

ارائه یک الگوریتم جدید برای بهبود مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم برداشت کننده انرژی

علیرضا کلائی^۱، حمیدرضا بخشی^۲

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد مخابرات سیستم دانشگاه شاهد تهران، ar.kalaei@shahed.ac.ir

^۲دانشیار گروه مهندسی برق - مخابرات دانشگاه شاهد تهران، bakhshi@shahed.ac.ir

چکیده

شبکه‌های حسگر بی‌سیم از جمله شبکه‌های پرکاربرد در صنایع مختلف محسوب می‌شوند که در عمل به علت محدودیت در ظرفیت باتری حسگرها و کمبود طول عمر مفید، همواره برای استفاده از آنها با محدودیت‌های عملیاتی مواجه هستیم. لذا در این مقاله به ارائه یک الگوریتم بهینه‌سازی مصرف انرژی، شامل روش‌های خوشه‌بندی، مسیریابی و فشرده‌سازی اطلاعات برای افزایش طول عمر گره‌های حسگر پرداخته شده است. در این الگوریتم که تمامی گره‌ها از برداشت انرژی خورشیدی استفاده نموده‌اند، ابتدا با وزن‌دهی هریک از گره‌ها، در نواحی مشخصی از شبکه سرخوشه‌هایی برای تشکیل خوشه تعیین شده است؛ پس از انتخاب اعضای هر خوشه و شکل‌گیری خوشه‌ها، اطلاعات دریافت شده توسط هر سرخوشه، جمع و به کمک یک الگوریتم فشرده‌سازی حجم این اطلاعات کاسته شده است. سپس اطلاعات فشرده شده توسط یک روش مسیریابی ترکیبی، به ایستگاه پایه منتقل شده‌اند. براساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی، الگوریتم ارائه شده از نظر میانگین انرژی باقی‌مانده در گره‌های حسگر و تعداد گره‌های زنده، نسبت به الگوریتم NEEC پیشرفت قابل توجهی داشته است.

کلید واژه

شبکه حسگر بی‌سیم، برداشت انرژی، خوشه‌بندی، مسیریابی، فشرده‌سازی، طول عمر.

برای پیشینه شدن کارایی شبکه براساس مقدار انرژی برداشت شده است، تا شبکه در شرایط پایدار باقی بماند [۳]. اصولاً در شبکه‌های بی‌سیم، انتقال داده‌ها انرژی بیشتری را نسبت به پردازش داده‌ها مصرف می‌نماید [۳]. به همین منظور، برای صرفه‌جویی در مصرف توان ناشی از انتقال اطلاعات، الگوهای مختلف خوشه‌بندی و مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در گره‌های حسگر برداشت انرژی، اگر انرژی برداشت شده کافی نباشد، گره‌ها به حالت خواب منتقل می‌شوند. در این زمان انتظار می‌رود که باتری حسگرها شارژ شود، بنابراین باتری این نوع گره‌ها را می‌توان مجدداً شارژ و به صورت مکرر از آنها استفاده نمود [۴].

در گره‌های حسگر معمولاً نرخ شارژ بسیار کوچکتر از مصرف انرژی است. این گره‌ها در مدت زمان لازم برای شارژ مجدد، خاموش شده و این موضوع باعث تغییر در ساختار شبکه می‌شود [۴]. در مقایسه با شبکه‌های حسگر بی‌سیم معمولی، شبکه‌های حسگر برداشت انرژی ویژگی‌های منحصر به فردی از جمله مدل انرژی متفاوت، امکان بازگشت گره‌های مرده به شبکه و... را دارند، بنابراین معمولاً پروتکل‌های خوشه‌بندی و مسیریابی حسگرهای عادی برای حسگرهای برداشت کننده انرژی مناسب نخواهند بود [۵].

در [۴] الگوریتم جدیدی برای خوشه‌بندی و مسیریابی شبکه‌های حسگر بی‌سیم متنوع، بر برداشت انرژی، ارائه شده که در

مقدمه

شبکه‌های حسگر بی‌سیم^۱ مجموعه‌ای از گره‌های حسگر بی‌سیم هستند که برای اهداف متنوعی از جمله مخابره اطلاعات در محیط‌های مختلف توزیع می‌شوند [۱]. در سال‌های اخیر، با توسعه و پیشرفت فناوری، شبکه‌های حسگر در حوزه‌های گوناگونی مانند پزشکی، کنترل محیط زیست، نظامی، مدیریت صنعتی و غیره مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱]. امروزه دسته جدیدی از شبکه‌های حسگر بی‌سیم که انرژی تجدیدپذیر محیطی (مانند انرژی خورشیدی، باد، ارتعاشات و غیره) را دریافت کرده و از آن برای شارژ باتری حسگرها استفاده می‌نمایند، ظهور یافته‌اند [۲]. در این شبکه‌ها معمولاً انرژی مصرفی حسگرها بیشتر از انرژی برداشت شده از منابع محیطی می‌باشد؛ لذا بدون اعمال الگوریتم‌های صرفه‌جویی در توان، گره‌های حسگر از کار خواهند افتاد. بنابراین در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با قابلیت برداشت انرژی^۲، هدف بهبود خوشه‌بندی^۳ و مسیریابی^۴

^۱ Wireless Sensor Networks (WSNs)

^۲ Energy Harvesting (EH)

^۳ Clustering

^۴ Routing

دقت به ایستگاه پایه انتقال می یابند ولی در شرایطی که سطح انرژی گره ها در وضعیت بحرانی قرار داشته باشد؛ به کمک داده های از پیش انتقال یافته و همبستگی بین آنها، می توان داده های مورد نیاز برای جمع آوری از محیط را براساس کاربرد شبکه، کاهش داد و همچنین با تخمین مناسب و البته نه با دقت حالت اول این اطلاعات را با مصرف انرژی کمتر به مقصد منتقل نمود. از جمله نقاط ضعف این روش می توان به پیچیدگی نسبتا بالای الگوریتم و عدم کارایی آن برای کاربردهایی که به حداکثر دقت انتقال اطلاعات نیاز دارند اشاره کرد. در [۱۱] از همبستگی ذاتی بین مشاهدات متوالی گره های حسگر و شباهت روند داده ها بین گره اصلی و گره های حسگر همسایه برای کاهش انتقال اطلاعات استفاده می شود. در این روش از مدل سازی ARIMA^۹ برای تخمین داده ها استفاده شده است. این مدل توسط گره سرخوشه اجرا و به سایر گره های خوشه نیز منتقل می شود. در هر دور از اجرای الگوریتم جمع آوری اطلاعات، گره ها مدل داده های پیش بینی شده و داده های مشاهده شده آنی را مقایسه می نمایند. در صورت وجود انحرافی فراتر از آستانه مشخص شده، گره ها اختلاف داده را به سرخوشه اطلاع می دهند. اختلاف داده های جمع آوری شده توسط سرخوشه پس از فشرده سازی به گره ایستگاه پایه منتقل می شوند. با استفاده از این روش، بخش عظیمی از انتقال داده های اضافی کاهش می یابد. در عوض به علت عدم انتقال اطلاعات اصلی، این روش برای کاربردهایی با دقت بالا چندان مناسب نیست. در [۱۲] علاوه بر استفاده از روش برداشت انرژی محیطی، به کمک الگوریتم پیش بینی مبتنی بر فیلتر تطبیقی یک روش خوشه بندی ارائه شده است. به این ترتیب در مصرف توان ناشی از انتقال اطلاعات، صرفه جویی شده و به کمک توان حاصل از برداشت انرژی، باتری گره ها شارژ می شوند. در نتیجه مرگ گره ها به تعویق خواهد افتاد.

در مقاله پیش رو، الگوریتم ارائه شده شامل یک روش خوشه بندی بر مبنای وزن بوده و در هر دور^{۱۰}، شبکه را به تعدادی ناحیه مشخص جهت انتخاب سرخوشه ها، تقسیم نموده است. همچنین پس از خوشه بندی مناسب گره های حسگر، اطلاعات هر خوشه در سرخوشه به کمک یک روش بدون اتلاف، فشرده شده و به کمک یک روش ترکیبی، بسته به شرایط گره ها از لحاظ برداشت انرژی و انرژی باقی مانده در آنها، مسیریابی اطلاعات از سرخوشه ها تا ایستگاه پایه انجام شده است.

