مجله علمی پژوهشی «علوم و فناوری های پدافند غیرعامل»
سال چهارم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۲؛ ص ۳۰۰-۲۹۳

تجمیع داده‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مبتنی بر خوشه‌بندی و درخت پوشای کمینه

سیده زهرا سعادتی[۱]، هدیه ساجدی[۲*]

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد امیدیه، گروه کامپیوتر، امیدیه، ایران ۲- استادیار دانشکده ریاضی، آمار و علوم کامپیوتر، پردیس علوم، دانشگاه تهران

(دریافت: ۹۲/۰۴/۲۵، پذیرش: ۹۲/۱۱/۲۵)

چکیده

شبکه‌های حسگر بی‌سیم با صدها گره حسگر کوچک امکان نظارت از راه دور بر بسیاری از محیط‌ها نظیر محیط‌های نظامی را فراهم می‌کنند. عمده‌ترین چالش در این شبکه‌ها، محدودیت مصرف انرژی است که بر طول عمر شبکه تأثیر می‌گذارد. یکی از راه‌حل‌های کلیدی برای رفع این چالش، تجمیع داده‌ها و جلوگیری از ارسال داده‌های تکراری است. شناخته‌شده‌ترین پروتکل‌های ارتباطی در این زمینه، تجمیع داده مبتنی بر خوشه‌بندی و تجمیع داده مبتنی بر درخت است. خوشه‌بندی در موضوع تجمیع داده موجب توازن انرژی می‌شود، اما بعضاً به دلیل مسافت زیاد بین سرخوشه و ایستگاه مرکزی، مصرف انرژی در این پروتکل زیاد است. در ساختار درختی با توجه به مسافت کوتاه بین حسگرها، انرژی مصرفی کم می‌باشد اما عمق درخت زیاد است و هنگامی که تعداد حسگرها زیاد باشد ساخت درخت تجمیع دشوار است. در این مقاله یک روش سلسله مراتبی ترکیبی با نام CTDA مبتنی بر خوشه‌بندی و درخت پوشای کمینه به منظور کاهش مصرف انرژی در تجمیع داده‌های شبکه حسگر بی‌سیم پیشنهاد شده است. شبیه سازی روش پیشنهادی بیانگر کاهش مصرف انرژی نسبت به دو پروتکل قبل است.

کلید واژه‌ها: شبکه حسگر بی‌سیم، تجمیع داده‌ها، خوشه‌بندی، درخت پوشای کمینه.

Data Aggregation in Wireless Sensor Networks Based on Clustering and Minimum Spanning Tree

Z. Saadati, H. Sajedi*
Department of Computer Science, University of Tehran

(Received: 16/07/2013; Accepted: 14/02/2014)

Abstract

Wireless sensor networks afford the possibility to control remote monitoring of many environments (such as military ones) by hundreds of tiny sensor nodes. Restriction of energy consumption is a major challenge in these networks, which will affect the lifetime of the network. One of the key solutions to solving the challenge is data aggregation and avoiding of repeated data sending. The most popular communication protocols are clustering and tree based data aggregation. Clustering in data aggregation issue leads to energy balance, but energy consumption is high due to long distances between cluster heads and base station. In the tree structure, due to short distances between nodes, energy consumption is low but, the depth of the tree is usually high. In this paper, a hybrid analytical hierarchical process named CTDA is proposed in which energy consumption is reduced by clustering and minimum spanning tree for data aggregation in wireless sensor networks. The simulation of the proposed method illustrates reduction in energy consumption compared to two aformentioned protocols.

Keywords: Wireless Sensor Network, Data Aggregation, Clustering, Minimum Spanning Tree.

* Corresponding Author E-mail: hhsajedi@ut.ac.ir

۱. مقدمه

پیشرفت‌های اخیر در زمینه الکترونیک، سامانه‌های MEMS[1] و مخابرات بی‌سیم، توانایی طراحی و ساخت حسگرهایی با توان مصرفی پایین، اندازه کوچک، قیمت مناسب و کاربردهای گوناگون را فراهم ساخته است. این تکنولوژی موجب پیدایش ایده‌ای برای ایجاد و گسترش شبکه‌هایی موسوم به شبکه‌های حسگر بی‌سیم[2] شده است. شبکه‌های حسگر بی‌سیم نوع خاصی از شبکه‌های موردی[3] هستند که متشکل از تعداد زیادی گره حسگر می‌باشند. هر گره حسگر شامل ماژول حسگر، ماژول پردازش، ماژول ارتباط و باطری است. این حسگرها محدودیت‌هایی در توان و باطری، محاسبات، ظرفیت و ذخیره‌سازی و مانند آن دارند. کاربرد عمده این نوع شبکه‌ها نظارت و کنترل بر محیط‌های مختلف از جمله محیط‌های نظامی، محیط زیست و پزشکی است. در یک شبکه حسگر بی‌سیم گره‌های حسگر در یک محیط خاص به طور گسترده پخش شده‌اند و به صورت دوره‌ای داده‌های حس شده از محیط را جمع‌آوری می‌کنند، پردازش بسیار کمی بر روی آن‌ها انجام می‌دهند سپس اطلاعات حاصل را برای ایستگاه مرکزی[4] ارسال می‌کنند [۱]. ایستگاه مرکزی یک گره حسگر قدرتمند است که معمولاً به هر دو شبکه حسگر بی‌سیم و شبکه IP سنتی اتصال دارد. طول عمر هر گره حسگر توسط باطری تعیین می‌شود که به میزان قابل توجهی ارتباط میان حسگرها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در بسیاری از کاربردهای شبکه‌های حسگر به ویژه در زمینه‌های نظامی و کنترل امنیت، به نظارت از راه دور محیط‌ها پرداخته می‌شود. لذا امکانی برای تعمیر، نگهداری و یا تعویض باطری وجود ندارد. از این رو یکی از عمده‌ترین چالش‌ها در این شبکه‌ها، محدودیت مصرف انرژی است که مستقیماً طول عمر شبکه را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

اطلاعات جمع‌آوری شده توسط حسگرها باید به یک ایستگاه مرکزی منتقل شوند. برای این ارسال دو روش وجود دارد که یکی ارسال تک‌گامی[5] و دیگری ارسال چندگامی[6] است. در روش تک‌گامی هر حسگر مستقیماً اطلاعات خود را به ایستگاه مرکزی می‌فرستد. در این روش به دلیل فاصله زیاد حسگرها از مرکز، انرژی زیادی مصرف می‌شود. در مقابل این رویکرد، روش چندگامی با کمک حسگرهای میانی فواصل ارتباطی را کوتاه‌تر می‌کند و می‌تواند طول عمر شبکه را طولانی‌تر کند. می‌توان گفت ارتباطات چند گامی در این گونه شبکه‌ها مفیدتر و مقرون به صرفه‌تر از ارتباطات تک‌گامی است. اما در ارتباط‌های چند گامی نیز بیشتر انرژی گره‌ها صرف ایجاد ارتباط با حسگرهای دیگر می‌شود، که این امر موجب مصرف انرژی زیاد در حسگرها می‌گردد.

