ارائه یک روش جدید خوشه‌بندی در جهت مسیریابی سلسله‌مراتبی با مصرف انرژی کارآمد در شبکه‌های حسگر بی‌سیم

سارا نصیریان[۱] – فرهاد فغانی[۲]

(۱) دانشجوی دکتری - دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

(۲) استادیار - دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۲/۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۶/۶

خلاصه: صرفه‌جویی در مصرف انرژی به یکی از معیارهای مهم ارزیابی طرح‌های پیشنهاد شده جهت به‌کارگیری در شبکه‌های حسگر بی‌سیم بدل شده است. پروتکل‌های مسیریابی سلسله مراتبی نسبت به بسیاری از پروتکل‌های مسیریابی از جمله پروتکل‌های مسیریابی مسطح، از نقطه نظر صرفه‌جویی در مصرف انرژی، عملکرد بهتری را از خود به نمایش گذاشته‌اند. با این حال برخی از این پروتکل‌ها نیز هنوز هم با مشکلاتی از جمله مصرف نامتعادل انرژی و اتمام انرژی در سرخوشه‌ها، به واسطه‌ی فواصل مختلف گره‌های مذکور تا ایستگاه مرکزی، مواجه هستند. در این مقاله، به منظور کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه، پروتکلی بر پایه تقسیم مساحت شبکه به چندین قطاع و دو سطح و انتخاب سرخوشه‌های مناسب از سطح نزدیک به ایستگاه مرکزی، پیشنهاد شده است. استفاده از یک ساختار درختی در هر قطاع به کاهش جریان معکوس داده از سمت ایستگاه مرکزی کمک چشمگیری می‌کند. علاوه بر آن امکان جابجایی پویای مرزهای موجود مابین سطوح و قطاع‌های مختلف شبکه در این طرح تعبیه شده است. نتایج شبیه‌سازی به درستی گویای بهبود عملکرد پروتکل پیشنهادی TSBC نسبت به پروتکل مشهور LEACH، بسیاری از نسخه‌های توسعه یافته آن از جمله Multi-Hop LEACH و تعداد کثیری از پروتکل‌های مرسوم مسیریابی از حیث کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه می‌باشد. فرمول پیشنهاد شده جهت انتخاب سرخوشه می‌تواند در سایر پروتکل‌ها نیز با هدف جلوگیری از تخلیه متمرکز باتری در نقاط مختلف شبکه به کار گرفته شود. نکته مثبت دیگر در پروتکل پیشنهادی به‌کارگیری تدابیری است که طرح پیشنهادی را تا حد زیادی نسبت به وقوع چندپارگی ایمن خواهد ساخت.

کلمات کلیدی: شبکه حسگر بی‌سیم، مسیریابی سلسله مراتبی، تخصیص قطاع، تخصیص سطح، درخت پوشای کمینه، سرخوشه، چندپارگی.

A Clustering Method for Energy Efficient Hierarchical Routing in Wireless Sensor Networks

Sara Nasirian[1] – Farhad Faghani[2]

(1) Phd Candidate - Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

sara-nasirian@sel.iaun.ac.ir

(2) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

farhad.faghani@gmail.com

One of the most important issues for performance evaluation of wireless sensor networks is energy consumption. Generally, the hierarchical clustering protocols are more efficient in energy conservation than flat routing protocols. In order to decrease energy consumption and increase network lifetime, we proposed a new clustering method, by dividing the network area to sectors and two levels and choosing cluster heads from the lower level, which are nearer to the Base Station (BS). In order to minimize the reverse flow of the data from BS, a tree structure is used in each sector. In addition, the frontier between two levels and the ones between the sectors can be moved during network lifetime and facing dead nodes. Simulation results show that the proposed TSBC outperforms LEACH, Multi-Hop LEACH and many other conventional routing protocols in energy conservation and in network lifetime. The special formula used for cluster head selection and concentrated battery depletion prevention can also be adapted to other hierarchical clustering protocols, to achieve higher energy-efficiency. Thanks to devising special measures, fragmentation occurrence in routing process is highly avoided.

Index Terms: Wireless Sensor Network, Hierarchical Routing, Minimum Spanning Tree, Fragmentation Avoidance, Sector Assignment.

نویسنده مسئول: فرهاد فغانی، استادیار، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، اصفهان، ایران، farhad.faghani@gmail.com

۱- مقدمه

شبکه‌های حسگر بی‌سیم که شامل تعداد زیادی گره‌های حسگر با قابلیت‌های حسی، محاسباتی و مخابراتی هستند، در واقع نوعی از شبکه‌های بی‌سیم اقتضایی می‌باشند [۱،۲]. برخلاف این نوع از طبقه‌بندی‌ها خصوصیات ذاتی شبکه‌های حسگر بی‌سیم از جمله داشتن باتری‌های کوچک و محدود ما را از استفاده از پروتکل‌های مسیریابی متداول و موجود برای شبکه‌های اقتضایی بی‌سیم باز می‌دارد [۲]. در نتیجه عملکردی با توان مصرفی کم راه حلی گریزناپذیر برای حل چنین مسائلی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم خواهد بود که از طریق استفاده از پروتکل‌هایی با مصرف توان کارآمد میسر خواهد شد [۳].

با وجود اینکه شبکه‌های حسگر بی‌سیم دارای محدودیت‌های ذکر شده هستند و همچنین نقاط ضعفی در رابطه با حافظه، پهنای باند و محدودیت‌های محاسباتی را نیز تجربه می‌کنند، با این حال قابلیت پشتیبانی از کاربردهای متنوع و حتی پیش‌بینی‌نشده‌ای در زمینه‌های نظامی، نظارت‌های زیست محیطی، بهداشتی و درمانی، پیش‌بینی فجایع و... را دارند [۴].

از میان جمع کثیری از پروتکل‌های مسیریابی که به منظور تعدیل مصرف انرژی گره‌ها و افزایش طول عمر شبکه پیشنهاد شده‌اند، پروتکل‌های مسیریابی سلسله مراتبی، صرفه‌جویی قابل درنگی در انرژی مصرفی کل از خود نشان داده‌اند. در پروتکل‌های مسیریابی سلسله‌مراتبی یک گره به سرخوشگی هر یک از خوشه‌های تشکیل‌شده منتسب می‌شود. این سرخوشه‌ها وظیفه‌ی دریافت اطلاعات از سایر گره‌ها، انجام پاره‌ای از پردازش‌ها بر روی اطلاعات واصله و نهایتاً ارسال داده‌ی تجمیع شده به ایستگاه مرکزی را بر عهده دارند. پردازش‌های مذکور شامل تجمیع اطلاعات، ترکیب، فیلترینگ و ... می‌باشند.

پردازش‌ها می‌توانند به نحو مؤثری تعداد پیام‌های ارسالی به سمت ایستگاه مرکزی را کاهش داده و باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی گره‌های سرخوشه شوند [۳،۵] .

انتقال اطلاعات درون هر خوشه در فاصله‌ی نسبتاً کمی انجام می‌پذیرد. پروتکل‌های سلسله‌مراتبی خوشه‌بندی از جمله LEACH [۶] و نسخه‌های توسعه‌یافته‌ی آن [۱۰،۹،۸،۷]، PEGASIS [۱۱]، CCS [۱۲] و TSC [۵] قدم‌های بزرگی در راستای صرفه‌جویی در مصرف انرژی برداشته‌اند. با این حال، این پروتکل‌های متداول مسیریابی هنوز هم می‌بایست از حیث مصرف انرژی اصلاح شده و از نقطه نظر کنترل جریان معکوس داده از سمت ایستگاه مرکزی بهبود یابند.

در این مقاله استفاده از یک طرح خوشه‌بندی دو سطحی درختی- قطاعی توصیه شده است. طرحی که در آن بکارگیری ساختار درختی باعث حذف جریان معکوس داده از سمت ایستگاه مرکزی می‌شود و علاوه بر آن بهره‌گیری از ساختار درختی- قطاعی مورد بحث، باعث توزیع مصرف انرژی به صورت یکنواخت در شبکه خواهد شد. ضمناً نزدیک‌ترین گره‌ها نسبت به ایستگاه مرکزی (گره‌های سطح یک) به عنوان سرخوشه مورد استفاده قرار می‌گیرند. این امر موجب کاهش مصرف انرژی مورد نیاز جهت ارسال پیام تجمیع‌شده توسط گره‌های سرخوشه به ایستگاه مرکزی خواهد شد.

