

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۱۰/۱۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۱۲/۲۵

افزایش طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم مبتنی بر حرکت قابل پیش بینی چاهک‌ها

سیده مولود امینی*

کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات تهران، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی کامپیوتر، تهران، ایران

پست الکترونیکی: sara.amini.tf@gmail.com

دکتر سام جبه داری

استادیار دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی کامپیوتر، تهران، ایران

پست الکترونیکی: s.jabbehdari@gmail.com

چکیده

و اولویت انتخاب گره‌های میانی هر خوشه برای سرخوشه شدن، که در مدل‌های پیشین به عنوان یک محدودیت در انتخاب سرخوشه مطرح شده است، برطرف می‌شود. با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها مشاهده می‌شود که مصرف انرژی کل در مدل پیشنهادی کاهش یافته است. در نتیجه این کاهش مصرف انرژی منجر به افزایش تعداد گره‌های فعال، افزایش متوسط انرژی باقیمانده و در نهایت افزایش طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم نسبت به مدل‌های پیشین می‌شود.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های حسگر بی‌سیم، چند چاهک متحرک، الگوریتم خوشه‌بندی، افزایش طول عمر شبکه

۱- مقدمه

کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم با استفاده از قابلیت تحرک چاهک‌ها، موضوع تحقیقاتی مهمی برای پژوهشگران در سال‌های اخیر بوده

در حال حاضر شبکه‌های حسگر بی‌سیم در سطح وسیعی از کاربردها از قبیل نظامی، پزشکی، حمل و نقل، نظارت محیط زیست و غیره استفاده می‌شوند. در این شبکه‌ها تعادل در انرژی مصرفی گره‌های حسگر و افزایش طول عمر شبکه بسیار حائز اهمیت می‌باشند. در این مقاله با توجه به مزایای شش ضلعی‌ها، محیط شبکه‌های حسگر به صورت یک شش ضلعی کلی در نظر گرفته شده است، که بر مبنای شعاع شش ضلعی به چندین خوشه با اندازه مساوی تقسیم می‌شود. در این مدل با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی انرژی کارآمد مبتنی بر چند چاهک متحرک، یک مسیر حرکت از پیش تعیین شده برای چاهک‌های متحرک، در راستای شعاع شش ضلعی ارائه شده است و هر خوشه به خوبی توسط چاهک‌ها از دو مسیر متفاوت پوشش داده می‌شود. در نتیجه مشکل دورافتادن سرخوشه‌ها از چاهک‌ها

* نویسنده مسئول

است. در این شبکه‌ها جریان داده به سمت گره خاصی که به‌عنوان چاهک یا ایستگاه اصلی مشخص می‌شود، با استفاده از ارتباطات چندگامی هدایت می‌شود. پژوهش‌ها در این زمینه نشان می‌دهند که با داشتن چندین گره چاهک متحرک، میزان مصرف انرژی گره‌های نزدیک چاهک کاهش می‌یابد [۲، ۳]. استفاده از چاهک‌های چندگانه به منظور جمع‌آوری اطلاعات از سایر گره‌های حسگر، به منظور کاهش مصرف انرژی و در نهایت بهبود در طول عمر شبکه‌های حسگر، در مراجع [۴، ۱، ۵] بررسی شده است. گره‌های چاهک متحرک برای تغییر موقعیت مکانی خود نیاز به انتخاب مسیر حرکت مناسبی دارند. اما نشان داده شده [۶] که مسئله انتخاب مسیر حرکت مناسب برای گره‌های چاهک در حالت کلی NP سخت است. لذا برای حل آن از روش‌های ابتکاری و سریع که جواب‌های نزدیک به بهینه را در مدت زمان کمی پیدا می‌کنند، استفاده می‌شود. مسئله این است که وقتی از چندین چاهک متحرک استفاده می‌شود، چگونه باید الگوریتم‌های مسیریابی بهبود پیدا کنند؟

در مرجع [۵] پژوهشگران به منظور بهبود طول عمر شبکه‌های حسگر یک الگوریتم مسیریابی انرژی کارآمد مبتنی بر مدل‌های خوشه‌بندی با استفاده از چند چاهک متحرک ارائه داده‌اند. الگوریتم سلسله مراتبی مرجع [۵] نسبت به الگوریتم‌های سلسله مراتبی مرسوم، در کاهش مصرف انرژی و ذخیره انرژی در هر خوشه عملکرد بهتری داشته است. اما در این مرجع مشکل لزوم نزدیک بودن سرخوشه‌ها به مرکز خوشه‌ها مشاهده می‌شود که به منظور برطرف شدن این مشکل در مرجع [۷]، یک مدل پیشنهادی برای حرکت چاهک‌ها در نظر گرفته شده است که بهبود مدل MECA می‌باشد و با نام IMP-MECA مشخص شده است. در این مدل چاهک‌ها با حرکت از چندین موقعیت در مرکز خوشه‌ها به گره‌های حسگر بیشتری نزدیک می‌شوند. در نتیجه به دلیل دسترسی بهتر به گره‌های چاهک، گره‌های بیشتری برای سرخوشه شدن نامزد خواهند شد.

بنابراین در این مدل مشکل لزوم نزدیک بودن سرخوشه‌ها به مرکز خوشه‌ها تا حدی برطرف می‌شود [۸]. اما در مدل IMP-MECA همواره به دلیل حرکت چاهک‌ها در مرکز خوشه‌ها، گره‌هایی که در مرکز خوشه‌ها قرار دارند و به چاهک‌ها نزدیک هستند، برای سرخوشه شدن انگیزه بیشتری دارند. بنابراین در مدل IMP-MECA نیز مانند مدل MECA مشکل دورافتادن سرخوشه‌ها از چاهک‌ها و اولویت انتخاب گره‌های میانی هر خوشه برای سرخوشه شدن مطرح می‌شود که با این محدودیت تعداد گره‌های کمتری برای سرخوشه شدن در هر خوشه نامزد خواهند شد.