در سناریوی مشترک شبکه‌های حسگر، داده‌ها از طریق گره‌های حسگر از ناحیه مورد مطالعه جمع‌آوری می‌شوند، و به طور مؤثر این داده‌های حس شده برای ایستگاه مرکزی ارسال می‌گردند. حسگرهای همسایه اغلب باعث افزونی داده‌ها می‌شوند، انتقال این اطلاعات افزون به ایستگاه مرکزی لازم نیست زیرا در شبکه‌های بزرگ، پردازش بسیار زیادی را در ایستگاه مرکزی به دنبال خواهد داشت. از این رو به روشی برای ترکیب داده‌ها، جهت جلوگیری از افزونی در انتقال داده‌ها و نیز کاهش ترافیک داده‌ها نیاز است که در نتیجه آن از انرژی و پهنای باند نیز محافظت می‌شود [۲]. بر این اساس موضوع تجمیع داده‌ها[7] که ترکیبی از داده‌های چند گره حسگر می‌باشد، مطرح شده است. روش تجمیع داده در محیط‌های بی‌سیم ضروری است به دلیل اینکه کاهش بسته‌ها می‌تواند باعث کاهش مصرف انرژی، افزایش طول عمر شبکه و افزایش نسبت انتقال داده‌های موفق گردد. علاوه بر این در کاربردهای شبکه‌های حسگر، اغلب تجمیع داده‌ها به منظور تسهیل عملیات، پوشش گسترده، افزایش دقت و قابلیت اطمینان صورت می‌پذیرد.

برای تجمیع داده‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم چند راهکار اساسی بیان شده است که از معروف‌ترین پروتکل‌های ارتباطی در این زمینه می‌توان به تجمیع داده مبتنی بر خوشه‌بندی و تجمیع داده مبتنی بر درخت اشاره کرد. ویژگی‌های برجسته در زمینه خوشه‌بندی در تجمیع داده‌ها، توزیع و توازن انرژی و کاهش برخورد در انتقال بسته‌های اطلاعاتی است. اما برقراری ارتباط بین سرخوشه و ایستگاه مرکزی بعضاً به دلیل مسافت زیاد، مصرف انرژی بسیاری به دنبال دارد. در روش مبتنی بر درخت، با توجه به مسافت کم بین حسگرها مصرف انرژی برای ارسال داده پایین است، اما در این روش سایر حسگرها نقش یک گره را در درخت دارند و این موضوع باعث افزایش عمق درخت می‌گردد. بنابراین زمانی که تعداد حسگرها زیاد می‌شود ساخت درخت تجمیع دشوار می‌گردد.

در این مقاله، از مزایای دو روش خوشه‌بندی و درخت در کنار هم استفاده شده و معایب آن‌ها تا حد زیادی بهبود می‌یابد. در روش پیشنهادی به نام CTDA[8] ابتدا به کمک الگوریتم خوشه‌بندی LEACH[9] گره‌های حسگر درون خوشه‌های مختلف قرار می‌گیرند سپس به کمک الگوریتم درخت پوشای کمینه یک ساختار درخت تجمیع داده‌ها بین سرخوشه‌ها ایجاد می‌گردد. در این روش ترکیبی مصرف انرژی بالا در انتقال داده از سرخوشه به ایستگاه مرکزی، به کمک ساختار درخت به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و همچنین به دلیل تعداد کم سرخوشه‌ها مشکل عمق زیاد در درخت تجمیع برطرف می‌گردد. در این مقاله حالت دیگری از روش ترکیبی پیشنهادی به نام MCTDA[10] نیز بررسی شده است که در آن درخت پوشای کمینه، تجمیع داده را انجام نمی‌دهد و قاب‌های[11] سرخوشه‌ها را از طریق سرخوشه‌های میانی برای ایستگاه مرکزی ارسال می‌شود.

[1] Micro-Electro- Mechanical-Systems
[2] Wireless Sensor Network
[3] Ad-hoc
[4] Base Station
[5] Single-hop
[6] Multi-hop
[7] Data Aggregation
[8] Clustering and Tree-Based Data Aggregation
[9] Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy
[10] Modified Clustering and Tree-Based Data Aggregation
[11] Frame

روش CTDA شامل چهار فاز است که عبارتند از: (۱) فاز انتخاب سرخوشه، (۲) فاز تشکیل خوشه، (۳) فاز ساخت درخت بین سرخوشه‌ها، (۴) فاز انتقال داده‌ها. هر دو روش ترکیبی CTDA و MCTDA با الگوریتم LEACH مقایسه شده است و نتایج شبیه سازی کارایی بهتر و بهینه‌تر CTDA را نسبت به LEACH نشان می‌دهد.

پس از بیان مقدمه‌ای بر موضوع در این قسمت، بخش دوم مقاله به بررسی کارهای گذشته می‌پردازد. در بخش سوم، موضوع اصلی مقاله و روش پیشنهادی بیان می‌شود. در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی و در بخش پنجم نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲. پیشینه تحقیق

در شبکه‌های تخت[1]، تمامی حسگرها به طور مستقیم به یکدیگر متصل شده‌اند و نقش یکسانی بر عهده دارند. در این شبکه‌ها، تجمیع داده‌ها توسط مسیریابی مرکزی انجام می‌شود که معمولاً ایستگاه مرکزی یک پیام پرس‌وجو به حسگرها ارسال می‌کند. گره‌های حسگر با همکاری یکدیگر وظیفه سنجش داده‌ها را انجام می‌دهند، حسگرهایی که داده‌های مرتبط با پیام پرس و جو را دارند پیام جواب را برای ایستگاه مرکزی ارسال می‌کنند [۲]. در این شبکه‌ها ارتباطات زیاد بین حسگرها و سربارهای محاسباتی در ایستگاه مرکزی موجب کاهش انرژی در حسگرها و ایستگاه مرکزی و در نتیجه از بین رفتن کل شبکه می‌گردد. بنابراین از منظر مقیاس‌پذیری و بهره‌وری انرژی، چندین روش تجمیع داده سلسله مراتبی پیشنهاد شده است. در روش‌های سلسله مراتبی، تجمیع و ترکیب داده‌ها در حسگرهای خاصی انجام می‌شود و در نتیجه تعداد پیام‌های ارسالی به ایستگاه مرکزی کاهش می‌یابد و این امر موجب بهره‌وری انرژی در شبکه می‌شود. در ادامه دو پروتکل ارتباطی سلسله مراتبی مطرح جهت تجمیع داده بیان می‌شود.

