Journal of Soft Computing and Information Technology (JSCIT)
Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
Journal Homepage: jscit.nit.ac.ir
Volume 13, Number 4, Winter 2025, pp. 17-25
Received: 10/12/2024, Revised: 02/11/2025, Accepted: 02/20/2025

Optimizing Energy Consumption in Wireless Sensor Networks Using a Cluster Head Selection Algorithm

Fatemeh Kalhor[1], Vahid Haghighstdoost[2*]
1- Department of Computer Engineering, Shahed University, Tehran, Iran.
2*- Department of Computer Engineering, Shahed University, Tehran, Iran.
[1]fatemeh.kalhor@shahed.ac.ir, [2*]haghighatdoost@shahed.ac.ir

Corresponding author's address: Vahid Haghighatdoost, Faculty of Computer Engineering and Technology, Shahed University, Tehran, Iran.

Abstract- Wireless sensor networks, which consist of numerous sensor nodes deployed in a specific environment, have been the focus of extensive research for monitoring physical and environmental activities. The crucial component of a sensor node is its battery power supply. As these batteries cannot be easily recharged in complex environments, achieving optimal energy consumption is a significant challenge for applications requiring a long network lifetime. Various methods have been proposed to address this challenge. One of most commonly used methods, is clustering of nodes and aggregation their data, as well as hierarchical transmission of sensed data to the base station. In this study, three types of network topologies—1) one-level, 2) two-level with maintaining dependence on the first layer cluster, and 3) two-level without dependence on the first layer cluster —were simulated using three methods of cluster head selection: 1) random, 2) sorted, selecting nodes with higher energy , and 3) weight-oriented, based on the remaining energy of the nodes and the distance with other selected cluster heads. Selecting the optimal cluster head is an NP-complete algorithm, which entails high computational complexity for implementation. The simulation results demonstrate that selecting the cluster head based on the weight-oriented method in the assumed network types increases the network lifetime, reduces energy consumption, and prolongs the stability period, measured from network initiation to the first node failure.

Keywords- Wireless Sensor Network, Energy Consumption, Cluster Head.

مجله علمی رایانش نرم و فناوری اطلاعات
دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
صفحه مجله: jscit.nit.ac.ir
جلد ۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴، صفحه ۱۶-۲۵
دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۱، بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۲۳، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۲

بهینه‌سازی مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با استفاده از الگوریتم انتخاب سر خوشه

فاطمه کلهر[۱]، وحید حقیقت دوست*[۲]
۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران.
*۲- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران.
[1]fatemeh.kalhor@shahed.ac.ir, [2*]haghighatdoost@shahed.ac.ir

* نشانی نویسنده مسئول: وحید حقیقت دوست، تهران، دانشگاه شاهد، دانشکده فنی و مهندسی.

چکیده- در طول دهه‌های گذشته، شبکه‌های حسگر بی‌سیم به دلیل کاربردهای گسترده، توجه تحقیقاتی قابل توجهی را به خود جلب کرده‌اند. عنصر اصلی یک شبکه حسگر بی‌سیم، گره حسگر آن است. این گره‌ها با باتری‌هایی تغذیه می‌شوند که اغلب قابلیت شارژ مجدد ندارند و یا به علت مشکلات دسترسی به گره‌های حسگر در محیط‌های سخت، تعویض آنها پر هزینه است. بنابراین یکی از مهم‌ترین مسائل در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، بهینه‌سازی مصرف انرژی و به تبع آن افزایش طول عمر شبکه است. روش‌های مختلفی برای غلبه بر این چالش پیشنهاد شده است که در میان آنها، خوشه بندی گره‌ها و تجمیع و ارسال سلسله مراتبی داده‌های حس شده به ایستگاه پایه جهت پردازش، به عنوان یکی از متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله، سه نوع توپولوژی شبکه ۱) یک سطحی، ۲) دو سطحی با حفظ وابستگی به خوشه اول و ۳) دو سطحی بدون وابستگی به خوشه اول با استفاده از سه روش انتخاب سرخوشه ، پیاده‌سازی شده است. روش‌های انتخاب سرخوشه به صورت ۱)انتخاب تصادفی بر اساس پروتکل لیچ، ۲)مرتب شده، به ترتیب پر انرژی‌ترین گره و ۳)وزن محور، براساس ترکیب دو معیار انرژی باقی مانده گره‌ها و فاصله با سایر سرخوشه‌های منتخب، مفروض است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نمایانگر آن است که انتخاب سرخوشه بر اساس روش وزن محور پیشنهادی و استفاده از توپولوژی شبکه دو سطحی بدون وابستگی پیشنهادی باعث افزایش طول عمر شبکه، کاهش مصرف انرژی و افزایش دوره پایداری، با مفهوم فاصله زمانی شروع عملیات شبکه تا مرگ اولین گره حسگر، می‌شود.

واژه‌های کلیدی: شبکه حسگر بی‌سیم، مصرف انرژی، سرخوشه.

۱- مقدمه

هر یک از اجزای منطقی و فیزیکی شبکه حسگر بی‌سیم(WSN[۱]) برای کار کردن به انرژی نیاز دارند. به طور مثال گره‌های حسگر برای تجمیع و ارسال داده‌های حس شده خود از محیط مانند دما، رطوبت و حرکات، به ایستگاه پایه به مقدار مشخصی انرژی نیاز دارند. طول عمر هر گره حسگر، که به عنوان مدت زمان کار گره بدون نیاز به هیچ گونه مداخله خارجی مانند تعویض باتری تعریف می‌شود، بر روی طول عمر شبکه تاثیرگذار است[۱]. بر این اساس انتخاب گره مناسب به عنوان سرخوشه جهت تجمیع داده‌های دریافتی از سایر گره‌های درون خوشه و ارسال آنها به ایستگاه پایه، تأثیر بالقوه‌ای بر طول عمر شبکه حسگر بی‌سیم دارد. روش‌های مختلفی برای تعیین سرخوشه وجود دارد. در این مقاله سه روش انتخاب سرخوشه به صورت ۱) تصادفی طبق پروتکل لیچ[۲]، ۲) مرتب سازی گره‌ها بر اساس پارامتر انرژی باقی مانده و انتخاب پر انرژی‌ترین آنها به عنوان سرخوشه و یا ۳) انتخاب وزن محور سرخوشه بر اساس ترکیب دو معیار انرژی باقی‌مانده گره‌ها و پراکندگی آنها، در انواع شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. توپولوژی شبکه‌ها به صورت ۱) شبکه یک سطحی، ۲) شبکه دو

سطحی با حفظ وابستگی به خوشه اول، با محدودیت تشکیل خوشه لایه دوم از بین گره‌های خوشه لایه اول همان خوشه و ۳) شبکه دو سطحی بدون وابستگی به خوشه اول، با قابلیت پیوستن گره‌ها به سرخوشه‌های لایه دوم سایر خوشه‌های لایه اول، مفروض است.