به همین دلیل در مدل پیشنهادی ارائه شده در این مقاله که با نام New-MECA معرفی شده است، با در نظر گرفتن یک شش ضلعی به جای دایره و افزایش تعداد خوشه‌ها نسبت به مدل مرجع [۸]، حرکت چاهک‌ها طوری در نظر گرفته شده است که گره‌های چاهک تعداد گره‌های بیشتری را بازدید نمایند.

در نتیجه با حرکت چاهک‌ها از چندین مسیر در امتداد شعاع شش ضلعی و پوشش بهتر هر خوشه از دو مسیر متفاوت، انتخاب‌های بیشتری برای سرخوشه شدن مطرح می‌شود و مشکل دورافتادن سرخوشه‌ها از چاهک‌ها و اولویت انتخاب گره‌های میانی هر خوشه برای سرخوشه شدن در مدل‌های پیشین برطرف می‌شود. همچنین در مدل پیشنهادی با استفاده از مسیریابی سلسله مراتبی انرژی کارآمد [۵] و افزایش تعداد خوشه‌ها نسبت به مدل IMP-MECA سرخوشه‌ها به خوبی توزیع می‌شوند.

به منظور ارزیابی کارایی مدل پیشنهادی نسبت به مدل‌های پیشین، تاثیر افزایش چگالی شبکه، افزایش سرعت حرکت چاهک‌ها و زمان توقف چاهک‌ها در آزمایش‌های مختلفی بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان دهنده بهبود مدل پیشنهادی از نظر مصرف انرژی کل، متوسط انرژی باقیمانده در میان گره‌های حسگر و تعداد گره‌های فعال می‌باشد.

ساختار ادامه مقاله به این شرح است: در بخش دوم

کارهای قبلی مرتبط با مدل حرکت چاهک‌ها، در جهت متعادل شدن انرژی مصرفی گره‌های حسگر و افزایش طول عمر این شبکه‌ها بررسی می‌شوند. در بخش سوم مدل پیشنهادی تعریف می‌شود و در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی‌ها و در بخش پنجم نتیجه‌گیری از این تحقیق مطرح می‌شوند.

۲- کارهای قبلی

در مرجع [۱] گره‌های حسگر به صورت تصادفی در داخل یک دایره کلی توزیع شده‌اند که این دایره بر اساس قطر دایره به چهار خوشه مساوی تقسیم شده است. چاهک‌های متحرک در راستای مسیرهای از پیش تعیین شده در حال حرکت هستند، به گونه‌ای که مرکز هر خوشه توسط چاهک‌ها به خوبی پوشش داده می‌شود. در نتیجه دسترسی سایر گره‌های حسگر به چاهک‌ها به راحتی امکان‌پذیر است. بنابراین به دلیل دسترسی مناسب گره‌های حسگر به چاهک‌ها تعداد گره‌های بیشتری برای سرخوشه شدن نامزد خواهند شد و مشکل لزوم نزدیک بودن سرخوشه‌ها به مرکز خوشه‌ها که در مدل مرجع [۵] مشاهده می‌شود برطرف می‌شود.

در مدل مرجع [۴] محیط شبکه‌های حسگر شامل چندین موزائیک شش ضلعی کنارهم چیده شده می‌باشد و از چند چاهک متحرک استفاده شده است. چاهک‌ها دارای دو دستگاه گیرنده و فرستنده هستند که یکی از آن‌ها برای ارتباط با حسگرها و دیگری برای ارتباط با چاهک‌های دیگر در نظر گرفته شده است. در این مدل چاهک‌ها روی یک مسیر از پیش تعیین شده، پیرامون موزائیک‌های شش ضلعی حرکت می‌کنند.

در مدل مرجع [۴] تاثیر استفاده از چاهک‌های متحرک برای جمع‌آوری داده‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم بررسی شده است. در این مدل بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌ها بهبود در طول عمر شبکه در حالتی که چاهک‌ها روی یک مسیر از پیش تعیین شده به صورت همزمان و متصل حرکت می‌کنند، به خوبی نشان داده شده است. همچنین استفاده

از یک الگوریتم توزیع شده، حرکت قابل پیش بینی و متصل چاهک‌ها و وجود چندین نقطه توقف مناسب برای چاهک‌ها از جمله معیارهایی است که در جهت کاهش مصرف انرژی و بهبود در طول عمر شبکه در این ارائه شده است.

در مرجع [۵] چاهک‌ها در طول یک مسیر از پیش تعیین شده پیرامون دایره حرکت می‌کنند. در این تحقیق اساساً تاثیر حرکت همزمان و قابل پیش بینی چاهک‌ها و استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی انرژی کارآمد مبتنی بر چند چاهک متحرک که منجر به توزیع بهتر سرخوشه‌ها در هر خوشه می‌شود، نشان داده شده است. در این مدل با افزایش تعداد گره‌های فعال و متوسط انرژی باقیمانده، بهبود در طول عمر شبکه نشان داده شده است.

در مرجع [۷] بررسی شده است، که وقتی گره چاهک متحرک در حاشیه شبکه‌های مدور حرکت می‌نماید، انرژی مصرفی سایر گره‌های حسگر به دلیل دسترسی مناسب به گره چاهک متحرک به حداقل ممکن خواهد رسید. این مدل نشان می‌دهد که انرژی مصرف شده در یک شبکه با استفاده از ایستگاه متحرک (چاهک) به طور معناداری کمتر از یک شبکه با چاهک ثابت است. بنابراین زمانی که چاهک دور تا دور محدوده کاربردی حرکت می‌کند و در محدوده‌های مشخصی متوقف می‌شود، داده‌های سایر گره‌های حسگر که مربوط به رویداد مشخصی می‌باشد را جمع‌آوری می‌نماید.

در تحقیق دیگری در مرجع [۸] مطرح شده است که اگر چاهک‌های متحرک، از مسیری در راستای محدوده مورد نظر استفاده کنند که بر اساس کمترین تعداد گام‌های محاسبه شده از یک چاهک باشد، منجر به تعادل در مصرف انرژی می‌شود.