در ادامه و در بخش دوم پس از ارائه مدل مصرف انرژی و برداشت انرژی شبکه، هر یک از روش های خوشه بندی، مسیریابی و فشرده سازی مورد استفاده در این مقاله تشریح گردیده است؛

روش خوشه بندی آن از الگوریتم ژنتیک استفاده گردیده است. همچنین در الگوریتم مسیریابی این روش، به کمک محاسبه یک تابع هزینه به ازای انتخاب هر سرخوشه^۵ بین گره جاری و ایستگاه پایه^۶ یک گره (احتمالا سرخوشه) برای ارسال اطلاعات سرخوشه مورد نظر انتخاب شده و این روند تا رسیدن اطلاعات به ایستگاه پایه ادامه یافته است. از نقاط ضعف این روش می توان به پیچیدگی نسبتا بالای الگوریتم و مصرف زیاد انرژی در هنگام شروع به کار آن اشاره نمود که این موضوع خود می تواند باعث مرگ اولیه تعدادی از گره های حسگر شود. در [۶] با تعمیم یک روش خوشه بندی تک خوشه به حالت چند خوشه ای همراه با قابلیت برداشت انرژی، برای هر خوشه یک گره به عنوان برداشت کننده انرژی انتخاب شده است. در این الگوریتم برای ارسال اطلاعات نیز از گره برداشت انرژی منتخب برای هر خوشه استفاده گردیده است. از ویژگی های این روش می توان به تخمینی بودن مکان سرخوشه نسبت به نتایج محاسبات و عدم برداشت انرژی توسط تمام گره ها اشاره کرد. در [۷] روشی تحت عنوان NEEC^۷ ارائه گردیده که در آن علاوه بر خوشه بندی گره های شبکه به کمک ارائه یک وزن جدید، از روش مسیریابی سلسه مراتبی برای ارسال اطلاعات به ایستگاه پایه استفاده شده است. از دیگر ویژگی های این روش، می توان به استفاده از برداشت انرژی خورشیدی توسط تمامی گره های شبکه اشاره نمود. در [۸] از روش برداشت انرژی رادیویی، مسیریابی، کدینگ اطلاعات و دستورات خواب و بیدار باش رادیویی برای بهینه سازی مصرف انرژی گره ها استفاده گردیده است. در [۹] با ارائه یک روش ترکیبی از هر دو نوع برداشت انرژی خورشیدی و رادیویی جهت شارژ مجدد حسگرها و جلوگیری از مرگ و میر آنها استفاده شده است. این روش در کنار پیچیدگی بالای محاسباتی، کارایی بالاتری نسبت به سایر روش های مشابه دارد. به همین منظور می توان در کنار الگوریتم های خوشه بندی و مسیریابی، از این الگوریتم برداشت انرژی نیز برای بهبود مصرف انرژی استفاده نمود.

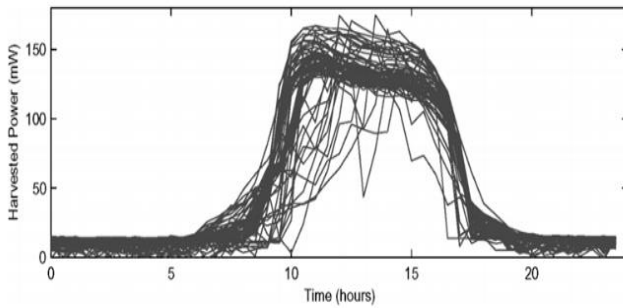
در [۱۰] روشی با عنوان APMC^۸ برای جمع آوری داده ها از گره های حسگر ارائه شده است که علاوه بر الگوریتم های رایج جمع آوری اطلاعات که بر مبنای میزان انرژی گره ها کار می کنند، الگوریتم جمع آوری و انتقال اطلاعات براساس یک روش ماتریسی در شرایط مختلف شبکه تغییر خواهد کرد. در حالتی که گره ها حاوی انرژی کافی باشند، داده ها با حداکثر رزولوشن و

^۵ Cluster-head

^۶ Base Station

^۷ Novel Energy Efficient Clustering (NEEC)

^۹ Auto Regressive Integrated Moving Average (ARIMA)



شکل ۱. نرخ برداشت انرژی یک حسگر در طول ۶۷ شبانه روز [۱۴]

است.

الگوی مصرف توان ناشی از ارسال اطلاعات برای هر گره مطابق رابطه (۳) محاسبه شده است. لازم به ذکر است که مصرف توان ناشی از ارسال اطلاعات توسط گره‌ها در [۴] و بسیاری از الگوریتم‌های دیگر از جمله روش LEACH^{۱۱} نیز که در [۱۵] تشریح شده است، به همین ترتیب محاسبه گردیده و مقدار d_0 نیز مطابق محاسبات انجام شده در [۱۶] برابر ۸۶٫۲ متر در نظر گرفته شده است.

$$E_{TX}(k, d) = \begin{cases} E_{elec}k + E_{fs}kd^2 & , d < d_0 \\ E_{elec}k + E_{mp}kd^4 & , d \geq d_0 \end{cases} \quad (3)$$

در رابطه فوق k تعداد بیت پیام، d فاصله بین فرستنده و گیرنده، E_{elec} میزان مصرف انرژی ناشی از فعال شدن مدار فرستنده یا گیرنده به ازای هر بیت پیام و E_{fs} و E_{mp} به ترتیب نمایانگر میزان مصرف انرژی انتقال در حالت محوشدگی چندمسیره و محوشدگی فضای آزاد می‌باشند.

روش خوشه‌بندی

پیش از ارائه روش خوشه‌بندی مناسب می‌بایست عوامل موثر در مصرف انرژی گره‌ها، مورد بررسی قرار گیرند.

به طور کلی گره‌ای که به عنوان سرخوشه انتخاب می‌شود نسبت به سایر گره‌ها انرژی بیشتری مصرف می‌نماید [۱۲]. لذا در انتخاب سرخوشه لازم است انرژی گره‌ها لحاظ شده و گره‌هایی با بیشترین انرژی به عنوان سرخوشه تعیین گردند. در شبکه‌های مبتنی بر برداشت انرژی معمولاً میزان برداشت انرژی گره‌ها با یکدیگر متفاوت است. بنابراین به جهت مصرف انرژی بیشتر سرخوشه‌ها، باید گره‌هایی با میزان برداشت انرژی بیشتر به عنوان سرخوشه انتخاب شوند. گره‌ای که به عنوان سرخوشه انتخاب شده است باید با استفاده از معیار حداقل فاصله، تعدادی از گره‌های غیر سرخوشه را به عنوان اعضای خوشه خود انتخاب

سپس در بخش سوم نتایج شبیه‌سازی الگوریتم ارائه شده با نتایج حاصل از روش NEE مقایسه شده است. در انتها و در بخش چهارم نیز نتایج حاصل از این تحقیق مورد جمع‌بندی قرار گرفته است.

ارائه الگوریتم پیشنهادی

پس از بررسی عوامل و روش‌های موثر در بهینه‌سازی مصرف انرژی شبکه‌های حسگر بی‌سیم در این بخش به تشریح روش ارائه شده شامل خوشه‌بندی، مسیریابی و فشرده‌سازی اطلاعات در شبکه‌های حسگر بی‌سیم برداشت کننده انرژی پرداخته شده است. در الگوریتم پیشنهاد شده در این مقاله شبکه به صورت مربعی و با طول ضلع ۱۰۰۰ متر می‌باشد. N نمایانگر تعداد گره-های حسگر شبکه بوده و برابر ۱۰۰ عدد در نظر گرفته شده است. حسگرهای شبکه از نوع ثابت (غیر قابل حرکت) و با قابلیت برداشت انرژی خورشیدی می‌باشند، BS نشان‌دهنده ایستگاه پایه بوده که در نقطه (۵۰، ۱۵۰۰) قرار گرفته است. همچنین میزان ذخیره‌سازی انرژی در باتری گره‌ها دارای محدودیت بوده و حداکثر این مقدار، ۵ ژول می‌باشد.

مدل انرژی شبکه

در مدل انتخابی برای انرژی شبکه مورد بحث، ضروریست در هر دور انرژی برداشت شده و مصرف انرژی در دور قبل در نظر گرفته شود. همچنین لازم به ذکر است که انرژی کل یک گره نمی‌تواند بیشتر از بیشینه انرژی قابل ذخیره‌سازی در باتری هر گره باشد. لذا مدل انرژی شبکه، مشابه بسیاری از پژوهش‌های ارائه شده در این حوزه به صورت رابطه (۱) در نظر گرفته شده است [۷]:

$$E_{rem}(i, r) = \min(E_{max}(i), E_{rem}(i, r-1) + E_{EH}(i, r-1)). \quad (1)$$

$E_{rem}(i, r)$ میزان انرژی گره i در دور r و $E_{EH}(i, r-1)$ میزان انرژی برداشت شده گره i در دور $r-1$ و $E_{Max}(i)$ میزان بیشینه انرژی قابل ذخیره در گره i می‌باشد.

