

تأثیر محل گره چاهک بر کارایی شبکه‌های حسگر بی‌سیم با در نظر گرفتن مسیریابی خوشه‌بندی و نظریه نمونه‌برداری فشرده

شیمای پاکدامن تیرانی^(۱) - آوید آوگ^(۲)

(۱) کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، اصفهان، ایران

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

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۷/۲۷

خلاصه: شبکه حسگر بی‌سیم متشکل از تعداد زیادی گره‌های حسگر است که در یک محیط به طور گسترده پخش شده و به جمع‌آوری اطلاعات می‌پردازند. از جمله چالش‌های اساسی در این شبکه‌ها، کاهش تعداد ارسال‌ها و در نتیجه، افزایش طول عمر شبکه می‌باشد. یکی از ایده‌های مطرح به منظور افزایش طول عمر شبکه، مسئله کنترل موقعیت گره چاهک می‌باشد. محل این گره، نقش به‌سزایی در بهبود توازن بار شبکه ایفا می‌کند. اهمیت این موضوع تا حدی است که امروزه از گره‌های چاهک متحرک در شبکه‌های حسگر بی‌سیم استفاده می‌شود. در کنار این مهم، نظریه نمونه‌برداری فشرده نیز به شکل چشمگیری منجر به کاهش تعداد ارسال‌های داده در این شبکه‌ها می‌شود. در این مقاله، از روش نمونه‌برداری فشرده پیوندی به همراه مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی استفاده می‌گردد. با استفاده از مدل مرسوم شبکه‌های حسگر بی‌سیم به بررسی اثر تغییر محل گره چاهک بر تعداد ارسال‌ها و کارایی شبکه پرداخته می‌شود. برای تحقق این هدف، در پنج حالت مختلف، فرمول محاسبه تعداد کل ارسال‌ها به دست می‌آید. در نظر گرفتن حالت‌های مطرح شده، جهت یافتن بهترین محل برای گره چاهک از نظر تعداد ارسال‌ها و میزان مصرف انرژی در شبکه حسگر است. با توجه به مدل مصرف انرژی رادیویی مرتبه اول در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، کاهش حجم داده ارسالی، میزان مصرف انرژی را نیز کاهش و طول عمر شبکه را افزایش خواهد داد.

کلمات کلیدی: شبکه‌های حسگر بی‌سیم، نمونه‌برداری فشرده، خوشه‌بندی، محل گره چاهک، تعداد ارسال‌ها.

Impact of Sink Node Placement onto Wireless Sensor Networks Performance Regarding Clustering Routing and Compressive Sensing Theory

Shima Pakdaman Tirani⁽¹⁾ - Avid Avokh⁽²⁾

(1) MSc Student - Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Esfahan, Iran
sh.pakdaman@sel.iaun.ac.ir

(2) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Esfahan, Iran
aavokh@pel.iaun.ac.ir

Wireless Sensor Networks (WSNs) consist of several sensor nodes with sensing, computation, and wireless communication capabilities. The energy constraint is one of the most important issues in these networks. Thus, the data-gathering process should be carefully designed to conserve the energy. In this situation, a load-balancing strategy can enhance the resources utilization, and consequently, increase the network lifetime. Furthermore, recently, the sparse nature of data in WSNs has been motivated the use of the compressive sensing as an efficient data gathering technique. Using the compressive sensing theory significantly leads to decreasing the volume of the transmitted data. Taking the above challenges into account, the main goal of this paper is to jointly consider the compressive sensing method and the load-balancing in WSNs. In this regards, using the conventional network model, we analyze the network performance in several different states. These states challenge the sink location in term of the number of transmissions. Numerical results demonstrate the efficiency of the load-balancing in the network performance.

Index Terms: Wireless sensor networks, compressive sensing, sink node, load-balancing, number of transmissions.

نویسنده مسئول: آوید آوگ، استادیار، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، اصفهان، ایران. aavokh_edu@yahoo.com

۱- مقدمه

پیشرفت‌های اخیر در صنعت الکترونیک و مخابرات بی سیم، توانایی طراحی و ساخت حسگرهایی را با توان مصرفی پایین، اندازه کوچک، قیمت مناسب و کاربری‌های گوناگون فراهم کرده است. این حسگرها موجب پیدایش ایده‌ای برای ایجاد و گسترش شبکه‌های موسوم به شبکه حسگر بی سیم^۱ (WSN) شده‌اند. یک شبکه حسگر متشکل از تعداد زیادی گره‌های حسگر است که در یک محیط به طور گسترده پخش شده و به جمع‌آوری اطلاعات می‌پردازند. پروتکل‌های مورد استفاده در شبکه‌های حسگر، باید از توانایی خودسازماندهی^۲ بالایی برخوردار باشند. لذا، همکاری و هماهنگی بین گره‌های حسگر مختلف از ضرورت بالایی برخوردار است [۱].

در شبکه‌های حسگر بی سیم، بیشترین سهم توان مصرفی یک گره متعلق به ارسال داده می‌باشد [۲]. در این راستا، به منظور حداکثر کردن طول عمر شبکه، با دو چالش اساسی روبرو هستیم: (۱) کاهش هزینه‌های مخابراتی^۳ شبکه (۲) افزایش توازن بار در شبکه. به دلیل وجود افزونگی زیاد بین داده گره‌های مختلف، اگر حسگرها به صورت مستقل داده‌هایشان را برای گره چاهک^۴ ارسال کنند، این انتظار می‌رود که یک داده مشابه چندین بار از طریق مسیرهای مختلف ارسال شود. این مسئله، باعث ارسال‌های اضافی در شبکه شده و هزینه‌های مخابراتی را افزایش می‌دهد [۲]. لذا در این شبکه‌ها، بسته‌های مشابه گره‌های مختلف، می‌توانند متراکم شوند و در نتیجه، حجم داده ارسالی کاهش یابد. تراکم داده، در حقیقت ترکیب کردن داده منابع مختلف طبق یک معیار مشخص همچون حذف نسخه‌های تکراری، حداقل، حداکثر و یا میانگین گرفتن از نسخه‌های کپی شده می‌باشد. این روش، برای رسیدن به کارایی بالاتر انرژی و بهبود انتقال داده در بسیاری از پروتکل‌های مسیریابی استفاده می‌گردد. یکی از مؤثرترین روش‌ها برای حذف افزونگی داده، استفاده از تئوری نمونه برداری فشرده^۵ است [۳].

روش قدیمی بازسازی سیگنال‌ها از داده‌های اندازه‌گیری شده بر پایه تئوری نمونه برداری نایکوئیست می‌باشد [۴]. طبق این تئوری، حداقل نرخ نمونه برداری به منظور بازسازی بدون خطای سیگنال، دو برابر حداکثر فرکانس موجود در سیگنال است. تئوری نمونه برداری فشرده روش جدیدی برای جمع‌آوری داده‌ها فراهم کرده و جایگزین روش نایکوئیست شده است [۳].

بر اساس این تئوری، یک سیگنال تنک^۶ را می‌توان با نرخی کمتر از نرخ نایکوئیست بازسازی کرد. در واقع، این تئوری، نمونه برداری و فشرده سازی را به وسیله‌ای اندازه‌گیری حداقل نمونه‌هایی که شامل بیشترین اطلاعات در مورد سیگنال هستند، در یک گام ترکیب می‌کند. با استفاده از این روش، دیگر نیازی به ذخیره سازی تعداد زیادی از نمونه‌ها نیست؛ چرا که بسیاری از نمونه‌ها که دارای ارزش کمی هستند، نادیده گرفته می‌شوند. تئوری نمونه برداری فشرده به منظور دستیابی به یک بردار از نمونه‌ها، برای هر سیگنال تنک، یک

ماتریس تبدیل^۷ و یک ماتریس اندازه‌گیری تصادفی^۸ را به کار می‌گیرد. این روش، منجر به کاهش حجم داده ارسالی توسط گره‌های حسگر می‌شود. در نتیجه، انرژی کمتری توسط گره‌های شبکه مصرف می‌شود. در فرآیند جمع‌آوری داده گره‌های شبکه، طبیعی است که گره‌های دور از گره چاهک، نقش کمتری در ارسال داده‌های سایر حسگرهای شبکه ایفا می‌کنند. ولی در مقابل، گره‌های نزدیک به گره چاهک، مجبور به هدایت بسته‌های بیشتری از داده هستند. این مسئله، ضمن بر هم زدن توازن بار در شبکه، منجر به افت طول عمر گره‌های نزدیک به گره چاهک و در نتیجه، کاهش طول عمر شبکه خواهد شد. در روش نمونه برداری فشرده، گره‌های دور از گره چاهک، داده اصلی را بدون استفاده از نمونه برداری فشرده ارسال می‌کنند؛ اما، گره‌های نزدیک به گره چاهک، داده را با استفاده از روش نمونه برداری فشرده به این گره ارسال می‌کنند. در این راستا، استفاده از روش خوشه بندی^۹ برای مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی سیم ضمن برخورداری از مزایایی همچون تحمل عیب^{۱۰}، توازن بار ترافیکی، تثبیت توپولوژی شبکه، کاهش نرخ مصرف انرژی شبکه را نیز به دنبال خواهد داشت [۵]. لذا، با استفاده از تئوری نمونه برداری فشرده به همراه روش مسیریابی، به شکل کارآمدی به هدف افزایش طول عمر شبکه دست خواهیم یافت. در این مقاله، به مسئله تئوری نمونه برداری فشرده پیوندی^{۱۱} و خوشه بندی در شبکه‌های حسگر بی سیم خواهیم پرداخت. ابتدا مدلی که روابط بین اندازه خوشه‌ها و تعداد ارسال‌ها در روش نمونه برداری فشرده پیوندی را مطالعه می‌کند، توضیح می‌دهیم. هدف این مدل، پیدا کردن اندازه بهینه خوشه‌ها است به طوری که منجر به حداقل تعداد ارسال‌ها شود. شایان ذکر است که با خوشه بندی شبکه و مشخص شدن سرخوشه‌ها^{۱۲} (CH)، نیاز به یک درخت مسیریابی احساس می‌شود. درختی که داده‌های سرخوشه‌ها را جمع‌آوری کرده و در نهایت، به دست گره چاهک می‌رساند. هر چه این درخت پرش‌های^{۱۳} کمتری را شامل شود، تعداد ارسال‌ها در شبکه کاهش می‌یابد. به طور مثال، اگر گره چاهک در گوشه شبکه حسگر باشد، درخت ذکر شده، پرش‌های بیشتری را شامل می‌شود. اما با انتقال این گره از گوشه به مرکز شبکه، درخت مسیریابی به گونه‌ای است که داده‌ها با طی پرش‌های کمتری به دست گره چاهک می‌رسند و تعداد ارسال‌ها کمتر می‌شود. با توجه به موارد ذکر شده، جایگاه گره چاهک نقش به‌سزایی در شکل‌گیری درخت مسیریابی، کنترل توازن بار، کاهش تعداد ارسال‌ها و در نتیجه افزایش طول عمر شبکه دارد. لذا، با توجه به مدل تشریح شده، تأثیر محل گره چاهک را بر روی تعداد کل ارسال‌های شبکه بررسی می‌کنیم. در این راستا، ضمن فرموله کردن مساله به آنالیز توازن بار و طول عمر شبکه خواهیم پرداخت.

