

یک رویکرد خواب و بیدار مبتنی بر نظریه بازی‌ها جهت بهبود مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم

ویدا یوسفی گل‌تپه

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام‌خمينی، قزوین، ایران
پست الکترونیکی: vidayousefi1375@gmail.com

نستوه طاهری جوان*

استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام‌خمينی، قزوین، ایران
پست الکترونیکی: nastooh@eng.ikiu.ac.ir

چکیده

این رویکرد به طور میانگین حدود ۱۰/۵ درصد مصرف انرژی را کاهش بخشیده و موجب بهبود طول عمر شبکه شده و در مقابل به طور متوسط موجب افزایش ۶/۵ درصدی تاخیر انتها-به-انتها می‌گردد. **واژه‌های کلیدی:** شبکه‌های حسگر بی‌سیم، نظریه بازی‌ها، مصرف انرژی، طول عمر شبکه، زمان بندی خواب و بیدار، پروتکل دسترسی به کانال.

مقدمه

شبکه‌های حسگر بی‌سیم سامانه‌های ناهمگنی شامل تعداد زیادی از حسگرها و محرک‌ها هستند [۱]. در پیاده‌سازی‌های عملیاتی از این شبکه‌ها، معمولاً صدها یا هزاران گره کم هزینه، کم توان و خودسازمانده در یک محیط و با اهداف خاص توزیع می‌شوند [۲]. در سال‌های اخیر این شبکه‌ها با توجه به حوزه وسیع کاربردها به بخش مهمی از زندگی ما تبدیل شده‌اند، کاربردهایی از کاهش خسارات بلایای طبیعی تا مراقبت‌های پزشکی، از پروژه‌های نظامی تا پروژه‌های کشاورزی، از رویکردهای

در این پژوهش، یک رویکرد نوین برای بهبود عملکرد شبکه‌های حسگر بی‌سیم معرفی شده است. این رویکرد از تئوری بازی‌ها برای تدوین یک پروتکل دسترسی به کانال آگاه از مصرف انرژی استفاده می‌کند. در این رویکرد، گره‌های حسگر با توجه به زمان بیکاری و تصمیمات همسایگان، تصمیم می‌گیرند که مصرف انرژی خود را با ورود به حالت خواب کاهش دهند یا در شبکه فعالیت داشته باشند و در جلورانی بسته‌ها مشارکت کنند. هر گره، با توجه به میزان انرژی باقی‌مانده، اندازه پنجره رقابت خود را برای کاهش تصادم بسته‌ها تنظیم می‌کند. این تنظیمات منجر به افزایش تعداد بسته‌های تحویل داده شده به مقصد می‌شود. به منظور جلوگیری از رفتارهای خودخواهانه گره‌ها، یک سازوکار مجازات نیز در رویکرد در نظر گرفته شده است. این سازوکار مجازات، گره‌ها را ترغیب به انتخاب راهبردهای همکارانه و مشارکت در فعالیت‌های شبکه می‌کند. نتایج شبیه‌سازی راهکار پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های LEACH و LGCA نشان می‌دهد که

* نویسنده مسئول

مصرف انرژی را افزایش می‌دهد. (۲) شنود: یک گره باید بسته‌هایی که به مقصد گره‌های دیگر ارسال می‌شوند را نیز دریافت می‌کند (زیرا عملاً تا زمانی که این بسته را دریافت نکرده است، نمی‌تواند تشخیص دهد که مخاطب این بسته گره دیگری بوده است). (۳) سربارهای عملیاتی. به عنوان مثال ارسال و دریافت بسته‌های کنترلی مصرف انرژی بالایی به شبکه تحمیل می‌کند. (۴) شنود بی‌کار: گره‌ها باید برای دریافت داده ارسالی احتمالی (که هنوز ارسال نشده و مشخص نیست کی ارسال خواهد شد) واحد رادیویی خود را روشن نگه دارند.

با این مقدمه سخن‌گرافی نیست اگر بگوئیم: مسئله کنترل و مدیریت مصرف انرژی مهم‌ترین چالش در شبکه‌های حسگر بی‌سیم است. به همین دلیل در سال‌های اخیر تحقیقات بسیار زیادی در این زمینه صورت گرفته و راهکارهای متنوعی پیشنهاد شده است. برخی از این راهکارها بر رویکرد کاهش مصرف انرژی استوار هستند [۶] و برخی دیگر بر رویکرد جمع‌آوری انرژی از محیط [۷]. هر کدام از این رویکردها در کنار مزایا و محاسن خود، معایب و پیچیدگی‌های خاص خود را به همراه دارند. در کل با توجه به سختی‌ها و نیازمندی‌های فناوری‌های راهکارهای جمع‌آوری انرژی از محیط، اکثر تحقیقات اخیر بر روی اصلاح عملکرد گره‌ها و در نتیجه بهبود مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم متمرکز هستند [۸]، موضوعی که هدف اصلی پژوهش حاضر نیز محسوب می‌شود.

رویکردهایی که به کاهش مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌پردازند تنوع زیادی دارند. از جمله این که برخی از تحقیقات بر بهبود الگوریتم‌های مسیریابی و اصلاح شیوه‌ی جلورانی اطلاعات به سمت چاهک کاهش مصرف انرژی تمرکز دارند [۹]. از سوی دیگر، برخی از تحقیقات بر روی اصلاح روش‌های جمع‌آوری اطلاعات در این شبکه‌ها متمرکز شده‌اند، که در این بین می‌توان به استفاده از تکنیک‌های فشرده‌سازی و تکنیک‌های تجمیع اطلاعات اشاره کرد [۱۰ و ۱۱]؛ در این روش‌ها با کاهش

محیط زیستی تا رویکردهای نظارتی، از حوزه‌های رباتیک تا حوزه‌های شهری، از سیستم‌های حمل و نقل تا سیستم‌های مدیریت صنعتی زندگی انسان را تحت تاثیر خود قرار داده‌اند [۳].

با توجه به ساختار و معماری شبکه‌های حسگر بی‌سیم یکی از مهم‌ترین چالش‌های موجود در این شبکه‌ها، چالش تامین و مصرف انرژی است [۴]. در اغلب کاربردها گره‌های حسگر به نحوی در محیط پراکنده و توزیع می‌شوند که امکان تعویض منبع انرژی آنها عملاً غیر ممکن است. در این کاربردها معمولاً گره حسگر به یک باتری برای تامین انرژی مورد نیاز تجهیز شده و سپس در مکان مورد نظر قرار می‌گیرد. از این لحظه به بعد گره باید تمام وظایف عملیاتی خود، شامل حس کردن پارامترهای مورد نظر، انجام عملیات در محیط و ارسال و دریافت داده‌ها را با اتکا به همان منبع انرژی اولیه به انجام برسانند. در چنین سناریویی کاهش مصرف انرژی در گره‌های حسگر به مهم‌ترین چالش این گره‌ها تبدیل می‌شود، چرا که با اتمام انرژی موجود در گره، گره به خواب ابدی رفته و در نتیجه طول عمر شبکه موجود به شدت کاهش می‌یابد.

اتلاف انرژی زیاد در شبکه‌های حسگر بی‌سیم اجتناب ناپذیر است [۵]. منظور از اتلاف انرژی این است که گره‌های حسگر ناگزیرند مقدار زیادی از انرژی خود را برای مسائلی به غیر از انجام عملیات اصلی خود هدر دهند. عملیات اصلی گره‌های حسگر را می‌توان شامل مواردی مانند: حس کردن و اندازه‌گیری پارامترها، انجام عملیات در محیط، ارسال داده‌های حس شده به سمت گره چاهک^۱ و حتی مشارکت در جلورانی داده‌های حسگرهای دیگر دانست. اما علاوه بر این موارد گره‌های حسگر ناچارند انرژی خود را برای مسائل دیگر نیز مصرف کنند.

در حالت کلی می‌توان چهار منبع اصلی برای اتلاف انرژی در گره‌های حسگر برشمرد. (۱) تصادم‌ها: هنگامی که یک بسته ارسال شده با تصادم مواجه می‌شود، باید دور انداخته شده و دوباره ارسال شود و ارسال‌های مجدد

سازوکار تنظیم پنجره رقابت به صورت یک بازی و در گره‌های درون خوشه پیاده‌سازی شده است. در واقع هنگامی که گره‌های عادی تصمیم به ارسال بسته‌های خود برای گره سرخوشه دارند، رقابتی از نوع رقابت گره‌های اطراف چاهک بین آن‌ها رخ می‌دهد، البته با ابعادی کوچکتر. به کمک این روال می‌توان مسئله رقابت بین گره‌ها برای ارسال داده به سرخوشه را با هزینه انرژی معقول و میزان تاخیر مناسب مدیریت کرد. در نهایت راهکار مبتنی بر نظریه بازی ارائه شده در این پژوهش از تجمیع این دو رویکرد شکل می‌گیرد.

جهت ارزیابی رویکرد پیشنهاد شده در این پژوهش، آن را با دو الگوریتم LEACH و LGCA به کمک شبیه‌سازی مقایسه کرده‌ایم. برای این منظور چندین سناریوی شبیه‌سازی طراحی شده و هر اجرای شبیه‌سازی به تعداد ۲۰۰ مرتبه تکرار شده است. به طور خلاصه می‌توان گفت نتایج به دست آمده حاکی از آنست که راهکار پیشنهادی در مقایسه با دو رویکرد دیگر به طور متوسط ۱۰/۵ درصد مصرف انرژی را کاهش داده و حدود ۹ درصد نرخ تحویل بسته‌ها به مقصد را افزایش می‌دهد. در مقابل روش پیشنهادی حدود ۶/۵ درصد میزان تاخیر انتها-به-انتها را برای بسته‌های داده تحویل شده به مقصد افزایش می‌دهد. به طور خلاصه می‌توان نوآوری‌های این پژوهش را به شرح زیر بیان نمود:

- یک رویکرد زمان‌بندی خواب و بیدار مبتنی بر نظریه بازی‌ها برای دسترسی به کانال مشترک ارائه می‌شود.
- جهت بهبود مصرف انرژی در فرآیند دسترسی به کانال، یک سازوکار کنترل پنجره رقابت در مدل بازی اعمال شده است.
- به منظور جلوگیری از رفتار خودخواهانه گره‌های حسگر در طول فرآیند بازی، یک سازوکار مجازات بهبودیافته برای وادار کردن گره‌های حسگر به اتخاذ کردن راهبردهای مبتنی بر همکاری با دیگران گنجانده شده است. در ادامه این مقاله از بخش‌های زیر تشکیل شده است.

حجم داده مبادله شده در شبکه، سعی در کاهش مصرف انرژی دارند. از سوی دیگر اصلاح شیوه‌های دسترسی به کانال و بهبود پروتکل‌های لایه MAC نیز رویکرد دیگری است که کمک شایانی به اصلاح الگوی مصرف انرژی در این شبکه‌ها می‌کند [۱۲]. در برخی از این روش‌ها سعی می‌گردد با تعیین و پیدا کردن یک الگوی مناسب برای خواب/بیدار گره‌ها میزان مصرف انرژی آن‌ها را کاهش داد [۱۳].