یک شبکه حسگر بی‌سیم به دو صورت همگن و ناهمگن قابل تصور است که معیارهای مختلفی مانند قابلیت پردازش، ذخیره سازی و سنجش به منظور نمایش ناهمگونی آن وجود دارد. در شبکه‌های مفروض در این مقاله، گره‌ها از نظر انرژی اولیه دارای ناهمگونی هستند. به این صورت که گره‌های ساده (S) با انرژی اولیه E_0 وارد شبکه می‌شوند و در مقابل، انرژی اولیه گره‌های پیشرفته (X) مطابق رابطه (۱) است:

$$E_0(j) = E_0 * (1 + \alpha), \qquad for \quad j \in X \qquad (۱)$$

به صورتی که $\alpha > 0$ یک مقدار ثابت است که نشان دهنده ضریب انرژی اضافی بین گره‌های ساده و پیشرفته است. در این پیاده‌سازی $\alpha = 1$ در نظر گرفته شده است؛ در نتیجه گره‌های پیشرفته با انرژی اولیه دو برابر نسبت به گرهای ساده وارد شبکه می‌شوند.

به طور کلی، نماد انواع گره‌های مفروض در این مقاله در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: انواع گره‌ها.

نام گره	نماد گره
ساده	S
پیشرفته	X
مرده	D
زنده	$A = S \cup X - D$
معمولی	$N = S \cup X - C$
سرخوشه	C
سرخوشه لایه اول	$C1$
سرخوشه لایه دوم	$C2$

به منظور بررسی بهره‌وری شبکه‌های حسگر بی‌سیم معیارهای متعددی قابل شمارش است. معیار بهره‌وری در این مقاله افزایش طول عمر شبکه با کاهش تعداد گره‌های مرده ($|D|$) و افزایش مقدار انرژی باقی مانده (E_r) در کل گره های شبکه در مراحل تکرار شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. برای مثال چنانچه در روش‌های قدیمی‌تر(مانند پروتکل تصادفی) در مرحله تکرار k ام، p درصد از گره‌ها می‌میرند، در روش وزن محور پیشنهادی تلاش می‌شود در مرحله تکرار k ام، p' درصد از گره‌ها مرده باشند به‌طوری که $p' < p$ است و همچنین اگر در سایر روش‌ها در مرحله تکرار K، کل گره‌ها می‌میرند، در روش پیشنهادی تمام گره‌ها در مرحله $K' > K$ انرژی خود را از دست خواهند داد.

در این مقاله با استفاده از زبان برنامه نویسی متلب، کارایی پروتکل وزن محور پیشنهادی را اثبات و نتایج را از نظر انرژی باقی مانده و تعداد گره‌های مرده با الگوریتم‌های پایه مقایسه می‌کنیم. جدول ۴ پارامترها و مقادیر مورد استفاده برای شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول ۲: پارامترهای در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی.

پارامتر	مقدار
اندازه شبکه	$100\ X\ 100$
انرژی اولیه گره‌های ساده	$E_0(S) = 0.5$ J
تعداد گره‌ها	$n = 100$
انرژی دریافت و ارسال	$E_{TX/RX} = 50$ nJ/bit
حداکثر تعداد دورها	$r = 150$
اندازه داده	$k = 400$ bits
ضریب تجمیع داده	$m = 0.2$

هر گره برای ارسال داده‌های حس شده خود به گره بالا دست یعنی همان سرخوشه و یا ایستگاه پایه و همچنین برای دریافت داده‌های گره‌های درون خوشه خود و تجمیع آنها، مقدار انرژی مصرف می‌کند. مقدار انرژی مصرفی برای هر گره مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.

$$S(i) \cdot E = S(i) \cdot E - (E_{TX/RX} * (k + RB * m) * \mathrm{d}_i) \qquad (۲)$$
$$\mathrm{d}_i = \sqrt{(x_i - x_{CH})^2 - (y_i - y_{CH})^2}$$
$$for \quad i \in N$$

به طوری که RB مجموع اندازه داده‌های دریافتی و d_i فاصله اقلیدسی هر گره با سرخوشه(ایستگاه پایه) را نشان می‌دهد.

۲- توپولوژی شبکه‌های حسگر بی‌سیم

یکی از راهکارهای کاهش مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم توجه به توپولوژی شبکه و نحوه اتصال گره‌ها به یکدیگر است. از آنجا که در شبکه‌های حسگر، گره‌ها همچنان که اطلاعات را جمع‌آوری می‌نمایند و برای مرکز کنترل شبکه ارسال می‌کنند، در فرایند هدایت بسته‌های مربوط به سایر گره‌ها نیز مشارکت دارند. لذا نوع توپولوژی در یک شبکه حسگر میتواند بار روی گره‌های حسگر را متعادل نموده و طول عمر شبکه را افزایش دهد. همچنین

