

# جمع‌آوری داده آگاه به انرژی در شبکه‌های حسگر قابل شارژ با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات توسعه‌یافته

وحیده فراهانی، لیلی فرزین‌وش، مینا زلفی لیقوان و رحیم ابری لیقوان

اطراف خود و همچنین انتقال داده، انرژی مصرف می‌کند. مصرف بی‌رویه انرژی منجر به مرگ زودهنگام گره‌ها می‌شود. در این حالت ممکن است پوشش برخی نواحی دچار مشکل شده و یا ارتباط بخش‌هایی از شبکه با چاهک قطع شود. برای مدیریت مصرف انرژی روش‌های مختلفی پیشنهاد شده که از آن جمله می‌توان به زمان‌بندی خواب گره‌ها<sup>۳</sup> [۲]، خوشه‌بندی<sup>۴</sup> [۳] و [۴] و مسیریابی آگاه به انرژی [۵] و [۶] اشاره کرد. استفاده از گره‌های حسگر قابل شارژ<sup>۵</sup> روشی کارا برای مقابله با مسئله محدودیت انرژی است [۷]. این گره‌ها از منابع محیطی مختلف مانند نور خورشید، باد و گرما، انرژی برداشت<sup>۶</sup> کرده و آن را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند [۸] تا [۱۰]. انرژی الکتریکی حاصل ذخیره شده و برای جمع‌آوری و انتقال داده استفاده می‌شود. با توجه به نرخ پایین برداشت انرژی از محیط، نحوه مصرف انرژی در شبکه‌های قابل شارژ باید مدیریت شود. در این راستا، مسئله جمع‌آوری داده آگاه به انرژی در شبکه‌های حسگر قابل شارژ در مقالات مختلفی بررسی شده است. این الگوریتم‌ها جنبه‌های مختلف جمع‌آوری داده از جمله زمان‌بندی خواب حسگرها [۱۱] تا [۱۳]، برقراری پوشش کامل [۱۱] و [۱۲]، تنظیم نرخ ارسال داده [۱۴] و [۱۵]، مسیریابی [۱۶] تا [۱۸] و خوشه‌بندی [۱۹] تا [۲۱] را مورد مطالعه قرار داده‌اند.

ایراد الگوریتم‌های ارائه‌شده آن است که هیچ کدام از آنها همه جنبه‌های جمع‌آوری داده را مد نظر قرار نداده‌اند. همچنین اکثر این روش‌ها به دلیل استفاده از روش‌های حریصانه<sup>۷</sup> کارایی کمی دارند. الگوریتم‌های ارائه‌شده در [۱۱] و [۱۲]، مسئله پوشش و ارتباط زمان‌بندی خواب گره‌ها با آن را بررسی نموده‌اند. روش‌های پیشنهادی در [۱۳]، [۲۲] و [۲۳]، فقط لایه پیوند داده<sup>۸</sup> را مطالعه کرده و به سایر جوانب مسئله جمع‌آوری داده نپرداخته‌اند. مراجع [۱۴] تا [۱۸] و [۲۴] تا [۲۷] فقط مسئله مسیریابی را مورد توجه قرار داده‌اند. در [۲۸] روشی حریصانه برای زمان‌بندی خواب گره‌ها و مسیریابی ارائه شده است. الگوریتم‌های ارائه‌شده در [۱۹]، [۲۹] و [۳۰] به خوشه‌بندی گره‌های قابل شارژ پرداخته‌اند. در [۲۹] و [۳۰] از روش‌های بهینه‌سازی برای خوشه‌بندی استفاده شده است. نحوه کدینگ<sup>۹</sup> و تابع هزینه<sup>۱۰</sup> تعریف‌شده در این مقالات کارا نبوده و

چکیده: یک چالش مهم در شبکه‌های حسگر، جمع‌آوری داده با توجه به انرژی محدود گره‌ها است. استفاده از حسگرهای قابل شارژ برای جمع‌آوری اطلاعات و انتقال آنها به چاهک، مشکل محدودیت انرژی را تا حدی مرتفع می‌نماید. با توجه به نرخ پایین برداشت انرژی در گره‌های قابل شارژ، مدیریت مصرف انرژی در این شبکه‌ها امری ضروری است. الگوریتم‌های موجود، جنبه‌های مهم جمع‌آوری آگاه به انرژی- شامل زمان‌بندی خواب گره‌ها، خوشه‌بندی و مسیریابی- را به صورت جامع بررسی نکرده‌اند و همچنین اکثر آنها از روش‌های حریصانه و با کارایی پایین استفاده نموده‌اند. در این مقاله، یک روش کارایی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات توسعه‌یافته به نام EDGR برای جمع‌آوری داده در شبکه‌های قابل شارژ ارائه شده است. در الگوریتم پیشنهادی، مسئله مورد نظر به سه مرحله زمان‌بندی خواب گره‌ها، خوشه‌بندی و مسیریابی، تقسیم گردیده و مراحل به ترتیب حل شده‌اند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، الگوریتم EDGR مقدار متوسط و انحراف از معیار انرژی ذخیره‌شده در گره‌ها و همچنین نرخ گم‌شدن بسته‌ها را به مقدار قابل توجهی نسبت به روش‌های پیشین بهبود داده است.

کلیدواژه: الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، خوشه‌بندی، زمان‌بندی خواب گره‌ها، شبکه حسگر قابل شارژ، مسیریابی.

## ۱- مقدمه

یک شبکه حسگر بی‌سیم<sup>۱</sup> مجموعه‌ای از گره‌های حسگر است که وظیفه نظارت بر محیط را بر عهده دارند. این گره‌ها مشخصات محیط مانند دما، رطوبت و فشار را اندازه‌گیری کرده و اطلاعات جمع‌آوری شده را به چاهک<sup>۲</sup> ارسال می‌کنند. از شبکه‌های حسگر برای نظارت بر محیط‌های مختلف استفاده می‌شود که از آن جمله می‌توان به کاربردهای نظامی، کنترل و مدیریت شرایط بحرانی و تحقیقات در حیات جانداران اشاره کرد [۱]. یکی از چالش‌های مهم در شبکه‌های حسگر، مدیریت مصرف انرژی در گره‌ها است. هر گره برای جمع‌آوری داده از محیط

این مقاله در تاریخ ۲۶ دی ماه ۱۳۹۹ دریافت و در تاریخ ۱۱ مهر ماه ۱۴۰۰ بازنگری شد.

وحیده فراهانی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، (email: v\_farahani96@ms.tabrizu.ac.ir)

لیلی فرزین‌وش (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، (email: l.farzinwash@tabrizu.ac.ir)

مینا زلفی لیقوان، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، (email: mzolfy@tabrizu.ac.ir)

رحیم ابری لیقوان، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، (email: abri.rahim@yahoo.com)

3. Sleep Scheduling
4. Clustering
5. Rechargeable
6. Harvesting
7. Greedy
8. MAC Layer
9. Coding
10. Cost Function

1. Wireless Sensor Network
2. Sink

بخش ۴ معرفی گردیده و سپس الگوریتم EDGR در بخش ۵ توضیح داده شده است. در بخش ۶ کارایی روش پیشنهادی با روش‌های موجود مقایسه گردیده و نهایتاً مقاله در بخش ۷ جمع‌بندی شده است.

## ۲- مروری بر کارهای قبلی

شبکه‌های حسگر قابل شارژ در مقالات متعددی بررسی شده‌اند. روش‌های ارائه‌شده، جنبه‌های مختلف شبکه از جمله پوشش، زمان‌بندی خواب، خوشه‌بندی، کنترل نرخ ارسال و مسیریابی را مد نظر قرار داده‌اند. مسئله زمان‌بندی خواب گره‌ها در شبکه‌های حسگر قابل شارژ در [۱۱] و [۱۲] بررسی شده است. مرجع [۱۱] پوشش مرزی  $k$  تایی با استفاده از گره‌های قابل شارژ را بررسی کرده است. در اینجا هدف، بیشینه‌کردن مقدار  $k$  با استفاده از زمان‌بندی خواب مناسب برای گره‌ها است. روش پیشنهادی در [۱۲] مسئله پوشش تعدادی هدف را مطالعه کرده است. در این تحقیق فرض شده که شبکه شامل گره‌های معمولی و قابل شارژ می‌باشد و هدف، پوشش اهداف با استفاده حداکثری از حسگرهای قابل شارژ است. مسئله مورد نظر با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی<sup>۹</sup> مدل و حل شده است. الگوریتم ارائه‌شده در [۱۳]، مسئله زمان‌بندی خواب در شبکه‌های حسگر قابل شارژ مبتنی بر لایه پیوند داده CSMA/CD<sup>۱۰</sup> را مطالعه کرده است. در این روش، دوره‌های زمانی خواب حسگرها به نحوی تنظیم می‌شوند که میزان مصرف انرژی گره‌ها متعادل باشد و همچنین نرخ ارسال هم‌زمان گره‌های متداخل<sup>۱۱</sup> کاهش یابد. مدیریت لایه پیوند داده در شبکه‌های حسگر قابل شارژ در [۲۲] و [۲۳] نیز بررسی شده است. هدف روش‌های ارائه‌شده در این مقالات، مدیریت مصرف انرژی و کاهش نرخ گم‌شدن بسته‌ها<sup>۱۲</sup> است.

مراجع [۱۴] تا [۱۸] و [۲۴] تا [۲۸] مسیریابی در شبکه‌های حسگر قابل شارژ را مطالعه نموده‌اند. الگوریتم‌های ارائه‌شده را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم نمود. در دسته اول، نرخ تولید داده ثابت در نظر گرفته شده است. در این الگوریتم‌ها هدف، مدیریت مصرف انرژی و کمینه‌نمودن نرخ گم‌شدن داده است. در [۱۶] برای ساخت مسیر از الگوریتم DSR<sup>۱۳</sup> استفاده شده است. در این روش، هزینه یک مسیر با توجه به دو معیار مشخص می‌شود: بیشینه‌نمودن انرژی گره‌ها با احتساب انرژی برداشتی پیش‌بینی شده و کمینه‌کردن میزان انرژی برداشت‌نشده به دلیل محدودیت ظرفیت باتری گره‌ها. مسیریابی فرصت‌طلبانه<sup>۱۴</sup> در [۱۷] و [۲۸] مطالعه شده است. در [۱۷] برای تعیین گره گام بعدی<sup>۱۵</sup> از معیارهای میزان انرژی و فاصله از چاهک استفاده شده است. روش پیشنهادی در [۲۸] زمان‌بندی خواب را با مسیریابی فرصت‌طلبانه ترکیب نموده است. در اینجا حالت گره‌ها (خواب یا بیداربودن) در دور بعدی با توجه به میزان انرژی برداشتی پیش‌بینی شده تعیین گردیده است.

دسته دوم الگوریتم‌های مسیریابی، نرخ تولید داده را با توجه به مقدار انرژی برداشت‌شده تنظیم می‌کنند. روش ارائه‌شده در [۱۴] نرخ برداشت انرژی را ثابت در نظر گرفته است. در اینجا نرخ تولید داده با استفاده از

منجر به تولید جواب‌های مناسب نمی‌شوند. در [۲۰]، [۲۱] و [۳۱] تا [۳۳] برای جمع‌آوری داده ابتدا خوشه‌بندی انجام شده و سپس مسیریابی برای سرخوشه‌ها<sup>۱</sup> انجام می‌گردد. این مقالات روش‌هایی حریصانه برای خوشه‌بندی و مسیریابی ارائه داده‌اند و بنابراین کارایی پایینی دارند.

در این مقاله، الگوریتمی آگاه به انرژی برای جمع‌آوری داده‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم قابل شارژ به نام EDGR<sup>۲</sup> ارائه شده است. الگوریتم EDGR از سه تکنیک زمان‌بندی خواب گره‌ها، خوشه‌بندی آگاه به انرژی و مسیریابی آگاه به انرژی، برای مدیریت مصرف انرژی استفاده می‌کند. بر این اساس، الگوریتم به سه مرحله زمان‌بندی خواب گره‌ها، خوشه‌بندی و مسیریابی تقسیم شده و مراحل مذکور به ترتیب حل می‌شوند. در طراحی الگوریتم EDGR به این نکته توجه شده که نرخ برداشت انرژی در بازه‌های زمانی مختلف تقریباً ثابت است [۱۱]، [۱۴]، [۲۰]، [۲۵]، [۳۲] و [۳۳]. بنابراین مقدار تقریبی انرژی ذخیره‌شده در هر گره در یک بازه زمانی - که در ادامه دور نامیده می‌شود - تقریباً مشخص است. با توجه به ثابت‌بودن پارامترهای مسئله، می‌توان الگوریتم‌های فراابتکاری<sup>۳</sup> را برای حل مسئله به کار برد. مراحل روش پیشنهادی با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>۴</sup> (PSO) توسعه‌یافته به نام PSO-TVAC [۳۴] حل شده‌اند. الگوریتم PSO-TVAC مشکل گیرافتادن در دام کمینه محلی<sup>۵</sup> را تا حد زیادی حل کرده و جواب‌های مناسبی را با سرعت بالا تولید می‌نماید.

