

بهینه سازی انتخاب گره های سرشاخه در شبکه های حسگر بیسیم از طریق تئوری گراف

ابوالفضل مشیدی^۱، عبدالرضا رسولی کناری^۲، محبوبه شمسی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی قم، a.moshayyedy@gmail.com

۲. استادیار دانشگاه صنعتی قم، rasouli@qut.ac.ir

۳. استادیار دانشگاه صنعتی قم، shamsi@qut.ac.ir

چکیده

در دهه اخیر مبحث جدیدی با نام شبکه های حسگر بیسیم معرفی و تحقیق شده است. این شبکه ها از حسگرهایی تشکیل می شوند که به صورت بیسیم توانایی ارسال داده دارند و به آن ها گره گفته می شود. مدیریت انرژی در شبکه های حسگر بیسیم بسیار حائز اهمیت است. به منظور کاهش میزان مصرف انرژی در این شبکه ها، پروتکل های مسیریابی زیادی ارائه شده اند که با ارائه مسیریابی بهتر سعی کرده اند که مصرف انرژی در این شبکه ها را کاهش دهند. یکی از بهترین روش ها که به کاهش مصرف انرژی کمک می کند، خوشه بندی میان گره ها است. یکی از بزرگ ترین چالش های این روش ها نحوه انتخاب گره سرخوشه در هر خوشه است؛ زیرا عدم انتخاب صحیح گره های سرخوشه در خوشه ها می تواند به عدم توازن مصرف انرژی در گره ها منجر شود و در نتیجه بر اثر تمام شدن باتری بعضی از گره ها عمر کلی شبکه کاهش پیدا می کند. در این مقاله روش جدیدی برای انتخاب گره های سرخوشه بر اساس تئوری گراف ارائه می شود. در این روش بین گره های موجود در شبکه حسگر بیسیم یک گراف تشکیل می شود و در این مقاله رابطه ای ارائه می شود که می توان برای ارتباطات بین گره ها، وزن در نظر گرفت و با استفاده از آن مسیر بهینه برای ارسال داده با کمترین مصرف را یافت و مصرف انرژی در شبکه را متوازن کرد. شبیه سازی این روش نشان می دهد که علاوه بر کاهش مصرف انرژی، باعث می شود که مصرف انرژی در گره های شبکه متوازن شده و گره های موجود در شبکه، متوازن با یکدیگر، از انرژی باتری خود استفاده کنند و به این طریق طول عمر شبکه حسگر بیسیم افزایش پیدا می کند.

کلمات کلیدی: شبکه حسگر بیسیم؛ خوشه؛ گره سرخوشه؛ گراف

۱. مقدمه

شبکه های حسگر بیسیم در سال های اخیر به طور گسترده به منظور کاربردهای نظامی، پزشکی، نظارت بر محیط زیست، نظارت بر سیستم حمل و نقل و... استفاده می شود. مهم ترین چالش های شبکه های حسگر بیسیم، مدیریت مصرف انرژی، مقیاس پذیری^۱ و مدیریت صحیح استفاده از منابع است [۱]. هر شبکه حسگر بیسیم شامل تعدادی گره حسگر^۲ و

^۱ Scalability
^۲ Sensor Nodes

یک ایستگاه پایه (BS)^۴ است. گره‌های حسگر، توانایی گرفتن اطلاعات از محیط، پردازش اطلاعات و ارسال و دریافت اطلاعات با دیگر گره‌ها و یا ایستگاه پایه را دارند. نقاط مثبت شبکه‌های حسگر بیسیم، هزینه کم استفاده و نصب این شبکه‌ها، راحتی در پخش گره‌ها در محیط و توانایی تحمل خطای بالای آن‌ها است. در این شبکه‌ها حسگرها اطلاعات موردنظر را از محیط جمع‌آوری کرده و به سمت ایستگاه پایه ارسال می‌کنند.

در شبکه‌های حسگر بیسیم، گره‌های حسگر به سه طریق در محیط پراکنده می‌شوند: محل از پیش تعیین‌شده – در این حالت گره‌ها به‌صورت از پیش تعیین‌شده در محیط قرار گرفته و مسیر ارسال داده‌های آن‌ها از پیش مشخص است. پخش تصادفی – در این حالت به دلیل عدم دسترسی راحت به محل موردنظر، گره‌ها به‌صورت تصادفی در محل موردنظر پخش می‌شوند. گره‌های حسگر متحرک – این حسگرها در مکان‌هایی استفاده می‌شوند که گره‌ها از طریق عوامل خارجی (مانند آب، باد، بدن انسان یا جانوران و...) می‌توانند جابجا شوند.

از آنجاکه تجدید انرژی و شارژ مجدد باتری گره‌ها کاری پرهزینه یا سخت یا غیرممکن است، استفاده بهینه از انرژی در جهت افزایش عمر شبکه مهم‌ترین اهداف موردنظر است. در شبکه‌های حسگر بیسیم انرژی گره‌ها از طریق پردازش یا ارسال و یا دریافت اطلاعات مصرف می‌شود. یکی از مؤثرترین راه‌های کاهش مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بیسیم، استفاده از روش‌های خوشه‌بندی است. در این روش شبکه به تعدادی گروه به نام خوشه تقسیم می‌شوند. سپس هر گره اطلاعات خود را به‌جای ارسال به گره ایستگاه پایه، به گره سرخوشه که نزدیک‌تر است و انرژی کمتری مصرف می‌کند، ارسال می‌کند.