نتایج تجربی نشان داده است که محاسبات محلی یا پردازش داده‌ها انرژی‌ای معادل یک هزارم مقدار مورد نیاز برای ارسال یا دریافت تک بیت داده مصرف می‌کند[۲]. از این رو تجمیع داده‌ها توسط یک گره سرخوشه و ارسال داده‌های تجمیع شده به ایستگاه پایه به طور قابل توجهی باعث کاهش مصرف انرژی می‌شود. همچنین گره‌های سرخوشه در مقایسه با سایر گره‌ها، به دلیل دریافت اطلاعات از چندین گره دیگر و تجمیع آنها، متحمل مصرف انرژی بیشتری می‌شوند. به طور مثال در صورتی که گره سرخوشه K ، B بیت داده را از گره‌های درون خوشه خود جمع آوری نماید، در نهایت باید mK بیت داده را برای گره بالادستی خود ارسال نماید. ضریب m، پارامتر میزان تجمیع داده می‌باشد به طوری که $m \leq 1$ است. از آن‌جایی که ممکن است گره‌های مختلف اطلاعات مشابهی را حس کرده باشند لذا لزومی به باز ارسال اطلاعات تکراری به گره بالا دست نمی‌باشد و در نتیجه کاهش تعداد پیام‌های ارسال شده به ایستگاه پایه منجر به صرفه جویی در مصرف انرژی می‌شود. بنابراین تعیین تعداد سرخوشه‌های مناسب با توجه به تعداد گره‌های زنده ($|A|$) موجود در شبکه، باعث افزایش طول عمر شبکه می‌گردد.

حداکثر تعداد سرخوشه‌های انتخابی برای هر دور طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

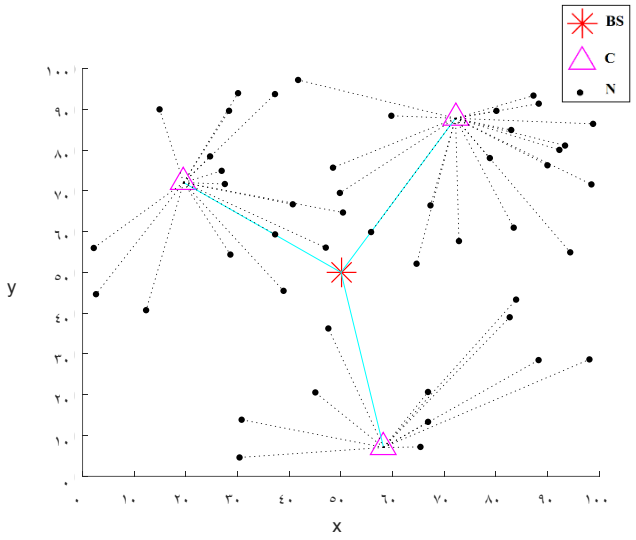
$$MaxCluster = \lfloor max\,(1, \gamma|A|) \rfloor \qquad (۳)$$

به طوری که ضریب $\gamma \in (0,1)$ تعیین می‌کند که باتوجه به تعداد گره‌های زنده در شبکه، چه تعداد گره برای سرخوشه شدن مناسب است. استفاده از این رابطه باعث می‌شود تا وجود حداقل یک سرخوشه، متناسب با تعداد گره‌های زنده، تضمین شود. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، مقدار پارامتر $\gamma = 0.2$ در نظر گرفته شده است. این انتخاب به صورت تجربی به دست آمده است.

۲-۱- توپولوژی شبکه یک سطحی

شبکه یک سطحی مفروض پروتکلی همانند پروتکل لیچ دارد. ابتدا شبکه بزرگ به خوشه‌های کوچک تقسیم می‌شود. گره‌هایی طبق پروتکل‌های انتخاب سرخوشه که در ادامه مقاله با آنها آشنا می‌شویم، برای دریافت داده از گره‌های داخل خوشه و ارسال آن به ایستگاه پایه به عنوان سرخوشه انتخاب می‌شوند. گره‌های سرخوشه انرژی بیشتری نسبت به سایر گره‌ها مصرف می‌کنند و انتخاب ثابت آنها منجر به اتلاف اولیه انرژی و مرگ زود هنگام آنها می‌شود. بنابراین به منظور افزایش طول عمر شبکه، سرخوشه‌ها (C) در هر دور مجددا انتخاب می‌شوند. بعد از مشخص شدن تمام سرخوشه‌ها، گره‌های معمولی(N) فاصله خود را تا تمام سرخوشه‌های موجود محاسبه می‌کنند و به خوشه‌ای که کمترین فاصله را با آن دارند می‌پیوندند. بعد از تشکیل خوشه‌ها، گره‌های درون خوشه داده‌های حس شده را به سرخوشه مربوطه ارسال می‌کنند و داده‌ها پس از تجمیع، آماده ارسال به ایستگاه پایه می‌شوند.

شکل ۱ نمونه‌ای از توپولوژی شبکه یک سطحی را نشان می‌دهد، به طوری که ستاره قرمز در مرکز شبکه نشان دهنده ایستگاه پایه(BS)، مثلث‌های بنفش سرخوشه‌ها (C) و نقاط سیاه شبکه، گره‌های N را نمایش می‌دهند.



شکل ۱: خوشه بندی یک سطحی گره‌های WSN.

۲-۲- توپولوژی شبکه دو سطحی با حفظ وابستگی به خوشه اول

در شبکه دو سطحی با حفظ وابستگی به خوشه اول پیشنهادی، شبکه بزرگ به دو لایه تقسیم می‌شود. به این صورت که ابتدا از بین تمام گره‌های موجود در شبکه، بر اساس پروتکل‌های انتخاب سرخوشه موجود و طبق رابطه (۳) تعدادی گره به عنوان سرخوشه‌های لایه اول($C1$) انتخاب می‌شوند و گره‌های معمولی(N) به سرخوشه‌ای که کمترین فاصله را با آن دارند می‌پیوندند و خوشه مربوطه را تشکیل می‌دهند. حال در صورتی که تعداد گره‌های معمولی موجود در یک خوشه بیشتر از چهار عدد باشد، مجدد از بین آنها گره‌هایی به عنوان سرخوشه لایه دوم($C2$) انتخاب می‌شوند و گره‌های معمولی در هر خوشه به $C2$ که کمترین فاصله را با آن دارند، می‌پیوندند و داده‌های حس شده خود را به آن ارسال می‌کنند. سرخوشه‌های لایه دوم نیز داده‌های خود و دادهای دریافتی از گره‌های معمولی خوشه خود را تجمیع و به سرخوشه لایه اول جهت آماده‌سازی و انتقال به ایستگاه پایه ارسال می‌کنند.

