Karafan

Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University

Autumn 2021, Vol. 18, No. 3, p. 253-272

Journal homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en

TVU

doi:10.48301/KSSA.2021.269713.1360

:20.1001.1.23829796.1400.18.3.13.6

Original Research

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

Sensor Node Clustering Algorithm with Respect to Node Density in Wireless Sensor Networks

Hamid Karimi[1]*

[1]Faculty Member, Department of Computer Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 03.08.2021
Revised: 09.06.2021
Accepted: 10.02.2021

Keyword:
Wireless sensor network
Clustering algorithm
Energy efficient
Node density

***Corresponding Author:**
Hamid Karimi
Email: *karimi-h@tvu.ac.ir*

ABSTRACT

In clustering algorithms for wireless sensor networks, cluster heads close to the sink node usually encounter much more relay traffic and therefore lose energy rapidly. To address this problem in wireless sensor networks, distance-aware clustering approaches such as EEUC that adjust the cluster size according to the distance between the sink node and each cluster head have been proposed. However, the network lifetime of such approaches is highly dependent on the distribution of the sensor nodes because in randomly distributed sensor networks the approaches do not guarantee that the cluster energy consumption is commensurate with the cluster size. It might be necessary, for example, for sensors to be randomly distributed over the surveillance region (e.g., via aircraft). To solve this problem in wireless sensor networks, a new method called distribution based clustering algorithm (DBCA) was proposed in the present research which is not only aware of the distance but also the density of the sensor nodes. In DBCA, clusters have limited sensor nodes that are determined by the distance between the sink node and the cluster head. The simulation results show that DBCA is 25% to 45% more efficient than previous algorithms in terms of power consumption under different operating conditions.

©2021 Technical and Vocational University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

کارافن
فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای
پاییز ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۳، ۲۷۲-۲۵۳
آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir/
doi:10.48301/KSSA.2021.269713.1360
:20.1001.1.23829796.1400.18.3.13.6
مقاله پژوهشی
شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰
شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

الگوریتم خوشه‌بندی گره‌های حسگر با توجه به تراکم گره‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم

حمید کریمی[1*]

۱- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۸
بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۵
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۰

کلید واژگان:
الگوریتم‌های خوشه‌بندی
تراکم گره‌ها
شبکه‌های حسگر بی‌سیم
کارایی در مصرف انرژی

***نویسنده مسئول:** حمید کریمی
پست الکترونیکی:
karimi-h@tvu.ac.ir

چکیده

در رویکردهای مبتنی بر خوشه‌بندی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، سرخوشه‌های نزدیک به گره سینک[1] معمولاً با ترافیک رله بسیار بیشتری روبه‌رو می‌شوند و بنابراین به‌سرعت انرژی خود را از دست می‌دهند. برای رفع این مشکل، رویکردهای خوشه‌بندی آگاه از فاصله[2]، مانند الگوریتم خوشه‌بندی EEUC[3] که اندازه خوشه را با توجه به فاصله بین گره سینک و هر سرخوشه تنظیم می‌کنند پیشنهاد شده است. با این حال، طول عمر شبکه با استفاده از چنین رویکردهایی بسیار وابسته به توزیع گره‌های حسگر می‌باشد؛ زیرا در شبکه‌های حسگر توزیع شده تصادفی، رویکردها تضمین نمی‌کنند که مصرف انرژی خوشه متناسب با اندازه خوشه باشد. برای رفع این مشکل، ما یک روش جدید به نام الگوریتم خوشه‌بندی با در نظر گرفتن توزیع گره‌ها پیشنهاد می‌کنیم که نه‌تنها آگاه از فاصله است بلکه آگاه از تراکم گره‌ها نیز می‌باشد. در الگوریتم پیشنهادی ما (DBCA)[4]، خوشه‌ها دارای گره‌های محدودی هستند که با توجه به فاصله بین گره سینک و سرخوشه تعیین می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که DBCA در شرایط مختلف عملیاتی با توجه به طول عمر شبکه، ۲۵ درصد الی ۴۵ درصد کارآمدتر از الگوریتم‌های قبلی از لحاظ مصرف انرژی می‌باشد.

[1] Sink node
[2] Distance-aware
[3] Energy-efficient unequal clustering
[4] Distribution based clustering algorithm

©2021 Technical and Vocational University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

مقدمه

در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، گره‌های حسگر معمولاً قابل شارژ یا تعویض نیستند؛ زیرا گره‌ها در تعداد بسیار زیاد در مناطقی قرار می‌گیرند که دسترسی به آنها دشوار است. بنابراین با توجه به اینکه گره‌های حسگر معمولاً از منابع محدود انرژی تأمین می‌شوند، بهبود طول عمر شبکه همیشه هدف اصلی شبکه‌های حسگر بی‌سیم بوده است.

بسیاری از پروتکل‌های مسیریابی کارآمد برای افزایش طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم ارائه شده‌اند [۱-۵]. مخصوصاً رویکردهای مبتنی بر خوشه مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند؛ زیرا این رویکردها می‌توانند به بهره‌وری بالای انرژی دست پیدا کنند و در عین حال مقیاس‌پذیری شبکه را نیز افزایش دهند. به‌طور معمول در رویکردهای مبتنی بر خوشه‌بندی، سرخوشه‌ها توسط الگوریتم‌های مبتنی بر رقابت انتخاب می‌شوند. معمولاً گره‌هایی با بیشترین انرژی در همسایگی، به‌عنوان سرخوشه انتخاب می‌شوند. سپس هر گره معمولی (غیر از سرخوشه) یک سرخوشه را انتخاب می‌کند تا با آن یک خوشه را تشکیل دهد. پس از اتمام خوشه‌بندی، سرخوشه‌ها، داده‌های حس شده را از گره‌های عضو جمع می‌کند و به گره سینک می‌فرستند [۶-۸]. برای بهینه‌سازی مصرف انرژی انتقال داده‌ها، سرخوشه‌ها موارد تکراری و اضافی را قبل از انتقال به گره سینک حذف می‌کنند.

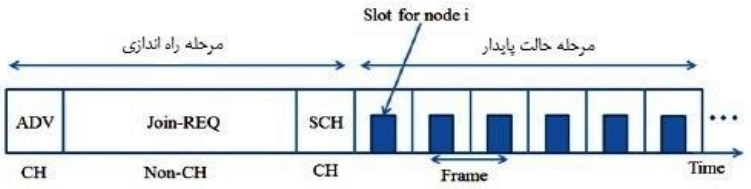
رویکردهای مبتنی بر خوشه‌بندی معمولاً از یک مدل ارتباطی چند هاپی[1] استفاده می‌کنند که کارآمدتر از مدل ارتباط مستقیم می‌باشد و داده‌های حس شده از منابع داده (گره‌های حسگر) را به گره سینک تحویل می‌دهند. با این حال در چنین رویکردهایی، سرخوشه‌های نزدیک به گره سینک به دلیل خوشه‌بندی برابر، منابع انرژی خود را بسیار سریع‌تر از سرخوشه‌های دیگر از دست می‌دهند. به‌طور دقیق‌تر، سرخوشه‌هایی که نزدیک به گره سینک قرار می‌گیرند معمولاً در رله‌های ترافیکی بیشتری درگیر هستند و بنابراین منابع انرژی خود را بسیار سریع‌تر از سایر سرخوشه‌ها از دست می‌دهند (مشکل نقطه داغ[2]). این ممکن است منجر به تقسیم شبکه حسگر و همچنین کاهش پوشش سنجش شبکه گردد. برای رفع این مشکل، الگوریتم EEUC در [۹] پیشنهاد شده است. در EEUC، فاصله سرخوشه تا گره سینک و همچنین اندازه خوشه‌ها کاهش می‌یابد. در نتیجه در الگوریتم EEUC، خوشه‌های نزدیک به گره سینک نسبت به خوشه‌های دیگر، اندازه خوشه کوچک‌تری دارند. به‌طور دقیق‌تر، EEUC خوشه‌های کوچک‌تر و بیشتری را نزدیک به گره سینک قرار می‌دهد تا انرژی کمتری برای سنجش، تجمیع و ارتباطات درون خوشه‌ای مصرف کنند. این خوشه‌بندی نابرابر ممکن است با انتخاب مسیرهای مختلف برای تحویل داده‌ها، بار کمتری در سرخوشه‌های خاص ایجاد کند. با این حال EEUC برای شبکه‌های حسگر با توزیع تصادفی، کمتر مؤثر است و کارآمد نمی‌باشد. الگوریتم EEUC با ایجاد یک تناسب بین مصرف انرژی خوشه (سنجش و حس داده‌ها و ارتباطات درون‌خوشه‌ای) و مصرف انرژی برای ارتباطات بین‌خوشه‌ای، منجر به افزایش طول عمر برای شبکه حسگر می‌شود. با این حال EEUC تضمین نمی‌کند که یک خوشه با اندازه کوچک‌تر دارای تراکم گره کمتری در یک شبکه حسگر توزیع شده به‌طور تصادفی باشد. قرار دادن خوشه‌های کوچک در یک منطقه شلوغ ممکن است کارآمدی الگوریتم EEUC را کاهش دهد. برای رفع این مشکل، الگوریتم جدیدی به نام DBCA[3] (الگوریتم خوشه‌بندی با در نظر گرفتن توزیع گره) را پیشنهاد می‌دهیم که اندازه هر خوشه را با توجه به تراکم گره‌ها تعیین می‌کند. علاوه بر این، DBCA به‌طور خودکار تراکم گره‌ها در هر خوشه را براساس مصرف انرژی در هر خوشه نیز تنظیم می‌کند. در DBCA، ابتدا تعداد بهینه‌ای از سرخوشه‌ها را برای یک شبکه حسگر مشخص محاسبه می‌کنیم و سپس اندازه و تراکم گره‌ها در هر خوشه را با توجه به فاصله بین گره سینک و سرخوشه مشخص می‌کنیم. به‌طور هم‌زمان، سطح انرژی موردنیاز هر خوشه را نیز برای