۲. پیشینه تحقیق

مقاله [۲] اولین مقاله شناخته‌شده‌ای است که روش خوشه‌بندی را پیشنهاد می‌کند. در این روش عملکرد شبکه به دو بخش تقسیم می‌شود به نام‌های زمان پیکربندی^۵ و زمان حالت ثابت^۶. در زمان پیکربندی، از بین گره‌های حسگر، گره‌های سرخوشه انتخاب شده و بر اساس آن زمان‌بندی ارسال داده بین گره‌های مختلف برای تمام گره‌ها ارسال می‌شود. در زمان حالت ثابت، بر اساس زمان‌بندی، گره‌های حسگر اطلاعات خود را برای گره سرخوشه ارسال، سپس گره سرخوشه اطلاعات دریافتی را به همراه اطلاعات خود، باهم تجمیع^۷ کرده و به سمت ایستگاه پایه ارسال می‌کند. در این روش در هر دور^۸، گره‌ها، خودشان تصمیم می‌گیرند که در این دور گره سرخوشه باشند یا خیر. این تصمیم بر اساس پارامتر ورودی p به‌عنوان درصد موردنظر تعداد گره سرخوشه، و همین‌طور بر اساس تعداد دفعاتی که هر گره سرخوشه بوده است انجام می‌گیرد. هر گره n یک عدد تصادفی انتخاب می‌کند. اگر عدد تصادفی از مقدار آستانه^۹ $T(n)$ کمتر بود، این گره به‌عنوان سرخوشه انتخاب می‌شود. مقدار $T(n)$ از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

^۴Base Station

^۵Setup Phase

^۶Steady State Phase

^۷Aggregate

^۸Round

^۹Threshold

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

در رابطه (۱) عدد مقدار P درصد مورد نظر تعداد گره سرخوشه بین صفر و یک است. مقدار r شماره دور مورد نظر و G مجموعه گره‌هایی است که در $\frac{1}{P}$ دور گذشته گره سرخوشه نبوده‌اند.

مشکل اصلی موجود در این روش این است که اگرچه این روش با گردش گره‌های سرخوشه سعی می‌کند که مصرف باتری در شبکه را بین گره‌ها تقسیم و به کاهش میزان باتری باقیمانده بین تمام گره‌ها تناسب ببخشد، ولی این روش به مقدار باقیمانده باتری هر گره توجه ندارد و در نتیجه در مصرف انرژی بین گره‌ها عدم توازن انرژی به وجود می‌آید. همچنین در این روش به دلیل اینکه گره‌های سرخوشه مستقیماً اطلاعات خود را برای ایستگاه پایه ارسال می‌کنند، مصرف انرژی در گره‌هایی که از ایستگاه پایه دور هستند بیشتر از مصرف انرژی در دیگر گره‌ها است.

در روش Modified LEACH [۳] سعی در ارتقا روش LEACH شده است. این کار با ارائه روش بهتری برای انتخاب گره‌های سرخوشه و همین‌طور زمان‌بندی ارسال بهتر انجام می‌شود تا گره‌های سرخوشه‌ای که در مناطق شلوغ قرار دارند بیشتر از بقیه گره‌های سرخوشه اطلاعات ارسال نکنند.

در [۴] با ارتقا روش LEACH روشی ارائه شده است بانام NR-LEACH که با استفاده از آن، طول عمر شبکه ارتقا یافته است. در این روش، از یک رابطه استفاده می‌شود که به هر گره یک امتیاز^{۱۰} اختصاص می‌دهد که این امتیاز بر اساس هزینه ارسال اطلاعات میان دو گره و همین‌طور تعداد ارتباطات با دیگر گره‌ها تخصیص داده می‌شود. این روش به دلیل تکرار رابطه به صورت همگرایی در دوره‌های مختلف، برای استفاده در شبکه‌های متحرک مناسب نیست و نمی‌تواند حرکت گره‌ها در شبکه را تحمل کند.

در [۵] روشی به نام MODLEACH ارائه شده است. در این روش، الگوریتم جدیدی برای انتخاب گره‌های خوشه ارائه شده است تا عمر شبکه افزایش پیدا کند. این الگوریتم، گره سرخوشه‌ای انتخاب می‌شود و به عنوان گره سرخوشه باقی می‌ماند تا زمانی که انرژی باقیمانده آن از حد آستانه مورد نظری کمتر شود. سپس عمل انتخاب گره سرخوشه مجدداً شروع می‌شود تا گره جدیدی جایگزین گره سرخوشه قبلی گردد. این روش برای انتخاب گره‌های سرخوشه مانند روش LEACH عمل می‌کند. این عمل به این دلیل انجام شده است تا میزان انرژی مصرفی سربار در هر دور کاهش پیدا کند. مشکل این روش این است که گره‌ها برای اینکه بدانند چه زمانی انتخاب فرایند گره سرخوشه شروع می‌شود، گیرنده خود را باید همیشه در حالت آماده نگه دارد.

در [۶] روشی به نام LEACH-CC ارائه شده است که انتخاب گره‌های سرخوشه در ایستگاه پایه انجام می‌گیرد. این روش با تلفیق روش مبتنی بر عدد تصادفی و انرژی باقیمانده در گره‌ها موجود در شبکه انتخاب گره‌های سرخوشه را بهبود می‌بخشد. در این روش انتخاب گره‌های سرگروه از بین گره‌هایی انجام می‌شود که میزان انرژی باقیمانده آن‌ها از میانگین انرژی باقیمانده در بقیه گره‌های شبکه به مراتب بیشتر از مصرف گره‌ها در هر دور باشد. اگر

^{۱۰} Rank

تعداد گره‌هایی که این شرط را دارند از تعداد بهینه تعداد خوشه‌ها کمتر باشند، گره‌هایی که میزان انرژی باقیمانده آن‌ها از میانگین انرژی باقیمانده در بقیه گره‌های شبکه بیشتر باشند را در نظر می‌گیرد. این روش باعث افزایش طول عمر شبکه می‌شود. مشکل این روش این است که مکان گره‌ها در انتخاب گره‌های سرگروه در نظر گرفته نمی‌شود.

