

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۰۹/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۲/۳۱

افزایش قابلیت اطمینان شبکه بیسیم با افزایش قدرت ارسال و کاهش مصرف انرژی

زهرا شیرمحمدی*

استادیار، دانشکده مهندسی کامپیوتر- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی- تهران- ایران
پست الکترونیکی: shirmohammadi@sru.ac.ir

الهه میربها

کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی کامپیوتر- دانشگاه صنعتی شریف - تهران - ایران
پست الکترونیکی: mirbaha@ce.sharif.edu

نظام رهبانی

پژوهشگاه دانش‌های بنیادی - تهران- ایران
پست الکترونیکی: rohbani@ipm.ir

چکیده:

بی‌سیم با برداشتگر انرژی، تفاوت در نرخ برداشت انرژی از محیط پیرامون هر گره، با توجه به شرایط محیطی است. در این پروژه تلاش شده است تا با بررسی کارهایی که در زمینه قابلیت اطمینان و افزایش طول عمر این شبکه‌ها صورت گرفته و با مقایسه معایب و مزایای آن‌ها، به راهکاری مؤثر برای ارسال مطمئن‌تر بسته‌ها در کنار افزایش طول عمر شبکه دست یابیم. راهکار ارائه شده بر پایه افزایش توان سیگنال ارسالی گره فرستنده است که با توجه به نرخ برداشت انرژی از محیط و پیش‌بینی آن در آینده صورت می‌پذیرد. به همین منظور ما تلاش کردیم تا با توجه به نرخ متغیری که برای برداشت انرژی از محیط وجود دارد، گره‌هایی که انرژی بیشتری از محیط می‌گیرند را شناسایی کنیم و از آن‌ها برای کمک به گره‌هایی که در شرایط نامساعدتری از لحاظ برداشت انرژی هستند،

شبکه‌های حسگر بی‌سیم به‌طور گسترده در کاربردهای نظارتی و کنترلی استفاده می‌شوند و به علت دور از دسترس بودن آن‌ها، طول عمر و قابلیت اطمینان در این شبکه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. یکی از عوامل تهدیدکننده قابلیت اطمینان در این شبکه‌ها انرژی ذخیره موجود در باتری گره است، برای کاهش این محدودیت، در برخی از شبکه‌های حسگر بی‌سیم امروزی از برداشتگر انرژی برای دریافت انرژی مورد نیاز از محیط پیرامون استفاده می‌شود. از سوی دیگر، ویژگی‌های برداشتگرهای انرژی، خصوصیات جدیدی به شبکه تحمیل می‌کند که چالش‌های جدیدی در افزایش قابلیت اطمینان ایجاد می‌نماید. از جمله مهم‌ترین خصوصیات شبکه‌های حسگر

* نویسنده مسئول

پیشرفت و توسعه روزافزون فناوری سیستم‌های الکترومکانیکی، ارتباطات رادیویی و الکترونیک دیجیتال، سبب گسترش گره‌های حسگر کوچک، کم‌مصرف، کم‌هزینه و چندکاره شده است. این گره‌ها می‌توانند محیط پیرامون خود را حس کنند، اطلاعات دریافتی از محیط را پردازش کنند و با یکدیگر از طریق بی‌سیم ارتباط داشته باشند.

اجزای اصلی یک گره حسگر شامل واحد حسگر، واحد پردازش، واحد ارسال و دریافت، واحد توان است. واحد حسگر، داده‌های محیطی را دریافت می‌کند، واحد پردازش، این داده‌های خام دریافتی را پردازش می‌کند و اطلاعات مورد نیاز را استخراج می‌کند و همچنین وظیفه مدیریت انرژی و مسیریابی را بر عهده دارد، واحد دریافت‌کننده و ارسال‌کننده اطلاعات، اطلاعات پردازش‌شده را دریافت و ارسال می‌کنند و واحد توان وظیفه رساندن انرژی به واحدهای مختلف گره را بر عهده دارد.

در بسیاری از روش‌های ارائه‌شده، مصرف کم‌تر انرژی بر ارسال مطمئن بسته‌ها ارجحیت داده شده است. محدودیت اصلی در این شبکه‌ها ضعیف بودن گره‌های آن از لحاظ سخت‌افزاری و همچنین محدودیت منبع تغذیه آن بوده است. اما پس از افزوده شدن امکان برداشت انرژی از محیط اطراف به این گره‌ها، اندکی از محدودیت منبع انرژی در این گره‌ها کاسته شده است [۴]-[۱]

امروزه بسیاری از پژوهش‌ها بر روی این شبکه‌ها برای بهره‌وری از این قابلیت جدید برداشت انرژی از محیط، اختصاص یافته است. نکته قابل توجه در این ارتقای توانایی گره‌ها، ویژگی و پیچیدگی رفتار این برداشتگر با توجه به نوع آن است، به طوری که بدون در نظر گرفتن رفتار برداشتگر و انرژی که از محیط برداشت می‌شود، نمی‌توان به طور مؤثر از آن استفاده کرد. از طرفی با استفاده از این امکان می‌توان شکافی را که بین افزایش طول عمر شبکه در اثر کاهش مصرف انرژی و قابلیت اطمینان در ارسال مطمئن بسته‌ها با توان بالا وجود دارد

استفاده کنیم. گره‌هایی که انرژی در دسترس بیشتری دارند، با افزایش توان ارسال خود، علاوه بر ارسال مطمئن بسته‌ها، باعث کاهش تعداد گره‌های شرکت‌کننده در رله کردن می‌شوند. انگیزش اصلی برای مطرح کردن این ایده، توجه به این مسئله است که در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، در واحد فرستنده، بخش‌های مختلفی وجود دارد که بخش اعظم انرژی مصرفی مربوط به آن‌ها است و مقداری ثابت است. بخش کمی از انرژی مصرفی مربوط به واحد توان سیگنال رادیویی است. بدین ترتیب، با افزایش توان رادیویی در واحد فرستنده، افزایش نمایی مصرف انرژی آن بخش، مقدار چشمگیری نخواهد داشت. از آنجایی که با پایان یافتن عمر هر گره‌ای که قادر به برداشت انرژی کافی از محیط نباشد، عمر شبکه و کارکرد درست آن تحت تأثیر قرار می‌گیرد، کاهش تعداد ارسال‌ها گره‌های با محدودیت انرژی، موجب افزایش طول عمر این گره‌ها و نهایتاً افزایش طول عمر شبکه خواهد شد. بدین ترتیب گره‌های با انرژی بیشتر، می‌توانند از شرکت دادن گره‌هایی که انرژی کمتری دارند، در مسیریابی جلوگیری کنند و به ذخیره انرژی آن‌ها و افزایش طول عمر شبکه کمک کنند. به این منظور، ما با اطلاع از میزان برداشت هر گره از محیط، توان ارسال آن را تغییر دادیم و برای جلوگیری اختلال در عملکرد لایه کنترل دسترسی رسانه، گره‌های همسایه را از این تغییر مطلع ساختیم. این اطلاع از افزایش توان ارسال، با اضافه کردن پارامتری در بسته ارسال صورت می‌گیرد و گره دریافت‌کننده نیز خود را با این توان جدید سازگار می‌کند. همچنین هم‌زمان با دریافت بسته از گره‌های همسایه، هر گره همسایه‌های پرنرژی خود را می‌شناسد و رفتار خود را متناسب با آن‌ها تغییر می‌دهد. با اعمال این روش، نسبت دریافت بسته‌های سالم در شبکه‌هایی با تراکم گره مختلف، به طور متوسط ۲۷٪ افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: قابلیت اطمینان، شبکه‌های حسگر

بی‌سیم، برداشتگر انرژی

کاهش داد. این دو عامل از هم مستقل نیستند، لذا این امکان وجود دارد که با در نظر گرفتن ویژگی‌های ذکر شده در این شبکه‌ها برای افزایش قابلیت اطمینان بهره برد [۴].

در کنار محدودیت‌های سخت‌افزاری که گره‌ها دارند، منبع انرژی تعیین‌کننده‌ترین بخش آن است. علت آن هم دور از دسترس بودن آن‌ها و عدم امکان تعویض باتری یا شارژ مجدد در صورت تمام شدن انرژی است. هم‌اکنون این مشکل در این گره‌ها به دلیل اضافه شدن بخش برداشتگر انرژی از محیط کاهش یافته است اما به شکل دیگری به پیچیدگی و محدودیت شبکه افزوده است. برداشتگر انرژی، خود مستقل از محیط پیرامون نیست و به دلیل یکنواخت نبودن انرژی موجود در محیط، با نرخ یکسانی از محیط انرژی برداشت نمی‌کند و حتی مقدار این انرژی برداشتی از محیط، قابل پیش‌بینی هم نیست. پیش از این، به دلیل این محدودیتی که در منبع انرژی وجود داشت، بخش قابل‌توجهی از کارهای انجام‌شده با هدف کاهش حداکثری مصرف انرژی بوده و کمتر به قابلیت اطمینان در این شبکه‌ها پرداخته می‌شد [۳].

اکنون با اضافه شدن این امکان در گره‌های حسگر، فرصت را برای کار در زمینه افزایش قابلیت اطمینان فراهم می‌کند ولی بر قابل پیش‌بینی نبودن این برداشتگرها در این روند اثر منفی دارد. از طرفی، از آن جا که بیش‌ترین مصرف انرژی در شبکه در واحد دریافت و ارسال رادیویی آن است، در انتخاب هرگونه روشی برای افزایش قابلیت اطمینان، این مسئله را باید در نظر داشت. همچنین افزایش فاصله ارسال بسته‌ها در مصرف انرژی گره تقریباً تأثیری متناسب با مجذور آن فاصله دارد [۳]، [۵].

در این مقاله، ما با تکیه بر اهمیت قابلیت اطمینان در شبکه حسگر بی‌سیم، و همچنین با توجه به محدودیت‌های این شبکه، بر آن شدیم تا با استفاده از برداشتگر انرژی و کاهش محدودیت، و البته با توجه به شرایط جدید که برداشتگر به همراه می‌آورد، از طریق افزایش قدرت سیگنال رادیویی، قابلیت اطمینان در شبکه حسگر بی‌سیم

را افزایش دهیم. این تلاش ما با تکیه بر این نکته است در که ساختار گره حسگر بی‌سیم، مقدار انرژی مربوط به بخش افزایش قدرت ارسال در گره بسیار ناچیز است و بیشتر انرژی مصرفی مربوط به دیگر بخش‌ها در واحد فرستنده است، در نتیجه با افزایش نمایی انرژی مصرفی به خاطر افزایش قدرت سیگنال، افزایش چشمگیری در مصرف انرژی نخواهد داشت.