در مراجع [۹، ۱۰] چندین روش موثر در جهت کاهش مصرف انرژی ارائه شده است. در این مراجع گره‌های متحرک به عنوان چاهک در طول شبکه برای جمع‌آوری داده‌های سایر گره‌های حسگر حرکت می‌کنند. بنابراین چاهک‌های متحرک باعث متعادل شدن مصرف انرژی

سایر گره‌های حسگر می‌شوند. همچنین استفاده از قابلیت متحرک بودن چاهک‌ها منجر به کنترل بهتر گره‌های حسگر و دسترسی به شبکه‌های پراکنده می‌شود.

در مرجع [۱۱] از چاهک‌های متحرک برای ذخیره انرژی گره‌های حسگر استفاده شده است. در این مدل فرض شده است، زمانی که رویدادی رخ داده شود، گره‌ها باید به نزدیک‌ترین چاهک گزارش ارائه دهند. در مدل مرجع [۱۲] یک شبکه حسگر بی‌سیم مبتنی بر یک گره چاهک متحرک بررسی شده است که چاهک با حرکت از مسیرهای از پیش تعیین شده به جمع‌آوری داده‌ها می‌پردازد. در این مدل یک رابطه برای جمع‌آوری داده‌ها مطرح شده است تا با حفظ ساختار و عملکرد شبکه مقدار داده‌های جمع‌آوری شده توسط چاهک افزایش یابد.

۳- مدل پیشنهادی

با توجه به ویژگی‌های شش‌ضلعی‌ها از جمله: وجود بیشترین مساحت به ازای محیط ثابت و متقارن بودن شش‌ضلعی، محیط شبکه‌های حسگر در مدل پیشنهادی به صورت یک شش‌ضلعی در نظر گرفته شده است. موضوع مورد بررسی در این تحقیق از آنجایی است که چاهک‌های متحرک در مدل مرجع [۵] یعنی مدل MECA دور تا دور محیط شبکه‌های حسگر که به صورت یک دایره کلی است، با سرعت ثابت حرکت می‌کنند. در این مدل برای هر خوشه می‌بایست یک سرخوشه بر مبنای بیشترین انرژی باقیمانده انتخاب شود. اما با توجه به این‌که چاهک‌ها فقط در دورتا دور دایره در حال حرکت هستند، بعضی از مواقع ممکن است سرخوشه فاصله زیادی تا چاهک‌های متحرک داشته باشد. در نتیجه برای حل این مشکل در مرجع [۵]، پیشنهاد شده است که در مرحله انتخاب سرخوشه گره‌هایی که در مرکز هر خوشه قرار دارند، برای سرخوشه شدن اولویت بیشتری داشته باشند. اما با توجه به این‌که در هر خوشه هر گره حسگر فقط یک بار می‌تواند به عنوان سرخوشه انتخاب شود، بنابراین وقتی اولویت در ابتدا با گره‌های میانی

هر خوشه باشد، بعد از انتخاب تمام گره‌های میانی، دیگر معیار قرارگرفتن گره نامزد در مرکز هر خوشه برای انتخاب سرخوشه موثر نخواهد بود. بنابراین در تمامی حالت‌های انتخاب سرخوشه، اولویت انتخاب گره‌های میانی هر خوشه و لزوم قرارگیری سرخوشه‌ها در مرکز خوشه‌ها معیار مناسبی نمی‌باشد.

در جهت رفع این مشکل در مدل پیشنهادی حرکت چاهک‌های متحرک به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که در هر خوشه چاهک‌ها با حرکت از دو مسیر متفاوت در امتداد شعاع شش‌ضلعی، به گره‌های بیشتری نزدیک شوند. در نتیجه گره‌های بیشتری برای سرخوشه شدن نامزد خواهند شد. بنابراین در مدل پیشنهادی مشکل دورافتادن سرخوشه‌ها از چاهک‌ها و اولویت انتخاب گره‌های میانی هر خوشه برای سرخوشه شدن مطرح نمی‌شود، بلکه معیار انتخاب سرخوشه برای هر گره، داشتن کمترین شناسه و بیشترین انرژی باقیمانده است.

در مدل پیشنهادی فرضیه‌های زیر را در نظر گرفته‌ایم:

- شبکه شامل N گره حسگر همگن و ثابت می‌باشد.
- گره‌های حسگر به صورت تصادفی در محیط شبکه‌های حسگر پخش می‌شوند.
- برای گره‌ها این امکان فراهم شده است که بر مبنای فاصله خود تا گیرنده توان ارسالی خود را تنظیم نمایند.
- حرکت چاهک‌های متحرک به صورت همزمان است.
- پیوند بین گره‌ها دو طرفه تعیین شده است.

در مدل پیشنهادی ابتدا شش‌ضلعی در یک دایره به شعاع ۲۳ متر محاط شده است که با توجه به شعاع دایره بیرونی به شش مثلث متساوی‌الاضلاع (خوشه) با اندازه‌های یکسان تقسیم شده است. در این مدل شعاع دایره باید با زاویه‌ای ترسیم شود که متناظر با قطرهای شش‌ضلعی باشد. برای هر خوشه می‌بایست یک سرخوشه انتخاب شود. در هر خوشه گره‌های چاهک در امتداد شعاع شش‌ضلعی در دو مسیر متفاوت حرکت می‌کنند، به گونه‌ای که در هر خوشه با حرکت چاهک‌ها از دو جهت (دو ضلع هر مثلث) این امکان

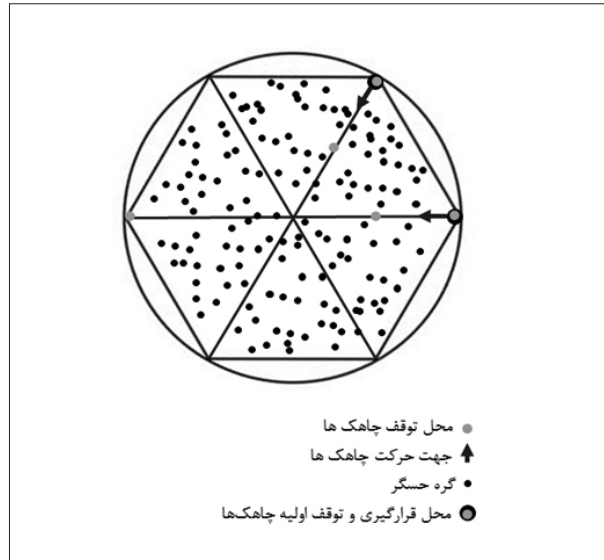
همگانی شروع می‌شود. برای هر گره چاهک دو موقعیت توقف تعیین شده است. همچنین گره‌های حسگر از نقطه مرکزی فقط برای تغییر مسیر خود استفاده می‌کنند. در این مدل چاهک‌ها براساس زمان توقف مشخص شده از قبل، در نقاط توقف متوقف می‌شوند و به جمع‌آوری داده‌ها می‌پردازند. سپس به نقاط توقف بعدی تغییر موقعیت می‌دهند.