تجمیع داده مبتنی بر خوشه: تجمیع داده‌ها بر اساس خوشه توسط برخی محققان مورد پژوهش قرار گرفته است. خوشه بندی یکی از راه‌حل‌های کلیدی برای رسیدن به بهره وری انرژی در شبکه حسگر است. در روش مبتنی بر خوشه، کل شبکه به چند خوشه تقسیم می‌شود. هر خوشه دارای سرخوشه[2] است که این سرخوشه از میان اعضای خوشه انتخاب شده است. سر خوشه نقش جمع کننده را دارد که داده‌های دریافت شده از سایر اعضای خوشه را به صورت محلی تجمیع می‌کند و نتایج را برای ایستگاه مرکزی ارسال می‌نماید.

پروتکل خوشه‌بندی سلسله مراتبی تطبیقی با انرژی کم (LEACH) یک پروتکل مسیریابی خوشه‌بندی است که توسط Heinzelman [۳] پیشنهاد شده است و از محبوب‌ترین پروتکل‌های مسیریابی سلسله مراتبی برای شبکه‌های حسگر است. در این پروتکل انتخاب سرخوشه به صورت تصادفی است و حسگرها بر اساس توان سیگنال دریافتی از سرخوشه گروه‌بندی می‌شوند. LEACH به دو فاز راه‌اندازی[3] و حالت پایدار[4] تقسیم بندی می‌گردد که به مدت زمان هر دو فاز یک دور گفته می‌شود. در آغاز فاز راه‌اندازی، از طریق یک الگوریتم توزیع شده، تصمیم‌گیری می‌شود که کدام گره سرخوشه است و پس از آن خوشه تشکیل می‌شود. در فاز حالت پایدار هر گره عضو خوشه در برش زمانی مشخص داده‌های خود را به سرخوشه می‌فرستد. گره سرخوشه داده‌های دریافتی از اعضای خوشه را تجمیع و فشرده می‌کند و در نهایت برای ایستگاه مرکزی ارسال می‌کند. به منظور صرفه‌جویی در هزینه‌ها، سرخوشه میان سایر گره‌های خوشه به صورت دوره‌ای تغییر می‌یابد. پروتکل LEACH به دلیل چرخش تصادفی سرخوشه، خوشه‌ها را به طور عادلانه توزیع نمی‌کند. در پروتکل LEACH، تعداد سرخوشه‌ها در شبکه بر اساس دانش قبلی است. تعداد سرخوشه به طور عمده به پارامترهایی نظیر توپولوژی شبکه و محاسبه هزینه‌های نسبی در مقابل ارتباطات بستگی دارد. بنابراین یک روش قطعی برای تعیین تعداد مطلوب سرخوشه وجود ندارد.

تجمیع داده مبتنی بر درخت: در تجمیع داده بر اساس درخت، جمع‌آوری داده توسط ساخت یک درخت تجمیع داده که می‌تواند یک درخت پوشای کمینه باشد انجام می‌پذیرد. معمولاً ایستگاه مرکزی به عنوان ریشه و سایر حسگرهای منبع به عنوان برگ در نظر گرفته می‌شوند. در ساختار درخت هر حسگر دارای یک گره پدر است که داده‌های خود را برای آن ارسال می‌کند، جریان داده از گره برگ تا ایستگاه مرکزی ادامه دارد و در حین آن تجمیع داده از طریق گره‌های والد انجام می‌پذیرد.

درخت پوشای کمینه یک گراف است که در آن تمامی حسگرها به عنوان رئوس هستند و هیچ چرخه‌ای در آن وجود ندارد. ساختار این درخت به گونه‌ای است که حسگر با کوچک‌ترین شناسه و بالاترین سطح انرژی به عنوان ریشه انتخاب می‌گردد و سایر حسگرها از طریق مسیرهای کوتاه به ریشه متصل می‌شوند [۴].

پروتکل تجمیع داده مبتنی بر خوشه‌بندی و درخت آگاه از توان CTPEDCA[5]: در این روش تجمیع داده‌ها بر اساس خوشه‌بندی و درخت انجام می‌شود [۵]. خوشه‌بندی به کمک الگوریتم LEACH انجام می‌شود، سپس از بین گره‌های سرخوشه، یک سرخوشه با انرژی بالا انتخاب می‌گردد و به عنوان ریشه درخت (CH_0) در نظر گرفته می‌شود. سایر گره‌های سرخوشه از طریق کوتاه‌ترین مسیرها به ریشه درخت متصل می‌شوند. تنها گره CH_0 است که با ایستگاه مرکزی ارتباط دارد و داده‌های دریافتی از گره‌های متصل به خود را برای ایستگاه مرکزی ارسال می‌کند. مشکل اصلی در این طرح این است که با اتمام انرژی گره CH_0 و از بین رفتن این گره کل ساختار درخت بین سرخوشه‌ها از بین می‌رود.

[1] Flat Networks
[2] Cluster-Head
[3] Set-Up
[4] Steady-State
[5] Cluster Based and Tree Based Power Efficient Data Collection and Aggregation Protocol

تجمیع داده‌ها بر اساس خوشه- درخت: در این روش که تجمیع داده مبتنی بر خوشه‌بندی و درخت انجام می‌شود [۶]، ایستگاه مرکزی در ابتدا، با فرض بی‌حرکت بودن حسگرها تعدادی خوشه ثابت ایجاد می‌کند. این خوشه‌ها قابل تغییر نیستند و در هر دور تنها سرخوشه تغییر می‌کند. سرخوشه‌ها به نحوی انتخاب می‌گردند که در هر خوشه، سرخوشه آن در مرکز قرار گیرد. پس از انتخاب سرخوشه‌ها در هر دور، بین سرخوشه‌ها درخت پوشای کمینه ایجاد می‌گردد. الگوریتم تعیین خوشه‌ها در این روش بسیار ساده است و معمولاً با تقسیم ناحیه حسگرها به دست می‌آید. تقسیم ناحیه مناسب در این روش مستلزم این است که تعداد گره‌های حسگر، توانی از دو باشد. در این تحقیق در مورد تعداد خوشه‌ها و همچنین نحوه خوشه‌بندی ایده خاصی مطرح نشده است. علاوه بر این، هیچ‌گونه شبیه‌سازی در مورد کارا بودن این الگوریتم ارائه نگردیده است.