ادامه‌ی مقاله‌ی ارائه شده به شرح ذیل خواهد بود:

بخش۲ کارهای انجام‌شده‌ی پیشین را مورد بررسی قرار می‌دهد. در بخش۳ مدل رادیویی استفاده شده در طرح پیشنهادی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بخش۴ معماری کلی و جزئیات قابل درنگ طرح TSBC را ارائه می‌دهد. در بخش ۵ نتایج حاصل از شبیه‌سازی طرح پیشنهادی با نتایج شبیه‌سازی پروتکل مشهور LEACH و یکی از نسخه‌های توسعه‌یافته‌ی آن مقایسه می‌شود. و در نهایت در بخش ۶ نتایج حاصل از تمامی بحث‌های صورت پذیرفته به صورت مدون در دسترس خواننده قرار می‌گیرد.

۲- کارهای انجام‌شده‌ی پیشین

به منظور کاهش اتلاف انرژی و افزایش طول عمر شبکه پروتکل‌های مسیریابی مختلفی پیشنهاد شده‌اند و در این راستا بیان این نکته شایان ذکر خواهد بود که پروتکل‌های مسیریابی بر پایه‌ی خوشه‌بندی از حیث صرفه‌جویی در مصرف انرژی در مقایسه با سایر پروتکل‌ها و خصوصاً پروتکل‌های مسطح بسیار خوش درخشیده‌اند. در این بخش از مقاله سعی شده است تا تعدادی از پروتکل‌های مسیریابی سلسله‌مراتبی مورد معرفی و مطالعه قرار گیرند، پروتکل‌هایی که پژوهشگران با امید تحقق هدفی همچون صرفه‌جویی در مصرف انرژی پیشنهاد کرده‌اند.

LEACH به واسطه‌ی کاهش ارسال مستقیم اطلاعات به ایستگاه مرکزی و ایجاد توازن روی بار موجود بر شبکه‌ی حسگر بی‌سیم ۸ برابر بهتر از روش انتقال مستقیم اطلاعات عمل می‌کند. از سوی دیگر باید افزود که LEACH باعث مصرف بسیار زیاد انرژی در گره‌های سرخوشه می‌شود و همین عامل است که باعث مرگ زودبهنگام گره‌های سرخوشه خواهد شد [۶].

یکی از نسخه‌های توسعه‌یافته‌ی ارائه شده برای پروتکل LEACH، TL-LEACH و یا LEACH دوسطحه نام گرفته است. TL-LEACH شامل دو سطح اولیه و ثانویه از گره‌های سرخوشه می‌باشد. در این الگوریتم هر سرخوشه‌ی اولیه با سرخوشه‌های ثانویه تحت پوشش خود و طبیعتاً هر کدام از این سرخوشه‌های ثانویه نیز با گره‌های حاضر در زیرخوشه‌های خود ارتباط برقرار می‌کنند. فرایند ترکیب اطلاعات درست همانند آنچه در LEACH به وقوع پیوست، به قوت خود باقیست. سرخوشه‌ها بر اساس برخی احتمالات از پیش‌تعیین‌شده انتخاب می‌شوند. گفتنی است که احتمال انتصاب به سرخوشگی اولیه کمتر از چنین احتمالی برای سرخوشگی ثانویه خواهد بود. باید ذکر کرد که ارتباطات درون خوشه‌ای برپایه‌ی زمان‌بندی TDMA صورت می‌پذیرد [۸].

در نسخه‌ی توسعه‌یافته‌ی دیگری از پروتکل LEACH که LEACH-C نام دارد، برخلاف آنچه در LEACH اتفاق افتاد، این بار ایستگاه

مرکزی در جهت تشکیل خوشه‌ها گام برمی‌دارد، حال آنکه در پروتکل LEACH این مهم بر عهده‌ی خود گره‌ها بود [۷]. پس از دریافت اطلاعات لازم در رابطه با سطح انرژی و محل‌قرارگیری هر یک از گره‌ها، ایستگاه مرکزی اقدام به محاسبه‌ی تعداد مناسب سرخوشه‌ها و همچنین تشکیل همین تعداد خوشه خواهد کرد. عملیات گروه‌بندی به چندین خوشه باید به نحوی انجام گیرد که وقتی اعضای خوشه‌ها اطلاعات جمع‌آوری شده را به سرخوشه‌ی خود ارسال می‌دارند، مصرف انرژی در سطح کمینه قرار گیرد [۱۳].

در صورتی که ابعاد شبکه از حد خاصی فراتر رود، شاهد افزایش بسیار زیاد فواصل مابین سرخوشه‌ها و ایستگاه مرکزی خواهیم بود. چنین شرایطی برای عملکرد پروتکل LEACH که سرخوشه‌ها در فاصله‌ی تنها یک پرش از ایستگاه مرکزی واقع شده‌اند، مناسب نخواهد بود [۹]. تحت چنین شرایطی اتلاف این سطح از انرژی برای گره‌های سرخوشه قابل تحمل و پذیرفتنی نخواهد بود و درست برای خاتمه بخشیدن به چنین مشکلی است که پروتکل Multi-Hop LEACH و یا LEACH چند- پرشه پیشنهاد شده است [۱۰].

این پروتکل نسخه‌ی توسعه‌یافته‌ی دیگری از پروتکل LEACH می‌باشد که می‌تواند کارایی انرژی را در شبکه‌های حسگر بی‌سیم بهبود بخشد. مشابه آنچه در پروتکل LEACH صورت پذیرفت، در Multi-Hop LEACH نیز برخی از گره‌ها خود را به عنوان سرخوشه معرفی کرده و سایر گره‌ها نیز به همکاری با سرخوشه‌های انتخاب شده و مساعدت در تشکیل خوشه‌ها می‌پردازند. این سرخوشه‌ها پس از تجمیع داده‌های اخذ شده از اعضای خوشه خود، فرم نهایی داده را یا به صورت مستقیم و یا از طریق سایر سرخوشه‌ها به ایستگاه مرکزی ارسال می‌کنند. Multi-Hop LEACH از دو نوع مختلف از ارتباطات تحت نام‌های ارتباطات درون- خوشه‌ای و ارتباطات برون- خوشه‌ای بهره می‌گیرد. ارتباطات درون- خوشه‌ای کلیه‌ی انتقال اطلاعات صورت گرفته بین اعضای یک خوشه و سرخوشه‌ی مربوطه را پوشش می‌دهد. ارتباطی که طی آن سرخوشه‌ی مذکور پس از دریافت اطلاعات از گره‌هایی که تنها به فاصله‌ی یک پرش از آن واقع شده‌اند، به تجمیع داده‌های دریافتی می‌پردازد و نهایتاً به ارسال فرم نهایی اطلاعات به سمت ایستگاه مرکزی دست می‌زند. درست همینجاست که می‌توانیم به توضیح ارتباطات برون- خوشه‌ای بپردازیم، زمانی که سرخوشه‌ی مذکور تمایل به ارسال اطلاعات به ایستگاه مرکزی دارد، اما فاصله‌ی گره مذکور تا ایستگاه مرکزی نسبتاً زیاد می‌باشد. در نهایت گره‌ی سرخوشه‌ی مورد بحث تصمیم به استفاده از گره‌های سرخوشه واسطه جهت ارسال فرم نهایی داده خود به ایستگاه مرکزی می‌گیرد. از چنین ارتباطاتی تحت عنوان ارتباطات برون- خوشه‌ای یاد می‌شود. تعویض تصادفی گره‌های سرخوشه هم درست شبیه پروتکل LEACH صورت می‌پذیرد. Multi-Hop LEACH بهترین مسیر با کمترین تعداد پرش مابین سرخوشه‌ی اول و ایستگاه مرکزی را انتخاب می‌کند [۱۴].