در [۷] روشی به نام MH-GEER ارائه شد که شبکه حسگر بیسیم توسط روش خوشه‌بندی K-Means به تعدادی خوشه یکسان تقسیم می‌شود. سپس در هر خوشه، گره با بیشترین انرژی باقیمانده به عنوان گره سرخوشه انتخاب می‌شود. سپس یک گراف بین گره‌های سرخوشه رسم کرده و با استفاده از روش فرومون گزاری مسیری بهینه بر اساس انرژی باقیمانده مانده در دیگر گره‌ها و همین‌طور هزینه ارسال به یکدیگر انتخاب می‌شود. انتخاب گره با بیشترین انرژی در هر خوشه باعث می‌شود که نسبتاً تمام گره‌ها تقریباً همراه با یکدیگر انرژی خود را مصرف کنند. بنابراین در همه خوشه‌ها گره‌ها انرژی خود را متناسب با یکدیگر از دست می‌دهند. مشکلات این روش در این است که به دلیل اینکه خوشه‌بندی K-Means در ابتدای شکل‌گیری شبکه انجام می‌گیرد و بنابراین شبکه نسبت به تغییرات حساس نیست و نمی‌تواند حرکت گره‌ها را تحمل کند. همین‌طور در صورت مرگ زودهنگام یک گره، محل آن برای همیشه در شبکه محفوظ است. بنابراین در صورت اینکه به هر دلیلی گره‌ها توانایی ارسال خود را از دست بدهند، شبکه دچار عدم تناسب می‌شود. و درنهایت در این روش مشکل عدم توازن وجود دارد و اگر در شبکه خوشه یا خوشه‌هایی با تعداد گره بسیار کم و یا بسیار زیاد وجود داشته باشد، باعث می‌شود که مصرف انرژی در بین خوشه‌ها نامتناسب باشد.

جدول ۱ - بررسی مقالات پیشینه تحقیق

روش	مزایا	معایب
LEACH [۲]	<ul style="list-style-type: none"> - تقسیم شبکه به خوشه - تقسیم وظیفه سرخوشه بودن به صورت نوبتی بین گره‌ها 	<ul style="list-style-type: none"> - ارسال مستقیم اطلاعات به ایستگاه پایه و در نتیجه مصرف بیشتر انرژی - عدم در نظر گرفتن باتری باقیمانده - مصرف نامتوازن انرژی
Modified LEACH [۳]	<ul style="list-style-type: none"> - در نظر گرفتن باتری باقیمانده گره - زمان‌بندی برای جلوگیری از ارسال زیاد داده توسط گره‌هایی که در مناطق شلوغ قرار دارند 	<ul style="list-style-type: none"> - استفاده نامتوازن انرژی - مسیریابی غیر بهینه - عدم تحمل تحرک گره‌ها
NR-LEACH [۴]	<ul style="list-style-type: none"> - استفاده از امتیازدهی به گره‌های شبکه برای تعیین مهم‌ترین گره‌ها 	<ul style="list-style-type: none"> - مسیریابی غیر بهینه - عدم تحمل تحرک گره‌ها
MODLEACH [۵]	<ul style="list-style-type: none"> - کاهش میزان انرژی سربار جهت انتخاب گره‌های سرشاخه 	<ul style="list-style-type: none"> - قرار گرفتن گیرنده در حالت آماده و در نتیجه مصرف انرژی بیشتر
LEACH-CC [۶]	<ul style="list-style-type: none"> - افزایش توازن مصرف توان - افزایش عمر شبکه 	<ul style="list-style-type: none"> - عدم در نظر گرفتن مکان گره‌ها
MH-GEER [۷]	<ul style="list-style-type: none"> - استفاده از درخت برای مسیریابی بهتر تا ایستگاه پایه - توازن مناسب مصرف انرژی در خوشه‌ها 	<ul style="list-style-type: none"> - عدم تحمل تحرک گره‌ها - عدم اصلاح خوشه‌ها پس از مرگ گره‌ها

در جدول ۱ مقالات مختلف مرتبط به این حوزه کاری بررسی و نتیجه بررسی در یک جدول نمایش داده شده است. با توجه به مباحث پیشین، مهم ترین مسائلی که این مقاله سعی در بهبود آن دارد، میزان مصرف انرژی و همین طور مصرف متوازن انرژی بین گره های موجود در شبکه است. به همین منظور یک روش بهینه بر مبنای تئوری گراف ارائه شده است که هدف آن متوازن کردن مصرف انرژی در تمام شبکه و همین طور بهینه سازی مصرف انرژی با استفاده از ارائه روشی بهتر برای مسیریابی ارسال بسته های اطلاعاتی در شبکه است.

۳. روش پیشنهادی

در این بخش به معرفی روش پیشنهادی پرداخته می شود.

۱.۳. مدل شبکه و انرژی

در این مقاله از مدل مصرف انرژی که در [۲] ارائه شده است استفاده می شود. این مدل مصرفی یک مدل مصرفی ساده است که در [۴] و [۷] استفاده شده است. در این رابطه برای انتقال پیغام l بیتی در فاصله ای به طول d ، از رابطه (۲) استفاده می شود:

$$E_{Tx} = \begin{cases} E_{elec} \times l + \varepsilon_{fs} \times l \times d^2, & \text{if } d \leq d_0 \\ E_{elec} \times l + \varepsilon_{mp} \times l \times d^4, & \text{if } d > d_0 \end{cases} \quad (2)$$

در این رابطه E_{elec} ، انرژی مصرفی مدار الکترونیکی فرستنده و گیرنده داخلی هر گره است. همچنین مقدار ε_{fs} برابر است با میزان انرژی مصرفی مدار فرستنده برای انتشار در فضای کوچک، و همین طور ε_{mp} برابر است با میزان انرژی مصرفی مدار فرستنده برای انتشار اطلاعات در محیط بزرگ است. مقدار d_0 در رابطه (۲) از طریق رابطه (۳) به دست می آید:

$$d_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_{fs}}{\varepsilon_{mp}}} \quad (3)$$

همین طور برای دریافت l بیت میزان انرژی مصرفی به صورت رابطه (۴) محاسبه می شود:

$$E_{Rx} = E_{elec} \times l \quad (4)$$

در رابطه های فوق مقادیر E_{elec} ، ε_{fs} و ε_{mp} به عنوان پارامترهای ورودی، بسته به شرایط محیطی و همین طور نوع مدار الکترونیکی مورد استفاده متغیر هستند و در ابتدای محاسبات باید به عنوان مقادیر ثابت جایگذاری شوند.