در پژوهش حاضر، ما یک الگوی خواب/بیدار جدید مبتنی بر نظریه بازی‌ها جهت کاهش مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با عنوان GTSS^۲ ارائه می‌دهیم. در راهکار پیشنهادی، گره‌ها سعی دارند با اجرای یک بازی از رده بازی‌های غیرهمکاری بهترین تصمیم برای الگوی خواب/بیدار خود را اتخاذ کنند. این تصمیم باید از یک سو بر اساس منافع خود گره گرفته شود و از یک سو نیم‌نگاهی به عملکرد همسایه‌های گره نیز انداخته شود. زیرا در این بازی عملکرد هر بازیکن (گره) تاثیر مستقیمی بر بازدهی گره‌های دیگر و در نتیجه کارایی کل شبکه دارد. راهبرد اتخاذ شده توسط هر گره در نهایت باید گره را در یک تصمیم‌گیری حیاتی کمک کند: گره بیدار مانده و داده‌های به دست آمده را ارسال کند، و یا گره برای یک بازه به خواب رفته تا قدری در مصرف انرژی خود صرفه جویی کند. در این سناریو، هنگامی که گره در راستای منافع خود تصمیم به خوابیدن می‌گیرد، در جلورانی داده‌های شبکه مشارکتی ندارد و از این راه بر روی منافع سایر بازیکنان نیز تاثیر مستقیم می‌گذارد. بنابراین بازی غیرمشارکتی انتخاب شده، یکی از گزینه‌های مناسب برای مدل‌سازی این فرآیند محسوب می‌گردد.

از سوی دیگر سازوکارهای تنظیم پنجره رقابت معمولاً در گره‌های اطراف گره چاهک پیاده‌سازی می‌شود. جایی که گره‌های اطراف چاهک رقابت شدیدی برای رساندن بسته‌های خود به دست گره چاهک دارند و نرخ تصادم‌ها در این مرحله بسیار است. در راهکار پیشنهادی ما،

سرخوشه‌ها برش‌های زمانی را تقسیم کرده و بین اعضای خوشه خود توزیع می‌کنند. سپس همه اعضای خوشه داده‌های جمع‌آوری‌شده را با روشی مبتنی بر TDMA به سرخوشه‌ها ارسال می‌کنند تا طبق راهکار مسیریابی تبیین شده، به سمت مقصد ارسال شوند.

نویسندگان در [۱۸] از نظریه بازی‌ها برای پیشنهاد یک راهکار مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم استفاده کرده‌اند. در این راهکار بر روی تضاد بین منافع یک گره منفرد و منافع کل شبکه تمرکز شده است. در مرحله اول این راهکار، کل شبکه باید خوشه‌بندی شود و فرآیند تعیین سرخوشه مبتنی بر یک تابع سودمندی بر اساس چگالی گره‌ها بنا شده است. در این طرح هم انرژی باقیمانده یک گره و هم میانگین مصرف انرژی همسایگان آن برای انتخاب سرخوشه در نظر گرفته می‌شود و بر اساس یک راه‌حل مبتنی بر سازوکار حراج سعی در انتخاب سرخوشه دارد. در این راهکار گره‌هایی با بالاترین انرژی باقیمانده همیشه به عنوان سرخوشه انتخاب می‌شوند. این رویکرد گره‌های خودخواه را با ارائه انگیزه‌هایی تشویق می‌کند تا صادقانه رفتار کنند. زیرا ممکن است گره‌های خودخواهی وجود داشته باشند که برای اجتناب از انتخاب شدن، میزان انرژی باقیمانده خود را کمتر از واقعیت اعلام کنند.

در سال‌های اخیر، بازی‌های از رده همکاری در کنترل مصرف انرژی توجه روزافزون دانشگاه و صنعت را به خود جلب کرده است. این راهکارها عموماً مستلزم اشتراک منافع همکاری میان بازیکنان بر اساس اصول منطقی و بدیهی است. نویسندگان در [۱۹] به بررسی و توصیف نظریه بازی‌های مشارکتی و همکاری برای کاهش مصرف انرژی می‌پردازند. آنها نشان می‌دهند که نظریه بازی همکاری یک رویکرد توانگر برای تجزیه و تحلیل پروژه‌ها فراهم می‌کند که در آن بازیکنان می‌توانند اقدامات جمعی و اشتراکی برای به دست آوردن منافع متقابل انجام دهند. در [۲۰] نویسندگان یک الگوریتم مسیریابی خوشه‌بندی را برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم بر اساس نظریه بازی‌های

در فصل دوم تحقیقات مرتبط بررسی خواهند شد. فصل سوم این مقاله به تشریح راهکار پیشنهادی می‌پردازد و نتایج شبیه‌سازی در فصل چهارم توصیف شده‌اند. در انتها نیز در فصل پنجم جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از این پژوهش آمده است.

۱. مرور ادبیات پیشین

در این بخش سعی شده است تحقیقات نزدیک به پژوهش جاری بررسی شوند. برای این منظور پژوهش‌های پیشین از دو جنبه بررسی می‌شوند. ابتدا نگاهی به کاربردهای نظریه بازی‌ها در کاهش مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم انداخته می‌شود، سپس روش‌های اصلاح پروتکل‌های دسترسی به کانال جهت کاهش مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مرور می‌شوند. در انتها با توجه به مزایا و معایب راهکارهای پیشین، چالش اصلی این پژوهش آشکار شده و تصریح می‌گردد.

در سال‌های اخیر از تئوری نظریه بازی‌ها برای بهبود عملکرد شبکه‌های حسگر بی‌سیم در جنبه‌های مختلف از جمله برای کنترل و کاهش مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم توجه زیادی را به خود معطوف کرده است [۱۴].

در [۹] نویسندگان سعی دارند به کمک بازی‌های از نوع همکاری [۱۵]، میزان مصرف انرژی را در مرحله مکان‌یابی برای فرآیند مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم نسل پنجم کاهش دهند. در صورتی که در [۱۶] نویسندگان از نظریه بازی‌های همکاری در مرحله تشکیل خوشه و انتخاب سرخوشه برای فرآیند مسیریابی در شبکه‌های حسگر استفاده کرده‌اند تا بتوان به این طریق قدری طول عمر شبکه را کاهش داد.

در [۱۷] برای انتخاب سرخوشه از نوعی بازی استفاده می‌شود. سپس یک پروتکل مسیریابی جدید مبتنی بر راهکار خوشه‌بندی پیاده‌سازی شده، استفاده می‌شود. در این مدل بازی تکاملی، بعد از تشکیل خوشه تمام

در [۲۴] یک الگوریتم بهینه‌سازی برای انتخاب اندازه پنجره رقابت مناسب از طریق تحلیل و تجزیه عملی برای بهبود عملکرد شبکه پیشنهاد شده است که می‌تواند بین مصرف انرژی (یعنی برداشت انرژی جایگزین) و تأخیر یک توافق و سازش را انجام دهد. سپس یک پروتکل کنترل دسترسی متوسط پنجره رقابت تطبیقی مبتنی بر نمای کلی برای کاهش بیشتر تأخیر و بهبود برداشت انرژی پیشنهاد شده است که می‌تواند به طور موثر عملکرد شبکه را بهبود بخشد و همچنین از طریق تجزیه و تحلیل در نوآوری‌های اصلی این پروتکل، مشخص شد که یک رابطه بهینه‌سازی پیچیده بین اندازه پنجره رقابت، مصرف انرژی و تأخیر انتقال وجود دارد.

نویسندگان [۲۵] یک الگوریتم MAC آگاه از انرژی پیشنهاد کرده‌اند که در این الگوریتم پیشنهادی، هر گره اندازه پنجره رقابت را بر اساس انرژی باقیمانده و انرژی برداشت حسگرهای بی‌سیم و توان انتقال تنظیم می‌کند و سپس نظریه بازی را برای فرموله‌بندی و تنظیم تابع سودمندی اعمال کرده‌اند که با معرفی بازی غیرهمکاری، تابع سودمندی را به راحتی فرموله کرده‌اند. علاوه بر این در این پژوهش با کنترل اندازه پنجره رقابت، احتمال برخورد را کاهش و تأخیر زمانی را به حداقل رسانده و مصرف انرژی گره حسگر را نیز کاهش داده‌اند که این کار منجر به افزایش طول عمر گره‌های حسگر می‌شود [۲۵]. همچنین آن‌ها در این پژوهش، یک مسئله بهینه‌سازی بین لایه‌ای را برای تخصیص توان با کنترل اندازه پنجره منازعه فرموله کرده‌اند. علاوه بر این، الگوریتم پیشنهادی را شبیه‌سازی و با الگوریتم معمولی مقایسه کرده‌اند [۲۵].

در [۲۶] نویسندگان یک پروتکل MAC برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم مبتنی بر zigbee ارائه داده‌اند. روش ارائه شده کاملاً مبتنی بر رقابت بین گره‌ها جهت دسترسی به کانال جهت شبکه‌های تک‌گامی و دوگامی است. در [۲۷] نویسندگان یک پروتکل MAC از نوع شروع گیرنده با بازگشت چند اولویتی برای بهبود مصرف انرژی در

راهبرد مختلط پیشنهاد کرده‌اند که رفتار گره‌های حسگر را در یک شبکه از طریق مدل راهبرد مختلط شبیه‌سازی می‌کند تا مشخص شود آیا گره‌های حسگر در انتخاب سرخوشه‌های نامزد مشارکت دارند یا خیر. گره‌های حسگر با توجه به انرژی باقیمانده و میانگین انرژی شبکه به صورت تصادفی به عنوان سرخوشه یا گره‌های مشترک انتخاب می‌شوند.

در [۲۱] نویسندگان یک الگوریتم خوشه‌بندی آگاه از انرژی پیشنهاد کرده‌اند که با هدف بهبود بهره‌وری انرژی شبکه از طریق کاهش و متعادل کردن مصرف انرژی انجام شده است. در این راهکار یک پروتکل انتخاب سرخوشه دوگانه معرفی شده است که شامل توزیع بهینه سرخوشه، نسبت انرژی به فاصله و نقش سرخوشه پشتیبان است. علاوه بر این، یک مدل بازی غیرهمکاری با هدف متعادل کردن مصرف انرژی در میان سرخوشه‌ها ارائه شده است که پس از اجرا نقطه تعادل نش مدل بازی به دست می‌آید و متعاقباً، الگوریتم خوشه‌بندی ارائه شده برای ارتباطات درون خوشه‌ای و بین خوشه‌ای استفاده می‌شود.

در [۲۲] رویکردهای مبتنی بر بازی‌های از نوع مشارکتی و همکاری در کاربردهای حساس به مصرف انرژی مرور شده‌اند. در این مقاله بازی‌های مشارکتی به عنوان یک چارچوب تئوری قوی و توانا برای تجزیه و تحلیل این کاربردها معرفی می‌شوند که در آن‌ها بازیکنان می‌توانند اقدامات جمعی و اشتراکی برای به دست آوردن منافع متقابل انجام دهند. در این حالت نه تنها مسائل و مراحل بعدی تخصیص منابع مدیریت و مدل می‌شود، بلکه قدرت چانه‌زدن بازیکنان را در راستای ثبات همکاری در یک فرآیند افزایش می‌دهد.

در سوی دیگر پژوهش‌های مرتبط، باید نگاهی به راهکارهای اصلاح پروتکل‌های دسترسی به کانال مشترک جهت بهبود مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم بن‌دازیم [۲۳].

خواب و بیدار گره‌ها دارد، به نحوی که با افزودن یک سازوکار مناسب جهت مجازات گره‌ها آن‌ها را به مشارکت در فعالیت‌های ترغیب کند.

۲. راهکار پیشنهادی

همانطور که در بخش مقدمه ذکر شد، فرآیند شنود بیکار مقدار زیادی انرژی از گره‌های حسگر مصرف می‌کند. در عمل، هنگامی که یک گره حسگر در حالت فعال است، مجبور است زمان قابل توجهی را به شنود بیکار اختصاص دهد، که این امر موجب اتلاف فراوان انرژی می‌گردد. برای غلبه بر این مشکل، راهکارهایی مبتنی بر زمانبندی خواب و بیدار گره ارائه شده اند که سعی دارند تا حد امکان از شنود بیکار گره‌ها جلوگیری کنند.