ساختار این مقاله به ترتیب زیر سازماندهی شده است: بخش ۲، به مرور کارهای مرتبط پیشین می‌پردازد. مدل شبکه و مدل مصرف انرژی را در بخش ۳ می‌توان دنبال کرد. در بخش ۴، نظریه نمونه برداری فشرده تشریح شده و با مثالی مسئله استفاده از نمونه برداری فشرده پیوندی

فرآیند جمع‌آوری داده به کار می‌گیرد. یک درخت تجمیع‌کننده داده با حداقل مصرف انرژی پیشنهاد می‌شود. مصرف انرژی یک پیوند در مرجع [۱۶]، تابعی از طول پیوند می‌باشد.

در مرجع [۱۷]، زیر مجموعه‌ای از گره‌ها که به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند در فرآیند حس کردن و ارسال داده با در نظر گرفتن دسترسی تصادفی به کانال شرکت می‌کنند. بازسازی داده بر اساس روش نمونه‌برداری فشرده در گره چاهک انجام می‌شود. این امکان وجود دارد که تنگی سیگنال‌های طبیعی تغییر کند. در ارتباط با این چالش، نویسندگان در مرجع [۹]، یک روش جمع‌آوری داده وقتی با استفاده از نمونه‌برداری فشرده برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم ارائه می‌کنند. این کار به بررسی مدلی برای بازسازی نمونه‌برداری فشرده می‌پردازد و تعداد اندازه‌گیری‌ها بر طبق تغییر داده حس شده تنظیم می‌شود.

کارهای تحقیقاتی کمی شامل به‌کارگیری تئوری نمونه‌برداری فشرده و مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، می‌باشند [۱۸]، [۵]. در مرجع [۵]، به طراحی توأم مسیریابی و تراکم داده در شبکه‌های حسگر بی‌سیم پرداخته می‌شود. نویسندگان این مقاله، یک روش مسیریابی خوشه‌بندی جمع‌آوری داده را پیشنهاد می‌کنند. هدف این روش، کاهش میزان مصرف انرژی ارسال داده می‌باشد. چالش‌های اساسی بحث شده، تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها و توزیع یکنواخت سرخوشه‌ها می‌باشد. در این تحقیق از مدل رادیویی مرتبه اول [۵]، برای پیدا کردن تعداد بهینه خوشه‌ها استفاده می‌شود. چون سرخوشه‌ها در مرکز خوشه قرار می‌گیرند و بسته‌های خود را همراه با درخت پوشای کوتاه‌ترین مربع فاصله ارسال می‌کنند، اگر اندازه خوشه‌ها نیز مشابه باشد، مصرف انرژی کل شبکه کاهش می‌یابد. نویسندگان مرجع [۱۸]، خوشه‌بندی شبکه حسگر بی‌سیم را به همراه روش نمونه‌برداری فشرده پیوندی به کار می‌گیرند. از آنجایی که تعداد گره‌ها در خوشه‌ها می‌تواند متوازن باشد، پس بار ترافیکی در شبکه متوازن می‌شود. در این مقاله، گره‌ها به صورت خوشه‌هایی سازمان‌دهی می‌شوند. درون هر خوشه، گره‌ها داده را بدون استفاده از روش نمونه‌برداری فشرده به سرخوشه ارسال می‌کنند. یک درخت جمع‌کننده و فشرده‌ساز داده همه‌ی سرخوشه‌ها را پوشش می‌دهد. این درخت برای ارسال داده به گره چاهک با استفاده از روش نمونه‌برداری فشرده بنا می‌شود. این روش حجم ارسال‌ها را در مقایسه با روش خوشه‌بندی بدون استفاده از تئوری نمونه‌برداری فشرده، کاهش می‌دهد.

۳- مدل شبکه و مفروضات

در این بخش، به بیان مفروضاتی در رابطه با مدل شبکه و مدل مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم پرداخته می‌شود. شبکه‌ای مشتمل بر یک گره چاهک و N گره حسگر را در نظر بگیرید. N گره حسگر به صورت تصادفی و مستقل با چگالی λ در یک شبکه حسگر مستطیلی شکل توزیع می‌شوند. برد مخابراتی گره‌های حسگر r فرض می‌شود. شبکه مفروض توسط یک گراف پیوسته بدون جهت $G(V, E)$ مدل می‌شود که مجموعه رئوس V شامل N گره حسگر و

در مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی توضیح داده خواهد شد. در بخش ۵، مدلی برای بررسی رابطه بین اندازه خوشه‌ها و تعداد ارسال‌ها مطرح خواهد شد. در بخش ۶، ضمن استخراج روابط مقتضی، اثر محل گره چاهک بر تعداد کل ارسال‌ها و کارایی شبکه بررسی خواهد شد. بخش ۷، به شبیه‌سازی و ارزیابی تحلیل انجام شده خواهد پرداخت و نهایتاً در بخش ۸، نتایج این مقاله ارائه خواهد شد.

۲- مروری بر کارهای پیشین

در سال‌های اخیر، روش‌های تجمیع داده مختلفی بر مبنای نمونه‌برداری فشرده ارائه شده است که با کاهش حجم داده‌های ارسالی، سعی در افزایش طول عمر شبکه داشته‌اند [۱۰-۶]. در مرجع [۶]، جمع‌آوری داده با بهره‌گیری از نمونه‌برداری فشرده برای دستیابی به فشرده‌سازی داده‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم تک پرشی^{۱۴} پیشنهاد می‌شود. در [۷]، Luo و همکارانش، تجمیع داده فشرده (CDG)^{۱۵} را بر مبنای نمونه‌برداری فشرده برای کاهش مؤثر هزینه ارتباطات و افزایش طول عمر شبکه در شبکه‌های حسگر با مقیاس بزرگ پیشنهاد می‌کنند. آن‌ها ظرفیت شبکه را هنگامی که تجمیع داده با استفاده از نمونه‌برداری فشرده صورت می‌گیرد، تجزیه و تحلیل نموده و ثابت می‌کنند که ظرفیت شبکه با سطح تنگی داده حسگرها متناسب است. در مقاله [۱۱]، نمونه‌برداری فشرده برای تجمیع داده‌های درون-شبکه‌ای به عنوان یک روش فشرده‌سازی غیرمتمرکز در نظر گرفته می‌شود.

نویسندگان مرجع [۱۲]، یک روش تراکم داده کارآمد، برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم پیشنهاد می‌کنند. هدف آن‌ها از ارائه این روش، کاهش ترافیک در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، بهبود صحت بازسازی سیگنال‌ها و مصرف توان پایین می‌باشد. روش آن‌ها در پارامترهای خطای بازسازی، مصرف توان و ظرفیت شبکه نسبت به روش‌های تراکم داده دیگر عملکرد بهتری دارد. نویسندگان مراجع [۱۳] و [۱۴]، محدودیت‌های اساسی تراکم داده با نمونه‌برداری فشرده را در شبکه حسگر بی‌سیم بررسی می‌کنند. از جمله کارهای انجام شده، پیشنهاد یک روش مسیریابی بر اساس نمونه‌برداری فشرده برای تراکم داده در شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این روش باعث افزایش ظرفیت و کاهش تأخیر در شبکه می‌شود.

مرجع [۸]، یک فرآیند جمع‌آوری داده را طراحی کرده است. در هر نوبت، M گره که به دور از گره چاهک هستند، داده خود را مستقیماً به یکی از گره‌های باقیمانده که از روش نمونه‌برداری فشرده استفاده می‌کنند، ارسال می‌کنند. محققان اثبات می‌کنند که روش آن‌ها هزینه ارسال را کاهش می‌دهد. چگونگی دسترسی به گذردهی^{۱۶} بالا با استفاده از روش نمونه‌برداری فشرده و یا روش نمونه‌برداری فشرده پیوندی در مرجع [۱۵]، بررسی می‌شود. ممکن است کاربرد نمونه‌برداری فشرده به صورت ساده، گذردهی را بهبود ندهد. اما به کارگیری روش نمونه‌برداری فشرده پیوندی تا حد زیادی گذردهی را بهبود می‌دهد. مرجع [۱۶]، روش نمونه‌برداری فشرده پیوندی را در

شرایط RIP از مرتبه $2k$ را برآورده می‌کند اگر یک $\delta_k \in (0, 1)$ وجود داشته باشد که عبارت (۳) برای بردار \underline{X} با نمایش k -تنک برقرار باشد:

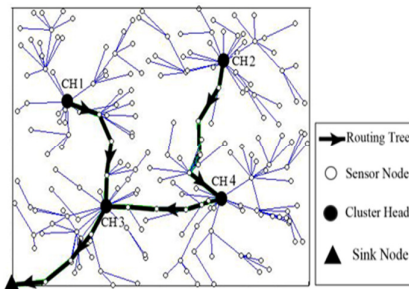
$$(1 - \delta_k) \|\underline{X}\|_2^2 \leq \|\Phi \underline{X}\|_2^2 \leq (1 + \delta_k) \|\underline{X}\|_2^2 \quad (3)$$

هنگام سر و کار داشتن با بردارها به‌طور مکرر از مفهوم ℓ_p -norm که به صورت $\|\underline{X}\|_p = (\sum_{i=1}^n |x_i|^p)^{1/p}$ تعریف می‌شود، استفاده می‌گردد.

در اینجا اشاره به این نکته ضروری است که وجود شرایط RIP برای ماتریس‌های تصادفی مانند ماتریس گوسی با عناصر مستقل و توزیع شده به صورت یکنواخت^{۲۱} و ماتریس برنولی با عناصر ± 1 به اثبات رسیده است [۲۰]. نهایتاً در گره چاهک، بعد از جمع‌آوری \underline{Y} ، بردار داده اصلی \underline{X} به‌وسیله الگوریتم‌های مشخصی بازیابی می‌شود [۳، ۴، ۲۱].