۳. روش پیشنهادی

در این مقاله یک روش تجمیع داده سلسله مراتبی ترکیبی به منظور کاهش مصرف انرژی و کاهش میزان انتقال داده‌ها بر پایه خوشه‌بندی و درخت پوشای کمینه با نام CTDA ارائه می‌شود. روش پیشنهادی باعث کاهش مصرف انرژی در گره‌های حسگر و کاهش تعداد حسگرهایی است که به طور مستقیم برای ایستگاه مرکزی داده ارسال می‌کنند. در روش‌های تجمیع داده پیشین، برای ارسال داده‌های تجمیع شده از سرخوشه‌ها به ایستگاه مرکزی در صورتی که فاصله سرخوشه و ایستگاه زیاد باشد، انرژی بسیاری از سرخوشه کاسته می‌شود. روش پیشنهادی CTDA مسئله مصرف انرژی تا حد قابل توجهی بهبود می‌دهد. در این روش، ابتدا به کمک الگوریتم خوشه‌بندی LEACH حسگرها درون خوشه‌های مختلف قرار می‌گیرند. سپس الگوریتم درخت پوشای کمینه بین سرخوشه‌ها اجرا می‌گردد. این امر موجب می‌گردد که سرخوشه‌ها از طریق ساختار درخت و به کمک سرخوشه‌های میانی با مصرف انرژی کمتر داده‌های تجمیع شده خود را برای ایستگاه مرکزی ارسال کنند.

در این مقاله از یک مدل ساده برای اتلاف انرژی رادیویی استفاده شده است که در سمت فرستنده اتلاف انرژی مربوط به الکترونیک رادیویی و آمپلی‌فایر توان است و در سمت گیرنده اتلاف انرژی تنها از سوی الکترونیک رادیویی است. با توجه به فاصله بین فرستنده و گیرنده، از هر دو مدل کانال فضای آزاد[1] (d^2) و محو شدگی چند مسیره[2] (d^4) استفاده شده است [۷]. به طور کلی زمانی که فاصله بین فرستنده و گیرنده کمتر از حد آستانه (d_0) باشد، از مدل کانال فضای آزاد استفاده می‌شود. در غیر این صورت از مدل کانال محو شدگی چند مسیره استفاده خواهد شد. بنابراین برای ارسال ۱ بیت پیام داده در فاصله d، میزان رادیوی مصرفی بر اساس رابطه (۱) است:

$$E_{TX}(l,d) = E_{TX} - E_{elec}(l) + E_{TX} - amp(l,d)$$

$$= \begin{cases} l\times E_{elec} + l\times(\varepsilon\times fs)\times d^2, & d< d_0 \\ l\times E_{elec} + l\times(\varepsilon\times mp)\times d^4, & d> d_0 \end{cases} \quad (۱)$$

fs انرژی مصرفی مدل فضای آزاد و mp انرژی مصرفی مدل محوشدگی چند مسیره است. مقدار آستانه فاصله (d_0) با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$d_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon fs}{\varepsilon mp}} \quad (۲)$$

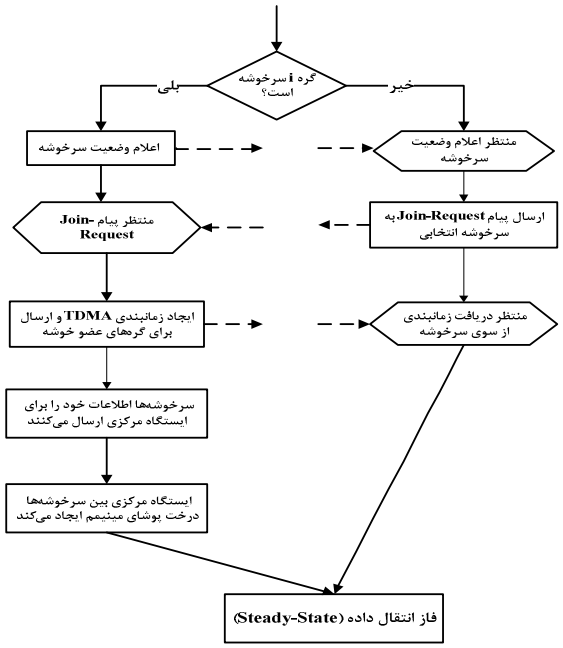
که ε عامل تقویت کننده سیگنال است و E_{elec} مصرف انرژی در انتقال و دریافت است. برای دریافت یک بیت پیام داده در فاصله d میزان رادیوی مصرفی بر اساس رابطه (۳) است:

$$E_{RX}(l) = l\times Eelec \quad (۳)$$

برای تمامی حسگرهای شبکه مفروضات ذیل در نظر گرفته می‌شود:

- همه حسگرها انرژی اولیه یکسانی دارند.
- همه حسگرها از اطلاعات مکانی خود آگاهی دارند.
- فرض می‌کنیم که شبکه، k سرخوشه دارد و بر اساس مدل رادیویی تنها سرخوشه‌ها از مدل کانال محوشدگی چند مسیره استفاده می‌کنند و حسگرهای دیگر از مدل کانال فضای آزاد استفاده می‌کنند.

شکل (۱) فلوچارت کلی روش CTDA پیشنهادی را نمایش می‌دهد و در ادامه هر یک از فازهای روش تشریح می‌شوند.



شکل ۱. فلوچارت کلی روش پیشنهادی CTDA. (با نمایش شش ضلعی به عنوان نشان انتظار اعضای خوشه و سرخوشه)

[1] Free space
[2] Multipath fading

فاز انتخاب سرخوشه: در این فاز، الگوریتم انتخاب سرخوشه مشابه الگوریتم LEACH است. هر گره حسگر بدون هیچ‌گونه کنترل مرکزی از سوی ایستگاه مرکزی یک عدد تصادفی بین ۰~۱ تولید می‌کند. اگر عدد تصادفی تولید شده توسط یک گره حسگر از حد آستانه T(n) کمتر باشد آن حسگر به عنوان سرخوشه در نظر گرفته می‌شود، T(n) با استفاده از رابطه (۴) به دست می‌آید. هر گره حسگری که سرخوشه می‌شود یک پیام اعلان مبنی بر سرخوشه شدن خود را در کل شبکه پخش همگانی می‌کند. در هر دور زمانی که یک حسگر به عنوان سرخوشه انتخاب می‌شود، T(n) برای آن حسگر برابر صفر قرار داده می‌شود که بدین معنی است که این حسگر نمی‌تواند به عنوان سرخوشه مجدداً در این دور انتخاب شود.