در ادامه، نحوه حل زیرمسائل الگوریتم EDGR توضیح داده شده‌اند. در مرحله اول، بخشی از گره‌ها که انرژی کمتری دارند به حالت خواب می‌روند. در اینجا به این نکته توجه شده که در شبکه‌های با تعداد گره زیاد، تنوع ذرات و اندازه فضای جواب<sup>۶</sup> قابل توجه است. به منظور کوچک‌کردن فضای حالت، شبکه به چندین بخش تقسیم شده و وضعیت گره‌ها در هر بخش به صورت مستقل بررسی می‌شود. در هر بخش، نحوه انتخاب گره‌ها باید به گونه‌ای باشد که شبکه به صورت کامل پوشش داده شود. بنابراین تابع برازندگی<sup>۷</sup> بر اساس مقدار انرژی و تعداد گره‌های بیدار و میزان پوشش تعریف شده است. همچنین یک ذره<sup>۸</sup>، مشخص‌کننده وضعیت گره‌ها است. در ادامه، گره‌های بیدار در مرحله دوم خوشه‌بندی می‌شوند. معیارهای در نظر گرفته شده برای خوشه‌بندی، شامل انرژی سرخوشه‌ها و انرژی لازم برای ارسال داده به آنها است. در مرحله پایانی، یک درخت برای انتقال داده از سرخوشه‌ها به چاهک ساخته می‌شود. در اینجا هدف، انتخاب تعداد محدودی گره پرنرزی برای ساخت درخت است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، الگوریتم EDGR کارایی بسیار بالاتری نسبت به روش‌های قبلی دارد.

در ادامه این مقاله، در بخش ۲ الگوریتم‌های زمان‌بندی خواب گره‌ها، خوشه‌بندی و مسیریابی موجود بر روی شبکه‌های حسگر معمولی و قابل شارژ بررسی شده‌اند. مدل شبکه در بخش ۳ آورده شده است. الگوریتم PSO-TVAC که برای حل مراحل روش پیشنهادی استفاده می‌شود، در

1. Cluster Head
2. Energy-Aware Data Gathering in Rechargeable Wireless Sensor Networks
3. Meta-Heuristic
4. Particle Swarm Optimization
5. Local Optimum
6. Solution Space
7. Fitness Function
8. Particle

9. Harmony Search Algorithm

10. Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection

11. Interfering

12. Packet Loss Ratio

13. Dynamic Source Routing

14. Opportunistic Routing

15. Next Hop

ارسال انرژی تعیین می‌شود. الگوریتم ارائه شده در [۳۳] نیز سرخوشه‌ها را بر اساس مقدار انرژی گره‌ها و میزان برداشت در دور کنونی مشخص کرده است. همچنین اندازه خوشه‌ها بر اساس فاصله آنها از چاهک تعیین شده‌اند. در اینجا داده به صورت چندگامی به چاهک ارسال می‌شود. برای یک سرخوشه مفروض، گره گام بعدی از بین سرخوشه‌هایی که به چاهک نزدیک‌تر هستند انتخاب می‌شود. معیارهای انتخاب این گره شامل میزان انرژی سرخوشه مفروض و گره گام بعدی، میزان برداشت آنها در دور کنونی و انرژی لازم برای انتقال داده بین دو گره است.

### ۳- مدل سیستم

در این بخش، فرضیات و مدل شبکه حسگر قابل شارژ مفروض و نیز مدل مصرف انرژی در گره‌های حسگر توضیح داده می‌شود.

#### ۳-۱ فرضیات و مدل شبکه

شبکه مورد نظر شامل  $n$  گره است که به صورت تصادفی در محیطی با ابعاد  $L \times W$  پراکنده شده‌اند و شعاع پوشش و ارسال همه گره‌ها برابر در نظر گرفته شده است. همچنین اندازه شعاع ارسال که با نماد  $TR$  نشان داده می‌شود، دو برابر شعاع پوشش است. مجموعه همسایگان گره  $s_i$  که در شعاع ارسال آن قرار دارند با  $N_i$  نشان داده می‌شود. ظرفیت باتری گره‌ها برای ذخیره انرژی برابر بوده و با  $cp$  نمایش داده می‌شود. فرض شده که باتری گره‌ها در ابتدا به صورت کامل شارژ شده‌اند. هر گره حسگر دارای دو حالت فعال و خواب است. میزان مصرف انرژی در حالت خواب ناچیز و قابل نظر فرض شده است. همچنین گره‌ها قابل شارژ در نظر گرفته شده‌اند. در الگوریتم پیشنهادی، زمان اجرا به یک سری دور به طول  $tp$  تقسیم شده است. مشابه [۱۱]، [۱۴]، [۲۰]، [۲۵]، [۳۲] و [۳۳]، نرخ برداشت انرژی در هر دور ثابت در نظر گرفته شده که مقدار آن با نماد  $h$  نشان داده می‌شود. مقدار انرژی ذخیره شده در گره  $s_i$  در ابتدا و انتهای دور فعلی به ترتیب با نمادهای  $es_i$  و  $ef_i$  نمایش داده می‌شود. ارتباط بین این دو متغیر در (۱) آورده شده است

$$ef_i = es_i + tp \times h \quad (1)$$

گره  $s_i$  برای انتقال داده، مقداری انرژی مصرف می‌کند. انرژی گره در انتهای دور با احتساب انرژی مصرفی با نماد  $er_i$  نشان داده می‌شود. رابطه (۲) نحوه محاسبه  $er_i$  را بیان می‌کند

$$er_i = ef_i - tp \times e_i \quad (2)$$

که در آن  $e_i$  نرخ مصرف انرژی گره  $s_i$  در دور فعلی است. مقدار این متغیر وابسته به مدل مصرف انرژی است و در بخش ۳-۲ محاسبه خواهد شد.

لیست متغیرهای استفاده شده در جدول ۱ آورده شده است.

#### ۳-۲ مدل مصرف انرژی

میزان مصرف انرژی با استفاده از مدل ارائه شده در [۳۵] محاسبه می‌شود. بر اساس این مدل، میزان انرژی لازم برای ارسال و دریافت یک بسته به طول  $l$  به ترتیب از (۳) و (۴) به دست می‌آید. در این روابط  $E_{RX}$  و  $E_{TX}$  به ترتیب نشان‌دهنده مقدار انرژی لازم برای ارسال و دریافت بسته هستند. همچنین پارامتر  $d_{ij}$  بیانگر فاصله بین گره فرستنده  $s_i$  و گره گیرنده  $s_j$  است. مطابق (۳)، میزان انرژی مصرفی برای ارسال بسته وابسته به  $d_{ij}$  است. در صورتی که این پارامتر کمتر از حد آستانه

چهارچوب بهینه‌سازی  $NUM^1$  تنظیم شده است. با استفاده از این چهارچوب، نرخ تولید داده توسط گره‌ها به صورت توزیع شده مشخص می‌شود. در [۲۵] نیز فرض گردیده که نرخ برداشت انرژی در دوره‌های مختلف ثابت بوده و از قبل مشخص است. بر این اساس، یک مدل بهینه برای بهینه‌کردن نرخ داده تولیدشده توسط حسگرها ارائه گردیده است. مرجع [۲۶] تنظیم نرخ تولید داده در شبکه‌های مبتنی بر لایه پیوند داده CSMA/CD را بررسی کرده است. نحوه حل مسئله در این مقاله مشابه [۱۴] است. در [۱۵] ابتدا یک درخت پوشا بر روی حسگرها ساخته شده است. این درخت به گونه‌ای ساخته می‌شود که نرخ تولید داده حسگرها که مشخص‌کننده نرخ مصرف انرژی آنها است، در شرایط مختلف قابل قبول باشد. در ادامه با توجه به نرخ برداشت انرژی در دور کنونی، نرخ تولید داده با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی<sup>۲</sup> تنظیم شده است.

خوشه‌بندی گره‌های قابل شارژ در [۱۹]، [۲۹] و [۳۰] مورد مطالعه قرار گرفته است. در این الگوریتم‌ها، سرخوشه‌ها به صورت مستقیم داده‌ها را به چاهک ارسال می‌کنند. الگوریتم خوشه‌بندی ارائه شده در [۱۹] پروتکل LEACH [۳۵] را توسعه داده است. احتمال انتخاب گره‌ها به عنوان سرخوشه با توجه به دو معیار میزان انرژی و همچنین مقدار پیش‌بینی شده برای انرژی برداشتی در دور کنونی تعیین شده است. روش پیشنهادی در [۳۰] از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای خوشه‌بندی استفاده کرده است. یک ذره آرایه‌ای شامل اعضای خوشه‌ها و سرخوشه‌ها است که در آن، ابتدا اعضای هر خوشه و در انتها سرخوشه‌ها آورده شده‌اند. برای مقاردهای اولیه یک ذره، سرخوشه‌ها از گره‌های پرنرژی انتخاب شده و گره‌های دیگر به صورت تصادفی به یکی از خوشه‌ها ملحق می‌شوند. تابع برازندگی با توجه به انرژی فعلی گره‌ها و انرژی لازم برای ارسال داده‌ها تعریف شده است. ضعف عمده الگوریتم، تعریف نامناسب ذرات برای خوشه‌بندی گره‌ها است. همچنین در تعریف تابع برازندگی به میزان انرژی برداشت شده در دور کنونی توجه نشده است.

مرجع [۲۱] و [۲۹] از الگوریتم ژنتیک<sup>۳</sup> برای خوشه‌بندی استفاده کرده‌اند. در [۲۱] ابتدا سرخوشه‌های اولیه انتخاب شده و گره‌های دیگر به صورت تصادفی به سرخوشه‌ها ملحق شده‌اند. برای تولید نسل جدید از ادغام تک‌نقطه‌ای<sup>۴</sup> استفاده شده است. الگوریتم مذکور روشی برای جهش<sup>۵</sup> کروموزوم‌ها ارائه نداده است. مرجع [۲۹] از کدینگ دودویی استفاده کرده که برای ساخت خوشه مناسب نمی‌باشد. همچنین مقالات مذکور در تعریف تابع برازندگی به انرژی برداشت شده از محیط توجه نکرده‌اند. الگوریتم پیشنهادی در [۲۰] گره‌های سرخوشه را به صورت حریصانه و بر اساس مقدار انرژی گره‌ها و میزان برداشت انرژی توسط آنها در دور قبلی، انتخاب می‌کند. در اینجا مقدار برداشت در دور قبلی به عنوان تخمینی از انرژی برداشت شده در دور کنونی در نظر گرفته شده است. در [۲۰] و [۲۱] مسیریابی به صورت حریصانه انجام شده است.

معیارهای انتخاب سرخوشه‌ها در [۳۲] شامل میزان انرژی گره‌ها و همچنین مقدار برداشت انرژی در دور کنونی است. در الگوریتم پیشنهادی، اندازه خوشه‌ها بر مبنای فاصله آنها از چاهک تنظیم شده و بنابراین نرخ مصرف انرژی در سرخوشه‌های نزدیک چاهک کاهش می‌یابد. در روش مسیریابی پیشنهادی، گره گام بعدی بر اساس میزان انرژی مصرفی برای

1. Network Utility Maximization
2. Stochastic Programming
3. Genetic Algorithm
4. Single-Point Crossover
5. Mutation

جدول ۱: متغیرهای استفاده‌شده.

