

بهبود طول عمر و بیشینه‌سازی پوشش در شبکه حس گر بی سیم خوشه‌بندی شده با استفاده از مسیریابی چندجهشی

سیدحسین کشمیری^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ حمیدرضا بخشی^۲، دانشیار

۱- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شاهد - تهران - ایران - h.keshmiri@shahed.ac.ir

۲- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شاهد - تهران - ایران - bakhshi@shahed.ac.ir

چکیده: در این مقاله به مسئله بهبود مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه حس گر بی سیم (WSN) با در نظر گرفتن پوشش پرداخته شده است. مسئله پوشش به عنوان «پوشش اهداف» در نظر گرفته شده است که در آن منظور از اهداف، نقاط خاصی از ناحیه کار است که در تمام مدت حیات شبکه باید تحت نظارت باشند. از آنجایی که تعداد گره‌ها بسیار بیشتر از تعداد اهداف است، حس گر‌ها با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی در گروه‌هایی موسوم به مجموعه‌های پوشش دسته‌بندی شده‌اند؛ به طوری که هر مجموعه پوشش، به تنهایی تمامی اهداف را تحت پوشش قرار می‌دهد. عملیات شبکه به دوره‌هایی با مدت زمانی یکسان تقسیم گشته است. در هر دوره، یک مجموعه پوشش انتخاب شده و نظارت اهداف را بر عهده می‌گیرد و گره‌های موجود در سایر مجموعه‌ها غیرفعال هستند. خوشه‌بندی و مسیریابی برای مجموعه انتخابی، توسط یک مدل MILP تعیین شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی علاوه بر پوشش تمامی اهداف، طول عمر شبکه را بهبود می‌بخشد. همچنین، بررسی اثر تغییر تعداد مجموعه‌ها بر طول عمر شبکه، بیان‌گر وجود تعاملی میان تعداد مجموعه‌های پوشش و شعاع سنجش اتخاذ شده توسط گره‌های فعال است. به علاوه، روش پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های مشابه عملکرد بهتری از نظر طول عمر دارد.

واژه‌های کلیدی: WSN، خوشه‌بندی، مسیریابی، پوشش، مجموعه‌های پوشش، MILP.

Lifetime Improvement and Coverage Maximization of Cluster-Based Wireless Sensor Network Using Multi Hop Routing

S. H. Keshmirifar¹, MSc Student; H. Bakhshi², Associate Professor

1- Department of Electrical Engineering, Shahed University, Tehran, Iran, Email: h.keshmiri@shahed.ac.ir

2- Department of Electrical Engineering, Shahed University, Tehran, Iran, Email: bakhshi@shahed.ac.ir

Abstract: The purpose of this paper is to reduce energy consumption and improve lifetime of a wireless sensor network (WSN) which is capable of covering all targets. Targets are special points of sensing field with determined locations that need to be constantly monitored. To this end, sensor nodes are categorized into number of groups called cover sets using an optimization approach. Each set alone, is able to cover all the targets. The operation of the network is divided into rounds with the same lengths. In the beginning of each round, one cover set is selected and will perform the monitoring task for current round while other nodes in other sets, are in sleep mode. Clustering and routing decisions of the network is calculated via a Mixed-Integer Linear Programming (MILP) model. Simulation results show that our proposed method not only fulfills the coverage requirements of the network, but also improves the network lifetime. Also, the impact of altering the number of cover sets reveals a tradeoff between the number of sets and the sensing radius adopted by sensors. Moreover, the proposed method outperforms similar algorithms in terms of network lifetime.

Keywords: WSN, clustering, routing, coverage, cover sets, MILP.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۱۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۲۶

نام نویسنده مسئول: حمیدرضا بخشی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - ابتدای آژادراه تهران قم - روبروی حرم مطهر امام خمینی - دانشگاه شاهد - دانشکده فنی و مهندسی.

۱- مقدمه

نماینده یا سرخوشه منتصب شده است. گره سرخوشه وظیفه جمع‌آوری اطلاعات خوشه خود و انتقال آن‌ها به کاربر را بر عهده دارد. همچنین، نشان داده شد که خوشه‌بندی، باعث بهبود مصرف انرژی در شبکه می‌گردد.

در [۶]، بر مبنای کار صورت گرفته در [۵]، زمان جایگزین کردن گره سرخوشه با در نظر گرفتن یک مقدار آستانه برای سطح انرژی حس‌گرها، مورد بحث قرار گرفته است. این الگوریتم، طول عمر شبکه را نسبت به الگوریتم LEACH بهبود بخشیده است.

در [۷]، گره‌ها در قالب یک زنجیره سازمان‌دهی گشته و هر گره تنها با همسایگان خود (به فاصله یک جهش) به تبادل اطلاعات می‌پردازد. به این ترتیب فواصل ارسال کاهش یافته و در مصرف انرژی صرفه‌جویی می‌گردد.

در [۸]، خانم لین^۴ و همکاران با در نظر گرفتن توأم معیارهای خوشه‌بندی، مسیریابی و کنترل توپولوژی، مسئله طراحی شبکه‌ای را مطرح کرده‌اند که دارای مصرف انرژی یکنواختی بوده و طول عمر بالایی دارد. کنترل توپولوژی به معنای کنترل و هدایت تصمیمات گره‌ها در مورد انتخاب مناسب محدوده ارسال رادیویی به منظور داشتن شبکه‌ای با خصوصیات مطلوب (مانند هم‌بندی) است به طوری که انرژی مصرفی گره‌ها کاهش یابد. این مسئله توسط یک مدل ریاضی بهینه‌سازی فرمول‌بندی گشته است که با حل آن، محل چاهک‌ها، سرخوشه‌ها و همچنین مسیرهای جریان اطلاعات از حس‌گرها به چاهک‌ها، حاصل می‌گردد.

در [۹]، الگوریتم بهینه‌ای پیشنهاد شده است که با استفاده از اطلاعات مکان شبکه را به خوشه‌های نابرابر افراز می‌نماید. ایده اصلی این الگوریتم از آنجا نشئت می‌گیرد که در بسیاری از کارهای انجام‌شده در زمینه خوشه‌بندی، به دلیل سادگی پیاده‌سازی، اندازه خوشه‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. در نتیجه اگر اندازه خوشه‌ها کوچک انتخاب شوند، تعداد سرخوشه‌ها بالا رفته و هزینه ارتباطات برون‌خوشه‌ای افزایش می‌یابد و اگر بزرگ انتخاب گردد، تعداد گره‌های هر خوشه افزایش یافته و هزینه ارتباطات درون‌خوشه‌ای بالا می‌گیرد؛ لذا باید بین این دو تعاملی برقرار شود.

در [۱۰]، خانم کاردی^۵ و همکاران مسئله پوشش اهداف را در شبکه با در نظر گرفتن مقدار متغیر محدوده سنجش برای گره‌ها، مورد بررسی قرار داده‌اند. تعداد زیادی گره با محدوده سنجش قابل تنظیم برای نظارت بر اهداف به‌طور تصادفی در ناحیه کار توزیع شده‌اند. از آنجایی که هر یک از اهداف توسط چندین حس‌گر تحت پوشش قرار گرفته و اطلاعات حاصل‌شده از آن‌ها دارای افزونگی است، به‌منظور صرفه‌جویی در مصرف انرژی، گره‌ها را می‌توان در مجموعه‌های مختلف سازمان‌دهی نمود به طوری که در هر دوره تنها یک مجموعه حس‌گر فعال بوده و به نظارت اهداف بپردازد و باقی گره‌ها در حالت غیرفعال قرار داشته باشند. نویسندگان، مسئله سازمان‌دهی گره‌ها به مجموعه‌های مختلف را AR-SC^۶ نامیده‌اند. هدف این مسئله، یافتن بیشترین مجموعه حس‌گرها

شبکه‌ای متشکل از تعداد زیادی گره حس‌گر است که بدون نیاز به هیچ‌گونه زیرساخت خاصی در ناحیه‌ای توزیع شده و به تعامل با محیط و جمع‌آوری اطلاعات از آن می‌پردازند. گره‌های حس‌گر، در اغلب کاربردها دارای ظرفیت محدود در ذخیره‌سازی، پردازش و ارسال اطلاعات و نیز تأمین انرژی می‌باشند. وجود این محدودیت‌ها، شبکه را با چالش‌های متفاوتی روبرو می‌کند؛ اما از آنجایی که انجام هر کاری در گره مستلزم هزینه‌ای در انرژی است، می‌توان گفت بزرگ‌ترین چالش در WSNها، منابع انرژی محدود می‌باشد [۱-۴]. هدف اصلی پیدایش WSNها، جمع‌آوری اطلاعات از محیط‌هایی است که حضور مستقیم انسان در آن‌ها بنا به دلایلی غیرممکن یا دشوار است.

بسته به نوع حس‌گر تعبیه‌شده در گره، یک پدیده خاص (مانند حرارت، فشار، تحرک، رطوبت، نور، رادیواکتیویته و غیره) احساس شده و توسط واحد حس‌گر به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل گشته و سپس به‌وسیله رادیو به چاهک^۲ ارسال می‌شود. چاهک واسط بین کاربر و شبکه بوده و وظیفه جمع‌آوری اطلاعات از گره‌ها را بر عهده دارد.