شایان ذکر است که عملکرد عملی نظریه نمونه‌برداری فشرده به میزان تنگی سیگنال و الگوریتم‌های بازسازی وابسته می‌باشد. همچنین، طبق این نظریه، افزایش تعداد اندازه‌گیری‌های نمونه‌برداری فشرده منجر به افزایش کیفیت بازیابی داده خواهد شد [۲۲]. حال، در ادامه با مثالی مسئله استفاده از نمونه‌برداری فشرده پیوندی در مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی را توضیح می‌دهیم.

مطابق شکل (۱) شبکه‌ای مشتمل بر چهار خوشه را در نظر بگیرید. هر خوشه دارای یک سرخوشه (CH) است. در این شکل سرخوشه‌ها با دایره‌های سیاه رنگ نشان داده شده‌اند. گره‌های حسگر یک خوشه، داده‌های خود را از طریق کوتاه‌ترین مسیر به سرخوشه ارسال می‌کنند. در روش نمونه‌برداری فشرده پیوندی با ساختار خوشه‌بندی، گره‌های حسگر برای ارسال داده به سرخوشه‌ها از تئوری نمونه‌برداری فشرده استفاده نمی‌کنند.



شکل (۱): جمع‌آوری داده نمونه‌برداری فشرده پیوندی به همراه خوشه‌بندی شبکه

Fig. (1): The hybrid compressive sensing data collection along with network clustering

یک درخت مسیریابی که شامل همه سرخوشه‌ها و گره چاهک باشد، نیاز می‌شود. در اینجا از درخت پوشا با حداقل وزن^{۲۲} (MST) استفاده می‌شود. این درخت به‌گونه‌ای است که کمترین تعداد پرش‌ها را شامل شده و از همه سرخوشه‌ها و گره چاهک عبور می‌کند. درخت مسیریابی ذکر شده در شکل (۱) به صورت خطوط ضخیم جهت‌دار قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که در روش نمونه‌برداری فشرده پیوندی، تصاویر داده تولید شده در هر سرخوشه‌ای از طریق درخت مسیریابی فوق‌الذکر

یک گره چاهک v_0 می‌باشد. مجموعه یال‌های E نشان‌دهنده پیوندهای دو طرفه بی‌سیم بین گره‌ها می‌باشد. وجود پیوند (i, j) بین دو گره $i \in V$ و $j \in V$ به این معنی است که این دو گره در برد مخابراتی یکدیگر قرار دارند و می‌توانند به‌طور مستقیم با هم در ارتباط باشند. گره چاهک v_0 وظیفه جمع‌آوری داده‌ها را در شبکه برعهده دارد. به دلیل استفاده از کدهای متعامد در ارسال داده‌ها، تداخلی^{۱۷} در شبکه صورت نمی‌گیرد؛ بنابراین، فرض بر آن است که هیچ بستهای در شبکه گم نخواهد شد.

در این مقاله، از مدل مصرف انرژی رادیویی مرتبه اول به صورت زیر، استفاده می‌شود [۱۹].

$$E_{Tx}(L, d) = E_{elec} \times L + \epsilon_{amp} \times L \times d^2, \quad (1)$$

$$E_{Rx}(L) = E_{elec} \times L. \quad (2)$$

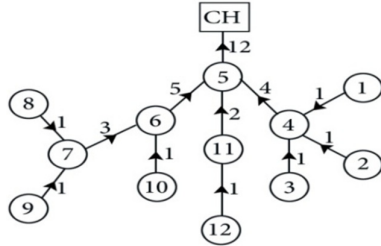
که $E_{Tx}(L, d)$ و $E_{Rx}(L)$ به ترتیب بیانگر انرژی مصرفی برای ارسال و دریافت یک بسته داده L بیتی بر روی مسیری به فاصله d می‌باشند. همچنین، E_{elec} انرژی مصرفی برای دریافت یا ارسال یک پیام تک بیتی توسط مدارات الکترونیکی و ϵ_{amp} انرژی مصرفی تقویت‌کننده انتقال را بیان می‌کنند.

۴- نظریه نمونه‌برداری فشرده

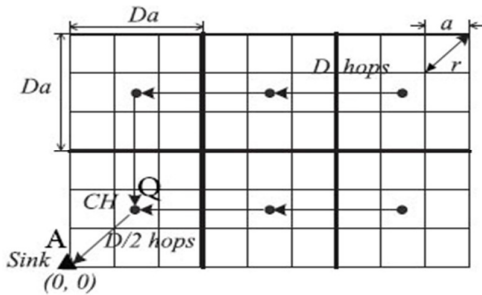
نظریه نمونه‌برداری فشرده، یک رویکرد جدید فشرده‌سازی و دست‌یابی به سیگنال است که از قابلیت فشرده‌سازی سیگنال‌ها، به‌منظور به حداقل رساندن نمونه‌های مورد نیاز برای بازیابی کل سیگنال بهره‌برداری می‌کند. بردار $\underline{X} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ ، k -تنک نامیده می‌شود اگر حداکثر دارای k درایه غیر صفر باشد. در این نمایش، $[.]^T$ معرف عملگر ترانهاده می‌باشد. چنانچه شبکه‌ای مشتمل بر N گره حسگر باشد، هر درایه بردار \underline{X} ، داده مربوط به یک گره حسگر است. به‌طور معمول، بردارهای موجود در شبکه‌های حسگر بی‌سیم تنک نیستند، اما یک نمایش تنک بر اساس برخی از پایه‌های فشرده‌سازی $\Psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N]$ به صورت $\underline{X} = \underline{\Psi} \underline{\alpha}$ دارند. در این رابطه، ψ_i بردارهای ستونی ماتریس $\underline{\Psi}$ و $\underline{\alpha} = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N]^T$ معادل تنک بردار اصلی \underline{X} می‌باشد که α_i ‌ها نمونه‌های بردار $\underline{\alpha}$ را نمایش می‌دهند. اگر حداکثر k ($k \ll N$) درایه غیر صفر در بردار $\underline{\alpha}$ وجود داشته باشد، بردار \underline{X} در حوزه $\underline{\Psi}$ ، اصطلاحاً k -تنک نامیده می‌شود. اگر k کوچک باشد، به‌جای ارسال N داده به گره چاهک، می‌توان تعداد کوچکی از تصاویر^{۱۸} بردار \underline{X} را به گره چاهک ارسال کرد. این تصاویر به صورت $\underline{Y} = \underline{\Phi} \underline{X}$ می‌باشند که $\underline{\Phi}$ یک ماتریس تصادفی $M \times N$ ($M \ll N$) برداری از M تصویر می‌باشد. برای بازسازی کامل بردار \underline{X} از بردار \underline{Y} باید بردارهای سطری ماتریس $\underline{\Phi}$ ناهم‌دوسی^{۱۹} زیادی با پایه فشرده‌سازی $\underline{\Psi}$ داشته باشند و یا این که شرایط RIP^{۲۰} برای ماتریس $\underline{\Theta} = \underline{\Phi} \underline{\Psi}$ برقرار باشد. ماتریس $\underline{\Phi}$

۵- تحلیل و بررسی اندازه خوشه بهینه^{۲۶}

در این بخش، با توجه به مدل در نظر گرفته شده در این مقاله، ابتدا مختصراً به تشریح ساختار ارائه شده در مرجع [۱۸] خواهیم پرداخت. شکل (۳) را در نظر بگیرید. شبکه حسگر به نواحی کوچکی با ابعاد $a \times a$ واحد تقسیم شده است. طول هر ناحیه برابر با $\frac{r}{\sqrt{2}}$ فرض شده است. لذا، هر دو گره در یک ناحیه می‌توانند با یکدیگر پیوند مستقیم داشته باشند. در این شکل، مربع‌های با ابعاد $Da \times Da$ واحد، خوشه‌ها را نمایش می‌دهند.



شکل (۲): نمایش ارسال‌های درون خوشه‌ای
Fig. (2): Intracluster transmissions diagram



شکل (۳): تقسیم‌بندی شبکه حسگر به نواحی با ابعاد $a \times a$ واحد [۱۸]
Fig. (3): Spacing of sensor network in partitions with size $a \times a$ unit [18]

لذا، همه گره‌های موجود در مربعی با ابعاد $Da \times Da$ واحد یک خوشه را شکل می‌دهند. D به صورت پرش‌های انجام شده برای ارسال داده از یک سرخوشه به سرخوشه دیگر فرض شده است. مقدار D در بازه $[1, D_{MAX}]$ واقع شده است که بعداً از طریق تحلیل‌های ارائه شده تعیین خواهد شد. بزرگترین مقدار قابل قبول برای D_{MAX} به ترتیب زیر است [۱۸]:

$$D_{MAX} = \sqrt{\frac{N}{\lambda a^2}} \quad (7)$$

از آنجایی که هر خوشه به طور متوسط دارای $\lambda D^2 a^2$ گره می‌باشد، لذا، شبکه حسگر به‌طور متوسط مشتمل بر $\frac{N}{\lambda D^2 a^2}$ خوشه خواهد بود.

به منظور بررسی دقیق‌تر هر خوشه، شکل (۴) را در نظر بگیرید. فرض بر آن است که با هدف حداقل‌سازی تعداد ارسال‌ها در جمع‌آوری داده، سرخوشه‌ها در مرکز نواحی مربوطه قرار گرفته باشند. لذا، هر گره (در

در M دور به گره چاهک ارسال می‌شوند. در هر ارسال، تصویر هر سرخوشه به سرخوشه همسایه آن از طریق تعدادی از گره‌های واسطه در طول درخت مسیریابی ارسال می‌شود. ماتریس Φ را می‌توان به زیر ماتریس‌هایی تجزیه نمود، به طوری که هر یک برای یک خوشه در نظر گرفته شود. برای روشن‌تر شدن مسئله خوشه نام را در نظر بگیرید. در این خوشه Φ^{H_i} ، CH_i و x^{H_i} به ترتیب بیانگر زیر ماتریس مربوطه، سرخوشه و بردار داده خوشه می‌باشند. سرخوشه نام تصاویر مربوط به بردار داده x^{H_i} را به صورت $\Phi^{H_i} x^{H_i}$ محاسبه می‌کند. سرخوشه نام، M تصویر از داده‌های خوشه‌اش را با استفاده از نمونه‌برداری فشرده تولید می‌کند. سپس، آن‌ها را در M دور و از طریق درخت مسیریابی ذکر شده به گره چاهک می‌فرستد. با توجه به اینکه شکل (۱) شامل چهار خوشه می‌باشد، بردار داده X می‌تواند به صورت $[x^{H_1} x^{H_2} x^{H_3} x^{H_4}]^T$ و ماتریس Φ می‌تواند به صورت $[\Phi^{H_1} \Phi^{H_2} \Phi^{H_3} \Phi^{H_4}]$ نوشته شود. تصاویر داده‌های شبکه برابر با مجموع تصاویر تولید شده از خوشه‌ها می‌باشد که در زیر نشان داده شده است.

$$Y = \Phi X \quad (4)$$

$$= [\Phi^{H_1} \Phi^{H_2} \Phi^{H_3} \Phi^{H_4}] [x^{H_1} x^{H_2} x^{H_3} x^{H_4}]^T \quad (5)$$

$$= \sum_{i=1}^4 \Phi^{H_i} x^{H_i} \quad (6)$$

بنابراین، در هر دور، سرخوشه تصویر خودش و تصاویر دریافت کرده از سرخوشه‌های فرزندش را جمع‌آوری می‌کند و آن را از طریق درخت مسیریابی به گره چاهک ارسال می‌کند. زمانی که گره چاهک همه M دور تصاویر را از سرخوشه‌ها دریافت کرد، داده اصلی همه گره‌های حسگر بازیابی می‌شود.