متغیر	مفهوم
$n$	تعداد گره‌ها
$W$ و $L$	ابعاد شبکه
$TR$	شعاع ارسال
$N_i$	مجموعه همسایگان گره $s_i$
$cp$	ظرفیت باتری هر گره برای ذخیره انرژی
$tp$	طول هر دور
$h$	نرخ برداشت انرژی در دور فعلی
$es_i$	مقدار انرژی ذخیره‌شده گره $s_i$ در ابتدای دور فعلی
$ef_i$	مقدار انرژی ذخیره‌شده گره $s_i$ در انتهای دور فعلی
$er_i$	مقدار انرژی گره $s_i$ در انتهای دور فعلی
$e_i$	نرخ مصرف انرژی گره $s_i$ در دور فعلی

این ذرات فضای جواب را جستجو کرده تا جواب بهینه را پیدا کنند. ذره  $i$  شامل بردار مکان  $X_i^t = [x_{i1}^t, x_{i2}^t, \dots, x_{iDim}^t]$  و بردار سرعت  $V_i^t = [v_{i1}^t, v_{i2}^t, \dots, v_{iDim}^t]$  است. بردار سرعت، نحوه حرکت ذره در فضای جواب را مشخص می‌کند. همچنین پارامترهای  $Dim$  و  $t$  به ترتیب نشان‌دهنده بعد فضا و تعداد تکرار اجرای الگوریتم هستند. مقادیر بردارهای مکان و سرعت ذرات ابتدا به صورت تصادفی تعیین شده و در هر تکرار در راستای افزایش برانزندی به روز رسانی می‌شوند. ابتدا بردار  $V_i^t$  بر اساس بهترین جواب پیدا شده توسط همه ذرات ( $gbest^t$ ) و بهترین جواب پیدا شده توسط خود ذره ( $pbest_i^t$ ) به روز رسانی می‌شود (رابطه (۸)). منظور از بهترین جواب پیدا شده، جوابی است که بیشترین ارزش (کمترین هزینه) را با توجه به تابع برانزندی (تابع هزینه) تعریف شده داشته باشد. سپس مکان ذره با استفاده از (۹) به روز رسانی می‌شود

$$V_i^{t+1} = wV_i^t + c_1r_{1i}(pbest_i^t - X_i^t) + c_2r_{2i}(gbest^t - X_i^t) \quad (۸)$$

$$X_i^{t+1} = V_i^{t+1} + X_i^t \quad (۹)$$

که در آن  $w$  نشان‌دهنده وزن اینرسی<sup>۴</sup> است. این پارامتر تأثیر سرعت فعلی ذره  $i$  بر سرعت آن در تکرار بعدی را کنترل می‌کند. پارامترهای  $c_1$  و  $c_2$  به ترتیب بیانگر ضرایب خودشناختی<sup>۵</sup> و نفوذ اجتماعی<sup>۶</sup> هستند. همچنین  $r_1$  و  $r_2$  دو بردار تصادفی  $Dim$  بعدی هستند که مقادیر درایه‌های آنها از بازه  $[0, 1]$  انتخاب می‌شود. به روز رسانی ذرات تا هنگام برآورده شدن شرط خاتمه ادامه خواهد داشت. این شرط به صورت مشخص کردن تعداد تکرارهای اجرای الگوریتم، دستیابی به یک مقدار برانزندی مشخص و یا ثابت ماندن مقدار  $gbest$  به دست آمده در چندین تکرار متوالی تعریف می‌شود.

نقطه ضعف الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، احتمال گیرافتادن در بهینه محلی است. این مشکل به دلیل عدم اکتشاف<sup>۷</sup> مناسب در فضای جواب و همگرایی سریع ذرات به  $gbest$  است. برای بهبود کارایی این الگوریتم روش‌های بسیاری ارائه شده‌اند که از آن جمله می‌توان به PSO-TVAC [۳۴] اشاره کرد. این الگوریتم، پارامترهای  $w$  و  $c_1$  را مطابق (۱۰) و (۱۱) به صورت خطی کاهش می‌دهد. همچنین  $c_2$  مطابق (۱۲) در حین اجرای الگوریتم افزایش داده می‌شود. با تنظیم پارامترها توانایی اکتشاف افزایش یافته و احتمال گیرافتادن در بهینه محلی کمتر می‌شود

$$w = w_{\max} - \frac{t}{T_{\max}}(w_{\max} - w_{\min}) \quad (۱۰)$$

$$c_1 = c_{1s} + \frac{t}{T_{\max}}(c_{1e} - c_{1s}) \quad (۱۱)$$

$$c_2 = c_{2s} + \frac{t}{T_{\max}}(c_{2e} - c_{2s}) \quad (۱۲)$$

در اینجا  $T_{\max}$  تعداد تکرارهای اجرای الگوریتم است. مقادیر سایر پارامترهای استفاده‌گردیده در جدول ۲ آمده است.

روندنامی الگوریتم PSO-TVAC در شکل ۱ آورده شده است.

$d$  که برابر  $\sqrt{\varepsilon_{fs}/\varepsilon_{mp}}$  است باشد، از مدل فضای آزاد<sup>۱</sup> و در غیر این صورت از مدل محوشدگی ناشی از چندمسیرگی<sup>۲</sup> برای محاسبه  $E_{TX}$  استفاده می‌شود. پارامترهای  $\varepsilon_{fs}$  و  $\varepsilon_{mp}$  به ترتیب بیانگر انرژی مصرفی تقویت‌کننده<sup>۳</sup> در مدل‌های فضای آزاد و محوشدگی ناشی از چندمسیرگی هستند. مقدار این پارامترها برابر  $10 \text{ pJ/bit/m}^2$  و  $0.13 \text{ pJ/bit/m}^4$  است. پارامتر  $E_{elec}$  نیز بیانگر انرژی مصرفی مدار بوده و مقدار آن برابر  $50 \text{ nJ/bit}$  می‌باشد

$$E_{TX}(l, d_{ij}) = \begin{cases} l(E_{elec} + \varepsilon_{fs}d_{ij}^*) & , d_{ij} < d. \\ l(E_{elec} + \varepsilon_{fs}d_{ij}^*) & , d_{ij} \geq d. \end{cases} \quad (۳)$$

$$E_{RX}(l) = lE_{elec} \quad (۴)$$

در ادامه مقدار متغیر  $e_i$  با استفاده از (۳) و (۴) محاسبه می‌شود. این متغیر برابر مجموع نرخ انرژی مصرفی برای ارسال و دریافت داده است

$$e_i = \sum_{s_j \in N_i} et_{ij} + \sum_{s_j \in N_i} ec_{ij} \quad (۵)$$

که در آن  $et_{ij}$  و  $ec_{ij}$  به ترتیب برابر نرخ انرژی مصرفی گره برای ارسال و دریافت داده به/از گره همسایه  $s_j$  است. مقادیر این متغیرها به ترتیب در (۶) و (۷) محاسبه شده‌اند

$$et_{ij} = \begin{cases} f_{ij}(E_{elec} + \varepsilon_{fs}d_{ij}^*) & , d_{ij} < d. \\ f_{ij}(E_{elec} + \varepsilon_{fs}d_{ij}^*) & , d_{ij} \geq d. \end{cases} \quad (۶)$$

$$ec_{ij} = f_{ij}E_{elec} \quad (۷)$$

که در این روابط،  $f_{ij}$  نرخ ارسال داده از گره  $s_i$  به گره  $s_j$  است. انتقال داده از اعضای خوشه‌ها به سرخوشه‌ها و همچنین از هر گره به گام بعدی آن صورت می‌پذیرد و بنابراین فقط در این موارد مقدار متغیر  $f$  مثبت است.

## ۴- الگوریتم PSO-TVAC

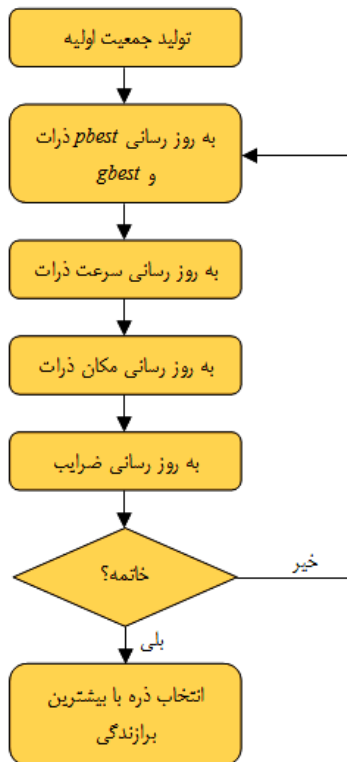
الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یک روش فراابتکاری الهام‌گرفته از رفتار اجتماعی پرندگان برای حل مسایل بهینه‌سازی است. در این روش ابتدا تعدادی جواب اولیه تصادفی که ذره نامیده می‌شوند، تولید می‌گردد.

4. Inertia Weight  
5. Self-Cognition  
6. Social Influence  
7. Exploitation

1. Free Space Model  
2. Multi-Path Fading Channel Model  
3. Amplifier

جدول ۲: مقادیر پارامترهای الگوریتم PSO-TVAC.

پارامتر	مقدار
$w_{max}$	۰٫۹
$w_{min}$	۰٫۴
$c_{1s}$	۲٫۵
$c_{1e}$	۰٫۵
$c_{2s}$	۰٫۵
$c_{2e}$	۲٫۵



شکل ۱: روندنمای الگوریتم PSO-TVAC.

### ۵- الگوریتم EDGR

جمع‌آوری آگاه به انرژی داده یک چالش اساسی در شبکه‌های حسگر است و استفاده از حسگرهای قابل شارژ مشکل محدودیت انرژی را تا حدی برطرف می‌کند. با وجود این، با توجه به نرخ پایین برداشت انرژی در این شبکه‌ها، ارائه الگوریتم‌های جمع‌آوری داده آگاه به انرژی ضروری است. در این راستا الگوریتم EDGR در این مقاله ارائه شده است. این الگوریتم شامل سه مرحله زمان‌بندی خواب گره‌ها، خوشه‌بندی آگاه به انرژی و مسیریابی آگاه به انرژی است که به صورت متوالی اجرا می‌شوند. برای حل مراحل فوق از الگوریتم PSO-TVAC استفاده شده و مراحل الگوریتم در بخش‌های ۵-۱ تا ۵-۳ توضیح داده شده‌اند.

#### ۵-۱ زمان‌بندی خواب گره‌ها

در روش پیشنهادی برای زمان‌بندی خواب حسگرها، تعدادی از گره‌ها برای پوشش و ارسال داده به چاهک فعال شده و بقیه حسگرها به حالت خواب می‌روند. در انتخاب مجموعه گره‌های فعال دو شرط باید لحاظ شوند: (۱) گره‌های فعال کل شبکه را پوشش دهند و (۲) هر گره فعال به چاهک متصل بوده و مسیری برای ارسال داده به چاهک داشته باشد. با توجه به این که شعاع ارسال دو برابر شعاع پوشش فرض شده است، در صورت پوشش کامل شبکه شرط اتصال نیز برآورده خواهد شد [۳۶] و بنابراین در ادامه فقط مسئله پوشش کامل بررسی می‌شود.

الگوریتم ارائه‌شده ابتدا منطقه تحت نظارت را ناحیه‌بندی کرده و سپس مسئله پوشش را در هر ناحیه به صورت جداگانه بررسی می‌کند. دلیل این مسئله، کوچک کردن فضای جواب و در نتیجه کاهش پیچیدگی است. برای حل مسئله پوشش در هر بخش، از الگوریتم PSO-TVAC استفاده شده است. پس از زمان‌بندی خواب گره‌ها در هر ناحیه، قسمت کوچکی از آن پوشش داده نشده می‌ماند و بنابراین در ادامه یک روش حریصانه برای پوشش قسمت‌های باقیمانده ارائه شده است. قسمت‌های روش پیشنهادی در بخش‌های ۵-۱ تا ۵-۳ بررسی شده‌اند.

#### ۵-۱-۱ ناحیه‌بندی ناحیه تحت پوشش

چالشی که برای حل مسئله پوشش وجود دارد، بزرگی فضای جواب آن است. هر گره در هر دور در یکی از دو حالت فعال و خواب قرار دارد و بنابراین اندازه فضای جواب برای شبکه‌ای با  $n$  گره برابر  $2^n$  خواهد بود. مشخص است که یافتن مجموعه گره‌های فعال مناسب برای شبکه‌هایی با اندازه معمولی بسیار زمان‌بر خواهد بود. استراتژی به کار گرفته شده برای حل این چالش، تقسیم شبکه به ناحیه‌هایی با  $na$  گره و بررسی مسئله پوشش در هر ناحیه به صورت جداگانه است. اندازه فضای جواب برای مسئله پوشش یک بخش برابر  $2^{na}$  خواهد بود که نسبت به فضای حالت مسئله اصلی بسیار کوچک‌تر است. در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، گره‌ها به ناحیه‌های ۵۰ گرهی تقسیم شده و هر ناحیه به صورت مستقل

بررسی شده است. شکل ۲ نحوه اعمال تکنیک ناحیه‌بندی پیشنهادی بر روی یک شبکه مفروض را نمایش می‌دهد.

روندنمای الگوریتم پیشنهادی برای زمان‌بندی خواب گره‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

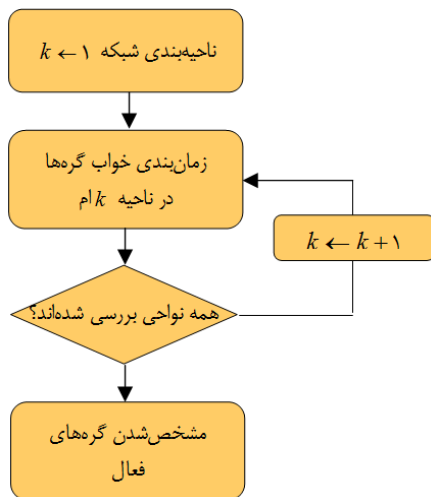
#### ۵-۱-۲ زمان‌بندی خواب گره‌ها در ناحیه $R_k$

در این بخش نحوه زمان‌بندی خواب گره‌ها در ناحیه  $R_k$  توضیح داده شده است. این ناحیه شامل مجموعه گره‌های  $\{s_1^k, s_2^k, \dots, s_{na}^k\}$  می‌باشد که در آن، گره  $s_j^k$  معادل  $na(k-1) + j$  امین گره در شبکه است. در ادامه، بخش‌های مختلف الگوریتم پیشنهادی، شامل تعریف ذره، نحوه دیکدومدن<sup>۱</sup> و تابع برازندگی بیان شده‌اند.