مفروضات شبکه به صورت زیر است [۷]:

- محاسبات در ایستگاه پایه صورت می گیرد و پس از انجام محاسبات، زمان بندی ارسال اطلاعات و همین طور مقصد هر ارسال را در زمان پیکربندی برای تمام گره ها ارسال می کند.
- اطلاعات دریافتی از هر حسگر از لحاظ ساختار به همدیگر شبیه است و تابع تجمیع، می تواند پس از تجمیع چند داده، به داده ای شبیه به هر کدام از داده های دریافتی، از لحاظ شکل و اندازه برسد. مانند جمع چند مقدار و یا میانگین چند مقدار. به همین منظور، طول داده تجمیع شده در تمام گره های سرخوشه همیشه با همدیگر برابر بوده و برابر طول داده جمع آوری شده در هر حسگر است.
- روش جمع آوری و تجمیع داده ها مطابق [۲] است.
- فرض بر این است که گره ها در هر زمان از مکان خود اطلاع دارند. این کار از طریق دستگاه خارجی و یا به صورت دستی و یا به هر طریق دیگری انجام می پذیرد.
- توان محاسباتی و همین طور انرژی ایستگاه پایه بی نهایت است.
- تمام گره ها مشابه یکدیگر هستند و همگی آن ها محدودیت مصرف انرژی دارند.

۳.۲. محاسبه بهترین مسیر

روش پیشنهادی در این مقاله یک روش بر پایه تئوری گراف است. در این روش، یک گراف در بین گره های موجود در شبکه که در محیطی مشخص پخش شده اند شکل می گیرد. سپس فاصله بین تمام گره ها به صورت یک به یک محاسبه شده و در ابتدای هر دور در جدولی نگهداری می شود. محاسبه مجدد این جدول در ابتدای هر دور کمک می کند که شبکه نسبت به حرکات احتمالی گره ها بین هر دور قابلیت تحمل داشته باشد. سپس بر اساس فاصله بین گره ها، یک درخت ایجاد می شود. این کار از سمت ایستگاه پایه انجام می گیرد و در ابتدا به منظور ارسال، تمام گره ها ایستگاه پایه را به عنوان بهترین گزینه برای ارسال در نظر می گیرند و درخت تنها یک عضو دارد و آن هم ایستگاه پایه است. سپس به صورت تکراری تمام گره ها یک به یک به ترتیب بهترین گزینه و نزدیک ترین به گره های فعلی موجود در درخت، به درخت اضافه شده و برای گره هایی که هنوز به درخت اضافه نشده اند به عنوان گره سرخوشه جدید شناخته می شود و تمام گره هایی که هنوز به درخت اضافه نشده اند، هزینه ارسال به گره جدید را با هزینه ارسال به گره ای که قبلاً برای ارسال در نظر گرفته بودند مقایسه می کنند. در صورتی که هزینه جدید بهتر از گره ای بود که قبلاً برای ارسال اطلاعات آن را در نظر گرفته بودند، گره جدید را به عنوان گره سرخوشه در نظر می گیرند.

محاسبه هزینه ارسال گره ها از سمت ایستگاه پایه انجام می گیرد و به سمت گره های دورتر حرکت می کند. بنابراین در این حرکت میزان باقیمانده باتری گره هایی که انتخاب شده اند به عنوان یک فاکتور مهم در نظر گرفته می شود. زیرا هر گره جدیدی که به درخت اضافه می شود می تواند به عنوان گره سرخوشه برای دیگر گره هایی که هنوز انتخاب نشده اند عمل کند. اگر i جدیدترین گره ای باشد که به درخت اضافه شده است، و j شمارنده دیگر گره های موجود در شبکه باشد، هزینه ارسال بین گره های i و j به صورت رابطه (۵) محاسبه می شود.

$$w_{ij} = \frac{E_{Tx} + ((E_{Rx} + E_{Da}) \times l)}{e_i} \quad (5)$$

در رابطه فوق، E_{Tx} برابر انرژی مصرفی ارسال داده بین گره‌های i و j ، E_{Rx} میزان مصرف انرژی برای دریافت بسته اطلاعاتی است. مقدار E_{Da} انرژی محاسباتی مورد نیاز جهت تجمیع داده دریافتی با داده‌های قبلی است و در نهایت e_i برابر با میزان باتری باقیمانده در گره سرخوشه است.

همان‌طور که گفته شد شروع محاسبات هزینه‌ها در این روش از ایستگاه است. بنابراین اگر گره i ایستگاه پایه باشد، هزینه تجمیع داده و همین‌طور هزینه دریافت برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود و همین‌طور به دلیل اینکه میزان انرژی ایستگاه پایه بی‌نیاز در نظر گرفته می‌شود، از میزان شارژ باتری باقیمانده گره‌های مقصد با نماد e_j برای این رابطه استفاده شده و رابطه به صورت (۶) محاسبه می‌شود:

$$w_{ij} = \frac{E_{Tx}}{e_j} \quad (6)$$

وجود مقدار باتری باقیمانده در تقسیم باعث می‌شود که اولویت انتخاب گره‌هایی که باتری آن‌ها کمتر از دیگر باتری دیگر گره‌ها است، کاهش یابد و از این طریق می‌توان مصرف انرژی در کل شبکه را متوازن با یکدیگر کرد. به‌طوری‌که هر اگر هر گره پس از انتخاب شدن به‌عنوان سرخوشه، بعد از چند دور، میزان شارژ باتری باقیمانده آن کاهش پیدا کرد، هزینه انتخاب آن گره (w_{ij}) بالاتر رفته و گره‌های با هزینه بهتر جایگزین آن خواهند شد. در شکل ۱ می‌توانید الگوریتم یافتن کوتاه‌ترین مسیر را مشاهده نمایید.