لیندسی و همکارانش الگوریتمی تحت عنوان PEGASIS پیشنهاد کرده‌اند [۱۱]. در این الگوریتم تمامی گره‌های حاضر در شبکه به تشکیل یک زنجیره می‌پردازند. داده‌ی تمامی گره ها به صورت پیوسته در طول این زنجیره پیشروی می‌کند و به صورت مدام با داده‌ی سایر گره‌ها تجمیع می‌گردد. در این الگوریتم تقریباً بهینه در هر بازه‌ی زمانیِ مخصوصِ ارسالِ داده به ایستگاه مرکزی، تنها یکی از گره‌های تشکیل‌دهنده‌ی زنجیره، به ارسال فرم نهایی اطلاعات به ایستگاه مرکزی مبادرت می‌ورزد. در iامین دوره از ارسال اطلاعات، اگر تعداد کل گره‌ها N باشد، $(i \bmod N)$ امین گره به عنوان سردسته برگزیده می‌شود و تنها گره‌ای خواهد بود که در طول این دوره به ارسال اطلاعات به ایستگاه مرکزی می‌پردازد. علیرغم کلیه‌ی نکات مثبت موجود در این پروتکل متأسفانه میزان جریان داده معکوس از سمت ایستگاه مرکزی بسیار زیاد می‌باشد [۱۱].

پروتکل دیگری تحت عنوان CCS برای رفع نقایص PEGASIS پیشنهاد شده است. در این پروتکل کل مساحت شبکه به حلقه‌های هم‌مرکز تقسیم می‌شود و در ادامه کلیه‌ی گره‌های موجود در هر حلقه نقش یک خوشه را ایفا می‌نمایند. این حلقه‌ها از سطح یک که نزدیک‌ترین سطح نسبت به ایستگاه مرکزی می‌باشد، تا سطح n که دورترین سطح تا این ایستگاه است، شماره‌دهی می‌شوند. با شگردی خاص در هر خوشه یک سرخوشه انتخاب می‌شود. در اینجا نیز درست همانند آنچه در PEGASIS گذشت، تمامی گره‌ها داده‌های خود را در طول یک زنجیره به نزدیک‌ترین همسایه‌ی خود ارسال می‌کنند. هر سرخوشه پس از وصول اطلاعات تجمیع شده به ارسال اطلاعات به سرخوشه‌ای که در سطح زیرینش واقع شده، اقدام می‌کند. نهایتاً سرخوشه موجود در سطح یک این وظیفه را با ارسال داده به ایستگاه مرکزی به پایان می‌برد [۱۲].

TSC یکی دیگر از طرح‌های خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی پیشنهاد شده می‌باشد، که در آن خوشه‌ها به شکل نوارهای منحنی شکلی هستند که در محل تقاطع حلقه‌های مدور و قطاع‌های مثلثی شکل گرفته‌اند [۵]. چنین شکلی از خوشه‌بندی می‌تواند با شکستن زنجیره‌های طولانی به زنجیره‌های کوتاه‌تر در هر حلقه مدور، منجر به کاهش ارسال مازاد داده در شبکه شود. اما گفتنی است که هنوز هم کاهش میزان ارسال سرباره داده و یا کاهش میزان جریان داده از سمت ایستگاه مرکزی امکان‌پذیر می‌باشد. با این اوصاف است که ما تصمیم به معرفی طرح TSBC با هدف کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه گرفته‌ایم.

۳- مدل رادیویی مرتبه اول

در این پژوهش، مدل رادیویی ساده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است، که در آن اتلاف بخش رادیو جهت استفاده از مدارات فرستنده و یا گیرنده برابر با $E_{elec} = ۵۰\ nJ/bit$ می‌باشد [۱۱]. این در حالی است که انرژی لازم برای مصرف در تقویت‌کننده فرستنده برابر با

$E_{amp} = ۱۰۰ \text{ pJ/bit/m}^2$ در نظر گرفته می‌شود. بخش رادیویی گره‌های حسگر بی‌سیم دارای قابلیت کنترل توان مصرفی می‌باشد و می‌تواند حداقل انرژی لازم برای ارسال پیام به یک گیرنده‌ی مشخص را صرف کند. همچنین می‌توان بخش رادیویی را برای جلوگیری از دریافت پیام‌های ناخواسته در حالت خاموش قرار داد. در چنین مدل رادیویی اتلاف انرژی وابسته به مجذور مسافت ارسالی به سبب انتقال در طول کانال در نظر گرفته می‌شود. اتلاف انرژی در یک کانال انتقال به طول d و برای یک پیام k بیتی به صورت زیر قابل مدلسازی می‌باشد:

$$E_T(k,d) = E_{Telec}(k) + E_{Tamp}(k,d), \quad E_T(k,d) = E_{elec} \times k + \varepsilon_{amp} \times k \times d^2 \qquad (۱)$$

علاوه بر این برای فرایند دریافت اطلاعات داریم:

$$E_R(k) = E_{Re\,lec}(k), \quad E_R(k) = E_{elec}(k) \qquad (۲)$$

همچنین فرض می‌کنیم که کانال رادیویی هرگز اشباع نخواهد شد. مضاف بر این کانال رادیویی متقارن در نظر گرفته می‌شود، در نتیجه انرژی لازم جهت ارسال اطلاعات از گره i به j درست برابر با انرژی لازم جهت ارسال اطلاعات در مسیر برگشت یعنی از گره j به i، با داشتن نرخ مشخصی از سیگنال به نویز (SNR)، می‌باشد. به عنوان فرضی دیگر، در نظر گرفتیم که تمامی گره‌ها محیط تحت نظارت را با نرخ ثابتی احساس کرده و در طی هر دوره داده‌ای جهت ارسال به ایستگاه مرکزی خواهند داشت.

۴- پروتکل پیشنهادی

بخش چهارم از مقاله در راستای ارائه‌ی شرح جامعی از ساختار کلی و جزئیات پروتکل TSBC نگاشته شده است. علاوه بر این برخی از اقدامات پیشگیرانه‌ای که موجب جلوگیری از وقوع چندپارگی در شبکه می‌شود تحت بررسی قرار گرفته‌اند.

۴-۱- TSBC گام به گام

هدف اصلی TSBC نائل آمدن به افزایش طول عمر شبکه با بهره‌گیری از کاهش اتلاف انرژی، خصوصاً با کمینه‌کردن جریان معکوس داده از سمت ایستگاه مرکزی، می‌باشد. در هر دوره تخصیص قطاع و سطح به صورت پویا و بر پایه‌ی تعداد گره‌های زنده و حتی میزان انرژی باقی‌مانده در شبکه، انجام می‌پذیرد. در هر قطاع، یک ساختار درختی با ریشه‌ای که یکی از گره‌های برگزیده‌ی سطح یک، نزدیکترین سطح به ایستگاه مرکزی، می‌باشد، شکل می‌گیرد. استفاده از درخت پوشای کمینه می‌تواند تضمینگر این امر باشد که تمامی گره‌ها داده‌های خود را به نزدیک‌ترین همسایه خود ارسال می‌کنند. همسایه‌ای که داده‌ی دریافتی را با داده‌ی خود ترکیب کرده و سپس به همسایه‌ی دیگرش که تنها در فاصله‌ی یک پرش از آن واقع شده، ارسال می‌کند و در نهایت سرخوشه که در طرح پیشنهادی حاضر همان ریشه‌ی درخت می‌باشد، وظیفه‌ی ارسال فرم نهایی داده به ایستگاه مرکزی را به دوش خواهد کشید.

هم‌اینک نوبت به ارائه جزئیاتی در رابطه با عبارت "خوشه‌بندی دوسطحی درختی- قطاعی" می‌رسد. به صورت کلی این عبارت به معنای شکل‌گیری یک خوشه با ادغام تمامی المان‌های مذکور، از جمله درخت‌ها، قطاع‌ها و نهایتاً سطح‌بندی آن‌ها به دو سطح می‌باشد.

تقسیم‌بندی مساحت شبکه به قطاع‌ها، استفاده از یک ساختار درختی در هر قطاع و اختصاص یکی از دو سطح به نواحی مختلف از شبکه، در واقع موجب کاهش انتقال سرباره اطلاعات می‌گردد و علاوه بر این در عمل موجب کاهش مصرف انرژی در گره‌های سرخوشه خواهد شد زیرا این پروتکل فاصله‌ی طولانی مابین گره‌های سرخوشه و ایستگاه مرکزی را به فواصل بسیار کوتاه‌تری تبدیل خواهد کرد. پروتکل جدید پیشنهادی شامل سه گام اصلی خواهد بود:

- فاز تنظیمات شبکه
- فاز ایجاد زمانبندی
- فاز ارسال اطلاعات

الف- فاز تنظیمات شبکه

در فاز تنظیمات شبکه قدم‌های مختلفی از جمله خوشه‌بندی، انتخاب سرخوشه و ساخت مسیر لازم جهت پیشرانی اطلاعات برداشته خواهد شد. تمامی این اقدامات با جزئیات کامل‌تری در این بخش بررسی می‌شوند.