۲-۳ فاز تشکیل خوشه‌ها و انتخاب سرخوشه‌ها

بعد از تشکیل خوشه‌ها، مرحله انتخاب سرخوشه‌ها اجرا می‌شود. با توجه با این‌که در شروع اجرای الگوریتم تمام گره‌ها از انرژی یکسانی برخوردار هستند، گرهی به عنوان سرخوشه اولیه و فعلی در هر خوشه انتخاب می‌شود که دارای کمترین شناسه باشد.

در این الگوریتم با فرض این‌که انرژی سرخوشه‌های فعلی از یک مقدار مشخص نباید کمتر شود، بر اساس یک بازه زمانی مشخص به صورت مرتب مرحله انتخاب سرخوشه جدید تکرار می‌شود. با شروع مرحله انتخاب سرخوشه با توجه به این‌که در کدام خوشه سرخوشه جدید باید انتخاب شود، الگوریتم گرهی با بیشترین انرژی باقیمانده نسبت به انرژی سرخوشه فعلی و کمترین شناسه را به عنوان گره نامزد اولیه یعنی گره S_1 از بین تمام گره‌های حسگر مشخص می‌نماید در این حالت مشخصات گره S_1 در قالب یک پیام شامل شناسه گره و انرژی باقیمانده به صورت همگانی توسط این گره ارسال می‌شود. بنابراین با دریافت پیام گره S_1 توسط سایر گره‌ها و تمایل یک یا چند گره دیگر برای نامزد شدن، الگوریتم از بین این گره‌ها گرهی با کمترین شناسه را به عنوان گره S_1 (نامزد جدید) انتخاب می‌نماید.

سپس انرژی باقیمانده گره نامزد جدید یعنی S_1 و گره نامزد فعلی یعنی S_2 مقایسه می‌شود. اگر انرژی باقیمانده گره S_2 نسبت به گره S_1 بیشتر باشد، این گره نامزد اصلی سرخوشه شدن می‌شود و گره S_1 از رقابت در این مرحله خارج می‌شود. سپس پیام جدیدی توسط گره S_2 با مشخصات

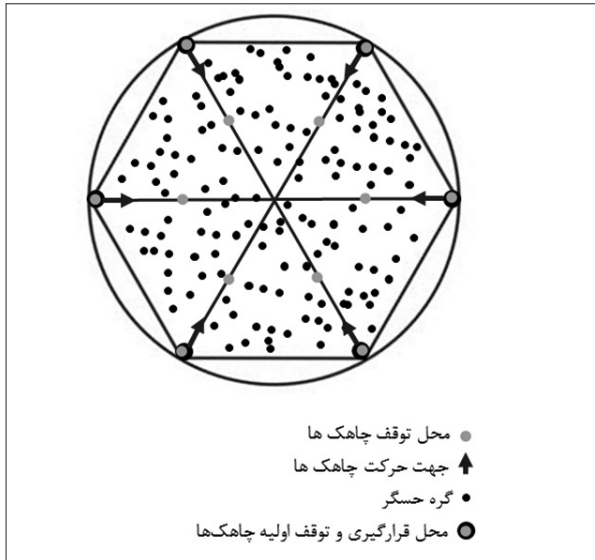


شکل ۱: موقعیت قرار گیری اولیه چاهک‌ها در یک خوشه در مدل پیشنهادی

برای سایر گره‌های حسگر فراهم می‌شود که با سرعت بیشتری به گره‌های چاهک دسترسی داشته باشند. همچنین در این مدل از الگوریتم خوشه‌بندی انرژی کارآمد با چند چاهک متحرک استفاده شده است [۵]، که شامل سه فاز به شرح زیر است.

۳-۱ موقعیت اولیه قرار گیری چاهک‌های متحرک

تمام چاهک‌ها در این الگوریتم به صورت همزمان و با یک سرعت ثابت که بر مبنای پارامتر V متناسب با جدول ۱ تعیین شده است، بر روی شعاع شش ضلعی از دو مسیر حرکت می‌کنند که در شکل ۱ موقعیت قرار گیری اولیه چاهک‌ها در یک خوشه نشان داده شده است. در هر دور تمام چاهک‌ها از گوشه‌های شش ضلعی به سمت مرکز حرکت می‌کنند و سپس در دور بعد در همان مسیر، چاهک‌ها به سمت گوشه‌های شش ضلعی حرکت برگشت را انجام می‌دهند. هر گره چاهک در شروع اجرای الگوریتم فقط یکبار در قالب یک پیام همگانی در کل شبکه موقعیت فعلی خود را برای تمام گره‌های حسگر مشخص می‌نماید. سپس گره‌های حسگر با توجه به موقعیت فعلی گره‌های چاهک و سرعت حرکت آن‌ها موقعیت بعدی چاهک‌ها را پیش‌بینی می‌نمایند. جمع‌آوری داده‌ها توسط چاهک‌ها پس از ارسال پیام



شکل ۲: نحوه تشکیل خوشه‌ها در مدل پیشنهادی

```

Id = id (sensor node)
RE = residual_energy (sensor node)
r = sensor communication range

if ( RE (Si) > RE (Initial-CH) ) then
node Si becomes candidate for CH and
node Si broadcast message include (Id, RE) to
neighborhood of radius r.

if (some nodes become candidate for CH) then
algorithm will choose node like Sj with smaller id.

if ( RE (Sj) > ( RE (Si) ) then
node Sj becomes idle and
node Si chooses as the new candidate and
Sj broadcasts message with its own information.
else if ( RE (Si) = ( RE (Sj) ) then
CH = min (Id(Si), Id(Sj))
else
node Sj becomes idle and
the message still broadcasts of Si.
end if
end if
end if