به همین منظور ما با معرفی ماژول فرستنده‌ای که این رفتار در آن صادق است و انرژی مصرفی بخش مربوط به افزایش قدرت سیگنال رادیویی آن نسبت به سایر بخش‌ها در واحد فرستنده بسیار کمتر است، نشان می‌دهیم که با افزودن سربار انرژی بسیار کم افزایش قدرت سیگنال رادیویی، از مزایای بسیاری که این کار دارد در جهت افزایش قابلیت اطمینان بهره می‌گیریم. از طرفی این افزایش سیگنال در شبکه مشکلاتی هم‌چون افزایش ترافیک در تراکم گره بالا به وجود می‌آورد که در ادامه تلاش ما بر حل این مشکل و دیگر مشکلات احتمالی این کار است. در این مقاله با اطلاع از میزان برداشت هر گره از محیط، توان ارسالی آن تغییر داده شد و برای جلوگیری اختلال در عملکرد لایه کنترل دسترسی رسانه، گره‌های همسایه از این تغییر مطلع شدند. این اطلاع از افزایش توان ارسال، اضافه کردن پارامتری در بسته ارسالی صورت می‌گیرد و گره دریافت‌کننده نیز خود را با این توان جدید سازگار می‌کند. همچنین هم‌زمان با دریافت بسته از گره‌های همسایه، هر گره همسایه‌های پرانرژی خود را می‌شناسد و رفتار خود را متناسب با آن‌ها تغییر می‌دهد. با اعمال این روش، نسبت دریافت بسته‌های سالم در شبکه‌هایی با تراکم گره مختلف، به‌طور متوسط ۲۷٪ افزایش یافت

در ادامه به تحلیل قابلیت اطمینان در شبکه‌های حسگر بی‌سیم در بخش ۲ می‌پردازیم. بخش ۳ مسیریابی در شبکه بی‌سیم را بررسی می‌کند. پس از آن در بخش ۴ کارهای پیشین را معرفی می‌کنیم. سپس در بخش ۵ ایده پیشنهادی را معرفی می‌کنیم و در بخش ۶ به معرفی سیستم ارزیابی

و پیاده‌سازی می‌پردازیم. تحلیل نتایج را در بخش ۷ بیان می‌کنیم و کارهای آتی و جمع‌بندی را هم در بخش ۸ شرح می‌دهیم.

۲- قابلیت اطمینان در شبکه‌های حسگر بی‌سیم

قابلیت اطمینان در شبکه‌های حسگر بی‌سیم تعریف‌های متعددی دارد و در بخش‌های مختلف از گره حسگر تا کل شبکه بررسی می‌شود [۶]. قابلیت اطمینان در گره به منظور ساختن گرهی است که توانایی مقاومت در شرایط محیطی نامناسب را دارد و شامل تمام بخش‌های سخت‌افزاری گره می‌شود. اما به دلیل تعامل مستقیمی که این گره‌ها با محیط دارند و هزینه‌ای که به خاطر استفاده از این گره‌ها در تعداد زیاد صرف می‌شود، افزایش قابلیت اطمینان در این سطح مقرون به صرفه نیست. در واقع می‌توان این قابلیت اطمینان را در سطوح بالاتری از لایه‌های شبکه و در سطح لایه‌های کنترل دسترسی به رسانه انتقال و لایه کاربردی و مسیریابی در شبکه انجام داد. به طوری که به صورت محتاطانه‌ای گره‌ها با همکاری یکدیگر بتوانند عدم وجود یک گره را جبران کرده و مانع از عدم انجام وظیفه شبکه شوند که اغلب این کارها در قالب مسیریابی در شبکه صورت می‌گیرد [۶].

کارهای بسیاری نیز با تحت تأثیر قرار دادن بخش‌های مختلفی از لایه‌های شبکه تحت عنوان چارچوب عملیاتی ارائه شده‌اند [۷]. اغلب کارهایی که در شبکه انجام می‌شود به منظور افزایش طول عمر شبکه و قابلیت دسترس‌پذیری گره‌ها و قابلیت اطمینان و کیفیت خدمات صورت گرفته است. افزایش طول عمر شبکه به تعداد گره‌های فعال در آن بستگی دارد و متناسب با کاهش مصرف انرژی و استفاده درست از گره‌هایی است که انرژی کافی برای ارسال کامل داده‌های دریافت شده از محیط دارند. [۶]. کارهای زیادی نیز تحت عنوان افزایش قابلیت اطمینان در شبکه صورت گرفته است که توجه به بازیابی عملکرد شبکه پس از وقوع خرابی و یا خاموش شدن گره صورت می‌گیرد.

در هر شبکه‌ای مدت زمانی که طول می‌کشد تا شبکه همچنان عملکرد خود را انجام دهد متوسط زمان اولین خرابی^۱ می‌گویند که با متوسط زمان اولین خرابی در هر گره تفاوت دارد. علت آن هم این است که در شبکه‌ای می‌شود چندین گره خراب شود، و شبکه بتواند با رویکردهایی همچنان در غیاب آن‌ها کار خود را به درستی انجام دهد. معیار درستی در هر شبکه‌ای بستگی به کاربرد آن دارد و می‌تواند حد آستانه‌ای باشد که آن شبکه می‌تواند تعداد خرابی‌های گره‌های خود و از دست رفتن گزارش‌ها را تحمل کند. بدین ترتیب هرچه مقدار این زمان تحمل خرابی در شبکه بیشتر شود، به معنی افزایش متوسط زمان خرابی کل شبکه و افزایش قابلیت اطمینان آن خواهد بود. در واقع ارتباط افزایش قابلیت اطمینان و افزایش طول عمر شبکه از این جهت به هم وابسته هستند. کارهایی که با این هدف در شبکه انجام می‌شود اغلب به صورت کاهش بار ترافیکی شبکه و کاهش میانگین انرژی مصرفی در شبکه است [۸]. از آن جا که در شبکه‌های برداشتگر انرژی احتمال شارژ مجدد باتری‌ها خالی‌شده گره‌ها زیاد است، خراب شدن گره به دلیل تمام شدن باتری در نظر گرفته نمی‌شود و تنها حالتی که گره معیوب شود خراب‌شده تلقی می‌گردد. همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد، با توجه به آنچه که در دسته‌بندی کارهای انجام‌شده در حوزه قابلیت اطمینان در شبکه‌های حسگر بی‌سیم بیان کردیم، مدل خطا را در این شبکه‌ها به این صورت دسته‌بندی می‌کنیم. ۱- مدلی که خرابی یک گره موجب از دست رفتن رویدادهای اتفاق افتاده در این منطقه از شبکه می‌شود. ۲- مدلی که در آن بسته ارسال‌شده در مسیر دچار خرابی می‌شود و یا از دست می‌رود. ۳- مدلی که در آن انرژی گره پایان می‌یابد و به خواب می‌رود.

۳- مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم

وظیفه مسیریابی در شبکه، ارسال بسته‌ها میان دو گره است که در همسایگی یکدیگر قرار ندارند. بیش‌ترین

1-Mean Time To Failure (MTTF)

مصرف انرژی در بخش دریافت و ارسال بسته‌ها است و تمام مسیریابی‌های ارائه‌شده تلاش کرده‌اند تا مسیر بهینه را پیدا کنند تا با کاهش مصرف انرژی گره‌ها در شبکه، طول عمر شبکه افزایش یابد. این مسیریابی بهینه در برخی کارهای انجام‌شده کوتاه‌ترین مسیر بوده و در برخی کارها مسیری که کم‌ترین انرژی را مصرف کرده و در کارهای دیگر، پیدا کردن مسیری که گره‌ها انرژی بیشتری دارند. در دسته‌بندی کلی که برای مسیریابی‌ها می‌شود، انواع مسیریابی را به سه دسته تقسیم می‌کنند. این سه دسته عبارت‌اند از، مسیریابی در شبکه‌هایی که محوریت داده دارند، مسیریابی در شبکه‌های سلسله مراتبی و مسیریابی در شبکه‌های مبتنی بر موقعیت [۶] که ما در ادامه به بررسی و مقایسه دو مدل اول می‌پردازیم. مدل مبتنی بر موقعیت به دلیل این‌که در اکثر شبکه‌ها از مختصات گره‌ها اطلاعی نداریم بررسی نمی‌شود.

۳-۱- مسیریابی مبتنی بر محوریت داده

این مسیریابی، با مسیریابی‌هایی که در گذشته رایج بود و در آن نشانی برای هر گره وجود داشت و هر بسته به نشانی خاصی ارسال می‌شد، تفاوت دارد. در این مسیریابی درخواست و ارسال مبتنی بر رفتار است. به این صورت که هر درخواست برای ارسال و دریافت داده خاصی صورت می‌گیرد و به طوری که اگر گرهی آن نوع داده را حس کرد، آن را برای گره درخواست‌کننده ارسال می‌کند. از شناخته‌شده‌ترین این نوع مسیریابی، مسیریابی‌های سیل آسا^۲، شایعه‌ای^۳ (بر مبنای سیل آسا)، SPIN^۴؛ انتشار مستقیم^۵، شایعه‌ای^۶ (بر مبنای انتشار مستقیم) و یک نوع مسیریابی آگاه از انرژی^۷ است [۹] در مسیریابی سیل آسا، داده به همه همسایه‌ها ارسال می‌شود تا به کمک آن‌ها به دست گرهی که درخواست آن داده را داده بود برسد. این عمل باعث پر

شدن میانگیرهای گره‌ها در صورت دریافت چند داده یکسان از چند همسایه خواهد شد.

در SPIN، قضیه فرق می‌کند و ابتدا گرهی که حاوی داده است، به گره مجاور خود می‌دهد و آن گره اگر مایل به دریافت آن نوع از داده بود به آن گره پاسخ می‌دهد و سپس گره اول، داده خود را برای آن ارسال می‌کند تا این روال به همین ترتیب ادامه یابد.

در مسیریابی انتشار مستقیم [۱۰]، درخواست داده ابتدا از طرف گره چاهک است و بعد گره منبع تلاش می‌کند تا با بررسی نرخ داده و دوره و زمان منقضی شدن، گره درخواست‌کننده را پیدا کند و فقط برای آن گره مورد نظر داده را ارسال کند.

این مسیریابی آگاه از انرژی، نیازمند نشانی‌دهی برای گره‌هاست تا بتواند برای ارسال داده به گره‌های مورد نظر بر حسب هزینه مسیر برای ارسال به آن گره و مقدار انرژی آن گره، یک جدول مسیریابی تشکیل بدهد و با توجه به روابطی که بر اساس این مقدار انرژی و هزینه مسیر احتمالی ارسال برای هر گره را حساب کرده، متوسط انرژی مسیر ارسال به هر یک از گره‌ها را نیز حساب کند. الگوریتم شایعه‌ای (بر مبنای سیل آسا)، هنگامی که حجم داده ارسالی و تعداد رویدادها کم است استفاده می‌شود. الگوریتم به این صورت عمل می‌کند که هر گرهی که رویدادی را تشخیص داد، یک عامل در شبکه می‌فرستد تا اطلاع دهد که چه رویدادی مشاهده شده است، سپس این عامل به هر گرهی رسید که می‌خواهد آن رویداد را دریافت کند، فرستنده از طریق همین عامل که این بار مسیر را پیدا کرده، رویداد مورد نظر را برای گره درخواست‌کننده می‌فرستد.