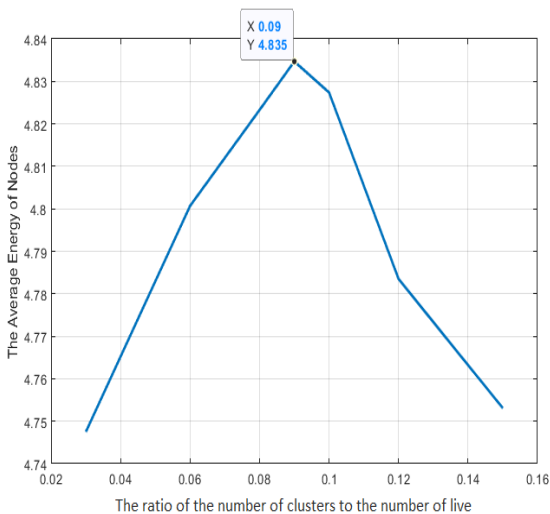
مدل انرژی برداشت شده توسط هر گره با فرض برداشت انرژی خورشیدی به صورت رابطه (۲) در نظر گرفته شده است [۱۳]:

$$E_{EH}(i, r-1) = \mu_{i, r-1} \Delta t. \quad (2)$$

Δt مدت زمان یک دور را نشان داده و $\mu_{i, r-1}$ نرخ برداشت انرژی گره i در دور $r-1$ بوده است که در واقع یک متغیر تصادفی با توزیع یکنواخت؛ بین کمترین نرخ برداشت انرژی $P_{h, Min}(r-1)$ و بیشترین نرخ برداشت انرژی $P_{h, Max}(r-1)$ می‌باشد. مطابق [۱۴]، مقادیر $P_{h, Min}(r-1)$ و $P_{h, Max}(r-1)$

^{۱۱} Low-energy adaptive clustering hierarchy (LEACH)

سرخوشه قرار گرفته‌اند که این مساله باعث مصرف انرژی بیش از حد، در گروه گره‌های دورتر از ایستگاه پایه شده است. برای رفع این مشکل، پیشنهاد شده است با توجه به وسعت شبکه، محدوده شبکه را به تعدادی ناحیه کوچکتر تقسیم کرده و سپس معیار انتخاب سرخوشه بر مبنای حداکثر وزن در هر محدوده اعمال گردد. طبیعی است که در هر دور پس از تعیین تعداد خوشه‌ها، شبکه به همان تعداد ناحیه تقسیم شده است. به این ترتیب در هر ناحیه جدید، پس از محاسبه رابطه (۵) بر اساس معیار حداکثر وزن، یک سرخوشه در آن ناحیه انتخاب و سپس بر اساس معیار حداقل فاصله اقلیدسی، اعضای هر خوشه مشخص خواهند شد. با بررسی نتایج شبیه‌سازی به ازای شرایط مختلف که در شکل ۲ تعدادی از این حالت‌ها نمایش داده شده است؛ ۹ درصد گره‌های زنده برای تعیین تعداد خوشه‌ها در هر دور در نظر گرفته شده است. در توضیح علت انتخاب این تعداد خوشه در هر دور، بدیهی است با افزایش تعداد خوشه‌ها در کنار ناحیه‌بندی شبکه، هزینه ارسال اطلاعات از هر گره به سرخوشه آن کاهش خواهد یافت، در مقابل میزان مصرف انرژی سرخوشه‌های دورتر از ایستگاه پایه برای ارسال اطلاعات به ایستگاه پایه افزایش یافته که این میزان مصرف را می‌توان تا حدودی، با ارائه روش مسیریابی مناسب جبران کرد. به این ترتیب برای انتخاب تعداد سرخوشه در هر دور باید بین تعداد خوشه‌ها و میزان مصرف انرژی موازنه برقرار گردد.



شکل ۲. مقایسه میانگین انرژی شبکه به ازای تعداد خوشه‌های مختلف

در فرآیند ناحیه‌بندی شبکه، تعداد نواحی که شبکه می‌تواند به آنها تقسیم شود اعداد مشخصی در نظر گرفته شده است که بسته به میزان گره‌های زنده و محاسبه تعداد خوشه مورد نظر در هر دور، تعداد نواحی شبکه به نزدیکترین سطح از پیش تعیین شده، گرد شده است. به این ترتیب ناحیه‌بندی شبکه در هر دور انجام می‌پذیرد. در جدول ۲ سطوح در نظر گرفته شده برای ناحیه‌بندی شبکه و نحوه تقسیم شبکه به هریک از این سطوح

نماید. از این رو به هر میزان که گره‌های بیشتری در همسایگی گره سرخوشه وجود داشته باشند، اعضای خوشه از بین این همسایگان با فاصله نزدیکتر به سرخوشه انتخاب شده و به همین میزان، مصرف انرژی در تبادل اطلاعات بین سرخوشه و اعضای خوشه کاهش خواهد یافت. برای محاسبه تعداد همسایه‌های یک گره حسگر به کمک یک سطح آستانه مطابق [۲] که در رابطه (۴) به آن اشاره شده است، گره‌های نزدیکتر از این سطح آستانه به عنوان همسایه‌های گره مورد نظر لحاظ می‌شوند.

$$d_N = \sqrt{\frac{E_{fs}}{E_{mp}}} \quad (4)$$

در شبکه‌های حسگر، اصلی‌ترین عامل مصرف انرژی، ارسال اطلاعات از هر گره به سرخوشه و سپس ارسال آنها توسط سرخوشه‌ها به ایستگاه پایه خواهد بود. لذا در تعیین سرخوشه باید سعی شود حتی المقدور گره‌های سرخوشه، نزدیک به ایستگاه پایه انتخاب گردند. همچنین جهت جلوگیری از مصرف انرژی در ارسال اطلاعات به سرخوشه و سپس ارسال اطلاعات، جمع‌بندی شده در سرخوشه‌ها به ایستگاه پایه، بهتر است توزیع خوشه‌ها در تمام مناطق و به خصوص در مناطق پر تراکم صورت گیرد. در جدول ۱ عوامل موثر در انتخاب سرخوشه‌ها که پیش‌تر توضیح داده شدند، جمع‌بندی شده است.

جدول ۱. عوامل موثر در انتخاب سرخوشه‌ها

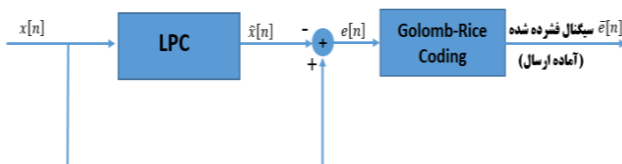
ارتباط با شانس انتخاب سرخوشه	پارامتر موثر در خوشه‌بندی
رابطه مستقیم	انرژی هر گره (E_{rem})
رابطه مستقیم	میزان برداشت انرژی (E_{EH})
رابطه مستقیم	تعداد همسایه‌های هر گره (N)
رابطه عکس	فاصله گره تا ایستگاه پایه $(d_{i,BS})$

بنابراین برای بررسی شانس هر گره جهت انتخاب به عنوان سرخوشه، معیاری مطابق رابطه زیر ارائه گردیده است:

$$W(i, r) = \frac{E_{rem}(i, r) \times E_{EH}(i, r) \times |N|(i, r)}{d_{i,BS}} \quad (5)$$

پس از محاسبه این رابطه که نمایانگر وزن گره i -ام در دور r -ام می‌باشد؛ بر مبنای حداکثر وزن، سرخوشه‌های مورد نظر تعیین می‌شوند. در رویکرد بیان شده با توجه به در نظر گرفتن حداکثر وزن برای انتخاب سرخوشه در کنار سایر معیارها، گره‌هایی با حداقل فاصله تا ایستگاه پایه در اولویت انتخاب به عنوان

رایس انجام شده است. این پیش‌بینی خطی در حالت کلی مطابق رابطه (۶) تا P داده، قبل از اطلاعات موجود را برای تخمین مورد استفاده قرار داده است که بسته به دقت مورد نیاز می‌توان این حافظه را تعیین نمود. در این مقاله، جهت سادگی پیاده‌سازی و جلوگیری از تحمیل هزینه بالای فشرده‌سازی، همانند روابط پیشنهاد شده توسط شرکت HP در [۱۷] برای تخمین خطی به کار رفته در فشرده‌سازی سیگنال‌های صوتی، از $P = 2$ استفاده شده است. (مطابق روابط (۷) و (۸)). مطابق شکل ۳ در این روش فشرده‌سازی، ابتدا به کمک رابطه (۷) تخمینی از داده اصلی ارائه شده و سپس خطای تخمین در مقایسه با داده اصلی مطابق رابطه (۸) محاسبه می‌شود. پس از این مرحله، خطای تخمین به روش کدگذاری گلمب-رایس که در بخش بعدی توضیح داده شده است، کد می‌شود. به این ترتیب فشرده‌سازی مورد نظر انجام می‌گیرد.



