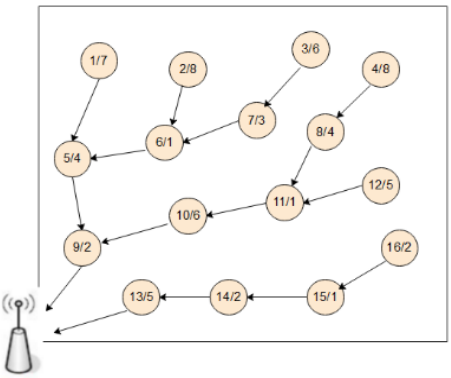
عملگر جهش: این عملگر روی pm^M درصد از کروموزوم‌ها اعمال می‌شود. هنگامی‌که کروموزوم X_i^M برای جهش انتخاب شود، هر ژن آن با احتمال mu^M تغییر داده می‌شود. با اعمال جهش بر روی ژن g_{ij}^M، سطح مدولاسیون گره v_j به صورت تصادفی عوض می‌شود. مثالی از جهش کروموزوم در شکل ۸ نمایش داده شده است. در اینجا سطح مدولاسیون گره v_{12} از پنج به هفت افزایش یافته است. کروموزوم جهش یافته ممکن است معتبر نباشد. دلیل این مسئله کاهش احتمالی سطح مدولاسیون برخی گره‌ها و در نتیجه بروز تداخل است. بنابراین پس از اعمال عملگر جهش، اعتبار کروموزوم بررسی شده و در صورت نیاز تصحیح می‌شود.

بررسی اعتبار و تصحیح کروموزوم: در درخت پوشای تولید شده در مرحله اول، میزان بار در شعاع تداخل هر گره کمتر از یک است. بنابراین می‌توان ارسال داده توسط گره‌های مختلف را زمان بندی نمود. با کاهش سطح مدولاسیون در مرحله دوم، ممکن است تداخل رخ دهد. برای بررسی وقوع تداخل، از روش ارائه شده در بخش ۵-۱ استفاده می‌شود.

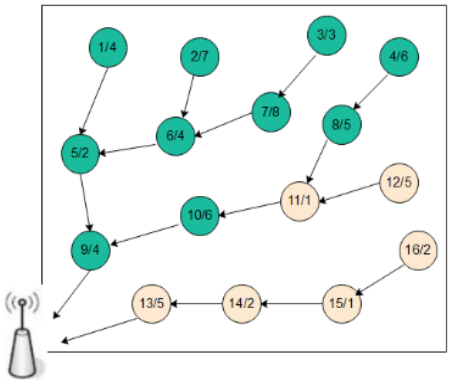
برای تعمیر کروموزوم X_i^M، گره‌ها به ترتیب صعودی بر اساس فاصله از چاهک مرتب شده و به ترتیب بررسی می‌شوند. به ازای هر گره v_j، در صورتی‌که مقدار ld_i^j بیشتر از یک باشد، یک گره $v_k \in INT_j$ با استفاده از چرخ رولت انتخاب شده و مقدار سطح مدولاسیون آن یک واحد افزایش داده می‌شود. معیار استفاده شده برای انتخاب گره



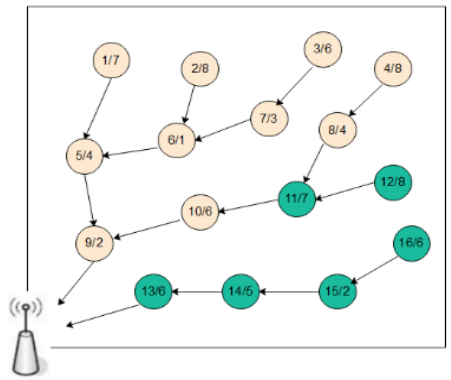
(الف)



(ب)

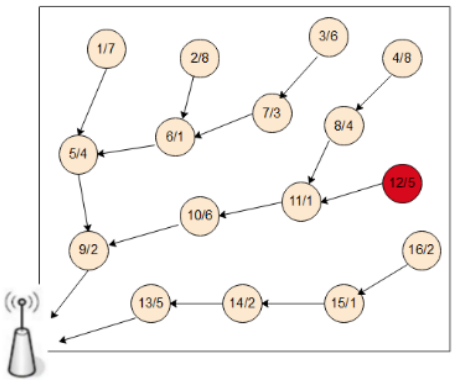


(ج)

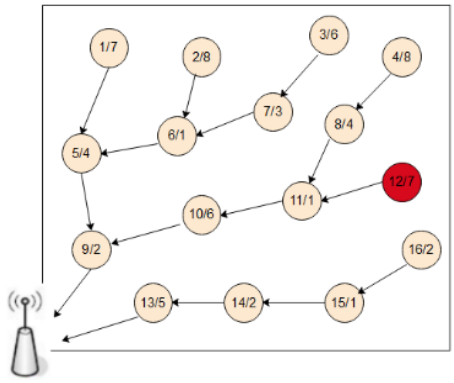


(د)

شکل ۷: اعمال عملگر ترکیب بر روی دو کروموزوم متناظر با مسئله تعیین سطح مدولاسیون گره‌ها. (الف) پدر اول. (ب) پدر دوم. (ج) فرزند اول. (د) فرزند دوم.