الف-۱- ارسال اطلاعات به ایستگاه مرکزی

در اولین گام گره‌های پخش شده در محیط مورد نظارت بایستی اطلاعاتی در رابطه با محل قرارگیری خود را به ایستگاه مرکزی ارسال کنند. این اطلاعات شامل مختصات قرارگیری این گره‌ها می‌باشد. تعدادی از گام‌های بعدی بر اساس همین اطلاعات دریافتی صورت می‌پذیرند.

الف-۲- ایجاد دایره فرضی

در دومین گام دایره‌ای فرضی به شعاع" فاصله‌ی دورترین گره موجود تا ایستگاه مرکزی" و مرکزیت "ایستگاه مرکزی" رسم خواهد شد. با در نظر گرفتن چنین شعاع و نقطه‌ی مرکزی دایره‌ی ما تمامی گره‌های موجود در شبکه را درون خود جای خواهد داد.

الف-۳- تخصیص سطح

دراین مرحله به هر گره با توجه به فاصله‌ی آن تا ایستگاه مرکزی یکی از دو سطح اول و دوم اختصاص می‌یابد. نزدیک‌ترین گره‌ها تا ایستگاه مرکزی به گره‌های سطح یک مبدل خواهند شد و سایر گره‌ها جمعیت گره‌های سطح دو را تشکیل خواهند داد. شعاع سطح‌بندی مورد استفاده و یا قیود سطح‌بندی به‌کار گرفته شده، می‌تواند به صورت پویا با مواجهه با گره‌های مرده و یا تغییر موضع گره‌های بی‌سیم متحرک تغییر کنند. پس از تخصیص سطح، تنها گره‌های سطح یک هستند که در صورت برآورده کردن سایر قیود سرخوشگی، اجازه‌ی سرخوشه‌شدن را کسب خواهند کرد. گفتنی است که در قسمت ضمائم از پارامتر R_1 به عنوان شعاع سطح‌بندی و یا همان شعاع دایره‌ی سطح یک استفاده شده است.

الف-۴- تخصیص قطاع

در این گام از طرح پیشنهادی تقسیم کل مساحت شبکه به چندین قطاع، فارغ از آنچه در قدم تخصیص سطح صورت پذیرفت، انجام می‌گیرد. تعداد قطاع‌ها به فاکتورهای مختلفی از جمله چگالی توزیع گره‌ها در شبکه، تعداد گره‌ها، فاصله‌ی بین گره‌ها و میزان تأخیر انتقال بستگی دارد. تعداد قطاع‌ها را همچنین می‌توان بر پایه‌ی تعداد بهینه خوشه‌ها در سیستم مشخص کرد. این تعداد بهینه به پارامترهای مختلفی از جمله توپولوژی شبکه و نسبت هزینه‌های مربوط به محاسبات به ارتباطات وابسته است. با این حال در این مقاله تعداد قطاع‌ها به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که زاویه‌ی بازتاب شده از هر یک از قطاع‌ها بر ایستگاه مرکزی زاویه‌ای برابر با ۶۰ درجه باشد. انتخاب قطاع‌هایی با زاویه رأس ۶۰ درجه منجر به تشکیل هر خوشه در یک مثلث متساوی الاضلاع خواهد شد. چنین چینشی از قطاع‌ها باعث می‌شود که فاصله‌ی هر دو گره در یک قطاع به شعاع سطح دوم نسبت به ایستگاه مرکزی محدود شود. تخصیص قطاع نیز می‌تواند به صورت پویا انجام پذیرد و حتی تعداد قطاع‌ها می‌توانند در طی طول عمر شبکه تغییر کنند. تعداد سرخوشه‌ها و یا قطاع‌ها در شبکه به صورت پویا مشخص می‌شوند، این امر به منظور جلوگیری از نگهداشتن تعداد غیرضروری و زیاد گره‌های سرخوشه توصیه می‌شود.

الف-۵- ارسال اطلاعات تکمیلی به ایستگاه مرکزی

در این مرحله گره‌هایی که در سطح یک قرار گرفته‌اند، اطلاعاتی در رابطه با سطح انرژی باقیمانده خود در اختیار ایستگاه مرکزی قرار می‌دهند. این مرحله در عمل می‌تواند با نخستین مرحله از پروتکل مورد بررسی ادغام شود. ولی این امر می‌تواند باعث انتقال اطلاعاتی در شبکه شود که ایستگاه مرکزی عملاً نیاز چندانی به دریافت آنها ندارد. بنابراین ترجیحاً برای کاهش انتقال داده سربار در شبکه از صورت پذیرفتن چنین اقدامی جلوگیری می‌کنیم. ارسال چنین اطلاعاتی به ایستگاه مرکزی کمک می‌کند تا با انتخاب گره‌هایی با انرژی باقیمانده زیادتر به عنوان گره‌های سرخوشه در فاز انتخاب سرخوشه، گره‌ها با انرژی باقیمانده کمتر بتوانند، طول عمر خود را افزایش بخشند و این امر مصرف انرژی در شبکه را یکنواخت‌تر خواهد کرد.

الف-۶- انتخاب سرخوشه

تا به اینجای کار ما موفق به تشکیل خوشه‌های قطاعی شکلی شده‌ایم که در آن‌ها تنها گره‌هایی که در محل تقاطع هر یک از قطاع‌ها و سطح پایینی واقع شده‌اند، مجوز سرخوشه شدن را کسب کرده‌اند. انتخاب سرخوشه‌ها با استفاده از فرمول زیر صورت خواهد پذیرفت:

$$A = \left(\frac{E_{res}}{E_{init}}\right) + \alpha * \left(\frac{r_{L1}}{D}\right)^2 - \beta * \left(\frac{r_{L1}}{d'}\right)^2. \qquad (۳)$$

در رابطه‌ی بالا E_{res} انرژی باقی‌مانده هر یک از گره‌های کاندید سرخوشگی و یا به عبارتی هر یک از سرخوشه‌های احتمالی می‌باشد. E_{init} انرژی اولیه‌ی گره‌ی کاندید مذکور می‌باشد. r_{L1} شعاع سطح یک می‌باشد. α و β مقادیر ثابتی هستند که بر پایه‌ی تعداد تقریبی گره‌های سطح یک در هر قطاع، ابعاد شبکه، فاصله کمینه و بیشینه‌ی گره‌ها از یکدیگر در هر قطاع و برخی از فاکتورهای دیگر قابل انتخاب خواهند بود. حتی α و β با گذر زمان و مواجهه با گره‌های مرده و یا تغییر موضع گره‌های متحرک قابل تغییر خواهند بود. D فاصله‌ی مابین کاندید جدید و ایستگاه مرکزی و d' فاصله‌ی مابین کاندید جدید و سرخوشه‌ی اخیر می‌باشد. در صورتی که تغییر سرخوشه امری ضروری و گریزناپذیر باشد و بیش از یک گره برای نائل شدن به مقام سرخوشگی کاندید شده باشند، گره‌ای که بتواند بیشترین مقدار A را کسب کند، سرخوشه‌ی دوره‌ی بعدی خواهد شد. حتی معیار انتخاب سرخوشه را می‌توان به گونه‌ای تغییر داد که فاصله تا سرخوشه‌ی خوشه‌های مجاور نیز در انتخاب سرخوشه‌ی جدید نقش‌آفرینی کند. استفاده از فاکتورهایی از جمله‌ی فواصل مابین سرخوشه‌های فعلی و قبلی و یا سرخوشه‌های دو قطاع مجاور می‌تواند از وقوع تخلیه متمرکز باتری در نواحی مختلف شبکه جلوگیری به عمل آورده و با انتخاب یک سرخوشه‌ی مناسب به ایجاد توازن بار در شبکه یاری رساند. فرمول مذکور همچنین به بهترین نحو از گره‌هایی که در نزدیک‌ترین فاصله نسبت به ایستگاه مرکزی واقع شده‌اند، بهره می‌برد. پس در هر دوره‌ای که تغییر سرخوشه امری الزامی می‌نماید، گره‌ای از سطح یک به عنوان سرخوشه انتخاب می‌شود که در نزدیک‌ترین فاصله از ایستگاه مرکزی و به طور همزمان در دورترین فاصله تا سرخوشه‌ی اخیر واقع شده است و همچنین از انرژی باقیمانده‌ی نسبتاً خوبی برخوردار می‌باشد. در اولین دوره از انتخاب سرخوشه، یکی از گره‌های سطح یک که بیشترین میزان انرژی و کم‌ترین فاصله تا ایستگاه مرکزی را دارا می‌باشد، به سرخوشگی منصوب می‌گردد. در صورتی که تمامی گره‌ها فعالیت خود را با میزان مساوی از انرژی آغاز کنند، اولین سرخوشه در هر قطاع، در واقع همان نزدیک‌ترین گره به ایستگاه مرکزی خواهد بود.