[1] Multi-Hop
[2] Hot-spot problem
[3] Distribution based clustering algorithm

سنجش و ارتباط درون‌خوشه‌ای تخمین می‌زنیم تا امکان تنظیمات بیشتر فراهم شود. علاوه بر این برای متعادل نگه‌داشتن شبکه حسگر، برخلاف روش‌های قبلی که ساختارهای خوشه‌ای را در ابتدای هر دوره به‌طور کامل بازسازی می‌کنند ما فقط به‌صورت جزئی ساختارهای خوشه‌ای را بازسازی می‌کنیم. در ادامه این مقاله، بخش‌های زیر آورده شده است. در بخش ۲، به‌طور خلاصه تحقیقات مرتبط پیشین برای شبکه حسگر بی‌سیم در زمینه الگوریتم‌های خوشه‌بندی بررسی می‌شود. بخش ۳، شرح روش پیشنهادی DBCA را ارائه می‌دهد. در بخش ۴، ارزیابی و تجزیه‌وتحلیل عملکرد توسط نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌گردد و سرانجام در بخش ۵ نتیجه‌گیری می‌شود.

کارهای مرتبط

الگوریتم خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی انطباقی کم‌مصرف (LEACH[1])، اولین رویکرد خوشه‌بندی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم است [۱۰]. الگوریتم LEACH به‌صورت دوره‌ای عمل می‌کند و در ابتدای هر دوره، مجموعه‌ای از سرخوشه‌ها با یک رقابت محلی انتخاب می‌شوند. برای توزیع یکنواخت مصرف انرژی در بین تمام گره‌ها، الگوریتم LEACH سرخوشه را در میان گره‌ها می‌چرخاند. در LEACH، هر دوره دارای دو مرحله است: مرحله راه‌اندازی و مرحله حالت پایدار، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است. در ابتدای مرحله راه‌اندازی، هر گره تصمیم می‌گیرد که آیا یک سرخوشه با یک احتمال مشخص باشد یا خیر.



شکل ۱. الگوریتم LEACH

پس از انتخاب سرخوشه، هر سرخوشه برای دوره جاری یک پیام اعلانی[2] (ADV) را با استفاده از پروتکل CSMA[3] برای بقیه گره‌ها ارسال می‌کند. هر گره غیر از سرخوشه که پیام ADV را دریافت کند با توجه به قدرت سیگنال پیام ADV، خوشه موردنظر خود را تعیین می‌کند. پس از اینکه هر گره غیر از سرخوشه در مورد خوشه خود تصمیم گرفت، با ارسال یک پیام Join-REQ به سرخوشه، عضویت خود را در خوشه اطلاع می‌دهد. سپس سرخوشه یک برنامه زمانی دسترسی چندگانه با تقسیم‌بندی زمان (TDMA[4]) را آماده و آن را برای گره‌های عضو ارسال می‌کند. در مرحله حالت پایدار، گره‌های حسگر در اسلات‌های زمانی اختصاص داده شده، داده‌های خود را به سرخوشه ارسال می‌کنند. برای جلوگیری از اتلاف انرژی گره‌های حسگر، فرستنده‌های رادیویی خود را به غیر از زمان‌های اختصاص داده شده به آنها برای ارسال خاموش می‌کنند. سرخوشه‌ها، داده‌های حس شده را جمع و با استفاده از ماژول CSMA آنها را به سمت گره سینک هدایت می‌کنند. متأسفانه الگوریتم LEACH استفاده از ساختار خوشه‌هایی که به‌خوبی شکل گرفته‌اند را تضمین نمی‌کند. از آنجایی که الگوریتم LEACH سرخوشه را با توجه به انرژی باقیمانده

[1] Low-energy adaptive clustering hierarchy
[2] Advertisement message
[3] Carrier sense multiple access
[4] Time-division multiple access

انتخاب می‌کند ساختار خوشه شدیداً به توزیع گره‌های حسگر وابسته است. برای رفع این مشکل یک الگوریتم خوشه‌بندی متمرکز LEACH-C[1] پیشنهاد شده است [۱۱]. از آنجا که الگوریتم LEACH-C فرض میکند که گره سینک مکان گره‌های حسگر را می‌داند و همه گره‌های حسگر باید اطلاعات موقعیت خود را به‌صورت هم‌زمان به گره سینک ارسال کنند یک روش پرهزینه‌تر است و برای تشکیل ساختار خوشه‌ای به هزینه انتقال داده بیشتری نیاز دارد.

الگوریتم‌های مختلفی در ادبیات موضوع ارائه شده است که با الگوریتم LEACH شباهت دارند یا الگوریتم LEACH را بهبود می‌بخشند. تحقیق انجام شده در [۱۲] رویکرد M-LEACH را ارائه می‌دهد که یک طرح مسیریابی با مدل ارتباطی چند هاپی در درون هر خوشه است. در M-LEACH، گره حسگری که بالاترین سطح انرژی را داشته باشد شانس تبدیل شدن به سرخوشه را پیدا می‌کند. مقاله [۱۳] یک الگوریتم خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی مبتنی بر وزن‌دهی توزیع شده به نام DWEHC[2] پیشنهاد می‌دهد که یک روش گروه‌بندی کارآمد است. در این الگوریتم، سرخوشه براساس درجه گره‌ها و انرژی باقیمانده انتخاب می‌شود و ارتباطات درون‌خوشه‌ای با محدوده ارتباط یک گره که برای مفهوم گام یا پرش استفاده می‌شود مدیریت می‌گردد. الگوریتم پیشنهادی در [۱۴] به‌عنوان الگوریتم LEACH بهینه شده (O-LEACH) نامگذاری شده است. این الگوریتم، بهینه‌سازی را در لایه‌های مختلف الگوریتم LEACH انجام می‌دهد و از نتایج آن برای انتخاب سرخوشه‌ها و پیکربندی خوشه‌ها استفاده می‌کند. با توجه به استفاده از یک آستانه خاص برای انرژی باقیمانده در فرایند انتخاب سرخوشه، O-LEACH موجب افزایش طول عمر شبکه حسگر می‌گردد. رویکرد MOPSO[3] یک الگوریتم خوشه‌بندی مبتنی بر روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات می‌باشد که در [۱۵] پیشنهاد شده است. این الگوریتم تعداد خوشه‌ها را بهینه می‌کند و استفاده از انرژی را کاهش می‌دهد. درجه گره‌ها، میزان استفاده از انرژی توسط گره‌ها و میزان انرژی مصرف شده برای انتقال در گره‌ها، پارامترهای مورداستفاده برای انتخاب سرخوشه است.