WSNها را می‌توان گونه خاصی از شبکه‌های بی‌سیم اقتضایی (WANET^۳) دانست. در واقع WANET، شبکه‌ای است که برای منظور خاصی طراحی گشته و در آن گره‌ها می‌توانند مستقیماً و بدون وجود هیچ زیرساخت ثابتی، با هم ارتباط برقرار نمایند [۲].

WSNها دارای ویژگی‌های منحصر به فردی می‌باشند که آن‌ها را از WANETها متمایز می‌سازد. مهم‌ترین این ویژگی‌ها عبارتند از [۲]:

۱. متجانس بودن: بر خلاف WANETها که متشکل از انواع گره‌ها از قبیل لپ‌تاپ، تلفن همراه، پیجر و غیره می‌باشند، WSNها معمولاً از گره‌هایی هم‌جنس تشکیل شده‌اند.
۲. قابلیت تحرک: گره‌های حس‌گر تشکیل‌دهنده یک WSN اغلب ثابت بوده و توانایی حرکت ندارند؛ هرچند در پاره‌ای از موارد قادر به حرکت محدود و آهسته می‌باشند. این در حالی است که غالباً گره‌های یک WANET، متحرک هستند.
۳. پراکندگی نسبتاً بالا: مشابه WANET، گره‌ها در WSN نیز در یک ناحیه جغرافیایی نسبتاً بزرگ توزیع می‌گردند؛ لذا پراکندگی گره‌ها بالاست.
۴. اندازه بزرگ شبکه: عموماً تعداد گره‌های به‌کاررفته در WSNها زیاد است. این تعداد می‌تواند از چند ده تا هزاران گره حس‌گر متغیر باشد.

در ادامه مهم‌ترین الگوریتم‌های ارائه‌شده در زمینه بهبود مصرف انرژی و افزایش طول عمر WSN مورد بررسی قرار گرفته است:

در [۵]، انجام ارتباطات رادیویی توسط گره‌ها پرمصرف‌ترین رکن اجتناب‌ناپذیر در شبکه معرفی گشته است که نسبت مستقیمی با فاصله فرستنده و گیرنده دارد. در این مقاله، به‌منظور کاهش مصرف انرژی، گره‌ها در قالب خوشه‌ها قرار گرفته و برای هر یک از آن‌ها یک گره

در [۱۶]، نویسندگان با در نظر گرفتن مدل سنجش احتمالاتی، پروتکلی برای یافتن بیشترین مجموعه‌های پوشش ارائه کرده‌اند. ساز و کار این پروتکل مشابه الگوریتم معرفی شده در [۱۰] است با این تفاوت که با استفاده از مدل سنجش احتمالاتی، سعی در بالاتر بردن ضریب اطمینان سنجش و نظارت شده است. در این مقاله، صحبتی از خوشه‌بندی و مسیریابی به میان نیامده که این امر می‌تواند توانایی شبکه را در استفاده مؤثر از منابع انرژی به‌طور قابل توجهی کاهش دهد.

یک الگوریتم جدید خوشه‌بندی در [۱۷] معرفی شده است که در آن گره‌های سرخوشه بر اساس وزنشان انتخاب می‌گردند. وزن هر گره بر مبنای میزان انرژی موجود در خود آن گره و میانگین انرژی موجود در تمام حس‌گرهای هر خوشه تعیین می‌شود. طراحی نامناسب الگوریتم خوشه‌بندی منجر به رها شدن برخی از گره‌ها در خارج از تمامی خوشه‌ها می‌شود. در نتیجه این گره‌ها که به عضویت هیچ خوشه‌ای در نیامده‌اند و اصطلاحاً ایزوله شده‌اند، به دلیل انجام ارتباطات رادیویی در فواصل طولانی با چاهک، انرژی خود را به سرعت از دست داده و طول عمر شبکه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در این الگوریتم، با استفاده از متوسط انرژی در ناحیه هر خوشه و فاصله گره‌ها تا چاهک، از ایجاد گره‌های ایزوله در فرایند خوشه‌بندی جلوگیری شده و طول عمر شبکه بهبود می‌یابد.

در [۱۸]، مسئله پوشش ناحیه مورد بحث قرار گرفته است. از آنجایی که نظارت بر یک ناحیه پیوسته بسیار مشکل‌تر از نظارت بر نقاط جدا از هم است، نویسندگان روشی را پیشنهاد نموده‌اند که به وسیله آن، می‌توان مسئله پوشش ناحیه را به مسئله پوشش نقاط تبدیل نموده و به این ترتیب از حجم و پیچیدگی مسئله کاست و همچنین با زمان‌بندی فعالیت گره‌ها، در مصرف انرژی گره‌ها صرفه‌جویی کرده و طول عمر شبکه را بهبود بخشید.

در [۱۹]، یک الگوریتم جدید برای مسیریابی مبتنی بر کیفیت خدمات ارائه شده است. در این الگوریتم، مسیر انتقال اطلاعات بر اساس میزان دارا بودن ویژگی‌های مربوط به کیفیت سرویس مانند قابلیت اطمینان، تأخیر و غیره انتخاب می‌شود.

در اغلب تحقیقات صورت گرفته در زمینه بهبود مصرف انرژی WSNها، پژوهشگران با تمرکز بر روی یکی از معیارهای خوشه‌بندی، مسیریابی، زمان‌بندی فعال-غیرفعال و غیره، به ارائه یک الگوریتم پرداخته‌اند؛ اما در مقاله [۸]، مسئله مورد بحث با در نظر گرفتن توأم معیارهای بیشتری حل شده است و از جامعیت و کلیت بیشتری برخوردار است. از سوی دیگر، توانایی شبکه در تحت پوشش قرار دادن ناحیه کار، یکی از مهم‌ترین معیارها برای ارزیابی آن به شمار می‌رود [۲۰]؛ لذا در این مقاله با اضافه کردن شرط پوشش به مرجع [۸] مسئله جدیدی حل شده است. این مسئله در واقع طراحی شبکه‌ای است که با استفاده مؤثر از منابع انرژی قادر به تحت پوشش قرار دادن تمامی اهداف در ناحیه کار می‌باشد.

در ادامه به بیان مسئله مورد در نظر در بخش دوم پرداخته شده و روش پیشنهادی در بخش سوم شرح داده شده است. در بخش چهارم

به‌همراه محدوده سنجش آن‌هاست به زعمی که هر مجموعه، توانایی پوشش همه اهداف را داشته باشد.

در [۱۱]، یک الگوریتم توزیع‌شده برای زمان‌بندی گره‌ها ارائه شده است. در این الگوریتم احتمال این که یک گره، با توجه به موقعیت مکانی گره‌های دیگر، برای انجام عملیات پوشش اضافه باشد محاسبه می‌گردد. در صورتی که گره برای پوشش، افزونگی ایجاد کند به حالت غیرفعال تغییر وضعیت می‌دهد؛ بنابراین گره‌هایی که دارای افزونگی در شعاع سنجش هستند شناسایی شده و در وضعیت غیرفعال قرار می‌گیرند تا در مصرف انرژی صرفه‌جویی گردد.

در [۱۲]، مسئله پوشش پیوسته اهداف (CTC) مورد بررسی قرار گرفته است. در این مسئله نیز، هدف، بیشینه‌سازی طول عمر شبکه با تقسیم‌بندی گره‌ها در مجموعه‌های مختلف و تنظیم یک جدول زمانی برای فعال و غیرفعال بودن هر یک از آن‌هاست؛ به طوری که هر مجموعه قادر باشد تمامی اهداف را تحت پوشش قرار داده و نیز هم‌بندی میان گره‌های فعال را حفظ نماید. مسئله CTC با مسئله درخت بیشینه پوشش (MCT) مدل شده و سپس توسط الگوریتم‌های اکتشافی و تقریبی حل گشته است.

در [۱۳]، یک روش خوشه‌بندی چندلایه معرفی شده است که با استفاده ترکیبی از تصمیم‌گیری‌های مرکزی در چاهک و تصمیم‌گیری‌های توزیع‌شده در گره‌های همسایه، به خوشه‌بندی می‌پردازد تا سطح انرژی مصرف‌شده در رد و بدل کردن پیام‌ها هنگام تعیین گره سرخوشه و اعضای هر خوشه کاهش یابد و در نتیجه طول عمر شبکه بهبود یابد.

در [۱۴]، روشی برای بیشینه‌سازی طول عمر با در نظر گرفتن چارچوبی خاص برای شبکه ارائه شده است. این چارچوب خاص از اجتماع چند معیار تصمیم‌گیری تشکیل می‌شود که عبارتند از: مکان گره‌ها در هنگام توزیع، زمان‌بندی فعالیت گره‌ها، مسیر انتقال اطلاعات و همچنین تحرک چاهک. تمامی این معیارها در قالب یک مدل ریاضی MILP فرمول‌بندی گشته و سپس توسط روش‌های فرا ابتکاری حل شده است. خوشه‌بندی و تجمیع داده در این روش جایگاهی ندارد و گره‌ها اطلاعات خود را مستقیماً و یا از طریق گره‌های نزدیک‌تر به چاهک ارسال می‌نمایند در نتیجه وجود فواصل طولانی برای ارسال‌ها موجب تخلیه زود هنگام گره‌ها شده و نیز وجود ارسال‌های بی‌دری به دلیل عدم وجود فرایند تجمیع روی داده‌های جمع‌آوری شده مصرف غیر بهینه انرژی را به دنبال داشته و موجب کاهش طول عمر شبکه می‌گردد.