۳-۲- الگوریتم‌های سلسله مراتبی

در بین الگوریتم‌های سلسله مراتبی، الگوریتم LEACH [۱۱] را بررسی می‌کنیم. در این الگوریتم، خوشه‌بندی سلسله مراتبی به این صورت انجام می‌شود که گره‌هایی که توان سیگنال ارسالی آن‌ها قوی‌تر است به عنوان

2-Flooding Routing

3-Gossiping

4-Sensor Protocols for Information via Negotiation

5-Directed Diffusion

6-Rumor Routing

7-Energy-aware routing

سرخوشه و سرخوشه‌های نزدیک به چاهک هم به‌عنوان مسیریاب منتهی به چاهک انتخاب می‌شوند که هر گره مستقیماً به یکی از این سرخوشه‌ها ارسال می‌کند که الزاماً فاصله مکانی کمی هم ندارند. بنابراین ارسال با این روش بهینه نخواهد بود و سبب کاهش سطح انرژی آن گره‌ها می‌شود. در این روش نیز به‌صورت دوره‌ای سرخوشه‌ها عوض می‌شوند تا انرژی گره‌ها متعادل شوند. تعداد این سرخوشه‌ها به‌طور معمول ۵٪ تعداد کل گره‌ها هست. انتخاب گره جایگزین نیز بر حسب تعداد دفعاتی است که انتخاب می‌شود. این پروتکل یکی از معروف‌ترین پروتکل‌های سلسله‌مراتبی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم است در این پروتکل زمان به قسمت‌های مساوی به نام دور تقسیم می‌شود. هر دور نیز به دو فاز تقسیم می‌شود. فاز اول، فاز راه‌اندازی نام دارد که در واقع فاز تشکیل خوشه‌ها است و فاز دوم مربوط به عملکرد عادی شبکه است که فاز حالت پایدار نام دارد.

در فاز اول بنابر یک تابع احتمال تطبیق، سرخوشه انتخاب می‌شود سرخوشه‌ها بدین صورت است که هر گره حسگر یک عدد بین صفر و یک انتخاب می‌کند. اگر این عدد کوچک‌تر از یک آستانه تعیین شده باشد، در طول آن دور آن گره به‌عنوان سرخوشه انتخاب می‌شود. این تابع احتمال طوری طراحی شده است که در ظرف تعداد مشخصی از دورها هر حسگر فقط یکبار سرخوشه شود و بدین صورت مصرف انرژی روی کل شبکه پخش می‌شود. پس از آن‌که در فاز راه‌اندازی هر دور، سرخوشه‌ها انتخاب شدند، هر سرخوشه انتخاب خود را به‌عنوان سرخوشه به سایر گره‌ها اعلام می‌کند و هر گره نیز سرخوشه مناسب برای خود را انتخاب می‌کند و این امر را به سرخوشه مربوطه اعلام می‌کند و بدین صورت خوشه‌ها شکل می‌گیرند. سپس هر سرخوشه برای حسگرهای خوشه خود برنامه‌ریزی زمانی انجام می‌دهد و برای هر حسگر یک برش زمانی تخصیص می‌دهد تا به‌واسطه آن از رخداد تصادم بین داده‌های حسگرهای هر

خوشه جلوگیری شود. همچنین برای جلوگیری از رخداد تصادم بین داده‌های خوشه‌های مختلف، از روش طیف گسترده با توالی مستقیم (DSSS) استفاده می‌گردد.

در فاز دوم هر حسگر داده خود را در بازه زمانی خودش می‌فرستد و سرخوشه پس از دریافت همه اطلاعات حسگرهای موجود در خوشه‌اش، آن‌ها را ترکیب کرده و به ایستگاه پایه می‌فرستد. با توجه به این‌که هر سرخوشه همه داده‌های حسگرهای موجود در خوشه را ترکیب می‌کند، در حجم داده‌های ارسالی به ایستگاه پایه و در نتیجه در مصرف انرژی صرفه جویی قابل توجهی به‌دست می‌آید.

۴- کارهای پیشین: ارتقای قابلیت اطمینان در شبکه‌های حسگر بی‌سیم

در ادبیات موضوعی، تعدادی از مقالات قابلیت اطمینان شبکه بی‌سیم را با بازیابی عملکرد شبکه در غیاب یک گره خاص افزایش داده‌اند. در مسیریابی‌هایی که پیکربندی آن به‌صورت خوشه‌ای است، سرخوشه یک نقطه از خرابی است و در صورتی که خراب شود علاوه بر از دست رفتن داده‌ها در آن بخش، تعدادی از زیرگره‌ها در آن خوشه نیز داده‌هایشان ارسال نخواهد شد و از شبکه جدا می‌شوند. [۱۱] [۱۲]

در روش دیگری که در [۱۳] ارائه شده است، تلاش می‌شود که با توجه به کاربردهای مختلفی که گره‌ها دارند، در صورت خرابی یک گره، گره‌های دیگر در غیاب آن، عملکرد آن را انجام دهند. به همین دلیل علاوه بر این‌که در صورت خرابی یک گره هنوز عملکرد آن در شبکه انجام می‌شود و در واقع قابلیت اطمینان شبکه کاهش نمی‌یابد، انرژی کمتری با توجه به کاهش تعداد گره‌ها مصرف می‌شود. علت آن هم همان‌طور که گفته شد، کمتر بودن انرژی مصرفی در واحد پردازش نسبت به واحد ارسال و دریافت است. از طرفی به دلیل محدودیت انجام پردازش توسط هر گره، باید در نظر گرفته شود که این پردازش

سنگین نباشد. این روش در شبکه‌هایی که این امکان جبران عملکرد یک گره توسط دیگر گره‌ها امکان‌پذیر است. از طرفی ممکن است اطلاعات در آن منطقه‌ای گره حذف شده است با منطقه‌ای که گره‌های جبران‌کننده در آن قرار دارند متفاوت باشد، در نتیجه بازیابی اطلاعات با خطا همراه خواهد بود.

یکی از کارهایی که برای افزایش قابلیت اطمینان در ارسال بسته‌ها در شبکه‌های حسگر انجام می‌شود، ارسال دوباره بسته‌ها در صورتی که تأیید آن به گرهی که ارسال شده است، نرسیده باشد. این ارسال مجدد می‌تواند توسط خود گره ارسال‌کننده باشد و یا این‌که توسط یک گره همکار باشد. این گره همکار، گرهی است که شرایط بهتری از لحاظ سطح انرژی دارد [۱۴]. این کار اگر با استفاده از ویژگی برداشتن انرژی گره همراه باشد کارایی بهتری خواهد داشت. در [۱۵] با استفاده از همین ایده اولیه تکرار خودکار درخواست و کمک گرفتن از یک گره با انرژی بیشتر در صورت خرابی بسته‌های ارسالی، در جهت بهره‌وری از انرژی دریافتی از محیط و استفاده از این امتیاز برای افزایش قابلیت اطمینان تلاش می‌کند. در مورد ابتدایی این الگوریتم ارسال مجدد توسط خود گره ارسال‌کننده صورت می‌گیرد و در مدل بهبودیافته آن، برای بار اول، این ارسال توسط گره همکار و در دفعات بعد توسط خود گره اصلی صورت می‌گیرد. در این مقاله روش C-ARQ^۹ که در واقع بهبودی است به کارهای قبلی، به این صورت این انتخاب انجام می‌شود که گرهی که دارای قابلیت بیشتری در دریافت انرژی از محیط است باید به عنوان گره همکار انتخاب شود. در اینجا با محاسبه نرخ برداشت از محیط با توجه به طیف‌های موجود، انرژی مؤثر یک گره را که ترکیبی است از انرژی باقی‌مانده در باتری و نرخ برداشت از محیط، محاسبه می‌کند. در این مقاله سعی شده است که در مصالحه‌ای که بین افزایش قابلیت اطمینان و صرفه‌جویی در مصرف انرژی وجود دارد، به قابلیت اطمینان اهمیت بیشتری بدهد و اثر آن را بیشتر کند.

8-Cooperative Automatic Repeat Request

در کار دیگری که جهت ارسال مطمئن داده از گره حسگر به سمت چاهک صورت می‌گیرد، از ترکیب روش افزونگی اطلاعات و استفاده از کدهای تصحیح اشکال^۹ در کنار ارسال مجدد در سطح لایه پیوند داده^{۱۰} به جای ارسال داده از مبدأ استفاده می‌شود [۱۶]. در [۱۷]، کاری با عنوان میان‌افزار تشخیص تطابق درخواست و داده با هدف افزایش قابلیت اطمینان در ارسال بسته‌هایی است که توسط حسگر تولید می‌شوند، انجام شده است. در این کار همچنین تلاشی برای افزایش قابلیت دسترس‌پذیری گره‌ها در شبکه صورت می‌گیرد. در این مقاله با بررسی و توجه به این موضوع که بخش اصلی مصرف انرژی در گره‌ها در واحد ارتباط رادیویی صورت می‌گیرد، تلاش شده است تا علاوه بر این‌که تعداد ارسال‌ها محدود شود، همه داده‌های دریافت شده توسط حسگرها به مقصد، یعنی چاهک برسد. تا کنون برای جلوگیری از ارسال داده‌های تکراری، از سازوکار تجمیع داده توسط گره سرخوشه در صورتی که به اندازه کافی انرژی داشته باشد استفاده می‌شد.

از آن جا که در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با برداشتن انرژی، از منبع انرژی موجود در محیط تأثیر می‌پذیرد و از ویژگی‌های این انرژی متفاوت بودن مقدار آن در نقاط مختلف است، لذا برای این شبکه، مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی متناسب است. در [۶] تلاش شده است تا با استفاده از برداشتن انرژی، بهبودی را در الگوریتم مسیریابی خوشه‌بندی LEACH ارائه دهد. این الگوریتم AEHAC^{۱۱} نامیده.

با توجه به راهکارهای مختلفی که برای افزایش قابلیت اطمینان در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مطرح شد و همچنین اهمیت آن در کاربردهای مختلف، همچنان قابلیت اطمینان از چالش‌های اصلی در شبکه حسگر بی‌سیم به حساب می‌آید. با این حال، افزایش قابلیت اطمینان در شبکه حسگر بی‌سیم به دلیل محدودیت‌های سخت‌افزاری به‌خصوص انرژی

9-Erasure Code

10-Link Level Retransmission

11-Adaptive Energy-Harvesting Aware Clustering

۱۰. در نهایت، مختل شدن عملکرد شبکه حسگر بی‌سیم کاهش عمر مفید آن

اکنون با افزودن برداشتگر به گره حسگر بی‌سیم این امکان وجود دارد که با کم کردن این محدودیت انرژی در گره حسگر بی‌سیم، بتوان در جهت افزایش قابلیت اطمینان در عملکرد شبکه حسگر بی‌سیم تلاش کرد. مسئله قابل توجه این است که افزودن برداشتگر خود شرایط متفاوتی را در شبکه ایجاد می‌کند. همان‌طور که در گذشته نیز اشاره شد، به دلیل خصوصیتی که برداشتگرها دارند، متناسب با محل قرارگیری گره‌ها، سالم یا خراب شدن برداشتگر و شرایط محیطی، سهم متفاوتی از انرژی محیط در اختیار هر گره قرار می‌گیرد. همچنین این خصوصیات برای هر گره ثابت و دائمی نیست و بسته به نوع برداشتگر، در زمان‌های مختلف متفاوت است. در واقع استفاده از برداشتگر سبب می‌شود که نه تنها شبکه حسگر بی‌سیم همگن به شبکه‌ای ناهمگن با گره‌هایی با توانایی متفاوت ایجاد کند، بلکه این توانایی در گره‌ها در طول زمان عملکرد شبکه یکسان و یکنواخت نباشد.

