

علمی - پژوهشی

مسیریابی چند پرشی آگاه به برداشت انرژی جهت به کارگیری در شبکه‌های حسگر بی سیم در حوزه پدافندی

زهرا حیدری قیری^۱، قاسم میرجلیلی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده برق دانشگاه یزد، ۲- استاد، دانشکده برق دانشگاه یزد

(دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۷، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۱۵)

چکیده

در شرایط بحرانی امروزی، شبکه‌های حسگر بی سیم به عنوان یکی از جدیدترین فناوری‌های ارتباطی برای استفاده در شرایط بحران، در حوزه پدافند غیرعامل توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. در این ارتباط، محدودیت منابع انرژی و در نتیجه عمر محدود این نوع شبکه، یک مشکل جدی برای به کارگیری آن در چنین کاربردهای حساسی است. به تازگی با ظهور روش‌های برداشت انرژی، غلبه بر این مشکل امکان پذیر شده است. در این مقاله، یک پروتکل جدید مسیریابی چند پرشی مبتنی بر خوشه بندی جهت به کارگیری در شبکه‌های حسگر بی سیم برداشت انرژی به نام R-DEARER پیشنهاد شده است. در این پروتکل از مسیریابی بین خوشه‌ای استفاده شده است تا ارتباط بین سرخوشه‌ها و چاهک به صورت چند پرشی انجام شود؛ به این صورت که سرخوشه‌ها بسته‌های خود را به سرخوشه‌های رله که سرخوشه‌های نزدیک به چاهک هستند، ارسال می کنند و سپس سرخوشه‌های رله بسته‌ها را به چاهک می فرستند. با به کارگیری این روش، انرژی مصرفی گره‌های سرخوشه کاهش می یابد که منجر به افزایش عمر شبکه و افزایش بازده انرژی می شود. در ادامه، به کمک تحلیل و ارزیابی نتایج عددی، عملکرد پروتکل پیشنهادی مورد بررسی قرار می گیرد. نتایج نشان می دهد که پروتکل پیشنهادی R-DEARER از نظر میزان بهره‌وری، نرخ ارسال بسته‌ها و احتمال قطع شبکه نسبت به روش مشابه که در آن ارتباط بین سرخوشه‌ها و چاهک به صورت تک پرشی است، عملکرد خیلی بهتری دارد.

کلیدواژه‌ها: شبکه‌های حسگر بی سیم، پدافند غیرعامل، برداشت انرژی، خوشه بندی، سرخوشه رله، مسیریابی بین خوشه‌ای

۱- مقدمه

مورد نیاز برای تعویض باتری را به شدت کاهش می دهد. روش‌های مدیریت انرژی نشان داده شده است که عمر گره‌های حسگر را برای نظارت بر محیط زیست طولانی تر می کند، اما میزان انرژی مورد نیاز حسگرها برای مدت طولانی، همچنان یک چالش است. از این رو، استفاده از برداشت انرژی برای پشتیبانی از برنامه‌های مدیریت فعلی موجود، امری ضروری است. در روش برداشت انرژی، گره‌های حسگر مجهز به دستگاه‌های برداشت انرژی مانند پانل‌های خورشیدی، ماشین‌های برداشت انرژی حرارتی و سلول‌های سوختی هستند که می توانند انرژی اضافی را از محیط پیرامون برداشت کنند. این نوع حسگرها را حسگرهای برداشت انرژی می نامند و شبکه‌های حسگر بی سیم که شامل حسگرهای برداشت انرژی هستند، به عنوان شبکه‌های حسگر بی سیم برداشت انرژی شناخته می شوند. برای دستیابی به طول عمر شبکه نامحدود، زمانی که گره‌های حسگر از انرژی برداشت شده به عنوان منبع انرژی استفاده می کنند، باید حالت خنثی انرژی برقرار باشد. در این حالت مصرف انرژی گره‌ها همیشه

با افزایش تهدیدات نظامی و بلایای طبیعی، نیاز به وجود سامانه‌های حسگری-ارتباطی مطمئن جهت تشخیص بهنگام این تهدیدات و گزارش دادن آنی آن‌ها، بیش از پیش احساس می شود. در این شرایط، شبکه‌های حسگر بی سیم یکی از بهترین گزینه‌هاست. یک شبکه حسگر بی سیم مجموعه‌ای از گره‌های حسگر است که با پیوند بی سیم به هم متصل شده‌اند [۱]. یکی از مشکلات اصلی شبکه‌های حسگر بی سیم، مسئله کمبود انرژی است که سبب کوتاه شدن عمر شبکه و اختلال در عملکرد پدافندی این شبکه‌ها در شرایط بحرانی می شود. برای حل این مشکل می توان از روش‌های برداشت انرژی برای پر کردن شکاف‌های انرژی استفاده کرد [۲]. استفاده از روش برداشت انرژی در سامانه‌های سازگار با محیط زیست، وابستگی گره‌های حسگر به توان باتری را از بین می برد و هزینه تعمیر و نگهداری

در پروتکل خوشه‌بندی مؤثر انرژی (NEEC) ارائه شده در [۸]، یک روش خوشه‌بندی جدید با اندازه نابرابر برای حل محدودیت‌های انرژی ارائه شده است. این روش در دو مرحله به شیوه توزیع شده و متمرکز انجام می‌شود و از روش ترکیب خوشه‌بندی ایستا و پویا استفاده می‌کند. پروتکل NEEC یک پروتکل مسیریابی چندمرحله‌ای بر اساس خوشه‌بندی و برداشت انرژی از محیط است که در آن انرژی مصرفی در شبکه متعادل، طول عمر شبکه نامحدود شده، بازدهی بهبود یافته و همچنین سرباری شبکه کاهش می‌یابد.

در [۹] روش تک مسیری برای انتقال داده از گره مبدأ به چاهک استفاده می‌شود و مجموعه‌ای از گره‌ها با حداکثر انرژی باقی‌مانده در طول مسیر به سمت چاهک در نظر گرفته می‌شود. همچنین در این روش اگر سطح انرژی یک گره افت کرد، گره‌های دیگری که انرژی بیشتری دارند، برای انتقال داده انتخاب می‌شوند.

با توجه به میزان مصرف زیادی از انرژی در مرحله انتخاب سرخوشه و انرژی برداشت شده نابرابر گره‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم برداشت انرژی، یک طرح انتخاب سرخوشه با کارایی انرژی با نام EECHS^۴ در [۱۰] ارائه شده است. در این پروتکل هر گره در خوشه به‌عنوان سرخوشه، عضو خوشه یا گره برنامه‌ریزی عمل می‌کند. گره برنامه‌ریزی برای نظارت و ذخیره اطلاعات انرژی باقی‌مانده در زمان واقعی همه گره‌ها، از جمله عضو خوشه و سرخوشه، در همان خوشه طراحی شده است. در مرحله انتخاب سرخوشه، گره برنامه‌ریزی با توجه به نتایج نظارت شده، یک گره عضو خوشه مربوطه را به‌عنوان گره سرخوشه جدید تعیین می‌کند، در نتیجه باعث کاهش مصرف انرژی ناشی از انتخاب سرخوشه می‌شود. به این ترتیب، وظیفه انتخاب گره سرخوشه به گره برنامه‌ریزی منتقل می‌شود و در نتیجه سرخوشه‌ها می‌توانند انرژی بیشتری را برای انتقال داده‌ها حفظ کنند و در نتیجه طول عمر شبکه بهبود می‌یابد.

در [۱۱]، یک طرح مسیریابی کارآمد مبتنی بر برداشت انرژی ارائه شده است که شامل دو مرحله اصلی می‌شود. در مرحله اول، گره‌ها برداشت انرژی و گره‌های مربوط به آن‌ها خوشه‌بندی می‌شوند سپس در مرحله دوم، یک طرح هوشمند در گره‌های حسگر برداشت انرژی برای مسیریابی بسته‌های داده که از طبیعت الهام گرفته شده است، پیاده‌سازی می‌شود. با استفاده از الگوریتم K-میانگین (K-means)، مقدار مرکزی به‌دست آمده و به‌طور مستقیم در میان خوشه‌ها قرار می‌گیرد سپس گره حسگر برداشت انرژی با محاسبه توابع توزیع احتمال گذرا انتخاب

کمتر یا برابر با انرژی برداشت‌شده از محیط است [۳].

از آنجا که منابع برداشت انرژی ممکن است موقتی و یا دوره‌ای باشند و انرژی تولیدی آن‌ها تقریباً ناکافی است، از این‌رو طرح‌های مدیریت انرژی برای استفاده کارآمد و مؤثر از انرژی جمع‌آوری شده مطرح می‌شود. با تحقیقات انجام‌شده، یک دسته‌بندی مناسب برای طرح‌های مدیریت انرژی بر اساس تنظیم توان ارسال، تعادل انرژی و چرخه کاری ارائه شده است [۴].