Initialization:

N : Number of Nodes

$Weights[1..N, 1..N]$: $N \times N$ Matrix of Transfer cost (J) between all nodes.

$ShortestDistances[1..N]$: Infinite Number in all cells.

$Added[1..N]$: Zeros in all cells

$Parents[1..N]$: Zeros in all cells

BS : Base Station Node

****Adding Base Station as the first Node to the Graph****

$ShorterstDistances[BS] \leftarrow 0$ //Base Station's Distance to the start of the graph is 0

$Parents[BS] \leftarrow \text{null}$ //Base station doesn't have a father node

for all nodes in the network

****Find nearest node from unselected nodes to the already selected nodes****

$NearestNode \leftarrow \text{Null}$

$Distance \leftarrow \text{Infinite}$

for each node i

```

if ShortestDistances[i] < DistanceAndAdded[i] == 0
    Distance ← ShorterstDistances[i]
    NearestNode ← i
end
end
Added[NearestNode] ← 1 //Mark nearest node as added to the list

**See if any of the nodes can use newly found node as parent node and update distances
accordingly**
for each node i
    NodeDistance ← (Weights[NearestNode, i] + ((ERx + EDa) × l)) / e
    if NodeDistance < ShortestDistances[i]
        Parents[i] ← NearestNode
        ShortestDistances[i] = NodeDistance
    end
end
end
end

```

شکل ۱ - الگوریتم یافتن کوتاه‌ترین مسیر بین گره‌ها

۴. ارزیابی عملکرد

در این بخش موارد پژوهشی مطرح می‌شود که بتوان روش پیشنهادی را در شرایط مختلفی که ممکن است برای شبکه رخ بدهد سنجید. برای شبیه‌سازی روش پیشنهادی از نرم‌افزار MATLAB 2018b استفاده شده است. در ابتدا مدل شبکه عادی بررسی شده و میزان تأثیر برخی پارامترهای ورودی بر روی عملکرد کلی تابع ورودی سنجیده می‌شود. در این بخش روش پیشنهادی در دو بخش زیر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد:

۱. میزان انرژی باقیمانده و میزان مصرف انرژی: در این حالت میزان مصرف انرژی و میزان باقیمانده انرژی داخل باتری گره‌ها بررسی می‌شوند تا میزان مصرف انرژی در شبکه و همین‌طور میزان باقیمانده مصرف انرژی ارزیابی گردد.

۲. توازن مصرف انرژی^{۱۱}: در این بخش ارزیابی از توازن مصرف انرژی در شبکه موردنظر انجام می‌گیرد.

در این شبیه‌سازی شبکه موردنظر از ۱۰۰ گره تشکیل شده است که به صورت تصادفی با توزیع یکنواخت در محیطی به مساحت ۱۰۰ متر در ۱۰۰ متر گسترده شده‌اند. در شبکه مورد ایستگاه پایه در نقطه (۱۷۵, ۵۰) قرار گرفته است. در مثال موردنظر انرژی ابتدایی تمام گره‌ها به صورت یکنواخت برابر 0.1 J در نظر گرفته می‌شود.

^{۱۱}Load Balancing

برای ارزیابی شبکه تعریف شده از پارامترهای محیطی جدول ۲ استفاده می‌شود.

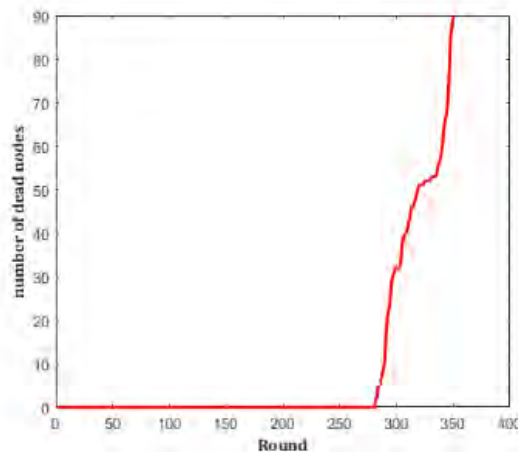
جدول ۲- پارامترهای شبکه

Parameter	Value
Initial Energy	0.1 J
E_{elec}	50 nJ/bit
ϵ_{fs}	10 pJ/bit/m ²
ϵ_{mp}	0.0013 pJ/bit/m ⁴
E_{DA}	5 nJ/bit/message
Data Packet Size	6400 bits
Control Packet Size	500 bits

۱.۴. بررسی میزان مصرف انرژی و انرژی باقیمانده

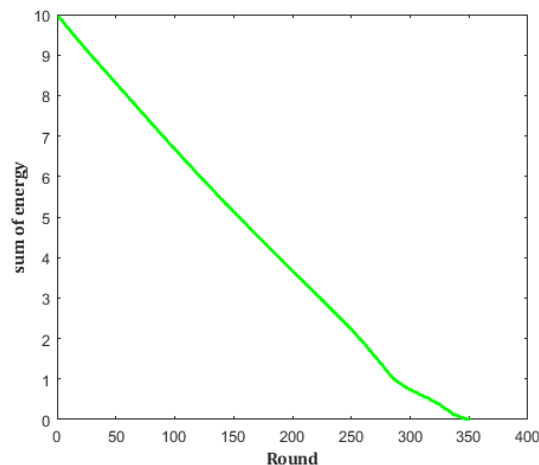
شبیه‌سازی به صورت یکنواخت انجام می‌گیرد تا زمان حیات شبکه به‌طور کلی محاسبه گردد. شبیه‌سازی تا زمانی صورت می‌گیرد که ۹۰٪ کل گره‌ها هنوز انرژی داشته باشند.

