

ارائه یک الگوریتم مبتنی بر رایانش مه جهت مسیریابی شبکه‌های حسگر بی‌سیم

الهام میرزاوند بروجنی، دامهر رهبری و محسن نیک‌رای

اینترنت اشیا را به شبکه‌های حسگر بی‌سیم مرتبط دانست. شبکه‌های حسگر بی‌سیم قادر به مدیریت و نظارت محیط‌هایی هستند که معمولاً غیر قابل دسترس هستند (مانند جنگل‌های دورافتاده، دهانه آتشفشان، زیر دریا و یا مکان‌های صعب‌العبور) و این توانایی شبکه‌های حسگر بی‌سیم و همچنین کوچکی و ارزانی حسگرها، باعث محبوبیت این شبکه‌ها و گسترش استفاده از آنها در محیط‌های مدرن امروزی و صنعت‌های مختلف شده است. بنابراین شبکه‌های حسگر بی‌سیم، زیرساخت مناسبی برای اینترنت اشیا هستند. امروزه شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌توانند وظایف پیچیده‌ای مانند تلفیق داده‌ها را نیز انجام دهند [۴]. با وجود مزایای بسیار این شبکه‌ها، محدودیت‌هایی در انجام محاسبات، ظرفیت حافظه و منابع انرژی، مشکلاتی را در شبکه‌های حسگر بی‌سیم به دنبال داشته است [۵] به گونه‌ای که این مباحث به اصلی‌ترین چالش‌های شبکه‌های حسگر بی‌سیم تبدیل شده‌اند. محدودیت در مصرف انرژی باعث می‌شود که این شبکه‌ها طول عمر محدودی داشته باشند و بنابراین برای زنده نگه‌داشتن شبکه‌های حسگر بی‌سیم لازم است که منابع انرژی به طور مؤثری مدیریت شوند. مطالعات اخیر نشان داده که به کارگیری مفهوم محاسبات مه در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، موجب بهبود طول عمر این شبکه‌های می‌شود.

مفهوم محاسبات مه، اولین بار توسط سیسکو ارائه شد که در آن گره‌های مه در لبه شبکه و نزدیک به کاربران قرار می‌گیرند. گره‌های حسگر، مسیریاب‌ها و یا دروازه‌های خروجی مصداق‌هایی از گره‌های مه در شبکه هستند [۶]. از جمله مزایای وجود گره‌های مه در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، بهبود زمان واکنش، افزایش پایداری و آگاهی کاربران است [۶]. ارسال داده‌ها به گره‌های مه می‌تواند مشکلات زیر را که در محاسبات ابری وجود دارد حل نماید [۷]:

زمان پاسخ‌گویی: در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، گره‌ها به سرخوشه‌ها متصل می‌شوند تا این که در نهایت داده‌ها را به گره چاهک ارسال کنند. بدون وجود گره‌های مه، این داده‌ها توسط گره چاهک به ابر ارسال می‌شوند. با توجه به این که ابر در فاصله دوری از شبکه قرار دارد، ارسال داده‌ها و برگشت پاسخ از ابر زمان زیادی لازم دارد. در بسیاری از اپلیکیشن‌های بلادرنگ، زمان پاسخ‌گویی کوتاه حاصل از پردازش داده‌ها و تأخیر کم بسیار حیاتی است. استفاده از گره‌های مه که در لبه شبکه قرار گرفته‌اند می‌تواند بسیار مؤثر واقع شود. این گره‌ها به گره‌های داخل شبکه بسیار نزدیک هستند لذا ارتباطاتی با تأخیر کم بی‌سیم فراهم می‌شود.

تأخیر: به منظور کاهش تعداد بسته‌های از دست رفته و تأخیر در شبکه، انجام پردازش‌ها در مکانی نزدیک به حسگرها ضروری است. با توجه به این نکته که گره‌های مه در لبه شبکه قرار می‌گیرند، وجود این گره‌ها می‌تواند به پردازش داده‌های حجیم در زمان کوتاه‌تر و عملکرد بهتر شبکه کمک کند.

چکیده: شبکه‌های حسگر بی‌سیم از هزاران گره کوچک تشکیل شده‌اند که کوچکی و ارزانی این گره‌ها موجب استفاده گسترده آنها در زمینه‌های مختلف شده است. در کنار مزیت‌های این شبکه‌ها، محدودیت در مصرف انرژی، منابع پردازشی و ذخیره‌سازی موجب شده مطالعات بسیاری به منظور کاهش این محدودیت‌ها ارائه شود. در سال‌های اخیر با ظهور مفهوم محاسبات مه، راهکارهای جدید و مؤثری در زمینه مسیریابی شبکه‌های حسگر بی‌سیم مطرح شده است. از آنجایی که در این شبکه‌ها، حفظ گره‌های زنده و کاهش انرژی مصرفی گره‌ها حایز اهمیت است لذا محاسبات مه در راستای این هدف به کار گرفته می‌شود. در پروتکل‌های مطرح مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، بهترین راه جهت ارسال داده‌ها به سرخوشه‌ها و همچنین ایستگاه اصلی مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعات جدید از محاسبات مه، جهت یافتن بهترین روش مسیریابی بهره برده شده که در این روش‌ها کاهش انرژی مصرفی و افزایش طول عمر شبکه را شاهد بوده‌ایم. ما نیز در این مقاله یک معماری مبتنی بر رایانش مه جهت مسیریابی شبکه‌های حسگر بی‌سیم را ارائه داده‌ایم. مطابق نتایج شبیه‌سازی، این پروتکل، انرژی مصرفی را ۹٪ و همچنین تعداد گره‌های زنده را ۷۴٪ در مقایسه با روش مورد بررسی بهبود بخشیده است.