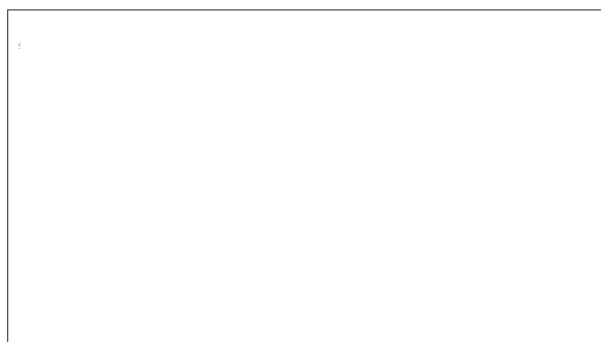
در این مقاله، ما فرآیند خواب و بیدار گره‌ها را در بستر یک بازی مدل‌سازی می‌کنیم. در طی این فرآیند گره‌ها با اتخاذ راهبردهای مختلف، تاثیر زیادی هم بر روی منابع خود از یک سو و هم بر روی کارایی و طول عمر شبکه از سوی دیگر می‌گذارند. از یک طرف، خواب گره‌های حسگر می‌تواند مصرف انرژی آن‌ها را به طرز چشمگیری کاهش دهد، انتقال‌های متناوب بین حالت‌های خواب و بیدار سربار مصرف انرژی خاص خود را دارد، به علاوه گره‌ها در حالت خواب نمی‌توانند در فعالیت‌های شبکه (مانند جلورانی بسته‌ها) مشارکت داشته باشند. از طرف دیگر، وضعیت شنود بیکار مصرف انرژی گره‌های حسگر را به شدت افزایش می‌دهد و موجب اتلاف انرژی به‌گونه غیرقابل چشم‌پوشی می‌شود. در نهایت می‌توان گفت حالت‌های خواب و بیدار گره‌ها بر روی عملکرد شبکه تاثیر گذاشته و هر دو با هم طول عمر شبکه را تعیین می‌کنند [۳۰].

در راهکار پیشنهادی با عنوان GTSS فرض بر این است که زمان به قسمت‌هایی که آن را برش زمانی می‌نامیم، تقسیم شده است. در این رویکرد به هر گره اجازه داده می‌شود در هر برش زمانی فقط یک بسته داده ارسال کند. در هر برش زمانی گره می‌تواند فقط در دو وضعیت باشد،

شبکه‌های حسگر بی‌سیم ارائه شده است. در این روش فرستنده زمانبندی خواب و بیدار خود را بر اساس اطلاعات دریافت شده از گیرنده تنظیم می‌کند. از سوی دیگر یک سازوکار بازگشت تطبیقی مبتنی بر چندین پارامتر اضافه شده است، پارامترهایی نظیر انرژی باقیمانده گره، اولویت رویدادها و تعداد بسته‌های منتظر ارسال.

در [۲۸] نویسندگان بر روی بهبود کیفیت خدمات در کنار کاهش مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم تمرکز کرده‌اند. برای این منظور آن‌ها یک سازوکار MAC تطبیقی برای دسترسی به کانال طراحی کرده‌اند که در آن اولویت خاصی برای بسته‌های اورژانسی در نظر گرفته می‌شود. برای این منظور آن‌ها بسته‌های داده موجود را در چهار رده طبقه‌بندی کرده تا بتوانند میزان تاخیر آنها به انتهای رسیدن بسته‌ها به مقصد را تا حد ممکن کنترل کنند. در [۲۹] نویسندگان جهت بهبود مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم یک پروتکل ترکیبی هم برای MAC و هم برای مسیریابی پیشنهاد داده‌اند. در این روش برای کاهش زمان شنود بیکار گره‌ها، از یک سازوکار خواب و بیدار تطبیقی برای گره‌ها استفاده می‌شود که در شرایط ترافیکی مختلف، زمانبندی مناسب را ارائه می‌دهد. پس از بررسی پژوهش‌های پیشین می‌توان دریافت که در حوزه زمانبندی خواب و بیدار گره‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، رویکردهای متنوعی پیشنهاد شده‌اند. در این بین اندک رویکردهایی که از نظریه بازی‌ها برای این منظور استفاده می‌کنند کارایی بهتری در فرآیند خوشه‌بندی از خود نشان می‌دهند، اما به دلیل برخی پیچیدگی‌های موجود در پیاده‌سازی جزئیات بازی‌ها، مصرف انرژی را افزایش می‌دهند. پس از بررسی دقیق این پژوهش‌ها ما متوجه شدیم هیچ‌کدام از این روش‌های مبتنی بر نظریه بازی‌ها سازوکار مناسبی برای جریمه گره‌های خودخواه و ترغیب آن‌ها برای مشارکت در فعالیت‌های شبکه ندارند. راهکار پیشنهادی در این پژوهش، سعی در استفاده کارآ و آگاه از مصرف انرژی از نظریه بازی‌ها در فرآیند زمانبندی

می‌شود و سرخوشه‌ها برش‌های زمانی را به صورت پویا فقط به گره‌هایی که داده‌ای برای ارسال دارند، اختصاص می‌دهند. این باعث صرفه‌جویی در انرژی بیکار می‌شود. پروتکل خوشه‌بندی و مسیریابی استفاده شده در این مقاله، پروتکل خوشه‌بندی لیچ و پروتکل مسیریابی AODV به ترتیب می‌باشد. توپولوژی شبکه به صورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱: نمای شماتیک توپولوژی شبکه

۲-۱-۲- مدل انرژی

انرژی یک منبع محدود در شبکه‌های حسگر بی‌سیم است و به منظور افزایش طول عمر شبکه‌های حسگر، به حداقل رساندن مصرف انرژی یکی از مهم‌ترین مسائل است. مصرف انرژی یک گره حسگر به عوامل زیادی مرتبط است. عوامل اصلی که مستقیماً بر مصرف انرژی گره‌های حسگر تأثیر می‌گذارند، در زیر مورد بحث قرار می‌گیرند.

جدول ۱: نشانه‌گذاری پارامترها و متغیرها

نماد	توضیحات
N	تعداد گره‌های حسگر در شبکه
S_i	گره حسگر جایی که $i = \{1, 2, \dots, n\}$
$C_{EoS}^{(S_i)}$	هزینه انرژی برای سنجش
$C_{EoP}^{(S_i)}$	هزینه انرژی برای پردازش
$C_{EoT}^{(S_i)}$	هزینه انرژی برای ارسال
$C_{EoR}^{(S_i)}$	هزینه انرژی برای دریافت
$C_{EoW}^{(S_i)}$	مصرف انرژی برای خواب به حالت فعال
C_i	مصرف انرژی کل برای گره حسگر

(۱) وضعیت فعال (بیدار)، (۲) وضعیت خواب. بدیهی است در در حالت فعال، گره می‌تواند هم داده ارسال کند و هم منتظر دریافت داده مانده و داده دریافت کند؛ اما در حالت خواب، تمام عملکرد گره غیرفعال می‌شوند تا مصرف انرژی به حداقل برسد. به این ترتیب عملاً در حالت فعال می‌توان سه وضعیت برای گره متصور بود، ارسال داده، دریافت داده و شنود بی‌کار.

۲-۱-۲- مدل سیستم

در این بخش مدل سیستم و مفروضات اصلی مسئله بررسی می‌شوند.

۲-۱-۱- مدل شبکه

در اینجا فرض شده است که شبکه حسگر بی‌سیم، شبکه‌ای است که به‌طور تصادفی از تعداد معینی گره حسگر تشکیل شده است که همه آنها دارای اعداد منحصر به فرد هستند. گره‌ها عملکرد یکسانی دارند، تحرک ندارند و می‌توانند فاصله ارتباطی را بر اساس قدرت سیگنال محاسبه کنند و گره‌های حسگر با هم چندین خوشه را تشکیل می‌دهند که خوشه‌بندی با هدف مقیاس‌پذیری، بهبود بهره‌وری انرژی و طول عمر بیشتر در شبکه‌های بی‌سیم است. هر خوشه حاوی یک سر است که به آن سرخوشه می‌گویند تا داده‌ها را ترکیب و جمع کند و از فناوری ترکیب داده‌ها استفاده می‌کند و همچنین دارای تعدادی گره منظم وجود دارد که به آن‌ها اعضای خوشه می‌گویند. گره‌های حسگر غیر سرخوشه‌ای می‌توانند داده‌ها را از شیء مورد نظارت جمع‌آوری و داده‌های جمع‌آوری شده را به سرخوشه مربوطه ارسال کنند و سپس سرخوشه داده‌هایی که از دیگر اعضای خوشه جمع‌آوری کرده است را به گره چاهک ارسال می‌کند که گره چاهک معمولاً در خارج از منطقه نظارت قرار دارد و مسئول ارسال اطلاعات جمع‌آوری شده توسط شبکه حسگر بی‌سیم به کاربر نهایی اطلاعات است. این زمانبندی برش (اسلات) توسط سرخوشه بین اعضای خوشه پخش

3-Cluster Head (CH)

4- Cluster Member (CM)

۲-۲-۱-۲- هزینه انرژی پردازش

یک گره حسگر نیز برای خواندن بسته $L(S_i)$ بیت و نوشتن آن در حافظه انرژی مصرف می‌کند [۲۵]. بنابراین، مصرف انرژی را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$C_{EOP}^{(S_i)} = \frac{L(S_i) * V_{VOS}}{8} (I_{WOS} * T_{WOS} + I_{ROS} * T_{ROS})$$

که در آن T_{WOS} و T_{ROS} مدت زمانی را که گره حسگر در نوشتن و خواندن بیت‌های $L(S_i)$ داده نشان می‌دهد، و I_{WOS} و I_{ROS} جریان مورد نیاز را برای نوشتن و خواندن هر بیت داده توسط گره حسگر مشخص می‌کند.

۲-۲-۱-۳- مصرف انرژی برای برقراری ارتباط

یک گره حسگر زمانی انرژی مصرف می‌کند که واحد داده‌ای را که با $C_{ROT}^{(S_i)}$ نشان داده شده است، ارسال می‌کند. همچنین برای دریافت واحد داده‌ای که با $C_{ROR}^{(S_i)}$ نشان داده شده است، انرژی مصرف می‌کند [۲۵]. از این رو، انرژی مصرف شده توسط گره حسگر هنگام ارسال واحد داده‌ای و اطلاعات را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$C_{EOT}^{(S_i)} = \begin{cases} L(S_i) * E_{elec} + L(S_i) * E_{FSOM} * d^2 & \text{when } d < d_0 \\ L(S_i) * E_{elec} + L(S_i) * E_{MPOM} * d^4 & \text{when } d > d_0 \end{cases} \quad (3)$$

که در آن E_{elec} انرژی مصرف شده برای دریافت یا ارسال در هر بیت پیام است، در حالی که ثابت‌های E_{FSOM} و E_{MPOM} به مدل تقویت‌کننده فرستنده بستگی دارند که به ترتیب مدل فضای آزاد و مدل چند مسیره را نشان می‌دهند. d فاصله بین دو گره حسگر است. d_0 فاصله آستانه است که می‌تواند به صورت بیان شود:

$$d_0 = \sqrt{E_{FSOM} / E_{MPOM}} \quad (4)$$

انرژی مصرف شده توسط گره حسگر هنگام دریافت واحد داده‌ای و اطلاعات را می‌توان به صورت بیان کرد:

$$C_{ROR}^{(S_i)} = L(S_i) * E_{elec} \quad (5)$$

۲-۲-۱-۴- مصرف انرژی در انتقال از حالت خواب به

حالت فعال

یک گره حسگر همچنین انرژی خود را هنگام حرکت از حالت خواب به حالت فعال مصرف می‌کند. اما زمانی که یک گره حسگر از حالت فعال به حالت خواب می‌رود،

گره حسگر ممکن است عملکردهای مختلفی مثل تمایل به ارسال و دریافت داده داشته و یا در حالت خواب باشد که در هنگام ارسال داده، قبل از هر فعالیتی باید محیط شبکه را بررسی و داده‌ارسالی را از حافظه خود بخواند و ارسال بکند یا در حالت دریافت نیز به بررسی محیط اطراف، دریافت داده‌ی دریافتی و ذخیره آن در حافظه‌ی خود بکند. پس در حالت‌های مختلف، گره حسگر انرژی مصرف می‌کند.