```

شکل ۳: شبه کد نحوه انتخاب سرخوشه‌ها در مدل پیشنهادی

$$E_2(S_i, S_j, CH_{S_i}) = E_{Tx}(l, d(S_i, S_j)) + E_{Rx}(l) + E_{Tx}(l, d(S_j, CH_{S_i})) \quad (2)$$

در نهایت گرهی انتخاب می‌شود که کمترین مقدار مربوط به رابطه ۲ را داشته باشد، چرا که برای انتخاب گره رله داده این نکته ضروری است که در ابتدا رابطه ۳ برقرار باشد.

$$E_2(S_i, CH_{S_i}) = \text{Min}(E_2(S_i, S_j, CH_{S_i})) \quad (3)$$

این گره، برای دیگر گره‌های حسگر ارسال خواهد شد. اما در صورت برابر بودن انرژی گره S_j با گره S_i گرهی با کمترین شناسه، انتخاب خواهد شد و گره دیگر از رقابت خارج می‌شود. اما در صورت کمتر بودن انرژی S_j از گره S_i ابتدا گره S_j غیر فعال می‌شود و سپس گره S_i دوباره پیامی به منظور رقابت با دیگر گره‌ها ارسال می‌نماید، تا زمانی که رقابت بین گره‌ها به پایان برسد و گرهی با کمترین شناسه و بیشترین انرژی باقیمانده به عنوان سرخوشه جدید انتخاب شود. در ادامه شبه کد مربوط به انتخاب سرخوشه در مدل پیشنهادی ارائه شده است.

۳-۳ فاز مسیریابی سلسله مراتبی درون خوشه‌ای

در مدل پیشنهادی شبکه به صورت یک گراف $G(N, E)$ در نظر گرفته شده است. E مجموعه‌ای از پیوندها و N مجموعه‌ای از گره‌های حسگر می‌باشد که به صورت تصادفی پخش شده‌اند. d فاصله گره حسگر تا مقصد (سرخوشه/چاهک)، l طول بسته و E_{elec} انرژی هدر رفته در مدار است. همچنین دو مدل رادیویی به عنوان مدل انرژی بر اساس فاصله بین فرستنده و گیرنده لحاظ شده است که شامل مدل فضای باز (F_s) و مدل چند مسیره (M_p) می‌باشد [۵]. پارامترهای کانال فضای باز با ϵ_{fs} و پارامترهای کانال چند مسیره با ϵ_{ms} نشان داده شده است.

به عنوان مثال هزینه انرژی مصرفی گره S_i ، برای ارسال داده به سرخوشه به صورت مستقیم بر اساس رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$E_1(S_i, CH_{S_i}) = \begin{cases} lE_{elec} + l\epsilon_{fs}d(S_i, CH_{S_i})^2, & d < d_0 \\ lE_{elec} + l\epsilon_{fs}d(S_i, CH_{S_i})^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

در این حالت گره S_i برای صرفه جویی در مصرف انرژی از یک گره میانی مانند S_j و مسیریابی چندگامی برای ارسال داده به سرخوشه استفاده می‌نماید. در نتیجه گره S_i برای تحویل یک بسته به طول l به سرخوشه از طریق مسیر یابی چندگامی بر اساس رابطه ۲ انرژی مصرف می‌نماید.

```

 $E_1(S_i, CH_{S_i})$  = energy cost for  $S_i$  to send data to CH directly
 $E(S_i, BS)$  = energy cost for  $S_i$  to send data to sink
 $E(S_i, CH_{S_i})$  = energy cost for  $S_i$  to send data to CH
 $E_2(S_i, CH_{S_i})$  = energy cost for  $S_i$  to send data to CH by optimal relay node( $S_i$ )

 $E_2(S_i, S_j, CH_{S_i})$  = energy cost for  $S_i$  to send data to CH by multihop routing

if (node  $S_i$  would like to send data) then
  first:  $S_i$  should calculate  $E_1(S_i, CH_{S_i})$ 
 $S_i$  tries to find another  $s_j$  as relay node and uses multihop routing and calculates  $E_2(S_i, S_j, CH_{S_i})$ 
 $E_2(S_i, CH_{S_i}) = \text{Min}(E_2(S_i, S_j, CH_{S_i}))$ 
if ( $E_1(S_i, CH_{S_i}) > E_2(S_i, CH_{S_i})$ ) then
   $S_j$  selects as a relay node
 $E(S_i, CH_{S_i}) = E_2(S_i, CH_{S_i})$ 
else
   $S_i$  send data to CH directly
 $E(S_i, CH_{S_i}) = E_1(S_i, CH_{S_i})$ 
end if
  second:  $S_i$  should calculate  $E(S_i, BS)$ 
if ( $E(S_i, CH_{S_i}) > E(S_i, BS)$ ) then
   $S_i$  should send data to sink
else
   $S_i$  should send data to CH
end if
end if

```

شکل ۴: شبه کد مسیریابی سلسله مراتبی در مدل پیشنهادی

مزایای شش ضلعی‌ها که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود، به صورت یک شش ضلعی کلی در نظر گرفته شده است که این مزایا شامل:

- ۱- متقارن بودن شش ضلعی‌ها
- ۲- شش ضلعی‌ها نسبت به دایره‌ها با فضای خالی کمی در کنار هم جفت می‌شوند.
- ۳- به ازای محیط ثابت شش ضلعی بیشترین مساحت را دارد، چرا که از شش مثلث متوازی‌الاضلاع با طول یک ششم تشکیل شده است. در نتیجه هر شش ضلعی نسبت به اشکال دیگر، تعداد گره‌های حسگر بیشتری را پوشش خواهد داد.
- در مدل پیشنهادی شش ضلعی براساس شعاع دایره بیرونی به شش مثلث متساوی‌الاضلاع با اندازه‌های یکسان تقسیم شده است. بنابراین این مدل شامل شش خوشه مساوی می‌باشد، همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده

سپس رابطه‌های (۱) و (۳) بررسی می‌شوند و در نهایت کمترین مقدار بر اساس رابطه ۴ انتخاب می‌شود.