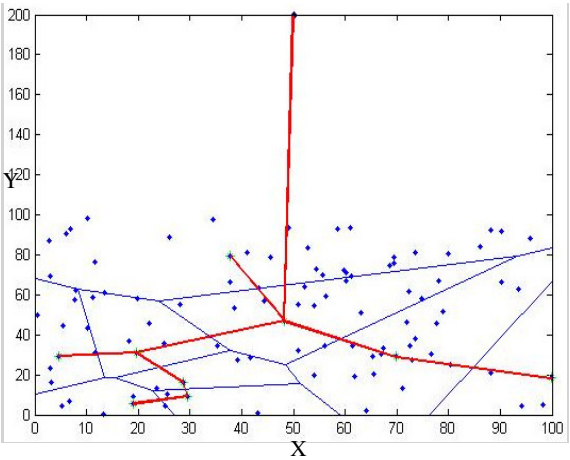
$$T(n)=\begin{cases}\frac{P}{1-P*[r\ mod\ (\frac{1}{p})]}, & n \in G \\ 0, & \text{در غیر این صورت}\end{cases} \quad (۴)$$

در این رابطه P احتمال تبدیل شدن به سرخوشه است (معمولاً برابر ۰/۰۵ در نظر گرفته می‌شود [۳])، r دور جاری است، r mod(1/ P) تعداد حسگرهایی است که به عنوان سرخوشه در دور r انتخاب شده‌اند. G مجموعه‌ای از حسگرهایی است که به عنوان سرخوشه در دور r انتخاب نشده‌اند و n تعداد کل حسگرها است.

با توجه به اینکه حسگرها در ابتدا انرژی یکسانی داشته‌اند، حسگرهایی که اخیراً سرخوشه نبوده‌اند به طور حتم انرژی باقی‌مانده بیشتری نسبت به سایر حسگرها دارند و بهتر است در دورهای بعدی به عنوان سرخوشه انتخاب شوند. بعد از آنکه همه حسگرها یک بار به عنوان سرخوشه انتخاب شدند، همه حسگرها برای دورهای بعدی واجد شرایط سرخوشه شدن هستند. احتمال انتخاب شدن به عنوان سرخوشه بر اساس این فرض است که همه حسگرها، با انرژی برابری شروع به کار می‌کنند و همه حسگرها، داده‌ها را به صورت یک قاب ارسال می‌کنند.

فاز تشکیل خوشه: پس از انتخاب سرخوشه، گره سرخوشه باید سایر حسگرهای شبکه را از نقش خود به عنوان سرخوشه مطلع سازد که حسگرها بتوانند در دور فعلی آن سرخوشه را انتخاب کنند. بنابراین هر گره سرخوشه، یک پیام ADV[1] را با استفاده از پروتکل دسترسی چندگانه[2] و همچنین مدل کانال محو شدگی چند مسیره در کل شبکه پخش همگانی می‌کند. این پیام، یک پیام کوچک حاوی شناسه گره سرخوشه و سرآیند است که به عنوان یک پیام اعلام می‌باشد. هر گره غیر سرخوشه در هر دور پس از دریافت پیام ADV بر اساس قدرت سیگنال دریافتی از گره سرخوشه، یک خوشه با حداقل هزینه ارتباطی را برای خود انتخاب می‌کند. پس از آنکه هر حسگر، خوشه خود را تعیین کرد باید گره سرخوشه را مطلع سازد که قصد پیوستن به آن خوشه را دارد. بنابراین هر حسگر یک پیام درخواست عضویت[3] با استفاده از پروتکل دسترسی چندگانه به سرخوشه مورد نظر ارسال می‌کند. این پیام نیز یک پیام کوتاه شامل شناسه گره و شناسه گره سرخوشه است. سرخوشه‌ها نقش کنترل‌کننده محلی و هماهنگ کننده انتقال داده‌ها در خوشه را بر عهده دارند. گره سرخوشه با استفاده از زمان‌بندی TDMA[4] به سایر گره‌های خوشه امکان انتقال داده‌ها در برش‌های زمانی خاص را می‌دهد. گره سرخوشه زمان‌بندی TDMA را تعیین می‌کند و با استفاده از مدل کانال فضای آزاد برای هر یک از اعضای خوشه ارسال می‌کند. این زمان‌بندی تضمین می‌کند که هیچ برخوردی در میان پیام‌های داده رخ نمی‌دهد، همچنین اجازه می‌دهد که قطعات رادیویی گره‌های غیر سرخوشه در تمام زمان‌ها به جز زمان‌های انتقال داده آن‌ها در حالت خواب باشند. این امر موجب کاهش مصرف انرژی در حسگرها می‌شود. فاز تشکیل خوشه در اینجا به اتمام می‌رسد.

فاز ساخت درخت بین سرخوشه‌ها: بعد از تشکیل خوشه، هر گره سرخوشه یک پیام ADV شامل شناسه سرخوشه، محل قرار گرفتن سرخوشه، اندازه خوشه (تعداد حسگرهای خوشه) و میزان انرژی باقی‌مانده را برای ایستگاه مرکزی ارسال می‌کند. ایستگاه مرکزی بر اساس اطلاعات دریافتی از سرخوشه‌ها یک درخت پوشای کمینه بین آن‌ها ایجاد می‌کند و اطلاعات مربوط به ساختار درخت را در شبکه پخش همگانی می‌کند. بر اساس اطلاعات درخت پوشای کمینه مشخص می‌گردد که کدام یک از سرخوشه‌ها به یکدیگر متصل شوند و سرخوشه‌ها از طریق کوتاه‌ترین مسیر ممکن با ایستگاه مرکزی ارتباط برقرار می‌کنند. در ساختار درخت پوشای کمینه پیشنهاد شده تجمیع داده نیز صورت می‌گیرد بدین صورت که هر گره والد پس از دریافت قاب‌های داده از سرخوشه‌هایی که به آن متصل هستند آن‌ها را با هم ترکیب می‌کند و اطلاعات تکراری را حذف می‌کند. شکل (۲) ایجاد درخت پوشای کمینه را در بین سرخوشه‌ها در فضای دو بعدی نشان می‌دهد.