(الف)



(ب)

شکل ۸: اعمال عملگر جهش بر روی یک کروموزوم متناظر با مسئله تعیین سطح مدولاسیون گره‌ها. (الف) کروموزوم اولیه. (ب) کروموزوم جهش یافته.

از INT_j، میزان انرژی باقی مانده است. با استفاده از چرخ رولت، احتمال اینکه سطح مدولاسیون گره پرانرژی‌تر افزایش یابد بیشتر خواهد بود. همچنین استفاده از این عملگر مانع از گیر افتادن در بهینه محلی می‌شود. احتمال انتخاب گره $v_k \in INT_j$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$pl_j^k = \frac{er_k}{\sum_{v_m \in INT_j} er_m} \qquad (۱۳)$$

که در آن pl_j^k احتمال انتخاب گره v_k برای کاهش میزان بار در شعاع تداخل گره v_j است. مراحل فوق تا زمانی‌که مقدار ld_i^j کمتر از یک شود تکرار خواهند شد. الگوریتم تصحیح ارائه شده قطعا یک جواب معتبر پیدا خواهد کرد. زیرا در بدترین حالت، سطح مدولاسیون همه گره‌ها برابر مقدار بیشینه می‌شود. این جواب معادل سطح مدولاسیون درخت پوشای تولید شده در مرحله اول است و اعتبار دارد.

دلیل مرتب کردن گره‌ها بر مبنای فاصله از چاهک، این است که گره‌های نزدیک‌تر به چاهک داده بیشتری را عبور می‌دهند. با توجه

به این مسئله، برای پایین نگه داشتن سطح مدولاسیون این گره‌ها، بهتر است ابتدا آنها بررسی شوند.

۶- نتایج شبیه سازی

در این بخش کارایی الگوریتم پیشنهادی که از این به بعد RMGA[۲۱] نامیده می‌شود، ارزیابی شده است. روش پیشنهادی با سه الگوریتم IEJSH [۱۶]، AH [۱۷] و GTCR [۳۲] مقایسه شده است. دو الگوریتم اول حریصانه بوده و از تکنیک DMS برای کاهش انرژی مصرفی استفاده می‌کنند. روش سوم از الگوریتم‌های بهینه سازی برای مسیریابی استفاده کرده است. در این روش از تکنیک DMS استفاده نشده است. همه الگوریتم‌ها در متلب[۲۲] پیاده سازی شده‌اند. معیارهای مقایسه میانگین انرژی مصرفی گره‌ها، انحراف از معیار انرژی مصرفی گره‌ها، و طول عمر شبکه هستند. برای افزایش دقت نتایج، هر آزمایش پنج دفعه تکرار شده و مقدار میانگین به عنوان جواب گزارش شده است. پارامترهای به کار رفته در شبیه سازی‌ها در جدول ۳ خلاصه شده است. همچنین جدول ۴ مقادیر پارامترهای استفاده شده در الگوریتم‌های ژنتیک ارائه شده را نمایش می‌دهد.

جدول ۳: مقادیر پارامترهای به کار رفته در شبیه سازی‌ها.