مهم‌ترین پارامتری که ما را برای بهره بردن و به‌کار بردن ایده مورد نظر هدایت می‌کند، افزایش قابلیت گره و مجهز شدن به برداشتگر انرژی است. همان‌طور که گفته شد، در کارهای پیشین، تلاش در جهت افزایش کارایی و قابلیت اطمینان گره با زیاد کردن توان، آثار مخربی بر سطح انرژی گره و طول عمر گره و شبکه حسگر بی‌سیم دارد. اما اکنون با بهره‌گیری از این قابلیت، بخشی از محدودیت گره حسگر بی‌سیم کاسته شده و راه را برای ایده‌هایی که انرژی مصرفی را تحت تأثیر قرار می‌دهد باز گذاشته است.

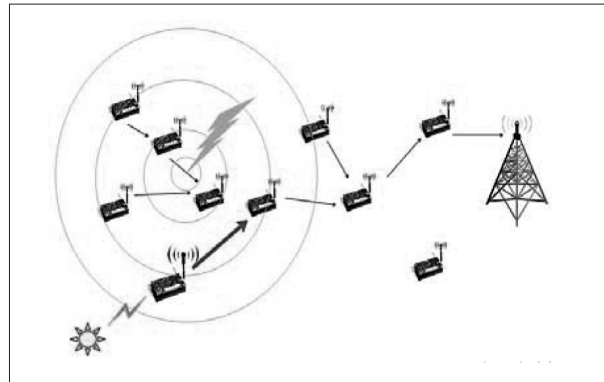
ما نیز در این مقاله با کمک گرفتن از این مزیت و کاهش محدودیت انرژی گره، سعی کردیم به بهبود قابلیت اطمینان در گره و شبکه حسگر بی‌سیم بپردازیم. عواملی که ممکن است یک برداشتگر در گره‌های مختلف شرایط متفاوتی را ایجاد کند عبارتند از:

محدود در گره‌ها مشکلاتی همچون کاهش طول عمر گره و شبکه حسگر بی‌سیم را به همراه خواهد داشت. زیرا تلاش در جهت افزودن قابلیت اطمینان همواره با افزودن انرژی در گره حسگر بی‌سیم، مسیریابی و یا چاهک صورت گرفته است که اکثراً با سربار سخت‌افزاری، نرم‌افزاری و یا افزایش مصرف انرژی صورت می‌گیرد. پس از آن تلاش برای قابلیت اطمینان، به‌صورت تلاش برای خنثی کردن اثرات سوء ناشی از افزودن انرژی صورت می‌گیرد. همچنین دور از دسترس بودن شبکه‌های حسگر بی‌سیم، سبب شده است که امکان تعمیر و بازیابی آن توسط کاربر وجود نداشته باشد و شبکه باید بتواند خود را با شرایط متفاوت وفق دهد. همکاری و وابستگی گره‌ها در شبکه نیز، سبب می‌شود که هر رفتاری که هر گره در شبکه داشته باشد بر عملکرد سایر گره‌ها و عملکرد کل شبکه حسگر بی‌سیم تأثیر بگذارد [۱۸].

۵- انگیزش: تأثیر انرژی گره و برداشت انرژی بر قابلیت اطمینان شبکه

اگر بخواهیم رابطه کاهش انرژی گره حسگر بی‌سیم را با کاهش قابلیت اطمینان در شبکه حسگر بی‌سیم بیان کنیم که به‌صورت اختلال در عملکرد گره حسگر بی‌سیم و در نهایت شبکه حسگر بی‌سیم خواهد بود، عبارت‌اند از:

۱. کاهش قابلیت اطمینان حسگر به دلیل ناتوانی در دریافت داده‌های درست از محیط
۲. کاهش دوره کاری و از دست دادن رویدادهای رخ داده پیرامون گره حسگر بی‌سیم
۳. عدم توانایی گره در ارسال بسته‌ها
۴. ناتوانی در پردازش صحیح داده‌ها
۵. کاهش طول عمر آن گره
۶. کاهش پوشش شبکه از گره‌های حسگر بی‌سیم
۷. خارج شدن یک منطقه از محدوده شبکه حسگر بی‌سیم
۸. از دست رفتن رویدادهای رخ داده در آن منطقه
۹. قطع شدن ارتباطات بین گره‌ها با خاموش شدن گره‌های میانی



شکل ۱. افزایش توان ارسالی گره پر انرژی و ارسال بسته‌های با قابلیت اطمینان بیشتر

فرستنده، شرایطی ایجاد کنیم تا سبب بهبود قابلیت اطمینان در شبکه حسگر بی‌سیم بشود.

بر اساس استانداردها افزایش قدرت سیگنال فرستنده، اثرات مطلوبی در افزایش قابلیت اطمینان در شبکه حسگر بی‌سیم دارد. [۱۸]. این کار سبب می‌شود بسته‌هایی که با توان بیشتر ارسال می‌شوند، اثرات تداخل و هم‌شنوایی و نوفه محیط، تأثیر کمتری در خرابی و از دست رفتن آن‌ها داشته باشند. بدین ترتیب این افزایش قدرت ارسال، تأثیر بسزایی در افزایش قابلیت اطمینان دارد. یکی از مهم‌ترین تأثیراتی که افزایش توان ارسالی بر قابلیت اطمینان دارد، ارسال داده‌های با احتمال خراب شدن کمتر است. هر چه قدر که بسته‌های ارسالی با توان کمتری ارسال شوند، احتمال تأثیرپذیری آن بسته‌ها از نوفه محیط بیشتر شده و احتمال آن‌ها که آن‌ها، خراب به مقصد برسند بیشتر است. برای مثال در شکل ۱، یک شبکه حسگر بی‌سیم با تعدادی گره حسگر بی‌سیم در آن مشاهده می‌کنید که یکی از گره‌های حسگر توانسته است با دریافت انرژی بیشتر از محیط، با توان بیشتری بسته‌های خود را ارسال کند و احتمال از دست رفتن آن بسته‌ها را کاهش دهد و قابلیت اطمینان داده‌های خود را افزایش دهد.

مزیت دیگر این افزایش قدرت ارسال، افزایش فاصله‌ای است که هر گره می‌تواند بسته‌هایش را ارسال کند. که سبب می‌شود گره‌های کمتری در ارسال شرکت کنند و گره‌های میانی نادیده گرفته بشوند. در حالت ساده، اگر برای هر گره، قابلیت اطمینان $R_i(t)$ در نظر بگیریم و از گره فرستنده تا گیرنده به تعداد N گره در مسیر باشد، قابلیت اطمینان این تعداد گره در کل مسیر از ابتدا تا انتها را $R_S(t)$ می‌نامیم که به صورت رابطه (۱) خواهد بود. در واقع با زیاد شدن تعداد گره در مسیر، قابلیت اطمینان کل، کاهش می‌یابد.

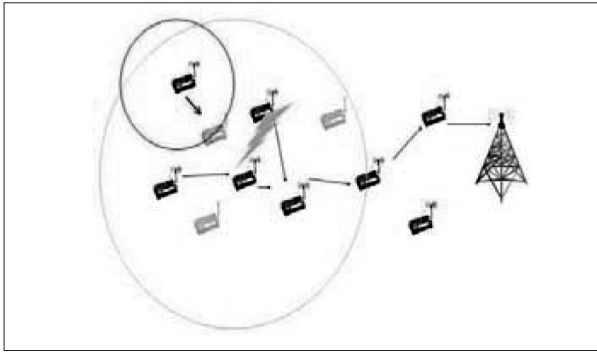
$$R_S(t) = \prod_{i=1}^N R_i(t) \quad (1)$$

از طرفی، کاهش تعداد گره‌های میانی در مسیر سبب می‌شود تا زمان کوتاه‌تری ارسال صورت گیرد. در برخی

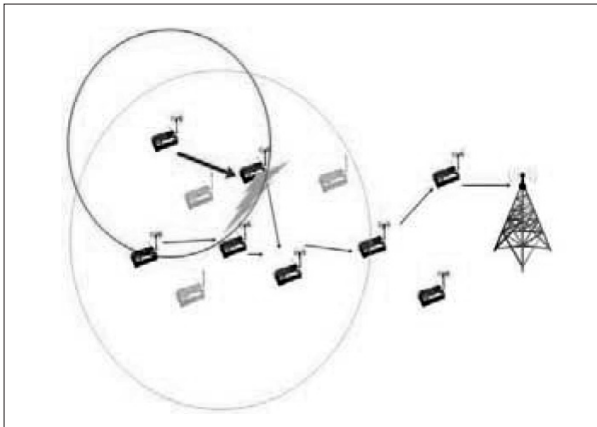
۱. خراب شدن تمام یا بخشی از برداشتگر که سبب می‌شود عملکرد آن تحت تأثیر قرار گیرد.
 ۲. قرار گرفتن گره‌ها در شرایط مختلف محیطی که مقدار جذب انرژی از محیط متفاوت باشد.
 ۳. ماهیت خود منبع انرژی که موجب می‌شود در بازه‌های مختلف و مکان‌های مختلف مقدار انرژی متفاوتی را در اختیار قرار دهد.
 ۴. استفاده به موقع از برداشتگر در زمان ذخیره و یا استفاده مستقیم وقتی که ذخیره انرژی صورت نمی‌گیرد.
- با وجود این شرایط، بهترین کار، استفاده بهینه از برداشتگر جهت بهبود پارامترهای شبکه حسگر بی‌سیم است. این استفاده بهینه مستلزم اتخاذ تصمیم‌های درست در رفتار گره در رابطه با برداشتگر و عملکرد آن است. با در نظر گرفتن این نکات، می‌توان از برداشتگر به عنوان یک مزیت جهت بهبود شرایط شبکه و قابلیت اطمینان استفاده کرد. از طرفی هر گونه تلاش در جهت افزایش قابلیت اطمینان که با افزودن سخت‌افزار، نرم‌افزار یا افزایش مصرف انرژی همراه است و بدون در نظر گرفتن این خصوصیات برداشتگر در جهت جبران انرژی مصرفی افزوده شده، سبب کاهش مضاعف قابلیت اطمینان خواهد شد [۱۹]

۶- ایده پیشنهادی: انتقال داده با توان بالا و کاهش انرژی

در این مقاله، ما قصد داریم تا با افزایش قدرت سیگنال



شکل ۲: جدا افتادن گره از شبکه به دلیل خاموش شدن گره همسایه رابط با شبکه



شکل ۳: بازگشت گره جدا افتاده از شبکه با افزایش قدرت و محدوده ارسال

حداکثری از این تفاوت در زمان و مکان برای گره‌های مختلف است.