شکل ۲. ایجاد درخت پوشای کمینه بین سرخوشه‌ها

[1] Advertisement
[2] CSMA(Mac)
[3] Join-Request
[4] Time Division Multiple Address

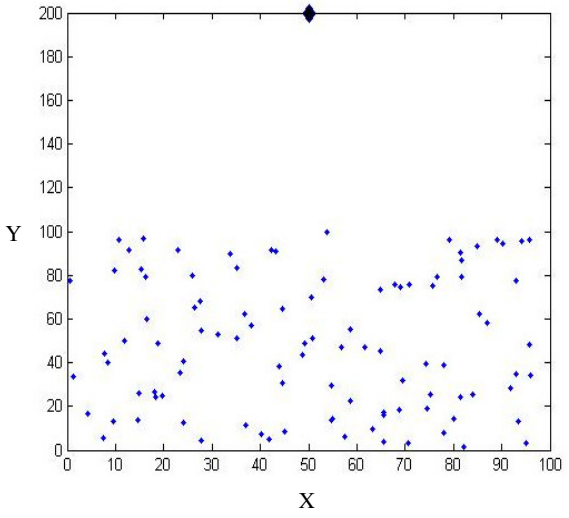
فاز انتقال داده: در این فاز عملیات انتقال داده به قاب‌ها شکسته می‌شود. در این فاز گره‌های عضو یک خوشه در طول برش زمانی مختص به خود و بدون هیچ‌گونه تداخلی در شبکه، قاب‌های داده را به سوی سرخوشه ارسال می‌کنند. در این مقاله فرض شده است که حسگرها در همه زمان‌ها با ایستگاه مرکزی هماهنگی زمانی دارند و ایستگاه مرکزی پالس‌های هماهنگ‌سازی را برای حسگرها ارسال می‌کند. به منظور کاهش اتلاف انرژی، هر گره غیر سرخوشه با استفاده از کنترل توان داده ارسال می‌کند، بنابراین رادیوی هر گره غیر سرخوشه تا زمانی که برش زمانی انتقال داده به آن اختصاص داده شود خاموش است. اما رادیوی سرخوشه برای جمع‌آوری داده‌ها از گره‌های عضو خوشه محلی خود باید همیشه فعال باشد. زمانی که سرخوشه تمام داده‌های گره‌های عضو خوشه را دریافت کرد بر روی آن‌ها تجمیع داده انجام می‌دهد و یک بسته داده مناسب ایجاد می‌کند. بعد از اینکه همه سرخوشه‌ها جمع‌آوری داده از خوشه محلی خود را تکمیل نمودند از طریق ساختار درختی که بین سرخوشه‌ها ایجاد شده است بسته‌های داده تجمیع شده خود را برای والد ارسال می‌کنند. هر والد پس از انجام تجمیع داده بر روی داده‌های محلی خود و داده‌های دریافتی از حسگرهای فرزند آن‌ها را ارسال می‌کند. در ساختار درخت پوشای کمینه ایستگاه مرکزی ریشه درخت است که در نهایت داده‌های تجمیع شده از والدهای بالایی را دریافت می‌کند.

۴. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به تشریح نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی پرداخته می‌شود. در این مقاله سه پروتکل مسیریابی مختلف به کمک نرم‌افزار متلب[1] شبیه‌سازی شده است که عبارتند از پروتکل LEACH، روش پیشنهادی CTDA و حالت دیگری از پروتکل پیشنهادی که درخت پوشای کمینه در بین سرخوشه‌ها تنها قاب‌ها داده را به ایستگاه مرکزی ارسال می‌کند و بر روی قاب‌های داده هیچ تجمیع داده‌ای انجام نمی‌دهد، این حالت خاص از پروتکل پیشنهادی MCTDA نامیده شده است. محیط شبیه‌سازی مشابه شبیه‌سازی پروتکل LEACH است که هدف در آن دست‌یابی به ذخیره انرژی و مصرف انرژی بهینه است. در این تحقیق ۱۰۰ گره حسگر در یک منطقه به ابعاد ۱۰۰× ۱۰۰ به صورت تصادفی پراکنده شده‌اند و شکل (۳) گره‌های حسگر را نمایش می‌دهد. ایستگاه مرکزی دور از منطقه حسگرها و در محل (۵۰،۲۰۰) واقع شده است. سایر پارامترها در جدول (۱) ذکر شده‌اند.

در این شبیه‌سازی هر گره حسگر دارای انرژی اولیه ۰/۵ J در ابتدای آزمایش است، و مقدار نامحدودی از داده‌ها به ایستگاه مرکزی ارسال می‌گردد. شکل (۴) تعداد کل حسگرهایی که در طول شبیه‌سازی شبکه زنده باقی می‌مانند را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۴) حسگرهای زنده باقی‌مانده در روش پیشنهادی بیشتر از پروتکل LEACH و روش MCTDA است.

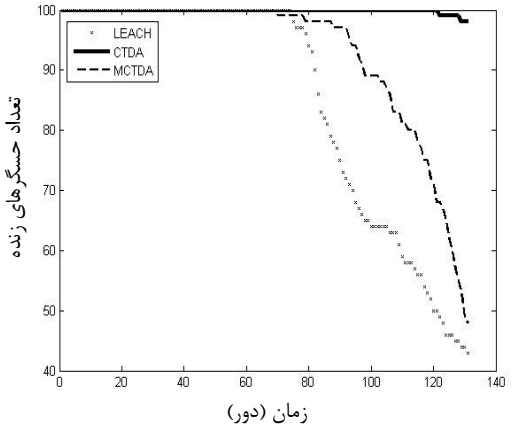
[1] MATLAB



شکل ۳. صد گره حسگر پراکنده به صورت تصادفی

جدول ۱. پارامترهای شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
انرژی اولیه	۰/۵ J
$E_{elec}= E_{TX} = E_{RX}$	۵۰ nJ / bit
انرژی مصرفی مدل فضای آزاد (fs)	۱۰ pJ/bit/m^2
انرژی مصرفی مدل محوشدگی چندمسیره (mp)	۰/۰۰۱۳ pJ/bit/m^4
انرژی تجمیع داده (EDA)	۵ nJ / bit / signal
اندازه بسته کنترلی	۸۰۰ bit
اندازه بسته داده	۴۰۰۰ bit

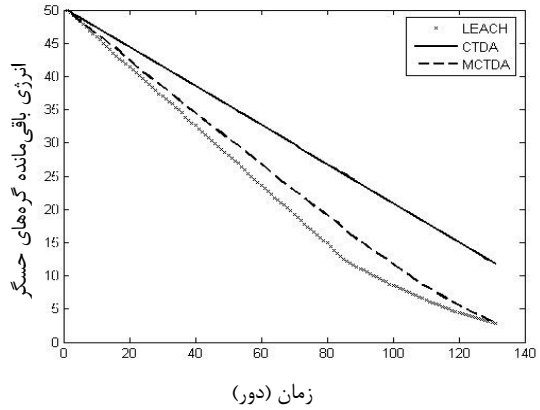


شکل ۴. تعداد حسگرهای زنده در طول شبیه‌سازی شبکه

شکل (۵) انرژی باقی‌مانده حسگرها را در طول شبیه‌سازی نشان می‌دهد. که انرژی باقی‌مانده حسگرها در روش پیشنهادی بسیار بیشتر از پروتکل LEACH و روش MCTDA است.