بر این اساس، دو نوع ارسال در روش خوشه‌بندی به همراه نمونه‌برداری فشرده پیوندی مطرح می‌شود. ارسال‌های درون خوشه‌ای^{۲۳} که از تئوری نمونه‌برداری فشرده استفاده نمی‌کنند و ارسال‌های بین خوشه‌ای^{۲۴} که از تئوری نمونه‌برداری فشرده استفاده می‌کنند. به منظور درک بهتر ارسال‌های درون خوشه‌ای، شکل (۲) را در نظر بگیرید. در این شکل، ۱۲ گره از طریق یک درخت کوتاه‌ترین مسیر^{۲۵} به سرخوشه (CH) متصل شده‌اند. اعداد نوشته شده بر روی شاخه‌های درخت، تعداد بسته‌های داده ارسالی می‌باشند. به عنوان مثال، پیوند اتصال دهنده گره‌های ۴ و ۵ را در نظر بگیرید. گره‌های ۱، ۲ و ۳ هر کدام یک بسته داده را به گره ۴ ارسال می‌کنند. گره ۴، بسته‌های دریافت شده و یک بسته داده خودش را (جمعاً ۴ بسته) به گره ۵ ارسال می‌کند. در نهایت ۱۲ بسته داده از طریق گره ۵ به سرخوشه ارسال می‌شود.

با توجه به مدل رادیویی مرتبه اول برای مصرف انرژی [۵]، در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، کاهش حجم داده ارسالی در شبکه، میزان مصرف انرژی برای ارسال و دریافت پیام را نیز کاهش می‌دهد. در نتیجه منجر به افزایش طول عمر شبکه حسگر بی‌سیم می‌شود.

همان طور که در شکل (۳) نشان داده شده است فرض بر آن است که در درخت مسیریابی ساخته شده: (۱) همه سرخوشه‌ها داده‌هایشان را به سرخوشه سمت چپشان ارسال می‌کنند و این کار تا زمانی که به سرخوشه‌های ستون آخر برسد ادامه می‌یابد. (۲) برای خوشه‌هایی که در ستون آخر قرار گرفته‌اند، سرخوشه‌ها داده را به خوشه‌های پایین خود ارسال می‌کنند تا در نهایت به خوشه‌ای که در پایین این ستون قرار گرفته است برسد. (۳) سرخوشه‌ای که در نقطه Q قرار گرفته، داده را به گره چاهک ارسال می‌کند.

برای ارسال یک تصویر از سرخوشه‌اش به سرخوشه همسایه D پرش انجام می‌شود. تقریباً $\frac{D}{2}$ پرش برای ارسال یک تصویر از سرخوشه در نقطه Q به گره چاهک انجام می‌شود. تعداد کل ارسال‌های بین خوشه‌ای با در نظر گرفتن تئوری نمونه‌برداری فشرده برای M دور به شکل زیر بیان می‌شود [۱۸]:

$$T_{inter} = \left(\frac{N}{\lambda D^2 a^2} - 1\right) DM + \frac{D}{2} M \quad (11)$$

$$= \frac{NM}{\lambda a^2} \frac{1}{D} - \frac{M}{2} D. \quad (12)$$

هدف، حداقل سازی تعداد کل ارسال‌های روش نمونه‌برداری فشرده پیوندی در ساختار خوشه‌ای (T) می‌باشد که مجموع ارسال‌های درون خوشه‌ای و ارسال‌های بین خوشه‌ای است.

$$T = T_{intra} + T_{inter} \quad (13)$$

$$= \left(\frac{N}{3} - \frac{M}{2}\right) D + \left(\frac{NM}{\lambda a^2} - \frac{N}{3}\right) \frac{1}{D} \quad (14)$$

$$= \frac{N}{3} \left(1 - \frac{3M}{2N}\right) D + \frac{N}{3} \left(\frac{3M}{\lambda a^2} - 1\right) \frac{1}{D} \quad (15)$$

$$= c_1 D + c_2 \frac{1}{D}. \quad (16)$$

با توجه به رابطه ۱۶، T تابعی از پارامتر D می‌باشد، که D نیز در بازه $[1, D_{MAX}]$ واقع شده است.

با Mهای مختلف، مقدار بهینه D به منظور حداقل سازی T متفاوت

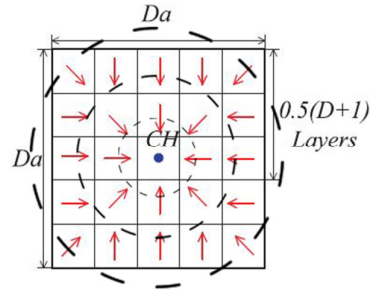
است. زمانی که M کمتر از $\frac{2}{9}N$ می‌باشد، مقدار بهینه D^* به رابطه

(۱۷) محاسبه می‌شود:

$$D^* = \begin{cases} \sqrt{\frac{3M}{\lambda a^2} - 1}, & M < \frac{2}{9}N, \\ D_{MAX}, & \frac{2}{9}N \leq M \leq N. \end{cases} \quad (17)$$

تعداد بهینه گره‌های هر خوشه برای روش نمونه‌برداری فشرده پیوندی در ساختار خوشه‌ای از رابطه زیر به دست می‌آید:

لایه اول) فقط با یک پرش می‌تواند داده‌هایش را به سرخوشه ارسال کند. گره‌های لایه بعدی دو پرش را برای رسیدن به سرخوشه انجام می‌دهند، و گره‌های لایه سوم نواحی، سه پرش به دور از سرخوشه می‌باشند. لایه‌های مطرح شده در شکل (۴) با دایره‌هایی نشان داده شده است. در حالت کلی، گره‌ها در h امین لایه، h پرش برای ارسال داده به سرخوشه انجام می‌دهند. تعداد نواحی در h امین لایه، $8(h-1)$ برای $h \geq 2$ می‌باشد. به دلیل اینکه گره‌های حسگر به صورت یکنواخت و با چگالی λ توزیع شده‌اند، تعداد گره‌ها در هر ناحیه λa^2 می‌باشد. لذا، تعداد ارسال‌ها برای همه گره‌های حسگر درون یک خوشه (NT) برابر است با [۱۸]:



شکل (۴): نمایش ارسال‌های درون خوشه‌ای، با فرض اینکه سرخوشه در مرکز قرار گرفته است [۱۸]

Fig. (4): Intracluster transmissions diagram, with supposing that the cluster head (CH) is located at the center

$$NT = \left(1 + \sum_{h=2}^{D+1} 8(h-1)h\right) \lambda a^2 = \left(\frac{D^3 - D}{3} + D^2\right) \lambda a^2. \quad (8)$$

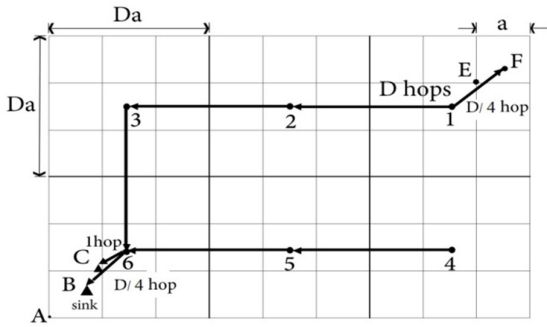
از آنجایی که تعداد کل خوشه‌ها $\frac{N}{\lambda D^2 a^2}$ می‌باشد، کران بالای تعداد ارسال‌های درون خوشه‌ای، بدون در نظر گرفتن نظریه نمونه‌برداری فشرده به شکل زیر بیان می‌شود [۱۸]:

$$\left(\frac{D^3 - D}{3} + D^2\right) \lambda a^2 \frac{N}{\lambda D^2 a^2} = \left(\frac{D}{3} - \frac{1}{3D} + 1\right) N. \quad (9)$$

همچنین، برای حصول کران پایین تعداد ارسال‌های درون خوشه‌ای، نواحی کوچک درون یک مربع با ابعاد $Da \times Da$ واحد، که در شکل (۴) نشان داده شده است را در نظر بگیرید. گره‌های درون لایه بعدی (اطراف ناحیه مرکز که شامل سرخوشه نیز می‌باشد)، برای ارسال داده به سرخوشه یک پرش نیاز دارند. گره‌های لایه سوم نواحی در فاصله دو پرشی از سرخوشه می‌باشند. لذا، گره‌های موجود در لایه h ام برای ارسال داده به سرخوشه $(h-1)$ پرش انجام می‌دهند. هر گره یک پرش کمتر از تحلیل کران بالای تعداد ارسال‌های درون خوشه‌ای انجام می‌دهد. بنابراین، کران پایین تعداد ارسال‌های درون خوشه‌ای به اندازه N ، کمتر از کران بالای آن می‌باشد که به صورت زیر است [۱۸]:

$$T_{intra} = \left(\frac{D}{3} - \frac{1}{3D}\right) N. \quad (10)$$

چاهک انجام می‌دهد. همچنین، D پرش برای ارسال یک تصویر از سرخوشه مربوطه به سرخوشه همسایه لازم می‌باشد. وجود پیوند بین دو گره به این معنی است که آن‌ها در برد مخابراتی یکدیگر قرار دارند و می‌توانند به‌طور مستقیم با هم در ارتباط باشند. بسته داده یکی از گره‌ها یک پرش را طی کرده و به‌دست دیگری می‌رسد. به‌طور مثال، دو جفت گره که فاصله هر کدام از آن‌ها یک پرش می‌باشد را در نظر بگیرید. اما فاصله اقلیدسی یک جفت پنج متر و فاصله اقلیدسی دیگری ده متر می‌باشد. با توجه به نکات مطرح شده، در همه حالت‌های بخش ۶، برای ترسیم درخت مسیریابی، پرش (و نه فاصله اقلیدسی) مد نظر است.