در شرایط نرمال که گره‌ها شرایط یکسانی دارند، همگن هستند و باتری آن‌ها یک اندازه است، بهترین کار، تقسیم وظایف به‌طور یکسان و در جهت مصرف انرژی یکسان است و تلاش‌های بسیاری صورت گرفته تا گره‌هایی که کمتر در ارتباطات شبکه حسگر بی‌سیم فعالیت دارند قسمتی از بار کاری شبکه را بر عهده بگیرند. به همین دلیل توان گرهی که دارای انرژی مؤثر بیشتری است، گرهی که با نرخ بیشتر انرژی از محیط دریافت می‌کند و انرژی حالت جاری آن بیشتر است را زیاد می‌کنیم. این کار سبب می‌شود تا از انرژی که آن گره به مقدار بیشتری دریافت می‌کند حداکثر استفاده صورت گیرد و به حد قابل قبولی از بهبود قابلیت اطمینان به خاطر افزایش توان ارسال دست یابیم. همچنین این تقسیم وظایف و زیاد کردن بار

کاربردها، تأخیر در ارسال بسته‌ها منجر به بروز فاجعه خواهد شد. به همین دلیل، با توجه به اهمیت زمان در برخی کاربردهای بی‌درنگ، کاهش تأخیر در این کاربردها به منزله افزایش قابلیت اطمینان خواهد بود و سبب بهبود عملکرد شبکه می‌شود.

از دیگر اثرات مثبت افزایش توان سیگنال ارسالی و افزایش فاصله ارسال، افزایش پوشش شبکه است. در شرایطی که قرارگیری گره‌ها در محیط به صورت تصادفی و بدون مهندسی قبلی صورت بگیرد و تعدادی گره در فواصل دورتر و خارج از دسترس دیگر گره‌ها باشند، ارتباط آن‌ها با شبکه قطع خواهد شد و رویدادهایی که در آن منطقه از شبکه رخ می‌دهد گزارش نخواهند شد. این حالت برای گره‌هایی که همسایه‌های آن‌ها خاموش و یا خراب شوند نیز رخ می‌دهد و آن گره‌ها از شبکه جدا می‌افتند. در این شرایط برای جبران جدا افتادگی گره‌ها در شبکه، این نیاز احساس می‌شود تا با افزایش قدرت ارسال، این گسستگی جبران شود تا آن گره‌ها بتوانند با زیاد کردن فاصله ارسال خود، با دیگر گره‌ها در شبکه ارتباط داشته باشند.

برای مثال در شکل ۲ یکی از گره‌ها که محدوده ارسال آن با رنگ قرمز نشان داده شده است به دلیل خاموش شدن گره همسایه خود از شبکه به دور افتاده است و بسته‌ها و داده‌های رخ داده در آن منطقه امکان ارسال به سمت چاهک را ندارند. اما این گره در شکل ۳، با افزایش توان ارسال خود، محدوده ارسال خود و تعداد گره‌های همسایه خود را افزایش داده است که سبب شده داده‌های آن منطقه از دست نروند و از طریق همسایه‌های جدیدش ارسال شوند.

۶-۱- متعادل کردن بار کاری گره‌ها با توجه به برداشت انرژی از محیط

همان‌طور که گفته شد، استفاده از برداشتگر سبب می‌شود تا گره‌های مختلف، در زمان‌های مختلف عملکرد متفاوتی داشته باشند. اکنون ایده ما تلاش برای استفاده

کاری گره پر انرژی، به دیگر گره‌های کم‌توان این امکان را می‌دهد تا انرژی خود را ذخیره کنند و عمرشان کاهش نیابد و در دوره بعدی برداشت انرژی خود، در شبکه ایفای نقش بکنند.

۶-۲- افزایش قابلیت اطمینان با افزایش قدرت ارسال و کاهش مصرف انرژی

با زیاد کردن قدرت ارسال، این بار گره‌ها می‌توانند با دقت بیشتری رویدادهای رخ داده در محیط را حس کنند. قابلیت شنیدن رویدادهایی در فاصله طولانی‌تر از قبل، ارسال صحیح و با خطای کمتر بسته‌ها و بدون در نظر گرفتن معایب افزایش مقدار جریان مصرفی در مقایسه با توان ارسال در معماری توان، بر قابلیت اطمینان به چندین دلیل و در چند حوزه از گره حسگر بی‌سیم تا کل شبکه و کارکرد آن اثر مثبت دارد.

تاکنون به دلیل محدودیت باتری گره در شبکه حسگر، افزایش توان ارسال مقرون به صرفه نبوده است. یکی از معایب اشاره‌شده حاصل از افزایش توان گره حسگر بی‌سیم، کاهش انرژی آن و متناسب با آن، کاهش عمر گره و شبکه حسگر بی‌سیم است. در واقع، مهم‌ترین ضرری که افزایش توان ارسال دارد، زیاد شدن مصرف انرژی با نسبتی از دو تا چهار برابر مقدار توان زیاد شده است.

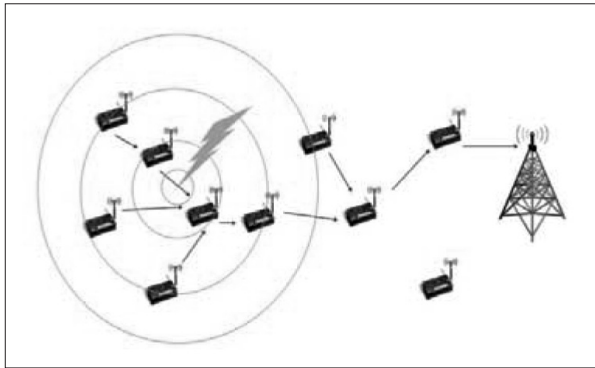
این افزایش مصرف انرژی با افزایش توان، اگرچه سبب کاهش قابلیت اطمینان گره و شبکه حسگر بی‌سیم می‌شود ولی اگر بتوان این مصرف انرژی را مدیریت کرد، همچنین این افزایش مصرف انرژی در مقابل بهبود قابلیت اطمینان چشمگیر نباشد و پارامترهایی همچون طول عمر شبکه را تحت تأثیر قرار ندهد، می‌توان از مزایای افزایش توان ارسال در جهت افزایش قابلیت اطمینان بهره برد.

نکته قابل توجه این است که اگرچه در تمام شبکه‌های بی‌سیم، افزایش مصرف انرژی به‌صورت نمایی متناسب با زیاد شدن توان ارسال است، اما در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، مقدار انرژی که صرف توان ارسال می‌شود در مقایسه با کل انرژی مصرفی که در بخش ارسال و

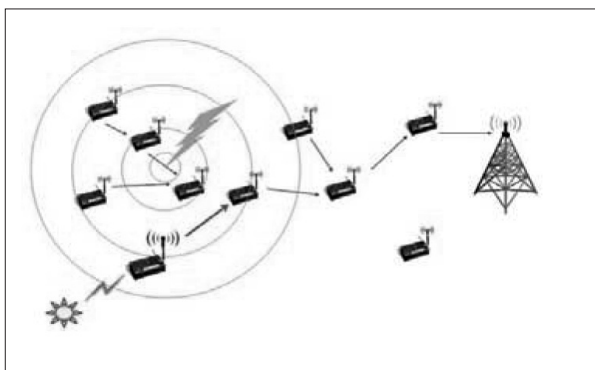
دریافت مصرف می‌شود بسیار اندک است و زیاد شدن انرژی آن بخش به‌صورت نمایی افزایش محسوسی نخواهد داشت. در بخش فرستنده و گیرنده هر گره حسگر بی‌سیم بخش‌های زیادی هستند که قسمت اعظم مصرف انرژی توسط آن‌ها صورت می‌گیرد و این مقدار ثابت و مشخص است و ارتباطی با مقدار توان و قدرت ارسال ندارد. بخش کوچکی از این انرژی مصرفی در بخش توان ارسال مصرف می‌شود که افزایش نمایی آن تأثیر بسزایی در افزایش مصرف انرژی ندارد. اما در شبکه‌های معمول بی‌سیم، سهم انرژی مصرفی از توان ارسال زیادتر است که افزایش نمایی انرژی آن بخش، جهت بهبود قابلیت اطمینان مقرون به صرفه نخواهد بود و چالش افزایش انرژی مصرفی را تشدید می‌کند.

این شرایط گفته شده در ماژول‌های پرکاربردی که در بخش ارسال و دریافت گره حسگر بی‌سیم نیاز است، صادق است. برای نمونه در CC2440 [۲۰] و nRF24LE1 [۲۱]، پارامترهای توان ارسال و انرژی مصرفی در حالت‌های مختلف قدرت ارسال برای دو ماژول ارسال و دریافت، افزایش جریان مصرفی نسبت به افزایش توان ارسال به‌صورت نمایی با توان دو یا بیشتر نبوده است. علت آن هم افزایش بخش کوچکی از انرژی مصرفی گره، که به بخش افزایش توان تعلق دارد، است. لذا با توجه به مزایایی که برای ایده مورد نظر نام بردیم، این بهبود نسبت به این مقدار افزایش انرژی به صرفه است.

به همین دلیل ایده پیشنهادی ما بر این اساس صورت می‌گیرد که از گره‌هایی که به دلیل داشتن برداشتگر انرژی، انرژی بیشتری دارند و می‌توانند در ارتباطات در شبکه حسگر بی‌سیم مؤثر باشند، استفاده بیشتر بکنیم و بتوانیم با بیشتر کردن توان ارسال آن‌ها از مزیت‌های گفته‌شده جهت افزایش قابلیت اطمینان بهره ببریم. در واقع تلاش ما بر این است که با کمک گرفتن از این گره‌های مستعد، بتوان گره‌های دیگر را که چنین توانی ندارند از مشارکت در ارتباطات حذف کنیم. بدین ترتیب تعداد ارسال‌ها کم



شکل ۴: شبکه حسگر بی سیم و ارسال‌های متعدد و افزایش ترافیک به خاطر روی دادن یک رخداد



شکل ۵: افزایش توان ارسالی گره پر انرژی و کاهش تعداد ارسال‌ها

ارسال و دریافت‌های درخواست‌ها شرکت می‌کنند و در معرض اتمام انرژی هستند استفاده شده است؛ اما با توجه به این امکان برداشت انرژی، این کار برای گره‌های دیگر نیز می‌تواند صورت بگیرد.

در شکل ۴ یک شبکه حسگر بی سیم را مشاهده می‌کنیم که به ازای رخ دادن یک رویداد، تعداد زیادی از گره‌ها آن را اطلاع می‌دهند و حجم ترافیک شبکه و مصرف انرژی کل بسیار بالا است. اما در شکل ۵ همین وضعیت، برای وقتی که یکی از گره‌ها به دلیل دریافت انرژی از محیط ظرفیت بیشتری دارد، با توان بیشتری بسته را ارسال می‌کند و از ارسال‌های زیاد از چند گره می‌کاهد که علاوه بر کاهش انرژی مصرفی کل، ترافیک شبکه و احتمال خرابی بسته‌ها کاهش می‌یابد.

بدین ترتیب به‌طور خلاصه بیان به مزایا و معایب این ایده می‌پردازیم.

مزیت‌ها: افزایش توان سیگنال ارسالی سبب ارسال

می‌شود و انرژی گره‌های کم‌توان ذخیره می‌شود. این ایده برای شبکه‌هایی که برداشتنگ دارند و تا حدودی قابل پیش‌بینی هستند مناسب‌اند. برداشتنگ خورشیدی یکی از این مثال‌ها است که می‌تواند به بهبود قابلیت اطمینان با در اختیار قرار دادن انرژی بیشتر کمک کند. در مطالعاتی که تاکنون داشته‌ایم این ایده‌ها در این سطح در شبکه حسگر بی سیم با قابلیت برداشت انرژی انجام نشده است.