یک الگوریتم متمرکز در [۱۶] به نام EELBC[4] ارائه شده است که گره سینک یا همان ایستگاه پایه مسئول فرایند خوشه‌بندی می‌باشد. در ابتدا یک تعداد گره دروازه[5] با توجه به تعداد کل گره‌ها در شبکه در نظر گرفته می‌شود و هر گره با نزدیک‌ترین دروازه، مرتبط می‌گردد. الگوریتم EELBC به دلیل استفاده کمتر از انرژی و کاهش تعداد گرهای مرده (گره‌هایی که انرژی خود را از دست داده‌اند)، کارایی شبکه حسگر را بهبود بخشیده است. در الگوریتم SLWCA[6] [۱۷] پارامترهای مورداستفاده برای انتخاب سرخوشه شامل انرژی گره، الگوی تحرک و درجه گره‌ها است. در ابتدا درجه گره‌ها محاسبه می‌شود و سپس تحرک گره‌ها و انرژی باقیمانده آنها بررسی می‌گردد و در نهایت یک وزن به‌دست می‌آید. گره با کمترین مقدار وزن به‌عنوان سرخوشه انتخاب می‌شود. در [۱۸] یک پروتکل خوشه‌بندی مقیاس‌پذیر با صرفه‌جویی در انرژی به نام EECSP[7] ارائه شده که در آن از مقادیر فاصله‌های درون‌خوشه‌ای و بین‌خوشه‌ای برای ساخت خوشه‌های متعادل استفاده می‌شود. این یک الگوریتم جدید مبتنی بر روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای انتخاب سرخوشه است که موجب افزایش طول عمر شبکه حسگر می‌گردد. در [۱۹]، یک پروتکل خوشه‌بندی ایستا معرفی شده که از مدل سرخوشه دوگانه استفاده می‌کند. با توجه به انرژی گره‌ها، دو سرخوشه انتخاب می‌گردد و یکی از سرخوشه‌ها برای تجمیع و دیگری برای انتقال داده‌ها

[1] Centralized low-energy adaptive clustering hierarchy
[2] Distributed Weight-Based Energy-Efficient Hierarchical Clustering
[3] Multi-objective Particle Swarm Optimization
[4] Energy Efficient Load Balanced Clustering
[5] Gateway
[6] Stable Load Balanced Weighted Clustered Algorithm
[7] Energy-Efficient Scalable Clustering Protocol

استفاده می‌شوند. در [۲۰]، یک روش مسیریابی برای شبکه حسگر ناهمگن ارائه شده که گره‌های با انرژی بیشتر را به‌عنوان سرخوشه انتخاب کرده و از الگوی چند هاپی برای برقراری ارتباط استفاده کرده است. الگوریتم پیشنهادی، محدوده شبکه را به مناطق مختلفی تقسیم کرده و یک گره متحرک را به هریک از منطقه‌ها اختصاص داده است. در [۲۱] پروتکلی مبتنی بر مدل شبکه‌های حسگر ناهمگن پیشنهاد شده که انرژی اضافی را برای بهبود کارایی در گره‌های نزدیک به گره سینک مدنظر قرار می‌دهد. با ترکیب گره‌های که انرژی بیشتری دارند با دیگر گره‌ها، ثبات و طول عمر شبکه حسگر افزایش پیدا می‌کند.

الگوریتم خوشه‌بندی ارائه شده در [۲۲] به‌صورت مورب محدوده شبکه را به مناطقی تقسیم می‌کند و سپس خوشه‌ها را تشکیل می‌دهد. الگوریتم از تکنیک k-means برای تشکیل خوشه بهره می‌برد و گره‌های حسگر با مدل ارتباط چند هاپی داده‌های خود را به گره سینک یا همان ایستگاه پایه منتقل می‌کنند. در پروتکل مسیریابی EESRA[1] [۲۳]، هدف پروتکل افزایش طول عمر شبکه و افزایش اندازه آن است. در این پروتکل، سرخوشه به‌صورت تصادفی انتخاب شد و یک مسیریابی سلسله‌مراتبی سه لایه‌ای را برای به‌حداقل رساندن بار ترافیکی سرخوشه اتخاذ می‌کند و از مدل انتقال چند هاپی برای انتقال داده‌های حس شده در درون خوشه استفاده می‌کند. به‌علاوه، هر سرخوشه یک یا چند گره واجد شرایط را انتخاب می‌کند تا به‌عنوان اجتماع خوشه‌ای عمل کنند. این اجتماعات خوشه‌ای مسئول بازیابی و جمع‌آوری داده‌های اندازه‌گیری شده از اعضای خوشه خود و انتقال آنها به سرخوشه با استفاده از پروتکل ترکیبی MAC هستند که این پروتکل شامل مکانیسم‌های جلوگیری از برخورد[2] و زمان‌بندی خواب گره‌های حسگر برای سنجش داده‌ها می‌باشد. در مقاله [۲۴] یک پروتکل مسیریابی سلسله‌مراتبی مبتنی بر الگوریتم درخت k-d ارائه شده که از تقسیم‌بندی شبکه برای سازماندهی گره‌ها و خوشه‌ها استفاده می‌کند. این پروتکل، شبکه را به k منطقه تقسیم می‌کند و خوشه‌هایی را در هر منطقه ایجاد می‌کند. درخت k-d یک شبکه سلسله‌مراتبی دو هاپی ایجاد می‌کند که براساس آن درخت مربوطه با توجه به موقعیت مکانی هر گره برای انتقال داده‌ها به ایستگاه پایه ساخته می‌شود. نتایج، نشانگر بهبود تأخیر و کارایی شبکه است.

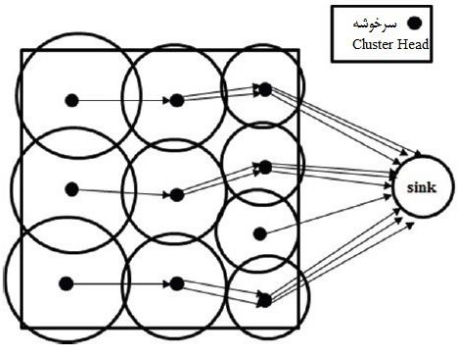
از آنجایی که الگوریتم‌های مبتنی بر خوشه‌بندی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم معمولاً از یک مدل ارتباطی چند هاپی برای انتقال داده‌ها به گره سینک استفاده می‌کنند؛ این سبب می‌شود که سرخوشه‌های نزدیک به گره سینک در رله‌های ترافیکی بیشتری قرار بگیرند و بنابراین بسیار سریع‌تر از سایر سرخوشه‌ها، منابع انرژی خود را مصرف کنند. برای رفع این مشکل، الگوریتم EEUC طرح خوشه‌بندی نابرابر را ارائه کرده است که در شکل۲ این طرح به تصویر کشیده شده است. الگوریتم EEUC، اندازه خوشه را براساس فاصله بین سرخوشه و گره سینک تعیین می‌کند؛ به این ترتیب که خوشه‌های نزدیک به گره سینک، کوچک‌تر می‌باشد و تعداد گره، عضو کمتری دارند. به‌طور دقیق‌تر، الگوریتم EEUC اندازه خوشه را با استفاده از معادله (۱) تعیین می‌کند.

$$S_i, R_{comp} = (1 - c\frac{d_{\max} - d(s_i, \sin k)}{d_{\max} - d_{\min}})R^0_{comp} \qquad (۱)$$

در معادله (۱)، R_{comp} حداکثر اندازه خوشه قابل تعریف می‌باشد. d_{max} و d_{min} به‌ترتیب بیشترین و کمترین فاصله بین گره سینک و یک سرخوشه را نشان می‌دهند. $d(s_i,sink)$ بیانگر فاصله سرخوشه S_i و گره سینک می‌باشد و C یک ضریب ثابت بین ۰ و ۱ است. با توجه به معادله (۱) ، اندازه خوشه از R_{comp} (1-C) تا R_{comp} متفاوت می‌باشد. در الگوریتم EEUC، خوشه‌های نزدیک‌تر به گره سینک انرژی کمتری را برای فعالیت‌های درون خوشه مصرف می‌کنند

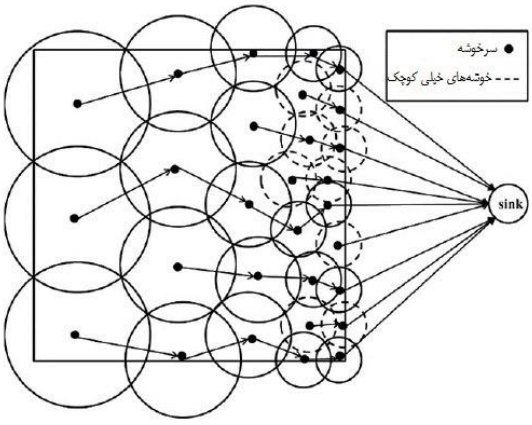
[1] Energy-Efficient Scalable Routing Algorithm
[2] Collision

(ارتباطات سنجش، تجمیع و ارتباطات درون‌خوشه‌ای) و بنابراین می‌توانند رله‌های ترافیکی بیشتری را تأمین کنند. با این حال EEUC برای شبکه‌های حسگر توزیع شده تصادفی، از کارآمدی کمتری برخوردار است؛ زیرا تراکم گره‌ها را در درون خوشه مدنظر قرار نمی‌دهد و تضمین نمی‌کند که خوشه‌ای با اندازه کوچک‌تر دارای تراکم گره کمتری باشد. بدیهی است که خوشه‌های کوچک با تراکم گره زیاد، کارآمدی الگوریتم EEUC را زیر سؤال می‌برند و تأثیر آن را کاهش می‌دهند.