وجود چهار عدد گره در خوشه لایه اول جهت تشکیل لایه دوم طی شبیه‌سازی‌های متعدد به دست آماده است. بخشی از نتایج حاصل از شبیه‌سازی شبکه مفروض با تعداد مختلف گره موجود در خوشه‌های لایه اول در جدول ۳ آمده است که مطلوب بودن این انتخاب تجربی را به اثبات می‌رساند.

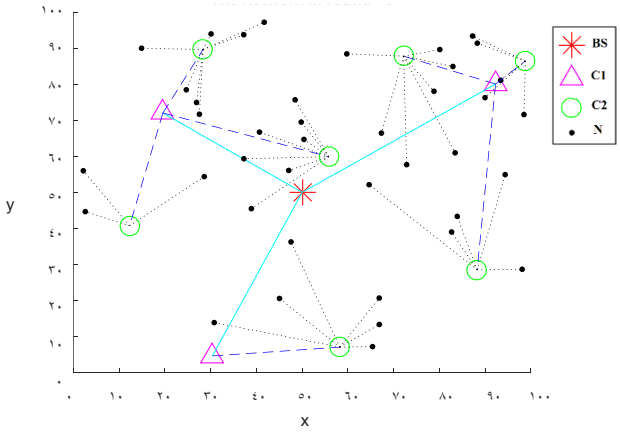
جدول ۳: عمر شبکه با تعداد مختلف گره موجود در خوشه لایه اول جهت تشکیل لایه دوم .

تعداد گره	عمر شبکه
۳	۱۳۰
۴	۱۳۱
۵	۱۲۸

از مزایای استفاده از شبکه دو سطحی می‌توان به این نکات اشاره کرد که:

- عملکرد شبکه را افزایش می‌دهد و کارایی شبکه را بهبود می‌بخشد.
- برای افزایش عملکرد گره‌های حسگر استفاده می‌شود.
- به کاهش بار انتقال از طریق تبادل اطلاعات در لایه‌های مختلف کمک می‌کند[۳].

شکل ۲ نمونه‌ای از طرح شبکه دو سطحی با حفظ وابستگی به خوشه اول را نشان می‌دهد، به طوری که مثلث‌های بنفش سرخوشه‌های $C1$، دایره‌های سبز رنگ سرخوشه‌های $C2$ و نقاط سیاه گره‌های N را نمایش می‌دهند.



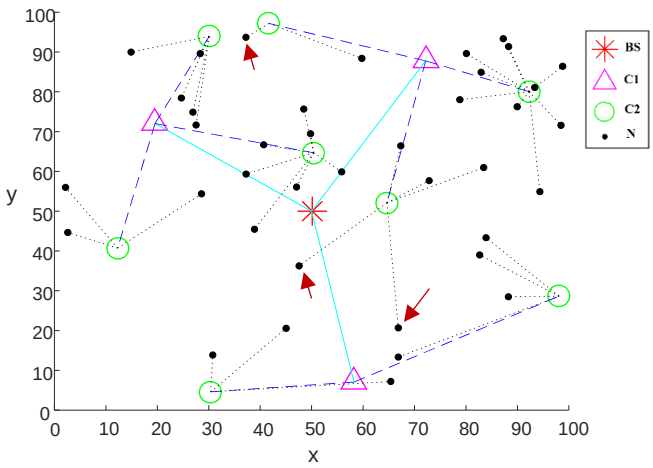
شکل ۲: خوشه بندی دو سطحی با حفظ وابستگی گره‌های WSN.

۲-۳- توپولوژی شبکه دو سطحی بدون وابستگی به خوشه اول

این شبکه که روش ابداعی ماست و تاثیر به سزایی در مصرف انرژی دارد، پروتکلی همانند شبکه دو سطحی با حفظ وابستگی به خوشه اول دارد، با این تفاوت که بعد از مشخص شدن سرخوشه‌های لایه دوم، گره‌های معمولی قابلیت پیوستن به هر کدام از سرخوشه‌های لایه دوم را بدون در نظر گرفتن خوشه لایه اول خود دارند. طبق پیاده‌سازی‌های انجام شده، ممکن است بعد از مشخص شدن سرخوشه‌های لایه دوم، گره‌ای فاصله کمتری با سرخوشه لایه دوم خوشه لایه اول دیگری داشته باشد و محدودیت انتخاب سرخوشه لایه دوم فقط از خوشه لایه اول خود باعث بیشتر شدن فاصله و در نتیجه مصرف انرژی بیشتر جهت ارسال داده‌های حس شده به آن سرخوشه شود.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که توپولوژی دو سطحی بدون وابستگی پیشنهادی با کاهش فاصله گره‌ها تا سرخوشه، به طور قابل توجهی مصرف انرژی را کاهش می‌دهد و از سایر توپولوژی‌های معرفی شده از نظر مصرف انرژی بهینه‌تر عمل می‌کند.

شکل ۳ نمونه‌ای از طرح شبکه دو سطحی بدون وابستگی به خوشه اول را نشان می‌دهد، به طوری که مثلث‌های بنفش سرخوشه‌های $C1$، دایره‌های سبز رنگ سرخوشه‌های $C2$ و نقاط سیاه گره‌های N را نمایش می‌دهند. همچنین در این شکل چند نمونه از گره‌هایی که در خوشه‌بندی اولیه متعلق به خوشه‌ای دیگر هستند ولی در خوشه بندی لایه دوم، به نزدیکترین سرخوشه $C2$ متصل شده‌اند، با پیکان قرمز رنگ مشخص شده است.



شکل ۳: خوشه بندی دو سطحی بدون وابستگی گره‌های WSN.

۳- پروتکل های انتخاب سر خوشه

طبق مطالعات انجام شده، ۷۸ درصد از کل انرژی در حسگرها به منظور انتقال داده‌ها مصرف می‌شود [۴]، در نتیجه انتخاب گره‌های مناسب به عنوان سرخوشه جهت تجمیع و انتقال داده‌ها به ایستگاه پایه، روشی مؤثر جهت کاهش مصرف انرژی و بهبود ذخیره‌سازی انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌باشد. در این مقاله سه پروتکل انتخاب سرخوشه معرفی می‌گردد که نتایج حاصل از پیاده‌سازی برتری پروتکل وزن محور را به اثبات می‌رساند.