در [۱۵]، یک الگوریتم خوشه‌بندی کارآمد از نظر انرژی و مبتنی بر تحرک چاهک پیشنهاد شده است. این الگوریتم، تحرک چاهک را به‌عنوان روشی برای جلوگیری از ایجاد حفره‌های انرژی در شبکه اتخاذ می‌کند. حفره انرژی به دلیل تخلیه زود هنگام حس‌گرهای اطراف چاهک رخ می‌دهد که موجب ایزوله شدن چاهک از شبکه می‌شود. این الگوریتم علاوه بر یافتن بهینه تعداد سرخوشه‌های مورد نیاز، مسیر حرکت چاهک را نیز به گونه‌ای تعیین می‌نماید که هزینه انتقال اطلاعات حداقل شود.

با چنین مفروضاتی، مسئله مورد نظر عبارت است از تعیین محل سرخوشه‌ها و چاهک‌ها، شعاع سنجش مناسب برای گره‌ها و همچنین تعیین مسیریابی اطلاعات از گره‌ها به چاهک‌ها به گونه‌ای که پایش اهداف به‌طور مداوم صورت گرفته و طول عمر شبکه تا حد ممکن افزایش یابد.

۳- بهینه‌سازی پوشش با رویکرد بهبود طول عمر

۳-۱- انگیزه تحقیق

بر اساس تحقیقات صورت گرفته در زمینه افزایش کارایی WSNها در استفاده مؤثر از انرژی می‌توان دریافت، بهبود طول عمر و کاهش مصرف انرژی شبکه متأثر از پارامترهای متنوعی است. هرچند ارائه روشی که بیشترین راندمان را از گره‌ها دریافت کرده و طول عمر شبکه را بیشینه نماید اگر محال نباشد بسیار دشوار است اما همواره پژوهشی که دارای ابعاد بیشتری بوده و به پارامترهای بیشتری اشراف داشته باشد، منشور طیف وسیع‌تری از کاربردها بوده و لذا از ارزش بالاتری برخوردار است. همان‌طور که در بخش مقدمه ذکر شد، روش ارائه‌شده در [۸] با در نظر گرفتن هر دو معیار خوشه‌بندی و مسیریابی، مسئله طراحی بهینه WSN را مطرح می‌کند که به‌مراتب نسبت به سایر روش‌ها که صرفاً به ارائه الگوریتمی بر مبنای یکی از معیارهای خوشه‌بندی، مسیریابی و یا زمان‌بندی گره‌ها پرداخته‌اند کامل‌تر است. لذا، در این مقاله هدف گسترش و بازطراحی روش ارائه‌شده در [۸] است به گونه‌ای که مسئله پوشش نیز در نظر گرفته شود. در [۸]، از یک مسئله بهینه‌سازی که هر دو معیار کنترل توپولوژی و مسیریابی را به‌طور توأم در نظر می‌گیرد، در یک شبکه سلسله‌مراتبی خوشه‌بندی شده استفاده می‌شود. متغیرها و پارامترهای به‌کاررفته در مدل ریاضی این مسئله در جدول ۱ شرح داده شده و روابط (۱) تا (۱۹) توصیف‌کننده این مدل هستند [۸].

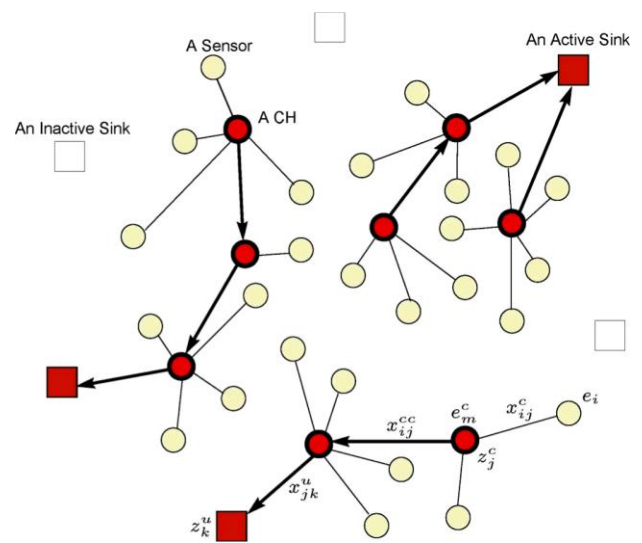
مطابق روابط (۱) تا (۱۹) مسئله بهینه‌سازی معرفی شده در [۸]، در واقع یک مسئله کمینه‌سازی است که با حل آن در ابتدای هر دوره، سرخوشه‌ها و محل چاهک‌ها و نیز جریان اطلاعات از گره‌ها به چاهک‌ها مشخص می‌شود. رابطه (۱) تابع هدف مسئله را نشان می‌دهد که جمع وزن‌دار سه جمله با وزن‌های t_1 ، 1 (وزن مبنا) و t_2 است. جمله اول، میانگین انرژی مصرفی در شبکه است که کمینه شدن آن برای کاهش مصرف انرژی ضروری می‌باشد. جمله دوم، اختلاف بیشترین و کمترین سطح انرژی باقی‌مانده در شبکه را نشان می‌دهد که کمینه شدن آن به یکنواختی مصرف انرژی در شبکه می‌انجامد. اضافه کردن این جمله به تابع هدف حیاتی است چراکه در حالت کلی، نرخ مصرف انرژی در گره‌ها یکسان نبوده و وجود اختلاف زیاد در سطح انرژی گره‌ها منجر به کاهش طول عمر عملیاتی شبکه می‌گردد؛ و بالأخره کمینه شدن جمله سوم به انتخاب گره‌ها با سطح انرژی بالاتر به‌عنوان سرخوشه منتج می‌شود. رابطه (۲) مصرف‌شده توسط یک سرخوشه را نشان می‌دهد که شامل ارتباطات صورت گرفته با گره‌های خوشه خود، سرخوشه‌های دیگر و نیز چاهک می‌باشد.

نیز، به گزارش نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش پیشنهادی و بحث و بررسی آن‌ها و همچنین و مقایسه آن با الگوریتم‌های مشابه پرداخته شده است.

۲- بیان مسئله

در مدل شبکه مورد نظر، گره‌ها در ناحیه‌ای دوبعدی به‌طور تصادفی با تابع چگالی یکنواخت توزیع شده‌اند. چاهک‌ها از میان مجموعه کاندیداهای چاهک‌شدن که در اطراف ناحیه کار قرار دارند، انتخاب می‌شوند. حس‌گرها پس از جمع‌آوری داده، آن‌ها را به فرم بسته‌های اطلاعاتی درآورده و به گره سرخوشه مورد نظر خود ارسال می‌نمایند. نرخ تولید داده در گره‌ها ثابت فرض شده و برابر با نرخ ارسال داده به گره سرخوشه می‌باشد. ساختار ارتباطی شبکه مطابق شکل ۱ به‌صورت سلسله‌مراتبی است و توان ارسال رادیویی گره‌ها به‌طور پویا قابل تغییر فرض می‌شود. همچنین شعاع سنجش گره‌ها قابل تنظیم بوده و مدل سنجش باینری است. به این معنی که اگر فاصله حس‌گر تا محل اتفاق رخداد کمتر از شعاع سنجش باشد، آن اتفاق توسط گره سنجیده شده و در غیر این صورت سنجش انجام نمی‌گیرد.

طول عمر شبکه، فاصله زمانی بین هر دو بار توزیع متوالی حس‌گرها در ناحیه مورد نظر تعبیر می‌شود. توزیع مجدد گره‌ها ممکن است به دلایل متعددی از جمله کاهش متوسط انرژی باقی‌مانده در شبکه از یک مقدار معین نیاز شود. همچنین طول عمر شبکه به دوره‌هایی با مدت زمان یکسان تقسیم شده (T) و در هر دوره طراحی شبکه به گونه‌ای صورت می‌گیرد که تعداد دوره‌های متوالی در هر چرخه توزیع گره، بیشینه شود. بر طبق شکل ۱، گره‌ها داده تولیدی خود را به سرخوشه‌ها ارسال کرده و سرخوشه‌ها نیز پس از پردازش و تجمیع اطلاعات دریافتی، آن را به‌طور مستقیم و یا از طریق سرخوشه‌های دیگر به چاهک‌ها می‌فرستند. تعداد سرخوشه‌های و چاهک‌های مورد نیاز به‌صورت پیش‌فرض مشخص شده و مکان آن‌ها از میان مجموعه کاندیداهای سرخوشه شدن و چاهک شدن تعیین می‌گردد.