در این مرحله از الگوریتم پیشنهادی، یک سطح انرژی آستانه برای گره‌هایی که تمایل به سرخوشه شدن دارند، تعریف می‌شود و در نتیجه تنها گره‌هایی که انرژی لازم جهت برآورده کردن این شرط را داشته باشند، مجوز سرخوشه شدن را اخذ می‌نمایند. اتخاذ چنین تدابیری احتمال وقوع پدیده‌ی چندپارگی را در شبکه کاهش داده و تضمینگر وصول پیام گردآوری، ترکیب و تجمیع‌شده‌ی نهایی در کمال صحت به ایستگاه مرکزی خواهد بود.

ذکر این نکته‌ی واضح شاید خالی از لطف نباشد که، E_{res}، D و d' همگی توسط بیشترین مقادیر خود یعنی E_{init} و r_{L1} در رابطه (۳) نرمالیزه شده‌اند و دیگر واحدی به آن‌ها اختصاص نخواهد یافت و انجام عملیات ریاضی خطی بر کسرهای نمایش داده شده، محقق خواهد شد. این مرحله می‌تواند توسط هر الگوریتم انتخاب سرخوشه‌ی دیگری نیز جایگزین شود و یا توسط هر پروتکل مسیریابی سلسله مراتبی دیگری به کار گرفته شود.

الف-۷- تشکیل درخت

در این مرحله نوبت به تشکیل ساختار درخت در هر قطاع می‌رسد. ریشه درخت‌ها در واقع سرخوشه‌های برگزیده در قدم قبل می‌باشند.

استفاده از ساختار درخت تضمین‌گر کمترین حد از انتقال مازاد داده می‌باشد، به ویژه وقتی که ریشه درخت در نزدیکترین فاصله نسبت به ایستگاه مرکزی واقع شده باشد. در این مقاله ما از درخت پوشای کمینه بهره گرفته‌ایم و مربع فاصله بین دوگره را به عنوان هزینه لینک بین دو گره لحاظ کرده‌ایم. در این حالت اگر فاصله بین گره A و B برابر با a باشد، هزینه لینک مابین این دوگره برابر با a^2 خواهد بود.

پس در اینجا درخت پوشای کمینه درختی خواهد بود که در آن تمامی گره‌ها قابلیت ارسال داده به نزدیک‌ترین همسایه خود را خواهند داشت و بدین صورت است که انرژی مصرفی جهت ارسال داده در طول شبکه به کمترین میزان ممکن تقلیل می‌یابد.

ب- فاز ایجاد زمانبندی

در پژوهش پیش رو، دو نوع مختلف از تداخلات تحت نام‌های تداخلات درون- خوشه‌ای و همچنین تداخلات برون- خوشه‌ای در نظر گرفته شده است. ما در صدد حل این معضلات با بکارگیری همزمان راهکارهای مختلف برآمده‌ایم. اولاً بکارگیری زمانبندی TDMA درون- خوشه‌ای تضمین- کننده‌ی این مسئله خواهد بود که از وقوع تداخلات مابین گره‌های یک خوشه جلوگیری به عمل خواهد آمد و همین امر موجب صرفه‌جویی بیشتر در مصرف انرژی شده و عملکرد موجود در رابطه با تعداد پیام‌های واصله به ایستگاه مرکزی را بهبود می‌بخشد. هر گره در ساختار درخت طبق زمانبندی از پیش تعیین شده و در طی بازه‌ی زمانی مختص به خود، داده‌ی خود را به گره والدش در ساختار درخت ارسال کرده و تا نوبت بعدی ارسال اطلاعاتش در حالت خواب قرار می‌گیرد. در ادامه طبق برنامه‌ی زمانی موجود نوبت به ارسال اطلاعات توسط گره‌ی والد مذکور خواهد رسید. پس در نتیجه با توجه به آنچه تا به این لحظه ذکر شد، امکان ایجاد هیچگونه تداخلی مابین اطلاعات ارسال شده توسط گره‌های یک خوشه وجود نخواهد داشت. با این وجود، چنین فرآیند بدون تداخلی را هنوز هم می‌توان با بهره‌گیری از برخی نسخه‌های محلی یا آگاه از همسایگیِ زمانبندیِ TDMA، تسریع کرد. با توجه به گنجایش محدود فریم زمانبندی و یا صرفاً جهت تسریع در فرآیند ارسال داده‌های یک خوشه استفاده از چنین نسخه‌هایی از زمانبندی TDMA، که مدل و برد تداخل را مورد ملاحظه قرار می‌دهند، توصیه می‌شود (پژوهش ما سعی در ارائه چنین الگوریتم‌های زمانبندی ندارد). ثانیاً برای حذف تداخلات برون- خوشه‌ای به استفاده از الگوریتم تخصیص کد CDMA روی آورده‌ایم. در این راستا هر خوشه چه برای انجام ارتباطات درون- خوشه‌ای و چه برای ارسال فرم نهایی داده به ایستگاه مرکزی از یک کد منحصر بفرد مختص به خود استفاده می‌کند. در نهایت باید اذعان داشت که استفاده‌ی توام از زمانبندی TDMA و تخصیص کد CDMA یک ارتباط عاری از تداخل را تا حد خوبی تضمین خواهد کرد.

ج- فاز ارسال اطلاعات

وقتی پیکربندی خوشه‌ها به سرانجام رسید، نوبت به انتقال اطلاعات به ایستگاه مرکزی خواهد رسید. هر گره داده خود را طی بازه‌ی زمانی مختص به خود به گره والدش در ساختار درخت ارسال می‌کند. در آنجا گره والد مذکور داده دریافتی را با داده خود ترکیب کرده و داده حاصل را به گره والد خودش در ساختار درخت ارسال می‌کند. این فرآیند تا جایی ادامه می‌یابد که کل داده موجود در قطاع مورد نظر به سرخوشه برسد. نهایتاً در این مرحله سرخوشه نیز داده خود را با داده‌ی دریافتی مذکور ترکیب کرده و حاصل را به ایستگاه مرکزی که به صورت نسبی در نزدیک‌ترین فاصله از آن واقع شده، ارسال می‌دارد. شکل (۱) می‌تواند تا حدی روشنگر قدم‌های مختلف موجود در پروتکل پیشنهادی باشد. برای سهولت هرچه بیشتر در فهم روند تکمیل الگوریتم می‌توانید به بلوک دیاگرام موجود در شکل (۲) و یا فلوچارت موجود در ضمائم تحت عنوان شکل (۸) توجه فرمایید.

۴-۲- اقدامات پیشگیرانه

به منظور جلوگیری از وقوع پدیده‌ی چندپارگی در شبکه که طی آن سرخوشه‌ها علیرغم داشتن انرژی باقیمانده غیر صفر قابلیت برقراری ارتباط با ایستگاه مرکزی را نخواهند داشت. به عبارت دیگر میزان انرژی باقیمانده گره‌های سرخوشه جهت ارسال اطلاعات تا ایستگاه مرکزی کافی نیست. سطح خاصی از انرژی به عنوان سطح انرژی آستانه برای گره‌هایی که قصد سرخوشه شدن دارند، مشخص می‌شود. گره‌هایی که قصد کاندید شدن برای سمت سرخوشگی را دارند باید پیش از هر چیز سطح انرژی خود را با سطح آستانه معرفی شده مقایسه نمایند. هر گره کاندید که انرژی لازم جهت برآورده کردن این قید را نداشته باشد در همان قدم‌های ابتدایی مجوز خود جهت انتصاب به سرخوشگی را از دست خواهد داد.