شکل (۵): نمایش درخت مسیریابی در شبکه حسگر تقسیم‌شده به نواحی کوچک با ابعاد $a \times a$ واحد

Fig. (5): Routing tree shown in divided sensor network to small partitions with size $a \times a$ unit

از آنجایی که در کلیه حالت‌های اول تا پنجم، ساختار خوشه‌ها و سرخوشه‌ها ثابت فرض می‌شوند، تعداد ارسال‌های درون خوشه‌ای تغییر نخواهد کرد. لذا، تعداد ارسال‌های درون خوشه‌ای از همان رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

هر گره واسطه روی درخت مسیریابی M ارسال را انجام می‌دهد. به دلیل اینکه تعداد خوشه‌ها در شبکه حسگر برابر با $\frac{N}{\lambda D^2 a^2}$ می‌باشد، تعداد کل ارسال‌های بین خوشه‌ای با در نظر گرفتن نمونه‌برداری فشرده برای M دور به صورت زیر مدل می‌شود:

$$T_{inter} = \left(\frac{N}{\lambda D^2 a^2} - 1 \right) DM + \frac{D}{4} M \quad (20)$$

$$= \frac{NM}{\lambda a^2} \frac{1}{D} - \frac{3M}{4} D. \quad (21)$$

هدف، حداقل سازی تعداد کل ارسال‌ها (T) یعنی مجموع تعداد ارسال‌های درون خوشه‌ای و تعداد ارسال‌های بین خوشه‌ای می‌باشد. لذا، (با توجه به رابطه (۱۳)) می‌توان نوشت:

$$T = T_{intra} + T_{inter} = \left(\frac{N}{3} - \frac{3M}{4} \right) D + \left(\frac{NM}{\lambda a^2} - \frac{N}{3} \right) \frac{1}{D} \quad (22)$$

$$N_c^* = \lambda (D^* a)^2 = \begin{cases} \frac{3M - \lambda a^2}{1 - \frac{3M}{2N}}, & M < \frac{2}{9} N, \\ N, & \frac{2}{9} N \leq M \leq N. \end{cases} \quad (18)$$

اگر N_c^* گره در هر خوشه‌ای وجود داشته باشد، تعداد کل ارسال‌ها در روش خوشه‌بندی با نمونه‌برداری فشرده پیوندی حداقل می‌شود. تعداد بهینه خوشه‌ها در سیستم به شکل زیر بیان می‌شود:

$$C = \left[\frac{N}{N_c^*} \right]. \quad (19)$$

۶- اثر محل گره چاهک بر تعداد ارسال‌ها

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، یکی از مهم‌ترین چالش‌های مطرح در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، افزایش طول عمر شبکه است. در این راستا، ایده‌های متنوعی ارائه شده که از جمله آن‌ها می‌توان به مسئله کنترل موقعیت گره چاهک اشاره نمود. از آنجایی که هدف نهایی تحویل داده‌های حس شده به این گره می‌باشد، محل آن نقش به‌سزایی در کنترل توازن بار و افزایش طول عمر شبکه خواهد داشت. اهمیت این مسئله تا حدی است که اخیراً از گره‌های چاهک متحرک در شبکه‌های حسگر بی‌سیم استفاده می‌شود [۲۳]. حال، در این بخش در نظر داریم با تعمیم کارهای قبلی، ضمن فرموله کردن مسئله و ارائه آنالیز مربوطه، اثر محل گره چاهک بر تعداد ارسال‌ها و در نتیجه طول عمر شبکه را بررسی نماییم. بدین منظور، مسئله را در پنج حالت مختلف بررسی خواهیم نمود. در نظر گرفتن حالت‌های مطرح شده جهت پیدا کردن بهترین محل برای گره چاهک از نظر تعداد ارسال‌ها و میزان مصرف انرژی در شبکه حسگر است. لذا، جایگاه‌های مختلف این گره (نقاط حساس‌تر) را به‌طور گسسته بررسی خواهیم نمود. در کلیه این حالت‌ها شبکه حسگر بی‌سیم را خوشه‌بندی خواهیم کرد. هر خوشه دارای یک سرخوشه می‌باشد. همچنین، به درخت مسیریابی که تصاویر تولید شده در سرخوشه‌ها را به دست گره چاهک می‌رساند، نیازمندیم. هرچه این درخت مشتمل بر تعداد پرش‌های کمتری باشد، مسلماً تعداد ارسال‌های بین خوشه‌ای کاهش می‌یابد. با توجه به مدل مصرف انرژی رادیویی مرتبه اول [۵]، با کاهش حجم داده‌های ارسال در شبکه، میزان مصرف انرژی نیز کاهش خواهد یافت. لذا، سعی بر آن داریم که در کلیه حالت‌ها، درختان مسیریابی، به ترتیبی در نظر گرفته شوند که شامل تعداد پرش‌های کمتری باشند.

۶-۱- حالت اول

در این‌جا، فرض بر آن است که درخت مسیریابی همچون شکل (۵) ساخته شده باشد؛ به طوری که جایگاه گره چاهک از نقطه A با مختصات $(0,0)$ به نقطه B تغییر کرده است. در واقع، نقطه‌ای است که تصویر سرخوشه خوشه ششم، $\frac{D}{4}$ پرش را برای ارسال به گره

$$T_{inter} = \left(\frac{N}{\lambda D^2 a^2} - 1\right)DM + M \quad (30)$$

$$= \frac{NM}{\lambda a^2} \frac{1}{D} - DM + M. \quad (31)$$

لذا، برای تعداد کل ارسال‌ها (T) می‌توان نوشت:

$$T = T_{intra} + T_{inter} \\ = \left(\frac{N}{3} - M\right)D + \left(\frac{NM}{\lambda a^2} - \frac{N}{3}\right)\frac{1}{D} + M \quad (32)$$

$$= \frac{N}{3}\left(1 - \frac{3M}{N}\right)D + \frac{N}{3}\left(\frac{3M}{\lambda a^2} - 1\right)\frac{1}{D} + M. \quad (33)$$

بنابراین، مقدار بهینه D^* و تعداد بهینه گره‌های هر خوشه (N_c^*) به شکل زیر محاسبه می‌شوند:

$$D^* = \begin{cases} \sqrt{\frac{\frac{3M}{\lambda a^2} - 1}{1 - \frac{3M}{N}}}, & M < \frac{1}{6}N, \\ D_{MAX}, & \frac{1}{6}N \leq M \leq N. \end{cases} \quad (34)$$

$$N_c^* = \lambda(D^*a)^2 = \begin{cases} \frac{3M - \lambda a^2}{1 - \frac{3M}{N}}, & M < \frac{1}{6}N, \\ N, & \frac{1}{6}N \leq M \leq N. \end{cases} \quad (35)$$

در اینجا ذکر این نکته ضروری است که اگر گره چاهک در شکل (۵) به نقطه E انتقال یابد، باز هم روابط به دست آمده در این بخش صادق هستند. قطعاً نقطه E در جایگاهی قرار می‌گیرد که داده سرخوشه خوشه یک تنها یک پرش را تا آن طی می‌کند.

۳-۶- حالت سوم

درخت مسیریابی نمایش داده شده در شکل (۶) را در نظر بگیرید. فرض کنید گره چاهک در نقطه D واقع باشد. سرخوشه خوشه‌های یک، سه، چهار و شش با طی D پرش، داده خود را به دست سرخوشه خوشه مجاور می‌رسانند. انتخاب نقطه D به گونه‌ای در شبکه است که

داده سرخوشه خوشه‌های دو و پنج، پس از طی $\frac{D}{2}$ پرش به این نقطه برسد. بر این اساس، تعداد کل ارسال‌های بین خوشه‌ای با در نظر گرفتن نمونه برداری فشرده برای M دور به صورت زیر مدل می‌شود:

$$T_{inter} = \left(\frac{N}{\lambda D^2 a^2} - 2\right)DM + 2\frac{D}{2}M \quad (36)$$

$$= \frac{NM}{\lambda a^2} \frac{1}{D} - DM. \quad (37)$$

لذا، می‌توان نوشت:

$$T = T_{intra} + T_{inter} \\ = \left(\frac{N}{3} - M\right)D + \left(\frac{NM}{\lambda a^2} - \frac{N}{3}\right)\frac{1}{D} \quad (38)$$

$$= \frac{N}{3}\left(1 - \frac{9M}{4N}\right)D + \frac{N}{3}\left(\frac{3M}{\lambda a^2} - 1\right)\frac{1}{D} \quad (23)$$

$$= e_1 D + e_2 \frac{1}{D}. \quad (24)$$

همان طور که مشخص است تعداد کل ارسال‌ها (T) تابعی از D می‌باشد. تعداد کل گره‌ها در یک ناحیه کوچک برابر با λa^2 است. بنابراین، زمانی که تعداد گره‌ها در یک ناحیه کوچک، کوچکتر از 3M باشد، خیلی بزرگتر از ۱ می‌گردد. لذا، عبارت $\left(\frac{3M}{\lambda a^2} - 1\right)$ تقریباً برابر با $\frac{3M}{\lambda a^2}$ می‌شود.

طبیعی است که بسته به مقادیر متفاوت M، مقدار بهینه D به منظور حداقل سازی T متفاوت است. پس، D^* با توجه به رابطه (۲۸) به دست می‌آید:

$$\frac{dT}{dD} = e_1 - \frac{e_2}{D^2} = 0, \quad (25)$$

$$D \left| \frac{dT}{dD} = 0 \right. = \sqrt{\frac{e_2}{e_1}} = \sqrt{\frac{\frac{3M}{\lambda a^2} - 1}{1 - \frac{9M}{4N}}}, \quad (26)$$

$$D \left| \frac{dT}{dD} = 0 \right. = D_{MAX} \Rightarrow M = \frac{4}{21}N. \quad (27)$$

$$D^* = \begin{cases} \sqrt{\frac{\frac{3M}{\lambda a^2} - 1}{1 - \frac{9M}{4N}}}, & M < \frac{4}{21}N, \\ D_{MAX}, & \frac{4}{21}N \leq M \leq N. \end{cases} \quad (28)$$

$$N_c^* = \lambda(D^*a)^2 = \begin{cases} \frac{3M - \lambda a^2}{1 - \frac{9M}{4N}}, & M < \frac{4}{21}N, \\ N, & \frac{4}{21}N \leq M \leq N. \end{cases} \quad (29)$$

اگر N_c^* گره در هر خوشه‌ای وجود داشته باشد، تعداد کل ارسال‌ها در روش خوشه‌بندی با نمونه برداری فشرده پیوندی حداقل می‌شود. شایان ذکر است، اگر گره چاهک از نقطه A به نقطه F نیز انتقال یابد، روابط به دست آمده در این بخش همچنان صادق است. البته درخت مسیریابی می‌باید قرینه شود.