طراحی پروتکل‌های مسیریابی انرژی کارآمد برای طولانی کردن طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم یک بحث ضروری است زیرا گره حسگر معمولاً انرژی محدودی دارد. هدف از طراحی پروتکل‌های مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم برداشت انرژی، علاوه بر طولانی کردن عمر شبکه، حفظ شبکه در حالت خنثی انرژی است.

در [۵]، پروتکل مسیریابی برداشت انرژی^۱ (EHR) معرفی شده که برداشت انرژی را به‌عنوان عامل اصلی در مسیریابی برای بهبود بهره‌وری انرژی بررسی می‌کند. EHR یک پروتکل مسیریابی بر اساس انرژی باقی‌مانده و میزان برداشت انرژی است. در این پروتکل یک روش به‌روزرسانی ارائه شده است که هر گره را قادر می‌سازد تا اطلاعات انرژی همسایگان خود را نگهداری کند.

در [۶]، پروتکل خوشه‌بندی خنثی انرژی^۲ (ENC) معرفی شده که این پروتکل شبکه را با هدف ارائه عملکرد دائمی شبکه به چند خوشه تقسیم می‌کند. در پروتکل ENC از گروه سرخوشه در یک خوشه استفاده می‌شود تا بار ترافیکی سنگین شبکه را به اشتراک بگذارد. استفاده از گروه سرخوشه می‌تواند به کاهش تعداد دفعات تشکیل مجدد خوشه و انتخاب مجدد سر خوشه کمک کند که این امر باعث کاهش سرباری پیام‌های کنترلی و افزایش اطمینان از تحویل داده‌ها می‌شود.

در [۷]، پروتکل خوشه‌بندی خنثی انرژی چندپرسی^۳ (MENC) ارائه شده است که برای ساخت معماری خوشه‌بندی بهینه چند پرسی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم برداشت انرژی، عملکرد خنثی انرژی شبکه را تضمین می‌کند. پروتکل MENC با اهداف دست‌یابی به عملکرد دائمی شبکه، کنترل سرعت انتقال اطلاعات، به حداکثر رساندن میزان اطلاعات جمع‌آوری شده و انتخاب سرخوشه‌های واجد شرایط بر اساس انرژی موجود گره‌های حسگر ارائه شده است.

^۱ Energy Harvesting Routing

^۲ Energy Neutral Clustering

^۳ Multi hop Energy Neutral Clustering

^۴ Energy-Efficient Cluster Head Selection

برداشت انرژی گره و هم فاصله آن از چاهک در نظر گرفته شده است. همچنین یکی از مهم‌ترین ویژگی این پروتکل، در نظر گرفتن عدم هماهنگی بین انرژی برداشت شده و انرژی مصرفی گره‌ها است؛ در صورتی که در پروتکل‌های ذکر شده، این عدم هماهنگی در نظر گرفته نشده است. در پروتکل DEARER، هر گره یکی از دو نقش سرخوشه یا عضو خوشه را داراست. زمانی که گره به‌عنوان عضو خوشه عمل می‌کند، بخشی از انرژی برداشت شده خود را در باتری ذخیره می‌کند و زمانی که گره به‌عنوان سرخوشه انتخاب شد، از این انرژی ذخیره شده استفاده می‌کند، در نتیجه احتمال وقوع کمبود انرژی در گره‌های سرخوشه کاهش می‌یابد.

از جمله معایب پروتکل DEARER این است که گره‌های سرخوشه دور از چاهک به انرژی بیشتری برای ارسال بسته‌های خود و عضوهای خوشه نیاز دارند بنابراین ممکن است دچار کمبود انرژی شوند و ارسال موفقیت‌آمیزی نداشته باشند. در روش پیشنهادی با نام $R\text{-DEARER}^2$ ، بادر نظر گرفتن گره‌های سرخوشه رله^۳ از مسیریابی بین خوشه‌ای جهت بهبود پروتکل DEARER استفاده شده است. در این روش، گره‌های سرخوشه دورتر نسبت به چاهک، بسته‌های خود را به گره‌های سرخوشه نزدیک به خود که فاصله کمتری از چاهک دارند، ارسال می‌کنند، بنابراین انرژی مصرفی گره‌های سرخوشه کمتر می‌شود و در نتیجه بازده انرژی و نرخ ارسال شبکه نسبت به پروتکل DEARER افزایش و احتمال قطع شبکه کاهش می‌یابد. در بخش چهارم به بررسی چگونگی عملکرد این روش پیشنهادی پرداخته می‌شود.

۲- مدل سیستم

در این بخش مدل‌سازی سیستم در پروتکل R-DEARER که شامل زیر بخش‌های مدل شبکه، مدل انرژی و کانال می‌باشد، به‌طور کامل تشریح می‌شود.

۲-۱- مدل شبکه

در راستای بررسی پروتکل R-DEARER، یک شبکه حسگر بی‌سیم برداشت انرژی در نظر گرفته شده است که مسیریابی آن بر ارسال که در یک ناحیه پخش شده‌اند. مکان گره n با (x_n, y_n) و مکان چاهک با (x_s, y_s) نشان داده شده است. فاصله‌ی بین دو گره n_1 و n_2 که در مکان‌های (x_1, y_1) و (x_2, y_2) واقع شده‌اند را با d_{n_1, n_2} و فاصله گره n تا چاهک

می‌شود. پس از خوشه‌بندی و انتخاب گره برداشت انرژی، از طرح هوشمند طبیعت برای مسیریابی بسته‌های داده درون خوشه‌ها، توسط الگوریتم سنتی کلونی مورچه‌ها و زنبور عسل استفاده می‌شود. این طرح مسیریابی پیشنهادی در زمان تضعیف مسیر (path loss) به‌خوبی کار می‌کند و قادر به تنظیم مجدد گره‌ها می‌باشد.

در [۱۲] یک شبکه حسگر بی‌سیم ناهمگن در نظر گرفته شده است که در آن گره‌های حسگر دارای سطح انرژی اولیه متفاوت و با قابلیت توان برداشت انرژی خورشیدی هستند. در این الگوریتم، روش مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی پیشنهاد شده است که ناهمگن بودن شبکه حسگر بی‌سیم از نظر انرژی، ترافیک و برداشت انرژی برای انتخاب سرخوشه در نظر می‌گیرد. این الگوریتم پایداری طول عمر شبکه حسگر بی‌سیم را تا زمانی که همه گره‌ها زنده باشند، نشان می‌دهد. این دوره زمانی قابل اطمینان‌ترین دوره برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم عملیاتی است.

برای حل مشکل کمبود انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم برداشت انرژی مطالعات زیادی شده است و روش‌هایی مطرح شده است. در [۱۳ و ۱۴] پروتکل مسیریابی بر اساس خوشه‌بندی معرفی شده است که مبتنی بر یک تابع پتانسیل انرژی است و توانایی جمع‌آوری انرژی هر گره را اندازه‌گیری می‌کند. در این پروتکل گره‌هایی که پتانسیل انرژی بیشتری داشته باشند، با احتمال بیشتری به‌عنوان گره سرخوشه انتخاب می‌شوند؛ این روش مسیریابی، گذردهی و عمر شبکه را بهبود می‌بخشد، اما در این پروتکل برای انتخاب گره سرخوشه فاصله بین گره و چاهک در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین در این روش بازده انرژی شبکه بهینه نیست. با توجه به اینکه گره‌های نزدیک به چاهک انرژی مصرفی کمتری دارند برای انتخاب به‌عنوان سرخوشه مناسب‌تر هستند.

در [۱۵ و ۱۶] پروتکلی ارائه شده است که در آن شبکه به چند حلقه بر اساس فاصله گره و چاهک تقسیم می‌شود و گره‌های نزدیک به چاهک به‌عنوان سرخوشه انتخاب می‌شوند. این گره‌های سرخوشه بسته‌ها را از گره‌های عضو خوشه خود می‌گیرند و به چاهک ارسال می‌کنند.

برای حل مشکل کمبود انرژی و بهبود بازده انرژی در شبکه‌های حسگر برداشت انرژی، یک پروتکل مسیریابی آگاه به انرژی و فاصله همراه با ذخیره‌سازی انرژی^۱ (DEARER) معرفی شده است [۱۷]. در این پروتکل، برای تعیین اولویت گره‌ها نسبت به یکدیگر جهت انتخاب به‌عنوان گره سرخوشه، هم توانایی

² Relayed DEARER

³ Relay Cluster Head

¹ Distance-and-Energy-Aware Routing with Energy Reservation

$$p_r \left\{ \frac{E_n^h(i)}{e_0} \right\} = \frac{\lambda_n^k}{k!} e^{-\lambda_n} \quad (2)$$

که در این رابطه $E_n^h(i)$ انرژی برداشت شده توسط گره n در فریم i و e_0 واحد برداشت انرژی از محیط است.