هزینه انرژی یک گره حسگر به انرژی مصرف شده مرتبط است و یافتن کل انرژی مصرفی یک گره در عملکرد بسته داده، هم انرژی باقیمانده یک گره و هم مطلوبیت گره حسگر تعیین می‌شود.

در نتیجه، با استفاده از معادلات زیر، انرژی مصرفی، تابع هزینه گره حسگر مطابق با مدل بازی پیشنهادی را و در ادامه سازوکار جریمه برای جلوگیری از رفتار خودخواهانه گره حسگر و تعیین آستانه حالت خواب و بیداری می‌سنجیم.

۲-۲-۱-۲- هزینه انرژی سنجش

قبل از انجام هر عملیاتی توسط یک گره حسگر، ابتدا باید محیط را حس کند تا بتواند داده‌ها را از محیط جمع‌آوری کند [۲۵]. یعنی هنگامی که حسگر به حالت فعال تغییر حالت می‌دهد و شروع به کار می‌کند، برای حس کردن محیط اطراف و دریافت اطلاعات و داده‌های حسگر از محیط انرژی مصرف می‌کند. هزینه انرژی سنجش بستگی به نوع حسگر دارد که از کدام نوع حسگر می‌باشد و معمولاً انرژی مصرفی به خود حسگر مرتبط دارد. هر کدام از این گره‌های حسگر موجود در شبکه و ویژگی‌های مصرف انرژی خود را دارند و انرژی مصرفی این گره‌های حسگر با همدیگر تفاوت دارد. به طور کلی، مصرف انرژی حسگر برای گره حسگر S_i را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$C_{EOS}^{(S_i)} = L(S_i) * I(S_i) * T(S_i) * V_{VOS} \quad (1)$$

که در آن $I(S_i)$ مقدار جریان مورد نیاز، V_{VOS} منبع ولتاژ و $T(S_i)$ مدت زمان شناسایی و جمع‌آوری بیت‌های $L(S_i)$ از داده‌ها است.

با توجه به ترجیح مناسب گره‌های حسگر، در این مقاله، فضای راهبردی بازیکن بازی با بررسی کردن مصرف انرژی توسط گره حسگر تعیین می‌شود. $\{u_i\}$ عملکرد

سودمندی بازیکن ام را نشان می‌دهد [۲۹].

$$u_i^{(S_i, S_{-i})} = U_i^{(S_i, S_{-i})} - C_i^{(S_i, S_{-i})} \quad (9)$$

که در آن S_i راهبرد اتخاذ شده توسط گره حسگر S_i ، S_{-i} راهبرد اتخاذ شده توسط گره‌های غیر از گره حسگر S_i ، $U_i^{(S_i, S_{-i})}$ تابع درآمد گره حسگر S_i و $C_i^{(S_i, S_{-i})}$ تابع هزینه گره حسگر S_i است. در شبکه حسگر بی‌سیم، ارسال بسته داده‌ها بین مبدأ و گره چاهک، به روشی چند جهشی انجام می‌شود. بر اساس تجزیه و تحلیل منطقی گره‌های حسگر، تابع درآمد یک گره حسگر به عنوان پاداش به دست آمده توسط یک گره حسگر برای ارسال موفقیت‌آمیز بسته داده به گره حسگر بعدی تعریف می‌شود. بنابراین

تابع درآمد به این صورت تعریف می‌شود:

$$U_i^{(S_i, S_{-i})} = R_{FoS} * P_{FoS} \quad (10)$$

که R_{FoS} پاداش یک گره حسگر برای ارسال موفقیت‌آمیز بسته داده به گره حسگر بعدی است و P_{FoS} احتمال اینکه گره حسگر با موفقیت بسته‌ی داده را ارسال می‌کند. گره حسگر دو حالت کار دارد، یعنی حالت فعال و حالت خواب. هنگامی که گره حسگر S_i در حالت خواب است و به ارسال بسته‌های داده نیاز دارد، دو راهبرد متفاوت را می‌تواند اتخاذ می‌کند، یکی اقدام خودخواهانه و عدم ارسال و دیگری همکاری و ارسال.

پس با توجه به هزینه‌های تعریف شده در بخش مدل انرژی، تابع هزینه گره حسگر S_i را در حالت‌های ارسال، دریافت داده و خواب تعریف می‌کنیم.

وقتی گره در حالت فعال است و داده‌ای برای ارسال دارد: یعنی هزینه‌هایی که گره حسگر در حالت فعال متحمل می‌شود، هزینه انرژی سنجش مطابق با معادله (۱)، هزینه انرژی برای ارسال مطابق با معادله (۳) و هزینه انرژی برای پردازش داده مطابق با معادله (۲) است.

$$C_i^{(S_i, S_{-i})} = C_{EoS}^{(S_i)} + C_{EoT}^{(S_i)} + C_{EoP}^{(S_i)} \quad (11)$$

مصرف انرژی ناچیز است [۲۵]. بنابراین، انرژی مصرف شده توسط گره حسگر برای تغییر حالت کار به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_{EoW}^{(S_i)} = \frac{V_{Vos}}{2} * (I_{AoS} - I_{SoS}) * T_{ASoS} \quad (6)$$

که در آن I_{AoS} جریان در حالت فعال گره حسگر، I_{SoS} جریان در حالت خواب گره حسگر، و T_{ASoS} زمان موردنیاز برای تغییر گره حسگر از حالت خواب به حالت فعال است.

۲-۱-۲-۵- کل مصرف انرژی برای گره حسگر

با توجه به معادلات (۱)-(۶)، کل انرژی مصرفی گره حسگر را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد و به دست آورد:

$$C_i = C_{EoS}^{(S_i)} + C_{EoP}^{(S_i)} + C_{EoT}^{(S_i)} + C_{EoR}^{(S_i)} + C_{EoW}^{(S_i)} \quad (7)$$

۳-۱- مدل بازی

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، گره‌های حسگر می‌توانند به‌طور معقولی بین حالت بیداری و فعال و حالت خواب تغییر حالت بدهند تا طول عمر شبکه حسگر بی‌سیم افزایش یابد. بنابراین، انتقال پویای گره‌های حسگر از حالت فعال به حالت خواب و بالعکس را می‌توان به عنوان یک مسئله بازی در نظر گرفت که گره‌ها باید بر اساس شرایط خود و شرایط سایر گره‌ها برای خواب و بیدار خود تصمیم بگیرند. مدل را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$GT = \{N, K, \{u_i\}\} \quad (8)$$

که در آن N برابر با تعداد بازیکنان در شبکه‌های حسگر بی‌سیم است. تمام گره‌های حسگر موجود در شبکه در حال دریافت و ارسال اطلاعات حسگر هستند و به عبارتی اطلاعات و داده‌ای را ارسال و یا دریافت می‌کنند. از این رو، تمام گره‌های حسگر در شبکه، بازیکنان بازی هستند. به عبارت دیگر، بازیکن بازی گره حسگر S_i ، $i = \{1, 2, \dots, n\}$ است. K فضای راهبردی بازیکنان است و هر بازیکن با سه راهبرد در هر بزنگاه تصمیم‌گیری مواجه است: فرستادن بسته، گوش دادن، خواب.

است، یعنی،

$$T_{th_Sleep} = \sqrt{\frac{(I_{AoS} - I_{SoS}) * T_{ASoS}}{2 * L(S_i) * I(S_i)}} T_{wx} \quad (14)$$

اثبات. گره حسگر در شبکه ممکن است در حالت بیداری و گوش دادن به حالت بیکار باشد و در تمام دوره‌های گوش دادن بیکار هنگام کار وارد حالت خواب نمی‌شود. هنگامی که گره حسگر وارد حالت خواب می‌شود، انرژی مصرف شده توسط گره حسگر در گوش دادن به حالت بیکار باید بیشتر از انرژی مصرف شده توسط گره حسگر هنگامی که حالت کار را تعویض می‌کند، باشد، به عنوان مثال،

$$\begin{aligned} T_{idle\ listening} * C_{EoS}^{(S_i)} &\geq T_{wx} * C_{EoW}^{(S_i)} \\ \leftrightarrow T_{idle\ listening} * L(S_i) * I(S_i) * T_{idle\ listening} * \\ V_{VoS} &\geq T_{wx} * \frac{V_{VoS}}{2} * (I_{AoS} - I_{SoS}) * \\ T_{ASoS} \leftrightarrow T_{idle\ listening}^2 &\geq \frac{(I_{AoS} - I_{SoS}) * T_{ASoS}}{2 * L(S_i) * I(S_i)} T_{wx} \quad (15) \\ \leftrightarrow T_{idle\ listening} &\geq \\ \sqrt{\frac{(I_{AoS} - I_{SoS}) * T_{ASoS}}{2 * L(S_i) * I(S_i)}} T_{wx} \\ \leftrightarrow T_{idle\ listening} &\geq T_{th_Sleep} \end{aligned}$$

که در آن $T_{idle\ listening}$ ، زمان گوش دادن بیکار گره حسگر در حالت فعال است. آستانه حالت خواب T_{th_Sleep} حداقل زمان گوش دادن به حالت بیکار است که گره حسگر از حالت فعال به حالت خواب تغییر می‌کند و T_{wx} زمانی که یک گره از حالت فعال به حالت خواب تغییر می‌کند که در این مقاله به عنوان یک مقدار ثابت در نظر می‌گیریم و I_{AoS} جریان در حالت خواب گره حسگر، و I_{SoS} جریان در حالت خواب گره حسگر، و T_{ASoS} زمان مورد نیاز برای تغییر گره حسگر از حالت خواب به حالت فعال و $I(S_i)$ مقدار جریان مورد نیاز، V_{VoS} منبع ولتاژ و $L(S_i)$ مقدار بیت داده‌ها است.

۳-۱-۲- سازوکار جریمه

در شبکه حسگر بی‌سیم، گره‌های حسگر از اطلاعات کل شبکه اطلاعی ندارند و گره‌های حسگر اغلب راهبردهای غیرهمکاری را اتخاذ می‌کنند. به عبارت دیگر، گره‌های

وقتی گره در حالت فعال است و داده‌ای برای ارسال ندارد، در این صورت در حالت شنیدن و آماده دریافت داده است: یعنی هزینه‌هایی که گره حسگر در حالت فعال متحمل می‌شود، هزینه انرژی سنجش مطابق با معادله (۱)، هزینه انرژی برای دریافت مطابق با معادله (۵) و هزینه انرژی برای پردازش داده مطابق با معادله (۲) است.

$$C_i^{(S_i, S-i)} = C_{EoS}^{(S_i)} + C_{EoR}^{(S_i)} + C_{EoP}^{(S_i)} \quad (12)$$

وقتی گره در حالت خواب است و داده‌ای برای ارسال دارد:

یعنی هزینه‌هایی که گره حسگر در حالت فعال متحمل می‌شود، هزینه انرژی در انتقال از حالت خواب به حالت فعال مطابق با معادله (۶)، هزینه انرژی برای ارسال مطابق با معادله (۳) و هزینه انرژی برای پردازش داده مطابق با معادله (۲) است.

$$C_i^{(S_i, S-i)} = C_{EoT}^{(S_i)} + C_{EoW}^{(S_i)} + C_{EoP}^{(S_i)} \quad (13)$$

هنگامی که گرهی داده‌ای برای ارسال دارد، زمان لازم برای ارسال داده برابر است با مجموع زمان‌هایی که گره حسگر محیط اطراف را بررسی کند، به علاوه مدت زمان برای ارسال بسته RTS و دریافت بسته CTS به علاوه زمان ارسال بسته و انتظار برای دریافت بسته ACK است.