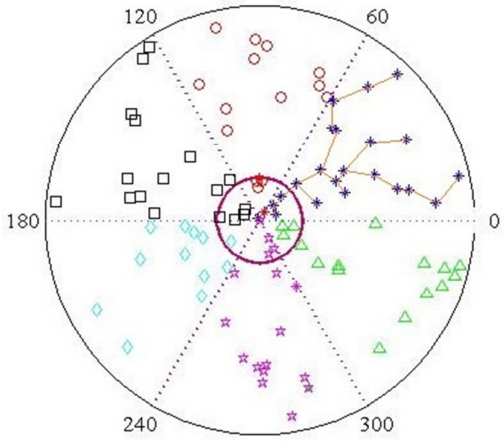
❖ تذکر

در اینجا ذکر این نکته بسیار مهم و اساسی می‌نماید که، ایستگاه مرکزی الزاماً در نقطه‌ی مرکزی شبکه واقع نمی‌شود، بلکه تنها در نقطه‌ی مرکزی دایره‌ی فرضی ما واقع می‌گردد. حتی تحت شرایطی که ایستگاه مرکزی در لبه‌ی شبکه واقع شده باشد، هنوز هم لازم است که یک دایره‌ی فرضی به شعاع "فاصله دورترین گره‌ی موجود تا ایستگاه مرکزی" و مرکزیت "ایستگاه مرکزی" در نظر گرفته شود.

یکی از مسائلی که ممکن است تحت این شرایط متفاوت ظاهر شود، افزایش شعاع دایره‌ی فرضی نسبت به حالتی است که ایستگاه مرکزی در مرکزیت جغرافیایی شبکه واقع شده باشد. نکته‌ی متفاوت دیگر این است که تحت این شرایط ممکن است بخشی از مساحت دایره‌ی فرضی ما خالی از هرگونه گره حسگر باشد. شایان ذکر است که محل قرارگیری ایستگاه مرکزی می‌تواند بر انتخاب تعداد قطاع‌ها نیز اثرگذار باشد. ولی در نهایت باید گفت هرچند محل قرارگیری ایستگاه مرکزی می‌تواند شعاع دایره‌ی فرضی را تغییر داده و یا تعداد قطاع‌ها را دستخوش تغییر کند، اما به هیچ عنوان خللی در روند پیشرفت الگوریتم ارائه شده ایجاد نخواهد کرد. شکل (۳) می‌تواند مسائل مطرح شده در رابطه با محل قرارگیری ایستگاه مرکزی و تغییرات حاصل را تا حدودی پوشش دهد.

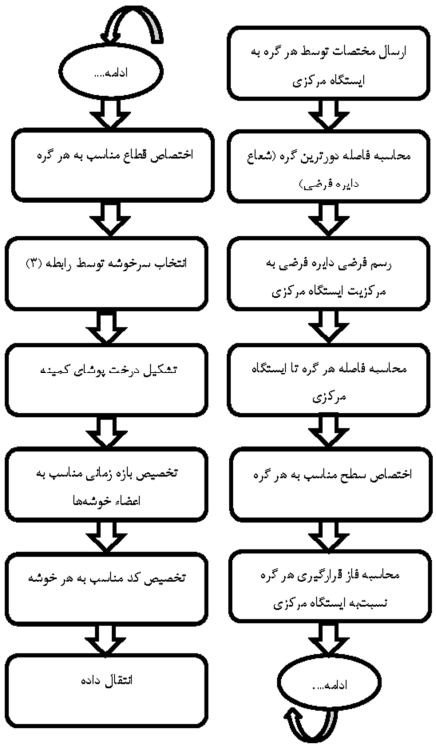
۵- شبیه‌سازی و نتایج

در این قسمت به معرفی شرایط شبیه‌سازی و نتایج حاصل می‌پردازیم.



شکل (۱): شمای کلی از تمامی قدم‌های برداشته شده در راستای تکمیل پروتکل TSBC

Fig. (1): Overall steps taken in TSBC



شکل (۲): بلوک دیاگرام قدم به قدم از چگونگی عملکرد طرح پیشنهادی

Fig. (2): Step by Step block diagram of TSBC

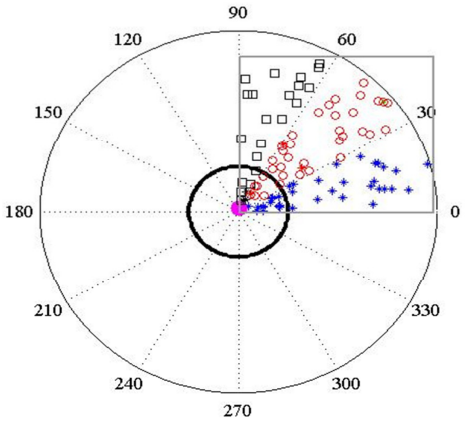
۵-۱- شبیه‌سازی

در این پژوهش، برای ارزیابی عملکرد طرح پیشنهادی TSBC از نرم افزار MATLAB R2013b استفاده شده است. در سناریوی اول شبیه‌سازی یک شبکه با ۱۰۰ گره حسگر که به صورت تصادفی در یک مساحت مدور پخش شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. در این سناریو ایستگاه مرکزی در مرکز این ناحیه واقع شده است. تفاوت سناریوی دوم با سناریوی مذکور پخش تصادفی گره‌ها در محیطی است که ایستگاه مرکزی در یکی از نقاط رأس آن واقع شده است. در هر دو سناریو انرژی اولیه هر گره ۰/۵ J در نظر گرفته شده و این بدان معناست که انرژی اولیه کل شبکه مقداری برابر با ۵۰ J خواهد داشت. در سناریوی اول که ایستگاه مرکزی در مرکز جغرافیایی شبکه واقع شده است، با انتخاب ۶ قطاع، هر قطاع یک زاویه ۶۰ درجه بر روی ایستگاه مرکزی بازتاب خواهد کرد. اما در سناریوی دوم در جهت بررسی وسیع‌تر عملکرد طرح پیشنهادی، شبیه‌سازی با تقسیم مساحت پوشیده شده از گره به ۳ قطاع که در رأس خود هر یک زاویه‌ای معادل ۳۰ درجه را بر ایستگاه مرکزی باز می‌تابانند، صورت پذیرفته است. لازم به ذکر است که در این حالت دایره‌ی فرضی شامل ۱۲ قطاع می‌باشد که تنها ۳ عدد از این قطاع‌ها حاوی گره‌های حسگر بی‌سیم می‌باشند و ایستگاه مرکزی علیرغم قرارگیری در گوشه‌ای از محیط تحت نظارت همچنان در مرکزیت دایره‌ی فرضی واقع شده است. در هر قطاع تعداد از پیش تعیین نشده‌ای گره وجود دارد. اندازه هر فریم داده ۲۰۰۰ بیت در نظر گرفته شده است. انرژی مصرفی جهت ارسال یا دریافت هر بیت برابر با ۵۰ nJ تنظیم شده و انرژی لازم جهت تجمیع اطلاعات برابر با $5\ {}^{nJ}/_{bit}$ در نظر گرفته شده است. اتلاف انرژی جهت تقویت یک بیت از داده برابر با $100\ PJ/bit/m^2$ در نظر گرفته شده است. جدول (۱) متغیرهای مورد استفاده جهت شبیه‌سازی‌های کامپیوتری را گرد آورده است.

بخش رادیویی هر گره توانایی کنترل توان ارسالی را دارا می‌باشد. در نتیجه قادر خواهد بود با کمترین توان ممکن داده‌ی مورد نظر را به گیرنده‌ی مشخصی ارسال کند. به منظور جلوگیری از دریافت داده‌های ناخواسته بخش رادیویی هر گره می‌تواند در حالت خاموش قرار گیرد.

تمامی کمیت‌های عددی در نظر گرفته شده از جمله انرژی اولیه هر گره، انرژی مصرفی جهت هر یک از فرآیندهای ارسال یا دریافت اطلاعات، انرژی لازم جهت تجمیع داده، اندازه‌ی هر یک از بسته‌های اطلاعاتی و انرژی لازم جهت استفاده در تقویت‌کننده‌ی فرستنده به گونه‌ای منطقی انتخاب شده‌اند تا نتایج حاصل از شبیه‌سازی پروتکل ارائه شده قابلیت مقایسه با نتایج حاصل از شبیه‌سازی سایر پروتکل‌های مشابه را داشته باشد. تعداد کثیری از پروتکل‌های معروفی که از مدل رادیویی مرتبه اول یا هر مدل رادیویی دیگر بهره گرفته‌اند، برای دستیابی به نتایج ارزشمند شبیه‌سازی‌های خود از مقادیر عددی مشابهی استفاده کرده‌اند.