شکل ۱: نمونه‌ای از شبکه و جریان داده‌ها [۸]

جدول ۱: پارامترها و متغیرهای مدل [۸]

پارامترهای مدل	
\mathcal{I}	مجموعه تمام گره‌ها $i \in \mathcal{I}$
\mathcal{J}	مجموعه گره‌های کاندیدای سرخوشه شدن $\forall m, j \in \mathcal{J}$ و $\mathcal{J} \subseteq \mathcal{I}$
\mathcal{K}	مجموعه کاندیداهای چاهک شدن
R_i	نرخ تولید داده در هر گره حس‌گر (بیت/ثانیه)
D_{pq}	فاصله میان هر دو گره p و q (متر)
w, v	نرخ مصرف انرژی برای رادیو و تقویت‌کننده فرستنده (به ترتیب از چپ به راست)
s, c	نسبت تجمیع متوسط و انرژی مورد نیاز برای آن (به ترتیب از چپ به راست)
C, U	تعداد سرخوشه‌ها و چاهک‌های مورد نیاز (به ترتیب از چپ به راست)
E_i	انرژی موجود در هر گره حس‌گر (ژول)
T	طول هر دوره (ثانیه)
متغیرهای تصمیم‌گیری	
x_{ij}^c	قسمتی از داده منتقل شده از هر گره i به سرخوشه j در هر دوره (بیت/ثانیه)
x_{ij}^{cc}	داده منتقل شده از سرخوشه i به سرخوشه j در هر دوره (بیت/ثانیه)
x_{jk}^u	داده منتقل شده از سرخوشه j به چاهک k در هر دوره (بیت/ثانیه)
z_j^c	اگر حس‌گر j سرخوشه باشد ۱ و در غیر این صورت صفر
z_k^u	اگر حس‌گر k چاهک باشد ۱ و در غیر این صورت صفر
e_i	انرژی مصرف شده در هر گره حس‌گر (ژول)
e_j^c	انرژی مصرف شده در هر گره سرخوشه (ژول)
E_{\max}^R	بیشینه انرژی باقی‌مانده در هر گره (ژول)
E_{\min}^R	کمینه انرژی باقی‌مانده در هر گره (ژول)

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} z_j^c = C \quad (10)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} z_k^u = U \quad (11)$$

$$e_i \leq E_i \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (12)$$

$$e_j^c \leq E_j \quad \forall j \in \mathcal{J} \quad (13)$$

$$z_j^c E_j - e_j^c \leq E_{\max}^R \quad \forall j \in \mathcal{J} \quad (14)$$

$$(1 - z_i^c) E_i - e_i \leq E_{\max}^R \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (15)$$

$$E_{\min}^R \leq E_i - e_i \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (16)$$

$$E_{\min}^R \leq E_j - e_j^c \quad \forall j \in \mathcal{J} \quad (17)$$

$$z_j^c, z_k^u \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{K} \quad (18)$$

$$x_{ij}^c, x_{mj}^{cc}, x_{jk}^u, e_i, e_j^c, E_{\max}^R, E_{\min}^R \geq 0 \quad (19)$$

$$\forall i \in \mathcal{I}, j, m \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{K}$$

رابطه (۳) نیز بیانگر انرژی مصرفی توسط یک گره عادی است که صرفاً ناشی از ارسال اطلاعات به گره سرخوشه می‌باشد. $w = 50$ nJ/bit، انرژی مورد نیاز برای راه‌اندازی ادوات الکترونیکی فرستنده و گیرنده است، $v = 100$ pJ/bit/m²، انرژی مصرفی توسط تقویت‌کننده فرستنده بوده و $c = 50$ pJ/bit نیز انرژی مصرف شده برای تجمیع در گره سرخوشه می‌باشد. لذا روابط (۲) و (۳)، در واقع مدل مصرف انرژی هستند که هر یک در قالب یک محدودیت، به مسئله بهینه‌سازی اعمال شده‌اند. رابطه (۴) توازن جریان داده‌های دریافتی و ارسالی در یک سرخوشه را نشان می‌دهد.

رابطه (۵) تضمین می‌نماید که هر گره حس‌گر به یک سرخوشه تعلق دارد. روابط (۶) تا (۹) متغیرهای باینری مربوط به انتخاب محل چاهک‌ها و گره‌های سرخوشه را مقداردهی می‌نماید. روابط (۱۰) و (۱۱) نیز تعداد چاهک‌ها و سرخوشه‌های مورد نیاز را تعیین می‌کند و روابط (۱۲) و (۱۳) بیانگر این است که مصرف انرژی در هر گره حس‌گر نمی‌تواند از کل انرژی موجود در آن گره تجاوز نماید. حداکثر انرژی باقی‌مانده در هر گره توسط روابط (۱۴) و (۱۵) و حداقل انرژی باقی‌مانده در هر گره طبق روابط (۱۶) و (۱۷) مشخص می‌گردد. مسئله بهینه‌سازی نشان داده شده در روابط (۱) تا (۱۹)، یک مسئله بهینه‌سازی خطی مرکب با متغیرهای صحیح (MILP) است که با حل آن، محل سرخوشه‌ها و چاهک‌ها و همچنین مسیریابی اطلاعات از گره‌ها به چاهک‌ها به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که طول عمر شبکه بیشینه گردد. حال در راستای گسترش این مسئله در جهتی که پوشش نیز در نظر گرفته شود، ابتدا تعریفی از مسئله پوشش ارائه نموده و بر مبنای آن روش پیشنهادی بیان می‌گردد.

کیفیت سرویس در WSN‌ها، با توجه به کاربرد مورد نظر، در معیارهای مختلفی از جمله طول عمر شبکه، تأخیر، پهنای باند، قابلیت اطمینان، پوشش، دقت داده سنجیده شده توسط گره‌ها و غیره تعبیر می‌شود. برخی از این معیارها ممکن است طبعاً با برخی دیگر در تضاد

$$\text{Min} \left\{ t_1 (1/|I|) \left(\sum_{m \in \mathcal{J}} e_m^c + \sum_{i \in \mathcal{I}} e_i \right) + (E_{\max}^R - E_{\min}^R) + t_2 \left(\sum_{m \in \mathcal{J}} z_m^c / E_m \right) \right\} \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} (w + v D_{mk}^2) T x_{mk}^u + \sum_{j \in \mathcal{J} \setminus \{m\}} (w + v D_{mj}^2) T x_{mj}^{cc} + \sum_{j \in \mathcal{J} \setminus \{m\}} w T x_{jm}^{cc} + \sum_{i \in \mathcal{I}} (w + cs) R_i T x_{im}^c = e_m^c \quad \forall m \in \mathcal{J} \quad (2)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} (w + v D_{ij}^2) R_i T x_{ij}^c = e_i \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (3)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} x_{mk}^u + \sum_{j \in \mathcal{J} \setminus \{m\}} x_{mj}^{cc} - \left(\sum_{j \in \mathcal{J} \setminus \{m\}} x_{jm}^{cc} + (1-s) \sum_{i \in \mathcal{I}} R_i x_{im}^c \right) = 0 \quad \forall m \in \mathcal{J} \quad (4)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} x_{ij}^c = 1 \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (5)$$

$$x_{ij}^c \leq z_j^c \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J} \quad (6)$$

$$x_{mj}^{cc} \leq \sum_{i \in \mathcal{I}} R_i z_j^c \quad \forall m, j \in \mathcal{J} \quad (7)$$

$$x_{jk}^u \leq \sum_{i \in \mathcal{I}} R_i z_k^u \quad \forall j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{K} \quad (8)$$

$$x_{jk}^u \leq \sum_{i \in \mathcal{I}} R_i z_j^c \quad \forall j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{K} \quad (9)$$

P تعداد سطوح سنجش r_1, r_2, \dots, r_p و e_1, e_2, \dots, e_p انرژی مصرفی متناظر با هر سطح.
 E انرژی اولیه حس‌گرها است.

a_{ipj} ضریب نشان‌دهنده ارتباط میان حس‌گر، شعاع سنجش و هدف؛ اگر حس‌گر s_i با شعاع سنجش r_p هدف t_j را تحت پوشش قرار دهد $a_{ipj} = 1$ و در غیر این صورت $a_{ipj} = 0$ خواهد بود.

c_k متغیر باینری برای $k = 1, 2, \dots, K$ مجموعه؛ اگر مجموعه k م، تمام اهداف را بپوشاند $c_k = 1$ و در غیر این صورت $c_k = 0$ است.

x_{ikp} متغیر باینری برای $k = 1, 2, \dots, K, i = 1, 2, \dots, N$ و $p = 1, 2, \dots, P$ ؛ اگر حس‌گر s_i با شعاع سنجش r_p در مجموعه k باشد $x_{ikp} = 1$ و در غیر این صورت $x_{ikp} = 0$ است.

رابطه (۲۰) تابع هدف این مسئله است که جمع حداکثر تعداد مجموعه‌های پوشش را نشان می‌دهد. رابطه (۲۱)، تضمین می‌نماید که انرژی مصرفی در هر گره حس‌گر کمتر یا مساوی E است. بر طبق رابطه (۲۲)، گره i تنها با یک سطح از سطوح سنجش (P) می‌تواند در مجموعه k حضور داشته باشد؛ و رابطه (۲۳) نیز ضامن تحت نظارت قرار گرفتن هر یک از اهداف توسط هر مجموعه c_k می‌باشد. هر گره می‌تواند در بیش از یک مجموعه حضور داشته باشد؛ اما مجموع انرژی مصرفی آن در کل مجموعه‌ها نمی‌تواند بیشتر از انرژی اولیه آن باشد. در [۱۰] با حل این مسئله ریاضی، حداکثر تعداد مجموعه‌های پوشاننده اهداف حاصل می‌گردد. در هر دوره تنها یک مجموعه فعال بوده و به نظارت اهداف می‌پردازد. پس از این که آخرین مجموعه فعالیت خود را به پایان رسانید، انرژی کل گره‌ها به شدت افت کرده و طول عمر شبکه به پایان می‌رسد؛ بنابراین، بیشینه‌سازی طول عمر شبکه در مدل اتخاذ شده در این روش صرفاً منوط به یافتن حداکثر تعداد مجموعه‌های پوشش می‌باشد. همچنین از آنجایی که پروتکل خاصی برای خوشه‌بندی و مسیریابی در نظر گرفته نشده، مصرف انرژی فقط ناشی از انجام عملیات سنجش فرض شده است.