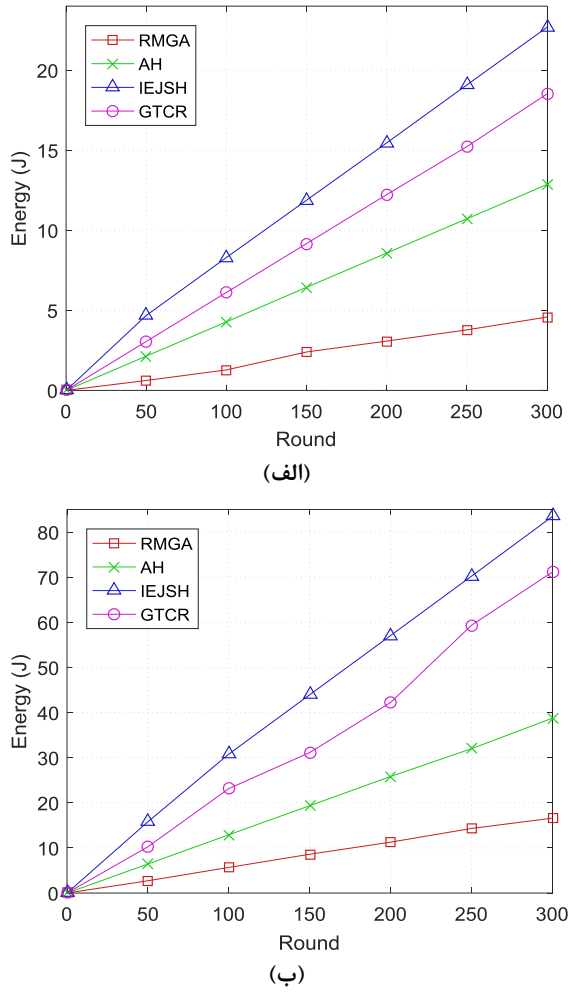
پارامتر	مقدار
n	۴۰۰-۱۰۰
e_{init}	۲J
شعاع ارسال	۱۵m
شعاع تداخل	۳۰m
l	۱۰۲۴ بیت
تعداد بسته‌های تولید شده در هر دور	۵۰
w_1	۰/۲
w_2	۰/۸

جدول ۴: مقادیر پارامترهای مرتبط با الگوریتم ژنتیک.

پارامتر	مقدار
n_{pop}	۵۰
pc	۰/۸
pm	۰/۳
mu	۰/۰۵
تعداد تکرار الگوریتم	۲۵۰

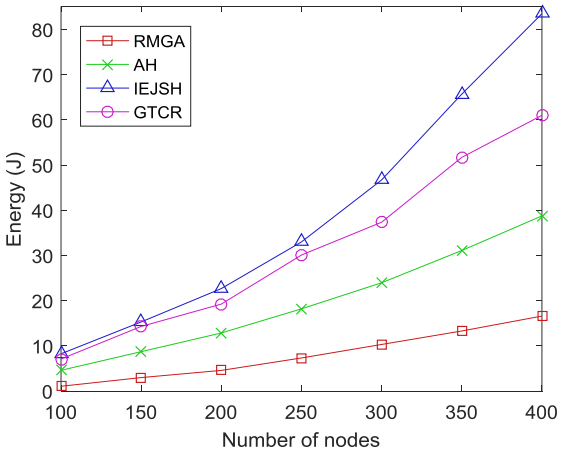
۶-۱- میانگین انرژی مصرفی گره‌ها

یک چالش اساسی در شبکه‌های حسگر، کاهش مصرف انرژی و در نتیجه افزایش طول عمر شبکه است. شکل ۹ متوسط مقدار انرژی مصرفی الگوریتم‌های مورد نظر در طول زمان را مقایسه کرده است. با توجه به نتایج گزارش شده در این شکل، روش پیشنهادی میزان انرژی مصرفی در طول زمان را نسبت به الگوریتم‌های IEJSH، GTCR، و AH به ترتیب ۸۰٪، ۷۵٪، و ۵۸٪ کاهش داده است. تاثیر تعداد گره‌ها بر متوسط میزان مصرفی در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. نتایج گزارش شده در این شکل، حاصل ۳۰۰ دور اجرای الگوریتم‌ها است. همان طور که در اینجا دیده می‌شود، مقدار انرژی مصرفی با افزایش تعداد گره‌ها بیشتر می‌شود. همچنین الگوریتم RMGA متوسط میزان مصرف انرژی در شبکه‌های با تعداد گره مختلف را نسبت به روش‌های دیگر کاهش داده است. به عبارت دقیق‌تر، مقدار انرژی مصرفی الگوریتم RMGA در مقایسه با IEJSH، GTCR، و AH به ترتیب ۸۱٪، ۷۷٪، و ۶۳٪ کمتر است.



شکل ۹: مقایسه انرژی مصرفی در طول زمان. (الف) شبکه‌های ۲۰۰ گرهی. (ب) شبکه‌های ۴۰۰ گرهی.

یک عامل مهم در کاهش مصرف انرژی در الگوریتم RMGA، استفاده از الگوریتم ژنتیک برای ساخت درخت و تعیین سطح مدولاسیون گره‌ها است. الگوریتم ژنتیک و کلا روش‌های بهینه سازی مبتنی بر هوش مصنوعی، جستجو را با تعدادی جواب تصادفی



شکل ۱۰: مقایسه انرژی مصرفی با افزایش تعداد گره‌ها.