شکل ۲. طرح الگوریتم EEUC

علاوه بر این برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم با توزیع تصادفی گره‌ها، الگوریتم EEUC ممکن است شامل خوشه‌هایی باشد که به دلیل اندازه کوچک در هیچ رله ترافیکی ایفای نقش نکنند همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است. در شکل ۳، خوشه‌های نشان داده شده توسط خط تیره در انتقال اطلاعات دخیل نیستند و بنابراین سرخوشه‌ها انرژی بسیار کمتری را مصرف می‌کنند. برای افزایش طول عمر شبکه، بزرگ‌تر بودن چنین خوشه‌هایی مطلوب‌تر است. این به ما انگیزه داد که تا یک الگوریتم با قابلیت ساختاربندی مجدد پیشنهاد کنیم. در روش پیشنهادی ما، خوشه‌هایی که در ارتباطات بین‌خوشه‌ای کمتری نقش دارند مجاز به داشتن گره‌های بیشتری برای عضویت در خوشه به‌منظور بهینه‌سازی می‌باشند. توضیحات دقیق‌تر در بخش ۳-۳ آورده شده است.



شکل ۳. طرح الگوریتم EEUC

الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم پیشنهادی ارائه شده در این مقاله به نام DBCA[1] دارای سه مرحله یا فاز راه‌اندازی، انتقال داده و ساختاربندی مجدد است. در مرحله راه‌اندازی، ابتدا الگوریتم DBCA تعدادی سرخوشه را تعیین می‌کند و سپس هر گره غیر از سرخوشه، یک سرخوشه را برای تشکیل یک خوشه انتخاب می‌کند. مشابه الگوریتم EEUC، الگوریتم پیشنهادی ما نیز تراکم گره‌ها در هر خوشه را با توجه به فاصله آن از گره سینک تعیین می‌کند. گره‌های حسگر، داده‌ها را به سرخوشه‌های خود منتقل می‌کنند و سپس سرخوشه‌ها با استفاده از یک مدل ارتباطی چند هاپی در مرحله انتقال داده، داده‌ها را جمع‌آوری می‌کنند و به گره سینک می‌فرستند. در مرحله ساختاربندی مجدد، اگر خوشه‌هایی در مراحل راه‌اندازی و انتقال داده انرژی بیشتری مصرف کنند، DBCA با بازسازی نسبی آن خوشه‌ها، مصرف انرژی را متعادل می‌کند. شکل ۴ نحوه سازماندهی هر دوره از الگوریتم DBCA را نشان می‌دهد. پس از فاز ساختاربندی مجدد برای چندین دوره بعدی، مرحله راه‌اندازی که یک مرحله پرهزینه است را حذف می‌کنیم تا از ساختار خوشه‌ای کاملاً تثبیت‌شده استفاده کنیم. این موضوع در شکل ۴ نشان داده شده است. در شکل ۴، مرحله راه‌اندازی با مرحله بازسازی در دوره دوم جایگزین می‌شود و برای دوره‌های بعدی، مرحله راه‌اندازی حذف می‌شود و بنابراین نتیجه مرحله بازسازی حفظ می‌گردد. با حفظ ساختار خوشه‌ای و حذف مرحله پرهزینه راه‌اندازی، الگوریتم DBCA انرژی بیشتری را برای ارتباطات بین‌خوشه‌ای حفظ می‌کند. جزئیات عملیاتی بیشتر در زیربخش‌های بعدی شرح داده شده است.

بدون اینکه خللی به کلّیت موضوع وارد شود خصوصیات زیر را در مورد شبکه حسگر فرض می‌کنیم:

- گره سینک ثابت می‌باشد و دارای منابع انرژی نامحدود است.
- هر گره حسگر با توجه به قدرت دریافت سیگنال قادر به اندازه‌گیری فاصله خود از گره سینک است.
- گره‌های حسگر ثابت هستند و دارای قابلیت‌های مشابه (پردازش، ارتباطات، منابع انرژی) می‌باشند.
- گره‌های حسگر می‌توانند سطح قدرت انتقال خود را با توجه به فاصله مدیریت کنند.

مرحله راه‌اندازی الگوریتم DBCA

در مرحله راه‌اندازی، الگوریتم DBCA مجموعه‌ای از سرخوشه‌ها را تعیین می‌کند و سپس با گره‌های باقیمانده خوشه‌ها را تشکیل می‌دهد. الگوریتم DBCA از مکانیزم انتخاب سرخوشه با مصرف کم انرژی و به‌صورت توزیعی HEED[2] استفاده می‌کند [۲۵]. الگوریتم HEED سرخوشه‌ها را براساس انرژی باقیمانده آنها جایگزین می‌کند. معادله (۲) برای انتخاب سرخوشه در زیر آورده شده است. درصد اولیه تعداد سرخوشه‌ها با C_{prob} مشخص شده و غالباً مقدار ۵ درصد را دارد.

$$CH_{prob} = C_{prob} * \frac{E_{residual}}{E_{\max}} \qquad (۲)$$

که در آن CH_{prob} بیانگر احتمال تبدیل شدن به یک سرخوشه را نشان می‌دهد. $E_{residual}$ و E_{max} به‌ترتیب انرژی باقیمانده و ماکزیمم انرژی یک گره می‌باشند.

[1] Distibution Based Clustering Algorithm
[2] Hybrid energy-efficient distributed

پس از انتخابات سرخوشه، الگوریتم پیشنهادی ما (DBCA) با استفاده از پیام‌های ADV و Join، خوشه‌ها را تشکیل می‌دهد. گره سینک با توجه به قدرت سیگنال، فاصله بین یک سرخوشه و سینک را تخمین می‌زند و اندازه‌های مناسب خوشه و تعداد گره‌های عضو را به سرخوشه اعلام می‌کند. با استفاده از این اطلاعات، هر سرخوشه یک خوشه را تشکیل می‌دهد. تعداد گره‌های عضو اختصاص‌یافته به یک خوشه، از معادله (۳) پیروی می‌کند.

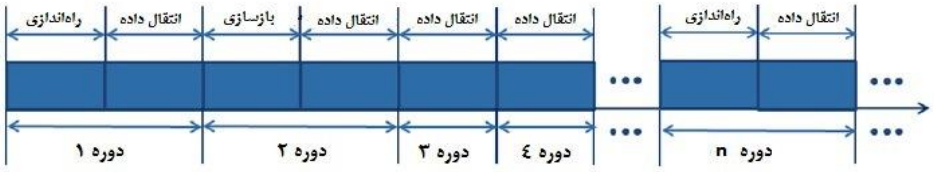
$$OSN = \frac{N}{CN} + P \qquad (۳)$$

که در آن، OSN[1] تعداد بهینه گره‌های حسگری است که باید در یک خوشه گنجانده شود. در حالی که N و CN به‌ترتیب تعداد گره‌های حسگر و تعداد سرخوشه‌ها برای شبکه حسگر می‌باشند. حرف P، یک ثابت برای مشخص کردن تراکم گره‌ها در هر خوشه با توجه به فاصله از گره سینک است. برای تعیین کارآمد ثابت P، الگوریتم DBCA از معادله (۴) پیروی می‌کند.

$$P = \frac{d(s_i, sink)}{F} * V \qquad (۴)$$

که در آن d (S_i, Sink) فاصله بین سرخوشه S_i و گره سینک می‌باشد و F بیانگر اندازه میدان شبکه حسگر است. در حالی که V یک ثابت تعریف شده توسط کاربر برای اختصاص تعداد مناسب گره‌های عضو به یک خوشه می‌باشد. اگر یک خوشه، گره‌های عضو بیشتری نسبت به مقدار OSN داشته باشد، خوشه تقسیم شده یا گره‌های عضو را به خوشه‌های همسایه منتقل می‌کند تا یک ساختار خوشه‌ای با مصرف انرژی حداقل ایجاد کند. ما آستانه M را برای پارتیشن‌بندی خوشه به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$M = OSN * 1.5 \qquad (۵)$$