شکل ۳. نمودار بلوکی روش فشرده‌سازی پیشنهادی

$$\hat{x}[n] = \sum_{i=1}^P a_i x[n-i]. \quad (۶)$$

$$\hat{x}[n] = 2 * x[n-1] - x[n-2]. \quad (۷)$$

$$e[n] = x[n] - \hat{x}[n]. \quad (۸)$$

در روابط فوق $\hat{x}[n]$ تخمین خطی از $x[n]$ ، ضریب تاثیر حافظه i -م داده مورد نظر در رابطه تخمین و $e[n]$ میزان خطای این تخمین می‌باشد. همچنین n شماره نمونه اطلاعات جاری هر گره حسگر است که شامل یک یا چند بیت داده بوده و در هر بار ارسال اطلاعات، به ایستگاه پایه انتقال می‌یابد.

نحوه کد کردن به روش گلمب-رایس^{۱۲}: کدگذاری گلمب-رایس یکی از روش‌های متداول کد کردن داده‌ها با پیاده‌سازی نسبتاً ساده می‌باشد. اولین گام در پیاده‌سازی این روش انتخاب یک مقدار مناسب برای متغیر M به عنوان پارامتر کدگذاری بوده است، مقدار این پارامتر با توجه به داده‌هایی که قرار است کد شوند و همچنین از طریق آزمایش اعداد مختلف، بدست خواهد آمد. یک قاعده کلی برای تعیین M آن است که برای

نمایش داده شده است. در این تقسیم‌بندی برای صرف توان کمتر در انتقال اطلاعات از هر خوشه تا ایستگاه پایه، اولویت تقسیم‌بندی به این ترتیب خواهد بود که همواره باید تعداد تقسیمات بیشتر در محور افقی (محور x) قرار گیرند تا تعداد خوشه‌های بیشتری در تماس مستقیم با ایستگاه پایه باشند.

جدول ۲. نحوه ناحیه‌بندی شبکه

تعداد ناحیه	نحوه تقسیم شبکه
۹	(محور y) 3×3 (محور x)
۸	(محور y) 4×2 (محور x)
۶	(محور y) 3×2 (محور x)
۴	(محور y) 2×2 (محور x)
۲	(محور y) 2×1 (محور x)

روش فشرده‌سازی

پس از اعمال خوشه‌بندی بر مبنای حداکثر وزن، در هر خوشه اطلاعات گره‌های غیر سرخوشه برای سرخوشه ارسال شده است. آنگاه پس از دریافت اطلاعات توسط سرخوشه، داده‌های مشترک بررسی و پیش از ارسال آنها به ایستگاه پایه، به کمک روش فشرده‌سازی اطلاعات، تجمیع یا حذف داده‌های مشابه انجام خواهد شد. در فرآیند فشرده‌سازی اطلاعات بسته به نوع الگوریتم مورد استفاده علاوه بر صرفه‌جویی در پهنای باند مورد نیاز برای ارسال داده‌ها، انرژی مورد نیاز برای ارسال داده‌ها نیز کاهش یافته است. در فشرده‌سازی اطلاعات دو پارامتر اساسی مورد بحث قرار گرفته است که باید بسته به نوع کاربرد بین این دو پارامتر مصالحه صورت گیرد. اولین معیار، نسبت فشرده‌سازی است که هرچه بیشتر باشد صرفه‌جویی در توان و پهنای باند بیشتر صورت می‌گیرد و دومین معیار، درصد خطای فشرده‌سازی است که معمولاً (در فشرده‌سازی با اتلاف) با افزایش نسبت فشرده‌سازی این درصد افزایش می‌یابد. همانطور که بیان شد در کاربردهای مختلف اهمیت هریک از دو معیار ذکر شده متفاوت خواهد بود و باید متناسب با کاربرد، مصالحه‌ای بین این دو معیار برقرار گردد. در این قسمت به ارائه الگوریتمی ساده با نسبت فشرده‌سازی پایین و درصد خطای صفر پرداخته شده است.

در این روش ابتدا یک تخمین خطی ساده از داده مورد نظر مبتنی بر داده‌های قبلی ارائه گردیده و سپس به کمک خطای تخمین مورد نظر، فشرده‌سازی با استفاده از کدینگ گلمب-

^{۱۲} Golomb-Rice

روش مسیریابی

بعد از جمع آوری اطلاعات توسط گره های حسگر و ارسال آنها به سرخوشه مربوطه، مطابق با الگوریتم فشرده سازی ارائه شده حجم اطلاعات رسیده به هر سرخوشه کاهش یافته و سپس به کمک یک الگوریتم مسیریابی مناسب این اطلاعات به ایستگاه پایه ارسال شده است.

در روش مسیریابی پیشنهادی ابتدا به محاسبه مکانی بهینه برای یک گره واسط بین هر سرخوشه و ایستگاه پایه پرداخته شده است. این گره، وظیفه تحویل گرفتن اطلاعات از سرخوشه مربوطه و سپس ارسال آنها به ایستگاه پایه را برعهده دارد و علاوه بر دارا بودن قابلیت برداشت انرژی به دلیل صرفه جویی در مصرف توان، از وظیفه جمع آوری اطلاعات محیطی معاف می شود. در ادامه، ابتدا مکان بهینه این گره برای هر خوشه تعیین گردیده و سپس توضیحات تکمیلی در مورد این روش مسیریابی ارائه شده است.

قضیه: زمانی مصرف انرژی گره سرخوشه برای ارسال اطلاعات به گره برداشت انرژی واسط حداقل خواهد شد که گره برداشت انرژی واسط، روی خط واصل بین ایستگاه پایه و سرخوشه قرار داشته باشد.

اثبات: با فرض انتخاب یک گره به عنوان واسط بین سرخوشه و ایستگاه پایه مصرف انرژی سرخوشه مورد نظر ناشی از دریافت و ارسال اطلاعات به صورت رابطه (۱۰) خواهد بود:

$$P_{CH} = E_{elec}rN + E_{DA}rN + E_{amp}d_{CH,EH}^2r. \quad (10)$$

که r نرخ انتقال اطلاعات، N تعداد کل گره های شبکه، E_{amp} ضریب مصرف انرژی تقویت کننده انتقال، E_{DA} انرژی مصرفی جهت جمع آوری داده ها، E_{elec} انرژی مورد نیاز برای پردازش هر بیت، $d_{CH,EH}$ فاصله بین گره سرخوشه و گره برداشت انرژی مربوط به ارسال اطلاعات همان خوشه است.