۳-۲- روش پیشنهادی

در روش پیشنهادی با توجه به شکل ۲، ابتدا تعدادی گره حس‌گر مطابق شکل ۳ به‌طور تصادفی با تابع چگالی یکنواخت در ناحیه کار توزیع می‌شوند. اهداف نیز نقاط خاصی از ناحیه هستند که با مثلث‌های قرمز رنگ مشخص شده‌اند. همچنین مربع‌های اطراف ناحیه کار، نقاط بالقوه چاهک‌هاست. پس از آن، گره‌های موجود در ناحیه کار، با استفاده از مدل توصیف شده در روابط (۲۰) تا (۲۴) در قالب مجموعه‌های پوشش سازمان‌دهی می‌شوند. لازم به ذکر است که حل این مدل ریاضی در یک کنترل‌کننده مجزا صورت گرفته و نتایج آن از طریق چاهک‌ها به گره‌ها ابلاغ می‌گردد. از آنجایی که عملیات شبکه در قالب دوره‌های زمانی با مدت مشخص انجام می‌گیرد، در هر دوره، یکی از این مجموعه‌ها فعال بوده و باقی مجموعه‌ها غیرفعال می‌باشند.

باشند. به‌عنوان مثال، مسیریابی چندمسیره می‌تواند ضریب اطمینان رسیدن داده به کاربر را افزایش دهد اما منجر به افزایش مصرف انرژی و در نتیجه کاهش طول عمر شبکه و همچنین افزایش تأخیر در جمع‌آوری اطلاعات تولیدشده در حس‌گرها می‌گردد [۲۱].

مسئله پوشش که یکی از مهم‌ترین معیارهای کیفیت سرویس در WSNها است، به‌طور کلی در توانایی شبکه در تحت پوشش قرار دادن هر نقطه از ناحیه کار معنا پیدا می‌کند. در واقع، اینکه هر نقطه از ناحیه تا چه میزان توسط یک گره حس‌گر تحت نظر قرار می‌گیرد به‌عنوان پوشش تعریف می‌گردد. بر مبنای این تعریف، در مسئله پوشش سؤال این است که آیا هر نقطه از ناحیه کار در محدوده سنجش گره‌های حس‌گر توزیع شده در شبکه قرار می‌گیرند یا خیر. در برخورد با مسئله پوشش رویکردهای گوناگونی وجود دارد که اغلب بسته به خصوصیات مختلف شبکه تعیین می‌گردد. این خصوصیات عبارتند از: نحوه قرارگیری گره‌ها در شبکه، مدل سنجش، ویژگی‌های هدف، کاربرد و ناحیه کار [۲۰].

در این مقاله، مسئله پوشش، به‌عنوان پوشش اهداف در نظر گرفته می‌شود که منظور از اهداف، نقاط خاصی از ناحیه کار با مکان معلوم هستند که در تمام مدت حیات شبکه باید تحت نظارت قرار گیرند. همچنین، مدل سنجش گره‌ها، باینری بوده و شعاع سنجش آن‌ها قابل تنظیم فرض می‌شود. از آنجایی که تعداد گره‌های حس‌گر بسیار بیشتر از تعداد اهداف است، هر یک از آن‌ها توسط بیش از یک گره حس‌گر تحت پوشش قرار می‌گیرند در نتیجه اطلاعات جمع‌آوری شده از گره‌ها تکراری و دارای افزونگی خواهد بود. وجود داده تکراری در اطلاعات گره‌ها به نوعی هدر رفتن انرژی آن‌ها است و باعث کاهش طول عمر شبکه می‌شود؛ بنابراین، می‌توان با سازمان‌دهی گره‌ها به گروه‌های مختلف اهداف را به‌گونه‌ای تحت پوشش قرار داد که نیازی به فعال بودن تمامی گره‌ها به‌طور همزمان نباشد. هر یک از این گروه‌ها قادرند به‌تنهایی تمام اهداف را تحت پوشش قرار دهند. لذا، به آن‌ها مجموعه‌های پوشش^۱ اطلاق می‌شود. به‌منظور سازمان‌دهی گره‌ها به مجموعه‌های پوشش، از مسئله بهینه‌سازی معرفی شده در [۱۰] استفاده شده است. مدل ریاضی این مسئله در روابط (۲۰) تا (۲۴) توصیف گشته است [۱۰].

$$\text{Max } \{c_1 + \dots + c_K\} \quad (20)$$

Subject to

$$\sum_{k=1}^K \left(\sum_{p=1}^P x_{ikp} e_p \right) \leq E \quad i = 1, \dots, N \quad (21)$$

$$\sum_{p=1}^P x_{ikp} \leq c_k \quad i = 1, \dots, N, k = 1, \dots, K \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^N \left(\sum_{p=1}^P x_{ikp} \times a_{ipj} \right) \geq c_k \quad k = 1, \dots, K, j = 1, \dots, M \quad (23)$$

$$x_{ikp} \in \{0, 1\} \quad \forall i, k, p \quad (24)$$

پارامترها و متغیرهای به‌کاررفته در این مدل، به‌شرح زیر می‌باشد:

N تعداد گره‌ها و M تعداد اهداف است.

پس از سازمان‌دهی گره‌ها در مجموعه‌های پوشش، اولین دوره با انتخاب اولین مجموعه پوشش آغاز می‌شود. سپس، دسته‌ای از گره‌های پرانرژی‌تر، به‌منظور انتخاب سرخوشه از میان آن‌ها، تشکیل می‌گردد (مجموعه \mathcal{T}). اعضای این دسته با در نظر گرفتن متوسط انرژی موجود در گره‌های عضو مجموعه پوشش انتخابی به‌عنوان آستانه انرژی، تعیین می‌شوند. همچنین، تعداد چاهک‌ها و سرخوشه‌های مورد نیاز به‌طور پیش‌فرض، مشخص می‌شود. در مرحله بعد، مدل MILP توصیف‌شده طبق روابط (۱) تا (۱۹) در دستگاه کنترل‌کننده مجزا حل شده و متغیرهای آن اعم از محل چاهک‌ها و سرخوشه‌ها و نیز مسیریابی اطلاعات از گره‌ها به چاهک‌ها و همچنین انرژی مصرف‌شده توسط هر یک از گره‌های فعال، به‌دست می‌آید. پس از آن، انرژی موجود در گره‌های فعال به‌روزرسانی شده و دوره جدید، با انتخاب مجموعه پوشش دوم کار خود را آغاز می‌کند. بعد از آن که تمام مجموعه‌های پوشش یک بار به فعالیت پرداختند، دوره بعدی، با انتخاب مجدد اولین مجموعه پوشش شروع می‌شود. این امر برخلاف روش ارائه‌شده در [۱۰] است که پایان فعالیت آخرین مجموعه پوشش به‌منزله پایان حیات شبکه بود. روند انتخاب مجموعه‌ها تا جایی ادامه می‌یابد که سطح انرژی گره‌ها به‌شدت افت کرده و دیگر قادر به انجام وظیفه نمی‌باشند. در این حالت مدل MILP به جواب نخواهد رسید و طول عمر عملیاتی شبکه به سر آمده است. در نتیجه برای ادامه نظارت بر اهداف، نیاز به توزیع گره‌های جدید است.

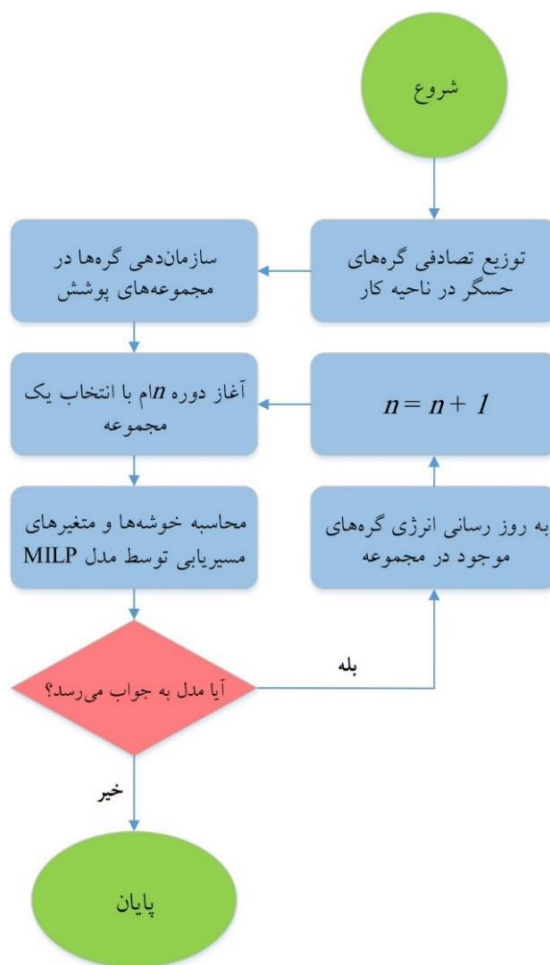
در محاسبه انرژی مصرفی حس‌گرها ذکر چند نکته الزامی است. در مرجع [۱۰]، مصرف انرژی گره‌ها تنها ناشی از سنجش فرض شده است در حالی که جمع‌آوری اطلاعات و ارسال آن‌ها نیز سهم عمده‌ای در بار انرژی مصرفی دارد. در این راستا، رابطه (۳) که نشان‌دهنده انرژی مصرفی برای هر گره غیر سرخوشه است، باید به فرم رابطه (۲۵) اصلاح شود.

$$e_i = \sum_{j \in \mathcal{T}} (w + vD_{ij}^2)R_iTx_{ij}^c + (R_s^2 e_s)R_iTx_{ij}^c \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (25)$$

معادله (۲۵)، انرژی مصرف‌شده برای سنجش و جمع‌آوری اطلاعات و سپس ارسال آن‌ها به گره سرخوشه را نشان می‌دهد. قسمت اول این معادله، هزینه ارسال اطلاعات به گره سرخوشه است که در توضیح رابطه (۳) شرح داده شد. قسمت دوم این معادله نیز بیانگر انرژی لازم برای سنجش بر مبنای مدل معرفی‌شده در مرجع [۱۰] می‌باشد. R_s شعاع سنجش و e_s مقداری ثابت است که مطابق مرجع [۱۰]، از رابطه (۲۶) محاسبه می‌شود.