۲-۶- حالت دوم

حال، فرض کنید گره چاهک در شکل (۵) به نقطه C منتقل شود. C نقطه‌ای است که داده سرخوشه خوشه ششم، یک پرش را برای ارسال به گره چاهک طی می‌کند. در این صورت، تعداد کل ارسال‌های بین خوشه‌ای به صورت زیر مدل می‌شود:

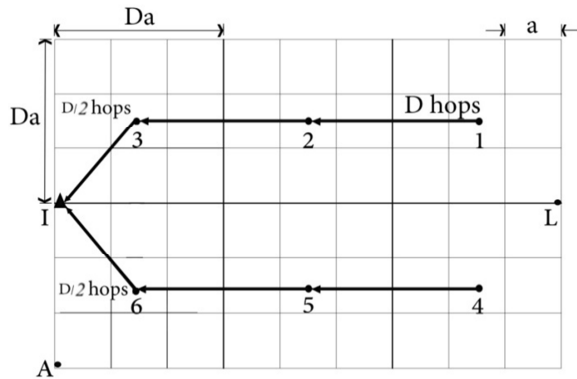
گره چاهک در مبدأ مختصات قرار گرفته نسبت به زمانی که گره چاهک در نقطه D قرار گرفته، شده است. حال، دو شکل (۳) و (۶) را در نظر بگیرید. این نکته به وضوح دیده می شود که درخت مسیریابی ترسیم شده در شکل (۳) پرش های بیشتری را نسبت به درخت شکل (۶) شامل می شود. تعداد ارسال های بین خوشه های در حالتی که گره چاهک در مبدأ مختصات می باشد نسبت به حالتی که این گره در نقطه D واقع شده، بیشتر است. با توجه به مدل مصرف انرژی رادیویی مرتبه اول، افزایش حجم داده ارسالی در شکل (۳) (گره چاهک در مبدأ مختصات) نسبت به شکل (۶) (گره چاهک در نقطه D) منجر به افزایش میزان مصرف انرژی می شود. لذا، طول عمر شبکه کاهش می یابد.

۴-۶- حالت چهارم

در این بخش، مطابق شکل (۷)، گره چاهک به نقطه I منتقل شده است. نقطه I در مکانی واقع شده که داده سرخوشه خوشه های سه و شش، $\frac{D}{2}$ پرش را طی می کند تا به این نقطه برسد. تعداد کل ارسال های بین خوشه های به صورت زیر مدل می شود (مشابه با روابط ۳۶ و ۳۷):

$$T_{inter} = \left(\frac{N}{\lambda D^2 a^2} - 2\right)DM + 2\frac{D}{2}M$$

$$= \frac{NM}{\lambda a^2} \frac{1}{D} - DM.$$



شکل (۷): نمایش درخت مسیریابی در شبکه حسگر تقسیم شده به نواحی کوچک با ابعاد $a \times a$ واحد در حالت چهارم
Fig. (7): Routing tree shown in divided sensor network to small partitions with size $a \times a$ unit in fourth state

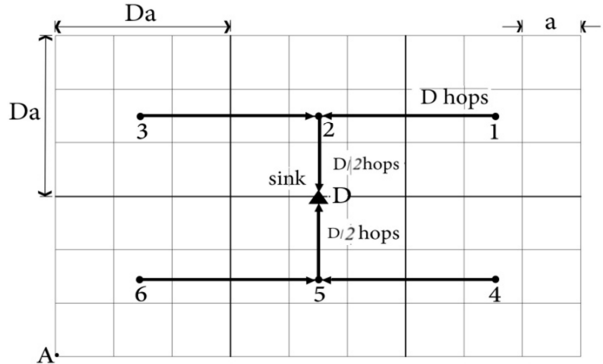
لذا، تعداد کل ارسال ها (T) به صورت زیر (مشابه با روابط ۱۳، ۳۸، ۳۹ و ۴۰) می باشد:

$$= \frac{N}{3} \left(1 - \frac{3M}{N}\right)D + \frac{N}{3} \left(\frac{3M}{\lambda a^2} - 1\right) \frac{1}{D} \quad (39)$$

$$= f_1 D + f_2 \frac{1}{D}. \quad (40)$$

حال، مقادیر D^* و N_c^* مطابق روابط زیر محاسبه می شوند:

$$\frac{dT}{dD} = f_1 - \frac{f_2}{D^2} = 0, \quad (41)$$



شکل (۶): نمایش درخت مسیریابی در شبکه حسگر تقسیم شده به نواحی کوچک با ابعاد $a \times a$ واحد در حالت سوم
Fig. (6): Routing tree shown in divided sensor network to small partitions with size $a \times a$ unit in third state

$$D \left| \frac{dT}{dD} = 0 \right. = \sqrt{\frac{f_2}{f_1}} = \sqrt{\frac{\frac{3M}{\lambda a^2} - 1}{1 - \frac{3M}{N}}}. \quad (42)$$

$$D \left| \frac{dT}{dD} = 0 \right. = D_{MAX} \Rightarrow M = \frac{1}{6} N. \quad (43)$$

$$D^* = \begin{cases} \sqrt{\frac{\frac{3M}{\lambda a^2} - 1}{1 - \frac{3M}{N}}}, & M < \frac{1}{6} N, \\ D_{MAX}, & \frac{1}{6} N \leq M \leq N. \end{cases}$$

$$N_c^* = \lambda (D^* a)^2 = \begin{cases} \frac{3M - \lambda a^2}{1 - \frac{3M}{N}}, & M < \frac{1}{6} N, \\ N, & \frac{1}{6} N \leq M \leq N. \end{cases}$$

D^* و N_c^* به دست آمده به ترتیب مشابه روابط (۳۴) و (۳۵) می باشند.

اگر روابط ۱۵ و ۱۶ را به ترتیب با روابط ۳۹ و ۴۰ مقایسه کنیم، در می یابیم که ضریب c_1 در رابطه ۱۶ بزرگتر از ضریب f_1 در رابطه ۴۰ می باشد. لذا، این مسئله منجر به افزایش تعداد ارسال ها در حالتی که

$$\begin{aligned} T &= T_{intra} + T_{inter} \\ &= \left(\frac{N}{3} - \frac{M}{2}\right)D + \left(\frac{NM}{\lambda a^2} - \frac{N}{3}\right)\frac{1}{D} \\ &= \frac{N}{3}\left(1 - \frac{3M}{2N}\right)D + \frac{N}{3}\left(\frac{3M}{\lambda a^2} - 1\right)\frac{1}{D} \\ &= c_1 D + c_2 \frac{1}{D}. \end{aligned}$$

D^* و N_c^* را می‌توان به ترتیب از روابط ۱۷ و ۱۸ به دست آورد. حال، فرض کنید گره چاهک به نقطه M منتقل شود. نقطه‌ای است که داده سرخوشه خوشه دو، $\frac{D}{2}$ پرش را تا آن طی خواهد کرد. در این صورت، باز هم روابط به دست آمده برای حالت پنجم برقرار است. در این بخش، برای تعداد کل ارسال‌های بین خوشه‌های دو رابطه به دست آورده شده است. رابطه دوم ($T_{inter} = \frac{NM}{\lambda a^2} \frac{1}{D} - \frac{M}{2} D$) را در نظر بگیرید. با مقایسه این رابطه و رابطه (۳۷) درمی‌یابیم که تعداد ارسال‌های بین خوشه‌های برای حالت پنجم بیشتر از حالت سوم می‌باشد. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، تعداد ارسال‌های درون خوشه‌های برای کلیه حالت‌ها ثابت و از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود. لذا، تعداد کل ارسال‌ها برای حالت پنجم بیشتر از حالت سوم می‌باشد. همچنین، مصرف انرژی شبکه برای حالت سوم (گره چاهک در نقطه D) کمتر از حالت پنجم (گره چاهک در نقطه H) می‌باشد.

۷- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، با هدف بررسی بهتر تئوری توصیف شده سناریوهای مختلفی را در نظر می‌گیریم. در همه آنها، گره‌های حسگر به صورت تصادفی در یک شبکه حسگر مستطیلی شکل با ابعاد 20×10 واحد مربع توزیع شده‌اند. طول ضلع هر ناحیه کوچک (a) برابر با ۱ واحد در نظر گرفته شده است. نسبت فشرده‌سازی $\rho = \frac{N}{M}$ برابر با ۱۰ می‌باشد.

در سناریوی اول، تعداد گره‌ها برابر با ۱۰۰۰ فرض می‌شود. تعداد خوشه‌ها (C) از ۱ تا ۱۵ خوشه تغییر می‌کند. با توجه به مدل تشریح شده در بخش ۵، $N_c = \frac{N}{C} = \lambda (Da)^2$ است. لذا، برای مقادیر متفاوت C یا N_c ، D از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$D = \sqrt{\frac{N_c}{\lambda a^2}} = \sqrt{\frac{N}{\lambda a^2 C}}. \quad (44)$$

شکل (۹) تغییرات تعداد کل ارسال‌ها را بر حسب تغییر اندازه خوشه نشان می‌دهد. با افزایش اندازه خوشه، تعداد کل ارسال‌ها ابتدا کاهش یافته ولی از یک حد آستانه‌ای، افزایش آن منجر به افزایش تعداد کل ارسال‌ها خواهد شد. با توجه به رابطه (۴۴) و ذکر این نکته که λ و a ثابت می‌باشند، اگر اندازه خوشه (N_c) افزایش یابد، D نیز افزایش می‌یابد. حال، روابط به دست آمده برای تعداد کل ارسال‌ها (T)

$$\begin{aligned} T &= T_{intra} + T_{inter} \\ &= \left(\frac{N}{3} - M\right)D + \left(\frac{NM}{\lambda a^2} - \frac{N}{3}\right)\frac{1}{D} \\ &= \frac{N}{3}\left(1 - \frac{3M}{N}\right)D + \frac{N}{3}\left(\frac{3M}{\lambda a^2} - 1\right)\frac{1}{D} \\ &= f_1 D + f_2 \frac{1}{D}. \end{aligned}$$

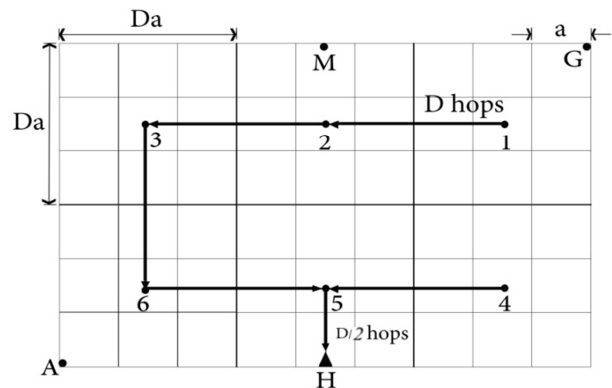
با توجه به تشابه روابط به دست آمده برای تعداد کل ارسال‌ها در این حالت با روابط به دست آمده در حالت سوم، D^* و N_c^* به ترتیب از روابط ۳۴ و ۳۵ محاسبه می‌شوند. شایان ذکر است با توجه به شکل (۷)، اگر گره چاهک به نقطه L منتقل شود، روابط به دست آمده در این بخش همچنان برقرار است.