پارامتر اول اندازه‌گیری، طول عمر شبکه است. در شبیه‌سازی انجام شده، طول عمر شبکه ۳۵۱ دور تخمین زده می‌شود. نمودار تعداد گره‌های مرده در شبکه در شکل ۲ نمایش داده شده است. در این نمودار، مشاهده می‌شود که با توجه به پارامترهای شبکه، مرگ اولین گره پس از گذشت حدود ۲۸۰ دور از شروع عملکرد شبکه رخ می‌دهد. سپس گره‌ها با نزدیک شدن پایان شدن عمر شبکه تقریباً همراه یکدیگر و با شیب نسبتاً تندی می‌میرند. دلیل شیب تند این اتفاق این است که تقریباً گره‌ها نسبت به همدیگر انرژی خود را مصرف می‌کنند و اختلاف انرژی باقیمانده آن‌ها بسیار کم است.



شکل ۲- تعداد گره‌های مرده در هر دور

در نموداری که در شکل ۳ نشان داده شده است، مجموع میزان باقیمانده انرژی تمام گره‌های موجود در شبکه را در شبیه‌سازی قبل مشاهده می‌نمایید. مشاهده می‌شود که تا زمان مرگ اولین گره میزان مصرف انرژی در بین گره‌های شبکه تقریباً یکنواخت است و فقط تغییرات کوچک به دلیل تغییر مسیرهای داخلی درون شبکه رخ می‌دهد. اما بعد از فوت گره‌ها به دلیل اینکه گره‌های مرده دیگر مصرفی ندارند، میزان مصرف انرژی کاهش پیدا می‌کند.

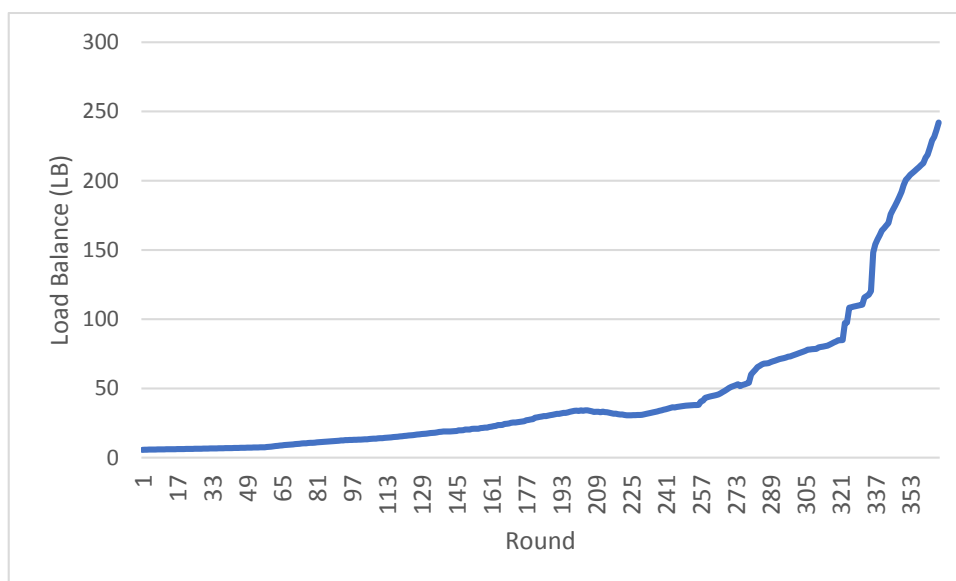


شکل ۳ - مجموع میزان باقیمانده باتری گره‌های شبکه

۲.۴. بررسی توازن مصرف انرژی

در این بخش، شبکه‌ای ارائه می‌شود که در آن از میزان باتری باقیمانده تصادفی با توزیع نرمال برای گره‌ها استفاده می‌شود تا عملکرد روش پیشنهادی را در حالتی سنجید که میزان باتری باقیمانده گره‌های موجود در شبکه با یکدیگر همخوانی ندارند. برای سنجش میزان تناسب انرژی از رابطه ارائه شده در [۷] استفاده می‌شود. این رابطه به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود.

$$LB = \frac{1}{\max_{i,j \in \{1, \dots, N\}} |e_i - e_j|} \quad (7)$$

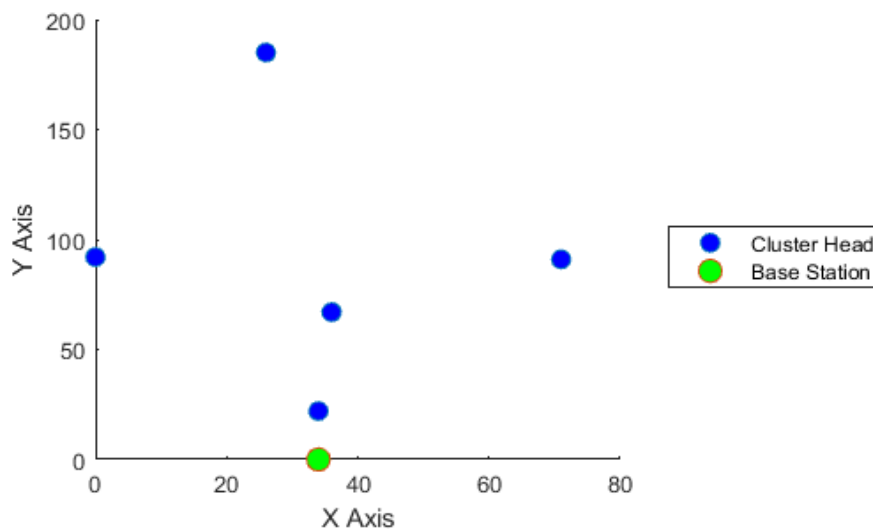


شکل ۴ - میزان تناسب انرژی در ادوار مختلف

در شکل ۴، میزان نحوه عملکرد روش پیشنهادی در این شبکه را ملاحظه می‌نمایید. در این شکل، محور افقی شمارنده دور عملکرد شبکه، و محور افقی میزان توازن انرژی باقیمانده گره‌های شبکه است. همان‌طور که در شکل، ملاحظه می‌شود، در شروع اجرای شبیه‌سازی، توازن میان میزان باقیمانده در گره‌های شبکه بسیار کم است. ولی الگوریتم ارائه‌شده در هر مرحله با انتخاب مسیرهای بهینه و انتخاب گره‌هایی با مصرف بیشتر به‌عنوان گره سرخوشه، سعی در ایجاد توازن بین گره‌های شبکه می‌نماید.