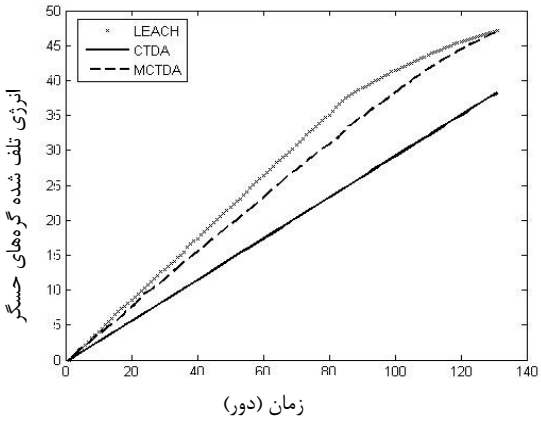
شکل (۶) کل انرژی اتلاف شده را در پروتکل LEACH و دو روش پیشنهادی CTDA و MCTDA، در طول شبیه‌سازی شبکه نشان

می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی بیانگر این است که تعداد گره‌های سرخوشه‌ای که برای ایستگاه مرکزی داده را ارسال می‌کنند از طریق ساختار درخت پوشای کمینه کاهش می‌یابند.

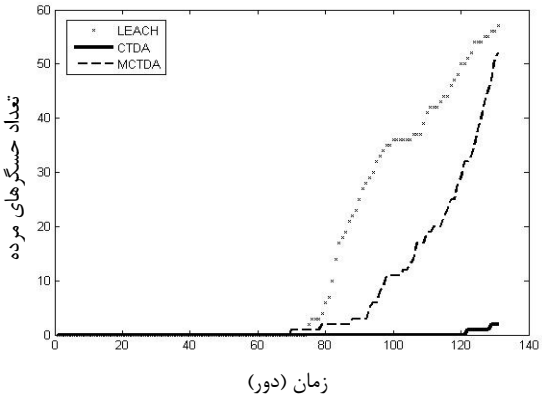


شکل ۵. انرژی باقی‌مانده حسگرها را در طول شبیه سازی شبکه

شکل (۷) حسگرهای مرده را در طول شبیه‌سازی شبکه نمایش می‌دهد. طبق شکل (۷) ماندگاری حسگرها در روش پیشنهادی بسیار بیشتر از پروتکل LEACH و روش مشابه آن یعنی MCTDA است.



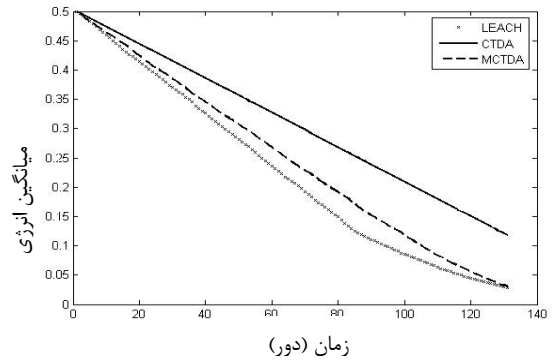
شکل ۶. کل انرژی تلف شده در پروتکل LEACH و دو روش پیشنهادی



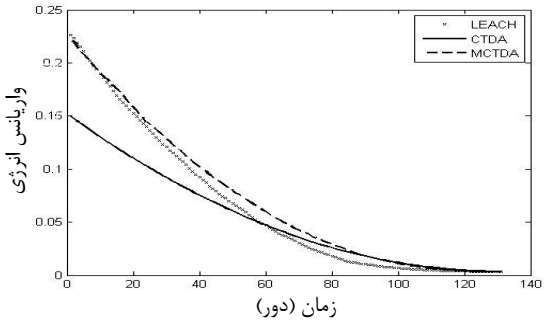
شکل ۷. حسگرهای مرده در طول شبیه‌سازی شبکه

شکل (۸ و ۹) میانگین انرژی هر گره حسگر و واریانس انرژی در هر گره حسگر را نمایش می‌دهند. بر اساس شکل (۸) می‌توان گفت میانگین انرژی در هر حسگر، در روش پیشنهادی از دو روش مشابه یعنی پروتکل LEACH و روش MCTDA بیشتر است، که این فاکتور موجب افزایش طول عمر شبکه در این روش می‌گردد.

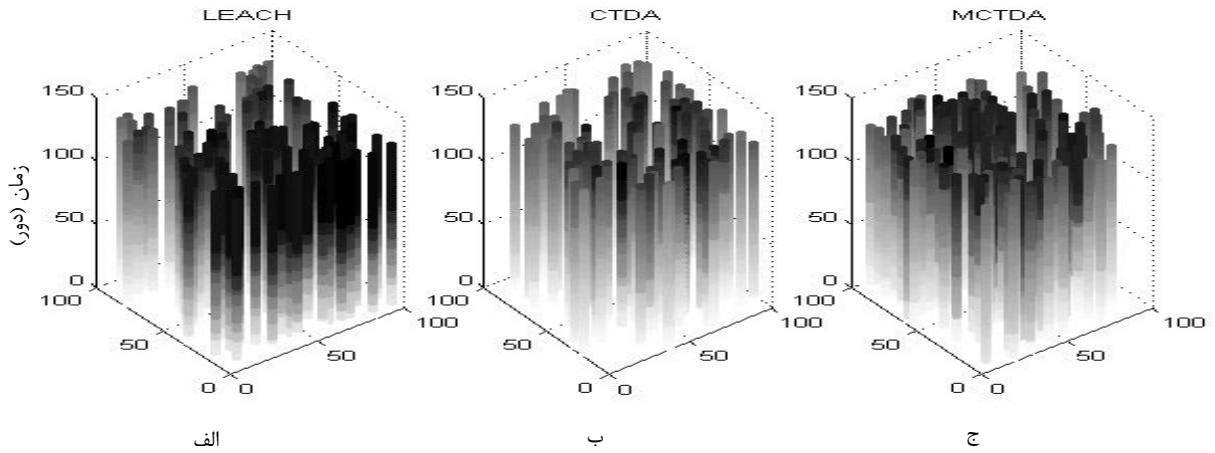
شکل (۱۰) نمودار توزیع انرژی را در سه روش طی شبیه‌سازی نشان می‌دهد. رنگ قرمز در این نمودار بیانگر بالاترین سطح انرژی است و رنگ آبی پررنگ پایین‌ترین سطح انرژی و انرژی در حد صفر را نشان می‌دهد. شکل (۱۰- الف) که مربوط به پروتکل LEACH می‌باشد بیانگر این است که به دلیل اینکه در LEACH همه حسگرها شانس سرخوشه شدن دارند انرژی همه حسگرها در طول زمان تقریباً یکسان می‌باشد و تغییرات انرژی قابل توجهی بین حسگرهای مختلف وجود ندارد. به عبارتی می‌توان گفت که انرژی در ناحیه مورد مطالعه در طول زمان تقریباً به صورت یکنواخت توزیع شده است، و امکان به وجود آمدن حفره در ناحیه مورد نظر کاهش می‌یابد به جز زمانی که انرژی کل محیط از یک حد آستانه کمتر می‌شود که در این صورت تشکیل حفره یک رویداد بدیهی می‌شود. همچنین این شکل نشان می‌دهد که در پروتکل LEACH، حسگرها به دلیل ارسال داده‌های طولانی سریع‌تر می‌میرند. شکل‌های (۱۰- ب) و (۱۰- ج) نمودار توزیع انرژی دو روش پیشنهادی CTDA و MCTDA، را نمایش می‌دهند. هر دو روش مانند LEACH دارای توزیع انرژی تقریباً یکنواخت هستند اما میانگین انرژی هر گره نسبت به پروتکل LEACH به دلیل ارسال داده کوتاه‌تر (ساختار درخت) بیشتر است.