شکل ۴. مراحل الگوریتم DBCA

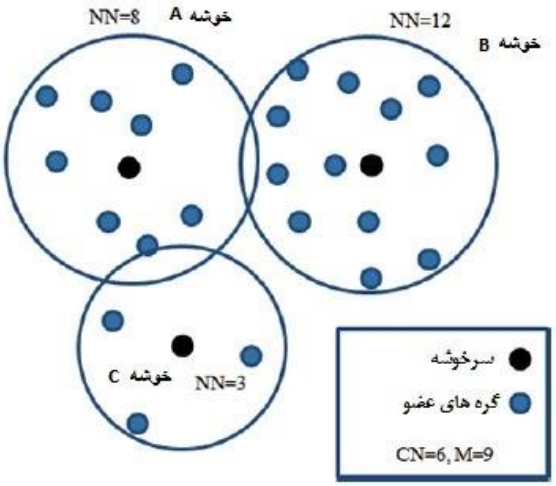
شکل ۵ و ۶ یک مثال در حال اجرا از یک خوشه را نشان می‌دهد که نیاز به پارتیشن‌بندی دارد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است خوشه B گره‌های حسگر بیشتری نسبت به M دارد (M=9). بنابراین خوشه B باید تقسیم شود تا میزان مصرف انرژی متعادل گردد. برای پارتیشنبندی، دو گره دورتر به‌عنوان سرخوشه‌های جدید انتخاب می‌شوند و سرخوشه‌های جدید خوشه‌هایی را با استفاده از پیام های ADV و Join تشکیل می‌دهند (همانطور که در بالا ذکر شد). شکل۶ نتیجه اعمال پارتیشن‌بندی را نشان می‌دهد. در شکل ۶، خوشه B به دو خوشه B' و D

[1] Optimal sensor node

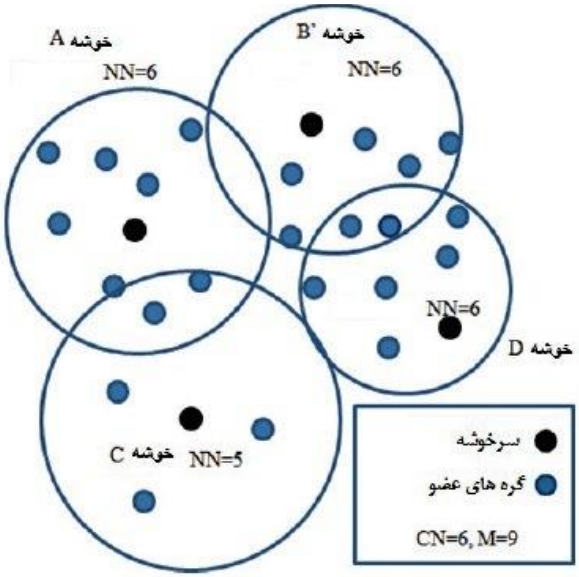
تقسیم شده است. همان‌طور که در مثال در حال اجرا قابل مشاهده است الگوریتم DBCA با محدود کردن حداکثر تعداد گره‌های عضو در هر خوشه، مصرف انرژی هر خوشه را متعادل می‌کند. حتی اگر اعمال پارتیشن‌بندی، ساختارهای خوشه‌ای با مصرف انرژی کارآمدی را تولید کند، این راهکار می‌تواند پرهزینه باشد. بر این اساس الگوریتم DBCA راهکار انتقال گره حسگر را برای خوشه‌هایی که گره‌های عضو آنها بیشتر یا کمتر از OSN است به‌منظور بهینه‌سازی بیشتر در نظر می‌گیرد. برای اینکه همه خوشه‌ها به اندازه مقدار OSN گره عضو داشته باشند خوشه‌هایی با تعداد عضو کمتر یا بیشتر از مقدار OSN پیام‌های Less یا Over را به سرخوشه‌های همسایه ارسال می‌کنند. اگر یک خوشه با گره‌های عضو بیشتر (C_o) و یک خوشه با گره‌های عضو کمتر(C_L) همسایه یکدیگر باشند، برخی از گره‌های عضو C_o که نزدیک به C_L هستند، به C_L منتقل می‌شوند؛ به‌طوری که همه خوشه‌ها به اندازه مقدار OSN، گره عضو داشته باشند. توجه داشته باشید که حداکثر تعداد گره‌های عضو با توجه به فاصله از گره سینک متفاوت می‌باشد. بنابراین نتایج الگوریتم DBCA از نظر کوچک بودن خوشه‌های نزدیک به گره سینک ممکن است مشابه با الگوریتم EEUC باشد اما الگوریتم DBCA با محدود کردن حداکثر تعداد گره‌های یک خوشه، (با توجه به فاصله از گره سینک) ساختارهای خوشه‌ای با مصرف بهینه انرژی را حتی برای مناطق شلوغ تضمین می‌کند.

مرحله انتقال داده

بعد از اتمام مرحله راه‌اندازی، سرخوشه‌ها با توجه به تعداد گره‌های عضو، برنامه‌های زمانی TDMA را ایجاد کرده و برنامه‌ها را به گره‌های عضو خود ارسال می‌کنند. سپس گره‌های عضو در اسلات‌های زمانی اختصاص داده شده، داده‌های خود را به سرخوشه منتقل می‌کنند. بعد از اینکه سرخوشه‌ها داده‌ها را جمع‌آوری کردند آنها را با استفاده از الگوریتم CSMA (برای جلوگیری از برخورد داده‌ها) به گره سینک هدایت می‌کنند. هنگام تحویل داده‌ها، اگر فاصله بین گره‌های فرستنده و گیرنده کمتر از d_0 باشد الگوریتم DBCA از مدل انتشار Friis free-space استفاده می‌کند و در غیر این صورت از مدل انتشار two-ray ground استفاده می‌شود.



شکل ۵. ساختار خوشه‌ای نامتعادل (پیش از پارتیشن‌بندی)



شکل ۶. ساختار خوشه‌ای متعادل (پس از پارتیشن‌بندی)

مرحله ساختاربندی مجدد

در طول مراحل راه اندازی و انتقال داده‌ها، سرخوشه‌ها انرژی مصرف شده برای ساخت ساختارهای خوشه‌ای و تجمیع و انتقال داده‌ها به گره سینک را برآورد می‌کنند (E_0). در مرحله ساختاربندی مجدد (بازسازی)، سرخوشه‌ها E_0 محاسبه‌شده را به گره سینک ارسال می‌کنند تا گره سینک متوسط هزینه انرژی (AEC[1]) و هزینه انرژی ساختاربندی مجدد (REC[2]) هر خوشه را برآورد کند. سپس گره سینک AEC و REC محاسبه‌شده را به سرخوشه‌ها می‌فرستد. در واقع REC آستانه تحریک مرحله ساختاربندی مجدد است.

$$AEC = \frac{E_{total}}{CN'} \quad (۶)$$

$$REC = AEC * 1.5 \quad (۷)$$

که در آن E_{total} نشان‌دهنده کل انرژی مصرفی شبکه حسگر و 'CN بیانگر تعداد سرخوشه‌ها می‌باشد. اگر یک سرخوشه دارای E_0 بزرگ‌تر از REC باشد (C_t)، برای بازسازی خوشه، پیام بازسازی را به سرخوشه‌های همسایه خود ارسال می‌کند. توجه داشته باشید که در معادله (۷) ضریب ثابت ۱/۵ را می‌توان با توجه به شرایط شبیه‌سازی تغییر داد و بنابراین باید براساس نتایج تجربی درباره آن تصمیم‌گیری شود. اگر سرخوشه‌هایی که E_0 آنها کمتر از AEC است وجود داشته باشد (C_r)، گره‌های عضوی خوشه C_t که نزدیک به C_r هستند به عضویت خوشه C_r درمی‌آیند. سپس سرخوشه C_r برنامه زمانی TDMA را دوباره ایجاد می‌کند و آن را برای گره‌های عضو ارسال می‌کند. پس از