$$E(S_i, CH_{S_i}) = \text{Min}(E_1(S_i, CH_{S_i}), E_2(S_i, CH_{S_i})) \quad (4)$$

در مدل پیشنهادی به دلیل متحرک بودن چاهک‌ها، ممکن است برخی از گره‌ها برای ارسال داده به نزدیک‌ترین چاهک انرژی کمتری مصرف نمایند، در مقایسه با حالتی که ابتدا داده‌های خود را به سرخوشه و سپس سرخوشه به چاهک ارسال نماید. در نتیجه در این الگوریتم هر گره حسگر می‌بایست، قبل از ارسال داده، ابتدا هزینه ارسال داده به (چاهک / سرخوشه) را محاسبه نماید. سپس انتقال از طریق کوتاهترین مسیر بر اساس رابطه ۵ صورت گیرد. شبه کد مربوط به مرحله مسیریابی سلسله مراتبی در مدل پیشنهادی در ادامه نشان داده شده است.

$$\text{Min}(E(S_i, CH_{S_i}), E(S_i, BS)) \quad (5)$$

۳-۴ ویژگی‌های مدل پیشنهادی و مدل IMP-MECA

با توجه به این‌که هر دو مدل پیشنهادی و مدل IMP-MECA بهبود مدل MECA می‌باشند و به منظور برطرف کردن مشکلات این مدل طراحی شده‌اند اما به دلیل این‌که مدل IMP-MECA جز طرح‌های اولیه بوده است [۱]، نوآوری‌های مدل پیشنهادی نسبت به این مدل بررسی شده است.

- مدل IMP-MECA به منظور رفع کردن مشکل لزوم نزدیک بودن سرخوشه‌ها به مرکز خوشه‌ها که در مدل MECA مشاهده می‌شود، طراحی شده است. درحالی که مدل پیشنهادی ارائه شده در این مقاله به منظور برطرف کردن مشکل دورافتادن سرخوشه‌ها از چاهک‌های متحرک و لزوم انتخاب گره‌های میانی هر خوشه برای سرخوشه شدن که در هر دو مدل MECA و IMP-MECA مشاهده می‌شود، طراحی شده است.

- در مدل IMP-MECA محیط شبکه‌های حسگر به صورت یک دایره کلی فرض شده است. اما در مدل پیشنهادی محیط مورد بررسی گره‌های حسگر با توجه به

است. اما در مدل IMP-MECA دایره کلی به چهارخوشه مساوی تقسیم شده است. بنابراین افزایش تعداد خوشه‌ها در مدل پیشنهادی منجر به کنترل و مدیریت بهتر گره‌های حسگر نسبت به مدل IMP-MECA می‌شود.

- در مدل پیشنهادی حرکت چاهک‌ها در امتداد شعاع شش ضلعی به صورت دو طرفه می‌باشد و هر خوشه از دو مسیر متفاوت (دو ضلع هر مثلث) توسط چاهک‌ها به خوبی پوشش داده می‌شود. اما در مدل IMP-MECA حرکت چاهک‌ها به صورت چرخشی است و هر خوشه فقط از یک مسیر که شامل مرکز خوشه‌ها می‌باشد، توسط چاهک‌ها پوشش داده می‌شود.

- در مدل پیشنهادی به دلیل حرکت چاهک‌ها در امتداد شعاع شش ضلعی و پوشش بهتر هر خوشه توسط چاهک‌های متحرک از دو مسیر متفاوت، دسترسی سایر گره‌های حسگر به گره‌های چاهک به راحتی امکان پذیر است. در نتیجه گره‌های بیشتری برای سرخوشه شدن نامزد خواهند شد. بنابراین در این مدل معیار انتخاب گره‌های میانی هر خوشه برای سرخوشه شدن موثر نمی‌باشد. اما در مدل IMP-MECA به دلیل حرکت چاهک‌ها که فقط از مرکز خوشه‌ها می‌باشد، همواره گره‌های میانی هر خوشه به دلیل نزدیک بودن به گره‌های چاهک انگیزه بیشتری برای سرخوشه شدن دارند. در نتیجه در این مدل مشکل لزوم نزدیک بودن سرخوشه‌ها به مرکز خوشه‌ها به طور کامل برطرف نمی‌شود.

- در تمامی حالت‌ها در مدل پیشنهادی هر خوشه توسط دو چاهک متحرک از دو مسیر متفاوت پوشش داده می‌شود. اما در مدل IMP-MECA در تمامی حالت‌ها هر خوشه شامل دو چاهک متحرک نمی‌باشد، بلکه به صورت یکی در میان هر خوشه توسط دو چاهک متحرک پوشش داده می‌شود. بنابراین در مدل پیشنهادی به دلیل وجود دو چاهک متحرک در هر خوشه و دسترسی بهتر گره‌های حسگر به گره‌های چاهک نسبت به مدل IMP-MECA مشکل دورافتادن سرخوشه‌ها از مرکز خوشه‌ها و اولویت انتخاب گره‌های میانی هر خوشه برای

سرخوشه شدن که در مدل MECA مشاهده شده است، به طور قابل توجهی برطرف می‌شود.

۴- نتایج شبیه‌سازی‌ها

به منظور ارزیابی مدل پیشنهادی، عملکرد آن در مطالعه‌های شبیه‌سازی با دو روش دیگر مقایسه شده است: یکی روش قبلی نویسندگان [۱] و دیگری روش MECA [۵]. هر سه مدل جهت مقایسه و ارزیابی کارایی با استفاده از شبیه‌ساز NS2 پیاده‌سازی شده‌اند. پارامترهای شبیه‌سازی در هر سه مدل مطابق با جدول ۱ در نظر گرفته شده است. مقادیر این پارامترها متناسب با سایر پارامترها و بعضی از مقادیر مقادیر پارامترهای مدل MECA مقادیردهی شده است [۵]. معیارهای ارزیابی کارایی بررسی شده در هر سه مدل عبارتند از: میانگین انرژی باقیمانده در میان گره‌های حسگر، مصرف انرژی کل و تعداد گره‌های فعال.