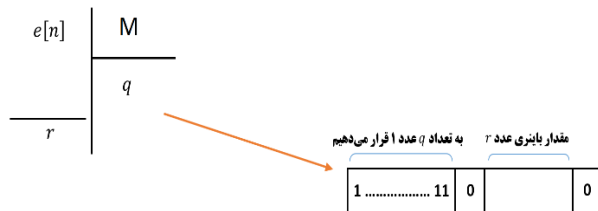
اگر گره برداشت انرژی واسط بین سرخوشه و ایستگاه پایه روی خط واصل سرخوشه و ایستگاه پایه قرار نداشته باشد؛ آنگاه رابطه زیر برقرار خواهد بود:

$$d_{CH,EH} \geq d_{CH,BS} - d_{EH,BS}. \quad (11)$$

در رابطه فوق $d_{EH,BS}$ ، $d_{CH,BS}$ و $d_{CH,EH}$ به ترتیب فاصله گره برداشت انرژی مورد نظر تا ایستگاه پایه، فاصله گره سرخوشه تا ایستگاه پایه و فاصله گره سرخوشه تا گره برداشت انرژی مورد بحث است. با جایگذاری رابطه (۱۱) در رابطه (۱۰) خواهیم داشت:

$$P_{CH} \geq E_{elec}rN + E_{DA}rN + E_{amp}(d_{CH,BS} - d_{EH,BS})^2r. \quad (12)$$

داده های بزرگ، مقدار بهینه M عددی بزرگ و برای داده های کوچک، مقدار بهینه M عددی کوچک خواهد بود. نحوه کدگذاری به روش گلمب-رایس در شکل ۴ نمایش داده شده است [۱۸]. مطابق این شکل، خطای حاصل از تخمین بر عدد M تقسیم می شود و به تعداد عدد محاسبه شده در خارج قسمت تقسیم، عدد یک در شروع کد قرار می گیرد. سپس یک عدد صفر برای جداسازی بین دو قسمت کد لحاظ شده و پس از آن معادل باینری عدد باقی مانده همراه با یک صفر جداکننده در انتهای آن در قسمت پایانی کد قرار می گیرد. در روش ارائه شده در این مقاله به دلیل کوچک بودن خطای تخمین از مقادیر



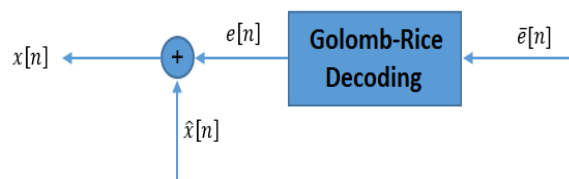
کوچک برای $M = 2$ استفاده شده است.

شکل ۴. کدگذاری به روش گلمب-رایس

پس از ارسال اطلاعات فشرده شده برای ایستگاه پایه، عملیات عکس فشرده سازی به کمک رابطه (۹) و به صورت نمایش داده شده در شکل ۵ انجام خواهد شد. مطابق این شکل ابتدا داده فشرده شده در گیرنده به روش عکس کدگذاری گلمب-رایس به ضرایب q و r تبدیل شده و مطابق رابطه (۹) خطای تخمین که در روش فشرده سازی محاسبه شده بود، بازیابی می گردد. در پایان به کمک رابطه (۸) داده اصلی که توسط فرستنده فشرده شده بود، آشکار می شود. با شبیه سازی این روش فشرده سازی، بدون ازدست رفتن اطلاعات، نسبت فشرده سازی ۰٫۶۲ حاصل شده است.

$$e[n] = (M * q) + r. \quad (9)$$

در این رابطه M پارامتر کدگذاری بوده، q و r نیز به ترتیب خارج قسمت و باقی مانده تقسیم $e[n]$ بر M بوده است.



شکل ۵. نمودار بلوکی روش گسترده کردن داده های فشرده شده

به صورت مجزا مکان گره برداشت انرژی واسط محاسبه شده است. به علت ماهیت تصادفی گره‌های توزیع شده در شبکه، پس از محاسبه مختصات گره برداشت انرژی واسط باید نزدیکترین گره به این مکان را به عنوان گره برداشت انرژی واسط برای خوشه متناظر آن در نظر گرفت. پس از انتخاب این گره‌های واسط برای هر خوشه، در فرآیند تشکیل خوشه‌ها، این گره‌ها به عنوان اعضای هیچ خوشه‌ای انتخاب نشده، هیچ داده‌ای را از محیط جمع‌آوری نمی‌کنند و تمام انرژی ذخیره شده در باتری خود را صرف انتقال اطلاعات از سرخوشه به ایستگاه پایه خواهند کرد.

در این روش مسیریابی به دلیل صرف توان بالا برای انتقال اطلاعات هر خوشه به ایستگاه پایه و همچنین عدم تداوم برداشت انرژی به دلیل استفاده از برداشت انرژی خورشیدی که تنها در مقاطعی از طول روز قابل تحقق است، در صورت استفاده مداوم از این گره برای ارسال اطلاعات خوشه، انرژی گره به اتمام رسیده و گره مورد نظر می‌میرد. به این ترتیب ارسال اطلاعات با چالش مواجه خواهد شد. برای رفع این مشکل در مقاطع زمانی که برداشت انرژی خورشیدی توسط گره برداشت انرژی واسط صورت نمی‌گیرد از مسیریابی سلسله مراتبی استفاده شده است و در سایر زمان‌ها که انرژی مناسبی در این گره ذخیره شده و همزمان برداشت انرژی نیز تداوم دارد از روش ارسال اطلاعات توسط گره برداشت انرژی واسط استفاده شده است.

در روش مسیریابی سلسله مراتبی، هر سرخوشه پس از جمع اطلاعات گره‌های عضو آن خوشه و فشرده‌سازی آنها به روش-هایی که پیش‌تر توضیح داده شد، نزدیکترین سرخوشه بین خود و ایستگاه پایه را انتخاب نموده و اطلاعات را برای آن سرخوشه ارسال خواهد کرد. در مرحله بعدی سرخوشه مقصد، اطلاعات فشرده شده مربوط به خوشه خود را با اطلاعات دریافتی از خوشه اول جمع کرده و با یافتن نزدیکترین سرخوشه بین خود و ایستگاه پایه این اطلاعات را برای سرخوشه مورد نظر ارسال خواهد شد. این فرآیند آنقدر ادامه خواهد یافت تا اطلاعات به نزدیکترین سرخوشه تا ایستگاه پایه رسیده و در این مرحله اطلاعات به صورت مستقیم به ایستگاه پایه ارسال خواهد شد. این روش به خصوص در سرخوشه‌های نزدیک به ایستگاه پایه به دلیل حجم بالای اطلاعات (ناشی از داده‌های خوشه خود و سایر خوشه‌های دورتر) جهت ارسال به ایستگاه پایه منجر به مصرف توان زیادی توسط این گره‌ها شده و لذا قادر است روند مرگ و میر گره‌ها را افزایش داده و میانگین انرژی گره‌های شبکه را کاهش دهد. به همین دلیل تنها در مواقع توقف برداشت انرژی خورشیدی و به دلیلی که پیش‌تر توضیح داده شد از این روش مسیریابی استفاده شده است. در شکل ۶ نمودار گردش الگوریتم فصلنامه صنایع الکترونیک دوره ۱۱، شماره ۱- بهار ۱۳۹۹

مطابق روابط (۱۱) و (۱۲) وقتی مقدار P_{CH} حداقل خواهد شد که نامساوی رابطه (۱۲) تبدیل به تساوی شود. در این حالت گره برداشت انرژی واسط، روی خط وصل بین ایستگاه پایه و سرخوشه قرار می‌گیرد (پایان اثبات).

اکنون به سراغ تعیین مکان گره برداشت انرژی واسط خواهیم رفت که وظیفه انتقال اطلاعات از سرخوشه به ایستگاه پایه را برعهده دارد. شرط جلوگیری از مرگ گره برداشت انرژی واسط در رابطه زیر بیان شده است:

$$P_{EH,c} \leq P_{EH,h} \quad (13)$$

که $P_{EH,c}$ نرخ مصرف انرژی گره برداشت انرژی واسط و $P_{EH,h}$ نرخ برداشت انرژی گره برداشت انرژی واسط است. مقدار $P_{EH,c}$ در رابطه (۱۴) نمایش داده شده است:

$$P_{CH,c} = E_{elec}r + E_{amp}d_{EH,BS}^2r \quad (14)$$

هرچقدر $P_{EH,c}$ کوچکتر از $P_{EH,h}$ باشد وضعیت انرژی گره در شرایط مناسب‌تری بوده و همواره بسته به میزان انرژی اولیه گره برداشت انرژی واسط، مقداری انرژی به صورت ذخیره شده در آن باقی خواهد ماند. از آنجائیکه با فاصله گرفتن مقادیر طرفین این نامساوی، برای کاهش مصرف انرژی توسط گره برداشت انرژی واسط، لازم است گره برداشت انرژی مذکور به ایستگاه پایه نزدیکتر و از گره سرخوشه متناظر دورتر شود؛ لذا مصرف توان سرخوشه برای ارسال اطلاعات به گره برداشت انرژی واسط افزایش خواهد یافت. به این ترتیب در بهترین شرایط و برای ایجاد موازنه بین مصرف توان سرخوشه و گره برداشت انرژی واسط باید رابطه $P_{EH,c} = P_{EH,h}$ برقرار گردد. بنابراین مقدار $P_{EH,h}$ به صورت رابطه (۱۵) مدل شده است:

$$P_{EH,h} = E_{elec}r + E_{amp}d_{EH,BS}^2r \quad (15)$$

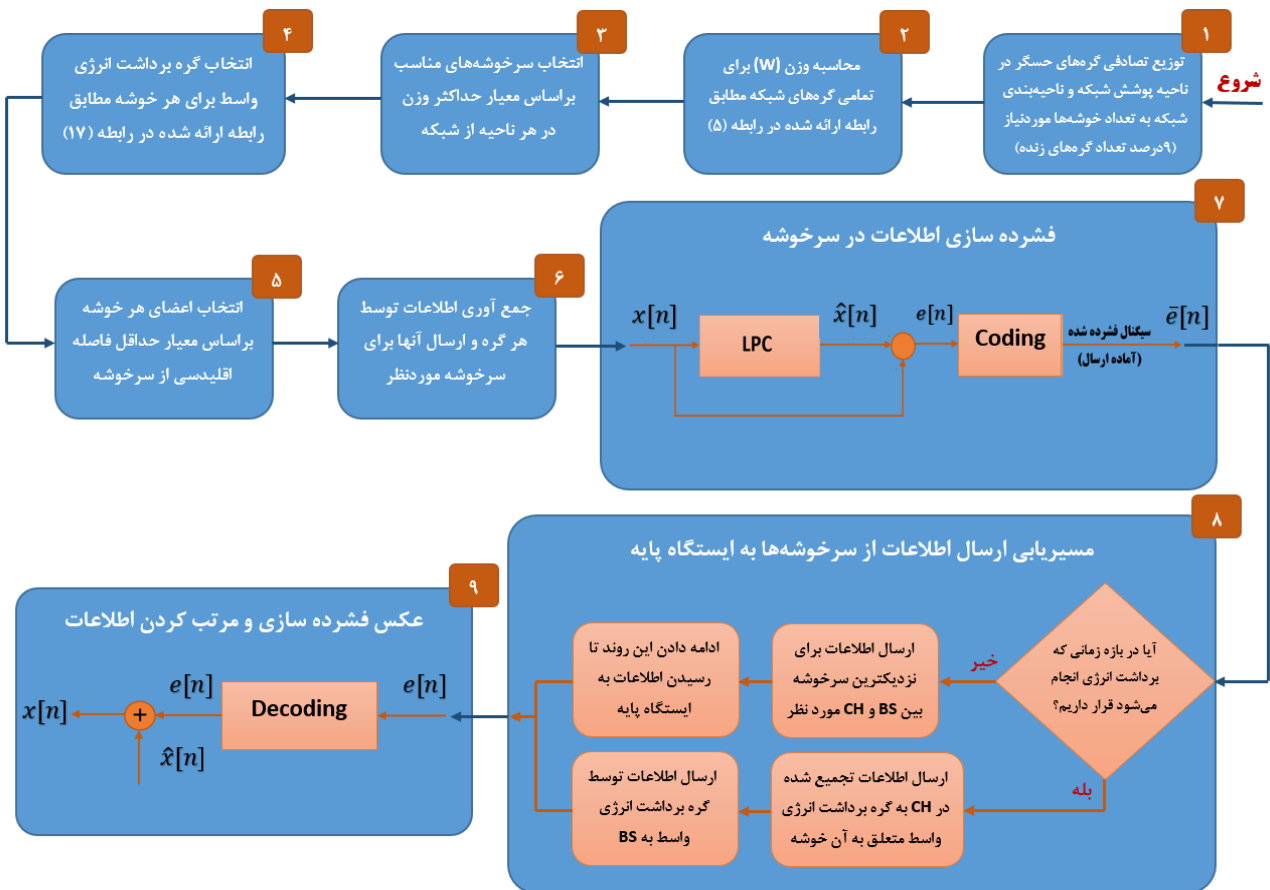
با استفاده از رابطه (۱۵) فاصله گره برداشت انرژی واسط تا ایستگاه پایه برای حالت بهینه به صورت رابطه زیر محاسبه شده است:

$$d_{EH,BS} = \sqrt{\frac{P_{EH,h} - E_{elec}r}{E_{amp}r}} \quad (16)$$

سپس به کمک مکان سرخوشه‌های انتخاب شده و فاصله محاسبه شده برای گره برداشت انرژی واسط تا ایستگاه پایه مطابق رابطه (۱۶)، برای هر خوشه یک گره برداشت انرژی واسط بر روی خط وصل سرخوشه و ایستگاه پایه به صورت زیر تعیین شده است:

$$(X_{EH}, Y_{EH}) = (50 + (\cos \theta)(d_{EH,BS}), 1500 - (\sin \theta)(d_{EH,BS})) \quad (17)$$

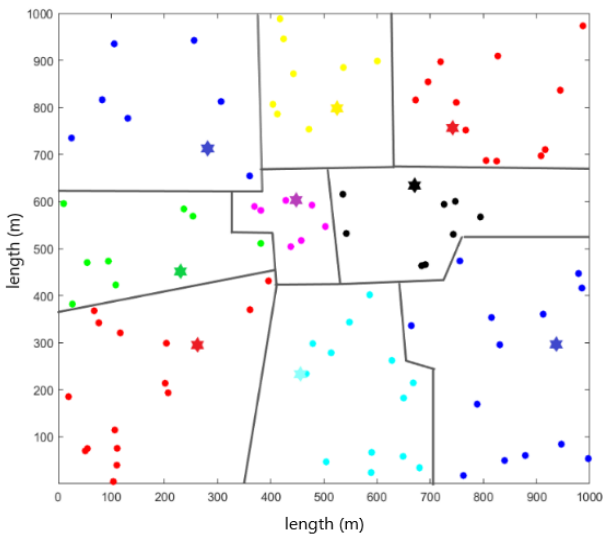
$$\theta = \arctan\left(\frac{1500 - Y_{CH}}{X_{CH} - 50}\right) \quad (18)$$



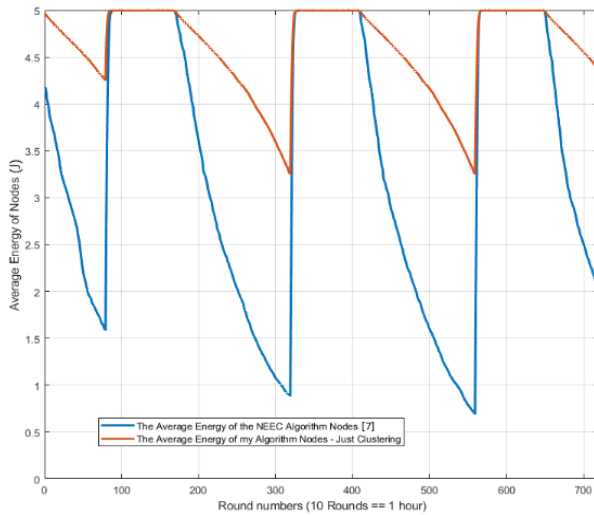
شکل ۶. نمودار گردش الگوریتم ارائه شده جهت کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه

نتایج شبیه سازی

در این بخش به مقایسه روش پیشنهادی با الگوریتم NEEC در اول خود در مقام مقایسه با دو روش دیگر نتایج بهتری داشته است و ثانیاً در سال های اخیر یک روش برای خوشه بندی و مسیریابی شبکه های حسگر بیسیم برداشت کننده انرژی ارائه کرده و جزء شبیه ترین مقالات به مقاله مورد بحث از نظر روش به کار گرفته شده در آن می باشد، پرداخته شده است. همچنین برای شبیه سازی، فرض امکان برداشت انرژی برای تمامی گره ها در نظر گرفته شده است. برخی از پارامترهایی که در طراحی و شبیه سازی شبکه مورد استفاده قرار گرفته اند در جدول ۳ ذکر شده است. در شکل ۷ نیز نمایی از گره های حسگر و نحوه خوشه بندی آنها مطابق با الگوریتم پیشنهادی، نمایش داده شده است. در این شکل علامت ستاره نمایانگر سرخوشه ها و علامت دایره نمایانگر اعضای هر خوشه است. همچنین هر رنگ نشان دهنده یک خوشه می باشد.