[1] Average energy cost
[2] Re-construct energy cost

مرحله بازسازی، مرحله راه‌اندازی برای k دوره بعدی حذف می‌گردد تا از این ساختار خوشه‌ای بازسازی شده استفاده شود؛ این موضوع در شکل۴ نشان داده شده است. توضیحات دقیق‌تری در مورد محاسبه مقدار k در بخش۴ آورده شده است. اگر همه خوشه‌های همسایه دارای E_0 بزرگ‌تر از AEC باشند از مرحله بازسازی صرف‌نظر می‌شود و الگوریتم DBCA دوره بعدی را آغاز می‌کند تا کل ساختار خوشه‌ها در مرحله راه‌اندازی مجدداً ساخته شود. الگوریتم زیر روش کار DBCA را ارائه می‌دهد. در خط ۱، سرخوشه‌ها را با توجه به مکانیزم مورداستفاده در HEED انتخاب می‌کنیم. سپس DBCA یک ساختار خوشه‌ای را در مابقی الگوریتم ایجاد می‌کند. در هنگام ساخت ساختار خوشه، خوشه‌ای که گره‌های عضو آن بیش از M باشد در خطوط ۵ تا ۷ به دو یا چند خوشه تقسیم می‌شود. هنگامی که یک سرخوشه دارای گره‌های عضو بیشتری نسبت به مقدار OSN باشد سرخوشه، خوشه‌هایی را پیدا می‌کند که قادر به داشتن گره‌های بیشتری باشند و گره‌های عضو خود را در خطوط ۸ تا ۱۸ به آنها منتقل می‌کند. در خط ۱۹، هر خوشه تصمیم می‌گیرد که آیا مرحله ساختاربندی مجدد را آغاز کند یا خیر. اگر E_0> REC، سرخوشه با پخش یک پیام بازسازی به سرخوشه‌های همسایه در خط ۲۰ باعث تحریک مرحله بازسازی می‌گردد و منتظر پیام گسترش خوشه می‌شود. اگر سرخوشه، پیام گسترش خوشه را دریافت کند؛ مرحله ساختاربندی مجدد در خط ۲۲ آغاز می‌گردد. در غیر این صورت، DBCA به‌سادگی به دوره بعدی می‌رود تا کل ساختار خوشه‌ها در مرحله راه‌اندازی در خط ۲۴ دوباره ساخته شود. اگر خوشه‌ای که E_0 آن کمتر از AEC است پیام بازسازی را دریافت کند؛ پیام گسترش خوشه را ارسال می‌کند و مرحله ساختاربندی مجدد در خطوط ۲۶ تا ۳۱ آغاز می‌شود.

DBCA algorithm
1. Cluster head election // HEED
2. For each cluster head (CH)
3. Broadcast ADV message;
4. Receive join-request message from non-CH node;
5. If number of join request node > m then // node partitioning
6. Selects cluster heads;
7. Partitions the cluster;
8. Else if number of join request node > OSN then
9. Broadcast OVER message to nighboring chs;
10. If CH receives LESS messages then
11. Adjusting cluster;
12. Endif
13. Else
14. Broadcast LESS messages to nighboring chs;
15. If CH receives OVER messages then
16. Adjusting cluster;
17. Endif
18. Endif
19. If E_0 > REC then
20. Broadcast reconstruct message to nighboring chs;
21. If CH receives cluster extend message then
22. Re-construction;
23. Else
24. Goto line 1;
25. Endif
26. Elseif CH receive reconstruct messages then
27. If E_0< AEC then

DBCA algorithm
28. Broadcast cluster extend message to nighboring chs;
29. Re-construction;
30. Endif
31. Endif
32. Endfor

ارزیابی و تحلیل عملکرد

در این بخش، عملکرد الگوریتم پیشنهادی DBCA را با مقایسه آن با الگوریتم‌های LEACH، HEED و EEUC ارزیابی می‌کنیم. برای شبیه‌سازی از شبکه شبیه‌ساز NS2 استفاده کردیم و مدل مصرف انرژی در شبیه‌سازی‌ها، مدل رادیویی مرتبه اول[1] می‌باشد (معادله ۸) که برای LEACH و EEUC نیز استفاده شده است.

$$E_{TX}(t,d) = E_{elec} * t + \varepsilon_{amp} * t * d^{n} = \begin{cases} E_{elec} * t + \varepsilon_{fs} * t * d^{2}, d < d_0 \\ E_{elec} * t + \varepsilon_{mp} * t * d^{4}, d > d_0 \end{cases} \quad (۸)$$
$$E_{RX}(t,d) = E_{elec} * t$$

که در آن E_{TX} بیانگر انرژی مصرف شده در انتقال داده‌ها می‌باشد و E_{elec} انرژی مصرف‌شده برای پردازش یک بیت داده را نشان می‌دهد در حالی که t و d به‌ترتیب اندازه داده و فاصله انتقال می‌باشند. ε_{amp} انرژی موردنیاز برای تقویت سیگنال است. هنگامی که $d < d_0$ ما از ε_{fs} استفاده می‌کنیم که از مدل انتشار friis free-space می‌باشد. در غیر این صورت، از ε_{mp} استفاده می‌شود که از مدل انتشار two-ray ground است و E_{RX} بیانگر انرژی مصرف شده هنگام دریافت اطلاعات می‌باشد و d_0 توسط معادله ۹ محاسبه می‌شود.

$$d_0 = \frac{4\pi\sqrt{L}h_r h_t}{\lambda} \quad (۹)$$

که در آن L ضریب تلفات سیستم می‌باشد که مربوط به انتشار موج نیست و λ طول موج سیگنال حامل است. h_t و h_r به‌ترتیب ارتفاع از سطح زمین آنتن‌های فرستنده و گیرنده می‌باشد.

$L = 1$ نشان‌دهنده نبود اتلاف در سخت‌افزار سیستم است. $h_t = h_r = 1.5m$ و اگر از فرکانس حامل ۹۱۴ مگاهرتز استفاده کنیم، λ به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\lambda = \frac{3*10^8}{914*10^6} = 3.28 \quad (۱۰)$$

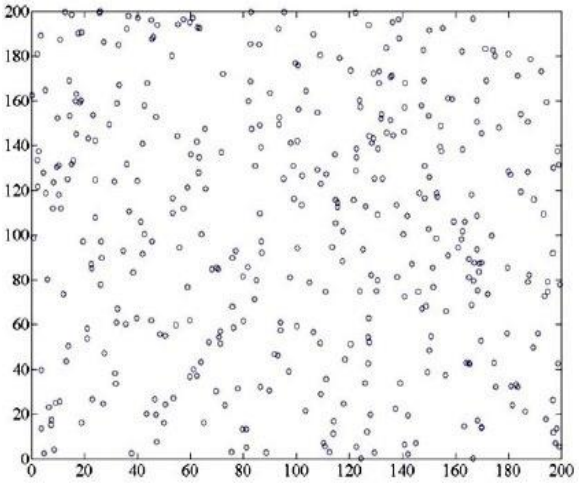
با استفاده از این پارامترها، $d_0 = 86.2$ m است. پارامترهای شبیه‌سازی در جدول ۱ آورده شده و از مولد سناریوی NS2 برای توزیع تصادفی گره‌های حسگر استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود اولین مجموعه از شبیه‌سازی‌ها برای یافتن بهترین مقدار برای k است (بخش ۳-۳)؛ زیرا با حذف مرحله راه‌اندازی برای k دوره بعد از

[1] First-order radio

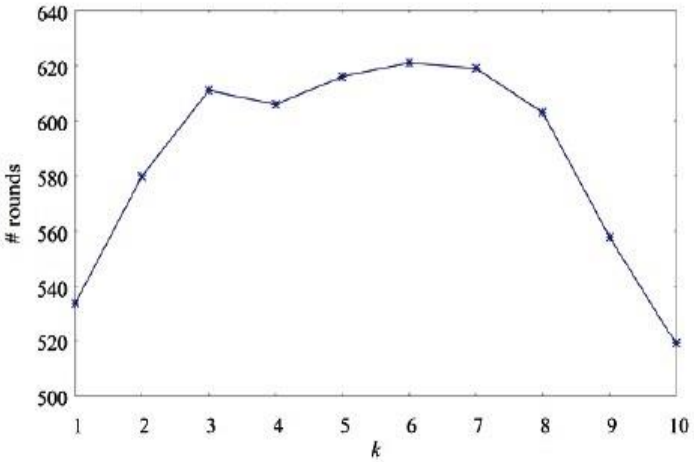
مرحله بازسازی، الگوریتم DBCA انرژی بیشتری را برای ارتباطات درون‌خوشه‌ای حفظ می‌کند و بنابراین می‌تواند طول عمر شبکه‌های حسگر را افزایش دهد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود زمانی که k کمتر از ۳ باشد الگوریتم DBCA عملکرد ضعیفی را نشان می‌دهد. این بدان دلیل است که با چنین مقادیر کوچک k، الگوریتم DBCA نمی‌تواند به‌طور کامل از مزیت مرحله بازسازی بهره‌برداری کند. به‌طور دقیق‌تر در مرحله بازسازی، DBCA یک ساختار خوشه‌ای با مصرف انرژی کارآمد را تولید می‌کند اما انرژی بیشتری را در کل فرایند مصرف می‌کند؛ بنابراین برای جبران این انرژی مصرفی اضافی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی برای ارتباطات بین خوشه‌ای، الگوریتم DBCA مرحله راه‌اندازی را حذف می‌کند و نتیجه مرحله بازسازی را برای k دوره بعدی حفظ می‌نماید. با این حال شکل ۸ نشان می‌دهد که DBCA نمی‌تواند با چنین مقادیر کوچک k به این اهداف برسد. علاوه بر این، کارایی الگوریتم DBCA وقتی k بیشتر از ۸ باشد نیز کاهش می‌یابد؛ زیرا حفظ ساختار خوشه‌ای برای چنین مدت طولانی باعث کاهش سریع منابع انرژی سرخوشه‌ها می‌شود. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است این کاهش سریع باعث می‌شود که رویکرد ما کمتر مثمرثمر باشد. در نتیجه برای بهینه‌سازی عملکرد DBCA، مرحله راه‌اندازی را برای ۶ دوره بعدی پس از مرحله بازسازی که بهترین مقدار برای k است حذف می‌کنیم. این موضوع در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