آغاز کرده و طی چندین دور در فضای حالت برای یافتن جواب مناسب جستجو می‌کنند. الگوریتم‌های مذکور در هر دور در فضای جواب به اکتشاف و استخراج پرداخته و جواب‌های موجود را با جواب‌های بهتر با برازندگی بیشتر جایگزین می‌کنند. با توجه به اینکه این روش‌ها در کل فضای حالت به جستجو می‌پردازند معمولا جواب‌های با برازندگی بالا پیدا می‌کنند. همچنین در الگوریتم RMGA از معیارهای آگاه به انرژی در توابع برازندگی ارائه شده استفاده شده که میزان انرژی مصرفی را به میزان قابل قبولی کاهش داده است.

در مقابل همان‌طور که در بخش ۲ توضیح داده شد، الگوریتم‌های IEJSH و AH از روش‌های حریصانه برای حل مسئله استفاده کرده‌اند. روش‌های حریصانه مسائل را در چند دور حل می‌کنند. تصمیمی که در هر دور گرفته می‌شود با استفاده از اطلاعات موجود در آن دور، و مستقل از دورهای قبلی و بعدی است. در نتیجه میزان کارایی الگوریتم‌های مذکور پایین خواهد بود. همچنین IEJSH از درخت از پیش ساخته شده استفاده می‌کند که کارایی آن را بسیار کاهش می‌دهد. روش GTCR برای ساخت درخت از الگوریتم بهینه سازی آموزش گروهی استفاده کرده است. با این حال، انرژی مصرفی این روش به دلیل عدم استفاده از تکنیک DMS نسبتا قابل توجه است. روش RMGA با بهره گیری از الگوریتم ژنتیک و تکنیک DMS توانسته میزان انرژی مصرفی را تا حد زیادی کاهش دهد.

۶-۲- انحراف از معیار انرژی مصرفی گره‌ها

معیار میانگین انرژی مصرفی نمی‌تواند اطلاعاتی در مورد انرژی مصرف شده توسط هر کدام از گره‌ها فراهم نمایید. ممکن است با وجود میانگین انرژی مصرفی پایین، نرخ مصرف انرژی در برخی گره‌ها بالا باشد. در نتیجه با وجود گره‌های پر انرژی در شبکه، انرژی برخی از حسگرها سریع تخلیه خواهند شد. برای سنجش میزان تعادل در مصرف انرژی گره‌ها، مقدار انحراف از معیار انرژی مصرفی گره‌ها بررسی می‌شود. هرچه مقدار انحراف از معیار انرژی مصرفی کمتر باشد، تعادل در مصرف انرژی بین گره‌های مختلف بیشتر می‌شود. در نتیجه از مرگ زود هنگام یک گره نسبت به گره‌های دیگر جلوگیری می‌شود.

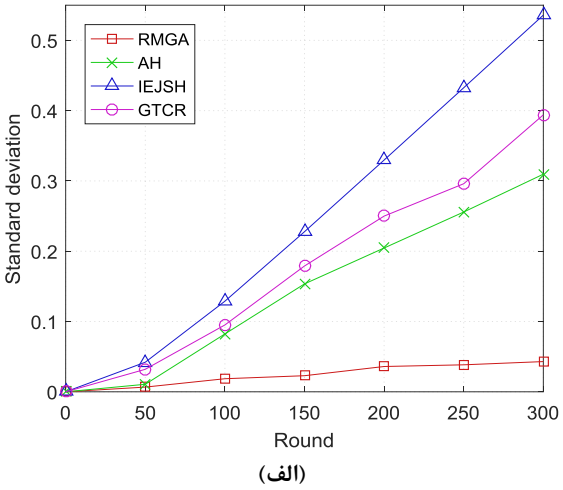
با توجه به نتایج گزارش شده در شکل ۱۱، انحراف از معیار روش پیشنهادی در طول زمان به ترتیب ۸۹٪، ۸۵٪، و ۷۸٪ کمتر از IEJSH، GTCR، و AH است. به علاوه، انحراف از معیار RMGA در طول زمان به مقدار بسیار کمی افزایش یافته که این مسئله نشان دهنده مصرف یکنواخت انرژی توسط این الگوریتم است. همچنین انحراف از معیار به دست آمده به ازای تعداد مختلف گره‌ها در شکل ۱۲ نشان داده شده است. این نتایج از ۳۰۰ دور اجرای الگوریتم‌ها به دست آمده‌اند. بر اساس نتایج آورده شده، متوسط انحراف از معیار الگوریتم RMGA به ازای تعداد گره مختلف به ترتیب ۹۴٪، ۹۲٪، و ۸۸٪ نسبت به IEJSH، GTCR، و AH کمتر است.

نتایج حاصله نشان دهنده توانایی بالاتر الگوریتم RMGA برای ایجاد تعادل در مصرف انرژی گره‌های مختلف است. همان‌طور که در بخش ۶-۱ توضیح داده شد، یک دلیل کارایی بیشتر روش پیشنهادی، استفاده از روش‌های بهینه سازی است. همچنین با افزودن انحراف از معیار طول عمر به تابع برازندگی، انرژی مصرفی گره‌های مختلف متعادل‌تر می‌شود.