در مدل سازی کانال، اگر مسافت از فاصله مرجع (d_0) کمتر باشد، مدل فضای آزاد و اگر مسافت بیشتر از فاصله مرجع باشد، از مدل فیدینگ چند مسیری استفاده می شود. بنابراین مقدار انرژی برای ارسال یک بیت اطلاعات به گیرنده از طریق رابطه زیر به دست می آید:

$$e_{RF}(d) = \begin{cases} \varepsilon_{fs} & d \leq 1 \\ \varepsilon_{fs} d^2 & 1 < d \leq d_0 \\ \varepsilon_{mp} d^4 & d_0 < d \end{cases} \quad (3)$$

که در این رابطه ε_{fs} و ε_{mp} مقادیری ثابت با واحد ژول است. اگر e_{elec} مقدار انرژی مورد نیاز برای پردازش سیگنال از قبیل کدگذاری کانال، فیلتر کردن، مدولاسیون و غیره باشد، با توجه به رابطه فوق، انرژی مصرفی گره n عضو خوشه m جهت ارسال یک بسته به سرخوشه خودش برابر است با:

$$E_n^{CH} = L_p (e_{elec} + e_{RF}(d_{mn})) \quad (4)$$

که در آن d_{mn} فاصله گره n از سرخوشه m است. حال اگر انرژی مصرفی گره عضو خوشه از انرژی باقی مانده آن کمتر باشد ($E_n^r(i) \geq E_n^{CH}$)، بسته خود را به سرخوشه ارسال می کند؛ در غیر این صورت مدت زمانی را صبر کرده تا انرژی بیشتری را جمع آوری کند و در فریم بعدی انرژی خود را به روز می کند.

انرژی مصرفی گره های سرخوشه در پروتکل R-DEARER شامل انرژی مصرفی برای دریافت بسته ها از گره های عضو خوشه، انرژی مصرفی برای فشرده سازی و تجمیع بسته ها و انرژی مصرفی برای ارسال به سرخوشه های رله است. اما در صورتی که گره، سرخوشه رله باشد، انرژی مصرفی آن شامل انرژی مصرفی برای دریافت بسته ها از گره های عضو خوشه، انرژی مصرفی برای فشرده سازی بسته های دریافتی از گره های عضو خوشه، انرژی مصرفی برای دریافت بسته ها از گره های سرخوشه نزدیک به خود و انرژی مصرفی برای ارسال بسته ها به چاهک می باشد. بر این اساس، انرژی مصرفی سرخوشه m در فریم i در پروتکل R-DEARER طبق رابطه زیر محاسبه می شود:

نیز با d_n نمایش داده شده است که از روابط زیر به دست می آید:

$$d_n = \sqrt{(x_n - x_s)^2 + (y_n - y_s)^2} \quad (1)$$

شبکه در دوره های زمانی مختلف کار می کند که در هر دوره، هر گره دارای نقش سرخوشه یا عضو خوشه می باشد. در پروتکل R-DEARER هر گره سرخوشه که به چاهک نزدیک باشد نیز می تواند به عنوان گره سرخوشه رله عمل کند. هر دوره زمانی شامل مرحله راه اندازی^۱ و مرحله عملیاتی^۲ است. در مرحله راه اندازی، پس از انتخاب سرخوشه و تشکیل خوشه ها، از بین گره های سرخوشه، تعدادی به عنوان سرخوشه رله انتخاب می شود. در مرحله عملیاتی سرخوشه ها بسته های دریافتی از عضو های خوشه خود را به سرخوشه رله ارسال می کنند. در نهایت سرخوشه های رله، بسته های دریافتی از سرخوشه های نزدیک به خود را بدون فشرده سازی و تجمیع به صورت مستقیم به چاهک ارسال می کنند. همچنین در این پروتکل جهت دسترسی به کانال برای ارسال بسته ها، روش TDMA به کار برده می شود. در بخش چهارم به بررسی چگونگی عملکرد این روش پیشنهادی پرداخته می شود.

۲-۲- مدل انرژی و کانال

در این بخش به توصیف مدل برداشت انرژی، ذخیره انرژی و استفاده از آن پرداخته می شود. قبل از پرداختن به این موضوع لازم است چند فرضیه کلیدی و مهم جهت تحلیل پروتکل پیشنهادی R-DEARER، بیان شود. این فرضیه ها عبارت اند از:

- ۱- ظرفیت باتری بی نهایت در نظر گرفته شده است.
- ۲- دریافت و برداشت انرژی هر زمانی ممکن است رخ دهد اما این انرژی برداشت شده فقط از فریم زمانی بعدی قابل استفاده است.
- ۳- گره های سرخوشه بسته های دریافتی از عضو های خود را در یک بسته فشرده و تجمیع می کنند و سپس به سرخوشه رله ارسال می کنند و گره های سرخوشه رله بسته ها را از سرخوشه های نزدیک به خود دریافت و بدون فشرده سازی، همه آن ها را به چاهک ارسال می کنند.
- ۴- میزان انرژی برداشت شده برای هر گره در یک شکاف زمانی از توزیع پواسون با پارامتر تصادفی λ_n پیروی می کند. همچنین نرخ دریافت انرژی هر گره (λ_n) یک متغیر تصادفی با توزیع رایلی است:

¹ Setup phase

² Steady phase

۳- مسیریابی در پروتکل R-DEARER

در این بخش روش مسیریابی در پروتکل R-DEARER تشریح می‌شود.

۳-۱- انتخاب سرخوشه و سرخوشه رله

اولویت گره‌ها برای انتخاب شدن به‌عنوان گره سرخوشه برابر با نسبت بین ظرفیت برداشت انرژی و انرژی مصرفی هر گره است. گره‌ای که نرخ دریافت انرژی بیشتری دارد و به چاهک نزدیک‌تر است (انرژی مصرفی کمتری دارد) به‌عنوان سرخوشه انتخاب می‌شود. در پروتکل R-DEARER از بین سرخوشه‌ها نیز سرخوشه‌هایی که به چاهک نزدیک‌ترند و نرخ دریافت انرژی مطلوبی دارند، به‌عنوان سرخوشه رله انتخاب می‌شوند. برای انتخاب این نقش‌ها پارامتر q جهت تعیین اولویت هر گره جهت انتخاب به‌عنوان سرخوشه یا سرخوشه رله تعریف شده است که برای گره n به‌صورت زیر بیان می‌شود [۱۷]:

$$q_n = \frac{\lambda_n e_n}{\sum_{k=1}^N \lambda_k e_k}, \quad n = 1, 2, \dots, N. \quad (8)$$

طبق این رابطه هر گره‌ای که اولویت بیشتری نسبت به گره‌های دیگر داشته باشد، به‌عنوان گره سرخوشه انتخاب می‌شود و هر گره سرخوشه‌ای که اولویت بیشتری نسبت به گره‌های سرخوشه دیگر داشته باشد به‌عنوان گره سرخوشه رله انتخاب می‌شود. تعداد مطلوب سرخوشه‌ها (M) به‌عنوان یک پارامتر کنترل کلیدی تعریف شده است که می‌توان عملکرد شبکه را با تغییر آن بررسی کرد. بر اساس این پارامتر کنترلی یک احتمال غیرشرطی برای انتخاب گره n به‌عنوان گره سرخوشه در هر دوره دلخواه به‌صورت زیر تعریف شده است [۱۷]:

$$p_n^{cond} = \frac{1}{\left| \frac{1}{Mq_n} - 0.5 \right|} \quad (9)$$

همچنین تعداد مطلوب سرخوشه‌های رله (M') در پروتکل R-DEARER به‌صورت زیر فرض شده است:

$$M' = \frac{1}{3} M \quad (10)$$

این رابطه بر اساس شبیه‌سازی‌های متعدد انجام شده به‌دست آمده است. بر اساس این پارامتر کنترلی می‌توان یک احتمال غیرشرطی برای انتخاب گره m به‌عنوان گره سرخوشه رله در هر دوره دلخواه به‌صورت زیر تعریف کرد:

$$p_n^{cond'} = \frac{1}{\left| \frac{1}{M'q_n} - 0.5 \right|} \quad (11)$$

$$E_m^{CH}(i) = [L_p \sum_{k=1}^{k_m} I_{T_{X_k}(i)} (e_{elec} + e_{da}) + L_p e_{da} (I_{k_m > 1}) + e'_m (I_{T_{X_m}(i)}) + (L_p \sum_{l=1}^{L_m-1} I_{T_{X_k}(i)} (e_{elec} + e_{da}) + I_m e_m) I_{T_{X_m}(i)}] \times I_{T_{X_m}(i)} \quad (5)$$

در این رابطه l_m ، تعداد سرخوشه‌هایی است که بسته خود را

به سرخوشه رله m ارسال می‌کنند، e_{da} انرژی مصرفی برای فشرده‌سازی هر بیت، $I_{T_{X_m}(i)}$ متغیر باینری است که بیان می‌کند آیا گره سرخوشه m سرخوشه رله است یا خیر و $I_{T_{X_m}(i)}$ بیان می‌کند آیا گره m بسته و یا بسته‌ها را در فریم i ارسال می‌کند یا خیر. همچنین e_n انرژی مصرفی گره n برای ارسال یک بسته به چاهک و e'_m انرژی مصرفی گره سرخوشه برای ارسال بسته به سرخوشه رله است که در پروتکل R-DEARER از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$e'_m = L_p (e_{elec} + e_{RF} (d_{mm}')) \quad (6)$$

که d_{mm}' فاصله سرخوشه m از سرخوشه رله مربوطه‌اش (m') است. در این پروتکل اگر گره سرخوشه رله انرژی کافی برای ارسال بسته‌های دریافتی از دیگر سرخوشه‌ها را به چاهک نداشته باشد بسته‌های خود را ارسال نمی‌کند سپس مدت زمانی را صبر کرده تا انرژی مورد نیاز برای ارسال بسته‌های خود از محیط برداشت کند.