تأثیر مهم دیگری که این افزایش توان ارسال دارد افزایش محدوده ارسال آن و افزایش گره‌هایی است که در محدوده همسایگی آن گره قرار دارند. بدین ترتیب گره حسگر این بار می‌تواند با افزایش توان ارسال، بسته‌های خود را به گره‌های همسایه‌ای که در فاصله طولانی‌تری هستند ارسال کند. این کار سبب کاهش تعداد ارسال‌ها با کاهش تعداد گره‌های درگیر ارسال صورت می‌گیرد. هر چه قدر ارسال یک بسته توسط گره‌های بیشتری صورت بگیرد در مجموع، انرژی بیشتری مصرف می‌شود. برای مثال، با افزایش توان ارسال، بسته‌هایی که از مسیری به واسطه سه گره قابل ارسال بودند، اکنون از طریق دو گره می‌تواند ارسال شود. با توجه به تأثیرات نامطلوبی افزایش مصرف انرژی بر کاهش قابلیت اطمینان دارد و همچنین توضیحاتی که پیرامون مقدار انرژی مصرفی در اثر افزایش فاصله ارسال با نادیده گرفتن گره‌های میانی، نسبت به زمانی که در فواصل کوتاه‌تر اما توسط تعداد گره بیشتر، صورت گرفت، این کاهش مصرف انرژی سبب افزایش قابلیت اطمینان در گره حسگر و شبکه حسگر بی سیم می‌شود.

این افزایش توان سیگنال باید با بررسی سطح انرژی خود گره مورد نظر و گره‌های همسایه آن صورت بگیرد. به‌طوری که انرژی مؤثر گره مورد نظر برای افزایش توان ارسال، در سطح قابل قبول باشد و همسایه‌های اطراف آن گره ضعیف و نیازمند پوشش^{۱۲} و نیازمند ارسال اطلاعات به جای آن‌ها باشند. این کار تاکنون برای کمک به گره‌های نزدیک چاهک که در تمام

12-cover

مطمئن‌تر بسته‌ها می‌شود. این ارسال مطمئن با کاهش نرخ خرابی بسته سبب افزایش قابلیت اطمینان در کل شبکه خواهد شد. همچنین سبب می‌شود تا انرژی مصرفی گره‌هایی که سطح انرژی کم‌تری دارند ذخیره شود. همچنین با افزایش فاصله ارسال بسته توسط هر گره، این امکان وجود دارد که به جای این‌که بسته‌ای که قبلاً توسط چند گره پشت هم ارسال می‌شد، این بار این تعداد دفعات ارسال کمتر می‌شود.

علت آن هم این است که در هر بار ارسال از هر گره، متغیر قابلیت اطمینان کمتر می‌شود و اگر بتوان این مسیر را کوتاه‌تر کرد، این مقدار قابلیت اطمینان بیشتر می‌شود. در واقع این ایده با در نظر گرفتن انرژی گره‌ها، سبب کمک به گره ضعیف‌تر و جلوگیری از خاموش شدن آن‌ها و از دست رفتن رویدادهای رخ داده در آن منطقه شود. در نتیجه مانع از پوشش ناقص آن منطقه از گزارش رویدادهای رخ داده می‌شود. در نهایت هم به افزایش طول عمر شبکه و افزایش قابلیت اطمینان آن منجر خواهد شد. در این حالت اگر همسایه گره‌ای که تنها رابط آن با شبکه بود، خراب و یا خاموش شود، با افزایش برد ارسالی، می‌تواند با گره‌های دیگر ارتباط برقرار کند.

چالش‌ها: افزایش توان سیگنال ارسال بسته‌ها ممکن است سبب افزایش تداخل در امواج ارسالی گره‌های اطراف بشود. اما با فرض این‌که در فاصله‌های نزدیک، گره‌ها از کانال مشترک استفاده نمی‌کنند می‌توان از این تداخل صرف‌نظر کرد. همچنین افزایش فاصله ارسال بسته سبب خواهد شد تا متناسب با مجذور آن انرژی مصرفی افزایش یابد. این افزایش توان با این نسبت در مخابرات رادیویی یک موضوع اثبات شده است، اما در شبکه‌های بی‌سیم که قسمتی از مصرف توان در لایه‌های زیرین شبکه صرف می‌شود و تمامی انرژی مصرفی مربوط به لایه شبکه و مسیریابی نیست، انتظار می‌رود که با کاهش تعداد گره‌های درگیر در ارتباط در مجموع توان با نسبت کمتری نسبت به حالت ایده‌آل افزایش می‌یابد.

چالش دیگری که پیش روی این ایده است، پاسخ به درخواستی است که با افزایش توان صورت گرفته است. زیرا گره‌ای که توانایی افزایش توان را دارد و برای برقراری ارتباط با گره دوم درخواستی را ارسال می‌کند، گره دوم باید بتواند آن درخواست را پاسخ بدهد. بدین منظور که آن گره دوم نیز باید توانایی افزایش توان و محدوده ارسال داشته باشد. در غیر این صورت، همان گره‌ای که برای کمک به ذخیره انرژی، از آن استفاده نکنیم، باید در انتقال این پاسخ درخواست، همکاری کند. که این امر مستلزم این است که گره دریافت‌کننده فقط برای پاسخ به گره ارسال‌کننده با توان زیاد، با همان توان پاسخ دهد. در واقع توان‌ها هم اندازه شود.

در پی همسان کردن توان‌های هر دو گره‌ای که با هم تبادل داده دارند، گره‌های دیگر نیز در این بین ممکن است این بسته‌ها را دریافت کنند و تصمیمات لازم در خصوص گره‌ای که از آن بسته دریافت کرده‌اند بگیرند. به این صورت ممکن است در ابتدا با توان زیاد به گره‌های بسته‌های خود را ارسال کرده و آن گره دوم نیز با زیاد کردن توان خود توانسته است پاسخ آن گره را بدهد و بدین ترتیب مسیری شکل بگیرد. اکنون اگر گره دیگری با گره دوم با توان کم تبادل داده داشته باشد و بسته‌هایی با توان ضعیف‌تر بین هم ارسال کنند، اگر گره اول بسته‌های ارتباطی بین آن دو را که با توان کم ارسال شده است، دریافت کند و از مقدار آستانه مورد نیاز کمتر خواهد بود، آن گره دوم را از لیست مسیریابی خود حذف خواهد کرد و بدین ترتیب مسیر ارتباطی شکل گرفته از حذف می‌کند.

پیشنهادی که ما برای حل این مشکل داریم آن است که هر گره، برای اضافه یا حذف کردن گره‌های همسایه خود از مسیر ارتباطی که از آن گره عبور می‌کند، تنها از روی توان بسته‌های دریافتی که فقط از آن گره در جواب بسته ارسالی خود بوده تصمیمات لازم را اتخاذ کند. به همین دلیل با شنیدن بسته‌های ارتباطی بین دو گره دیگر، برای ارتباط خود با آن گره‌ها تصمیم نگیرد. پس لازم است پس

از تبادل داده با هر گره و اطمینان حاصل کردن از دریافت صحیح توسط آن گره، آن گره را به صورت بر خط جزء همسایه‌های خود قرار دهد و تا زمانی که خود آن گره، به مقصد گره فعلی بسته‌ای نفرستاده است، تصمیم در مورد همسایه بودن یا نبودن آن و حذف یا تشکیل مسیر ارتباطی توسط آن اتخاذ نکند.

چالش دیگر، افزایش شنوایی در کل شبکه است، به صورتی که پس از تشکیل یک ارتباط بین مبدأ تا مقصد، و ارسال بسته‌ها، در این بین، گره‌های مجاور که در مسیر ارتباط قرار ندارند در پایین‌ترین لایه شبکه به این ارتباطات پاسخ می‌دهند. در سطوح پایین لایه‌های شبکه همچون لایه کنترل دسترسی به رسانه انتقال، هر گره، پس از دریافت هر بسته، بسته‌ای در جواب آن گره ارسال کننده ارسال می‌کند. بخشی از این بسته‌ها تلاش برای مسیریابی است که شروع آن توسط گره مبدأ و انتهای آن توسط گره مقصد یا چاهک هست. بخش دیگر این بسته‌ها در شبکه پس از شکل گرفتن مسیر بین گیرنده و فرستنده برای انتقال اطلاعات در این ارتباط، ارسال و دریافت می‌شود. بخش اعظمی هم در این بین پس از شکل‌گیری مسیر ارتباطی، توسط گره‌های همسایه دیگر که در مسیریابی نیستند صورت می‌گیرد که صرفاً به دلیل شنیدن و دریافت بسته‌های این ارتباطات، به آن‌ها پاسخ می‌دهند. اکنون که ما این محدوده ارسال را زیاد کردیم، احتمال می‌دهیم این بسته‌های اضافی در شبکه زیاد شود و ترافیک شبکه افزایش یابد.

بهترین راه برای حل این مشکل از نظر ما، جلوگیری و حذف ارتباطات غیر ضروری پس از تشکیل مسیر است. به این صورت که پس از تشکیل ارتباط بین گره مبدأ تا مقصد، فقط بسته‌هایی که برای مسیریابی و یا تشکیل دیگر ارتباطات که می‌خواهد از این بین گذر کند، پاسخ داده شود و مابقی بسته‌هایی که صرفاً به دلیل افزایش محدوده شنوایی به بسته‌هایی که در مسیر ارتباطی در حال ارسال هستند پاسخ می‌گویند و قصد تشکیل ارتباطی توسط گره

دیگری ندارند، حذف شده و در جواب آن‌ها پاسخی ارسال نشود.