**تعریف ذره:** ذره  $X_i^S$  آرایه‌ای به طول  $na$  است که در آن، درایه  $x_{ij}^S$  متناظر با گره  $s_j^k$  تعریف شده است و مقدار هر درایه، عددی در بازه  $[0, 1]$  است. در روش پیشنهادی، مقداردهی اولیه ذرات به صورت تصادفی انجام می‌شود. در شکل ۴ یک ذره مفروض برای مسئله زمان‌بندی خواب گره‌ها در ناحیه اول شکل ۲ (شکل ۲-ب) نمایش داده شده است. درایه‌های این ذره، متناظر با گره‌های ناحیه مورد نظر یعنی مجموعه  $\{s_{27}, s_{28}, s_{29}, s_{30}, s_{31}, s_{32}, s_{33}, s_{34}, s_{35}, s_{36}, s_{37}, s_{38}, s_{39}, s_{40}\}$  هستند.

**دیکد کردن:** دیکد کردن ذره  $X_i^S$  با توجه به مقدار درایه‌های آن انجام می‌شود. اگر مقدار درایه  $x_{ij}^S$  کمتر از ۰٫۷ باشد، گره  $s_j^k$  به حالت خواب می‌رود و در غیر این صورت گره فعال خواهد بود. برای مثال در ذره نمایش داده شده در شکل ۴، مقادیر درایه‌های متناظر با گره‌های  $s_{37}, s_{38}, s_{39}, s_{40}$  بیشتر از ۰٫۷ است، بنابراین این گره‌ها فعال شده و بقیه گره‌ها به حالت خواب می‌روند.

**تابع برازندگی:** برای انتخاب گره‌های فعال، سه معیار پوشش، مقدار انرژی و تعداد گره‌های فعال مورد توجه قرار گرفته‌اند. هدف افزایش سطح



شکل ۳: روندنمای الگوریتم زمان‌بندی خواب گره‌ها.

7	12	13	14	19	20	21	25	26	27
0.34	0.76	0.55	0.36	0.84	0.93	0.65	0.35	0.79	0.81

شکل ۴: ذره متناظر با ناحیه اول شکل ۲ برای مسئله زمان‌بندی خواب گره‌ها.

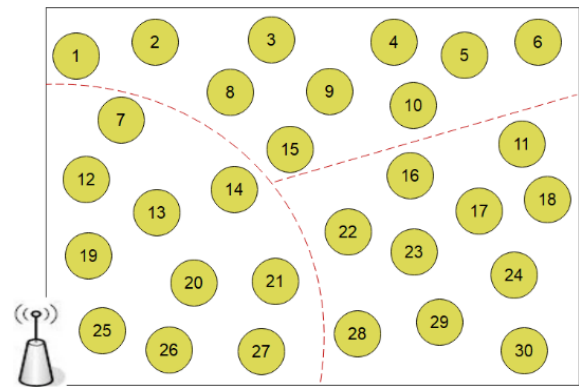
$$F_i^S = w_1 \frac{ca_k}{ar_k} + w_2 \frac{\sum_{s_j^k \in R_k} b_j^k ef_{s_j^k}}{\sum_{s_j^k \in R_k} b_j^k} + w_3 (1 - \frac{\sum_{s_j^k \in R_k} b_j^k}{na}) \quad (13)$$

,  $w_1 + w_2 + w_3 = 1$

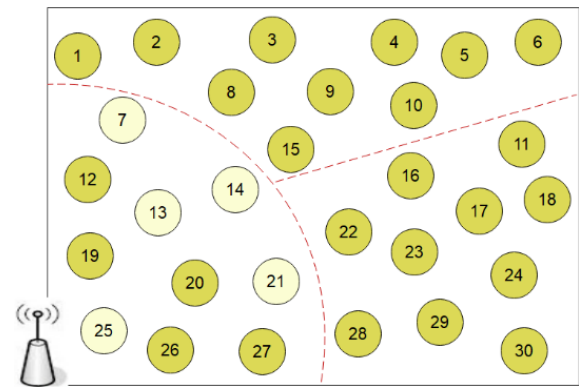
که در آن  $F_i^S$  نشان‌دهنده برازندگی ذره  $X_i^S$  است. متغیرهای  $ca_k$  و  $ar_k$  به ترتیب مساحت پوشش داده شده توسط گره‌های فعال در ناحیه  $R_k$  و مساحت کل آن هستند. همچنین  $b_j^k$  یک متغیر دودویی است که بیانگر حالت گره  $s_j^k$  است. این متغیر در صورتی که گره  $s_j^k$  فعال باشد برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود. ضرایب  $w_1$ ،  $w_2$  و  $w_3$  میزان تأثیر معیارهای بررسی‌شده را مشخص می‌کنند. مقادیر این ضرایب به ترتیب برابر  $0.2$ ،  $0.4$  و  $0.4$  در نظر گرفته شده‌اند. نکته دیگر، نرمال‌سازی معیارهای انتخاب‌شده در تابع برازندگی است. معیارهای مساحت پوشش داده شده، مقدار متوسط انرژی گره‌های فعال و تعداد آنها به ترتیب با استفاده از مساحت  $R_k$ ، انرژی اولیه و تعداد گره‌ها در ناحیه مورد نظر، نرمال شده‌اند.

### ۵-۱-۳ پوشش قسمت‌های باقیمانده

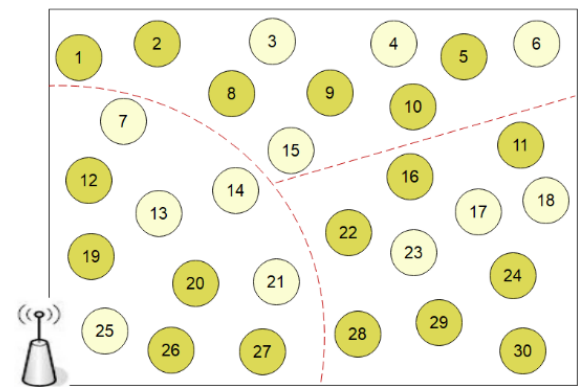
الگوریتم ارائه‌شده در بخش قبلی تا حد زیادی در حدود  $90\%$  الی  $95\%$  پوشش ایجاد می‌کند. دستیابی به پوشش کامل با این الگوریتم عملاً امکان‌پذیر نیست، زیرا افزایش مقدار ضریب  $w_1$  (و در نتیجه کاهش  $w_2$  و  $w_3$ ) مصرف انرژی را شدیداً افزایش می‌دهد. برای پوشش قسمت‌های باقیمانده یک روش حریصانه ارائه گردیده که در شکل ۵ توضیح داده شده است. در اینجا ابتدا مجموعه  $VS$  تشکیل می‌شود. این مجموعه شامل گره‌هایی است که در حالت خواب قرار گرفته‌اند و مقدار انرژی آنها که با متغیر  $ef$  نشان داده می‌شود، از یک حد آستانه مشخص ( $50\%$  ظرفیت باتری) بیشتر است. در ادامه، گام‌های زیر تا هنگامی که پوشش کامل ایجاد شود تکرار می‌شوند. ابتدا به ازای هر گره  $s_i \in VS$ ، مساحت قسمت پوشش داده شده توسط آن که با  $ac_i$  نمایش داده می‌شود، محاسبه می‌گردد. سپس وضعیت گره‌ی که بیشترین مساحت تحت پوشش



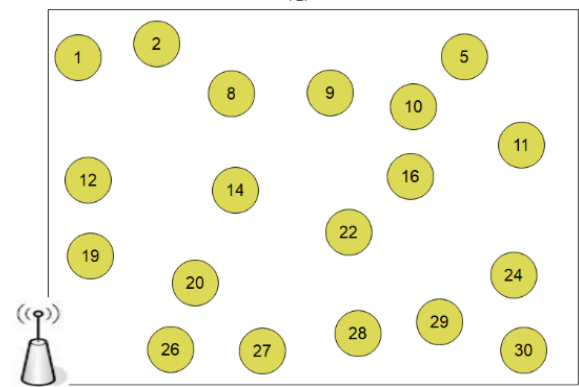
(الف)



(ب)



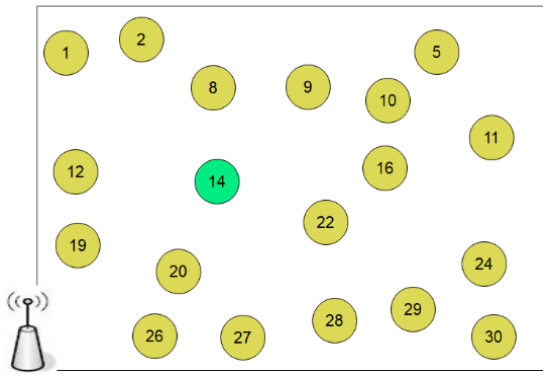
(ج)



(د)

شکل ۵: ناحیه‌بندی و مشخص کردن گره‌های فعال در یک شبکه مفروض، (الف) ناحیه‌بندی، (ب) مشخص کردن گره‌های فعال ناحیه اول، (ج) مشخص کردن گره‌های فعال در سایر ناحیه‌ها و (د) گره‌های فعال شبکه.

تحت پوشش، افزایش مقدار متوسط انرژی گره‌های فعال و کاهش تعداد آنها است. بر این اساس، تابع برازندگی ذره  $X_i^S$  به صورت ترکیب خطی این سه معیار در (۱۳) تعریف شده است



شکل ۶: ایجاد پوشش کامل برای شبکه شکل ۲-د.

$$CS_{jk}(i) = w_{\varphi} \frac{d_{jk}(i)}{TR} + (1 - w_{\varphi}) \frac{m_{ij}}{nv} \quad (14)$$

که در آن  $CS_{jk}(i)$  بیانگر هزینه انتخاب سرخوشه  $ch_{ij}$  توسط گره  $s_k$  است. همچنین  $d_{jk}(i)$  فاصله بین گره  $s_k$  و سرخوشه  $ch_{ij}$  را نمایش می‌دهد. با توجه به مدل انرژی ارائه شده در بخش ۳-۲،  $d_{jk}(i)$  متناسب با مقدار انرژی مصرفی گره  $s_k$  برای ارسال داده به  $ch_{ij}$  است. همچنین  $m_{ij}$  بیانگر تعداد اعضای  $C_{ij}$  (خوشه زام متناظر با  $X_i^C$ ) و متغیر  $nv$  نیز نشان‌دهنده تعداد گره‌های فعال است. در تابع هزینه ارائه شده، متغیرهای  $d_{jk}(i)$  و  $m_{ij}$  به ترتیب با استفاده از  $TR$  و متوسط تعداد اعضای خوشه‌ها که برابر  $nv/nc$  است، نرمال شده‌اند. همچنین مقدار ضریب  $w_{\varphi}$  برابر ۰/۵ فرض گردیده است.

در ادامه، نحوه دیکدکردن ذره ارائه شده در شکل ۷ بررسی گردیده است. ابتدا نقاط متناظر با درایه‌های ذره مفروض در شکل ۷ بر روی شبکه مشخص شده و نزدیک‌ترین گره‌ها به این نقاط به عنوان سرخوشه انتخاب می‌شوند (شکل ۸-الف) و سپس فرایند خوشه‌بندی با استفاده از (۱۴) انجام می‌گردد. خوشه‌بندی متناظر با ذره شکل ۷ در شکل ۸-ب نشان داده شده است.

تابع برازندگی: برای خوشه‌بندی آگاه به انرژی، چند معیار مد نظر قرار گرفته است. معیار اول انتخاب گره‌های پرانرژی به عنوان سرخوشه است. دلیل این مسئله آن است که گره‌های سرخوشه برای جمع داده‌های جمع‌آوری شده و ارسال آنها به چاهک انرژی زیادی مصرف می‌کنند. معیار دوم، کاهش انرژی مصرفی برای جمع‌آوری داده در خوشه‌ها است. آخرین معیار کاهش تعداد گره‌های خوشه‌بندی نشده است. گره‌های خوشه‌بندی نشده در شعاع ارسال هیچ کدام از سرخوشه‌ها نبوده و بنابراین نمی‌توان آنها را خوشه‌بندی نمود. با توجه به معیارهای بیان شده، برازندگی ذره  $X_i^C$  به صورت زیر تعریف می‌شود

$$F_i^C = w_{\delta} \frac{\sum_{j=1}^{nc} ef_{ch_{ij}}}{cp} + w_{\epsilon} \frac{\sum_{j=1}^{nc} \sum_{n_k \in C_{ij}, n_k \neq ch_{ij}} er_k}{cp} \quad (15)$$

$$+ w_{\nu} \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^{nc} m_{ij}}{nv}\right), \quad w_{\delta} + w_{\epsilon} + w_{\nu} = 1$$

در این رابطه، ضرایب  $w_{\delta}$ ،  $w_{\epsilon}$  و  $w_{\nu}$  به ترتیب میزان اهمیت معیارهای انرژی سرخوشه‌ها، انرژی اعضای خوشه‌ها و تعداد گره‌های خوشه‌بندی نشده را نشان می‌دهند. مقادیر این ضرایب به ترتیب برابر ۰/۴، ۰/۲ و ۰/۴ در نظر گرفته شده است.