از آن‌جا که نیاز به یک معیار اندازه‌گیری است تا توانایی شبکه را در برداشت انرژی از محیط اندازه‌گیری کند، در ادامه نسبت دوام شبکه تعریف می‌شود.

نسبت دوام شبکه نسبت دوام شبکه (ρ) قابلیت شبکه را برای برداشت انرژی از محیط مشخص می‌کند. این مقدار برابر با نسبت بین مجموع انرژی برداشت شده کل شبکه و مجموع انرژی مورد نیاز برای همه گره‌های موجود در شبکه جهت ارسال یک بسته به چاهک است که با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\rho = \frac{\sum_{n=1}^N \lambda_n e_0}{\sum_{n=1}^N e_n} \quad (7)$$

مقدار ρ عددی بین صفر و یک است که نباید خیلی بزرگ یا خیلی کوچک در نظر گرفته شود؛ زیرا اگر ρ خیلی کوچک باشد، انرژی بسیار کمی در شبکه برداشت می‌شود و اطلاعات کمتری می‌تواند ارسال شود. از طرف دیگر اگر ρ مقدار زیادی در نظر گرفته شود، گره‌های حسگر بایستی دارای ظرفیتی قوی برای برداشت انرژی باشند که این موضوع پیچیدگی شبکه و هزینه راه‌اندازی آن را افزایش می‌دهد.

گره از این انرژی ذخیره شده استفاده می کند که به عنوان گره سرخوشه یا گره سرخوشه رله انتخاب شود. بدین منظور احتمال p_n^{sv} برای گره n تعریف می شود به گونه ای که با برداشت یک واحد انرژی (e_0) توسط n امین گره عضو، با احتمال p_n^{sv} این انرژی برای استفاده های بعدی ذخیره می شود و با احتمال $1 - p_n^{sv}$ به انرژی باقی مانده گره افزوده می شود تا بتواند در فریم های زمانی بعدی استفاده کند. انرژی ذخیره شده و انرژی باقی مانده n امین گره عضو خوشه به ترتیب از روابط زیر محاسبه می شوند:

$$E_n^{sv}(i) = E_n^{sv}(i) + e_0 \quad \text{with probability } p_n^{sv} \quad (12)$$

$$E_n^r(i) = E_n^r(i) + e_0 \quad \text{with probability } 1 - p_n^{sv} \quad (13)$$

در مرحله راه اندازی شبکه در هر دوره، هر گره سرخوشه و سرخوشه رله انرژی های ذخیره شده در بافر خود را اندازه گیری می کند؛ این انرژی شامل دو بخش است؛ یک بخش، انرژی باقی مانده از فریم قبلی ($E_n^r(N_F)$) و بخش دیگر انرژی ذخیره شده گره، زمانی که در دوره قبل به عنوان عضو خوشه بوده است (\hat{E}_n^{sv}) انرژی گره ها در ابتدای هر دوره به صورت زیر به روز می شود:

$$E_n^r(0) = E_n^r(N_F) + \hat{E}_n^{sv} \quad (14)$$

۴- ارزیابی عملکرد پروتکل R-DEARER

از آنجا که پیاده سازی یک شبکه حسگر بی سیم در دنیای واقعی به ویژه در مقیاس گسترده، مستلزم صرف هزینه و امکانات زیادی است، تحلیل و ارزیابی نتایج عددی به عنوان یک ابزار معقول و ضروری جهت بررسی عملکرد این شبکه ها به شمار می رود، پیرو این ارزیابی، نقاط ضعف و قوت شبکه و عوامل تأثیرگذار در آن، مشخص خواهد شد. برای تحلیل عملکرد، مهم ترین مسئله، نزدیک شدن به واقعیت و در عین حال قابل اطمینان بودن نتایج است. بر این اساس، انتخاب یک مدل مناسب جهت تحلیل از اهمیت ویژه ای برخوردار است. جهت بررسی عملکرد پروتکل R-DEARER، پارامترهای نرخ ارسال شبکه، احتمال قطع شبکه و بازده انرژی به صورت تحلیلی مورد ارزیابی قرار می گیرد.

۴-۱- نرخ ارسال

نرخ ارسال یک گره، بخشی از فریم هایی است که در آن، گره انرژی کافی برای ارسال یک بسته را دارد و رابطه آن به صورت زیر تعریف شده است [۱۷]:

$$r_n = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{tN_F} \sum_{l=1}^t \sum_{i=1}^{N_F} I_{T_{x_n}}(i) \quad (15)$$

در حالت کلی نرخ ارسال گره مشخص می کند که آن گره چه

الگوریتم (۱) انتخاب سرخوشه در پروتکل R-DEARER، مشابه با پروتکل DEARER است. در این الگوریتم متغیر C_n تعریف شده است که نشان می دهد آیا گره n به تازگی به عنوان گره سرخوشه انتخاب شده است یا خیر. در ابتدای راه اندازی شبکه، C_n صفر در نظر گرفته می شود؛ سپس اگر گره n فقط یک بار به عنوان گره سرخوشه انتخاب شود، مقدار این پارامتر برابر با یک می شود و بعد $\max\left\{\left[\frac{1}{Mq_n} - 0.5\right], 1\right\}$ دوره، دوباره مقدار آن صفر خواهد شد [۱۷].

الگوریتم ۱: انتخاب سرخوشه

مقادیر اولیه

گام اول: در صورتی که باقیمانده تقسیم l بر $\left[\frac{1}{Mq_n} - 0.5\right]$ برابر صفر شود،

مقدار C_n صفر در نظر گرفته می شود. ($C_n = 0$)

حلقه تکرار

برای هر گره n

گام دوم: اگر $C_n = 0$ باشد، یک توزیع یکنواخت با پارامتر x به صورت $x \sim U(0,1)$ تولید می شود.

گام سوم: اگر $p_n^{cond}(l) \leq x$ باشد، آن گاه گره خودش را به عنوان سرخوشه انتخاب می کند.

گام چهارم: مقدار C_n برابر با یک قرار داده می شود. ($C_n = 1$)

گام پنجم: هر گره، ID خود را توسط یک پیام در اسلات مربوط به خود، منتشر می کند.

همچنین در الگوریتم (۲) انتخاب سرخوشه رله در پروتکل R-DEARER نیز یک متغیر C'_n تعریف می شود که نشان می دهد آیا گره n به تازگی به عنوان گره سرخوشه رله انتخاب شده است یا خیر. در ابتدای راه اندازی شبکه، C'_n در نظر گرفته می شود سپس اگر گره n فقط یک بار گره سرخوشه رله انتخاب شود، مقدار این پارامتر برابر با یک می شود و بعد از $\max\left\{\left[\frac{1}{Mq_n} - 0.5\right], 1\right\}$ دوره، دوباره مقدار آن صفر خواهد شد.

الگوریتم ۲: انتخاب سرخوشه رله

مقادیر اولیه

گام اول: در صورتی که باقیمانده تقسیم l بر $\left[\frac{1}{Mq_n} - 0.5\right]$ برابر صفر شود،

مقدار C'_n صفر در نظر گرفته می شود. ($C'_n = 0$)

حلقه تکرار

برای هر گره n

گام دوم: اگر $C'_n = 0$ باشد، یک توزیع یکنواخت با پارامتر x به صورت $x \sim U(0,1)$ تولید می شود.

گام سوم: اگر $p_n^{cond}(l) \leq x$ باشد، آن گاه گره خودش را به عنوان سرخوشه رله انتخاب می کند.