۳-۱- پروتکل تصادفی

یکی از رایج ترین پروتکل های مورد استفاده، پروتکل لیچ است. در این پروتکل گره‌های سرخوشه در هر دور به صورت تصادفی، بر اساس مقدار آستانه $T(n)$ انتخاب می‌شوند. به این صورت که هر گره در شبکه یک مقدار تصادفی بین $(0,1)$ را انتخاب می‌کند. گره‌ای که مقدار تصادفی آن کمتر از حد آستانه $T(n)$ باشد به عنوان سرخوشه برای آن دور خاص انتخاب می‌شود. مقدار آستانه طبق رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$T(n) = \begin{cases} \dfrac{p}{1 - p\left[r \bmod \left(\frac{1}{p}\right)\right]} & \text{if} \quad n \in G \\ 0 \qquad otherwise \end{cases} \qquad (۴)$$

به طوری که p احتمال انتخاب هر گره به عنوان سرخوشه را بیان می‌کند، r نشان دهنده تعداد دورها و G مجموعه گره‌هایی را نشان می‌دهد که به عنوان سرخوشه در دور $1/p$ انتخاب نشده‌اند[۵].

توجه به این نکته مهم است که که هرچه تعداد مراحل تکرار بیشتر می‌شود احتمال سرخوشه شدن گره‌ای که تا به حال سرخوشه نشده است، بیشتر می‌شود.

کل انرژی(ژول) موجود در مجموع گره‌های انواع شبکه‌های مفروض با استفاده از پروتکل تصادفی انتخاب سرخوشه در دورهای خاص توسط جدول ۴ قابل مقایسه است. شبکه مفروض دارای تعدادی گره معمولی و پیشرفته است که در ابتدا مجموع انرژی شبکه، ۵۵ ژول است.

با مقایسه مقادیر جدول ۴ به این نتیجه می‌رسیم که در پروتکل تصادفی انتخاب سرخوشه، استفاده از شبکه دو سطحی بدون وابستگی به خوشه اول باعث افزایش انرژی باقی‌مانده گره‌ها در هر دور از اجرای شبکه و در نتیجه افزایش طول عمر شبکه می‌گردد. طول عمر شبکه مدت زمانی است که تمام گره‌های شبکه می‌میرند.

جدول ۴: انرژی کل باقی مانده در شبکه، در پروتکل تصادفی.

انواع شبکه/ دور	یک سطحی	دو سطحی با حفظ وابستگی	دو سطحی بدون وابستگی
۵۰	۱۴.۴۶	۲۳.۱۲	۲۵
۷۵	۲.۷۶	۹.۴۶	۱۲.۰۵
۱۰۰	۰	۱.۸۷	۳.۵۷
عمر شبکه	۹۳	۱۱۸	۱۲۱

همچنین تعداد گره‌های مرده در انواع شبکه های ذکر شده با استفاده از پروتکل تصادفی انتخاب سرخوشه در دورهای مشخصی از شبکه توسط جدول ۵ قابل مقایسه است.

جدول ۵: تعداد گره‌های مرده شبکه در پروتکل تصادفی.

انواع شبکه/ دور	یک سطحی	دو سطحی با حفظ وابستگی	دو سطحی بدون وابستگی
۵۰	۲۳	۶	۳
۷۵	۶۲	۳۵	۲۶
۱۰۰	۱۰۰	۷۹	۶۷

در دور ۱۰۰ام از تکرار شبیه‌سازی، تعداد گره‌های مرده در شبکه دو سطحی بدون وابستگی به خوشه اول برابر ۶۷ می‌باشد، که در مقایسه با شبکه دو سطحی با حفظ وابستگی به خوشه اول شاهد افزایش ۱۲٪ تعداد گره‌های زنده موجود در شبکه هستیم. همچنین در شبکه یک سحطی در دور ۱۰۰ از اجرای برنامه، ۱۰۰٪ از گره‌ها می‌میرند که نسبت به شبکه دو سطحی بدون وابستگی به خوشه اول، تعداد گره‌های زنده موجود در شبکه ۳۳٪ افزایش یافته است.

در حالی که لیچ درجاتی از برتری را نشان می‌دهد چرا که طول عمر شبکه را به دلیل خوشه‌بندی تطبیقی افزایش می‌دهد و همچنین کاملاً توزیع شده است زیرا نیازی به دانش در مورد کل شبکه ندارد، اما با محدودیت‌هایی نیز همراه است، به عنوان مثال با توجه به مفهوم اعداد تصادفی برای انتخاب سرخوشه، شانس تبدیل شدن گره‌ها به سرخوشه محفوظ نیست و در نتیجه کارایی شبکه از نظر انرژی تحت تأثیر قرار می‌گیرد[۶] و بعضاً در شبیه‌سازی‌ها شاهد توقف اجرای برنامه در دورهای پایین به علت پیدا نشدن سرخوشه هستیم. پروتکل های مختلفی در جهت بهبود عملکرد پروتکل لیچ از نظر مصرف انرژی پیشنهاد شده است که در ادامه به معرفی تعدادی از این پروتکل‌های پایه می‌پردازیم.

I. لیچ-سی[۳]

لیچ-سی یک پروتکل خوشه‌بندی متمرکز است. در این پروتکل، اطلاعات مکان و مقدار انرژی باقی‌مانده تمام گره‌ها در ابتدای هر دور به ایستگاه پایه ارسال می‌شود. سپس ایستگاه پایه میانگین انرژی همه گره‌ها را محاسبه می‌کند و گره‌هایی با انرژی باقی‌مانده بالاتر از انرژی میانگین به عنوان کاندید سرخوشه شدن در نظر گرفته می‌شوند. سپس ایستگاه پایه با استفاده از یک روش جستجوی تصادفی مبتنی بر مسیر(آنیلینگ شبیه‌سازی شده[۴])، سرخوشه‌ها را از میان گره‌های کاندید انتخاب می‌کند. این پروتکل انتخاب تعداد سرخوشه مورد نیاز برای شبکه را تضمین می کند[۷].