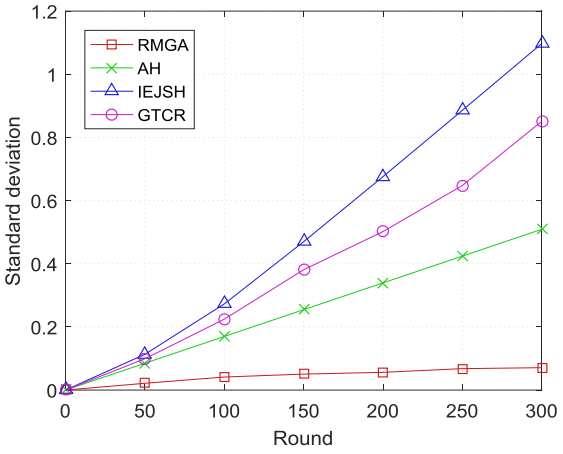
۶-۳- طول عمر شبکه

یک معیار مهم برای سنجش مدت زمان کارکرد شبکه‌ها، طول عمر آنها است. این معیار نشان دهنده مدت زمان بین شروع کار شبکه تا مرگ اولین گره است. معیار دیگر تعداد گره‌های زنده در طول زمان اجرای الگوریتم است. این دو معیار ارتباط مستقیمی با میانگین و انحراف از معیار انرژی مصرفی دارند. مشخص است که هر چه انحراف از معیار انرژی مصرفی کمتر باشد، طول عمر شبکه و همچنین تعداد گره‌های زنده در طول زمان بیشتر خواهد بود.

شکل ۱۳ طول عمر شبکه به ازای تعداد گره مختلف را نشان داده است. با توجه به نتایج آورده شده، الگوریتم پیشنهادی طول عمر شبکه را به ترتیب ۱۲۵٪، ۱۱۰٪، و ۱۰۰٪ نسبت به IEJSH، GTCR، و AH افزایش داده است. همچنین تعداد گره‌های زنده با

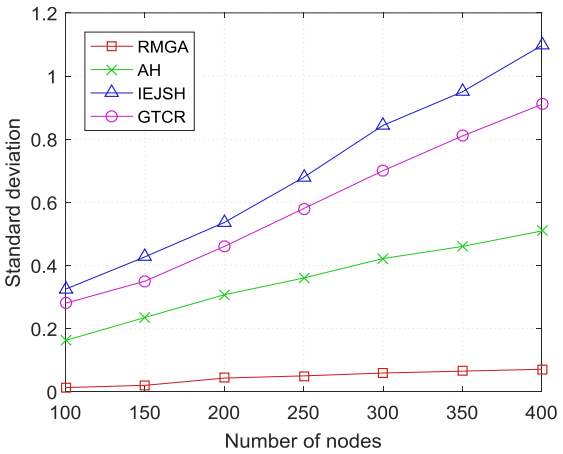


(الف)



(ب)

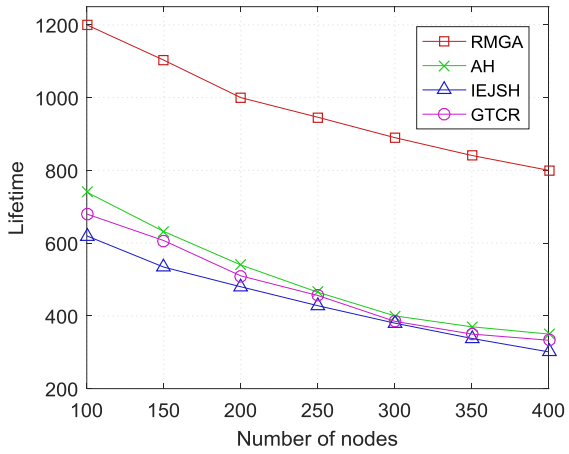
شکل ۱۱: مقایسه انحراف از معیار انرژی مصرفی در طول زمان. (الف) شبکه‌های ۲۰۰ گرهی. (ب) شبکه‌های ۴۰۰ گرهی.



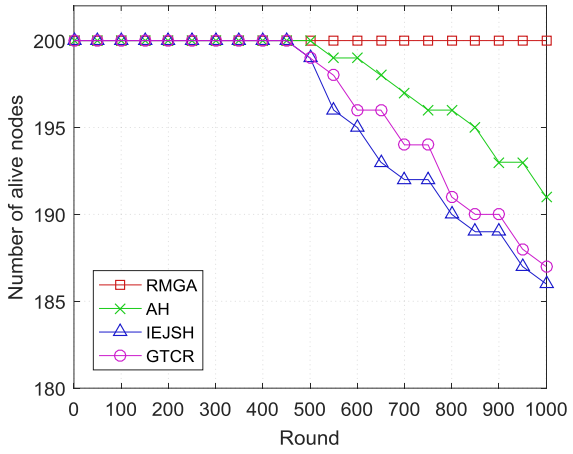
شکل ۱۲: مقایسه انحراف از معیار انرژی مصرفی با افزایش تعداد گره‌ها.