گام چهارم: مقدار C'_n برابر با یک قرار داده می شود. ($C'_n = 1$)

گام پنجم: هر گره، ID خود را توسط یک پیام در اسلات مربوط به خود، منتشر می کند.

۳-۲- روش ذخیره انرژی

همان طور که اشاره شد، برای مهیا کردن انرژی بیشتر در گره های سرخوشه، هر گره در مدت زمانی که به عنوان گره عضو خوشه است، بخشی از انرژی برداشت شده خود را ذخیره می کند و زمانی

۲-۴- احتمال قطع سرخوشه

قطعی زمانی رخ می‌دهد که گره سرخوشه یا سرخوشه رله در پروتکل انرژی کافی برای ارسال بسته یا بسته‌های خود به چاهک نداشته باشند. این قطعی را می‌توان با یک احتمال بیان کرد که به آن احتمال قطع سرخوشه گویند و به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۷]:

$$p_n^{out} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{N_F \sum_{l=1}^t I_{CH_n(l)}} \sum_{l=1}^t I_{CH_n(l)} \sum_{i=1}^{N_F} (1 - I_{T_n}(i)) \quad (22)$$

همچنین احتمال قطع شبکه برابر با میانگین احتمال قطع شدن همه گره‌ها در شبکه تعریف می‌شود:

$$p_{out} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N p_n^{out} \quad (23)$$

به دلیل اینکه انرژی موجود در هر گره سرخوشه، مجموعه‌ای از متغیرهای تصادفی پواسون (که متعلق به خانواده تابع نمایی) است، احتمال قطع سرخوشه را می‌توان با انرژی موجود در گره‌های سرخوشه توسط توزیع گاما به خوبی تقریب زد. احتمال قطع گره n در حالت سرخوشه بودن از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۷]:

$$p_n^{out} \approx \gamma \left(k_n, \frac{N_F \mu_{E_n}^{CH}}{\theta_n} \right) - \frac{k_n \theta_n}{N_F \mu_{E_n}^{CH}} \gamma \left(k_n + 1, \frac{N_F \mu_{E_n}^{CH}}{\theta_n} \right) \quad (24)$$

که در آن

$$k_n = \frac{N_F \lambda_n (p_n^{sv} (\mu_{T_n} - 1) + 1)^2}{N_F \lambda_n (p_n^{sv})^2 \sigma_{T_n}^2 + p_n^{sv} (\mu_{T_n} - 1) + 1} \quad (25)$$

$$\theta_n = e_0 + \frac{N_F \lambda_n e_0 (p_n^{sv})^2 \sigma_{T_n}^2}{p_n^{sv} (\mu_{T_n} - 1) + 1} \quad (26)$$

که در این رابطه p_n^{sv} احتمال ذخیره انرژی است. همان طور که قبلاً گفته شد، هر گره زمانی که عضو خوشه است، بخشی از انرژی برداشت شده را در بافر خود ذخیره می‌کند و زمانی که به عنوان سرخوشه یا سرخوشه رله انتخاب شد، از این انرژی ذخیره شده استفاده می‌کند. می‌توان اثبات کرد، احتمال ذخیره انرژی که با p_n^{sv} نمایش داده می‌شود از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۷]:

$$p_n^{sv} = 1 - \frac{\mu_{E_n}^{CH} r_n^{CH}}{\lambda_n e_0} \quad (27)$$

۳-۴- انرژی مصرفی گره سرخوشه

در این بخش به بررسی انرژی مصرفی گره عضو خوشه، سرخوشه و سرخوشه رله پرداخته می‌شود که یکی از عوامل مهم در تحلیل

تعداد بسته را می‌تواند به طور متوسط در یک فریم ارسال کند؛ صرف نظر از اینکه آن بسته به صورت موفق به چاهک می‌رسد یا خیر. همچنین نرخ ارسال شبکه برابر با میانگین نرخ ارسال همه گره‌های شبکه است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$r_{net} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N r_n \quad (16)$$

واحد اندازه‌گیری r_n و r_{net} بسته بر فریم است.

نرخ ارسال گره عضو خوشه‌ای که قابلیت سرخوشه رله شدن را ندارد، با گره عضو خوشه‌ای که قابلیت سرخوشه رله شدن را دارد، متفاوت است زیرا میانگین انرژی مصرفی این گره‌ها زمانی که به عنوان سرخوشه یا سرخوشه رله انتخاب می‌شوند، متفاوت است. بر این اساس نرخ ارسال برای گره عضو خوشه‌ای که قابلیت سرخوشه رله شدن را ندارد به صورت زیر به دست می‌آید:

$$r_n^{CH} = \min \left\{ \frac{\mu_{T_n} \lambda_n e_0 - (e_n' + L_p e_{da} (I_{k_n} > 1)) (1 - p_n^{out})}{(\mu_{T_n} - 1) \mu_{E_n}^{CH} + L_p (k_n - 1) (e_{elec} + e_{da}) (1 - p_n^{out})} \right\} \quad (17)$$

در این رابطه μ_{T_n} میانگین زمان سرخوشه شدن است که از رابطه (۱۸) به دست می‌آید و K_n تعداد اعضای خوشه n است که اندازه هر خوشه با توجه به این نکته تعیین می‌شود که مجموع احتمال سرخوشه شدن گره‌ها در یک خوشه تقریباً برابر با یک است و می‌توان اثبات کرد، این اندازه از رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$\mu_{T_n} = \left\lceil \frac{1}{M q_n} - 0.5 \right\rceil \quad (18)$$

$$K_n \approx \frac{1}{P_n^{cond}} \quad (19)$$

همچنین نرخ ارسال گره عضو خوشه‌ای که قابلیت سرخوشه رله شدن را دارد می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$r_n^{CH} = \min \left\{ \frac{\mu_{T_n} \lambda_n e_0 - (k_m e_n + L_p e_{da} (I_{k_n} > 1)) (1 - p_n^{out})}{(\mu_{T_n} - 1) \mu_{E_n}^{CH} + L_p (k_n - 1) (e_{elec} + e_{da}) (1 - p_n^{out})} \right. \\ \left. - \frac{(L_p (k_m - 1) (e_{elec} + e_{da}) (1 - p_n^{out})) (1 - p_n^{out})}{(\mu_{T_n} - 1) \mu_{E_n}^{CH} + L_p (k_n - 1) (e_{elec} + e_{da}) (1 - p_n^{out})} \right\} \quad (20)$$

به همین ترتیب نرخ ارسال گره سرخوشه مشخص می‌کند که آن گره چند بسته در یک فریم می‌تواند به چاهک ارسال کند. می‌توان نشان داد که نرخ ارسال برای گره‌های سرخوشه از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$r_n^{CH} = 1 - p_n^{out} \quad (21)$$

$$l_m \approx \frac{M \times p_n^{\text{cond}'}}{p_n^{\text{cond}}} \quad (۳۴)$$

در این رابطه p_n^{cond} احتمال سرخوشه شدن گره n و $p_n^{\text{cond}'}$ احتمال سرخوشه رله شدن گره n می‌باشد.

۴-۴- بازده انرژی شبکه

بازده انرژی شبکه برابر است با نسبت تعداد بسته‌هایی که به‌صورت موفقیت‌آمیز به چاهک برسند بر کل انرژی برداشت شده و از طریق رابطه (۳۲) به‌دست می‌آید. با ارگادیک فرض کردن فرآیند دریافت انرژی و همچنین استفاده از قانون اعداد بزرگ، رابطه η به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$\begin{aligned} \eta &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\sum_{l=1}^t \sum_{i=1}^{N_F} \sum_{n=1}^N I_{T_{x_n}(i)} I_{T_{x_m}(i)}}{\sum_{l=1}^t \sum_{i=1}^{N_F} \sum_{n=1}^N E_n^h(i)} \\ &= \frac{1}{N \mu_{\lambda} e_0} \sum_{n=1}^N \left(\frac{\mu_{T_n} - 1}{\mu_{T_n}} r_n^{\text{CH}} (1 - p_m^{\text{out}}) + \frac{1}{\mu_{T_n}} r_n^{\text{CH}} \right) \\ &= \frac{1}{N \mu_{\lambda} e_0} \sum_{n=1}^N \frac{r_n^{\text{CH}}}{\mu_{T_n}} (1 + (\mu_{T_n} - 1) r_n^{\text{CH}}) \quad (۳۵) \end{aligned}$$

۵- بررسی نتایج عددی و ارزیابی عملکرد

برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی، محیطی با ابعاد 140×140 مترمربع در نظر گرفته شده است که در آن ۱۰۰۰ گره با توزیع یکنواخت پخش شده‌اند؛ در این محیط چاهک در مختصات $(0, 80)$ واقع شده است. پارامترهای شبیه‌سازی و مقادیر آن‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است.