۷- ارزیابی‌ها

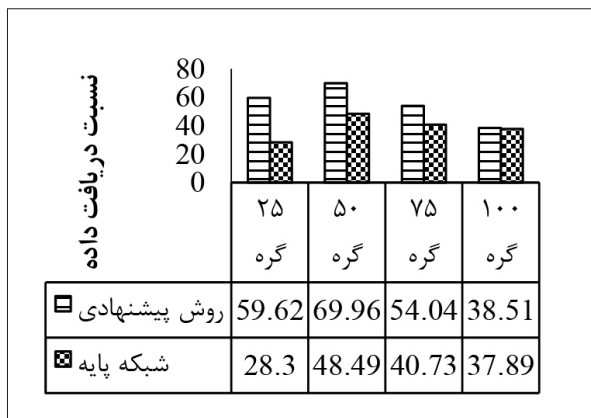
در این قسمت ما به معرفی محیط شبیه‌ساز، فرضیات و کارهای انجام‌شده در شبیه‌سازی ایده مورد نظر می‌پردازیم. شبکه حسگر بی‌سیم، شبکه‌ای متشکل از تعدادی گره حسگر بی‌سیم است که در کنار هم با فاصله مشخص یا تصادفی قرار می‌گیرند. این فاصله‌ها می‌تواند از قبل مشخص باشد، مهندسی شده باشد، یا به صورت تصادفی مختصات داده شود. می‌توان برای الگوی برداشت انرژی، مدل انرژی ارائه داده و یا از مدل‌های موجود استفاده کرد. از آن‌جا که در بسیاری از برداشتگرها، احتمال برداشت انرژی در دوره کاری بعدی مستقل از دوره فعلی است، احتمال این‌که در دوره بعد نیز برداشت انرژی از محیط داشته باشیم می‌تواند به صورت توزیع پواسون مدل شود. این مدل برداشت انرژی بسیار رایج است و برای بسیاری از برداشتگرهایی همچون برداشتگر خورشیدی که کاملاً قابل پیش‌بینی نیستند، مناسب است [۲۲]، [۲۳]. برای شبیه‌سازی از شبیه‌ساز Network simulator 2 (NS2) استفاده می‌کنیم که این شبیه‌ساز قابلیت پیاده‌سازی شبکه‌های بی‌سیم و سیمی را دارد. این شبیه‌ساز شبکه، با بهره‌گیری از ساختار لایه‌ای شبکه، تمام لایه‌های آن را پیاده‌سازی کرده و امکان تغییر و بهبود آن را به طور کامل و منبع باز، در اختیار برنامه‌نویسان قرار می‌دهد. این شبیه‌ساز به دلیل دقیق بودن و منطبق بودن با ساختار شبکه در شبکه‌های بی‌سیم و شبکه‌های حسگر بی‌سیم و به دلیل منبع باز^{۱۳} بودن، در هر دو حوزه پژوهشی و صنعتی رایج است قابل اطمینان است. در این شبیه‌ساز، مسیریاب‌های DSR^{۱۴}، AODV^{۱۵} و DSDV^{۱۶} پیاده‌سازی شده‌است و امکان افزودن مسیریاب‌های دیگر نیز وجود دارد. در لایه کنترل دسترسی به رسانه بخش مربوط به ارتباطات و ارسال

13-Open source

14-Ad hoc On-Demand Distance Vector

15-Dynamic Source Routing

16-Destination-Sequenced Distance-Vector Routing



شکل ۶: مقایسه نسبت دریافت داده در کار انجام شده با شبکه پایه در حجم تراکم متفاوت

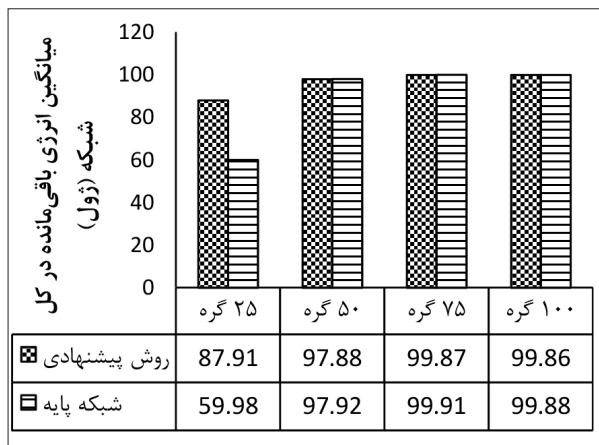
و دریافت بسته‌ها پیاده‌سازی شده‌است و در لایه فیزیکی جزئیات توان مصرفی در ارسال، دریافت و تغییر حالات گره از حالت‌های خاموش، بی‌کار و فعال به یکدیگر تحت نظر قرار گرفته است.

ما برای شبیه‌سازی ایده مورد نظر، نیاز به تغییراتی در سطح لایه فیزیکی و لایه کنترل دسترسی به رسانه و لایه شبکه بودیم. در لایه فیزیکی با مشخص کردن چند سطح توان برای گره‌ها به دلیل داشتن شرایط مختلف از لحاظ قابلیت برداشت انرژی و مقدار انرژی مصرفی متفاوت تعریف کردیم. در لایه مسیریابی برای تشکیل هر ارتباط، بیت وضعیتی قرار دادیم تا بسته‌های ارسالی جهت تشکیل ارتباط از سایر بسته‌های موجود در شبکه متمایز شود. در شروع ارسال بسته به سمت مقصد، سطح انرژی گره در نظر گرفته می‌شود. منظور از این سطح انرژی، انرژی محاسبه‌شده از مقدار انرژی باقی‌مانده در باتری گره که حاصل از برداشت انرژی تا کنون و همچنین انرژی برداشتی از برداشتگر است. نرخ برداشت انرژی در هر سیکل کاری با توجه به فرمول توزیع پوآسون در نظر گرفته شده‌است. در این حالت، گره‌ای که سطح انرژی بیشتری دارد با توان ارسال بیشتری بسته خود را ارسال می‌کند. با این کار، ارسال بسته‌ها با قابلیت اطمینان بیشتر و در فواصل طولانی‌تر و با جا گذاشتن گره‌های میانی صورت می‌گیرد. هر اتصالاتی که تعریف شده برای

مدتی مشخص و کوتاه است و پیش از گذشت مدتی ارتباط دیگری برقرار می‌شود که مشابه رویدادهای کوتاه مدت در محیط است. شروع هر ارتباطی، با در نظر گرفتن دوباره سطح انرژی گره و انتخاب توان ارسالی مناسب همراه است [۸].

در ادامه گزارشی از تأثیر کار خود بر شبکه در مقایسه با حالت اصلی شبیه‌ساز شبکه نسخه ۲، ارائه می‌کنیم. در شکل ۶ مقایسه نسبت تعداد بسته دریافت شده به تعداد بسته ارسال شده در کار انجام‌شده با حالت پایه شبیه‌ساز شبکه به وضوح دیده می‌شود. ستون اول ایده شبیه‌سازی شده‌است و در ستون دوم نمودار شبیه‌ساز پایه را آورده‌ایم. به دلیل تلاشی که برای کم کردن تعداد بسته‌ها در شبکه صورت گرفته است، ترافیک کاهش یافته احتمال خرابی بسته‌ها نیز کمتر شده‌است. بدین ترتیب، با افزایش نرخ دریافت صحیح داده، می‌توان این ادعا را داشت که قابلیت اطمینان در شبکه افزایش داشته است. این درصد بهبود قابلیت اطمینان با توجه به نتایج در تراکم مختلف به ترتیب، ۵۲٪، ۳۰٪، ۲۴٪ و ۱٪ است و به‌طور میانگین ۲۷٪ بهبود داشته‌ایم. نتایج نشان می‌دهد که این کار انجام شده در تراکم بالا بهبود آن چنانی نخواهد داشت. علت آن هم افزایش نمایی تزیق بسته‌ها در شبکه به دلیل تراکم بالای گره‌ها و پر شدن بافرها و تداخل بسته‌ها است.

در شکل ۷، مقایسه میانگین تأخیر کل از ابتدا تا انتهای مسیر، در کار انجام شده را با شبکه پایه در حجم تراکم متفاوت می‌توان دید. با توجه به تأثیر کاهش تأخیر در افزایش قابلیت اطمینان در برخی کاربردهای بی‌درنگ، از نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که این کار در کاهش تأخیر در تراکم مختلف به ترتیب، ۱۰۸٪، ۸۹٪، ۱۸٪ و ۰٫۲۸٪ بهبود داشته است. به‌طور میانگین در چهار حالت ۵۲٪ کاهش تأخیر داشته‌ایم. همانند نمودار مقایسه نسبت دریافت داده درست، در تراکم بالای گره در شبکه بهبود زیادی نخواهیم داشت و در واقع تنها توانسته‌ایم این ترافیک در شبکه را فقط برای تراکم گره کمتر از ۷۵ گره در



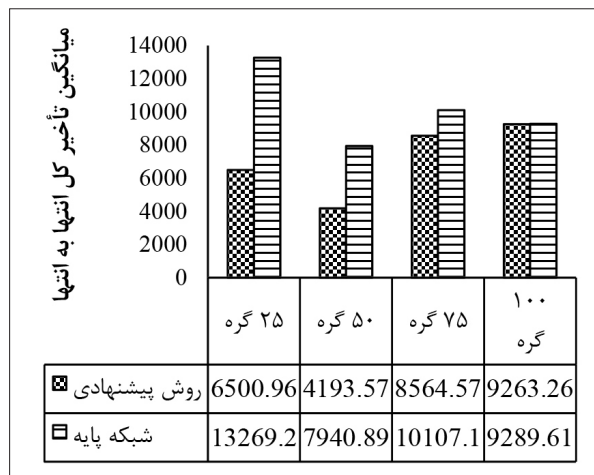
شکل ۸: مقایسه میانگین انرژی باقی مانده، در کار انجام شده با شبکه پایه در حجم تراکم متفاوت

و شبکه، با قابلیت اطمینان، شاهد بهبود قابلیت اطمینان در این سطح تراکم گره در شبکه هستیم.

همچنین با بررسی و مقایسه پراکندگی انرژی باقی مانده، در کار انجام شده با شبکه پایه در حجم تراکم آنچه از نتایج قابل استنباط است این است که اگرچه ایده انجام شده با کاهش انرژی همراه نبوده است، سبب شده تا در تراکم پایین مصرف انرژی را متعادل کند و از این طریق قابلیت اطمینان را در تراکم پایین بهبود ببخشد. این پراکندگی انرژی باقی مانده همانند انرژی مصرف شده در تراکم بالا تغییری نکرده است و نشان می دهد که این کار برای بهبود قابلیت اطمینان از جنبه متعادل کردن مصرف انرژی در تراکم بالا مؤثر نیست.

در ادامه نتایج شبیه سازی را در تراکم ثابت و با میانگین ۵۰ گره در شبکه، ولی با حجم ترافیک و نرخ داده مختلف در شبکه بررسی می کنیم. این ترافیک متفاوت با ۲۰، ۴۰ و ۶۰ ارتباط به صورت تصادفی از ۵۰ گره تا چاهک بررسی می شود. پس از زمان ۱۳۰ ثانیه کل شبیه سازی نیز در این حالت متوقف شده و نتایج در انتهای شبیه سازی تحلیل می شود. این بار نیز همانند قبل، پارامترهای مهم در قابلیت اطمینان بررسی و مقایسه و تحلیل می شود.

در شکل ۹، مقایسه نسبت تعداد بسته دریافتی به تعداد بسته تزیق شده در شبکه، در کار انجام شده با شبکه پایه با نرخ متفاوت داده در شبکه، قابل مقایسه است. همان طور که

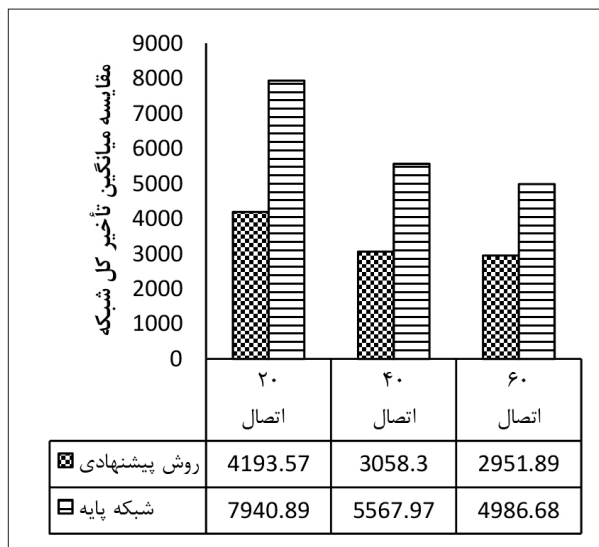


شکل ۷: مقایسه میانگین تأخیر کل، در کار انجام شده با شبکه پایه در حجم تراکم متفاوت

۲۰۰×۲۰۰ متر مربع کاهش دهیم. اما همان طور که مشاهده می کنیم، در شبکه پایه، در تراکم پایین به دلیل دور افتادن گره ها به طور تصادفی، تأخیر ارسال بسته ها همانند نرخ دریافت داده صحیح اثر بسیار نامطلوبی بر قابلیت اطمینان دارد که این حالت در شبکه ارائه شده با افزایش زیاد قابلیت اطمینان همراه بوده است.