NP: Nondeterministic Polynomial

Fs= Free space

Mp= Multi-path fading

MECA: Mobile-sink based Energy-efficient Clustering Algorithm

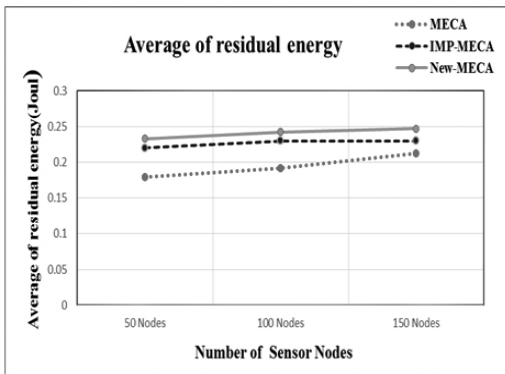
New-MECA: New-Mobile-sink based Energy-efficient Clustering Algorithm

IMP-MECA: Improved-Mobile-sink based Energy-efficient Clustering Algorithm

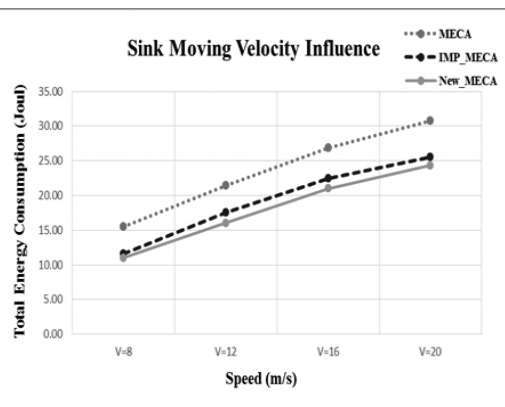
نمودارهای شکل ۵ تا شکل ۱۱ نتایج شبیه‌سازی‌ها و ارزیابی‌های مدل پیشنهادی با مدل‌های MECA و IMP-MECA را نشان می‌دهند. بر اساس نمودارهای شکل ۵ تا شکل ۷ مشاهده می‌شود که با افزایش چگالی شبکه (تعداد گره‌های حسگر) مدل پیشنهادی نسبت به مدل‌های MECA و IMP-MECA، از لحاظ میانگین انرژی باقیمانده، تعداد گره‌های فعال و انرژی مصرفی کل بهبود بیشتری داشته است. بر اساس نمودار شکل ۸ مشاهده می‌شود که در صورت افزایش سرعت حرکت چاهک‌ها در هر سه مدل، انرژی مصرفی کل در مدل MECA نسبت به دو مدل دیگر یعنی مدل پیشنهادی و مدل IMP-MECA افزایش داشته است. همچنین نمودارهای شکل ۹ تا شکل ۱۱ نشان می‌دهند

جدول ۱: پارامترهای مدل شبکه

نماد	پارامترها	مقدار
R_h	شعاع دایره (محیط شبکه‌های حسگر)	۲۳ متر
N	تعداد گره‌های حسگر	۱۰۰
l	طول بسته	۶۴ بیت
M	تعداد گره‌های چاهک	۶
r	محدوده انتقال هر گره حسگر	۵.۱ متر
R	محدوده انتقال هر گره چاهک	۲۰ متر
v	سرعت حرکت چاهک‌ها	۲۰ m/s
E_0	انرژی اولیه	۰.۵ Jouل
E_{elec}	انرژی مصرفی در مدار	۰.۰۰۰۰۵ nJ/bit
ϵ_{fs}	پارامتر کانال فضای باز	۰.۰۰۰۰۰۱۵ pJ/bit/m ²
ϵ_{ms}	پارامتر کانال چند مسیره	۰.۰۰۰۰۰۱۳ pJ/bit/m ⁴
	معیار شبیه‌سازی	{۱۰، ۲۰، ...، ۱۵۰}
	تعداد شبیه‌سازی	۲۰ مرتبه برای هر آزمایش



شکل ۷: تاثیر افزایش چگالی شبکه در میانگین انرژی باقیمانده

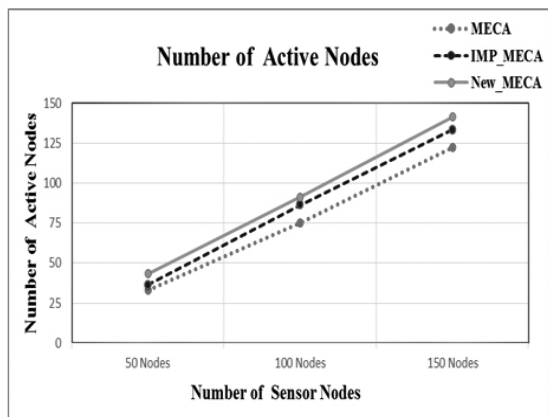


شکل ۸: تاثیر سرعت حرکت چاهک‌ها در مصرف انرژی کل

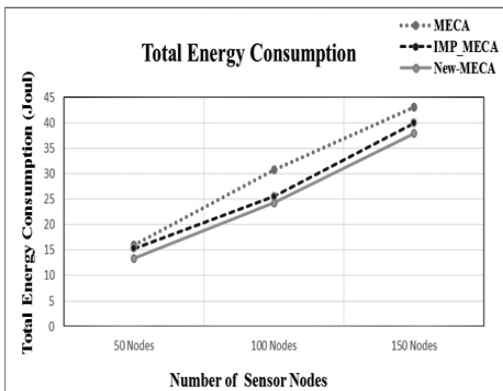
که تعداد گره‌های فعال و متوسط انرژی باقیمانده در مدل پیشنهادی با افزایش زمان توقف گره‌های چاهک نسبت به مدل‌های MECA و IMP-MECA افزایش داشته است. همچنین در این آزمایش مصرف انرژی کل در مدل MECA نسبت به مدل پیشنهادی و مدل IMP-MECA افزایش داشته است.