II. پگاسیس[۵]

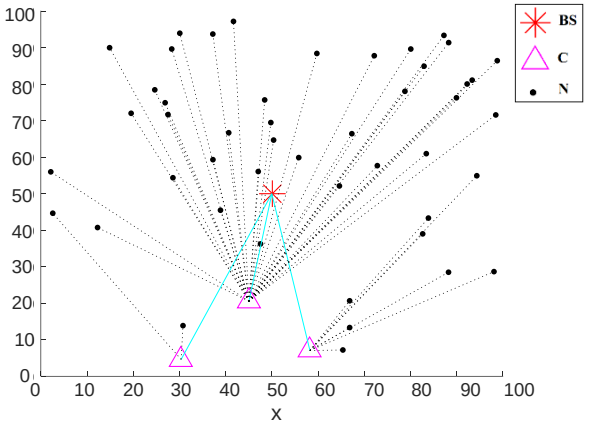
این پروتکل برای افزایش طول عمر شبکه، از مفهوم زنجیره‌سازی استفاده می‌کند. در این پروتکل، زنجیره‌ای در میان گره‌های حسگر تشکیل می‌شود که از گره‌ای که در دورترین فاصله قرار دارد، شبیه به رویکرد حریصانه شروع می‌شود. سپس یک گره، بر اساس انرژی باقی‌مانده، به عنوان گره رهبر به منظور انتقال داده به ایستگاه پایه انتخاب می‌شود. گره‌های حسگر داده‌ها را جمع‌آوری می‌کنند و آن‌ها را به نزدیک‌ترین گره ارسال می‌کنند. زنجیره ادامه می‌یابد تا گره رهبر اطلاعات جمع آوری شده را دریافت کرده و آن را به ایستگاه پایه ارسال کند[۸].

III. تین[۶]

در پروتکل تین، سرخوشه‌ها دو مقدار HT و ST را برای اعضای خود پخش می‌کنند تا کمیت انتقال داده را کنترل کنند. تنها زمانی که مقدار داده حس شده از مقدار HT بیشتر باشد، گره‌ها داده‌های حس شده را در دور جاری به سرخوشه ارسال می‌کنند. سپس، داده حس شده در یک متغیر داخلی SV ذخیره می‌شود. زمانی که مقدار داده حس شده بعدی اختلافی بیشتر از مقدار یا مساوی ST با SV داشته باشد، آن داده ارسال می‌شود. ST می‌تواند انتقال مکرر داده‌ها را با در نظر نگرفتن تغییرات اندک کاهش می‌دهد [۹].

۳-۲- پروتکل مرتب‌سازی در انتخاب سر خوشه

در این روش پیاده سازی شده، ابتدا گره‌ها بر اساس انرژی باقی مانده خود مرتب‌سازی شده و سپس گره‌هایی که بیشترین انرژی را دارند به عنوان سرخوشه انتخاب می‌شوند. یکی از نقاط ضعف این پروتکل، در نظر نگرفتن مختصات گره‌های پر انرژی و پراکندگی آنها در کل شبکه است؛ به همین دلیل ممکن است گره‌هایی با فواصل نزدیک به یکدیگر به عنوان سر خوشه انتخاب شوند و گره‌های دورتر مجبور شوند انرژی زیادی برای انتقال داده‌های خود به آنها صرف کنند؛ به طور مثال، در شکل ۴ سه گره پر انرژی که به عنوان سرخوشه انتخاب شده‌اند، فاصله کمی با یکدیگر دارند و اکثر گره‌های معمولی در فواصل دوری نسبت به آنها قرار دارند.



شکل ۴: استفاده از پروتکل مرتب‌سازی برای خوشه‌بندی WSN.

مقادیر انرژی کل شبکه و تعداد گره‌های مرده در دورهای خاص حاصل از شبیه‌سازی انواع شبکه‌های یاد شده توسط پروتکل مرتب سازی، به ترتیب در جدول ۶ و جدول ۷ قابل مشاهده است.

جدول ۶: انرژی کل باقی مانده در شبکه، در پروتکل مرتب‌سازی.

انواع شبکه/ دور	یک سطحی	دو سطحی با حفظ وابستگی	دو سطحی بدون وابستگی
۵۰	۶.۹۸	۹.۱۳	۱۰.۶۶
۷۵	۰	۰.۰۶	۰.۱۲
۱۰۰	۰	۰	۰
عمر شبکه	۷۵	۷۶	۷۷

جدول ۷: تعداد گره‌های مرده شبکه در پروتکل مرتب‌سازی.

انواع شبکه/ دور	یک سطحی	دو سطحی با حفظ وابستگی	دو سطحی بدون وابستگی
۵۰	۲۹	۳۰	۲۸
۷۵	۱۰۰	۹۶	۸۲
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

به دلیل رابطه مستقیم فاصله گره‌ها تا سرخوشه و مصرف انرژی، طبق رابطه (۲)، استفاده از پروتکل مرتب‌سازی برای خوشه‌بندی گره‌ها باعث افزایش انرژی مصرفی کل و در نتیجه کاهش طول عمر

شبکه می‌شود. به طوری که در دور ۱۰۰ از تکرار شبیه‌سازی ۱۰۰٪ از گره‌ها در انواع شبکه‌های یاد شده می‌میرند. به منظور رفع محدودیت پروتکل مرتب‌سازی، پروتکل وزن محور پیشنهاد گردید.