۳.۴. شبکه‌ای با یک گره دورافتاده

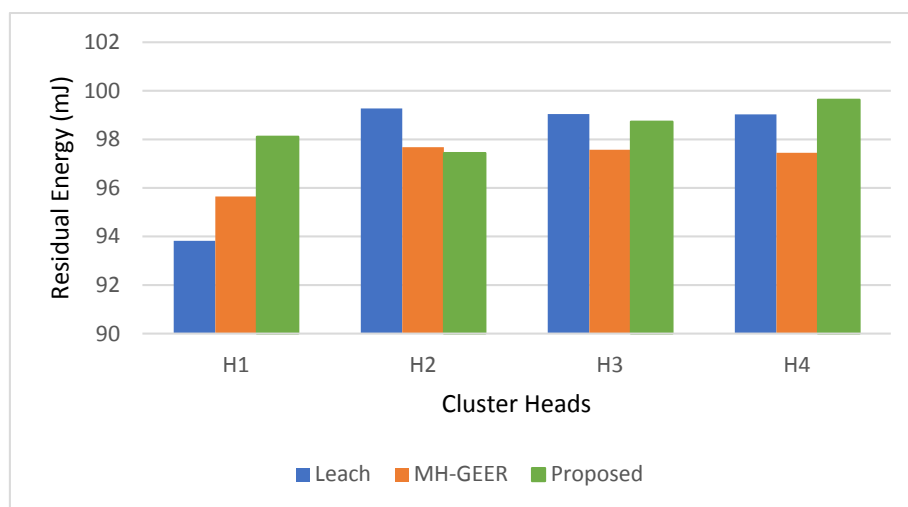
در این بخش، روش پیشنهادی را در شبکه‌ای سنجیده می‌شود که یک گره سرگروه آن از دیگر گره‌ها فاصله داشته و نتایج بررسی را با نتایج به‌دست‌آمده از [۵] مقایسه می‌نماییم. در این بخش، شبکه‌ای ارائه می‌شود که شامل ۴ گره سرخوشه، که شامل یک گره سرخوشه دور و یک گره میانی است. شکل این شبکه را می‌توانید در شکل ۵ ملاحظه کنید. سپس میزان مصرف انرژی و همچنین توازن انرژی باقیمانده در این شبکه پس از ۸ دور شبیه‌سازی بررسی می‌شود.



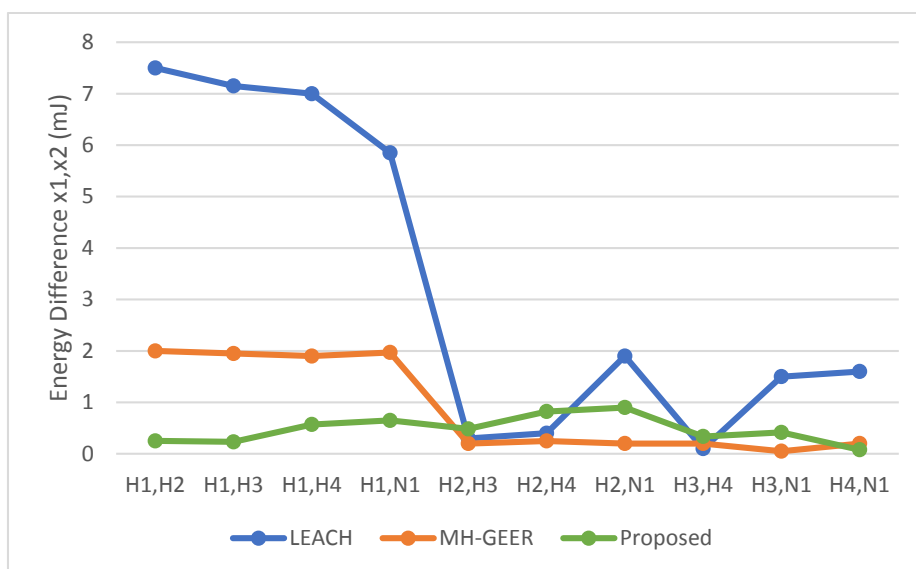
شکل ۵- شبکه ارائه شده در مورد پژوهشی ۳

همان طور که در نمودار شکل ۶ ملاحظه می‌نمایید، انرژی باقیمانده در هر گره در هر سه روش LEACH، MH-GEER و روش پیشنهادی این مقاله مقایسه شده است. در روش LEACH به دلیل ارسال مستقیم داده توسط گره‌های سرخوشه، گره H1 انرژی بیشتری از دست داده است ولی بقیه گره‌ها مصرف کمتری داشته‌اند. در روش MH-GEER به دلیل استفاده از مسیریابی بهتر از روش LEACH مصرف انرژی در گره H1 بهبود داشته است ولی هنوز این گره بیشتر از دیگر گره‌ها مصرف انرژی داشته است. در روش پیشنهادی، مصرف انرژی در همه گره‌ها خصوصاً گره H1 بهبود مشاهده می‌شود. تنها در گره H2 به دلیل قرار داشتن در مرکز شبکه و استفاده بیشتر از این گره به عنوان سرخوشه برای ارسال داده، مقدار بیشتری مصرف انرژی نسبت به دیگر گره‌ها مشاهده می‌شود.