- ۱) مجموعه  $VS$  شامل گره‌های پرانرژی (گره‌هایی که انرژی آنها بیشتر از ۵۰٪ ظرفیت باطری است) که در حالت خواب قرار دارند، تشکیل شود.
  - ۲) تا هنگامی که پوشش کامل ایجاد نشده است مراحل زیر تکرار شود:
    - ۱-۲) مقدار  $ac_i$  برای هر گره  $s_i \in VS$  محاسبه شود.
    - ۲-۲) گره‌هایی که مقدار  $ac$  آنها صفر است از  $VS$  حذف گردد.
    - ۳-۲) وضعیت گرهی که بیشترین مقدار  $ac$  را دارد به فعال تغییر داده شود و همچنین این گره از  $VS$  حذف گردد.
  - ۳) در صورت عدم پوشش کامل، از گره‌های کم‌انرژی برای کامل کردن پوشش استفاده شود. برای انتخاب گره‌های مناسب مطابق گام ۲ عمل گردد.
- شکل ۵: ایجاد پوشش کامل در شبکه.

21	5	75	60
31	68	20	69

شکل ۷: ذره متناظر با شکل ۶ برای مسئله خوشه‌بندی.

را دارد، از خواب به فعال تغییر داده می‌شود. در صورتی که پس از بررسی گره‌های موجود در  $VS$  قسمت پوشش داده نشده‌ای باقی مانده باشد، از گره‌های کم‌انرژی برای کامل کردن پوشش استفاده خواهد شد. شکل ۶ وضعیت گره‌های شکل ۲-د را پس از پوشش قسمت‌های باقیمانده نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل دیده می‌شود، وضعیت گره  $s_{14}$  برای ایجاد پوشش کامل به فعال تغییر داده شده است.

### ۲-۵ خوشه‌بندی آگاه به انرژی

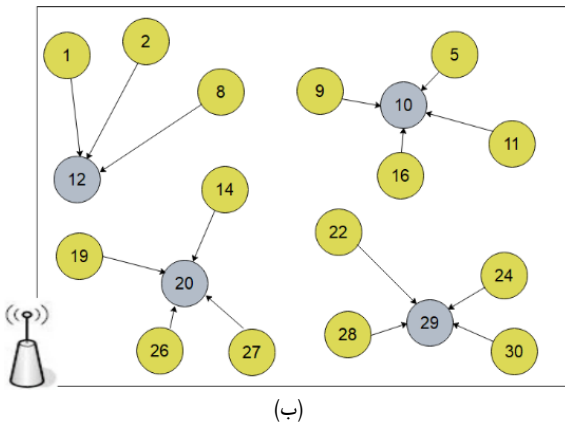
پس از برقراری پوشش کامل در شبکه، نحوه انتقال داده‌های جمع‌آوری شده به چاهک مشخص می‌شود. برای این منظور، ابتدا گره‌های فعال خوشه‌بندی شده و سپس یک درخت شامل گره‌های سرخوشه ساخته می‌شود. در این بخش، الگوریتم خوشه‌بندی پیشنهادی معرفی گردیده و برای خوشه‌بندی از الگوریتم PSO-TVAC استفاده شده است. در ادامه بخش‌های مختلف روش پیشنهادی، شامل تعریف ذره، نحوه دیکد نمودن و تابع برازندگی بررسی شده‌اند.

**تعریف ذره:** ذره  $X_i^C$  یک آرایه دوبعدی به طول  $nc$  است و پارامتر  $nc$  نشان‌دهنده تعداد گره‌های سرخوشه می‌باشد. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، مقدار این پارامتر برابر  $0.05n$  در نظر گرفته شده است. همچنین مقادیر ابعاد اول و دوم به ترتیب از بازه‌های  $[0, L]$  و  $[0, W]$  به صورت تصادفی مشخص می‌شوند.

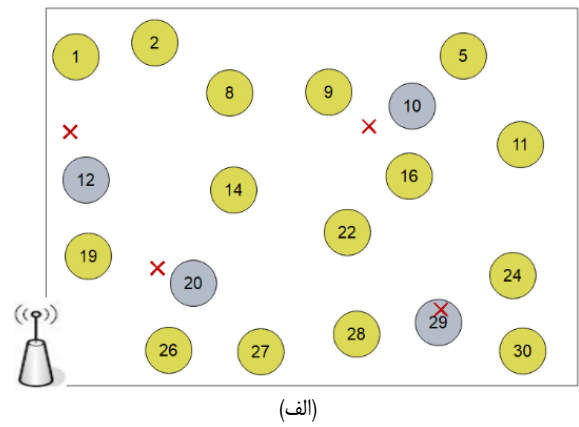
در شکل ۷ مثالی از یک ذره برای شبکه شکل ۶ نمایش داده شده است. با توجه این شکل، چهار سرخوشه در شبکه انتخاب خواهند شد.

**دیکدکردن:** هر درایه ذره  $X_i^C$  متناظر با یک گره سرخوشه است. درایه  $x_{ij}^C$  شامل دو مقدار عددی است که به ترتیب در بازه‌های  $[0, L]$  و  $[0, W]$  قرار دارند. این مقادیر مختصات یک نقطه در سطح شبکه را مشخص می‌کنند. گرهی که کمترین فاصله با نقطه مذکور را داشته باشد به عنوان سرخوشه انتخاب خواهد شد.

برای تکمیل فرایند خوشه‌بندی، اعضای هر خوشه باید مشخص شوند. با توجه به تابع برازندگی تعریف شده، این کار برای محاسبه برازندگی ذره  $X_i^C$  ضروری است. در روش پیشنهادی، گره  $s_k$  به سرخوشه‌ای می‌پیوندد که در شعاع ارسال آن قرار داشته و پیوستن به آن کمترین هزینه را داشته باشد. هزینه پیوستن گره  $s_k$  به سرخوشه  $ch_{ij}$ ، سرخوشه متناظر با  $X_{ij}^C$ ، به صورت (۱۴) محاسبه می‌گردد



(ب)



(الف)

شکل ۸: دیکد کردن ذره شکل ۷، (الف) مشخص کردن سرخوشه‌ها و (ب) مشخص کردن اعضای خوشه‌ها.

1	2	5	8	9	10	11	12	14	16	19	20	22	24	26	27	28	29	30
0.8	0.4	0.75	0.3	0.1	-0.5	0.9	-0.1	0.6	0.3	0.81	0.68	0.97	-0.3	0.26	0.7	0.21	0.34	0.75

شکل ۹: ذره متناظر با شکل ۸ برای مسئله مسیریابی.

با [۳۷] در بررسی شرط نزدیک‌تر بودن گام بعدی به چاهک است. در [۳۷] همه گره‌های همسایه، بدون توجه به فاصله آنها از چاهک مورد بررسی قرار می‌گیرند. این کار باعث می‌شود که فضای مسئله به صورت کنترل‌نشده‌ای بزرگ شده و یافتن جواب مناسب دشوار گردد. به علاوه، انتخاب گره‌های دورتر از چاهک به عنوان گام بعدی مسیر را طولانی‌تر کرده و متوسط انرژی مصرفی را افزایش می‌دهد. بنابراین به احتمال زیاد انتخاب گره‌های دورتر منجر به یافتن جواب مناسب نخواهد شد. جزئیات نحوه دیکد نمودن ذره  $X_i^T$  در شکل ۱۰ بیان شده است.

شکل ۱۱ مراحل ساخت درخت مسیریابی متناظر با ذره شکل ۹ را به تصویر کشیده است. ابتدا مراحل ساخت مسیر بین سرخوشه اول (گره  $s_{v_1}$ ) و چاهک نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۱-الف، گام بعدی گره  $s_{v_2}$  از بین گره‌های  $s_{v_1}$  و  $s_{v_2}$  انتخاب خواهد شد. با توجه به ساختار ذره  $X_i^T$ ، گره  $s_{v_2}$  به عنوان گام بعدی انتخاب می‌شود. در ادامه با بررسی مقادیر  $x_{i_{v_2}}$  و  $x_{i_{v_3}}$ ، گره  $s_{v_3}$  به عنوان گام بعدی انتخاب می‌شود و همین روند تا تکمیل درخت مسیریابی ادامه می‌یابد.

**تابع برازندگی:** تابع برازندگی ذره  $X_i^T$  که با  $F_i^T$  نشان داده می‌شود، در (۱۶) تعریف شده است. برای محاسبه  $F_i^T$ ، دو معیار انرژی گره‌ها و تعداد گره‌های درخت مسیریابی مد نظر قرار گرفته‌اند. معیار انرژی به صورت متوسط انرژی گره‌های فعال پس از انتقال داده در دور فعلی یا به عبارت دیگر  $\sum_{s_j^v \in T_i} er_{s_j^v} / nt_i$ ، تعریف می‌شود. در اینجا  $T_i$  درخت مسیریابی متناظر با  $X_i^T$  و  $nt_i$  تعداد گره‌های این درخت هستند. معیار انرژی معرفی شده منجر به انتخاب گره‌های پرنرژی برای ارسال داده می‌شود. همچنین مقدار داده عبور داده شده و در نتیجه نرخ انرژی مصرفی، توسط گره‌های درخت متوازن خواهد شد

$$F_i^T = w_\lambda \frac{\sum_{s_j^v \in T_i} er_{s_j^v}}{cp} + (1-w_\lambda) \frac{nt_i}{nv} \quad (16)$$

در (۱۶) معیارهای متوسط انرژی گره‌های درخت و تعداد آنها به ترتیب با  $nt_i$  و  $nv$  نرمال شده‌اند و مقدار  $w_\lambda$  نیز ۰/۵ در نظر گرفته شده است.

### ۶- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش مورد کارایی الگوریتم EDGR بررسی قرار گرفته است.

(۱) به ازای هر سرخوشه  $ch_k$  ( $1 \leq k \leq nc$ ) مراحل زیر انجام شود:

$$s_i^v \leftarrow ch_k \quad (1-1)$$

(۲-۱) تا هنگامی که چاهک ملاقات‌نشده مراحل زیر انجام شود:

$$(1-2-1) \text{ گره } s_q^v \text{ با بیشترین مقدار } x_{iq}^T \text{ که شرایط زیر را}$$

دارد به عنوان گام بعدی انتخاب شود:

$$s_q^v \in N_i -$$

$$d_{q,sink} < d_{i,sink} -$$

$$s_i^v \leftarrow s_q^v \quad (2-2-1)$$

شکل ۱۰: دیکد کردن ذره  $X_i^T$ .

### ۳-۵ مسیریابی آگاه به انرژی

در این مرحله به منظور اتصال گره‌های سرخوشه به چاهک، یک درخت بر روی این گره‌ها و برخی از گره‌های فعال غیر سرخوشه ساخته می‌شود. الگوریتم مبتنی بر PSO-TVAC برای ساخت درخت مسیریابی پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی تعریف ذره و نحوه دیکد کردن با توجه به الگوریتم پیشنهادی در [۳۷] انجام شده است. در ادامه پس از تعریف ذره متناظر با درخت مسیریابی، نحوه دیکد کردن آن توضیح داده شده و سپس تابع برازندگی پیشنهادی جهت ساخت درخت آگاه به انرژی ارائه گردیده است.

**تعریف ذره:** ذره  $X_i^T$  آرایه‌ای به طول  $nv$  (تعداد گره‌های فعال) است و درایه‌های این آرایه در بازه  $[0, 1]$  قرار دارند. مقاردهای اولیه ذرات نیز به صورت تصادفی است. شکل ۹ یک نمونه ذره برای مسیریابی در شبکه شکل ۸-ب را نمایش می‌دهد.