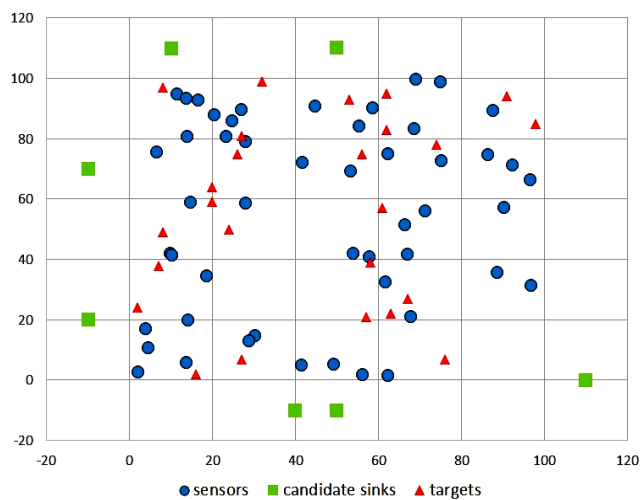
$$e_s = \frac{E}{2 \sum_{p=1}^P r_p} \quad (26)$$

در رابطه (۲۶)، E ، انرژی اولیه حس‌گرهاست؛ اما در مورد روش پیشنهادی که گره‌ها با انرژی اولیه غیریکسان توزیع شده‌اند، برابر با متوسط انرژی اولیه حس‌گرها خواهد بود. r_p شعاع سنجش گره‌ها بوده و $P = 4$ تعداد سطوح سنجش می‌باشد. سطوح سنجش در تمامی گره‌ها،



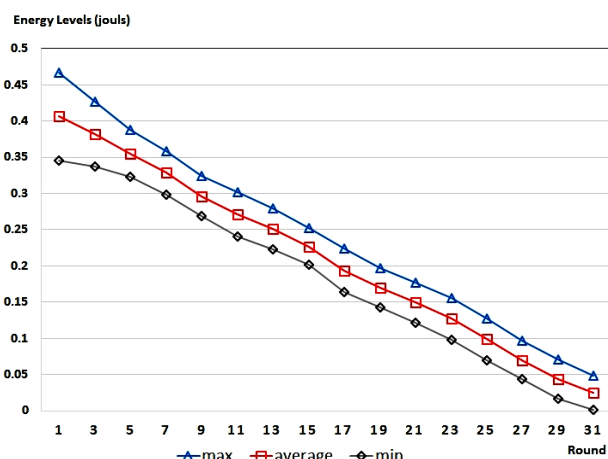
شکل ۲: روندنمای مراحل مختلف روش پیشنهادی

در مدل ریاضی تعیین‌کننده مجموعه‌های پوشش، تعداد مجموعه‌ها نیز به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شده است چراکه کلید بیشینه‌سازی طول عمر، یافتن بیشترین مجموعه پوشش است؛ اما در روش پیشنهادی تعداد مجموعه‌ها به‌صورت فرضی از ۱ تا ۱۵ تغییر داده شده و نتایج مقایسه گشته‌اند.



شکل ۳: گره‌های حس‌گر، چاهک‌ها و اهداف در ناحیه کار

شوند، روند مصرف انرژی همانند شکل ۵ خواهد بود.



شکل ۴: روند مصرف انرژی بدون احتساب پوشش

جدول ۲: مقداردهی پارامترهای مسئله

100 × 100 m ²	100 × 100 m ²	ابعاد ناحیه
100	50	تعداد گره (I)
8	8	تعداد کاندیدای چاهک شدن (K)
6	4	C
2	2	U
10 bits/sec	10 bits/sec	R _i
4000 s	4000 s	T
0.3	0.3	s
50 pJ/bit	50 pJ/bit	c
50 nJ/bit	50 nJ/bit	w
100 pJ/bit/m ²	100 pJ/bit/m ²	v
50	25	تعداد اهداف
J [0.35,0.5] در بازه	J [0.35,0.5] در بازه	انرژی اولیه هر گره (E _i)

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با وجود ۵ مجموعه پوشش، چیزی از یکنواختی مصرف انرژی در طول مدت حیات شبکه کاسته نشده و همچنین تعداد دوره‌ها و درواقع طول عمر شبکه افزایش می‌یابد. این میزان افزایش، نسبت به حالتی که پوشش در نظر گرفته نمی‌شود و فرضیات شبکه مبنی بر تعداد گره‌ها (شکل ۴)، تعداد چاهک‌ها و تعداد سرخوشه‌ها یکسان است به بیش از ۲ برابر رسیده است. شکل ۶ تصویری از مقایسه متوسط انرژی مصرفی در این دو وضعیت را نمایش می‌دهد. در صورتی که تعداد گره‌ها برابر ۱۰۰ و تعداد چاهک، سرخوشه و اهداف را به ترتیب برابر ۲ و ۶ و ۵۰ و گره‌ها در ۷ مجموعه پوشش سازمان‌دهی گردند، روند مصرف انرژی مطابق شکل ۷ خواهد بود.

برابر ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ متر در نظر گرفته شده است. در مورد محاسبه e_s ذکر یک نکته ضروری است. در روش پیشنهادی، اگر e_s از رابطه (۲۶) محاسبه شود، مقدار بزرگی برای آن حاصل می‌گردد که شبیه‌سازی مدل MILP توصیف‌شده در روابط (۱) تا (۱۹) را با مشکل مواجه کرده و ادامه کار را غیرممکن می‌سازد. از طرفی در مرجع [۱۲]، شعاع سنجش حس‌گرها برابر مقدار ثابت ۲۰ متر و انرژی مصرفی ناشی از عملیات سنجش برابر 150 nJ/bit فرض شده است. با جایگذاری این مقادیر در مدل سنجش معرفی شده در [۱۰]، عدد e_s برابر 375 pJ/m² حاصل می‌گردد. با قرار دادن این مقدار برای e_s روند شبیه‌سازی به‌خوبی پیش می‌رود.

۴- نتایج شبیه‌سازی

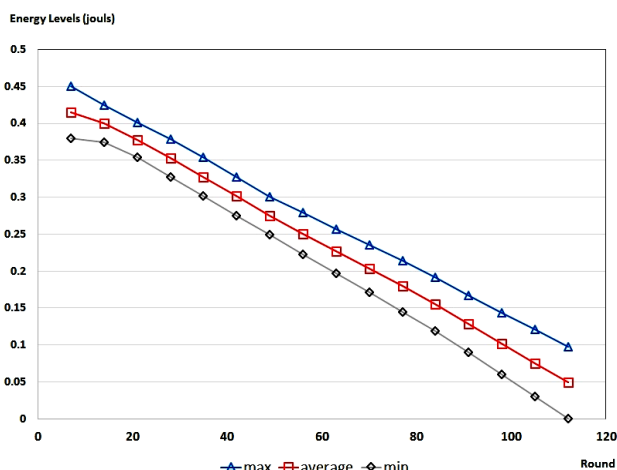
در این قسمت به ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش پیشنهادی پرداخته شده است. پارامترهای شبکه مطابق با جدول ۲ مقداردهی شده‌اند. در مرحله اول، تعداد ۵۰ گره حس‌گر در ناحیه‌ای مربعی شکل با طول ضلع ۱۰۰ متر به‌طور تصادفی توزیع می‌شود. از نقاط اطراف ناحیه کار تعداد ۸ نقطه به‌طور تصادفی به‌عنوان مکان احتمالی چاهک شدن برگزیده شده و تعداد چاهک‌های مورد نیاز در هر دوره برابر ۲ عدد قرار داده شده است.

بنابراین در هر دوره، حل مدل MILP ۲ نقطه را از میان ۸ نقطه، به‌عنوان چاهک‌های فعال انتخاب می‌نماید. تعداد اهداف نصف تعداد حس‌گرها فرض شده و به‌صورت تصادفی در ناحیه کار گمارده شده‌اند. همچنین تعداد سرخوشه‌های مورد نیاز برابر با ۴ عدد فرض می‌شود و انرژی اولیه گره‌ها به‌طور یکنواخت در بازه J [0.35,0.5] توزیع شده است. مدت زمان هر دوره برابر ۴۰۰۰ ثانیه و $R_i = 10$ bits/sec قرار داده می‌شود. از آنجایی که توزیع گره‌ها به‌صورت اتفاقی انجام می‌گیرد، تعداد ۱۰ نمونه شبکه با مفروضات ذکرشده در جدول ۲ تولید گشته و آزمایش‌ها بر روی همه آن‌ها انجام شده است. سپس، میانگین نتایج حاصل، به‌عنوان نتیجه نهایی گزارش شده است. شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزار متلب و با استفاده از جعبه‌ابزار CVX انجام شده است.