در این شبیه‌سازی فرض بر این است که برداشت انرژی در هر شکاف زمانی از توزیع پواسون تبعیت می‌کند و همچنین فرض شده است که نرخ دریافت انرژی گره‌ها (λ_n) با یکدیگر متفاوت است و از توزیع رایلی با پارامتر $\sigma_{\lambda} = \sqrt{\frac{2}{\pi}}$ تبعیت می‌کند.

جدول (۱): پارامترهای ارزیابی

مقدار	پارامتر
۱۰۰۰	تعداد گره‌های حسگر (N)
۴۰۰ bits	طول بسته (L_p)
۱۰۰	تعداد فریم (N_F)
۵۰ nj/bit	e_{elec}
۵ nj/bit	e_{da}
۱۰ pj/bit/m ²	\mathcal{E}_{fs}
۰/۰۰۱۳ pj/bit/m ²	\mathcal{E}_{mp}
۸۷ m	فاصله مرجع (d_0)
۲۰۰	حداکثر تعداد تکرار برنامه (K)
۰/۰۰۵	(\mathcal{E} خطای نسبی)

همچنین الگوریتم پیشنهادی به‌صورت گام به گام مطابق با الگوریتم (۳) است.

عملکرد شبکه است. جهت تحلیل و ارزیابی عملکرد شبکه از میانگین انرژی مصرفی گره سرخوشه استفاده شده است.

می‌توان فرض کرد که خوشه m دارای K_n عضو است. حال اگر ناحیه مربعی به ضلع $2L$ باشد، به دلیل توزیع یکنواخت گره‌ها در شبکه و با فرض دایره‌ای بودن خوشه‌ها می‌توان شعاع آن‌ها را به‌طور متوسط از رابطه زیر به‌دست آورد:

$$R_m = \sqrt{\frac{4L^2 k_m}{\pi n N}} \quad (۲۸)$$

با به‌دست آوردن شعاع خوشه‌ها، میانگین فاصله گره‌های عضو خوشه و سرخوشه‌ها از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$\bar{d}_{nm} = \sqrt{\frac{2L^2 k_m}{\pi N}} \quad (۲۹)$$

بنابراین می‌توان متوسط انرژی مصرفی گره عضو خوشه برای ارسال بسته به گره سرخوشه مربوط به خود مطابق با رابطه زیر به‌دست آورد:

$$\begin{aligned} \mu_{E_n^{\text{CH}}} &= L_p (e_{elec} + e_{RF}(\bar{d}_{nm})) \\ &= L_p (e_{elec} + e_{RF}(\sqrt{\frac{2L^2 k_n}{\pi N}})) \quad (۳۰) \end{aligned}$$

همان‌طور که گفته شد در پروتکل R-DEARER سرخوشه‌های نزدیک به چاهک به‌عنوان گره سرخوشه رله عمل می‌کنند و بسته‌ها را از سرخوشه‌های دورتر دریافت کرده و بدون تجمع و فشرده‌سازی به چاهک ارسال می‌کنند. بنابراین انرژی مصرفی گره‌های سرخوشه دور از چاهک، کاهش می‌یابد و می‌توان این انرژی مصرفی را به‌صورت رابطه زیر بیان کرد:

$$\mu_{E_n^{\text{CH}}} = L_p \left[(k_n - 1)(e_{elec} + e_{da}) r_n^{\text{CH}} + e_{da} (I_{k_n} > 1) \right] + e_n' \quad (۳۱)$$

در این رابطه e_n' میانگین انرژی مصرفی گره سرخوشه برای ارسال یک بسته به سرخوشه رله نزدیک به خود است که از طریق رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$e_n' = L_p (e_{elec} + e_{RF}(\bar{d}_{nm}')) \quad (۳۲)$$

که در این رابطه \bar{d}_{nm}' متوسط فاصله بین گره سرخوشه n و سرخوشه رله m' است.

همچنین می‌توان انرژی مصرفی گره سرخوشه رله برای ارسال بسته‌های خود به چاهک را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه کرد:

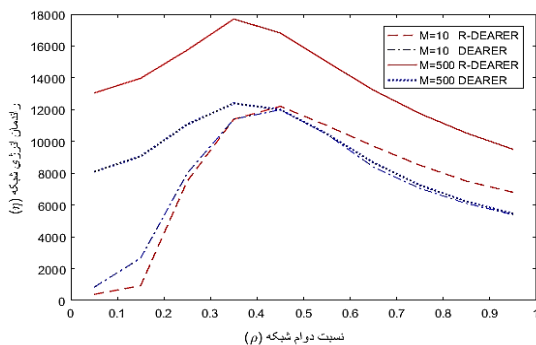
$$\mu_{E_n^{\text{CH}}} = L_p (e_{elec} + e_{da}) \left[(k_n - 1) r_n^{\text{CH}} + (l_m - 1) r_m^{\text{CH}} \right] + l_m e_n \quad (۳۳)$$

که l_m تعداد سرخوشه‌هایی است که بسته خود را به سرخوشه رله نزدیک به خود ارسال می‌کنند و می‌توان به‌صورت زیر تعریف کرد:

این الگوریتم زمانی به پایان می‌رسد که حداکثر تعداد تکرار برنامه (K) فرا رسد و یا اینکه اختلاف بین خروجی P_n^{out} در دو تکرار متوالی از خطای نسبی تعیین شده، کمتر شود. برای ارزیابی عملکرد تأثیر پارامترهای نسبت دوام شبکه (ρ) و تعداد سرخوشه‌ها (M) بر بازده شبکه، نرخ ارسال و احتمال قطع شبکه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، با افزایش بازده افزایش می‌یابد. در $\rho \in (0.15, 0.3)$ ، هر دو پروتکل DEARER و R-DEARER، بیشترین مقدار بازده را دارند. همچنین بازده انرژی شبکه در هر دو پروتکل وقتی ρ بیشتر از ۰/۵ است، کاهش می‌یابد زیرا فرض شده است که هر گره در هر فریم فقط یک بسته ارسال می‌کند بنابراین وقتی که ρ افزایش می‌یابد انرژی برداشت‌شده از انرژی مورد نیاز خیلی بیشتر است و استفاده بهینه از این انرژی برداشت‌شده نمی‌شود؛ در نتیجه بازده کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه در $M=10$ اندازه خوشه‌ها بزرگ است، ترافیک و سرباری گره‌های سرخوشه و سرخوشه رله زیاد می‌شود؛ بنابراین بازده شبکه نسبت به $M=500$ کمتر است.

با توجه به شکل (۱) در $M=10$ ، بازده انرژی در ρ های کم در پروتکل DEARER عملکرد بهتری نسبت به پروتکل R-DEARER دارد زیرا گره‌ها انرژی کمی از محیط برداشت کرده‌اند و ممکن است سرخوشه‌های رله دچار کمبود انرژی شوند در نتیجه بهتر است سرخوشه‌ها به صورت مستقیم بسته‌های خود را به چاهک ارسال کنند. اما در ρ های زیاد سرخوشه‌های رله انرژی کافی برای دریافت و ارسال بسته‌ها از سرخوشه‌های دیگر را دارند بنابراین با استفاده از روش پیشنهادی، می‌توان بازده انرژی را نسبت به پروتکل DEARER افزایش داد. همچنین در $M=500$ ، با مقایسه دو نمودار مشاهده می‌گردد که روش R-DEARER بازده بهتری نسبت به روش DEARER دارد زیرا استفاده از مسیریابی بین خوشه‌ای، مسافت‌های طولانی برای ارسال بسته‌ها را کم می‌کند؛ به همین دلیل احتمال کمبود انرژی در آن‌ها کاهش می‌یابد و ارسال‌های موفقیت‌آمیزی بیشتری خواهند داشت که موجب افزایش بازده انرژی در شبکه خواهد شد.



شکل (۱): بازده انرژی شبکه بر حسب ρ .

شکل (۲) چگونگی تأثیر پارامتر کنترلی M بر روی بازده

الگوریتم ۳: R-DEARER

مقادیر اولیه

گام اول: چاهک پیام مربوط به تخصیص شکاف زمانی به هر گره را برای همه گره‌های شبکه با توان مشخص P_n پخش همگانی می‌کند.

گام دوم: هر گره توان دریافتی را به منظور تعیین α_n و β_n اندازه‌گیری می‌کند.

گام سوم: هر گره نسبت $\beta_n = \frac{\alpha_n}{\alpha_n}$ را محاسبه و آن را به چاهک ارسال می‌کند.

گام چهارم: چاهک مقدار $\sum_{n=1}^N \beta_n$ را محاسبه و آن را برای تمامی گره‌ها منتشر می‌کند.

گام پنجم: هر گره $\sum_{n=1}^N \beta_n$ را از چاهک دریافت کرده و اولویت سرخوشه شدن خود را از رابطه η_n محاسبه می‌کند.