جدول ۱. پارامترهای شبیه‌سازی

Parameter	Value
Network coverage (m)	(0,0)-(200,200)
Sink location (m)	(-100,100)-(100,100)
N	400
Initial energy (J)	2
T (bit)	4000
d_0(m)	86.2
E_{elec}(nJ/bit)	50
ε_{fs}(pJ/bit/m^2)	10
ε_{mp}(pJ/bit/m^4)	0.0013
E_{DA}(nJ/bit/signal)	5
C	0.5
Initial cluster head rate (%)	5
P	0.05



شکل ۷. استقرار اولیه نودهای حسگر

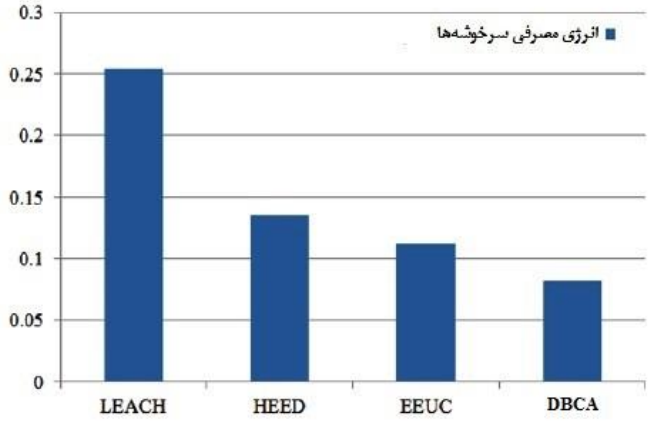


شکل ۸. تأثیر مقدار k روی عمر شبکه در الگوریتم DBCA

مجموعه بعدی شبیه‌سازی ما بررسی اثربخشی الگوریتم DBCA است. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است ما مصرف انرژی هر گره حسگر را ارزیابی و مقایسه می‌کنیم. شکل ۹ میانگین مصرف انرژی هر دوره را برای چهار الگوریتم موردبحث نشان می‌دهد. الگوریتم DBCA از لحاظ صرفه‌جویی انرژی تا ۳ برابر کارآمدتر از LEACH و تا ۱/۶ برابر کارآمدتر از الگوریتم‌های HEED و EEUC است. عملکرد ضعیف LEACH به این دلیل است که تراکم گره‌ها و اندازه هر خوشه را در نظر نمی‌گیرد. علاوه بر این، ارتباط مستقیم بین هر سرخوشه و گره سینک منجر به کاهش کارایی این الگوریتم می‌گردد.

الگوریتم HEED به دلیل استفاده از مدل ارتباطی چند هاپی برای ارسال اطلاعات، از LEACH بهتر عمل می‌کند اما ممکن است مشکل نقطه داغ باعث کاهش کارایی آن گردد؛ زیرا سرخوشه‌های نزدیک به گره سینک برای انتقال داده‌های خوشه‌های دورتر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۶]. این مشکل نقطه داغ، مصرف انرژی گره‌های همسایه گره سینک را تسریع می‌کند و به‌نوبه خود ممکن است منجر به تقسیم شبکه حسگر و همچنین کاهش پوشش سنجش شود که برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم مطلوب نیست.

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود الگوریتم EEUC به دلیل رویکرد خوشه‌بندی آگاه از فاصله، انرژی کمتری نسبت به HEED مصرف می‌کند اما ممکن است برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم با توزیع تصادفی از کارآمدی کمتری برخوردار باشد. الگوریتم پیشنهادی ما، با در نظر گرفتن تراکم گره‌ها در هرخوشه، الگوریتم EEUC را توسعه داده و به‌طور متوالی باعث کاهش مصرف انرژی در هر دوره می‌شود این موضوع در شکل ۹ قابل مشاهده است.



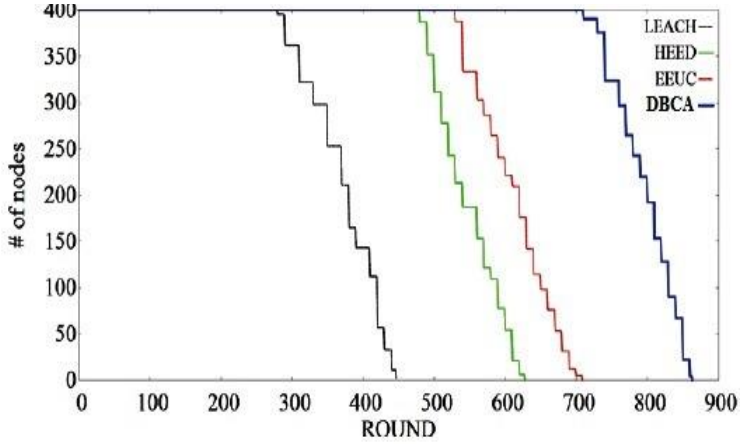
شکل ۹. میانگین مصرف انرژی در هر دوره

شکل ۱۰ تعداد گره‌های حسگری را نشان می‌دهد که در طول زمان شبیه‌سازی چهار الگوریتم موردبحث همچنان انرژی دارند و زنده هستند. همان‌طور که قابل مشاهده است الگوریتم DBCA به‌وضوح باعث افزایش طول عمر شبکه نسبت به LEACH، HEED و EEUC می‌شود. هنگام تشکیل ساختارهای خوشه‌ای، الگوریتم‌های دیگر تراکم گره‌ها و مصرف انرژی هر خوشه را در نظر نمی‌گیرند و ممکن است ساختارهای خوشه‌ای نامتعادل ایجاد کنند. این ساختارهای نامتعادل خوشه‌ای ممکن است در هنگام پردازش و انتقال داده‌ها، انرژی بیشتری را هدر دهند. در مقابل الگوریتم DBCA یک خوشه را وادار می‌کند تا تعداد گره‌های عضو کمتری نسبت به مقدار OSN[1] داشته باشد که این مقدار با توجه به فاصله از گره سینک متفاوت است. این ویژگی DBCA مصرف انرژی متعادل‌تری را روی شبکه حسگر تضمین می‌کند حتی اگر گره‌های شبکه حسگر به‌صورت تصادفی توزیع شده باشند.

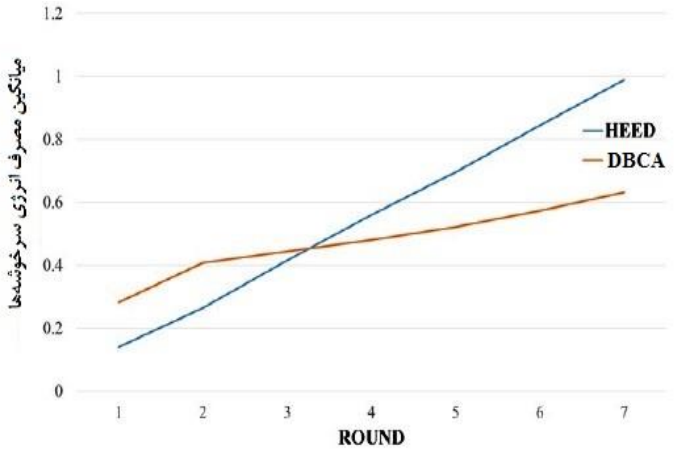
آخرین مجموعه از آزمایش‌های ما، مصالحه ناشی از حفظ ساختارهای خوشه‌ای را بررسی کرده است. شکل ۱۱ مصرف انرژی سرخوشه‌ها در الگوریتم DBCA و HEED را نشان می‌دهد. الگوریتم EEUC با در نظر گرفتن سطح انرژی هر گره، سرخوشه را انتخاب می‌کند اما ما در این مقاله DBCA را فقط با HEED مقایسه می‌کنیم؛ زیرا

[1] Optimal sensor node

جزئیات الگوریتم انتخاب سرخوشه در الگوریتم EEUC در مقاله آن آورده نشده است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود منحنی الگوریتم DBCA نشان می‌دهد که سرخوشه‌ها به دلیل مرحله راه‌اندازی و مرحله ساختاربندی مجدد، انرژی بیشتری نسبت به HEED تا دو دوره مصرف می‌کنند اما پس از آن، DBCA انرژی کمتری مصرف می‌کند؛ زیرا DBCA ساختار خوشه را برای هفت دوره متوالی حفظ می‌کند. سرخوشه‌ها ممکن است در DBCA بار ترافیکی بیشتری داشته باشند اما پایداری ساختار خوشه‌ها، بارهای ترافیکی را به‌حداقل می‌رساند و الگوریتم را از لحاظ مصرف انرژی کارآمدتر می‌سازد.