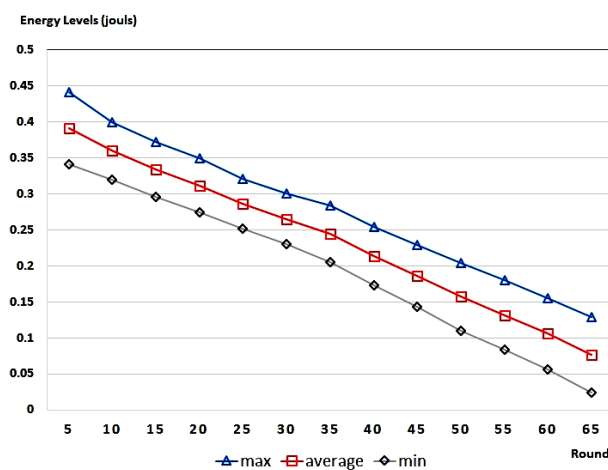
برای مشخص شدن اثر مجموعه‌های پوشش بر طول عمر، ابتدا حالتی بررسی می‌شود که پوشش دخالتی در مسئله نداشته باشد. در این صورت، روند مصرف انرژی مطابق با شکل ۴ خواهد بود.

شکل ۴ درواقع نتیجه حاصل از پیاده‌سازی مرجع [۸] را نشان می‌دهد. در مرجع [۸]، نویسندگان شبیه‌سازی را با استفاده از بسته نرم‌افزاری CPLEX 11 انجام داده و به جوابی نیمه بهینه با شکاف بهینگی ۲٪ دست یافته‌اند.

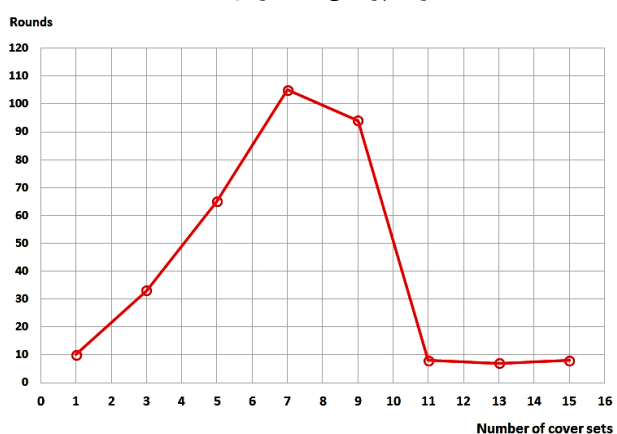
این در حالی است که با استفاده از CVX جوابی نیمه بهینه با شکاف بهینگی ۱۰^{-۸} حاصل شده است. مطابق شکل ۴، حل مسئله MILP به طراحی شبکه‌ای منجر می‌شود که دارای مصرف انرژی یکنواخت بوده و حیات آن به‌طور متوسط تا ۳۱ دوره به طول می‌انجامد. حال اگر برای شبکه‌ای با خصوصیات مذکور، گره‌ها در ۵ مجموعه پوشش سازمان‌دهی



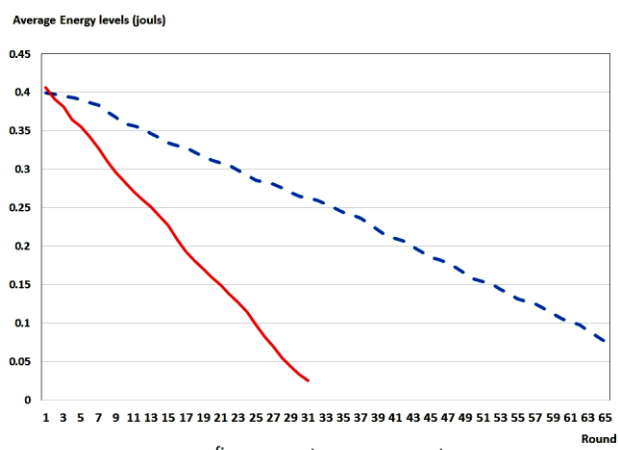
شکل ۷: بیشترین، کمترین و متوسط مصرف انرژی در شبکه با ۷ مجموعه پوشش، ۱۰۰ گره و ۵۰ هدف



شکل ۵: بیشترین، کمترین و متوسط مصرف انرژی در شبکه با ۵ مجموعه پوشش، ۵۰ گره و ۲۵ هدف



شکل ۸: اثر تغییر تعداد مجموعه‌های پوشش بر طول عمر برای ۵۰ گره و ۲۵ هدف



شکل ۶: مقایسه متوسط مصرف انرژی در دو حالت بدون مجموعه پوشش و ۵ مجموعه پوشش

علاوه بر آن، فاصله گره‌ها از یکدیگر و از چاهک‌ها افزایش یافته و ارتباطات رادیویی مستلزم مصرف انرژی بالاتری است. این امر منجر به تخلیه سریع انرژی در گره‌های فعال شده و مرگ زودهنگام شبکه را به دنبال دارد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت بین تعداد گره‌های فعال و شعاع سنجش اتخاذشده توسط آن‌ها، یک تعامل وجود دارد. کاهش تعداد گره‌های فعال فرصت غیرفعال بودن و در نتیجه ذخیره کردن انرژی به تعداد بیشتری از گره‌ها می‌دهد و این امر تأثیر مثبتی بر طول عمر شبکه دارد؛ ولی این تعداد نباید آنقدر کاهش یابد که گره‌ها را مجبور به استفاده از بالاترین شعاع سنجششان کند؛ چراکه در این صورت حیات شبکه دیر نمی‌یابد.

در شکل ۸، هنگامی که تعداد مجموعه‌های پوشش برابر ۱ است، طول عمر شبکه در مقایسه با حالتی که هیچ مجموعه پوششی وجود ندارد کاملاً محسوس می‌باشد. دلیل این تفاوت این است که در تشکیل مجموعه‌ها، تحت پوشش قرار گرفتن تمام اهداف توسط اعضای مجموعه الزامی است. از طرفی، به دلیل تصادفی توزیع شدن گره‌ها در ناحیه کار، وجود حس‌گرهایی که در نقطه‌ای دور از همه اهداف قرار گرفته باشند غیرقابل تصور نیست. فاصله این گره‌ها تا هر یک از اهداف از حداکثر

در مرحله بعد، اثر تغییر تعداد مجموعه‌های پوشش بر طول عمر شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، شبکه یک بار با تعداد گره ۵۰ و اهداف ۲۵ و یک بار با تعداد گره ۱۰۰ و اهداف ۵۰ در نظر گرفته و تعداد مجموعه‌ها از ۱ تا ۱۵ تغییر می‌یابند. شکل‌های ۸ و ۹ نتایج حاصل از این تغییر را نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۸، بیشترین طول عمر شبکه زمانی حاصل می‌شود که تعداد مجموعه‌های پوشش برابر با ۷ باشد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، افزایش تعداد مجموعه‌ها به افزایش طول عمر شبکه می‌انجامد. در شکل ۹، بیشینه طول عمر به‌ازای تعداد مجموعه پوشش ۹ رخ می‌دهد. دلیل این امر کمتر شدن تعداد گره‌های فعال در هر دوره و بیشتر شدن تعداد گره‌هایی است که از مزیت غیرفعال بودن استفاده می‌کنند. در تعداد مجموعه‌های بیشتر از ۷، طول عمر شدیداً کاهش می‌یابد. دلیل این رخداد را می‌توان این‌گونه توجیه کرد؛ هرچند تعداد مجموعه‌های بیشتر به معنی تعداد گره کمتر در هر مجموعه است؛ اما گره‌های فعال برای تحت پوشش قرار دادن تمامی اهداف، ناگزیرند تا از شعاع سنجش بیشتری استفاده نمایند.

اهداف» تعریف گشته است؛ که در آن منظور از اهداف، نقاط خاصی از ناحیه کار با مکان از پیش تعیین شده می‌باشند که نیاز به نظارت مداوم دارند. گره‌ها همگی دارای چهار سطح مختلف برای سنجش در نظر گرفته شدند و از مدل سنجش باینری استفاده گردید. با توجه به اینکه تعداد گره‌های توزیع شده در ناحیه کار، بسیار بیشتر از تعداد اهداف است، با سازمان‌دهی گره‌ها به مجموعه‌های مختلف موسوم به مجموعه‌های پوشش، نوعی زمان‌بندی ایجاد شده است تا در هر دوره از طول عمر شبکه، تنها یک مجموعه گره فعال بوده و به نظارت اهداف بپردازد و باقی گره‌ها در وضعیت غیرفعال قرار گرفته و انرژی خود را ذخیره نمایند.