استفاده از الگوریتم‌های مورد بررسی در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. همان طور که در اینجا دیده می‌شود، در شبکه‌های ۲۰۰ گرهی تعداد گره‌های زنده پس از ۱۰۰۰ دور برای الگوریتم RMGA به ترتیب ۹، ۱۳، و ۱۴ تا بیشتر از IEJSH، GTCR، و AH است.

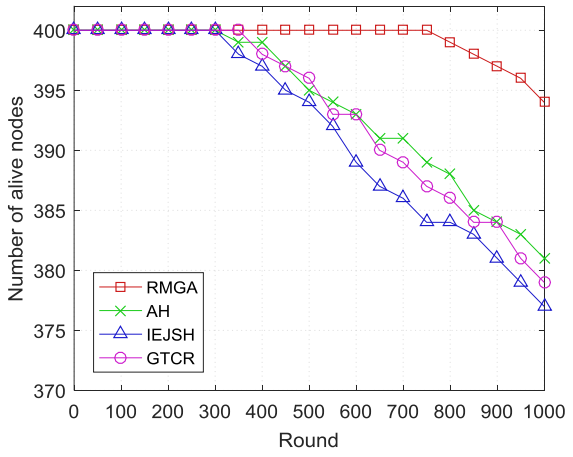
همچنین در شبکه‌های ۴۰۰ گرهی این مقادیر به ترتیب برابر ۱۳، ۱۵، و ۱۷ گره هستند. نتایج به دست آمده در این بخش موید خروجی‌های دو بخش قبلی هستند.



شکل ۱۳: مقایسه طول عمر شبکه با افزایش تعداد گره‌ها.



(الف)



(ب)

شکل ۱۴: مقایسه تعداد گره‌های زنده در طول زمان. (الف) شبکه‌های ۲۰۰ گرهی. (ب) شبکه‌های ۴۰۰ گرهی.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله، الگوریتم RMGA برای مسیریابی و تعیین سطح مدولاسیون در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مبتنی بر DMS ارائه شده است. در روش پیشنهادی، تعیین مسیر ارسال داده‌ها و سطح مدولاسیون گره‌ها در دو مرحله و با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شده است. کروموزوم ارائه شده در مرحله اول دربرگیرنده گره پدر هر حسگر است. همچنین تابع برازندگی به صورت بیشینه کردن متوسط، و کمینه کردن انحراف از معیار انرژی گره‌ها تعریف شده است. خروجی مرحله اول یک درخت پوشا بر روی حسگرها است. در مرحله دوم سطح مدولاسیون گره‌ها مشخص می‌شوند. کروموزوم معرفی شده در این مرحله شامل سطح مدولاسیون گره‌ها است. همچنین برای یک جلوگیری از بروز تداخل، کروموزوم‌های تولید شده اعتبار سنجی شده و در صورت لزوم تصحیح می‌شوند. شبیه سازی‌های انجام شده بیان‌گر کارایی بالاتر الگوریتم RMGA نسبت به روش‌های پیشین است. عمده‌ترین دلیل بهبود روش پیشنهادی، به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک در هر دو مرحله مسیریابی و تعیین سطح مدولاسیون گره‌ها است. جواب‌های به‌دست آمده از طریق الگوریتم ژنتیک به دلیل حرکت در راستای یک تابع برازندگی و همچنین استفاده از تکنیک جهش برای فرار از بهینه محلی، مطلوب خواهند بود.

مراجع

[1] R. E. Mohamed, A. I. Saleh, M. Abdelrazzak, and A. S. Samra, “Survey on Wireless Sensor Network Applications and Energy Efficient Routing Protocols,” Wireless Personal Communications, vol. 101, pp.1019-1055, 2018.

[2] R. M. Curry and J. C. Smith, “A Survey of Optimization Algorithms for Wireless Sensor Network Lifetime Maximization,” Computers & Industrial Engineering, vol. 101, pp. 145-166, 2016.

[3] J. Singh, R. Kaur, and D. Singh, “A Survey and Taxonomy on Energy Management Schemes in Wireless Sensor Networks,” Journal of Systems Architecture, vol. 111, pp. 101782, 2020.