۶-۵- حالت پنجم

درخت مسیریابی ترسیم شده در شکل (۸) را در نظر بگیرید. گره چاهک در نقطه H واقع شده است. نقطه‌ای است که داده سرخوشه خوشه پنج، $\frac{D}{2}$ پرش را تا آن طی می‌کند. با توجه به روابط زیر (مشابه روابط ۱۱ و ۱۲) می‌توان تعداد کل ارسال‌های بین خوشه‌های را به دست آورد.

$$\begin{aligned} T_{inter} &= \left(\frac{N}{\lambda D^2 a^2} - 1\right)DM + \frac{D}{2}M \\ &= \frac{NM}{\lambda a^2} \frac{1}{D} - \frac{M}{2} D. \end{aligned}$$

تعداد کل ارسال‌ها (T) به ترتیب زیر (مشابه روابط ۱۲، ۱۴، ۱۵ و ۱۶) محاسبه می‌شود:

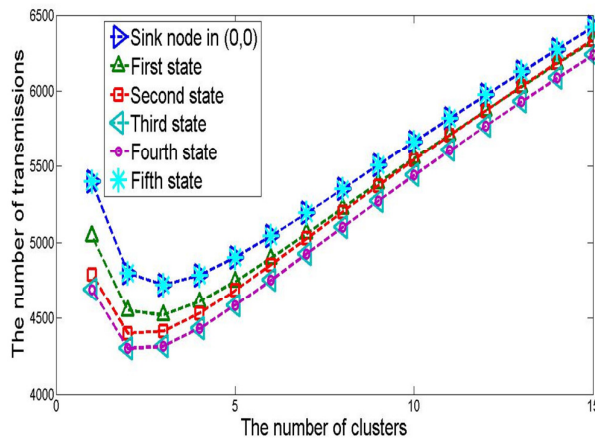


شکل (۸): نمایش درخت مسیریابی در شبکه حسگر تقسیم‌شده به نواحی کوچک با ابعاد $a \times a$ واحد در حالت پنجم

Fig. (8): Routing tree shown in divided sensor network to small partitions with size $a \times a$ unit in fifth state

بیشتر شود، افزایش تعداد ارسالها را به دنبال خواهد داشت. در اینجا نیز منحنی‌های رسم شده مبین آن است که در صورت انتقال گره چاهک از مبدأ مختصات به نقطه D (حالت سوم) تعداد ارسالها نسبت به حالات دیگر کاهش خواهد داشت.

در سناریوی دوم، با فرض ۱۰۰۰ گره، تعداد خوشه‌ها از ۱ تا ۴ خوشه تغییر می‌کند. شکل (۱۱)، تغییرات تعداد ارسالهای شبکه حسگر را به ازاء تغییر مکان گره چاهک نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، هر چه مکان گره چاهک از مبدأ مختصات (نقطه A)، به نقطه D (حدوداً در مرکز شبکه حسگر) نزدیک شود، تعداد ارسالها کاهش خواهد یافت. بعد از نقطه D، هر چه گره چاهک از مرکز شبکه دور شده، تعداد ارسالها افزایش یافته است. منحنی‌های شکل (۱۱)، برای مقادیر متفاوت تعداد خوشه‌ها ترسیم شده‌اند. در همه آنها اگر گره چاهک در نقطه D (حدوداً در مرکز شبکه) قرار گیرد، کمترین تعداد ارسال را خواهیم داشت.

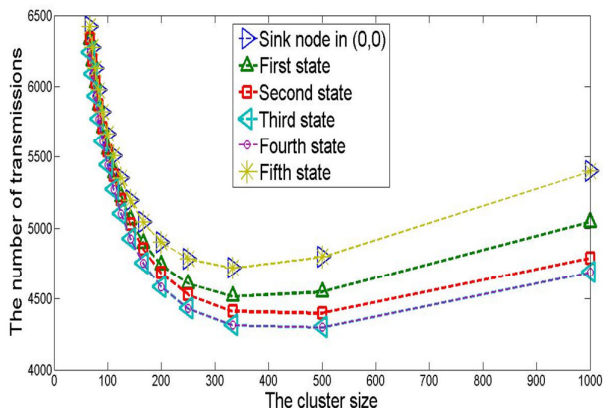


شکل (۱۰): تعداد ارسالها به ازاء مقادیر مختلف تعداد خوشه‌ها
Fig. (10): Number of transmissions for different amounts of number of clusters

در سناریوی سوم، تعداد گره‌ها برابر با ۴۰۰ و تعداد خوشه‌ها از ۱ تا ۵ خوشه تغییر می‌کند. در شکل‌های (۱۲)، (۱۳) و (۱۴)، منحنی‌های تعداد ارسالها به ازاء تغییر تعداد خوشه‌ها ترسیم شده است. همان‌طور که در این اشکال قابل مشاهده است، یک منحنی مربوط به تحلیل ارائه شده توسط محققان مرجع [۱۸] می‌باشد و دیگری مربوط به روابط به دست آمده از تحلیل‌های بخش ۶ است. در هر کدام از شکل‌ها، گره چاهک در مکان خاصی قرار گرفته است. شایان ذکر است که منحنی ترسیم شده بر اساس تحلیل ارائه شده در مرجع [۱۸]، روند مشابهی با منحنی مربوط به روابط بخش ۶ طی می‌کند. شکل (۱۲) را در نظر بگیرید. تعداد ارسالها برای منحنی ترسیم شده بر اساس تحلیل مرجع [۱۸] در یک نقطه به کمترین مقدار خود رسیده است. این نقطه همان تعداد خوشه بهینه را نشان می‌دهد. لذا زمانی که تعداد خوشه‌ها برای شبکه با ۴۰۰ گره حسگر برابر با ۳ باشد، کمترین

حالت‌های مختلف مطرح شده بخش ۶ را در نظر بگیرید. با توجه به وابستگی تعداد کل ارسالها (T) به پارامتر D، افزایش N_c (که منجر به افزایش D می‌شود) تا یک حد آستانه‌ای پارامتر T را کاهش داده و بعد از آن روند افزایشی خواهد داشت. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شکل (۹) حالت‌های مختلف بحث‌شده در بخش ۶ را مقایسه می‌کند.

اگر به این شکل با دقت کافی بنگریم، در هر منحنی تنها یک نقطه وجود دارد که تعداد ارسالهای شبکه به حداقل مقدار خود می‌رسد. پس اندازه خوشه مربوط به این نقطه اندازه خوشه بهینه می‌باشد. به طوری که اگر اندازه خوشه روی هر منحنی از مقدار بهینه خود کمتر یا بیشتر شود، تعداد ارسالها افزایش می‌یابد. مجدداً شکل (۹) را در نظر بگیرید؛ در حالتی که $N_c = 1000$ باشد، تعداد خوشه‌ها برابر با ۱ و $D \approx 14$ است. اما در حالتی که $N_c = 250$ باشد، تعداد خوشه‌ها برابر با ۴ و $D \approx 7$ است. پارامتر D برای حالت $N_c = 1000$ تقریباً دو برابر حالت $N_c = 250$ شده است.

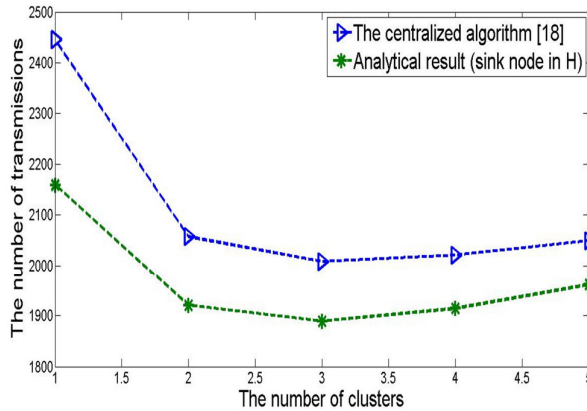


شکل (۹): تعداد ارسالها به ازاء مقادیر مختلف اندازه خوشه

Fig. (9): Number of transmissions for different cluster sizes

با توجه به افزایش چشمگیر پارامتر D در حالت $N_c = 1000$ ، اختلاف زیادی بین منحنی‌های رسم شده در این حالت وجود دارد. در بهترین حالت، زمانی که گره چاهک در نقطه D (حالت سوم) قرار گرفته کمترین ارسالها را در شبکه خواهیم داشت که منجر به افزایش طول عمر شبکه می‌شود.