۵- نتیجه گیری

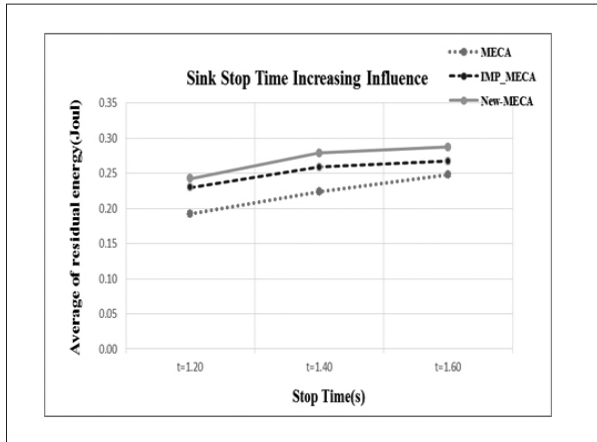
در مدل ارائه شده در این مقاله با در نظر گرفتن چندین مسیر حرکت متفاوت برای چاهک‌ها در امتداد شعاع ضلعی، این امکان برای سایر گره‌های حسگر فراهم می‌شود که مسیر حرکت چاهک را از قبل پیش‌بینی نمایند و با سرعت بیشتری به چاهک‌ها دسترسی داشته باشند. بنابراین با



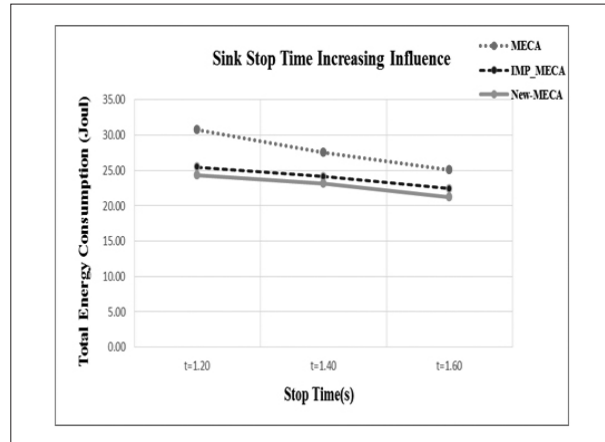
شکل ۵: تاثیر افزایش چگالی شبکه در تعداد گره‌های فعال



شکل ۶: تاثیر افزایش چگالی شبکه در مصرف انرژی کل



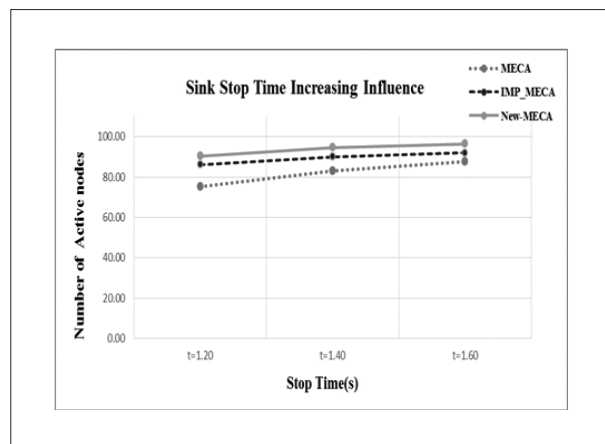
شکل ۱۱: تاثیر افزایش زمان توقف در میانگین انرژی باقیمانده



شکل ۹: تاثیر افزایش زمان توقف چاهک‌ها در مصرف انرژی کل

برای چاهک‌های متحرک در جهت کاهش مصرف انرژی. مجله علوم رایانشی انجمن انفورماتیک ایران. ۴

2. Chen, M., et al., Balanced itinerary planning for multiple mobile agents in wireless sensor networks. in International Conference on Ad Hoc Networks. 2010. Springer.
3. Kweon, K., et al., Grid-based energy-efficient routing from multiple sources to multiple mobile sinks in wireless sensor networks. in Wireless Pervasive Computing, 2009. ISWPC 2009. 4th International Symposium on. 2009. IEEE.
4. Marta, M. and M. Cardei, Improved sensor network lifetime with multiple mobile sinks. Pervasive and Mobile computing, 2009. 5(5): p. 542-555.
5. Wang, J., et al., Mobility based energy efficient and multi-sink algorithms for consumer home networks. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2013. 59(1): p. 77-84.
6. Akkaya, K., M. Younis, and M. Bangad, Sink repositioning for enhanced performance in wireless sensor networks. Computer Networks, 2005. 49(4): p. 512-534.
7. Somasundara, A.A., et al., Controllably mobile infrastructure for low energy embedded networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006. 5(8): p. 958-973.
8. Chinnappen-Rimer, S. and G. Hancke, Calculation of an optimum mobile sink path in a wireless sensor network. 2012: INTECH Open Access Publisher.
9. Guo, S., C. Wang, and Y. Yang, Joint mobile data gathering and energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014. 13(12): p. 2836-2852.
10. Zhao, M., Y. Yang, and C. Wang, Mobile data gathering with load balanced clustering and dual data uploading in wireless sensor networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015. 14(4): p. 770-785.
11. Vupputuri, S., K.K. Rachuri, and C.S.R. Murthy, Using mobile data collectors to improve network lifetime of wireless sensor networks with reliability constraints. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2010. 70(7): p. 767-778.
12. Zhang, Y., S. He, and J. Chen, Near Optimal Data Gathering in Rechargeable Sensor Networks with a Mobile Sink. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2016.



شکل ۱۰: تاثیر افزایش زمان توقف چاهک‌ها در تعداد گره‌های فعال

توجه به حرکت چاهک‌ها در دو ضلع هر خوشه و نزدیک بودن گره‌های حسگر به چاهک‌های متحرک تعداد گره‌های بیشتری برای سرخوشه شدن نامزد خواهند شد. در نتیجه مشکل دورافتادن سرخوشه‌ها از چاهک‌ها و اولویت انتخاب گره‌های میانی هر خوشه برای سرخوشه شدن که در مدل MECA یک محدودیت در انتخاب سرخوشه می‌باشد و در مدل IMP-MECA نیز به طور کامل رفع نشده است، برطرف می‌شود. همچنین با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها، مدل پیشنهادی از نظر میانگین انرژی باقیمانده، انرژی مصرفی کل و تعداد گره‌های فعال نسبت به مدل‌های MECA و IMP-MECA بهبود داشته است.

مراجع

امینی، سیده مولود و جبه داری، سام. ۱۳۹۵. ارائه یک مسیر حرکت مناسب