[4] P. Visu, T. S. Praba, N. Sivakumar, R. Srinivasan, and T. Sethukarasi, “Bio-Inspired Dual Cluster Heads Optimized Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks,” Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, vol. 12, pp. 3753-3761, 2021.

[۵] محمد علائی و فهیمه یزدان پناه، "یک روش خوشه بندی توزیع شده مبتنی بر منطق فازی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و انتقال داده در شبکه‌های حسگر بی‌سیم"، مجله علمی-پژوهشی رایانش نرم و فناوری اطلاعات، دوره ۹، شماره ۳، صفحه ۲۲۹-۲۴۳، مهر ۱۳۹۹.

[6] N. M. Shagari, R. B. Salleh, I. Ahmedy, M. Yamani Idna Idris, G. Murtaza, U. Ali, and S. Modi, “A Two-Step Clustering to Minimize Redundant Transmission in Wireless Sensor Network Using Sleep-awake Mechanism,” Wireless Networks, vol. 28, pp. 2077-2104, 2022.

[7] Z. Jiao, L. Zhang, M. Xu, C. Cai, and J. Xiong, "Coverage Control Algorithm-Based Adaptive Particle Swarm Optimization and Node Sleeping in Wireless Multimedia Sensor Networks," IEEE Access, vol. 7, pp. 170096-170105, 2019.

[8] A. Gumusalan, R. Simon, and H. Aydin, "Adaptive Transmission Scheduling for Energy-Aware Real-Time Wireless Communication," In 13th International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks (EWSN), pp. 1-12, 2016.

[9] A. Gumusalan, R. Simon, and H. Aydin, "Flexible Real-Time Transmission Scheduling for Wireless Networks with Non-Deterministic Workloads," Ad Hoc Networks, vol. 73, pp. 65-79, 2018.

[10] M. Bandari, R. Simon, and H. Aydin, “On Minimizing Expected Energy Usage of Embedded Wireless Systems with Probabilistic Workloads,” Sustainable Computing: Informatics and Systems, vol. 11, pp. 50-62, 2016.

[11] M. Bandari, R. Simon, and H. Aydin, "Power Management in Cluster-Based Energy-Harvesting Sensor Networks Through Dynamic Modulation Scaling," In 17th International Conference on High Performance Computing and Communications, 7th International Symposium on Cyberspace Safety and Security, and 12th International Conference on Embedded Software and Systems, pp. 925-933, 2015.

[12] M. Bandari, R. Simon, and H. Aydin, "DMS-Based Energy Optimizations for Clustered WSNs," ACM Transactions on Embedded Computing Systems, vol. 16, no. 3, pp. 1-28, 2017.

[13] G. S. A. Kumar, G. Manimaran, and Z. Wang, "End-to-End Energy Management in Networked Real-Time Embedded Systems," IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 19, no. 11, pp. 1498-1510, 2008.

[14] B. Fateh and M. Govindarasu, “Energy Minimization by Exploiting Data Redundancy in Real-Time Wireless Sensor Networks,” Ad Hoc Networks, vol. 11, no. 6, pp. 1715-1731, 2013.

[15] Y. Yu, V. K. Prasanna and B. Krishnamachari, “Energy Minimization for Real-Time Data Gathering in Wireless Sensor Networks,” IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 5, no. 11, pp. 3087-3096, 2006.

[16] B. Fateh and M. Govindarasu, “Joint Scheduling of Tasks and Messages for Energy Minimization in Interference-Aware Real-Time Sensor Networks,” IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 14, no. 1, pp. 86-98, 2015.

[17] A. Gumusalan, R. Simon, and H. Aydin, "Dynamic Modulation Scaling Enabled Multi-Hop Topology Control for Time Critical Wireless Sensor Networks," Wireless Networks, vol. 26, pp. 1203-1226, 2020.

[18] E. Cuevas, A. Rodríguez, A. Alejo-Reyes, and C. Del-Valle-Soto, “Metaheuristic Algorithms for Wireless Sensor Networks,” Studies in Computational Intelligence, Springer, vol. 948, pp. 193-235, 2021.

[19] Z. Al Aghbari, A. M. Khedr, W. Osamy, I. Arif, and D. P. Agrawal, “Routing in Wireless Sensor Networks Using Optimization Techniques: A Survey,” Wireless Personal Communications, vol. 111, pp. 2407-2434, 2020.

[20] M. Al-Shal, M. Anbar, T-C. Wan, and Z. Alqattan, “Energy Efficient Multi-Hop Path in Wireless Sensor Networks using an Enhanced Genetic Algorithm,” Information Sciences, vol. 500, pp. 259-273, 2019.

[21] M. Wang, S. Wang, and B. Zhang, “APTEEN Routing Protocol Optimization in Wireless Sensor Networks Based on Combination of Genetic Algorithms and Fruit Fly Optimization Algorithm,” Ad Hoc Networks, vol. 102, pp. 102138, 2020.