۳-۳- پروتکل وزن محور

پروتکل وزن محور روش پیشنهادی ماست و سرخوشه‌ها را مبتنی بر چند پارامتر انتخاب می‌کند. این پروتکل از پروتکل مرتب‌سازی الهام گرفته شده است و در آن پر انرژی‌ترین گره به عنوان اولین سرخوشه انتخاب می‌شود. برخلاف روش مرتب‌سازی که تنها اولویت گره‌ها برای سرخوشه شدن، داشتن انرژی بالا بود، در اینجا علاوه بر داشتن انرژی بالا، فاصله با سایر سرخوشه‌های انتخاب شده، میتواند اولویت گره‌ها را جابه‌جا کند. چرا که این معیار باعث می‌شود، گره‌های سرخوشه در ناحیه پوشش، پراکنده شوند و گره‌های با انرژی بالا که نزدیک به هم هستند، همزمان سرخوشه نشوند. لذا به هر گره وزنی(w) بر اساس انرژی باقی‌مانده و فاصله تا سرخوشه(های) منتخب قبلی اختصاص داده می‌شود و گره‌ای که بیشترین وزن را داشته باشد به عنوان سرخوشه بعدی برگزیده شده و به مجموعه C اضافه می‌شود. تابع محاسبه وزن هر گره در رابطه (۵) آورده شده است.

$$w_i = E_r(i) * \prod_{j=1}^{|C|} \left(\sqrt{\left(x_i - x_{c_j}\right)^2 + \left(y_i - y_{c_j}\right)^2} \right), \quad for \quad i \in N \qquad (۵)$$

طبق رابطه فوق، ابتدا حاصل ضرب فاصله اقلیدسی هر گره تا سایر سرخوشه‌ها محاسبه می‌شود، سپس این مقدار در انرژِی باقی‌مانده گره ضرب شده و وزن گره محاسبه می‌گردد.

مقادیر انرژی کل شبکه و تعداد گره‌های مرده، حاصل از شبیه سازی شبکه‌های مفروض توسط پروتکل وزن محور ، به ترتیب در جدول ۸ و جدول ۹ آورده شده است.

جدول ۸: انرژی کل باقی مانده در شبکه، در پروتکل وزن محور.

انواع شبکه/ دور	یک سطحی	دو سطحی با حفظ وابستگی	دو سطحی بدون وابستگی
۵۰	۱۵.۷۶	۲۴.۶۳	۲۵.۴۳
۷۵	۲.۴۱	۱۱.۵۵	۱۲.۰۷
۱۰۰	۰	۳.۲۲	۳.۲۹
عمر شبکه	۹۴	۱۲۹	۱۳۰

پروتکل وزن محور در بین تمام توپولوژی‌های شبکه باعث افزایش طول عمر شبکه می‌شود. همچنین در مقایسه با دو پروتکل تصادفی و مرتب سازی تعداد گره‌های مرده کمتری در هر دور ایجاد می‌شود.

جدول ۹: تعداد گره‌های مرده شبکه در پروتکل وزن محور.

انواع شبکه/ دور	یک سطحی	دو سطحی با حفظ وابستگی	دو سطحی بدون وابستگی
۵۰	۴	۰	۰
۷۵	۴۹	۱۲	۶
۱۰۰	۱۰۰	۴۹	۴۰

۴- نتیجه گیری

به دلیل محدودیت‌های منبع تغذیه گره‌های حسگر، یکی از مهم ترین مسائل در شبکه های حسگر بی‌سیم مسأله مدیریت مصرف انرژی و در نتیجه افزایش طول عمر شبکه است. یکی از روش‌های کارآمد، استفاده از پروتکل انتخاب سرخوشه مناسب و بهینه‌سازی توپولوژی شبکه است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی افزایش دوره پایداری، کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه را در هنگام استفاده از پروتکل وزن محور پیشنهادی نسبت به دو پروتکل تصادفی و مرتب‌سازی به اثبات می‌رساند.

جدول ۱۰ انرژی باقی‌مانده در انواع شبکه‌های مفروض را هنگام استفاده از سه توپولوژی شبکه معرفی شده در دور ۲۵ از اجرای شبکه نشان می‌دهد.

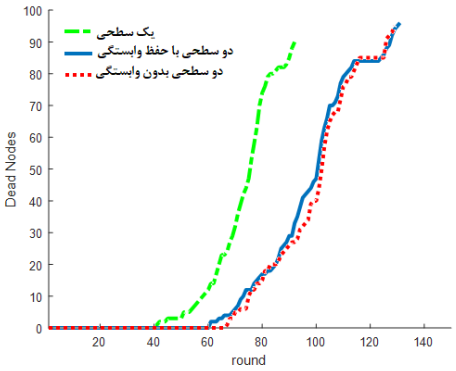
جدول ۱۰: مقایسه انرژی کل باقی مانده در انواع شبکه.

روش انتخاب سر خوشه / توپولوژی شبکه	تصادفی	مرتب سازی	وزن محور
یک سطحی	۲۶	۲۵	۳۴.۶۶
دو سطحی با حفظ وابستگی	۳۳.۸۳	۲۷.۵	۳۹.۷۷
دو سطحی بدون وابستگی	۳۹	۳۳.۰۳	۴۰.۳۷

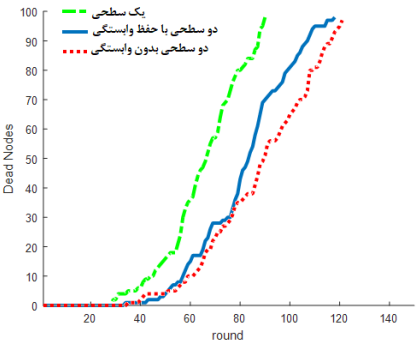
با استناد به مقادیر جدول فوق، استفاده از پروتکل وزن محور و همچنین توپولوژی شبکه دو سطحی بدون وابستگی به خوشه اول باعث کاهش مصرف انرژی میگردد.

شکل ۵ نمودار تعداد گره‌های مرده را برای سه پروتکل شبکه هنگام

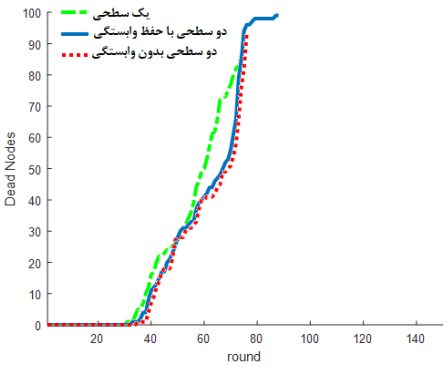
شبیه‌سازی آنها با استفاده از انواع توپولوژی‌های معرفی شده نشان می‌دهد؛ به طوری که نمودار سبز توپولوژی شبکه یک سطحی، نمودار آبی رنگ شبکه دو سطحی با حفظ وابستگی به خوشه اول و نمودار قرمز شبکه دو سطحی بدون وابستگی به خوشه اول را نشان می‌دهند. با توجه به کاهش سطح زیر نمودار هنگام استفاده از توپولوژی شبکه دو سطحی بدون وابستگی، بهبود بهره‌وری شبکه از منظر کاهش تعداد گره‌های مرده هنگام استفاده از این توپولوژی اثبات می‌شود. همچنین بر اساس نقطه شروع نمودارها، استفاده از این توپولوژی باعث افزایش دوره پایداری می‌شود.