شکل ۷. نمایی از خوشه بندی در الگوریتم پیشنهادی



شکل ۹. مقایسه میانگین انرژی گره‌های زنده دو الگوریتم با اعمال خوشه‌بندی پیشنهادی

مرده و افزایش مقدار میانگین انرژی گره‌ها، کاملاً مشهود است. اعمال تغییراتی که پیش‌تر در توضیح الگوریتم خوشه‌بندی پیشنهادی بیان شد منجر به بهبود این روش خوشه‌بندی نسبت به روش ارائه شده در الگوریتم NEEC شده است. از جمله این تغییرات می‌توان به بهینه‌سازی و ساده‌سازی وزن محاسبه شده برای هر گره که در انتخاب گره‌های سرخوشه موثر است، افزایش تعداد خوشه‌ها نسبت به الگوریتم NEEC جهت مصرف انرژی کمتر در گره‌ها برای ارسال اطلاعات به سرخوشه‌ها و همچنین ناحیه‌بندی شبکه برای انتخاب سرخوشه‌ها از تمامی نواحی پرتراکم شبکه که علاوه بر صرفه‌جویی در ارسال اطلاعات به ایستگاه پایه، برای ارائه الگوریتم مسیریابی پیشنهادی نیز مورد استفاده قرار گرفته است، اشاره نمود.

مقایسه روش خوشه‌بندی و مسیریابی

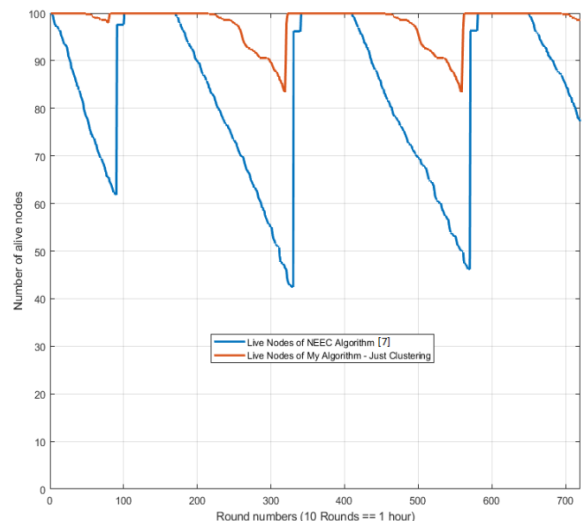
در این بخش علاوه بر خوشه‌بندی، مسیریابی ارائه شده در این مقاله نیز در الگوریتم شبیه‌سازی شده اعمال گردیده و از همان روش برداشت انرژی مورد استفاده در الگوریتم NEEC استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مورد نظر در شکل ۱۰ و ۱۱ به نمایش گذاشته شده است که به ترتیب نمایانگر مقایسه تعداد گره‌های زنده و میانگین انرژی گره‌ها در طول سه شبانه روز برای دو الگوریتم می‌باشند. این نتایج نشان می‌دهند الگوریتم خوشه‌بندی و مسیریابی پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم NEEC، نه تنها شامل تعداد مرگ و میر کمتر گره‌ها بوده بلکه میانگین انرژی گره‌ها نیز در روش پیشنهادی بیشتر شده است.

جدول ۳. پارامترهای شبکه مورد بحث

مقدار	پارامتر
1000 m × 1000 m	ابعاد شبکه مورد بحث
100	تعداد گره‌های حسگر (N)
(50,1500)	موقعیت ایستگاه پایه
5 J	ظرفیت ذخیره‌سازی باتری حسگرها (E_{max})
5 J	انرژی اولیه هر حسگر
0.1 J	سطح آستانه برای مرگ یک حسگر زنده
1 J	سطح آستانه برای زنده شدن یک حسگر مرده
5 Nj/bit/message	انرژی مورد نیاز جهت جمع‌آوری اطلاعات (E_{DA})
10 pJ/bit/m ²	انرژی مورد نیاز برای ارسال هر بیت (E_{amp})
50 nJ/bit/m ²	انرژی مورد نیاز برای پردازش هر بیت اطلاعات (E_{elec})
2.5×10^5 bit/sec	نرخ انتقال اطلاعات (r)

مقایسه روش خوشه‌بندی

برای انجام این مقایسه، میانگین انرژی گره‌ها و تعداد گره‌های زنده در الگوریتم NEEC با روش خوشه‌بندی پیشنهادی شده در این مقاله به ترتیب در دو نمودار مجزا و با قرار دادن نتایج دو الگوریتم بر روی یک شکل نمایش داده شده است. در این حالت شکل ۸ و ۹ به ترتیب نمایانگر تعداد گره‌های زنده و میانگین انرژی گره‌ها در طول سه شبانه روز برای حالتی است که تنها روش خوشه‌بندی پیشنهادی اعمال شده و مسیریابی مورد استفاده همان مسیریابی الگوریتم NEEC است. در این مقایسه برتری الگوریتم پیشنهادی از نظر کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه به دلیل کاهش تعداد گره‌های



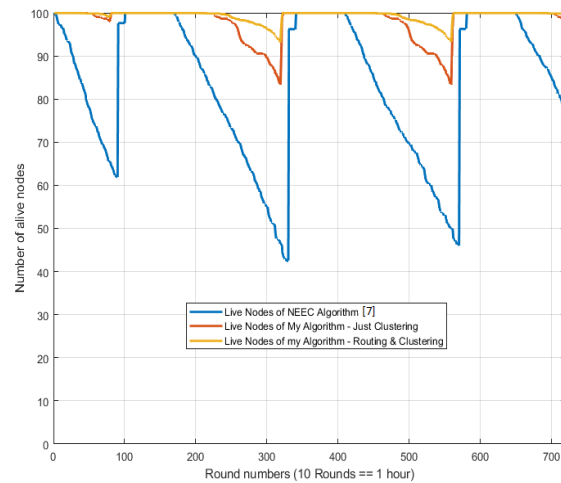
شکل ۱۰. مقایسه تعداد گره‌های زنده دو الگوریتم با اعمال خوشه‌بندی پیشنهادی

انرژی توسط شبکه و به دلیل کمبود انرژی گره های برداشت انرژی مختص هر خوشه، از سرخوشه ها برای ارسال اطلاعات به ایستگاه پایه استفاده شده است.

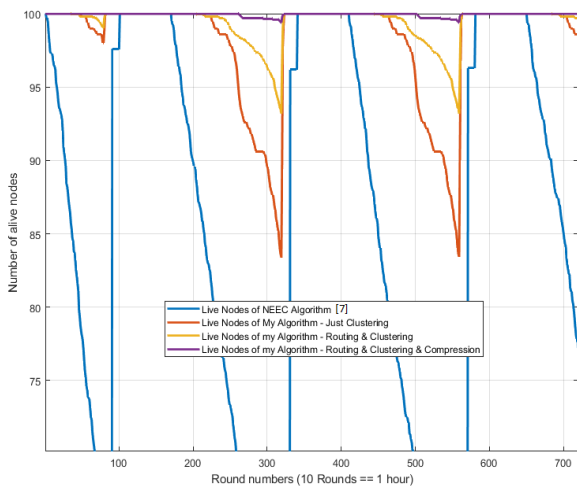
مقایسه خوشه بندی، مسیریابی و فشرده سازی

در این بخش علاوه بر خوشه بندی و مسیریابی، روش فشرده سازی ارائه شده در این مقاله نیز در الگوریتم شبیه سازی شده اعمال و نتایجی مطابق با شکل ۱۲ و ۱۳ حاصل شده است؛ که به ترتیب تعداد گره های زنده و میانگین انرژی گره ها در طول سه شبانه روز را برای دو الگوریتم نمایش داده است. پس از اعمال هر سه روش پیشنهادی رشد قابل ملاحظه ای در میانگین انرژی گره های حسگر و تعداد گره های زنده قابل مشاهده بوده، چنانکه در الگوریتم پیشنهادی تقریباً در طول سه شبانه روز هیچ گره ای دچار مرگ نشده است (میانگین تعداد گره های زنده برای این الگوریتم در طی سه شبانه روز برابر ۹۹،۹۵ عدد از تعداد کل ۱۰۰ گره بوده است) لذا برتری این الگوریتم از نظر کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه مطابق نتایج شبیه سازی کاملاً مشهود بوده است. در این بخش به دلیل فشرده سازی اطلاعات در سرخوشه ها حجم اطلاعات ارسالی به سمت ایستگاه پایه کاهش یافته و به این ترتیب علاوه بر صرف پهنای باند کمتر و حفاظت اطلاعات در مقابل نویز و اغتشاشات بیرونی، منجر به کاهش مصرف انرژی سرخوشه و یا هرکدام از گره های واسط در فرآیند مسیریابی شده است. بنابراین طول عمر گره های شبکه بهبود یافته و میانگین انرژی گره های شبکه نیز نسبت به قبل از شرایط بهتری برخوردار خواهند بود.