برای سادگی و با در نظرگرفتن این نکته که در این شبیه‌سازی‌ها تنها تعداد محدودی سرخوشه محتمل در هر قطاع وجود دارد، از فرمول مخصوص معرفی‌شده جهت انتخاب سرخوشه استفاده نشده است. بدین منظور سرخوشه‌ها به نحوی انتخاب شده‌اند که بیشترین میزان انرژی باقیمانده و کمترین فاصله تا ایستگاه مرکزی را دارا باشند.



شکل (۳): عدم جایگیری ایستگاه مرکزی در مرکزیت جغرافیایی شبکه
Fig. (3): A Network with a not-centrally-placed BS

۵-۲- نتایج

در این مقاله از دو معیار عملکردی مختلف جهت ارزیابی طرح پیشنهادی TSBC استفاده شده است:

- تعداد گره‌های مرده بر حسب شماره دوره
- انرژی باقیمانده شبکه برحسب شماره دوره

معیار اول که تعداد گره‌های مرده بر حسب شماره دوره می‌باشد می‌تواند تا حدودی نشانگر این واقعیت باشد که تا چه زمانی شبکه قابلیت ارسال اطلاعات پیش از مرگ تمامی گره‌هایش را خواهد داشت. معیار دیگر که میزان انرژی باقیمانده شبکه را نشان می‌دهد، کماکان نشانگر نرخ مصرف انرژی در شبکه خواهد بود. این دو معیار از معیارهای گویا و نسبتاً جامع در ارزیابی عملکرد شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌باشند که در بسیاری از مقالات و کارهای پژوهشی جهت مقایسه عملکرد طرح پیشنهادی با عملکرد پروتکل‌های معروف و کارا مورد استفاده قرار گرفته اند. در ادامه ما نیز سعی در مقایسه عملکرد طرح پیشنهادی خود با پروتکل‌های معروفی از قبیل LEACH و یکی از موفق‌ترین توسعه یافته‌های این الگوریتم تحت عنوان Multi Hop LEACH داریم.

شکل (۴) نشان می‌دهد که شبکه تحت پوشش پروتکل پیشنهادی TSBC حتی در بیش از ۲۵۰۰ دوره پس از دوره‌ای که در آن آخرین گره‌ی زنده در شبکه تحت پوشش پروتکل LEACH می‌میرد، هنوز هم حاوی گره‌های زنده می‌باشد.

مواردی مشابه در مقایسه‌ای که مابین نتایج شبیه‌سازی پروتکل پیشنهادی و پروتکل Multi-Hop LEACH صورت پذیرفته است، تکرار می‌شود. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، در حدود بیش از ۱۷۵۰ دوره شبکه تحت پوشش الگوریتم پیشنهاد شده هنوز هم حاوی گره‌های زنده می‌باشد. این در حالی است که تمامی گره‌های حاضر در شبکه تحت پوشش پروتکل Multi-Hop LEACH پیش از این مرده‌اند. مسئله شایان ذکر دیگر اشاره به این نکته است که فرآیند مرگ گره‌ها با تاخیر حدود ۱۵۰۰ و ۱۲۵۰ دوره‌ای در پروتکل پیشنهادی نسبت به LEACH و Multi-Hop LEACH آغاز می‌شود.

Table (1): Variables used for network simulations
جدول (۱): متغیرهای مورد استفاده جهت شبیه‌سازی‌های کامپیوتری

متغیر	مقدار
تعداد گره‌ها	۱۰۰
تعداد قطاع‌ها (سناریوی اول)	۶
تعداد قطاع‌ها (سناریوی دوم)	۱۲ (۳ قطاع پوشیده شده از گره + ۹ قطاع خالی)
مقدار انرژی اولیه هر گره	۰/۵ **J**
انرژی موردنیاز جهت فرایند دریافت (مدارات گره)	۵۰ $^{\mathbf{nJ}}/_{\mathbf{bit}}$
انرژی مورد نیاز جهت فرایند ارسال (مدارات گره)	۵۰ $^{\mathbf{nJ}}/_{\mathbf{bit}}$
تجمیع اطلاعات	۵ $^{\mathbf{nJ}}/_{\mathbf{bit}}$
سایز داده	۲۰۰۰**bit**
تقویت کننده فرستنده	۱۰۰**PJ/bit/m²**

شکل (۵) نمایشگر این واقعیت است که، انرژی باقی‌مانده‌ی شبکه تحت پوشش پروتکل پیشنهادی حداقل ۳۰۰۰ دوره بیشتر از شبکه تحت پوشش پروتکل LEACH و حداقل ۲۰۰۰ دوره بیشتر از شبکه تحت پوشش پروتکل Multi-Hop LEACH می‌باشد.

تمامی آنچه در شکل‌های (۴) و (۵) ملاحظه شد، کمابیش در شکل‌های (۶) و (۷) نیز قابل مشاهده است. بدین صورت که فرآیند مرگ گره‌ها در سناریوی دوم حتی کمی دیرتر نسبت به سناریوی اول صورت می‌پذیرد. شروع مرگ گره‌ها در سناریوی دوم تأخیر حدوداً ۲۵۰ دوره‌ای را تجربه می‌کند. ولی با این حال از دوره ۳۰۰۰ به بعد کمی نسبت به سناریوی اول ضعیف‌تر عمل می‌کند. البته در این دوره شبکه با مرگ تعداد زیادی از گره‌هایش با چالش‌های بسیار جدی‌تری نسبت به مرگ این تعداد از گره مواجه می‌باشد. پس می‌توان گفت محل قرارگیری ایستگاه مرکزی تأثیر سوء چندانی که تنها قابلیت تخریب طرح پیشنهادی TSBC را داشته باشد، به همراه ندارد و حتی در مواردی با توجه به پخش متعادل بار در شبکه‌های تحت پوشش TSBC باعث بهبود عملکرد چنین شبکه‌هایی خواهد شد. بررسی هرچه دقیق‌تر شکل (۷) نیز می‌تواند مؤید موارد مذکور باشد.

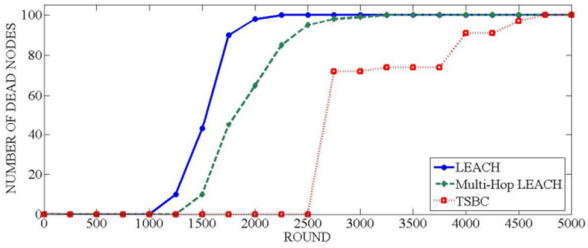
تمامی این نتایج خوب با یادآوری این نکته که جریان معکوس داده از ایستگاه مرکزی با استفاده از ساختار درختی تقریباً برابر با صفر شده است، به شدت تقویت خواهد شد. علاوه بر این پدیده‌ی چندپارگی به واسطه‌ی تعیین یک حد آستانه از انرژی برای سرخوشه‌ها و حرکت پویای مرزهای سطح‌بندی و قطاع‌بندی اتفاق نخواهد افتاد.

۶- نتیجه‌گیری

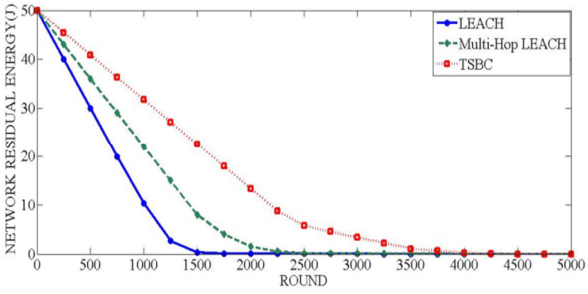
در این مقاله طرح TSBC با هدف ارائه‌ی یک پروتکل مسیریابی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیمی که مصرف انرژی در آن‌ها به صورت کارآمدی مدیریت می‌شوند، معرفی شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها گویای افزایش نسبتاً خوبی در فاکتور طول عمر شبکه و بهبود نرخ مرگ گره‌ها در مقایسه با سایر پروتکل‌های مرسوم مسیریابی بوده است. طرح پیشنهادی با

بهره‌گیری از ساختار درختی کمینه به لغو یا کاهش اساسی میزان جریان داده‌ی معکوس از سمت ایستگاه مرکزی می‌انجامد. تقریباً تمام محاسبات لازم برای پیاده‌سازی طرح پیشنهادی پیش از فاز انتقال داده در ایستگاه مرکزی صورت می‌پذیرد و در نتیجه طرح پیشنهادی ما وظایف سنگین محاسباتی را بر دوش گره‌های کم‌انرژی و کم‌حافظه تحمیل نخواهد کرد. نتیجتاً طرح پیشنهادی TSBC مناسب کاربردهایی است که در آنها صرفه‌جویی در مصرف انرژی کاملاً اجباری می‌باشد.