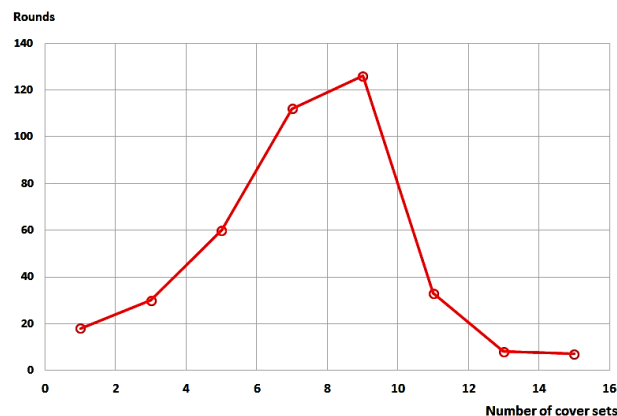
از آنجایی که علاوه بر ارتباطات رادیویی و عملیات محاسباتی، سنجش نیز تأثیر قابل توجهی بر انرژی مصرف‌شده در هر گره دارد، رابطه مربوط به مصرف انرژی، به‌گونه‌ای اصلاح شده است که نقش سنجش نیز در نظر گرفته شود. بر طبق رابطه اصلاح‌شده، مصرف انرژی در هر گره ناشی از ارتباطات رادیویی و سنجش با شعاع اتخاذ شده توسط گره در هر دوره می‌باشد.

چنان‌که در نتایج شبیه‌سازی نشان داده شد، با این‌که یک جمله جدید به مدل مصرف انرژی اضافه شد، وجود مجموعه‌های پوشش، یکنواختی مصرف انرژی را مختل نمی‌کند و اصولاً حالتی که در آن گره‌های با سطح انرژی بالا در کنار گره‌های با سطح انرژی پایین قرار داشته باشند مشاهده نمی‌گردد. همچنین، طول عمر شبکه با افزایش تعداد مجموعه‌های پوشش بیشتر می‌شود اما بین تعداد گره‌های فعال و شعاع سنجش آن‌ها تعاملی وجود دارد. یعنی افزایش بیش از اندازه تعداد مجموعه‌ها ممکن است نه تنها موجب افزایش طول عمر نگردد بلکه حیات شبکه را با کاهش شدیدی روبرو نماید. همچنین، روش پیشنهادی در مقایسه با روش ارائه شده در [۸] و الگوریتم T-LEACH عملکرد بهتری از نظر طول عمر نشان می‌دهد.

مراجع

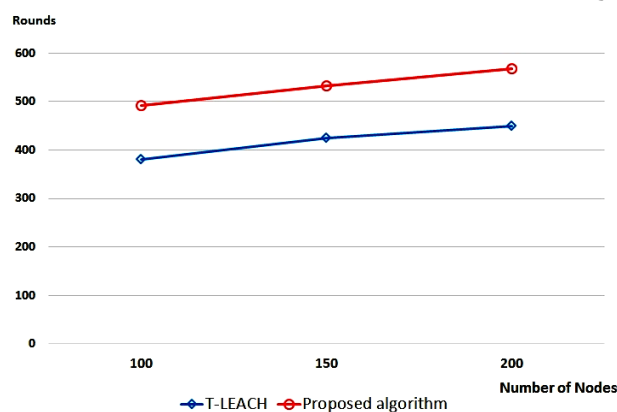
- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer networks*, vol. 38, pp. 393-422, 2002.
- [2] P. Santi, *Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*: Wiley, 2005.
- [3] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, "Wireless sensor network survey," *Computer networks*, vol. 52, pp. 2292-2330, 2008.
- [4] G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, and A. Passarella, "Energy conservation in wireless sensor networks: A survey," *Ad Hoc Networks*, vol. 7, pp. 537-568, 5// 2009.
- [5] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 1, pp. 660-670, 2002.
- [6] J. Hong, J. Kook, S. Lee, D. Kwon, and S. Yi, "T-LEACH: The method of threshold-based cluster head replacement

شعاع سنجش آن‌ها نیز بیشتر بوده و لذا به‌عنوان عضوی از مجموعه پوشش به شمار نمی‌روند. این امر باعث می‌شود که پایش اهداف، مجموعاً با تعداد گره کمتری صورت گرفته و طول عمر شبکه کاهش یابد. علاوه بر آن، در مدل مصرف انرژی، جمله مجزایی برای محاسبه هزینه سنجش در نظر گرفته شده است که این خود، میزان مصرف انرژی را نسبت به حالت عدم وجود مسئله پوشش افزایش داده و از طول عمر شبکه می‌کاهد.



شکل ۹: اثر تغییر تعداد مجموعه‌های پوشش بر طول عمر برای ۱۰۰ گره و ۵۰ هدف

در مرحله آخر، روش پیشنهادی با الگوریتم T-LEACH مورد مقایسه قرار گرفته است. نتیجه حاصل از این مقایسه در شکل ۱۰، به تصویر کشیده شده است. به‌منظور انجام این مقایسه، پارامترهای ورودی الگوریتم T-LEACH مانند سطح انرژی اولیه گره‌ها، مدت زمان هر دوره و ابعاد ناحیه کار بر روی روش ارائه شده اعمال گشته است. مطابق شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که با تغییر تعداد گره‌ها از ۱۰۰ تا ۲۰۰، روش پیشنهادی دارای طول عمر بالاتری بوده و لذا استفاده مؤثرتری از انرژی دارد.



شکل ۱۰: مقایسه روش پیشنهادی با الگوریتم T-LEACH

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به موضوع بهبود طول عمر WSN با استفاده از مسیریابی چندجهشی و خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی با شرط حداکثر پوشش در ناحیه کار پرداخته شده است. مسئله پوشش به‌عنوان مسئله «پوشش

- optimal sensor deployment, activity scheduling, data routing and sink mobility," *Ad Hoc Networks*, vol. 17, pp. 18-36, 6// 2014.
- [15] M. Abo-Zahhad, S. M. Ahmed, N. Sabor, and S. Sasaki, "Mobile Sink-Based Adaptive Immune Energy-Efficient Clustering Protocol for Improving the Lifetime and Stability Period of Wireless Sensor Networks," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, pp. 4576-4586, 2015.
- [16] B. a. A. Attea, E. A. Khalil, S. Özdemir, and O. Yıldız, "A Multi-objective Disjoint Set Covers for Reliable Lifetime Maximization of Wireless Sensor Networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 81, pp. 819-838, 2015.
- [17] J. S. Leu, T. H. Chiang, M. C. Yu, and K. W. Su, "Energy Efficient Clustering Scheme for Prolonging the Lifetime of Wireless Sensor Network With Isolated Nodes," *IEEE Communications Letters*, vol. 19, pp. 259-262, 2015.
- [18] Q. Yang, S. He, J. Li, J. Chen, and Y. Sun, "Energy-Efficient Probabilistic Area Coverage in Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, pp. 367-377. ۲۰۱۵ .
- [۱۹] م. واعظی و م. جبرئیل جمالی، «پروتکل مسیریابی جدید مبتنی بر کیفیت خدمات در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با تحلیل سلسله‌مراتبی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، شماره ۴۶، ۲۴ خرداد ۱۳۹۵.
- [20] A. Sangwan and R. P. Singh, "Survey on Coverage Problems in Wireless Sensor Networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 80, pp. 1475-1500, 2015.
- [21] C. Basaran and K.-D. Kang, "Quality of service in wireless sensor networks," in *Guide to Wireless Sensor Networks*, ed: Springer, 2009, pp. 305-321.
- for wireless sensor networks," *Information Systems Frontiers*, vol. 11, pp. 513-521, 2009.
- [7] S. Lindsey and C. S. Raghavendra, "PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems," in *Aerospace Conference Proceedings, 2002. IEEE, 2002*, pp. 3-1125-3-1130 vol.3.
- [8] H. Lin and H. Uster, "Exact and heuristic algorithms for data-gathering cluster-based wireless sensor network design problem," *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol. 22, pp. 903-916, 2014.
- [9] S. Lee, H. Choe, B. Park, Y. Song, and C. K. Kim, "LUCA: An Energy-efficient Unequal Clustering Algorithm Using Location Information for Wireless Sensor Networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 56, pp. 715-731, 2011/02/01 2011.
- [10] M. Cardei, W. Jie, L. Mingming, and M. O. Pervaiz, "Maximum network lifetime in wireless sensor networks with adjustable sensing ranges," in *Wireless And Mobile Computing, Networking And Communications, 2005. (WiMob'2005), IEEE International Conference on*, 2005, pp. 438-445 Vol. 3.
- [11] D. Tian and N. D. Georganas, "A node scheduling scheme for energy conservation in large wireless sensor networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. ۳ . pp. 271-290, 2003.
- [12] Q. Zhao and M. Gurusamy, "Lifetime maximization for connected target coverage in wireless sensor networks," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 16, pp. 1378-1391, 2008.
- [13] S. Jabbar, A. A. Minhas, A. Paul, and S. Rho, "Multilayer cluster designing algorithm for lifetime improvement of wireless sensor networks," *The Journal of Supercomputing*, vol. 70, pp. 104-132, 2014.
- [14] M. E. Keskin, İ. K. Altınel, N. Aras, and C. Ersoy, "Wireless sensor network lifetime maximization by

زیرنویس‌ها

⁵ Mihaela Cardei⁶ Adjustable Range Set Covers⁷ Connectivity Target Coverage⁸ Maximum Cover Tree⁹ Mixed Integer Linear Programming¹⁰ Cover sets¹ Wireless Sensor Network² Sink³ Wireless Ad-hoc Network⁴ Hui Lin