همچنین، شکل (۱۰) با فرض ثابت بودن پارامترهای a ، λ و N ، تغییرات تعداد ارسالها بر حسب افزایش تعداد خوشه‌ها را نشان می‌دهد. در این شکل، منحنی‌های مربوط به حالات مختلف بحث شده در بخش ۶، قابل مشاهده است. نظر به رابطه (۴۴)، واضح است که افزایش تعداد خوشه‌ها (C)، منجر به کاهش پارامتر D خواهد شد. با افزایش تعداد خوشه‌ها (که منجر به کاهش D می‌شود)، تعداد ارسالها تا یک حد آستانه‌ای کاهش یافته و بعد از آن روند افزایشی را طی می‌کند. برای حالتی که گره چاهک در مبدأ مختصات قرار گرفته، تعداد بهینه خوشه‌ها ۳ می‌باشد که در این صورت حداقل تعداد ارسالها را خواهیم داشت. اگر تعداد خوشه‌ها از مقدار بهینه کمتر یا



شکل (۱۴): نمایش تعداد ارسال‌ها در تحلیل ارائه شده توسط محققان مرجع [۱۸] و حالت پنجم به ازاء تغییر تعداد خوشه‌ها

Fig. (14): Number of transmissions shown in presented analysis by researchers in [18] and fifth state for different of the number of clusters

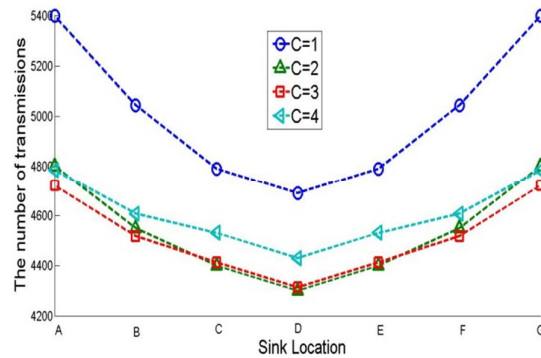
۸- نتیجه گیری

در این مقاله، سعی بر آن شد که با استفاده از مدل مرسوم شبکه‌های حسگر بی‌سیم به بررسی اثر تغییر محل گره چاهک بر تعداد ارسال‌ها و کارایی شبکه پرداخته شود. برای تحقق این هدف، در پنج حالت مختلف، درخت‌های مسیریابی که برای ارسال‌های بین خوشه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند، ترسیم شد. با توجه به ساختار ارائه شده، تعداد کل ارسال‌ها در هر حالت محاسبه و فرموله گردید. نتایج شبیه-سازی‌های انجام شده حاکی از آن است که بسته به مدل مورد استفاده، موقعیت گره چاهک نقش بسزایی بر عملکرد شبکه خواهد گذاشت. هر چه مکان گره چاهک به مرکز شبکه حسگر نزدیک‌تر شود، از تعداد کل ارسال‌ها کاسته خواهد شد. لذا، با توجه به مدل مصرف انرژی رادیویی مرتبه اول در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، کاهش حجم داده ارسالی، میزان مصرف انرژی را نیز کاهش می‌دهد. در نتیجه، طول عمر شبکه حسگر بی‌سیم افزایش می‌یابد.

پی‌نوشت:

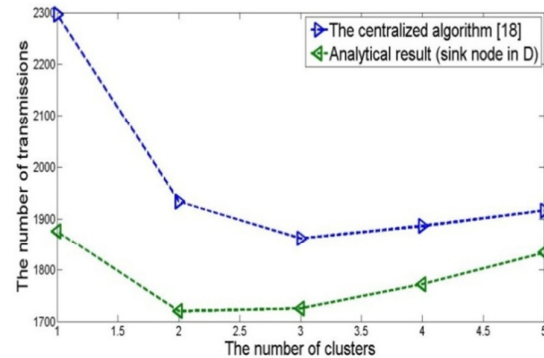
- 1- Wireless Sensor Network
- 2- Self-organizing
- 3- Communication costs
- 4- Sink node
- 5- Compressive sensing
- 6- Sparse signal
- 7- Transform matrix
- 8- Random measurement matrix
- 9- Clustering
- 10- Fault tolerance
- 11- Hybrid compressive sensing
- 12- Cluster head
- 13- Hop
- 14- Single-hop
- 15- Compressive Data Gathering
- 16- Throughput

تعداد ارسال را خواهیم داشت. پس مصرف انرژی نیز کمتر می‌شود. اگر تعداد خوشه‌ها از مقدار بهینه ($C=3$) کمتر یا بیشتر شود، تعداد ارسال‌ها افزایش می‌یابد.



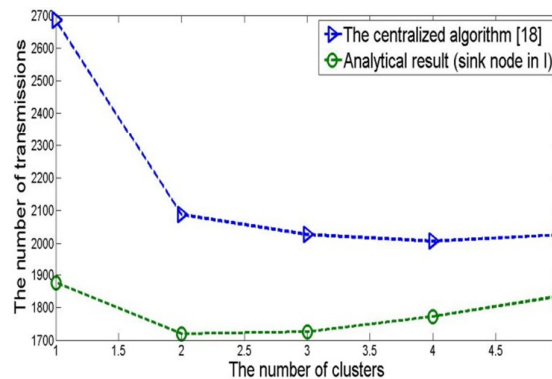
شکل (۱۱): تعداد ارسال‌ها به ازاء تغییر مکان گره چاهک

Fig. (11): Number of transmissions for different of sink node locations



شکل (۱۲): نمایش تعداد ارسال‌ها در تحلیل ارائه شده توسط محققان مرجع [۱۸] و حالت سوم به ازاء تغییر تعداد خوشه‌ها

Fig. (12): Number of transmissions shown in presented analysis by researchers in [18] and third state for different of the number of clusters



شکل (۱۳): نمایش تعداد ارسال‌ها در تحلیل ارائه شده توسط محققان مرجع [۱۸] و حالت چهارم به ازاء تغییر تعداد خوشه‌ها

Fig. (13): Number of transmissions shown in presented analysis by researchers in [18] and fourth state for different of the number of clusters

- | | |
|--------------------------------|---------------------------------------------|
| 23- Intracluster transmissions | 17- Interference |
| 24- Intercluster transmissions | 18- Projections |
| 25- Shortest path tree | 19- Incoherent |
| 26- Optimal cluster size | 20- Restricted Isometry Property |
| 27- Compressive ratio | 21- Independent and Identically Distributed |
| | 22- Minimum spanning tree |

References

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "Wireless sensor networks: A survey", *Computer Networks*, Vol. 38, No. 4, pp. 393-422, Mar. 2002.
- [2] D. Ebrahimi, C. Assi, "Compressive data gathering using random projection for energy efficient wireless sensor networks", *Ad Hoc Networks*, Vol. 16, pp. 105-119, May 2014.
- [3] M. Balouchestani, K. Raahemifar, S. Krishnan, "Compressed sensing in wireless sensor networks: Survey", *Canadian Journal*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-4, Feb. 2011.
- [4] S. Qaisar, R. Bilal, W. Iqbal, M. Naureen, S. Lee, "Compressive sensing: from theory to applications, A survey", *Communications and Networks*, Vol. 15, No. 5, pp. 443-456, Oct. 2013.
- [5] X. Wu, Y. Xiong, W. Huang, H. Shen, M. Li, "An efficient compressive data gathering routing scheme for large-scale wireless sensor networks", *Computers and Electrical Engineering*, Vol. 39, No. 6, pp. 1935-1946, Aug. 2013.
- [6] J. Haupt, W.U. Bajwa, M. Rabbat, R. Nowak, "Compressed sensing for networked data", *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 25, No. 2, pp. 92-101, Mar 2008.
- [7] C. Luo, F. Wu, J. Sun, C. W. Chen, "Compressive data gathering for large-scale wireless sensor networks", *Proceeding of the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 145-156, Sep. 2009.
- [8] C. Luo, F. Wu, J. Sun, C.W. Chen, "Efficient measurement generation and pervasive sparsity for compressive data gathering", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 9, No. 12, pp. 3728-3738, Dec. 2010.
- [9] J. Wang, S. Tang, B. Yin, X.Y. Li, "Data gathering in wireless sensor networks through intelligent compressive sensing", *Proceeding of the IEEE/INFOCOM*, pp. 603-611, March 2012.
- [10] X. Wu, Y. Xiong, P. Yang, S. Wan, W. Huang, "Sparsest random scheduling for compressive data gathering in wireless sensor networks", *IEEE Trans. on Wireless Communications*, Vol. 13, No. 10, pp. 5867-5877, Oct. 2014.
- [11] G. Yang, M. Xiao, S. Zhang, "Data aggregation scheme based on compressed sensing in wireless sensor network", *Information Computing and Applications*, ed: Springer, pp. 556-561, Sep 2012.
- [12] J. Cheng, Q. Ye, H. Jiang, D. Wang, C. Wang, "STCDG:an efficient data gathering algorithm based on matrix completion for wireless sensor networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 12, No. 2, pp. 850-861, Feb. 2013.
- [13] H. Zheng, S. Xiao, X. Wang, X. Tian, "On the capacity and delay of data gathering with compressive sensing in wireless sensor networks", *Proceeding of the IEEE/GLOBECOM*, pp. 1-5, Dec. 2011.
- [14] H. Zheng, S. Xiao, X. Wang, X. Tian, M. Guizani, "Capacity and delay analysis for data gathering with compressive sensing in wireless sensor networks", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 12, No. 2, pp. 917-926, Feb. 2013.
- [15] J. Luo, L. Xiang, C. Rosenberg, "Does compressed sensing improve the throughput of wireless sensor networks?" *Proceeding of the ICC*, pp. 1-6, May 2010.
- [16] L. Xiang, J. Luo, A. Vasilakos, "Compressed data aggregation for energy efficient wireless sensor networks", *Proceeding of the IEEE/SECON*, pp. 46-54, Jun. 2011.
- [17] F. Fazel, M. Fazel, M. Stojanovic, "Random access compressed sensing for energy-efficient underwater sensor networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 29, No. 8, pp. 1660-1670, Sep. 2011.
- [18] R. Xie X. Jia, "Transmission-efficient clustering method for wireless sensor networks using compressive sensing," *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, Vol. 25, No. 3, pp. 806-815, Mar. 2014.
- [19] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks", *Proceeding of the IEEE/HICSS*, pp. 1-10, Jan. 2000.
- [20] E. Candes, M. Wakin, "An introduction to compressive sampling", *Signal Processing Magazine*, Vol. 25, No. 2, pp. 21-30, Mar 2008.
- [21] H. Zheng, F. Yang, X. Tian, X. Gan, X. Wang, S. Xiao, "Data gathering with compressive sensing in wireless sensor networks: a random walk based approach", *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, Vol. 26, No. 1, pp. 1-10, Feb. 2014.
- [22] D. Donoho, "Compressed sensing", *IEEE Trans. on Information Theory*, Vol. 52, No. 4, pp. 4036-4048, April 2006.
- [23] M. Emre Keskin, I. Kuban Altinel, N. Aras, C. Ersoy, "Wireless sensor network lifetime maximization by optimal sensor deployment, activity scheduling, data routing and sink mobility", *Ad Hoc Networks*, Vol. 17, pp. 18-36, Jun. 2014.