شکل ۱۰. تعداد گره‌های حسگر زنده در طول زمان



شکل ۱۱. میانگین مصرف انرژی سرخوشه‌ها

نتیجه‌گیری

در این مقاله، الگوریتم DBCA پیشنهاد شد که هدف آن افزایش طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم است که معمولاً از منابع محدود انرژی تأمین می‌شوند. رویکرد DBCA ساختارهای خوشه‌ای را ایجاد می‌کند که می‌تواند با در نظر گرفتن تراکم گره‌ها و انرژی مصرفی در هر خوشه، مصرف انرژی را حتی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم با توزیع تصادفی نیز متعادل کند. آنالیزها و ارزیابی عملکرد نشان داد که روش DBCA تا سه برابر کارآمدتر از روش‌های قبلی است.

به‌عنوان کار آینده، قصد داریم رویکرد خود را با بررسی مدل ارتباطی همکاری‌کننده [۲۷; ۲۸] گسترش دهیم تا یک ساختار خوشه‌ای با مصرف انرژی بهینه‌تر ایجاد کنیم.

References

[1] Abdul-Salaam, G., Abdullah, A. H., Anisi, M. H., Gani, A., & Alelaiwi, A. (2016). A comparative analysis of energy conservation approaches in hybrid wireless sensor networks data collection protocols. *Telecommunication Systems*, *61*(1), 159-179. https//:doi.org/10.1007/s11235-015-0092-8

[2] Akkaya, K., & Younis, M. (2005). A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, *3*(3), 325-349. https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2003.09.010

[3] Chang, F.-C., & Huang, H.-C. (2016). A Survey on Intelligent Sensor Network and Its Applications. *J. Netw. Intell.*, *1*(1), 1-15 .

[4] Kong, L., Pan, J.-S., Tsai, P.-W., Vaclav, S., & Ho, J.-H. (2015). A balanced power consumption algorithm based on enhanced parallel cat swarm optimization for wireless sensor network. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, *11*(3), 729680. https://doi.org/10.1155/2015/729680

[5] Snasel, V., Kong, L., Tsai, P.-W., & Pan, J.-S. (2016). Sink Node Placement Strategies based on Cat Swarm Optimization Algorithm. *J. Netw. Intell.*, *1*(2), 52-60 .

[6] Horng, M.-F., & Shieh, C.-S. (2016). An Energy-based Cluster Head Selection Algorithm to Support Long-lifetime in Wireless Sensor Networks. *Network Intelligence*, *1*(1), 27-37 .

[7] Jangwan, H., & Negi, A .(2016) .Enhanced Energy-Efficient Balanced Clustering Protocol for WSN. *International Journal of Applied Engineering Research*, *11*(5), 3619-3623 .

[8] Liu, X. (2012). A Survey on Clustering Routing Protocols in Wireless Sensor Networks. *Sensors*, *12*(8), 11113-11153 .https://doi.org/10.3390/s120811113

[9] Chengfa, L., Mao, Y., Guihai, C., & Jie, W. (2005, Nov 7-7). *An energy-efficient unequal clustering mechanism for wireless sensor networks.* IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference, 2005., Washington, DC, USA. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1542849

[10] Heinzelman, W. B. (2000). *Application-specific protocol architectures for wireless networks.* [Massachusetts Institute of Technology]. Cambridge. http://hdl.handle.net/1721.1/26881

[11] Li, H. (2010, Oct 22-24). *LEACH-HPR: An energy efficient routing algorithm for Heterogeneous WSN.* 2010 IEEE International Conference on Intelligent

Computing and Intelligent Systems, Taiyuan, China. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5620564

[12] Aslam, M., Javaid, N., Rahim, A., Nazir, U., Bibi, A., & Khan, Z. A. (2012, June 25-27). *Survey of Extended LEACH-Based Clustering Routing Protocols for Wireless Sensor Networks*. 2012 IEEE 14th International Conference on High Performance Computing and Communication & 2012 IEEE 9th International Conference on Embedded Software and Systems, Liverpool, UK. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6332317

[13] Ding, P., Holliday, J., & Celik, A. (2005). Distributed energy-efficient hierarchical clustering for wireless sensor networks. In *International conference on distributed computing in sensor systems* (pp. 322-339). Springer. https://doi.org/10.1007/11502593_25

[14] Nasri, N., Ben Fradj, A., & Kachouri, A. (2017). Optimised cross-layer synchronisation schemes for wireless sensor networks. *International Journal of Electronics*, *104*(7), 1178-1189. https://doi.org/10.1080/00207217.2017.1292555

[15] Ali, H., Shahzad, W., & Khan, F. A. (2012). Energy-efficient clustering in mobile ad-hoc networks using multi-objective particle swarm optimization. *Applied Soft Computing*, *12*(7), 1913-1928. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.05.036

[16] Kuila, P., & Jana, P. K. (2012). Energy Efficient Load-Balanced Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks. *Procedia Technology*, *6*, 771-777. https://doi.org/10.1016/j.protcy.2012.10.093

[17] Aissa, M., Belghith, A., & Drira, K. (2013). New strategies and extensions in weighted clustering algorithms for mobile ad hoc networks. *Procedia Computer Science*, *19*, 297-304. https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.06.042

[18] Singh, H., & Singh, D. (2019). An energy efficient scalable clustering protocol for dynamic wireless sensor networks. *Wireless Personal Communications*, *109*(4), 2637-2662. https://doi.org/10.1007/s11277-019-06701-7

[19] Panag, T. S., & Dhillon, J. S. (2018). Dual head static clustering algorithm for wireless sensor networks. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, *88*, 148-156. https://doi.org/10.1016/j.aeue.201.۸03019

[20] Toor, A. S., & Jain, A. K. (2019). Energy Aware Cluster Based Multi-hop Energy Efficient Routing Protocol using Multiple Mobile Nodes (MEACBM) in Wireless Sensor Networks. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, *102* ,41-53 .https://doi.org/10.1016/j.aeue.2019.02.006

[21] Nehra, V., Sharma, A. K., & Tripathi, R. K. (2019). NMR inspired energy efficient protocol for heterogeneous wireless sensor network. *Wireless Networks*, *25*(6), 3689-3700. https://doi.org/10.1007/s11276-019-01963-2

[22] Gupta, P., Raj, P., Tiwari, S., Kumari, P., & Mehra, P. S. (2020, Apr 1). *Energy efficient diagonal based clustering protocol in wireless sensor network.* Proceedings of the International Conference on Innovative Computing & Communications (ICICC), Delhi 110089, India https://ssrn.com/abstract=3565781

[23] Elsmany, E. F. A., Omar, M. A., Wan, T. C., & Altahir, A. A. (2019). EESRA: Energy Efficient Scalable Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks. *IEEE Access*, *7*, 96974-96983. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2929578

[24] Anzola, J., Pascual, J., Tarazona, G., & Gonzalez Crespo, R. (2018). A clustering WSN routing protocol based on kd tree algorithm. *Sensors*, *18*(9), 2899. https://doi.org/10.3390/s18092899

[25] Younis, O., & Fahmy, S. (2004). HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, *3*(4), 366-379. https://doi.org/10.1109/TMC.2004.41

[26] Kim, K., & Cha, B. (2007, Aug 26-29). *A Topology Control Scheme for Avoiding Sensing Hole in Wireless Sensor Networks.* 2007 International Conference on Computational Science and its Applications (ICCSA 2007), Kuala Lampur, Malaysia https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4301174

[27] Asaduzzaman & ,Kong, H. Y. (2010). Energy efficient cooperative LEACH protocol for wireless sensor networks. *Journal of Communications and Networks*, *12*(4), 358-365. https://doi.org/10.1109/JCN.2010.6388472

[28] Kim, H., Kim, C., Kim, J., Seo, M., Lee, S., & Lee, T .(2015) .A context aware cooperative communication method in wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, *11*(6), 357509. https://doi.org/10.1155/2015/357509