حلقه تکرار

در مرحله راه‌اندازی برای هر دوره l

گام هفتم: انتخاب سرخوشه

گام هشتم: انتخاب سرخوشه رله

گام نهم: تشکیل خوشه‌ها

گام دهم: به‌روزرسانی انرژی؛ هر گره سرخوشه، انرژی باقی‌مانده خود را توسط رابطه $E_n^r(0)$ به‌روزرسانی می‌کند.

در مرحله عملیاتی برای هر فریم $1 \leq i \leq N_n$

گام یازدهم: هر گره عضو خوشه با شرط $E_n^r(i) \geq \overline{E_n^r}$ ، بسته خود را ارسال می‌کند.

گام دوازدهم: هر گره سرخوشه بسته‌های مربوط به گره‌های عضو خوشه خود را دریافت کرده، حال اگر دور از چاهک باشد بسته خود را به سرخوشه رله ارسال می‌کند و اگر نزدیک به چاهک باشد، به‌منوان سرخوشه رله، بسته‌ها را از گره‌های سرخوشه نزدیک به خود دریافت کرده و به چاهک ارسال می‌کند.

گام سیزدهم: هر گره از محیط انرژی برداشت می‌کند و گره‌های عضو خوشه، بخشی از انرژی برداشت شده را ذخیره می‌کنند.

گام چهاردهم: هر گره انرژی باقی‌مانده خود را توسط رابطه $E_n^r(i)$ به‌روزرسانی می‌کند.

از آن‌جا که پارامترهای مرتبط با معیارهای ارزیابی

(p_n^{out} ، r_n^{CH} ، r_n^{CH} ، r_n^{sv} و p_n^{sv}) به هم وابسته هستند؛ بنابراین نمی‌توان آن‌ها را به صورت جداگانه بررسی کرد. محاسبه این پارامترها برای پروتکل R-DEARER در الگوریتم (۱)، ارائه شده است.

الگوریتم ۴: محاسبه p_n^{out} ، r_n^{CH} ، r_n^{sv} و p_n^{sv}

مقادیر اولیه

گام اول: تعیین مقادیر حداکثر تکرار برنامه (K) و خطای نسبی (ϵ)

گام دوم: قراردادن مقدار اولیه احتمال قطع شبکه برابر با صفر

$$(p_n^{out}[1] = 0)$$

حلقه تکرار

گام سوم: محاسبه $r_n^{CH}[k]$ و $r_n^{sv}[k]$ با استفاده از $p_n^{out}[k]$ و روابط (۱۷)، (۲۰) و (۲۱)

گام چهارم: محاسبه $p_n^{sv}[k]$ از رابطه (۲۷)

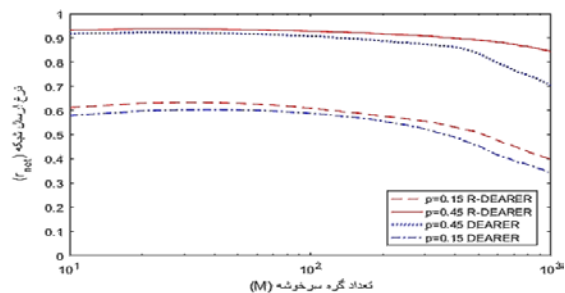
گام پنجم: به‌روزرسانی $\mu_{E_n^r}[k]$ از رابطه (۳۱) و (۳۳)

گام ششم: به‌روزرسانی $p_n^{out}[k+1]$ از رابطه (۲۴)

گام هفتم: ادامه یافتن حلقه تکرار تا زمانی که $k = K$ و یا شرط

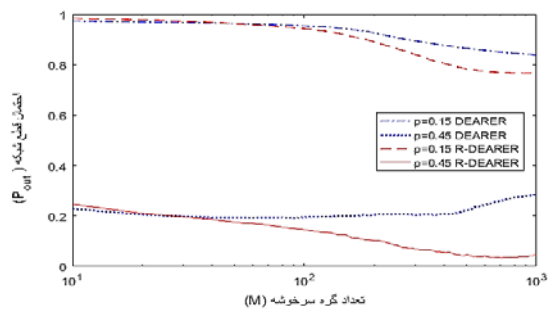
$$|p_n^{out}[k] - p_n^{out}[k+1]| \leq \epsilon p_n^{out}[k+1]$$

در شکل (۳) نرخ ارسال شبکه در هر دو پروتکل DEARER و R-DEARER با $\rho = 0.15$ و $\rho = 0.45$ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نرخ ارسال در پروتکل R-DEARER با هر دو مقدار $\rho = 0.15$ و $\rho = 0.45$ نسبت به پروتکل DEARER افزایش یافته است چون انرژی مصرفی گره‌های سرخوشه که از چاهک دور هستند، به دلیل کاهش فاصله برای ارسال بسته‌های خود، کاهش می‌یابد سپس آن‌ها می‌توانند در هر دوره زمانی با توجه به انرژی باقی‌مانده خود، بسته‌های بیشتری در نقش‌های مختلف (عضو خوشه، سرخوشه، سرخوشه رله) به مقصد ارسال کنند، صرف‌نظر از اینکه بسته‌ها به‌صورت موفقیت‌آمیز ارسال شده‌اند یا خیر.



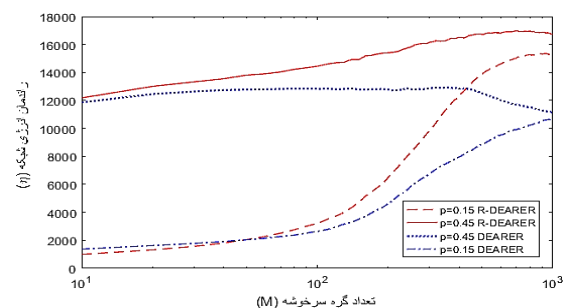
شکل (۳): نرخ ارسال شبکه بر حسب M .

در شکل (۴) احتمال قطع شبکه با استفاده از روش مسیریابی DEARER و R-DEARER با دو مقدار $\rho = 0.15$ و $\rho = 0.45$ مقایسه شده است. در مقایسه دو پروتکل با یکدیگر در $\rho = 0.15$ دیده می‌شود که احتمال قطع شبکه در پروتکل R-DEARER نسبت به پروتکل DEARER به دلیل استفاده از سرخوشه‌های رله، کمتر است. همان‌طور که در شکل (۴) می‌بینید پروتکل DEARER در M های بزرگ و $\rho = 0.45$ احتمال قطع سرخوشه افزایش می‌یابد چون گره‌هایی که در فاصله دور از چاهک قرار گرفته‌اند، به‌عنوان گره سرخوشه انتخاب می‌شوند بسته‌های خود را به‌صورت مستقیم به چاهک ارسال می‌کنند؛ در نتیجه انرژی مصرفی آن‌ها افزایش می‌یابد که منجر به افزایش احتمال قطع گره‌های سرخوشه می‌شود، این درحالی است که در پروتکل R-DEARER احتمال قطع نسبت به پروتکل DEARER کمتر است چون انرژی مصرفی گره‌های سرخوشه با استفاده از روش مسیریابی بین خوشه‌های کاهش می‌یابد.



شکل (۴): احتمال قطع شبکه بر حسب M .

شبکه را نشان می‌دهد. واضح است که می‌توان با انتخاب درست تعداد سرخوشه‌ها بازده مطلوبی به‌دست آورد. اگر تعداد خوشه‌ها کم در نظر گرفته شود، سایز خوشه‌ها بزرگ و در نتیجه ترافیک و سرباری گره‌های سرخوشه و سرخوشه رله زیاد می‌شود لذا همان‌طور که در شکل (۲) می‌بینید برای M های کوچک، بازده انرژی نسبت به M های بزرگ، کم‌تر است یعنی با افزایش M بازده افزایش می‌یابد. زمانی که $\rho = 0.15$ ، انرژی شبکه بسیار نامطلوب است و گره‌ها انرژی کمی از محیط برداشت کرده‌اند. در این حالت در M های کم بازده بسیار نامطلوب است. از این‌رو می‌توان در هر دو پروتکل با افزایش M بازده را افزایش داد. همچنین در M های کم، بازده انرژی در پروتکل R-DEARER نسبت به پروتکل DEARER کاهش یافته است چون گره‌های سرخوشه رله دارای انرژی کافی برای دریافت بسته‌ها از سرخوشه‌های نزدیک به خود و ارسال آن‌ها به چاهک نیستند در نتیجه دچار کمبود انرژی می‌شوند. هر دو پروتکل در M های کم تقریباً عملکردی مشابهی دارند؛ چون گره‌هایی به‌عنوان سرخوشه انتخاب می‌شوند که فاصله کمتری نسبت به چاهک و انرژی بیشتری نسبت به گره‌های دیگر دارند بنابراین گره‌های سرخوشه رله از بین همین گره‌هایی که از نظر انرژی و فاصله نسبت به چاهک وضعیت مشابهی دارند، انتخاب می‌شوند؛ در نتیجه استفاده از روش مسیریابی بین خوشه‌های تأثیر زیادی روی بهبود بازده شبکه نسبت به پروتکل DEARER نخواهد داشت. از طرف دیگر اگر تعداد سرخوشه‌ها زیاد باشد، اکثر گره‌ها به‌عنوان سرخوشه عمل می‌کنند؛ در پروتکل DEARER سرخوشه‌ها بسته‌های خود را به‌صورت مستقیم به چاهک ارسال می‌کنند در نتیجه گره‌هایی که انرژی کمی دارند و یا فاصله آن‌ها از چاهک زیاد است، دچار کمبود انرژی می‌شوند و نمی‌توانند بسته خود را به چاهک ارسال کنند. به همین علت، در M های بزرگ برای $\rho = 0.45$ ، بازده کاهش می‌یابد. حال در پروتکل R-DEARER برای $\rho = 0.45$ در M های بزرگ بازده نسبت به پروتکل DEARER افزایش می‌یابد چون با استفاده از روش مسیریابی بین خوشه‌های سرخوشه‌های دورتر بسته‌های خود را با مصرف انرژی کمتر به سرخوشه‌های نزدیک به چاهک ارسال می‌کنند در نتیجه سرخوشه‌ها ارسال موفقیت‌آمیزی به چاهک خواهند داشت و بازده شبکه افزایش می‌یابد.