۳-۱-۳- تعیین آستانه حالت خواب

هنگامی که گره حسگر در شبکه حسگر بی‌سیم بیشتر از دوره زمانی تعیین شده در حالت گوش دادن باشد، در آن صورت گره در حالت گوش دادن بیکار است و باید به حالت خواب تغییر حالت بدهد. به عبارت دیگر، مصرف انرژی گره‌های حسگر را می‌توان با تغییر به حالت خواب از یک زمان گوش دادن بیکار کاهش داد و در نتیجه طول عمر شبکه حسگر را افزایش داد. یعنی اگر گره حسگر در حالت گوش دادن بیکار باشد، می‌تواند به حالت خواب تغییر حالت بدهد که این کار باعث کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه می‌شود، زیرا انرژی بیشتری در حالت گوش دادن بیکار مصرف می‌شود. پس آستانه تغییر از حالت گوش دادن بیکار به حالت خواب T_{th_Sleep}

مجبور می‌کند تا از حالت فعال به حالت خواب تغییر حالت بدهد و گره حسگر پس از وارد شدن به حالت خواب، رفتار خودخواهانه‌ای نداشته باشد و عملکرد خودخواهانه‌ای از خودش بروز دهد و بسته‌ی داده و اطلاعاتی ارسال نکند و بعبارتی یک راهبرد غیرهمکاری را اتخاذ کند. در آن صورت شبکه شناسه گره حسگر را مشخص و علامت‌گذاری و گره را مجبور می‌کند تا در زمان‌های T بعدی بیدار بماند. حتی اگر در زمان‌های T بعدی، گره حسگر در حالت گوش دادن بیکار باقی بماند و زمان گوش دادن بیکار بیشتر از آستانه حالت خواب باشد. در واقع، گره حسگر بهای معین و سنگینی را برای این رفتار خودخواهانه و انتخاب راهبرد غیر همکاری می‌پردازد که باعث می‌شود گره حسگر به موقع از خواب بیدار شود تا بسته‌های داده ارسالی و اطلاعات را در حالت خواب آینده دریافت کند. با توجه به تابع درآمد و تابع هزینه بازی، می‌توان نتیجه گرفت که مطلوبیت به دست آمده توسط گره حسگر در زمان قبلی و جریمه بعدی T زمان بندی شده به شرح زیر است: به عبارتی مطلوبیت و سودمندی گره حسگر به شکل معادله (۱۷) را با توجه به تابع درآمد و تابع هزینه تعریف شده در معادله (۱۱) در زمان قبلی ($t=0$) و جریمه بعدی T زمان بندی شده مطابق با مدل بازی پیشنهادی تعریف می‌کنیم.

$$m_{22} + T_{data} \sum_{t=1}^T (m_{31})_t = 0 + T_{data} \sum_{t=1}^T [(R_{FoS} * P_{FoS}) - (C_{EoS}^{(Si)} + C_{EoT}^{(Si)} + C_{EoP}^{(Si)})] \quad (17)$$

که در آن $(m_{31})_t$ نشان‌دهنده سودمندی است که توسط گره حسگر S_i هنگام ارسال بسته‌ها در حالت جریمه زمان t به دست می‌آید.

گره حسگر پس از وارد شدن به حالت خواب، ممکن است رفتار خودخواهانه‌ای اتخاذ کند و داده‌ای ارسال نکند. پس در زمان اولیه ($t=0$)، سودمندی گره حسگر برابر m_{22} می‌باشد، یعنی در حالت خواب، تمایلی به ارسال ندارد. در ادامه، شبکه گره حسگر را مجبور به بیدار بودن و تنبیه می‌کند تا به موقع از خواب بیدار و داده را ارسال کند. پس

حسگر تنها می‌تواند راهبرد بهینه را با توجه به منافع خود انتخاب کند، اما از دیدگاه کل شبکه بهینه نیستند. با توجه به ترجیح منطقی، هنگامی که گره حسگر وارد حالت خواب می‌شود، ممکن است تصمیم بگیرد که در خواب بماند و دریافت و ارسال بسته‌های داده را متوقف کند تا در مصرف انرژی صرفه‌جویی شود. این رفتار خودخواهانه گره، منجر به تأخیر یا شکست در انتقال بسته داده می‌شود که مستقیماً بر سازوکار عملکرد کل شبکه حسگر بی‌سیم تأثیر می‌گذارد. به منظور جلوگیری از رفتار خودخواهانه گره حسگر، یک سازوکار جریمه برای تشویق گره‌های حسگر به بیدار شدن فعال برای ارسال و دریافت بسته‌های داده در حالت خواب معرفی شده است. به منظور اطمینان کردن از عملکرد عادی شبکه حسگر بی‌سیم، اقدامات خاص سازوکار تنبیه اتخاذ شده در این مقاله به شرح زیر است: هنگامی که گره حسگر در شبکه حسگر بی‌سیم رفتار خودخواهانه از خود نشان می‌دهد، شبکه بلافاصله گره را علامت‌گذاری کرده و شناسه آن را مکان‌یابی می‌کند.

ماتریس سودمندی U گره حسگر را به صورت زیر به دست می‌آورد:

$$U = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \\ m_{31} & m_{32} \end{pmatrix} \quad (16)$$

ماتریس $m_{\alpha\beta}$ نشان‌دهنده سودمندی است که پس از انجام یک عمل گره حسگر به دست می‌آورد. $\alpha=1$ به معنی این است که گره حسگر یک عمل بیدار شدن را انجام و $\alpha=2$ به معنی این است که گره حسگر یک عمل خواب را انجام می‌دهد و $\alpha=3$ به معنی این است که گره حسگر جریمه می‌شود و $\beta=1$ به معنی این است که گره حسگر بسته داده را به گره حسگر بعدی یا گره چاهک ارسال می‌کند و $\beta=2$ به معنی این است که گره حسگر بسته داده را به گره حسگر بعدی یا گره چاهک ارسال نمی‌کند [۲۹]. وقتی که گره حسگر در شبکه در حالت گوش دادن بیکار باشد و زمان گوش دادن بیکار آن بیشتر از مقدار آستانه خواب باشد، در آن صورت، شبکه آن گره حسگر را

در ادامه، گره حسگر در هر تایمی (حالت خواب و حالت بیداری) تمایل به ارسال داده دارد. پس در زمان‌های T بعدی $\{1, \dots, T\}$ ، مطلوبیت و سودمندی گره حسگر برابر m_{21} و m_{11} می‌باشد.

برای این که از تعادل راهبردها اطمینان حاصل و از مرگ زودرس گره‌های حسگر به دلیل تنبیه شدن بیش از حد جلوگیری کنیم که هم می‌تواند گره‌های خودخواه را باز دارد و هم باعث افزایش طول عمر شبکه بشود، رابطه زیر برقرار می‌شود:

$$m_{22} + T_{data} \sum_{t=1}^T (m_{31})_t \leq m_{21} + (1-p) * T_{data} \sum_{t=1}^T (m_{11})_t + p \sum_{t=1}^T (m_{21})_t \quad (20)$$

پس از چند مرحله ساده‌سازی خواهیم داشت:

$$T * T_{data} * P_{FoS} - (C_{EoS}^{(S_i)} + C_{EoT}^{(S_i)} + C_{EoP}^{(S_i)}) \leq [R_{FoS} * P_{FoS} - (C_{EoT}^{(S_i)} + C_{EoW}^{(S_i)} + C_{EoP}^{(S_i)})] + T * T_{data} * [(R_{FoS} * P_{FoS}) - (C_{EoS}^{(S_i)} + C_{EoT}^{(S_i)} + C_{EoP}^{(S_i)})] + T_{data} * P * [(R_{FoS} * P_{FoS}) - (C_{EoS}^{(S_i)} + C_{EoT}^{(S_i)} + C_{EoP}^{(S_i)})] + T * P * [(R_{FoS} * P_{FoS}) - (C_{EoS}^{(S_i)} + C_{EoT}^{(S_i)} + C_{EoP}^{(S_i)})] - T * P * C_{EoW}^{(S_i)} \quad (21)$$

و در نتیجه:

$$(C_{EoS}^{(S_i)} + C_{EoW}^{(S_i)} + C_{EoP}^{(S_i)}) - (R_{FoS} * P_{FoS}) \leq T * P * [(R_{FoS} * P_{FoS}) - (C_{EoT}^{(S_i)} + C_{EoP}^{(S_i)}) * (1 - T_{data})] + (T_{data} * C_{EoS}^{(S_i)}) - C_{EoW}^{(S_i)} \quad (22)$$

در نهایت خواهیم داشت:

$$\frac{(C_{EoS}^{(S_i)} + C_{EoW}^{(S_i)} + C_{EoP}^{(S_i)}) - (R_{FoS} * P_{FoS})}{p * \left[\left((R_{FoS} * P_{FoS}) - (C_{EoT}^{(S_i)} + C_{EoP}^{(S_i)}) * (1 - T_{data}) \right) + (T_{data} * C_{EoS}^{(S_i)}) - C_{EoW}^{(S_i)} \right]} \leq T \quad (23)$$

این معادله محدوده نشان‌دهنده تعداد زمان‌هایی برای تنبیه و مجازات گره حسگر S_i که رفتار خودخواهانه‌ای از خود تحت سازوکار جریمه بروز می‌دهد، است و به عبارتی عملکرد خودخواهانه‌ای از خودش بروز دهد. با توجه به تعریف تعادل نش، می‌توان مشخص کرد که وقتی تعداد

در زمان‌های T بعدی $\{1, \dots, T\}$ ، مطلوبیت و سودمندی گره حسگر برابر m_{31} می‌باشد.

حالا اگر گره حسگر در شبکه، راهبرد همکاری را اتخاذ کند. در آن صورت، هنگامی که به آستانه T_{th_Sleep} می‌رسد، به حالت خواب می‌رود و از حالت فعال به حالت خواب تغییر حالت می‌دهد. به عبارتی گره حسگر همیشه از ارسال بسته داده اطمینان حاصل می‌کند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مطلوبیت به دست آمده توسط گره در زمان قبلی و زمان T بعدی: به عبارتی مطلوبیت و سودمندی گره حسگر به شکل معادله (۱۸) را با توجه به تابع درآمد و تابع هزینه تعریف شده در معادله‌های (۱۲) و (۱۳) در زمان قبلی ($t=0$) و جریمه بعدی T زمان بندی شده مطابق با مدل بازی پیشنهادی تعریف می‌کنیم.

$$m_{21} + (1-p) * T_{data} \sum_{t=1}^T (m_{11})_t + p * \sum_{t=1}^T (m_{21})_t = [(R_{FoS}) * P_{FoS} - (C_{EoS}^{(S_i)} + C_{EoW}^{(S_i)} + C_{EoP}^{(S_i)})] + (1-p) * T_{data} \sum_{t=1}^T [(R_{FoS} * P_{FoS}) - (C_{EoS}^{(S_i)} + C_{EoT}^{(S_i)} + C_{EoP}^{(S_i)})] + p * [(R_{FoS} * P_{FoS}) - (C_{EoS}^{(S_i)} + C_{EoW}^{(S_i)} + C_{EoP}^{(S_i)})] \quad (18)$$

جایی که $(m_{11})_t$ و $(m_{21})_t$ نشان‌دهنده سودمندی ارسال بسته‌های داده گره‌های حسگر به ترتیب در حالت فعال و حالت خواب می‌باشد و p نسبت گره حسگر S_i است که در زمان‌های T وارد حالت خواب می‌شود [۲۹]. به عبارتی p ، احتمال ورود گره حسگر به حالت خواب به صورت زیر می‌باشد که مقدار آن برابر با نسبت آستانه حالت خواب T_{th_Sleep} به زمان گوش دادن بیکار گره حسگر در حالت فعال $T_{idle_listening}$ می‌باشد.

$$p = 1 - \frac{T_{th_Sleep}}{T_{idle_listening}} \quad (19)$$

گره حسگر پس از وارد شدن به حالت خواب، ممکن است راهبرد همکاری اتخاذ کند و داده‌ای ارسال کند. پس در زمان اولیه ($t=0$)، سودمندی گره حسگر برابر m_{21} می‌باشد، یعنی در حالت خواب، تمایلی به ارسال دارد.