شکل ۸. میانگین انرژی هر حسگر در طول شبیه‌سازی شبکه



شکل ۹. واریانس انرژی در هر حسگر در طول شبیه‌سازی شبکه



شکل۱۰. نمودار توزیع انرژی در سه روش

۵. نتیجه‌گیری

برای تجمیع داده‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم چند راهکار اساسی بیان شده است که از مطرح‌ترین پروتکل‌های ارتباطی در این زمینه می‌توان به تجمیع داده مبتنی بر خوشه‌بندی و تجمیع داده مبتنی بر درخت اشاره کرد. خوشه‌بندی در زمینه تجمیع داده‌ها موجب توزیع و توازن انرژی و کاهش برخورد می‌گردد اما برقراری ارتباط بین برخی سرخوشه‌ها و ایستگاه مرکزی بعضاً به دلیل مسافت زیاد، مصرف انرژی بسیاری به دنبال دارد. در روش مبتنی بر درخت، با توجه به مسافت کم بین گره‌ها مصرف انرژی برای ارسال داده پایین است اما در این روش سایر حسگرها نقش یک گره را در درخت دارند که این موضوع باعث افزایش عمق درخت می‌شود. بنابراین زمانی که تعداد حسگرها زیاد می‌شود ساخت درخت تجمیع دشوار می‌گردد. در این مقاله، از مزایای دو روش خوشه بندی و درخت در کنار هم استفاده شده است و سعی شده معایب آن‌ها تا حد زیادی بهبود یابد. در روش پیشنهادی، CTDA، ابتدا به کمک الگوریتم خوشه بندی LEACH گره‌های حسگر درون خوشه‌های مختلف قرار می‌گیرند. سپس به کمک الگوریتم درخت پوشای کمینه یک درخت تجمیع داده بین سرخوشه‌ها ایجاد می‌گردد. در این روش ترکیبی، مصرف انرژی بالا در انتقال داده از سرخوشه به ایستگاه مرکزی، به کمک ساختار درخت به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و همچنین به دلیل تعداد کم سرخوشه‌ها مشکل عمق بالا در درخت تجمیع برطرف می‌گردد. در این مقاله حالت دیگری از روش MCTDA نیز بررسی شده است که در آن درخت پوشای کمینه، تجمیع داده انجام نمی‌دهد و تمامی قاب‌های سرخوشه‌ها را از طریق سرخوشه‌های میانی برای ایستگاه مرکزی ارسال می‌کند. هر دو روش ترکیبی CTDA و MCTDA از نظر میزان مصرف انرژی، طول عمر شبکه و توزیع انرژی با الگوریتم LEACH مقایسه شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی کارایی بهتر و بهینه‌تر CTDA نسبت به الگوریتم LEACH را نشان می‌دهد. زیرا در روش CTDA با کاهش فواصل ارتباطی به کمک ساختار درختی، هزینه ارسال بسته‌های اطلاعاتی به کمک مدل کانال فضای آزاد محاسبه می‌گردد. تحلیل ریاضی مصرف انرژی در روش پیشنهادی در مقایسه با تحقیقات پیشین به عنوان کارهای آتی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۶. مراجع

[1] Akyildiz, I. F.; Su, W. “Wireless Sensor Networks: A Survey”; J. Computer Networks 2002, 38, 393-422.

[2] Rajagopalan, R.; Varshney, P. K. “Data Aggregation Techniques in Sensor Networks: A Survey”; J. IEEE Communications Surveys & Tutorials 2006, 4, 48-63.

[3] Heinzelman, W. B.; Chandrakasan, A. P.; Balakrishnan, H. “An Application Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks”; J. IEEE Transactions on Wireless Communications 2002, 4, 660-669.

[4] Lee, M.; Wong, V. “An Energy-Aware Spanning Tree Algorithm for Data Aggregation in Wireless Sensor Networks”; In Proc. of IEEE International Pac Rrim 2005, 300-303.

[5] Wang, W.; Wang, B. “Cluster-based and Tree-based Power Efficient Data Collection and Aggregation Protocol for Wireless Sensor Network”; J. Information Technology 2011, 10, 557-564.

[6] Chabra, G.; Sharma, D. “Cluster-Tree Based Data Gathering In Wireless Sensor Networks”; J. Soft Comput. Eng. 2011, 1, 27-31.

[7] Heinzelman, W.; Chandrakasan, A.; Balakrishnan, H. “Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks”; In Proc. of IEEE International Conference on System Sciences 2000, 1-10.

[8] Min, X.; Wei, S.; Chang, J.; Ying, Z. “Energy Efficient Clustering Algorithm For Maximizing Lifetime of Wireless Sensor Networks”; J. Electronics Communications 2010, 64, 289-298.

[9] Ding, M.; Cheng, X.; Xue, G. “Aggregation Tree Construction in Sensor Networks”; In Proc. of IEEEVTC’03 2003, 2168-2172.

[10] Ranjani, S.; Krishnan, S.; Thangaraj, C. “Energy-Efficient Cluster Based Data Aggregation for Wireless Sensor Networks”; In Proc. of International Conference on Recent Advances in Computing and Software Systems 2012, 174-179.

[11] Akkaya, K.; Younis, M. “A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks”; J. Ad Hoc Networks 2005, 3, 325-349.