الف) پروتکل وزن محور



ب) پروتکل تصادفی

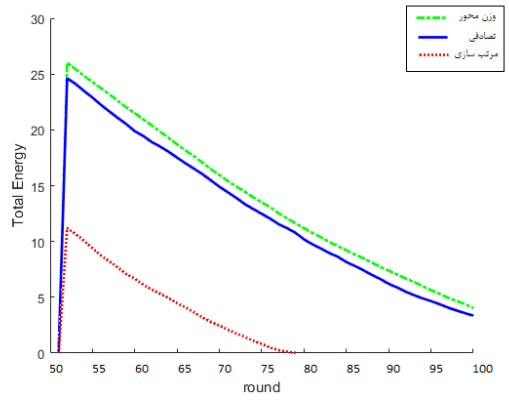


ج) پروتکل مرتب سازی

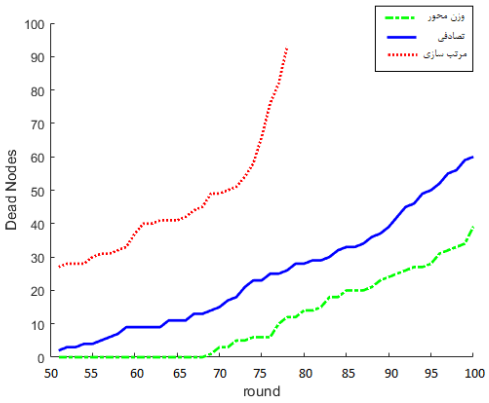
شکل ۵: مقایسه تعداد گره‌های مرده در پروتکل‌های مختلف.

به منظور نمایش دقیق‌تر بهینه بودن پروتکل وزن محور نسبت به دو پروتکل تصادفی و مرتب‌سازی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی این پروتکل‌ها در دورهای ۵۰ الی ۱۰۰ از اجرای شبکه در شکل ۶ و شکل ۷ آورده شده است.

شکل ۶ انرژی باقی‌مانده انواع شبکه را در توپولوژی دو سطحی بدون وابستگی به خوشه اول نشان می‌دهد. به طوری که نمودار سبز رنگ پروتکل وزن محور، نمودار آبی پروتکل تصادفی و نمودار قرمز پروتکل مرتب‌سازی را نشان می‌دهد.



شکل ۶: مقایسه انرژی باقی‌مانده انواع شبکه در توپولوژی دو سطحی بدون وابستگی.



شکل ۷: مقایسه تعداد گره‌های مرده انواع شبکه در توپولوژی دو سطحی بدون وابستگی.

با توجه به شکل ۶ و افزایش سطح زیر نمودار پروتکل وزن‌محور استفاده از این پروتکل باعث افزایش انرژی باقی‌مانده می‌شود. همچنین با توجه به شکل ۷، که تعداد گره‌های مرده شبکه‌ها را در توپولوژی دو سطحی بدون وابستگی در دورهای ۵۰ الی ۱۰۰ نشان می‌دهد، استفاده از این پروتکل باعث کاهش تعداد گره‌های مرده و در مجموع افزایش طول عمر شبکه می‌شود.

در مجموع استفاده از تابع وزن‌دهی گره‌ها برای افزایش احتمال سرخوشه شدن در این مقاله ایده‌ای ابتکاری است که ضمن انتخاب گره‌های با انرژی بالاتر به عنوان سرخوشه، به پراکندگی این گره‌ها در محدوده پوشش حسگرها هم توجه می‌کند. این الگوریتم که در حال حاضر به صورت مرکزی است با ارائه سازوکاری قابل پیاده‌سازی، و تعریف پیام‌های مناسب برای تبادل حالت گره‌ها، قابل تبدیل به یک الگوریتم توزیع شده نیز می‌باشد.

مراجع

[1] Đ. Banđur, B. Jakšić, M. Banđur and S. Jović, "An analysis of energy efficiency in Wireless Sensor Networks (WSNs) applied in smart agriculture", Computers and Electronics in Agriculture, pp. 500-507, 2019.

[2] O. khalaf, M. Abdulsahib, "Energy Efficient Routing and Reliable Data Transmission Protocol in WSN". Journal of International Center for Scientific Research and Studies, Vol.12, No.3, November 2020.

[3] P.Sultana, H.Zeeshan, "A Review on Cross-Layer Design Approach in WSN by Different Techniques", Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal Vol. 5, No. 4, pp.741-754 ,2020.

[4] S.Tyagi, N.Kumar, "A systematic review on clustering and routing techniques based upon LEACH protocol for wireless sensor networks", Journal of Network and Computer Applications, Vol.36, No.2, pp.623-645, March 2013.

[5] S. Rani, "Network adaptive self-configuring multi-mode LEACH protocols for hierarchical WSN", Third International Conference on Communication, 2022.

[6] N. S. Karan Singh ،"QoS-Based Energy-Efficient Protocols for Wireless Sensor Network". Journal of Sustainable computing,2021.

[7] Y.Adnan, A.Faiza, H.Shahzaib, "Performance Comparison of Various LEACH Protocols in Wireless Sensor Networks", 9 IEEE 15th International Colloquium on Signal Processing & its Applications, 8 -9 March 2019.

[8] Sh.Misra, R.Kumar, "An Analytical Study of LEACH and PEGASIS protocol in Wireless Sensor Network", International Conference on Innovations in information Embedded and Communication Systems (ICIIECS), 2017.

[9] Y.Ge, Sh.Wang, J.Ma, "Optimization on TEEN routing protocol in cognitive wireless sensor network", Ge et al. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2018.

پاورقی‌ها:

[1] Wireless Sensor Networks

[2] LEACH: Low-energy adaptive clustering hierarchy

[3] LEACH-C: LEACH Centralized

[4] Simulated Annealing

[5] PEGASIS

[6] TEEN: Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network