۳-۲-۴- تنظیم پنجره رقابت

با کنترل اندازه پنجره رقابت، می‌توان احتمال برخورد را کاهش داد، تأخیر زمانی را به حداقل رساند و مصرف انرژی گره حسگر را نیز کاهش داد [۲۳]. مثلاً وقتی دو تا گره حسگر می‌خواهند بسته‌ای را همزمان ارسال کنند که این کار باعث ایجاد برخورد بسته و دور ریختن آن می‌شود و در ارسال به مقصد از بین برود و صحیح به مقصد تحویل داده نشود که این باعث کاهش عملکرد شبکه و مصرف انرژی بیشتر می‌شود. کنترل کردن اندازه پنجره رقابت باعث کاهش احتمال برخورد می‌شود و همچنین تأخیر زمانی به حداقل مقدار خود می‌رسد. علاوه بر این مصرف انرژی کاهش می‌یابد و باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌شود و در نتیجه، طول عمر شبکه افزایش می‌یابد.

برای راحتی تعریف کنید $CW_{min} = W$ که CW_{min} و CW_{max} مقادیر حداقل و حداکثر اندازه پنجره رقابت اولیه هستند و m «حداکثر مرحله عقب نشینی» باشد و $2^m W$ $CW_{max} =$ است و به عبارتی $CW_i = 2^i W$ هنگامی که $i \in (m, 0)$ «مرحله عقب نشینی» نامیده می‌شود و هنگامی که ایستگاه قصد ارسال داده‌ای دارد، بازه عقب‌نشینی تصادفی ایجاد می‌کند تا احتمال برخورد با بسته‌هایی که توسط ایستگاه‌های دیگر منتقل می‌شوند، به حداقل برساند. اگر مقدار CW کم باشد، اگر بسیاری از گره‌ها به‌طور همزمان اقدام به انتقال داده‌ها و بسته‌ای کنند، ممکن است برخی از آنها فاصله عقب‌نشینی یکسانی داشته باشند. این بدان معنی است که به‌طور مداوم برخوردهایی وجود خواهد داشت که اثرات جدی بر عملکرد شبکه خواهد داشت. از سوی دیگر، مقدار CW زیاد باشد، اگر تعداد کمی از گره‌ها بخواهند داده‌ها و بسته‌ای را ارسال کنند، احتمالاً تأخیرهای طولانی عقب‌نشینی خواهند داشت که منجر به کاهش عملکرد شبکه می‌شود [۳۱]. پس مقدار $CW_{min} = 32$ می‌باشد و پس از هر برخورد مقدار آن دوبرابر می‌شود، تا زمانی که مقدار $CW_{max} = 1024$ شود.

زمان‌های جریمه T مقدار کمتری داشته باشد، تعادل نش کل شبکه است و در این صورت، باعث می‌شود تا انرژی گره حسگر به دلیل جریمه‌های بیش از حد در شبکه حسگر زود هنگام تخلیه نشود که این به نوبه خود باعث افزایش طول عمر شبکه حسگر می‌شود و همچنین از طرفی، یک تاثیر منع‌کنندگی کافی بر روی گره‌های حسگر دارد که در نتیجه، اثر مطلوبی بر طول عمر و عملکرد گره‌های حسگر و شبکه‌ی حسگر بی‌سیم دارد.

۳-۲-۳- تعیین حالت بیداری

در شبکه حسگر، گره A می‌خواهد به گره B بسته‌ی داده بفرستد در حالی که گره B در حالت خواب است. به عبارتی از رفتار خودخواهانه گره B برای بیداری و دریافت داده جلوگیری می‌کنیم که در صرفه‌جویی انرژی گره A نیز موثر می‌باشد. پس آستانه تغییر از حالت خواب به حالت بیداری T_{th_Active} است، یعنی:

$$T_{th_Active} = \frac{T_{listen} C_{EoS}^{(S_i)}}{C_{EoR}^{(S_i)} - C_{EoW}^{(S_i)}} \quad (24)$$

اثبات. گره حسگر در شبکه ممکن است در حالت خواب باشد و قصدی برای بیدار شدن نداشته باشد. در حالی که گره دیگری قصد ارسال داده برای آن را دارد. هنگامی گره حسگر وارد حالت بیداری و فعال می‌شود، زمان و انرژی مصرف شده توسط گره حسگر هنگام جابجایی حالت بین خواب و بیداری باید کمتر از زمان حالت خواب و انرژی مصرف شده توسط گره حسگر برای دریافت داده باشد، به عنوان مثال:

$$T_{Sleep} * C_{EoW}^{(S_i)} + T_{listen} * C_{EoS}^{(S_i)} \leq T_{Sleep} * C_{EoR}^{(S_i)} \rightarrow \frac{T_{listen} C_{EoS}^{(S_i)}}{C_{EoR}^{(S_i)} - C_{EoW}^{(S_i)}} \leq T_{Sleep} \rightarrow T_{th_Active} \leq T_{Sleep} \quad (25)$$

که در آن T_{Sleep} ، زمان خواب یک گره حسگر است. آستانه حالت بیداری T_{th_Active} ، حداقل زمان خواب یک گره حسگر که از حالت خواب به حالت فعال تغییر می‌کند.

جدول ۲: مدل بازی برای تنظیم پنجره رقابت

		بازیکن ۲ (سایر گره ها)	
		ارسال	انتظار
بازیکن ۱ (گره i)	ارسال	$\tau_i (\bar{\tau}_{-i})^{N-1}$	$\tau_i (1 - \bar{\tau}_{-i})^{N-1}$
	انتظار	$(1 - \tau_i) (\bar{\tau}_{-i})^{N-1}$	$(1 - \tau_i) (1 - \bar{\tau}_{-i})^{N-1}$
		انتظار	ارسال
		$(1 - \tau_i) (\bar{\tau}_{-i})^{N-1}$	$(1 - \tau_i) (1 - \bar{\tau}_{-i})^{N-1}$

برای حالت (ارسال، انتظار) یا تعادل نش کل شبکه داریم:

$$\begin{aligned}
 P_{s_i} &= \frac{n\tau_i(1-\tau_i)^{n-1}}{1-(1-\tau_i)^n} \\
 P_{s_{-i}} &= \frac{(1-\bar{\tau}_{-i})(1-(1-\bar{\tau}_{-i})^{1-i})}{1-(1-(1-\bar{\tau}_{-i})^1)} = \frac{(1-\bar{\tau}_{-i})}{(1-\bar{\tau}_{-i})} = 1 \\
 P_{s_{-i}} &= \frac{(1-\bar{\tau}_{-i})(1-(1-\bar{\tau}_{-i})^{1-i})}{1-(1-(1-\bar{\tau}_{-i})^1)} = \frac{(1-\bar{\tau}_{-i})}{(1-\bar{\tau}_{-i})} = 1 \\
 P_s &= P_{s_i} * P_{s_{-i}} = \frac{n\tau_i(1-\tau_i)^{n-1}}{1-(1-\tau_i)^n}
 \end{aligned} \quad (31)$$

برای حالت (ارسال، ارسال) داریم:

$$\begin{aligned}
 P_{s_i} &= \frac{n\tau_i(1-\tau_i)^{n-1}}{1-(1-\tau_i)^n} \\
 P_{s_{-i}} &= \frac{\bar{\tau}_{-i}(1-\bar{\tau}_{-i})^{1-i}}{1-(1-\bar{\tau}_{-i})^1} = \frac{\bar{\tau}_{-i}}{\bar{\tau}_{-i}} = 1 \\
 P_{s_{-i}} &= \frac{\bar{\tau}_{-i}(1-\bar{\tau}_{-i})^{1-i}}{1-(1-\bar{\tau}_{-i})^1} = \frac{\bar{\tau}_{-i}}{\bar{\tau}_{-i}} = 1 \\
 P_s &= P_{s_i} * P_{s_{-i}} = \frac{n\tau_i(1-\tau_i)^{n-1}}{1-(1-\tau_i)^n}
 \end{aligned} \quad (32)$$

برای حالت (انتظار، ارسال) داریم:

$$\begin{aligned}
 P_{s_i} &= \frac{n(1-\tau_i)(\tau_i)^{n-1}}{1-(\tau_i)^n} = 0 \\
 P_{s_{-i}} &= \frac{\bar{\tau}_{-i}(1-\bar{\tau}_{-i})^{1-i}}{1-(1-\bar{\tau}_{-i})^1} = \frac{\bar{\tau}_{-i}}{\bar{\tau}_{-i}} = 1 \\
 P_{s_{-i}} &= \frac{\bar{\tau}_{-i}(1-\bar{\tau}_{-i})^{1-i}}{1-(1-\bar{\tau}_{-i})^1} = \frac{\bar{\tau}_{-i}}{\bar{\tau}_{-i}} = 1 \\
 P_s &= P_{s_i} * P_{s_{-i}} = 0
 \end{aligned} \quad (33)$$

برای حالت (انتظار، انتظار) داریم:

وقتی گره‌ای بسته کنترلی می‌خواهد بفرستد حداقل و حداکثر اندازه پنجره رقابت ۳۲ و ۱۰۲۴ است. اگر در شبکه برای اولین بار برخورد صورت گیرد، حداقل اندازه پنجره رقابت دوبرابر می‌شود یعنی برابر ۶۴ می‌شود. حداقل اندازه پنجره رقابت برای برخورد دوم برابر ۱۲۸، برای برخورد سوم ۲۵۶، برای برخورد چهارم ۵۱۲ و برای برخورد پنجم ۱۰۲۴ می‌شود و برای بار ششم گره فرستنده از ارسال بسته صرف‌نظر کرده و یک پیام خطا برای لایه بالاتر صادر می‌کند.

$$\tau_i = \frac{2}{1+W} \quad (26)$$

که τ_i احتمال ارسال یک ایستگاه در یک برش زمانی است.

$$\begin{cases} \tau_i = \frac{2}{1+W} & e_{e,i} \geq e_{th} \\ \text{عدم ارسال} & e_{e,i} \leq e_{th} \end{cases} \quad (27)$$

که $e_{e,i}$ انرژی باقیمانده تخمینی گره i ام و e_{th} آستانه

انرژی می‌باشد:

$$e_{th} = e_m(j) \times \frac{CW_{min}}{CW_{max}} \quad (28)$$

و

$$e_m(j) = \frac{e_{eff}}{e_{max}} e_m(j-1) - I * T_{active} \quad \forall j = 1, \dots, n_b \quad (29)$$

$e_m(0)$ مقدار انرژی ظرفیت باقیمانده باتری،

مقدار انرژی ظرفیت کامل باتری، e_{eff} مقدار انرژی ظرفیت موثر باتری، e_{max} مقدار انرژی ظرفیت کامل باتری، I مقدار جریان مورد نیاز، T_{active} مدت زمان دوره بیداری و n_b تعداد دوره‌های بیداری می‌باشد.