[22] M. J. Zardosht and N. Parhizgar, “Energy Optimization in Multi-Hop Wireless Sensor Networks based on Proposed Harmony Search Routing Algorithm,” Wireless Personal Communications, vol. 118, pp. 2717-2731, 2021.

[23] M. Angurala, M. Bala, and S. Singh Bamber, "Energy Efficient CLB Approach to Find Optimum Modulation Scheme in Wireless Rechargeable Sensor Networks," International Journal of Information Technology, vol. 13, pp. 269-276, 2021.

[24] M. Angurala, H. Singh, Anupriya, A. Grover, and M. Singh, "Testing Solar-MAODV Energy Efficient Model on Various Modulation Techniques in Wireless Sensor and Optical Networks," Wireless Networks, vol. 28, pp. 413-425, 2022.

[25] J. Hu, G. Liang, Q. Yu, K. Yang, and X. Lu, "Simultaneous Wireless Information and Power Transfer with Fixed and Adaptive Modulation," Digital Communications and Networks, 2022, https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.01.001.

[26] S. Randhawa and S. Jain, "Energy-Efficient Load Balancing Scheme for Two-Tier Communication in Wireless Sensor Networks," The Journal of Supercomputing, vol. 74, pp. 386-416, 2018.

[27] A. Gumusalan, R. Simon, and H. Aydin, "A Software-Defined Radio Analysis of the Impact of Dynamic Modulation Scaling Within Low-Power Wireless Systems," In 21st International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWIM), pp. 315-324, 2018.

[28] H. Esmaeili, B. Minaei Bidgoli, and V. Hakami, "CMML: Combined Metaheuristic-Machine Learning for Adaptable Routing in Clustered Wireless Sensor Networks," Applied Soft Computing, vol. 118, pp. 108477, 2022.

[۲۹] سمانه پوست فروشان و مهدی آقا صرام، "به کارگیری الگوریتم بهینه سازی PSO به منظور بهبود طول عمر شبکه های حسگر بیسیم"، مجله رایانش نرم و فناوری اطلاعات، دوره ۵، شماره ۳، صفحه ۵۵-۶۴، پاییز ۱۳۹۵.

[30] S. J. Anandh and E. Baburaj, "Energy Efficient Routing Technique for Wireless Sensor Networks Using Ant-Colony Optimization," Wireless Personal Communications, vol. 114, pp. 3419-3433, 2020.

[31] V. K. Arora, V. Sharma, and M. Sachdeva, "A Multiple Pheromone Ant Colony Optimization Scheme for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks," Soft Computing, vol. 24, pp. 543-553, 2020.

[32] L. Rajesh and H. S. Mohan, "Adaptive Group Teaching Based Clustering and Data Aggregation with Routing in Wireless Sensor Network," Wireless Personal Communications, vol. 122, pp. 1839-1866, 2022.

[33] K. SureshKumar and P. Vimala, "Energy Efficient Routing Protocol Using Exponentially-Ant Lion Whale Optimization Algorithm in Wireless Sensor Networks," Computer Networks, vol. 197, pp. 108250, 2021.

[34] S. Singh and R. M. Sharma, "HSCA: A Novel Harmony Search Based Efficient Clustering in Heterogeneous WSNs," Telecommunication Systems, vol. 67, pp. 651-667, 2018.

[35] C. Schurgers, V. Raghunathan, and M. B. Srivastava, "Power Management for Energy-Aware Communication Systems," ACM Transactions on Embedded Computing Systems, vol. 2, no. 3, 2003.

[36] D. E. Goldberg, "Genetic algorithms in sea, optimization, and machine learning," Addison-Wesley Professional, first edition, 1989.

[37] H. S. Chiu and K. L. Yeung, "Maximizing Multicast Call Acceptance Rate in Multi-Channel Multi-Interface Wireless Mesh Networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 9, no. 8, pp. 2622 – 2631, 2010.

پاورقی‌ها:

[1] Dynamic Modulation Scaling
[2] Chromosome
[3] Fitness function
[4] Binary Phase-Shift Keying
[5] Channel fading
[6] Quadrature Amplitude Modulation
[7] Pulse Amplitude Modulation
[8] Slot
[9] Low power
[10] Channel noise power spectral density
[11] Bit error rate
[12] Cost function
[13] Crossover
[14] Mutation
[15] Parent
[16] Roulette wheel selection
[17] Binary tournament selection
[18] Exploitation
[19] Offspring
[20] Exploration
[21] Routing and determining the Modulation level of nodes in dynamic modulation scaling-enabled WSNs using Genetic Algorithm
[22] MATLAB