در شکل ۸، مقایسه میانگین انرژی باقی مانده در کل شبکه، در کار انجام شده با شبکه پایه در حجم تراکم متفاوت قابل مشاهده است. همان طور که از نتایج مشخص است، کار ما در مجموع بهبود آن چنانی در افزایش میانگین انرژی باقی مانده در کل گره های حسگر بی سیم نداشته است. آنچه که از نتایج دیگر نمودارها استنباط می شود، به دلیل محدودیت هایی که شبکه پایه در برقراری ارتباطات در شبکه داشته است، که شاهد از دست رفتن بسته ها و تأخیر بودیم. این ها همه منجر به کاهش و یا نرساندن بسته ها و رویدادهای رخ داده به مقصد شد، که این عدم ارسال خود در حفظ انرژی شبکه دخیل بوده است. در صورتی که شرایطی برای ما مطلوب است که در کنار حفظ انرژی کل در شبکه، حداکثر بسته ها ارسال شود.

اما همان طور که از نتایج مشخص است، در تراکم پایین، این مصرف بهینه انرژی صورت گرفته است که با توجه به دلایل گفته شده در مورد ارتباط میزان انرژی گره

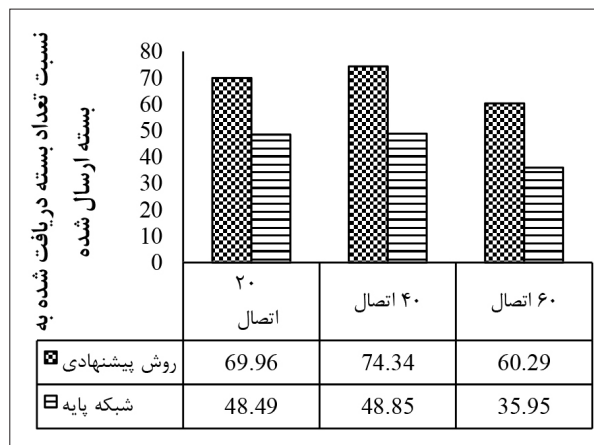


شکل ۱۰: مقایسه میانگین تأخیر کل در شبکه، در کار انجام شده با شبکه پایه با نرخ متفاوت

شبکه پایه با افزایش تراکم داده در شبکه، به دلیل افزایش توان و مصرف انرژی، به ترتیب حدود ۰.۴٪، ۰.۱٪ و ۰.۲٪ کاهش میانگین انرژی مصرفی داشته‌ایم. این امر باعث کاهش قابلیت اطمینان می‌شود اما در کنار سایر بهبود پارامترهای قابلیت اطمینان، این کاهش نامحسوس انرژی که به ۱٪ هم نمی‌رسد، تأثیر بسزایی خواهد داشت.

۸- نتیجه گیری

با توجه به اهمیتی که امروزه در اجرای مطمئن وظایف در شبکه‌ها است و کاهش محدودیت حداقلی منبع انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با استفاده از برداشتن انرژی ایجاد شده است؛ با در نظر گرفتن شرایط و انجام اقداماتی که در گذشته به علت این محدودیت امکان نداشت، توانستیم سطح قابلیت اطمینان در این شبکه‌ها را بالا ببریم. همچنین با توجه به دور از دسترس بودن این شبکه‌ها، هر گونه اقدامی برای افزایش طول عمر و ارسال مطمئن بسته‌ها در نهایت موجب افزایش قابلیت اطمینان در شبکه خواهد شد و تنها تفاوت آن‌ها از لحاظ زمان اقدام برای بازیابی شبکه است



شکل ۹: مقایسه نسبت تعداد بسته در یافت شده به بسته ارسال شده، در کار انجام شده با شبکه پایه با نرخ متفاوت

می‌بینیم، در هر سه حالت نرخ متفاوت داده در ۲۰، ۴۰ و ۶۰ ارتباط گره تا چاهک و در تراکم ۵۰ گره در ۲۰۰×۲۰۰ متر مربع، نسبت تعداد بسته‌هایی که سالم به مقصد رسیده‌اند به تعداد بسته‌هایی که در شبکه تزریق شده‌اند افزایش یافته است. با توجه به این‌که در هر سه حالت، تزریق بسته به شبکه یکسان بوده است، مشاهده می‌کنیم که تعداد بسته‌های از دست رفته کاهش یافته و در نتیجه قابلیت اطمینان در شبکه حسگر بی‌سیم افزایش یافته است. این نسبت دریافت صحیح در سه حجم ترافیک در شبکه، به ترتیب ۴۴٪، ۵۲٪ و ۶۷٪ بهبود داشته است که به‌طور میانگین ۵۵٪ بوده است. در این جا نیز، ستون اول از چپ ایده ارائه شده است و ستون دوم شبیه‌ساز پایه و ستون سوم درصد بهبود کار انجام شده نسبت به حالت پایه است.

در شکل ۱۰، مقایسه میانگین تأخیر کل در شبکه، در کار انجام شده با شبکه پایه با نرخ متفاوت قابل مشاهده است. همان‌طور که می‌بینیم، در هر سه مدل ترافیک شبکه، میانگین تأخیر کم شده است و به ترتیب ۸۹٪، ۸۲٪ و ۶۸٪ بهبود در کاهش تأخیر و به دنبال آن افزایش قابلیت اطمینان در شبکه حسگر بی‌سیم را خواهیم داشت. کار انجام شده، به‌طور میانگین در سه حالت ترافیک شبکه، ۸۰٪ بهبود در کاهش تأخیر کل در شبکه داشته است.

همچنین با بررسی و مقایسه میانگین انرژی باقی‌مانده در گره‌های حسگر بی‌سیم در شبکه، در کار انجام شده و

- Sensor Nodes”, in Proceedings of the European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN), pp. 45-56, Istanbul, Turkey, 2005.
- 15.F. Jalali, S. Khodadoustan, A. Ejlali, “Error Control Schemes in Solar Energy Harvesting Wireless Sensor Networks”, in Proceedings of the International Symposium on Communications and Information Technologies (IS-CIT), pp. 979-984, Gold Coast, Australia 2012.
 - 16.S. Kim, R. Fonseca, D. Culler, “Reliable Transfer on Wireless Sensor Networks”, in Proceedings of the IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), pp. 449-459, Santa Clara, California, USA, 2004.
 - 17.A. Taherkordi, M. A. Taleghan, M. Sharifi, “Dependability Considerations in Wireless Sensor Networks Applications”, Journal of Networks, Vol. 1, No. 6, pp. 28-35, December 2006.
 - 18.K. Ma, X. Li, “Dynamic Power and Energy Management for Energy Harvesting Nonvolatile Processor Systems,” in ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS), V. 16, No. 4, 2017, pp. 1122-1139.
 - 19.K. Zeng, K. Ren, W. Lou, P. J. Moran, “Energy Aware Efficient Geographic Routing in Lossy Wireless Sensor Networks with Environmental Energy Supply”, Journal of Wireless Networks, Vol. 15, No. 1, pp. 39-51, 2009.
 - 20.<http://www.ti.com/product/CC2420/technicaldocuments>
 - 21.<http://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24LE1>.
 - 22.P., Lee, Eu, Z. A., Han, M., Tan, H. P., “Empirical Modeling of a Solar-Powered Energy Harvesting Wireless Sensor Node for Time-Slotted Operation”, in Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp. 179-184, Cancun, Quintana Roo, March 2011.
 - 23.F. Iannello, O. Simeone, U. Spagnolini, "Medium Access Control Protocols for Wireless Sensor Networks with Energy Harvesting", IEEE Transactions on Communications, Vol. 60, No. 5, pp. 1381-1389, 2012.
 - 24.
 1. I. F. Akyildiz, M. C. Vuran, Wireless Sensor Networks, John Wiley and Sons, 2010.
 2. J. N. Al-Karaki, A. E. Kamal, “Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: a Survey”, IEEE Transaction on Wireless Communication, Vol. 11, No. 6, pp. 6-28, 2004.
 3. M. N. Riaz, M. N. Qureshi, A. Mahboob, Energy Efficient MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: A Survey, Technical Report in School of Engineering, University of Greenwich Chatham Maritime ME4 4TB, United Kingdom, 2006.
 4. S. Sudevalayam, P. Kulkarni, “Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications”, IEEE Journal of Communications Surveys and Tutorials, Vol. 13, No. 3, pp. 443-461, 2011.
 5. C. Moser, D. Brunelli, L. Thiele, L. Benini, “Real-Time Scheduling for Energy Harvesting Sensor Nodes”, Journal of Real-Time Systems, Vol. 37, No. 3, pp. 233-260, 2007.
 6. L. M. Souza, H. Vogt, M. Beigl, A Survey on Fault Tolerance in Wireless Sensor Networks, Technical report, Faculty of computer science, University of Karlsruhe, Germany, 2007.
 7. A. Kansal, M. B. Srivastava, “An Environmental Energy Harvesting Framework for Sensor Networks”, in Proceedings of the International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED), pp. 481-486, Seoul, South Korea, 2003.
 8. S. Vupputuri, K. K. Rachuri, C. S. R. Murthy, “On Providing Event Reliability and Maximizing Network Lifetime Using Mobile Data-Collectors in Wireless Sensor Networks”, in Proceedings of the International Conference on High Performance Computing (HiPC), pp. 160-169, Kochi, India, 2009.
 9. J. N. Al-Karaki, A. E. Kamal, “Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: a Survey”, IEEE Transaction on Wireless Communication, Vol. 11, No. 6, pp. 6-28, 2004.
 - 10.C. Intanagonwiwat, R.Govindan, D. Estrin, J. Heidemann, F.Silva, “Directed Diffusion for Wireless Sensor Networking,” ACM/IEEE Transactions on Networking, Vol. 11, No. 1, pp. 2-16, 2002.
 - 11.W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, “Energy-efficient Communication Protocol for Wireless Micro Sensor Networks”, in Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), pp. 1-10, Maui, Hawaii, USA, 2000.
 - 12.H. Husnain, R. Sherazi, L. AlfredoGrieco, G.nnaro Boggia, “A Comprehensive Review on Energy Harvesting MAC Protocols in WSNs: Challenges and Tradeoffs” in Ad Hoc Networks, Vol. 71, pp. 117-134, 2018.
 - 13.F. Koushanfar, M. Potkonjak, A. Sangiovanni-Vincentell, “Fault Tolerance Techniques for Wireless Ad Hoc Sensor Networks”, in IEEE Sensors, pp. 1491-1496, Orlando, FL, USA, 2002.
 - 14.M. Tacca, P. Monti, A. Fumagali, “Cooperative and Non cooperative ARQ Protocols for Microwave Recharged