برای محاسبه P_s ، احتمال انتقال موفقیت آمیز، داریم:

$$P_s = \frac{n\tau_i(1-\tau_i)^{n-1}}{1-(1-\tau_i)^n} \quad (30)$$

یک عدد ثابت n تعداد گره‌های رقابت در شبکه هستند.

با یک انتقال موفقیت‌آمیز ضبط می‌شود.

راهکار پیشنهادی به صورت شبکه‌کد در شکل (۲)

نمایش داده شده است.

```

# Proposed Algorithm
# Initialize:
N = total nodes
Dead = 0 # the number of dead nodes.
# Begin
for i = 1 : N
  if Si.E > 0 # If node is alive
    Cluster formation
    Record the ID of node
    if the sensor nodes need to forward the data
      The sensor nodes forward the data
      Calculate the contention window
    else
      Calculate the sleep threshold Tth_Sleep
      if Tidle listening < Tth_Sleep
        The sensor node remains listen
      else
        The sensor node remains idle listen
        and The sensor node will enter the
        sleep state from idle listening
      end if
    end if
  end if
end for

```

شکل ۲: شبه کد راهکار پیشنهادی

۳. نتایج شبیه‌سازی

در سال‌های اخیر، چهار دسته مختلف از پروتکل‌ها تکامل یافته که عبارتند از: پروتکل مسیریابی مبتنی بر جغرافیا، پروتکل‌های مسیریابی داده‌محور، پروتکل‌های مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی و پروتکل مسیریابی ترکیبی و ما متناسب با روش پیشنهادی خود از پروتکل‌های مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی استفاده می‌کنیم.

در این مقاله، برای شبیه‌سازی راهکار پیشنهادی از نرم افزار NS2 استفاده کردیم و طرح پیشنهادی در این مقاله با عنوان GTSS را با نسخه بهبود یافته الگوریتم LEACH مبتنی بر زمان‌بندی تی‌دی‌ام‌آی آگاه از انرژی^۵ [۳۲] و نسخه بهبود یافته الگوریتم خوشه‌بندی نظریه بازی محلی^۶ (LGCA) با افزودن جزء انرژی برای یافتن سرخوشه‌های مناسب [۳۳] به صورت پارامتریک مقایسه کردیم. شایان ذکر است الگوریتم LEACH در حیطه خوشه‌بندی همواره

$$P_{S_i} = \frac{n(1-\tau_i)(\tau_i)^{n-1}}{1-(\tau_i)^n} = 0$$

$$P_{S_{-i}} = \frac{(1-\bar{\tau}_{-i})(1-(1-\bar{\tau}_{-i}))^{1-i}}{1-(1-(1-\bar{\tau}_{-i}))^2} = \frac{(1-\bar{\tau}_{-i})}{(1-\bar{\tau}_{-i})} = 1 \quad (34)$$

$$P_{S_{-i}} = \frac{(1-\bar{\tau}_{-i})(1-(1-\bar{\tau}_{-i}))^{1-i}}{1-(1-(1-\bar{\tau}_{-i}))^2} = \frac{(1-\bar{\tau}_{-i})}{(1-\bar{\tau}_{-i})} = 1$$

$$P_S = P_{S_i} * P_{S_{-i}} = 0$$

۳-۲-۴- تابع سودمندی

تأخیر زمانی با احتمال انتقال موفقیت‌آمیز و احتمال ارسال یک ایستگاه در یک برش زمانی رابطه نزدیک دارد، یعنی تأخیر زمانی یک رابطه معکوس با احتمال انتقال موفقیت‌آمیز و احتمال انتقال موفقیت‌آمیز با احتمال ارسال یک ایستگاه در یک برش زمانی رابطه دارد. همچنین رابطه‌ای بین مصرف انرژی گره حسگر با این احتمالات وجود دارد، به عبارتی این احتمالات با مصرف انرژی گره حسگر رابطه دارند. به همین دلیل در این مقاله یک تابع سودمندی را تعریف می‌کنیم که با تأخیر زمانی رابطه معکوس دارد. تابع سودمندی را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$U(\tau_i, \bar{\tau}_{-i}) = \frac{1}{T_{d,i}} \quad (35)$$

که $T_{d,i}$ تابع تأخیر زمانی است:

$$T_{d,i} = E(N_c)(E(BD) + T_c + T_o) + (E(BD) + T_s) \quad (36)$$

$$E(N_c) = \frac{1}{P_s} - 1$$

که در آن $E(N_c)$ تعداد برخوردهای یک تاب تا دریافت موفقیت‌آمیز آن است، $E[BD]$ میانگین تأخیر برگشتی است. از آنجایی که مقدار متوسط $E[BD]$ برای محاسبه بسیار پیچیده است، باید آن را به عنوان یک مقدار ثابت در این مقاله در نظر بگیریم.

T_c میانگین زمانی که کانال توسط ایستگاه‌های دارای برخورد گرفته می‌شود، T_o زمانی است که یک ایستگاه باید در هنگام برخورد انتقال تاب آن منتظر بماند، قبل از این که دوباره کانال را حس کند، T_s میانگین زمانی است که کانال

5-Energy-aware TDMA scheduling

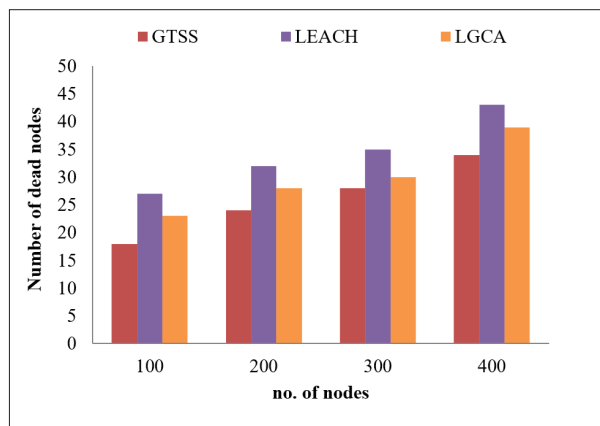
6-Localized Game theoretical Clustering Algorithm (LGCA)

۳-۲- طول عمر شبکه

برای مقایسه طول عمر شبکه بین الگوریتم‌های مورد نظر، ما تعداد کل گره‌های مرده را با هم مقایسه کرده‌ایم. شکل (۴) تعداد گره‌های مرده برای سه الگوریتم را به ازای تعداد گره‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به بهبود مصرف انرژی در راهکار پیشنهادی، تعداد گره‌های مرده در طول زمان در این راهکار نسبت به دو الگوریتم دیگر به طور متوسط حدود ۱۵ درصد کمتر است. در راهکار پیشنهادی، و در هر مرحله براساس میزان انرژی مصرفی، میزان انرژی باقیمانده و آستانه به دست آمده برای انرژی، تمایل هر گره در بلند مدت به سمت انتخاب حالت‌های با مصرف انرژی پایین‌تر است و گرهی برای ارسال انتخاب می‌شود که مقدار انرژی باقیمانده آن بیشتر از آستانه انرژی تخمینی باشد.

۳-۳- میزان تحویل بسته‌ها به مقصد

شکل (۵) میزان تحویل بسته‌ها به مقصد را در سه راهکار مورد نظر نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۵) دیده می‌شود، میزان تحویل بسته‌ها به مقصد در راهکار پیشنهادی به طور متوسط حدود ۷ درصد از دو پروتکل دیگر بالاتر است.



شکل ۴: مقایسه طول عمر شبکه

یکی از ایده‌های مرجع و پر استناد در سال‌های اخیر محسوب می‌شود، از سوی دیگر الگوریتم LGCA، یک راهکار جدید مبتنی بر نظریه بازی‌ها در این حیطة است که هر دو الگوریتم گزینه بسیار مناسب و نزدیکی برای مقایسه با رویکرد پیشنهادی محسوب می‌شوند.

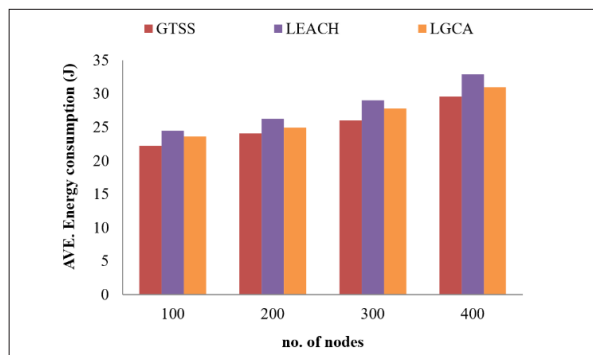
برای مقایسه کارایی الگوریتم‌های مورد نظر، پارامترهای میزان مصرف انرژی، طول عمر شبکه، نرخ تحویل صحیح بسته‌ها به مقصد، تاخیر انتها به انتها و سربرابر کنترلی اندازه‌گیری و مقایسه شده‌اند، برای این منظور هر اجرای شبیه‌سازی ۲۰۰ بار تکرار شده است و میانگین نتایج به دست آمده گزارش شده‌است.

جدول ۳: خلاصه پارامترها و تنظیمات شبیه‌سازی

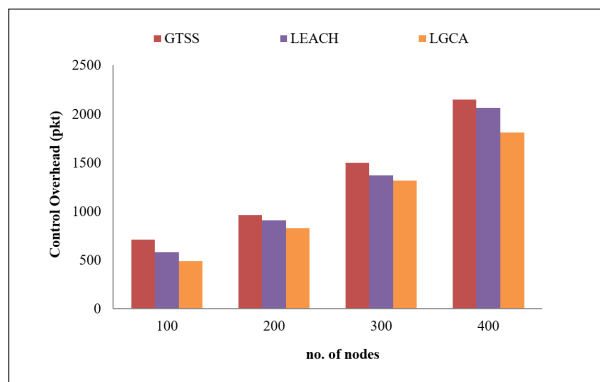
پارامتر	مقدار
محدوده‌ی ناحیه شبیه‌سازی	۲۰۰۰ در ۱۰۰۰ متر
تعداد گره	۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰
انرژی اولیه	۱۰ ژول
زمان شبیه‌سازی	۹۰۰ ثانیه

۳-۱- میانگین مصرف انرژی

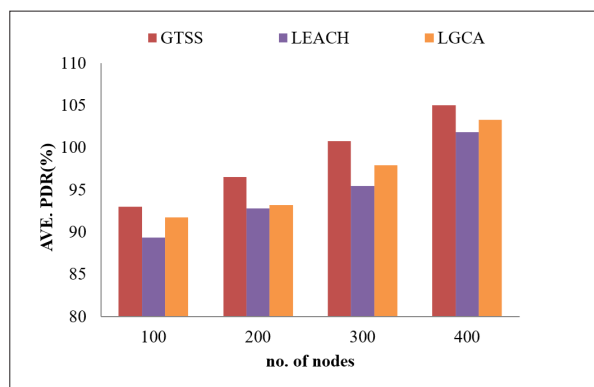
شکل (۳) مصرف انرژی گره‌های حسگر برای سه الگوریتم با تعداد گره‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نمایان است، راهکار پیشنهادی به طور متوسط حدود ۱۰/۵ درصد مصرف انرژی در شبکه را کاهش می‌دهد.