در شکل ۷ میزان تفاوت انرژی را مشاهده می‌نمایید. همان طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، تناسب مصرف انرژی در گره H1 نسبت به هر دو روش LEACH و MH-GEER بهبود داشته است. ولی به دلیل استفاده H1 از گره‌های میانی به عنوان گره‌های سرخوشه جدید، در بین گره‌های H1، H2 و H3 مقداری عدم توازن انرژی به اندازه میزان استفاده از انرژی این گره‌ها به عنوان گره سرخوشه مشاهده می‌شود. در روش LEACH به دلیل عدم وجود روشی برای توازن مصرف بین گره‌های شبکه، شاهد تفاوت انرژی شدید بین گره‌های این شبکه هستیم. در روش MH-GEER نسبت به روش LEACH مقداری بهبود در متوازن سازی مصرف انرژی در گره‌های شبکه وجود دارد. البته هنوز در گره H1 مقداری عدم توازن مشاهده می‌شود.



شکل ۶ - میزان باقیمانده انرژی هر سه گره

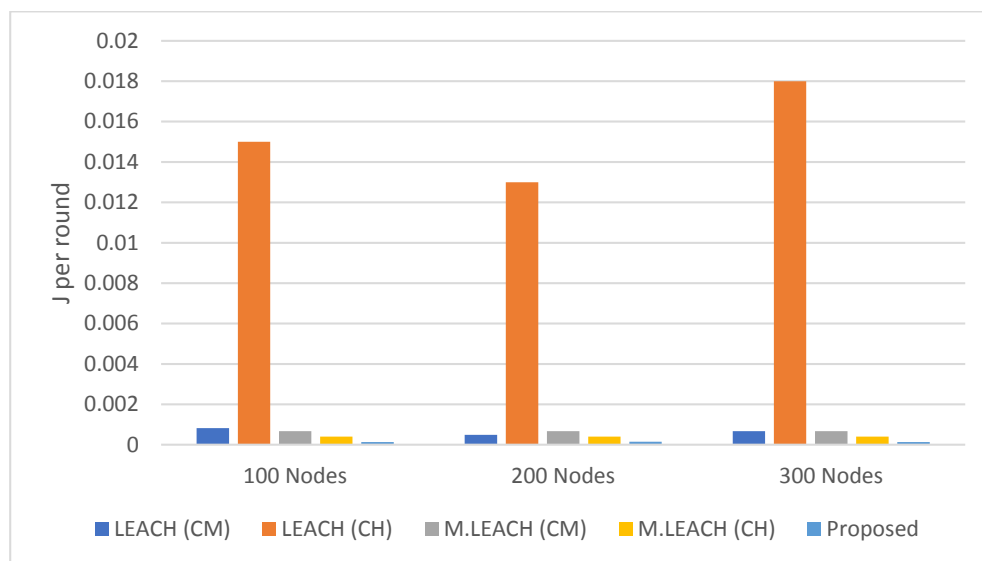


شکل ۷ - میزان تفاوت انرژی بین گره‌ها بر حسب mJ

۴.۴. مقایسه تعداد گره‌های شبکه

در این بخش با تغییر تعداد گره‌های موجود در شبکه، متوسط میزان مصرف انرژی در هر گره اندازه‌گیری شده و با نتایج [۳] مقایسه می‌شود. در این حالت شبکه با پارامترهای یکسان با تعداد ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ گره حسگر مقایسه می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، میانگین مصرف انرژی در گره‌های شبکه در روش ارائه‌شده از روش‌های LEACH و LEACH-Modified مصرف کمتری دارند و در مصرف انرژی این روش بهبود مشاهده می‌شود. گره‌های سرخوشه در روش LEACH به دلیل ارسال مستقیم به ایستگاه پایه، بیشترین مصرف انرژی را دارند.



شکل ۸- میانگین مصرف انرژی گره‌ها در شبکه‌های با اندازه‌های مختلف

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، الگوریتم جدیدی برای پیدا کردن بهترین مسیر برای ارسال بسته‌ها در شبکه حسگر بیسیم ارائه شد. گرافی که در این الگوریتم در نظر گرفته شده، بر اساس انرژی باقیمانده گره‌ها و فاصله آن‌ها با دیگر گره‌ها به دست آمده است. ابتدا با استفاده از تابع هزینه مقدار متناسب با هر گره محاسبه شده و سپس بهترین گره‌ها برای مسیریابی انتخاب می‌شوند. استفاده از تابع هزینه و همچنین الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر، باعث بهبود مصرف انرژی و همین‌طور متوازن‌سازی مصرف انرژی در مقایسه با سایر روش‌های ارائه شده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نیز نشان می‌دهند که مسیریابی پیشنهادی باعث افزایش طول عمر شبکه از طریق کاهش مصرف انرژی گره‌های حسگر و همین‌طور متوازن کردن مصرف انرژی در گره‌های حسگر در شبکه می‌شود.

۶. منابع

1. S. Anthony Jesudurai and A. Senthilkumar, "An Improved Energy Efficient Cluster Head Selection protocol using the double cluster heads and data fusion methods for IoT applications," *Cognitive Systems Research*, 2018.
2. W. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in *International conference on system sciences*, Hawaii, 2000.
3. M. Elshrkawey, S. M. Elsherif and M. Elsayed Wahed, "An Enhancement Approach for Reducing the Energy Consumption in Wireless Sensor Networks," *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 2017.

4. A. Al-Baz and A. El-Sayed, "A new algorithm for cluster head selection in LEACH protocol for wireless sensor networks," *International Journal of Communication systems*, 2017.
5. D. Mahmood, N. Javaid, S. Mahmood, S. Qureshi, A. M. Memon and T. Zaman, "MODLEACH: A Variant of LEACH for WSNs," in *Eighth International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications*, 2013.
6. Z. Ma, G. Li and Q. Gong, "Improvement on LEACH-C Protocol of Wireless Sensor Network (LEACH-CC)," *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, 2016.
7. H. Rhim, K. Tamine, R. Abassi, D. Sauveron and S. Guemara, "A multi-hop graph-based approach for an energy-efficient routing protocol in wireless sensor networks," *Human-centric Computing and Information Sciences*, 2017.