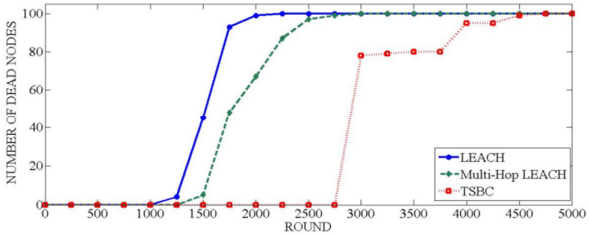
برخلاف تعداد زیادی از پروتکل‌های مسیریابی متداول، در این پروتکل انتقال مازاد اطلاعات وجود ندارد و یا قابل چشم‌پوشی خواهد بود، چرا که جریان معکوس داده از سمت ایستگاه مرکزی با بهره‌گیری از ساختار درختی لغو شده است. باید افزود که پروتکل پیشنهاد شده بهترین گزینه برای کاربردهایی است که در آنها انتقال مازاد اطلاعات باید در کمترین سطح ممکن انجام پذیرد.



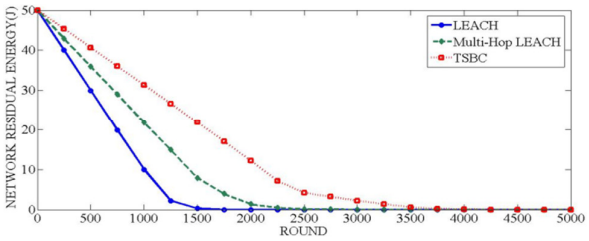
شکل (۴): منحنی مقایسه‌ای تعداد گره‌های مرده بر حسب شماره دوره
(قرارگیری ایستگاه مرکزی در مرکز جغرافیایی محیط تحت نظارت)
Fig. (4): Number of dead nodes per round
(BS at center)



شکل (۵): منحنی مقایسه‌ای کل انرژی باقی‌مانده در شبکه
(قرارگیری ایستگاه مرکزی در مرکز جغرافیایی محیط تحت نظارت)
Fig. (5): Residual energy of all the sensor nodes per round
(BS at center)

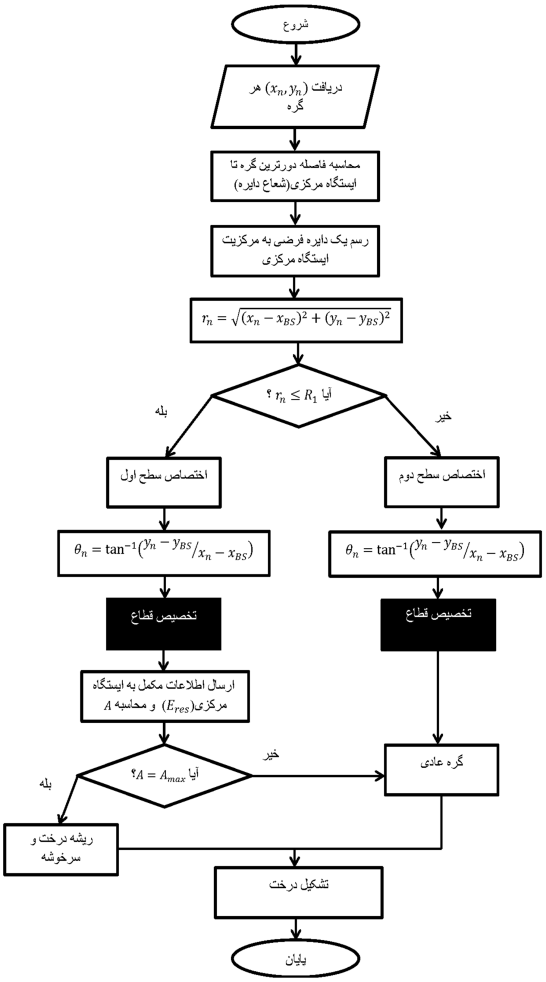


شکل (۶): منحنی مقایسه‌ای تعداد گره‌های مرده بر حسب شماره دوره
(عدم قرارگیری ایستگاه مرکزی در مرکز جغرافیایی محیط تحت نظارت)
Fig. (6): Number of dead nodes per round
(BS not at center)



شکل (۷): منحنی مقایسه‌ای کل انرژی باقی‌مانده در شبکه
(عدم قرارگیری ایستگاه مرکزی در مرکز جغرافیایی محیط تحت نظارت)
Fig. (7): Residual energy of all the sensor nodes per round
(BS not at center)

ضمائم :



شکل (۸): فلوچارت چگونگی عملکرد طرح پیشنهادی TSBC
Fig. (8): Flowchart of TSBC Operation

References

[1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "Wireless sensor networks: A survey", ComputerNetworks, Vol. 38, No.4, pp.393-422, Dec. 2002.

[2] J.N. Al-Karaki,A.E. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks: A survey", IEEE Wireless Communications, Vol.11, No.6, pp.6-28, Dec.2004.

[3] J.J. Lotf, M. Hosseinzadeh, R.M. Alguliev, "Hierarchical routing in wireless sensor network: Asurvey", Proceeding of the IEEE/ICCET, Vol. 3, pp. 650-654, Chengdu, China, 2010.

[4] H. Zhao, W. Jie, Z. Jie, L. Liefeng, T. Kaiyun, "A general self-organized tree-based energy-balance routing protocol for wireless sensor network", IEEE Trans. on Nuclear Sciences, Vol. 61, No.2, pp. 732-740, Apr.2014.

[5] G. Navin, L. Won-Il, P. Jae-Young, "Track-sectorclustering for energy efficient routing in wireless sensornetworks", Proceeding of the IEEE/CIT, Vol.2, pp.116-121, Xiamen, China, China, 2009.

[6] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks", Proceeing of the IEEE/HICSS, Vol. 2, pp. 1-10, Maui, HI, USA, USA, Jan. 2000.

[7] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks", IEEE Trans. on Wireless Communications, Vol.1, No.4, pp. 660-670, Oct. 2002.

[8] V. Loscri, G. Morabito, S. Marano, "A two-level hierarchy for low-energy adaptive clustering hierarchy (TL-LEACH)", Proceeding of the IEEE/ETECF, Vol.3, pp. 1809-1813, Dallas, TX, USA, USA,2005.

[9] F. Xiangning, S. Yulin, "Improvement on LEACH protocol of wireless sensor network", Proceeding of the IEEE/ SENSORCOMM, pp. 260-264, Valencia, Spain, 2007.

[10] R.V. Biradar, S.R. Sawant, R.R. Mudholkar, V.C. Patil, "Multihop routing in self-organizing wireless sensor networks", IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 8, Issue 1, Jan. 2011.

[11] S. Lindsey,C. Raghavendra,"PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems", Proceeding IEEE/AERO, Vol.3,pp.1125-1130, Big Sky, MT, USA, 2002.

[12] S.M. Jung, Y.J.Han, T.M. Chung, "The concentric clustering scheme for efficient energy consumption in the PEGASIS", Proceeding of the IEEE/CACT, Vol.1,pp.260-265, Okamoto, Kobe, Japan, Feb.2007.

[13] S. Varshney, C. Kumar, A. Swaroop, "A comparative study of hierarchical routing protocols in wireless sensor networks", Proceeding of the IEEE/INDIACom, pp. 1018-1023, New Delhi, India, 2015.

[14] M. Aslam, N. Javaid, A. Rahim, U. Nazir, A. Bibi, Z.A. Khan, "Survey of extended LEACH-based clustering routing protocols for wireless sensor networks", Proceeding of the IEEE/HPCC, pp. 1232 - 1238, July 2012