شکل (۲): بازده انرژی بر حسب M .

- [4] A. A. Babayo, M. H. Anisi, and I. Ali, "A review on energy management schemes in energy harvesting wireless sensor networks," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 1176–1184, 2017.
- [5] Y. Cao, X.-Y. Liu, L. Kong, M.-Y. Wu, and M. K. Khan, "Ehr: Routing protocol for energy harvesting wireless sensor networks," in *Parallel and Distributed Systems (ICPADS)*, 2016 IEEE 22nd International Conference on, IEEE, pp. 56–63, 2016.
- [6] S. Peng, T. Wang, and C. Low, "Energy neutral clustering for energy harvesting wireless sensors networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 28, pp. 1–16, 2015.
- [7] L. Yang, Y. Lu, Y. Zhong, X. Wu, and S. X. Yang, "A multi-hop energy neutral clustering algorithm for maximizing network information gathering in energy harvesting wireless sensor networks," *Sensors*, vol. 16, no. 1, p. 26, 2015.
- [8] S. M. Bozorgi, A. S. Rostami, A. A. R. Hosseinabadi, and V. E. Balas, "A new clustering protocol for energy harvesting-wireless sensor networks," *Computers & Electrical Engineering*, 2017.
- [9] M. H. Anisi, G. Abdul-Salaam, M. Y. I. Idris, A. W. A. Wahab, and I. Ahmedy, "Energy harvesting and battery power based routing in wireless sensor networks," *Wireless Networks*, vol. 23, no. 1, pp. 249–266, 2017.
- [10] R. Qian and G. Yao, "An Energy-Efficient Cluster Head Selection Scheme for Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks," *Sensors* 20, no. 1, 2020.
- [11] R. Srinivasan and E. Kannan, "Energy Harvesting Based Efficient Routing Scheme for Wireless Sensor Network," *Wireless Personal Communications* 101, no. 3, pp. 1457–1468, 2018.
- [12] D. Sharma and A. P. Bhonekar, "An Improved Cluster Head Selection in Routing for Solar Energy-Harvesting Multi-heterogeneous Wireless Sensor Networks," *Wireless Personal Communications* 108.4, pp. 2213–2228, 2019.
- [13] M. Xiao, X. Zhang, and Y. Dong, "An effective routing protocol for energy harvesting wireless sensor networks," in *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 2080–2084, IEEE, 2013.
- [14] G. Martinez, S. Li, and C. Zhou, "Multi-commodity online maximum lifetime utility routing for energy-harvesting wireless sensor networks," in *Global Communications Conference (GLOBECOM)*, IEEE, pp. 106–111, 2014.
- [15] W. Gong, X. Yang, M. Zhang, and K. Long, "An adaptive path selection model for wsn multipath routing inspired by metabolism behaviors," *Science China Information Sciences*, vol. 58, no. 10, pp. 1–15, 2015.
- [16] D. Wu, J. He, H. Wang, C. Wang, and R. Wang, "A hierarchical packet forwarding mechanism for energy harvesting wireless sensor networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 8, pp. 92–98, 2015.
- [17] Y. Dong, J. Wang, B. Shim, and D. I. Kim, "DEARER: A distance-and-energy-aware routing with energy reservation for energy harvesting wireless sensor networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 12, pp. 3798–3813, 2016.

درصد بهبود بازده، نرخ ارسال و احتمال قطع شبکه در پروتکل R-DEARER نسبت به پروتکل DEARER در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲): درصد بهبود پارامترها

نسبت دوام شبکه پارامترها	$\rho = 0.15$	$\rho = 0.45$
بازده شبکه (η)	۳۰/۲۵٪	۲۱/۸٪
نرخ ارسال شبکه (r_{net})	۹/۱٪	۹/۶٪
احتمال قطع شبکه (p_{out})	۵/۲٪	۴۶/۲٪

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، برای بهبود پروتکل مسیریابی DEARER در شبکه‌های حسگر بی‌سیم برداشت انرژی برای کاربردهای پدافندی، پروتکلی جدید با عنوان R-DEARER ارائه شد. هر دو پروتکل در M‌های کم تقریباً عملکردی مشابهی دارند؛ چون گره‌هایی به‌عنوان سرخوشه انتخاب می‌شوند که فاصله کمتری نسبت به چاهک و انرژی بیشتری نسبت به گره‌های دیگر دارند. بنابراین گره‌های سرخوشه رله از بین همین گره‌هایی که از نظر انرژی و فاصله نسبت به چاهک وضعیت مشابهی دارند، انتخاب می‌شوند؛ در نتیجه استفاده از روش مسیریابی بین خوشه‌ای تأثیر زیادی روی بهبود بازده شبکه نسبت به پروتکل DEARER نخواهد داشت. از جمله معایب پروتکل DEARER این است که وقتی تعداد خوشه‌ها افزایش می‌یابد گره‌های دورتر نسبت به چاهک که به‌عنوان گره سرخوشه انتخاب می‌شوند ممکن است برای ارسال داده‌های خود و اعضای خوشه دچار کمبود انرژی شوند و ارسال موفقیت‌آمیزی نداشته باشند. در پروتکل مسیریابی R-DEARER، به‌منظور بهبود مسیریابی، مسیریابی چندپرشی بین گره‌های سرخوشه معرفی گردید که در این روش می‌توان انرژی مصرفی گره‌های سرخوشه را کاهش داد. در نتیجه، بازده انرژی شبکه و نرخ ارسال شبکه نسبت به پروتکل DEARER افزایش و احتمال قطع شبکه کاهش می‌یابد.

۷- مراجع

- [1] I. Mahgoub and M. Ilyas, "Sensor network protocols," CRC press, 2016.
- [2] F. K. Shaikh and S. Zeadally, "Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 1041–1054, 2016.
- [3] A. Manu, K. S. Nadir Adam, C. Tapparello, H. Ayatollahi, and W. Heinzelman, "Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks (EH-WSNs) A Review," *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)* 14, no. 2, 2018.

Energy-Harvesting Aware Multi-Hop Routing in Wireless Sensor Networks for Defense Applications

Z. Heidary Ghiri, Gh. Mirjalily*

*Department of Electrical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

(Received: 19/10/2019, Accepted: 05/08/2020)

ABSTRACT

In today's critical situation, wireless sensor networks have attracted much attention as one of the newest communication technologies for use in passive defense applications. In this regard, the limited energy resources of these networks and consequently their limited network lifetime, is a serious problem in applying them for such critical applications. Recently with the advent of energy harvesting methods, it has become possible to overcome this problem. In this paper, a new cluster-based multipath routing protocol called R-DEARER is proposed for use in energy harvesting wireless sensor networks. In this protocol, inter-cluster routing is used to make possible the multi-hop communication between cluster heads and the sink. For this purpose, the cluster-heads send their collected data packets to relay cluster-heads that are near the sink and then the relay cluster-heads send packets to the sink. By using this method, the energy consumption of the cluster-head nodes will be reduced; therefore, the network lifetime and energy efficiency will be increased significantly. The performance of the proposed protocol is examined by analyzing and evaluating the numerical results. The results show that in terms of energy efficiency, packet delivery rate, and network outage probability, the proposed R-DEARER protocol performs better than the same method in which the communication from cluster-heads to the sink is single hop.

Keywords: Wireless Sensor Networks, Passive Defense, Energy Harvesting, Clustering, Relay Cluster-Head, Inter-Cluster Routing