**دیکد کردن:** درایه  $x_{ij}^T$  متناظر با زمین گره فعال است که با  $s_j^v$  نشان داده می‌شود و مقدار  $x_{ij}^T$  میزان مطلوبیت گره  $s_j^v$  برای ارسال داده را مشخص می‌کند. برای تشکیل درخت مسیریابی، مسیری بین هر سرخوشه  $ch_k$  و چاهک به صورت جداگانه ساخته می‌شود. بدین منظور، ابتدا گام بعدی  $ch_k$  مشخص شده و این کار تا رسیدن به چاهک ادامه می‌یابد. برای تعیین گام بعدی گره  $s_j^v$  که بر روی مسیر بین  $ch_k$  و چاهک قرار دارد، گره‌های همسایه آن که فعال بوده و به چاهک نزدیک‌تر هستند، بررسی می‌شوند. گرهی که بیشترین مقدار  $x^T$  را دارد به عنوان گام بعدی انتخاب می‌شود. تفاوت روش دیکد نمودن پیشنهادی



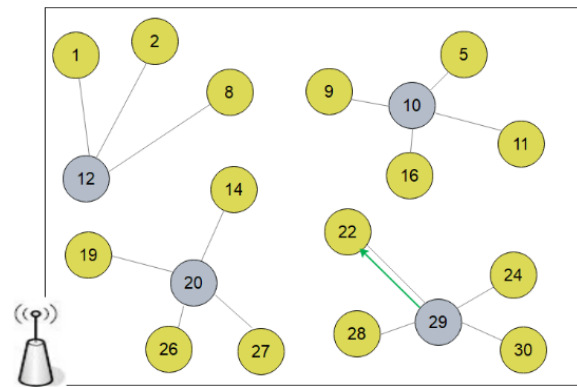
متلب<sup>۱</sup> استفاده گردیده است. معیارهای ارزیابی کارایی الگوریتمها شامل میانگین و انحراف از معیار انرژی ذخیره شده در گرهها و نرخ گم شدن بستهها است. برای افزایش دقت نتایج، هر آزمایش بر روی پنج شبکه مختلف تکرار شده و مقدار متوسط به عنوان نتیجه گزارش شده است. شبیه سازیها بر روی شبکههای ۳۰۰ و ۵۰۰ گرهی اجرا شدهاند. شعاع پوشش و ارسال گرهها به ترتیب برابر ۲۰ m و ۴۰ m در نظر گرفته شدهاند. همچنین ابعاد شبکه مفروض برابر ۱۰۰m×۱۰۰m است و حسگرها به صورت تصادفی در آن پخش شدهاند. در شبیه سازیهای انجام شده، ظرفیت ذخیره سازی حسگرها (cp) ۲ J فرض شده و همچنین دو نرخ تولید داده ۵۰ بیت/ثانیه و ۱۰۰ بیت/ثانیه مورد بررسی قرار گرفتهاند. نرخ برداشت انرژی برای همه گرهها یکسان بوده و برابر ۸ μJ/s می باشد و زمان شبیه سازی هشت ساعت، معادل هشت دور اجرای الگوریتمها در نظر گرفته شده است.

### ۶-۱ میانگین انرژی ذخیره شده در گرهها

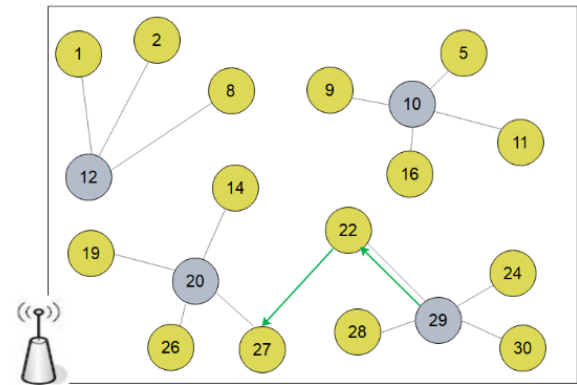
گرههای حسگر برای جمع آوری داده از سطح شبکه و ارسال آنها به شبکه انرژی مصرف می کنند. بیشتر بودن مقدار انرژی گرهها به معنای توانایی بالاتر در ایجاد پوشش کامل و اتصال در سطح شبکه است. مقادیر انرژی ذخیره شده توسط الگوریتم EDGR و سایر روشهای بررسی شده در طی دورههای متوالی در شکل های ۱۲ و ۱۳ مقایسه گردیدهاند. این شکلها به ترتیب شبکههای ۳۰۰ و ۵۰۰ گرهی را مورد بررسی قرار دادهاند. با توجه به نتایج گزارش شده، میانگین انرژی ذخیره گردیده با افزایش نرخ ارسال کم شده و همچنین مقدار این معیار با افزایش تعداد گرهها کاهش یافته است. نکته دیگر آن است که میزان انرژی ذخیره شده به مرور زمان کاهش یافته و بعد از مدتی به مقدار ثابتی می رسد. در ابتدا گرهها از انرژی اولیه و همچنین انرژی برداشت شده برای جمع آوری داده و ارسال آن استفاده می کنند. در این حالت نرخ مصرف انرژی کمتر از نرخ برداشت است و بنابراین سطح انرژی ذخیره شده گرهها کاهش می یابد. به تدریج سیستم به حالت پایدار<sup>۲</sup> رسیده و بین میزان انرژی مصرفی و انرژی برداشت شده در حسگرها تعادل ایجاد می شود.

انرژی ذخیره شده توسط الگوریتم پیشنهادی در شبکههای ۳۰۰ گرهی به ترتیب ۹٪ و ۱۴٪ بیشتر از CREST و EHTEAR است و میزان بهبود در شبکههای ۵۰۰ گرهی به ترتیب برابر ۸٪ و ۱۳٪ می باشد. شایان ذکر است که در نتایج ارائه شده، نرخ گم شدن بستههای روشهای مذکور در نظر گرفته نشده و هر بسته در یک مسیر چندگامی به سمت چاهک ارسال می شود. این کار مستلزم مصرف انرژی توسط گرههای قرار گرفته بر روی مسیر است. بنابراین گم شدن بستهها، میزان انرژی مصرفی را کاهش خواهد داد. همان طور که در بخش ۶-۳ نشان داده شده است، دو الگوریتم CREST و EHTEAR نرخ گم شدن بالایی دارند. این مسئله به نحو محسوسی میزان انرژی مصرفی آنها را کاهش و انرژی ذخیره شده در گرهها را افزایش می دهد.

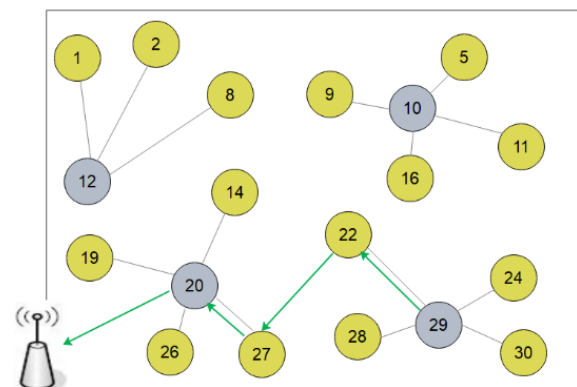
نتایج به دست آمده نشان دهنده توانایی الگوریتم EDGR در مدیریت مصرف انرژی است. عملکرد بهتر الگوریتم پیشنهادی به دلیل طراحی آگاه به انرژی آن است. عوامل مختلفی کارایی EDGR را افزایش دادهاند که از آن جمله می توان به استفاده از الگوریتم PSO-TVAC برای خوشه بندی و مسیریابی اشاره کرد. این الگوریتم به دلیل استفاده از



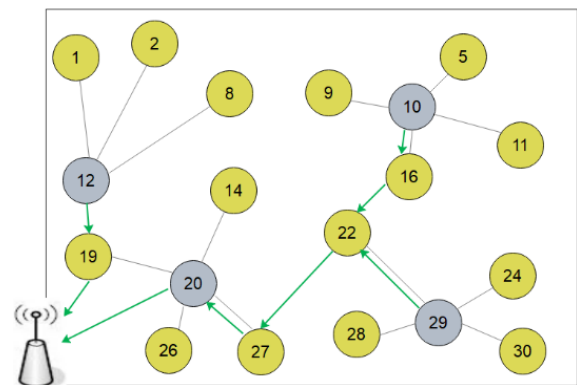
(الف)



(ب)



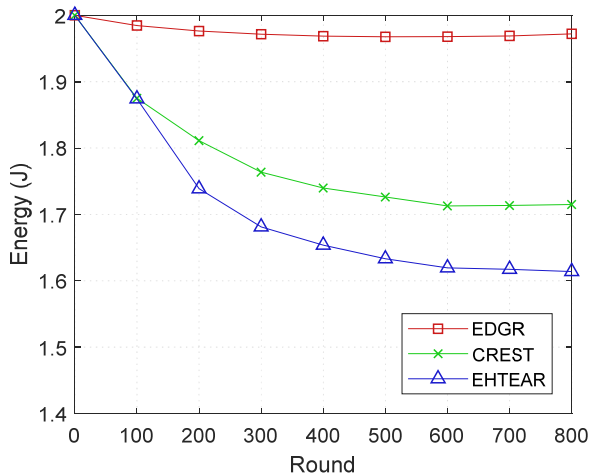
(ج)



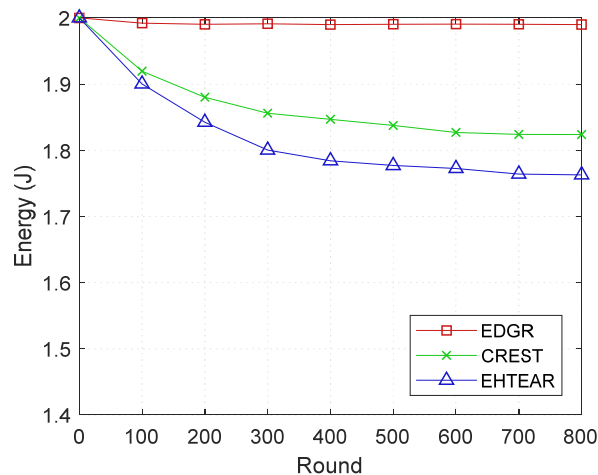
(د)

شکل ۱۱: دیدکردن ذره شکل ۹، (الف) مشخص کردن گام بعدی گره  $s_{29}$ ، (ب) مشخص کردن گام بعدی گره  $s_{29}$ ، (ج) ساخت مسیر بین گره  $s_{29}$  و چاهک و (د) ساخت درخت مسیریابی.

برای این منظور، روش پیشنهادی با دو الگوریتم CREST [۳۳] و EHTEAR [۲۰] مقایسه شده و برای پیاده سازی الگوریتمها از نرم افزار

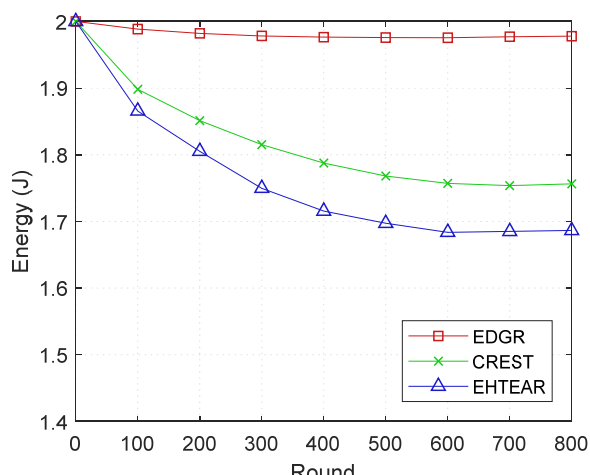


(ب)

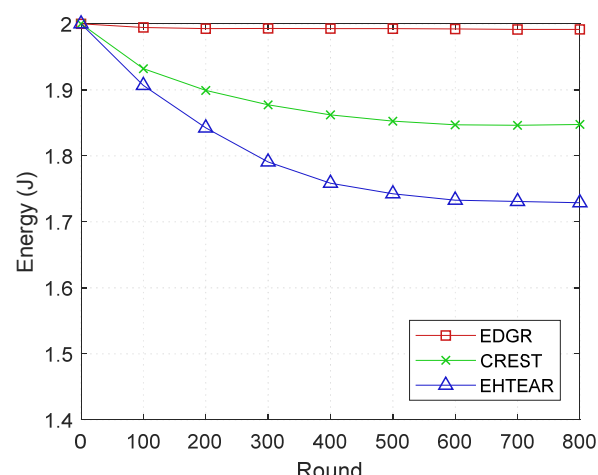


(الف)

شکل ۱۲: مقایسه انرژی ذخیره‌شده در شبکه‌های ۳۰۰ گرهی، (الف) نرخ ارسال ۵۰ بیت/ثانیه و (ب) نرخ ارسال ۱۰۰ بیت/ثانیه.



(ب)



(الف)

شکل ۱۳: مقایسه انرژی ذخیره‌شده در شبکه‌های ۵۰۰ گرهی، (الف) نرخ ارسال ۵۰ بیت/ثانیه و (ب) نرخ ارسال ۱۰۰ بیت/ثانیه.