شکل ۳: مقایسه میانگین مصرف انرژی



شکل ۷: مقایسه سربار کنترلی



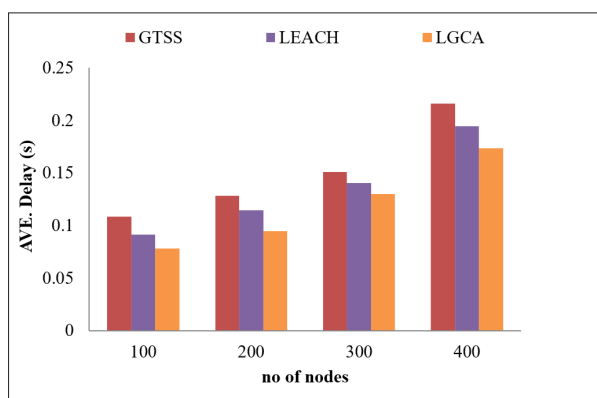
شکل ۵: مقایسه نرخ تحویل بسته‌ها به مقصد

۴. نتیجه‌گیری

به منظور صرفه‌جویی در مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه‌های حسگر، در این مقاله یک الگوریتم MAC آگاه از انرژی مبتنی بر نظریه بازی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم پیشنهاد شد. در راهکار پیشنهادی، آستانه حالت خواب تعیین شده است که اگر زمان حالت گوش دادن گره حسگر بیشتر از دوره زمانی تعیین شده در حالت گوش دادن باشد، در آن صورت در حالت گوش دادن بیکار است و گره حسگر برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی باید وارد حالت خواب شود. همچنین یک سازوکار جریمه در این مقاله، پیشنهاد شده است که به منظور جلوگیری از اتخاذ یک راهبرد غیرهمکاری گره حسگر پس از خواب در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، برای جلوگیری از برخورد در یک گره چاهک، یک پنجره رقابت تنظیم شده است که اگر مقدار انرژی باقیمانده تخمینی گره حسگر بیشتر از آستانه انرژی بر اساس حداقل و حداکثر اندازه پنجره رقابت باشد، در آن صورت، گره حسگر برای ارسال، انتخاب می‌شود و در نتیجه، تعداد بسته‌هایی که به مقصد تحویل داده می‌شود، بیشتر است. به منظور ارزیابی، مقایسه‌ای بین راهکار پیشنهادی (GTSS) با روش‌های دیگر (LEACH و LGCA) صورت گرفت و نتایج شبیه‌سازی نشان داد که این طرح و مدل پیشنهادی از نظر انرژی مصرفی و نرخ تحویل بسته و طول عمر شبکه در مقایسه با دو روش دیگر از عملکرد خوبی برخوردار است. در مقابل در رویکرد

۳-۴- میانگین تأخیر انتها به انتها

شکل (۶) تأخیر انتها به انتها در سه راهکار مورد نظر را به ازای تعداد گره‌های متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نمایان است میزان تأخیر انتها به انتها به ازای بسته‌های تحویل شده در راهکار پیشنهادی به طور متوسط حدود ۶/۵ درصد بیشتر از دو راهکار دیگر است و آن به دلیل انتخاب لحظه ارسال گره‌ها بر اساس انرژی آنهاست.



شکل ۶: مقایسه تأخیر انتها به انتها

۳-۵- مقایسه سربار کنترلی

سربار تعداد بسته‌های کنترلی در شکل (۷) برای سه راهکار مورد نظر مقایسه شده است. در راهکار پیشنهادی تعداد بسته‌های کنترلی به ازای هر بسته داده نسبت به دو رویکرد دیگر به طور متوسط در حدود ۱۲ درصد بیشتر است.

- Measurement: Sensors, vol. 25, p.100642, 2023.
13. A. M. L. Abdulzahra, A. K. M. Al-Qurabat, and S. A. Abdulzahra, "Optimizing energy consumption in WSN-based IoT using unequal clustering and sleep scheduling methods" *Internet of Things*, vol. 22, pp.100765, 2023.
 14. J. Reyes, F. García, M. E. Lárraga, J. Gómez and L. Orozco-Barbosa, "Game of Sensors: An Energy-Efficient Method to Enhance Network Lifetime in Wireless Sensor Networks Using the Game of Life Cellular Automaton," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 129687-129701, 2022.
 15. M. Seif El-Nasr, B. Aghabeigi, D. Milam, M. Erfani, B. Lameman, H. Maygoli, and S. Mah, "Understanding and evaluating cooperative games, SIGCHI conference on human factors," *computing systems*, pp. 253-262, 2010.
 16. M. Gupta, N. Singh Aulakh, and I. Kaur Aulakh, "A game theory-based clustering and multi-hop routing scheme in wireless sensor networks for energy minimization," *International Journal of Communication Systems*, vol. 35, no. 10, pp. e5176, 2022.
 17. D. Lin, Q. Wang, "A game theory based energy efficient clustering routing protocol for WSNs", *Wireless Networks*, vol. 23, no. 4, pp. 1101-1111, 2017.
 18. T. AlSkaif, M. G. Zapata and B. Bellalta, "Game theory for energy efficiency in Wireless Sensor Networks: Latest trends," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 54, 2015.
 19. A. Churkin, J. Bialek, D. Pozo, E. Sauma and N. Korgin, "Review of Cooperative Game Theory applications in power system expansion planning," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 145, 2021.
 20. B. Wang, Y. Xia and S. Zhao, "Clustering Routing Algorithm for Wireless Sensor Network Based on Mixed Strategy Game Theory," *Sensors and Materials*, vol. 34, no. 2, pp. 885-896, 2022.
 21. D. Lin and Q. Wang, "An Energy-Efficient Clustering Algorithm Combined Game Theory and Dual-Cluster-Head Mechanism for WSNs," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 49894-49905, 2019.
 22. A. Churkin, J. Bialek, D. Pozo, E. Sauma, N. Korgin, "Review of Cooperative Game Theory applications in power system expansion planning", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 145, pp. 111056, 2021.
 23. H. Kim, H. Lee and S. Lee, "A cross-layer optimization for energy-efficient MAC protocol with delay and rate constraints," 2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Prague, Czech Republic, 2011, pp. 2336-2339.
 24. F. Li, G. Huang, Q. Yang and M. Xie, "Adaptive Contention Window MAC Protocol in a Global View for Emerging Trends Networks," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 18402-18423, 2021.
 25. B. Pati, J. L. Sarkar and C. R. Panigrahi, "ECS: An Energy-Efficient Approach to Select Cluster-Head in Wireless Sensor Networks," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 42, no. 2, pp.669-676, 2016.
- پیشنهادی هزینه‌های سربارکنترلی و تاخیر انتها به انتها نسبت به الگوریتم‌های دیگر قدری افزایش می‌یابد.
- ### ۵. مراجع
1. A. Srivastava, P. L. Mishra, "A Survey on WSN Issues with its Heuristics and Meta-Heuristics Solutions," *Wireless Personal Communications*, vol. 121, pp. 745-814, 2021.
 ۲. میثم یدالله زاده طبری «ارائه یک الگوریتم مسیریابی انرژی‌آگاه جهت متوازن‌سازی جریان ترافیک داده در شبکه‌های حسگر بی‌سیم باتکیه برانتخاب بهینه گره سرخوشه»، *مجله علوم رایانشی، محاسبات نرم، دوره ۶، شماره ۱، صفحات ۹۱-۱۰۲، اردیبهشت ۱۴۰۰*.
 3. F. Alawad and F. A. Kraemer, "Value of Information in Wireless Sensor Network Applications and the IoT: A Review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 10, pp. 9228-9245, 15 May15, 2022.
 ۴. سیده مولود امینی و سام جبه داری، «ارائه یک مسیر حرکت مناسب برای چاهک‌های متحرک در جهت کاهش مصرف انرژی»، *مجله علوم رایانشی، محاسبات نرم، دوره ۲، شماره ۱، صفحات ۴۶-۵۴، خرداد ۱۳۹۶*.
 5. O. Kanoun et al., "Energy-Aware System Design for Autonomous Wireless Sensor Nodes: A Comprehensive Review," *Sensors*, vol. 21, no. 2, p. 548, Jan. 2021.
 6. E. A. Evangelakos, D. Kandris, D. Rountos, G. Tselikis, and E. Anastasiadis, "Energy Sustainability in Wireless Sensor Networks: An Analytical Survey," *Journal of Low Power Electronics and Applications*, vol. 12, no. 4, p. 65, Dec. 2022.
 7. A. J. Williams, M. F. Torquato, I. M. Cameron, A. A. Fahmy and J. Sienz, "Survey of Energy Harvesting Technologies for Wireless Sensor Networks," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 77493-77510, 2021.
 8. J. Singh, R. Kaur, and D. Singh, "Energy harvesting in wireless sensor networks: A taxonomic survey," *International Journal of Energy Research*, vol. 45, no. 1, pp.118-140, 2021.
 9. A. Mateen, A. Ahad, S. Zia, I. Shayea and S. Ali, "Energy-efficient routing to prevent void holes in heterogeneous 5G wireless sensor network using game theory," *International Conference on Smart Computing and Application (ICSCA)*, Hail, Saudi Arabia, 2023, pp. 1-6.
 10. M. S. Shahryari, L. Farzinvas, M. R. Feizi-Derakhshi, and A. Taherkordi, "High-throughput and energy-efficient data gathering in heterogeneous multi-channel wireless sensor networks using genetic algorithm," *Ad Hoc Networks*, vol. 139, pp. 103041, 2023.
 11. I. Nassra and J. V. Capella, "Data Compression Techniques in IoT-enabled Wireless Body Sensor Networks: A Systematic Literature Review and Research Trends for QoS Improvement," *Internet of Things*, p.100806, 2023.
 12. G. S. Uthayakumar, B. Dappuri, M. Vanitha, R. Suganthi, V. Savithiri, and S. Kamatchi, "Design criteria for enhanced energy constraint MAC protocol for WSN,"

26. N. Ajmi, A. Helali, P Lorenz and R Mghaieth, "SPEECH-MAC: Special purpose energy-efficient contention-based hybrid MAC protocol for WSN and Zigbee network", *International Journal of Communication Systems*, vol. 34, no. 1, 2021.
27. Q. Huamei, F. Linlin, Y. Zhengyi, Y. Weiwei and W. Jia, "An energy-efficient MAC protocol based on receiver initiation and multi-priority backoff for wireless sensor networks", *IET Communications*, vol. 15, no. 20, pp. 2503-2512, 2021.
28. A. N. Sakib, M. Drieberg and A. A. Aziz, "Energy-Efficient Synchronous MAC Protocol based on QoS and Multi-priority for Wireless Sensor Networks," 11th IEEE Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE), Penang, Malaysia, 2021, pp. 347-352.
29. A. N. Sakib, M. Drieberg, S. Sarang, A. A. Aziz, N. T. T. Hang, and G. M. Stojanović, "Energy-Aware QoS MAC Protocol Based on Prioritized-Data and Multi-Hop Routing for Wireless Sensor Networks," *Sensors*, vol. 22, no. 7, p. 2598, Mar. 2022.
30. Eman Alzahrani, Fatma Bouabdallah, Hind Almisbahi, "State of the Art in Quorum-Based Sleep/Wakeup Scheduling MAC Protocols for Ad Hoc and Wireless Sensor Networks", *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 22, Article ID 6625385, 33 pages, 2022.
31. V. K. Garg, "Wireless Local Area Networks," in *Wireless Communications & Networking*, pp. 713-776, October. 2007.
32. R. Sinde, F. Begum, K. Njau, Sh. Kaijage, " Lifetime improved WSN using enhanced-LEACH and angle sector-based energy-aware TDMA scheduling," *Cogent Engineering*, vol. 7, no. 1, January. 2020.
33. Q. Liu, M. Liu, " Energy-efficient clustering algorithm based on game theory for wireless sensor networks," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 13, no. 11, Nov. 2017.