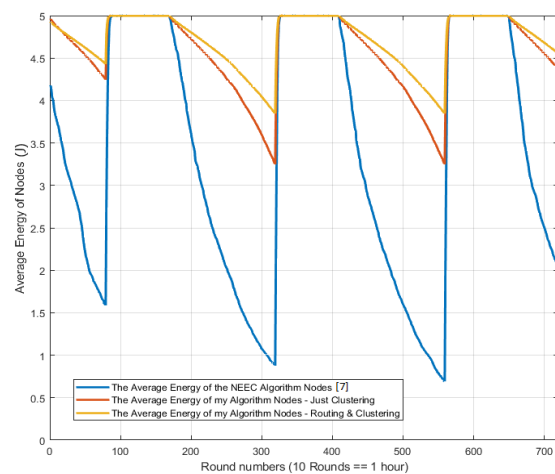
لذا برتری الگوریتم پیشنهادی از نظر کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه کاملاً مشهود است. مهمترین دلیل بهبود الگوریتم مسیریابی پیشنهادی نسبت به مسیریابی ارائه شده در الگوریتم NEEC آن است که الگوریتم پیشنهادی از یک روش مسیریابی ترکیبی بهره برده است. در این الگوریتم در بازه های زمانی برداشت انرژی خورشیدی، از گره برداشت انرژی مختص هر خوشه جهت ارسال اطلاعات استفاده شده و در مابقی زمان ها از روش ارسال اطلاعات به نزدیکترین سرخوشه استفاده خواهد شد. این روند تا رسیدن اطلاعات به ایستگاه پایه ادامه خواهد یافت. به این ترتیب در شرایطی که انرژی مناسبی در گره برداشت انرژی مختص هر خوشه موجود باشد و این گره ها از انجام هر کاری به جز انتقال اطلاعات از سرخوشه تا ایستگاه پایه معاف باشند، از این گره ها به عنوان واسط بین سرخوشه ها و ایستگاه پایه استفاده شده است. تنها در مواقع عدم برداشت



شکل ۱۰. مقایسه تعداد گره های زنده دو الگوریتم با اعمال خوشه بندی و مسیریابی پیشنهادی



شکل ۱۲. مقایسه تعداد گره های زنده دو الگوریتم با اعمال خوشه بندی، مسیریابی و فشرده سازی پیشنهادی

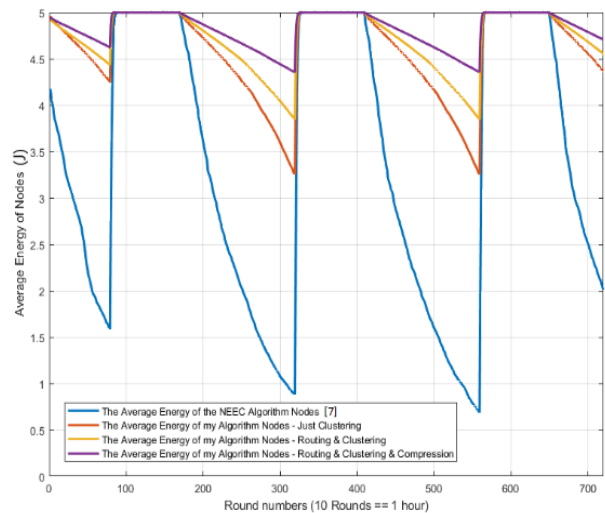


شکل ۱۱. مقایسه میانگین انرژی گره های زنده دو الگوریتم با اعمال خوشه بندی و مسیریابی پیشنهادی

گره‌های شبکه یکی از دو مسیریابی مورد نظر را انتخاب خواهد کرد)، میانگین انرژی گره‌ها و تعداد گره‌های زنده در الگوریتم پیشنهادی را نسبت به الگوریتم NEEC بهبود دهد. لذا بهبود سطح انرژی گره‌ها و تعداد گره‌های زنده نشان از مناسب بودن الگوریتم پیشنهادی درمقایسه با الگوریتم NEEC و بسیاری از الگوریتم‌های مشابه آن خواهد داشت.

مراجع

- [1] H. Tavakkolai, N. Yadollahi, M. Yadollahi, A. Asghar, and R. Hosseinabadi, "Sensor selection wireless multimedia sensor network using gravitational search algorithm," *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 1–6, 2015.
- [2] A. S. M. Zahid Kausar, A. Wasif Reza, M. Uddin Saleh, and H. Ramiah, "Energizing wireless sensor networks by energy harvesting systems: Scopes, challenges and approaches," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, no. 2, pp. 973–989, Oct. 2014.
- [3] W. Lu, Y. Gong, X. Liu, J. Wu, and H. Peng, "Collaborative energy and information transfer in green wireless sensor networks for smart cities," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 14, no. 4, pp. 1585–1593, 2018.
- [4] W. Liu and Y. Wu, "Routing protocol based on genetic algorithm for energy harvesting-wireless sensor networks," *IET Wirel. Sens. Syst.*, vol. 3, no. 2, pp. 112–118, Jun. 2013.
- [5] D. Zorbas, P. Raveneau, Y. Ghamri-Doudane, and C. Douligieris, "The charger positioning problem in clustered RF-power harvesting wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 78, no. 2, pp. 42–53, 2018.
- [6] P. Zhang, G. Xiao, and H.P. Tan, "Clustering algorithms for maximizing the lifetime of wireless sensor networks with energy-harvesting sensors," *Comput. Networks*, vol. 57, no. 14, pp. 2689–2704, 2013.
- [7] S. M. Bozorgi, A. Shokouhi Rostami, A. A. R. Hosseinabadi, and V. E. Balas, "A new clustering protocol for energy harvesting-wireless sensor networks," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 64, no. 1, pp. 233–247, Nov. 2017.
- [8] C. Mahapatra, Z. Sheng, and P. Kamalinejad, "Optimal power control in green wireless sensor networks with wireless energy harvesting, wake-up radio and transmission control," *IEEE Access*, vol. 5, no. 1, pp. 501–518, 2017.
- [9] C. Wang, J. Li, Y. Yang, and F. Ye, "Combining solar energy harvesting with wireless charging for hybrid wireless sensor networks," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 17, no. 5, pp. 1560–1570, 2018.



شکل ۱۳. مقایسه میانگین انرژی گره‌های زنده دو الگوریتم با اعمال خوشه‌بندی، مسیریابی و فشردسازی پیشنهادی

پس از مشاهده برتری نتایج شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با روش NEEC برای مقایسه پیچیدگی دو الگوریتم، زمان اجرای این دو روش را در شرایط یکسان بررسی می‌نماییم. برای این منظور کدهای مربوط به شبیه‌سازی این دو الگوریتم را در یک رایانه با پردازنده Intel® Core™ i7-3632QM و حافظه RAM 6 GB به ازای ۱۰۰ بار تکرار الگوریتم اجرا نموده و مشاهده شده است که زمان اجرای الگوریتم NEEC برابر ۱۲۳۲٫۲۰۴ ثانیه (معادل ۲۰٫۵ دقیقه) می‌باشد در صورتیکه زمان اجرای الگوریتم پیشنهاد شده در این مقاله در همین شرایط برابر ۸۴۱٫۶۳۷ ثانیه (معادل ۱۴ دقیقه) می‌باشد. به این ترتیب برتری الگوریتم پیشنهاد شده در این مقاله هم از نظر کاهش پیچیدگی الگوریتم و هم از لحاظ بهبود نتایج شبیه‌سازی نسبت به روش NEEC به اثبات می‌رسد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله علاوه بر روش‌های مرسوم در مقالات و تحقیقات صورت گرفته پیرامون بهینه‌سازی مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم سعی در ارائه یک روش جامع، متشکل از خوشه‌بندی، مسیریابی، فشردسازی و برداشت انرژی به ساده‌ترین شکل و برای رسیدن به بهترین عملکرد ممکن بوده است. به این ترتیب چنانچه مشاهده شد الگوریتم ارائه شده در این مقاله با در نظر گرفتن یک روش خوشه‌بندی مناسب بر مبنای وزن‌دهی به گره‌ها، ناحیه‌بندی شبکه همراه با اعمال برداشت انرژی و استفاده از فشردسازی اطلاعات در سرخوشه توانسته همراه با مسدود شدن رهنه به‌صورت تک‌مسیر (که بسته به شرایط انرژی،