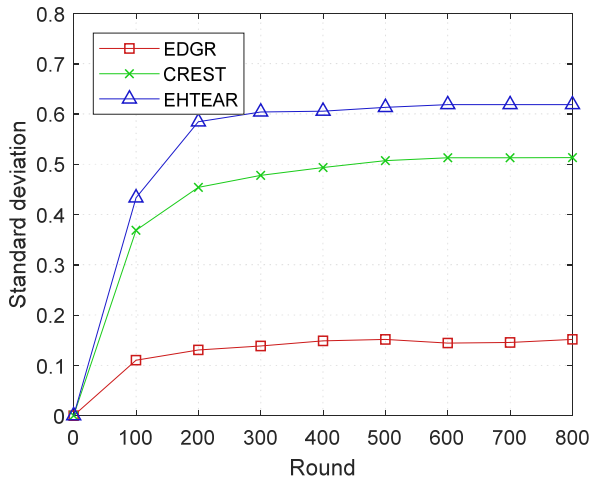
بهتری دارد که انحراف از معیار آن کمتر باشد. مقدار انحراف از معیار حاصل از الگوریتم‌های بررسی‌شده در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ آورده شده است. بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل ۱۴، انحراف از معیار الگوریتم EDGR در شبکه‌های حسگر ۳۰۰ گرهی به ترتیب ۳۷٪ و ۴۷٪ نسبت به CREST و EHTEAR کمتر است. با توجه به شکل ۱۵، در شبکه‌های ۵۰۰ گرهی، مقدار بهبود این معیار توسط الگوریتم پیشنهادی نسبت به دو روش دیگر به ترتیب برابر ۲۲٪ و ۲۸٪ است. همچنین مشابه نمودارهای بخش ۶-۱، در اینجا نیز ابتدا مقدار انحراف از معیار افزایش یافته و بعد از مدتی به حالت پایدار می‌رسد.

توازن بالاتر الگوریتم پیشنهادی به علت در نظر گرفتن معیار انرژی در توابع برازندگی مراحل مختلف آن است. در روش زمان‌بندی خواب پیشنهادی، در هر دور گره‌های کم‌انرژی به حالت خواب رفته و انرژی مصرف نمی‌کنند. این گره‌ها با برداشت انرژی از محیط، میزان انرژی خود را بالا برده و بنابراین میزان اختلاف در انرژی ذخیره‌شده گره‌های مختلف کاهش می‌یابد. در روش ارائه‌شده برای خوشه‌بندی، گره‌های پرانرژی به عنوان سرخوشه انتخاب می‌شوند. همچنین میزان انرژی در پایان دور که با متغیر  $er$  نشان داده می‌شود، در انتخاب سرخوشه و گره‌های درخت مسیریابی لحاظ شده است. استفاده از این معیار باعث متوازن شدن انرژی مصرفی گره‌ها و کاهش انحراف از معیار می‌گردد.

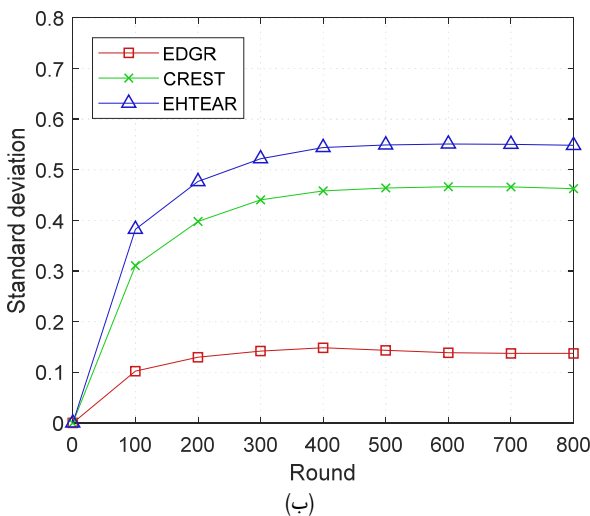
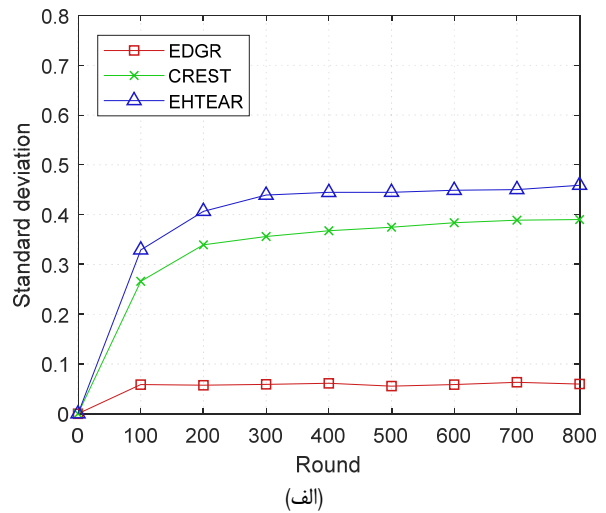
روش‌های بهینه‌سازی، دید جامعی از فضای جواب دارد و بنابراین می‌تواند جواب‌های مناسب را پیدا کند. از طرف دیگر، الگوریتم‌های CREST و EHTEAR به صورت حریصانه خوشه‌بندی و مسیریابی را انجام می‌دهند و در نتیجه کارایی این روش‌ها در مقایسه با EDGR کمتر است. همچنین در نظر گرفتن میزان انرژی مصرفی در توابع برازندگی روش‌های پیشنهادی برای خوشه‌بندی (روابط (۱۴) و (۱۵)) و مسیریابی (رابطه (۱۶))، میزان انرژی مصرفی را کاهش داده است. عامل بعدی استفاده از تکنیک زمان‌بندی خواب گره‌ها می‌باشد. در هر دور، فقط تعدادی از گره‌ها فعال خواهند بود و گره‌هایی که به حالت خواب رفته‌اند انرژی مصرف نمی‌کنند. همچنین تعداد گره‌های بیدار در تابع برازندگی روش زمان‌بندی خواب پیشنهادی لحاظ شده است و بنابراین میزان مصرف انرژی کاهش می‌یابد.

### ۶-۲ انحراف از معیار انرژی گره‌ها

این معیار نشان‌دهنده میزان تعادل در انرژی ذخیره‌شده در گره‌ها است. اگر ذخیره انرژی در حسگرها متوازن نباشد، ممکن است باتری برخی گره‌ها موقتاً خالی شود و در این حالت ممکن است علی‌رغم وجود گره‌های پرانرژی، پوشش کامل و یا اتصال در سطح شبکه به صورت مقطعی دچار مشکل گردد. هرچه میزان ذخیره انرژی گره‌ها متعادل‌تر باشد، مقدار انحراف از معیار کمتر خواهد بود و بنابراین الگوریتمی عملکرد



شکل ۱۴: انحراف از معیار انرژی ذخیره شده در شبکه‌های ۳۰۰ گرهی، (الف) نرخ ارسال ۵۰ بیت/ثانیه و (ب) نرخ ارسال ۱۰۰ بیت/ثانیه.



شکل ۱۵: انحراف از معیار انرژی ذخیره شده در شبکه‌های ۵۰۰ گرهی، (الف) نرخ ارسال ۵۰ بیت/ثانیه و (ب) نرخ ارسال ۱۰۰ بیت/ثانیه.

نتیجه همان طور که در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است، نرخ گم شدن داده توسط الگوریتم EDGR به نحو قابل ملاحظه‌ای کمتر از سایر روش‌های بررسی شده و نزدیک صفر است.

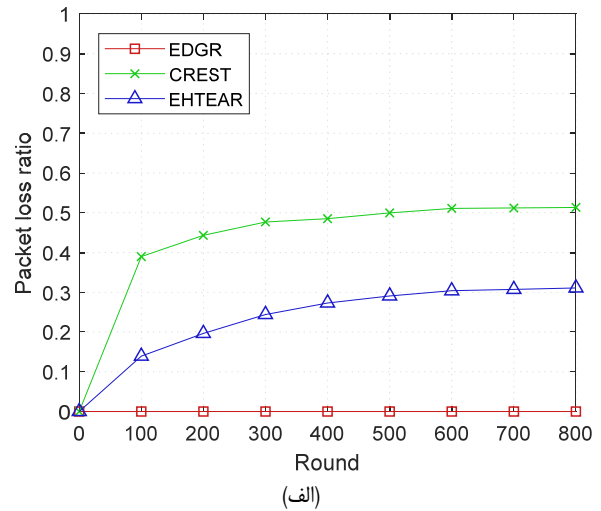
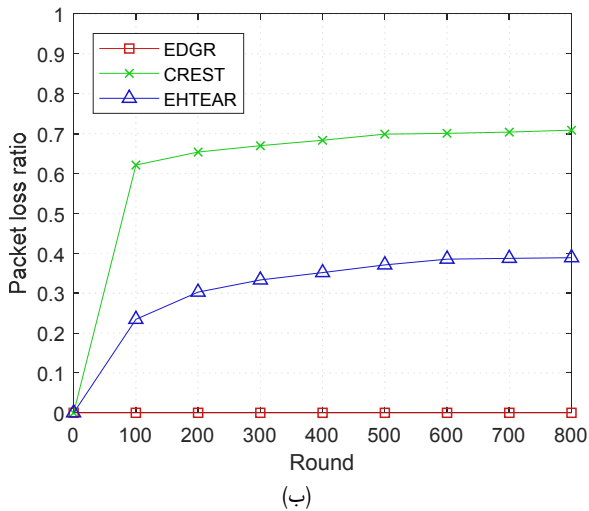
### ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، الگوریتم EDGR برای جمع‌آوری آگاه به انرژی داده در شبکه‌های حسگر قابل شارژ ارائه شده است. روش پیشنهادی از سه مرحله مبتنی بر الگوریتم PSO-TVAC، شامل زمان‌بندی خواب گره‌ها، خوشه‌بندی و مسیریابی تشکیل شده است. در مرحله اول برای افزایش کیفیت جواب به دست آمده، محیط تحت نظارت به چند بخش تقسیم شده و هر بخش به صورت جداگانه بررسی شده است. تابع برازندگی برای مشخص نمودن گره‌های روشن در هر بخش با استفاده از معیارهای سطح تحت پوشش و مقدار انرژی ذخیره شده در انتهای دور و تعداد گره‌های فعال تعریف شده است. در مرحله بعدی، گره‌های فعال خوشه‌بندی شده‌اند. در این مرحله، خوشه‌ها با توجه به مقدار انرژی سرخوشه‌ها در پایان دور، میزان انرژی مصرفی برای ارسال داده به آنها و تعداد اعضای خوشه‌ها ساخته شده‌اند. در مرحله نهایی، مسیریابی آگاه به انرژی برای انتقال داده از سرخوشه‌ها به چاهک انجام شده است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، الگوریتم EDGR کارایی قابل توجهی نسبت به روش‌های پیشین دارد. دلیل این مسئله دید جامع روش پیشنهادی نسبت به جنبه‌های

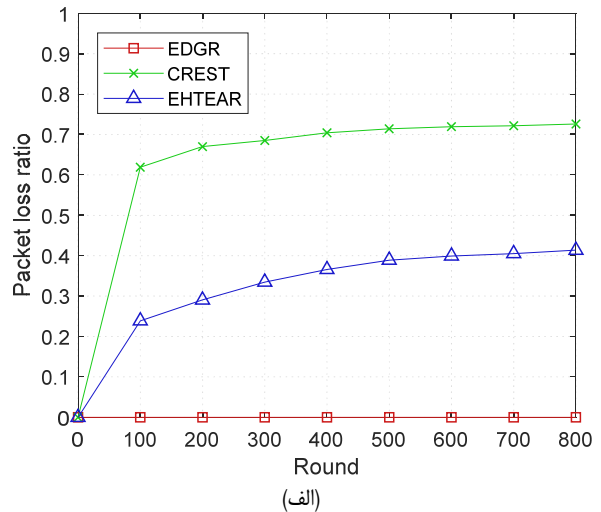
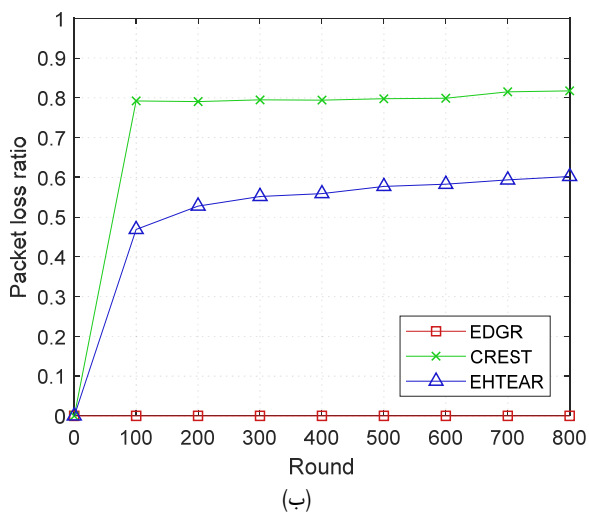
### ۳-۶ نرخ گم شدن بسته‌ها

نرخ برداشت انرژی در شبکه‌های قابل شارژ به طور معمول پایین است و بنابراین در صورتی که مصرف انرژی در گره‌ها مدیریت نشود، ذخیره انرژی برخی از گره‌ها سریعاً تمام می‌شود. در این حالت این گره‌ها قادر به جمع‌آوری داده از محیط و ارسال داده‌های خود و سایرین نخواهند بود. در نتیجه قسمتی از داده‌های جمع‌آوری شده از سطح شبکه به چاهک نمی‌رسند و یا اصطلاحاً گم می‌شوند. نرخ گم شدن الگوریتم‌های EDGR، CREST و EHTEAR در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ مورد بررسی قرار گرفته است. همان طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، نرخ گم شدن الگوریتم EDGR تقریباً برابر صفر است. همچنین این معیار برای الگوریتم‌های CREST و EHTEAR در شبکه‌های ۳۰۰ گرهی به ترتیب برابر ۵۸٪ و ۳۰٪ است. در شبکه‌های ۵۰۰ گرهی، نرخ گم شدن بسته توسط روش‌های مذکور به ترتیب برابر ۷۵٪ و ۴۶٪ است.

معیار نرخ گم شدن بسته‌ها وابسته به میانگین و انحراف از معیار انرژی ذخیره شده در گره‌ها است. با توجه به نتایج ارائه شده در بخش‌های ۱-۶ و ۲-۶، الگوریتم پیشنهادی مقدار انرژی گره‌ها را در سطح بالایی نگه داشته و همچنین نرخ مصرف انرژی در آنها را تا حد زیادی متوازن نموده است. بنابراین احتمال تخلیه باتری گره‌ها، مخصوصاً گره‌های مستقر در مکان‌های بحرانی مانند اطراف چاهک به شدت کاهش یافته است. در



شکل ۱۶: نرخ گم‌شدن بسته در شبکه‌های ۳۰۰ گرهی، (الف) نرخ ارسال ۵۰ بیت/ثانیه و (ب) نرخ ارسال ۱۰۰ بیت/ثانیه.



شکل ۱۷: نرخ گم‌شدن بسته در شبکه‌های ۵۰۰ گرهی، (الف) نرخ ارسال ۵۰ بیت/ثانیه و (ب) نرخ ارسال ۱۰۰ بیت/ثانیه.

[5] M. Shafiq, H. Ashraf, A. Ullah, and S. Tahira, "Systematic literature review on energy efficient routing schemes in WSN-a survey," *Mobile Networks and Applications*, vol. 25, pp. 882-895, Jun. 2020.

[۶] و. ستاری نائینی و ف. موحدی، "به کارگیری منطق فازی در انتخاب مناسب گره بعدی برای پیکربندی مسیر با پروتکل LEAP در شبکه‌های حسگر بی‌سیم،" *نشریه مهندسی برق و کامپیوتر ایران، ب- مهندسی کامپیوتر، سال ۱۵، شماره ۴، صص. ۳۰۴-۲۹۵، زمستان ۱۳۹۶.*

[7] K. S. Adu-Manu, N. Adam, C. Tapparelo, H. Ayatollahi, and W. Heinzelman, "Energy-harvesting wireless sensor networks (EH-WSNs): a review," *ACM Trans. on Sensor Networks*, vol. 14, no. 2, Article No.: 10, 50 pp., May 2018.

[8] Q. Chen, et al., "Harvest energy from the water: a self-sustained wireless water quality sensing system," *ACM Trans. on Embedded Computing Systems*, vol. 17, no. 1, Article No.: 3, 24 pp., Jan. 2017.

[9] S. Kosunalp, "An energy prediction algorithm for wind-powered wireless sensor networks with energy harvesting," *Energy*, vol. 139, pp. 1275-1280, Nov. 2017.

[10] A. Bakar and J. Hester, "Making sense of intermittent energy harvesting," in *Proc. of Int. Workshop on Energy Harvesting & Energy-Neutral Sensing Systems, SenSys'18*, pp. 32-37, Shenzhen, China, 4-4 Nov. 2018.

[11] J. DeWitt and H. Shi, "Barrier coverage in energy harvesting sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 56pp. 72-83, 1 Mar. 2017.

[12] C. C. Lin, Y. C. Chen, J. L. Chen, D. J. Deng, S. B. Wang, and S. Y. Jhong, "Lifetime enhancement of dynamic heterogeneous wireless sensor networks with energy-harvesting sensors," *Mobile Networks and Applications*, vol. 22, no. 5, pp. 931-942, Oct. 2017.

[13] A. Bengheni, F. Didi, and I. Bambrik, "EEM-EHWSN: enhanced energy management scheme in energy harvesting wireless sensor networks," *Wireless Networks*, vol. 25, no. 6, pp. 3029-3046, Aug. 2019.

مختلف مسئله جمع‌آوری داده، مانند زمان‌بندی خواب گره‌ها، خوشه‌بندی و مسیریابی است. همچنین استفاده از الگوریتم PSO-TVAC در مراحل مختلف، کارایی روش پیشنهادی را افزایش داده است. راه حل‌های به دست آمده به دلیل حرکت در راستای توابع برازندگی معرفی شده، کیفیت بالایی خواهند داشت.

### مراجع

[1] M. K. Singh, S. I. Amin, S. A. Imam, V. K. Sachan, and A. Choudhary, "A survey of wireless sensor network and its types," in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Advances in Computing, Communication Control and Networking, ICACCCN'18*, pp. 326-330, Greater Noida, India, 12-13 Oct. 2018.

[2] 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, Nov. 2019.

[3] P. Visu, T. S. Praba, N. Sivakumar, R. Srinivasan, and T. Sethukarasi, "Bio-inspired dual cluster heads optimized routing algorithm for wireless sensor networks," *J. of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 12, no. 3, pp. 3753-3761, Mar. 2021.

[۴] ن. نوروزی، ه طباطبایی ملاذی و م. فضلعلی، "EBONC: یک روش جدید خوشه‌بندی آگاه از انرژی، مبتنی بر تعداد خوشه بهینه برای شبکه حسگر بی‌سیم متحرک،" *نشریه مهندسی برق و کامپیوتر ایران، ب- مهندسی کامپیوتر، سال ۱۴، شماره ۴، صص. ۳۱۰-۲۹۹، زمستان ۱۳۹۵.*

- on *Wireless Communications & Signal Processing, WCSP'15*, 5 pp., Nanjing, China, 15-17 Oct. 2015.
- [31] M. Deb and S. Roy, "Harvested profile aware multi hop routing protocol for wireless sensor network," in *Proc. of Int. Conf. on Emerging Applications of Information Technology, EAIT'18*, 4 pp., Kolkata, India, 12-13 Jan. 2018.
- [32] S. M. Bozorgi, A. S. Rostami, A. A. R. Hosseinabadi, and V. E. Balas, "A new clustering protocol for energy harvesting-wireless sensor networks," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 64, pp. 233-247, Nov. 2017.
- [33] M. M. Afsar and M. Youni, "A load-balanced cross-layer design for energy-harvesting sensor networks," *J. of Network and Computer Applications*, vol. 145, Article ID: 102390, 1 Nov. 2019.
- [34] A. Ratnaweera, S. Halgamuge, and H. Watson, "Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients," *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, vol. 8, no. 3, pp. 240-255, Jun. 2004.
- [35] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 1, no. 4, pp. 660-670, Oct. 2002.
- [36] H. Zhang and J. C. Hou, "Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks," *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, vol. 1, pp. 89-124, Jan. 2005.
- [37] R. S. Y. Elhabyan and M. C. E. Yagoub, "Two-tier particle swarm optimization protocol for clustering and routing in wireless sensor network," *J. of Network and Computer Applications*, vol. 52, no. C, pp. 116-128, Jun. 2015.
- وحیده فراهانی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی کامپیوتر در دانشگاه تبریز در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ به پایان رسانده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل شبکه‌های بی‌سیم و کاربردهای بهینه‌سازی در شبکه‌های کامپیوتری است.
- لیلی فرزین‌وش** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی کامپیوتر در دانشگاه تهران در سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۸۸ به پایان رسانده است. همچنین مدرک دکتری خود در رشته مهندسی کامپیوتر را در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر دریافت نمود. ایشان در حال حاضر استادیار گروه مهندسی فناوری اطلاعات در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تبریز است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل شبکه‌های بی‌سیم، بهینه‌سازی و کاربردهای مهندسی آن و امنیت شبکه است.
- مینا زلفی لبقوان** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی کامپیوتر در دانشگاه تهران در سال‌های ۱۳۷۸ و ۱۳۸۱ به پایان رسانده است. همچنین مدرک دکتری خود در رشته مهندسی برق را در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه تبریز دریافت نمود. ایشان در حال حاضر استادیار گروه مهندسی کامپیوتر در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تبریز است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل معماری کامپیوتر و شبکه‌های بی‌سیم است.
- رحیم ابری لبقوان** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی کامپیوتر در دانشگاه تبریز در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ به پایان رسانده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل مدل‌سازی سیستم‌های کامپیوتری با استفاده از شبکه پتری و شبکه‌های بی‌سیم است.
- [14] T. Lu, G. Liu, W. Li, S. Chang, and W. Guo, "Distributed sampling rate allocation for data quality maximization in rechargeable sensor networks," *J. of Network and Computer Applications*, vol. 80, pp. 1-9, 15 Feb. 2017.
- [15] S. Liu and Y. C. Chen, "Robust data collection for energy-harvesting wireless sensor networks," *Computer Networks*, vol. 167, Article ID: 107025, 11 Feb. 2020.
- [16] G. Martinez, S. Li, and C. Zhou, "Wastage-aware routing in energy-harvesting wireless sensor networks," *IEEE Sensors J.*, vol. 14, no. 9, pp. 2967-2974, Sep. 2014.
- [17] H. Shafieirad, R. S. Adve, and S. Shabbazpanahi, "Opportunistic routing in large-scale energy harvesting sensor networks," in *Proc. of IEEE GLOBECOM Workshops*, 6 pp., Washington, DC, USA, 4-8 Dec. 2016.
- [18] F. Li, M. Xiong, L. Wang, H. Peng, J. Hua, and X. Liu, "A novel energy-balanced routing algorithm in energy harvesting sensor networks," *Physical Communication*, vol. 27, no. C, pp. 181-187, Apr. 2018.
- [19] J. Li and D. Liu, "An energy aware distributed clustering routing protocol for energy harvesting wireless sensor networks," in *Proc. of IEEE/CIC Int. Conf. on Communications in China, ICC'16*, 6 pp., Chengdu, China, 27-29 Jul. 2016.
- [20] D. Sharma and A. P. Bhonekar, "An improved cluster head selection in routing for solar energy-harvesting multi-heterogeneous wireless sensor networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 108, no. 4, pp. 2213-2228, Oct. 2019.
- [21] Y. Wu and W. Liu, "Routing protocol based on genetic algorithm for energy harvesting-wireless sensor networks," *IET Wireless Sensor Systems*, vol. 3, no. 2, pp. 112-118, Jun. 2013.
- [22] S. Sarang, M. Drieberg, A. Awang, and R. Ahmad, "A QoS MAC protocol for prioritized data in energy harvesting wireless sensor networks," *Computer Networks*, vol. 144, pp. 141-153, 24 Oct. 2018.
- [23] P. Zhong, Y. Zhang, S. Ma, J. Gao, and Y. Chen, "An adaptive MAC protocol for wireless rechargeable sensor networks," in *Proc. of Int. Conf. on Wireless Algorithms, Systems, and Applications, WASA'17*, Lecture Notes in Computer Science, Springer, vol. 10251, 5 pp., May 2017.
- [24] A. Pal and A. Nasipuri, "Joint power control and routing for rechargeable wireless sensor networks," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 123992-124007, Aug. 2019.
- [25] R. S. Liu, K. W. Fan, Z. Zheng, and P. Sinha, "Perpetual and fair data collection for environmental energy harvesting sensor networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 19, no. 4, pp. 947-960, Nov. 2011.
- [26] T. Lu, G. Liu, and S. Chang, "Energy-efficient data sensing and routing in unreliable energy-harvesting wireless sensor network," *Wireless Networks*, vol. 24, no. 2, pp. 611-625, Feb. 2018.
- [27] R. R. Rout, M. S. Krishna, and S. Gupta, "Markov decision process-based switching algorithm for sustainable rechargeable wireless sensor networks," *IEEE Sensors J.*, vol. 16, no. 8, pp. 2788-2797, Apr. 2016.
- [28] X. Zhang, C. Wang, and L. Tao, "An opportunistic packet forwarding for energy-harvesting wireless sensor networks with dynamic and heterogeneous duty cycle," *IEEE Sensors Letters*, vol. 2, no. 3, 4 pp., Sept. 2018.
- [29] H. Darji and H. B. Shah, "Genetic algorithm for energy harvesting-wireless sensor networks," in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology, RTEICT'16*, pp. 1398-1402, Bangalore, India, 20-21 May 2016.
- [30] J. Li and D. Liu, "DPSO-based clustering routing algorithm for energy harvesting wireless sensor networks," in *Proc. of Int. Conf.*