کلیدواژه: شبکه‌های حسگر بی‌سیم، طول عمر شبکه، کارآمدی انرژی، محاسبات مه.

۱- مقدمه

اینترنت اشیا در دنیای فناوری انقلاب بزرگی ایجاد کرده است. در اینترنت اشیا دستگاه‌های مختلف مانند اپلیکیشن‌های خانگی، اپلیکیشن‌های پزشکی، دوربین‌ها و غیره به اینترنت متصل می‌شوند و داده‌های خود را در بستر اینترنت انتقال می‌دهند [۱]. واژه «شیء» معمولاً به ماشین‌های هوشمند، پهپادها، ماشین‌های بدون سرنشین و همچنین حسگرهایی که پارامترهای مختلفی مانند دما، رطوبت و ... را اندازه‌گیری می‌کنند اطلاق می‌شود [۲]. داده‌های جدیدی که از محیط دریافت می‌شود از طریق اینترنت به یک ایستگاه مرکزی برای پردازش ارسال می‌شوند [۳]. با توجه به رشد فناوری، استفاده از وسایل هوشمند نیز بیشتر مورد استقبال مردم قرار گرفته است. این وسایل هوشمند به کمک حسگرهای خود اطلاعات را از محیط پیرامون جمع‌آوری می‌کنند. از آنجایی که شبکه‌های حسگر بی‌سیم از تعداد زیادی حسگرهای کوچک به منظور دریافت داده‌های محیطی تشکیل شده‌اند، بنابراین می‌توان

این مقاله در تاریخ ۱۰ مهر ماه ۱۳۹۶ دریافت و در تاریخ ۱۷ تیر ماه ۱۳۹۷ بازنگری شد. الهام میرزاوند بروجنی، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه قم، قم، ایران، (email: e.mirzavand@stu.qom.ac.ir).

دامهر رهبری، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه قم، قم، ایران، (email: d.rahbari@stu.qom.ac.ir).

محسن نیک‌رای (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه قم، قم، ایران، (email: m.nickray@qom.ac.ir).

تبدیل گره‌ها به سرخوشه با توجه به انرژی باقیمانده هر گره مورد ارزیابی قرار گرفته است. یکی دیگر از نسخه‌های ارتقایافته لیچ، پگاسیس است. هدف این روش افزایش طول عمر شبکه و کاهش مصرف انرژی است. در این روش داده‌ها در طول یک زنجیر فرستاده می‌شوند. داده‌های نهایی توسط یک نماینده به گره نهایی که همان ابر یا ایستگاه اصلی است ارسال می‌شود. در [۱۴] به ناهمگونی شبکه‌های حسگر بی‌سیم پرداخته شده است. نسخه اصلاح‌شده این پروتکل در [۱۵] آورده شده که در آن گره‌ها به دو دسته ساده و پرانرژی (با انرژی بیشتری نسبت به گره‌های ساده) دسته‌بندی می‌شوند. نسخه اصلاح‌شده کارآمد این روش [۱۶] است که در آن تعادل مصرف انرژی و بهبود کارایی دیده می‌شود. در پروتکل ذکرشده در [۹]، روش P-SEP معرفی شده است. این روش با بهره‌گیری از سیاست‌های جدیدی برای انتخاب سرخوشه‌ها و اضافه کردن مفهوم محاسبات مه، توانست طول عمر شبکه را افزایش دهد. در ادامه پروتکل [۱۷] به ارائه الگوریتم‌هایی مبتنی بر دسته‌بندی خوشه‌ها به صورت نامساوی پرداخته است. گره‌ها در گروه‌هایی با اندازه‌هایی متفاوت و اعضای نابرابر جای می‌گیرند. در [۱۸] روشی مبتنی بر خوشه‌بندی با انرژی کارآمد معرفی شده است. در این روش با بهینه‌سازی خوشه‌بندی گره‌ها و معرفی کردن سرخوشه‌ها به عنوان دروازه‌های مسیریابی به ارتقای طول عمر شبکه کمک کرده است. سال ۲۰۱۳ در [۱۹] بر محدودیت پارامترهای کیفیت خدمات، کنترل ازدحام، کدگذاری شبکه و قدرت توزیع‌شده انطباق‌پذیر کنترل دسترسی‌های تداخل چندگانه در شبکه‌های حسگر بی‌سیم تمرکز شده است. یکی دیگر از مأموریت‌های مهم در بهینه‌سازی الگوریتم لیچ، ایجاد یک پروتکل برای همگرایی ریکت‌ها^۲ در شبکه‌های حسگر بی‌سیم است که در [۲۰] به آن پرداخته شده است. بهبود ناهمگونی انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم در [۲۱] ارائه شده است. در این پروتکل گره‌ها در k سطح از سلسله‌مراتب جای می‌گیرند و به منظور محاسبه آستانه سرخوشه‌ها، نسبت گره‌ها در دور فعلی محاسبه می‌شود. علاوه بر این در [۲۲] از همبندی کنترل برای ارائه یک الگوریتم مسیریابی چندگانه به منظور ذخیره انرژی در شبکه استفاده شده است. در [۲۳] پروتکلی برای بهبود لیچ ارائه شده که مبتنی بر تعیین کارایی شبکه و مسیر بهینه است. در [۲۴] تلاش شده که پارامترهای کیفیت خدمات و کارآمدی انرژی را بهبود دهد، همچنین با ارائه یک پروتکل مسیریابی به افزایش طول عمر شبکه کمک کرده است. در سال ۲۰۱۵ نویسندگان [۲۵] طرح BRIDGE را ارائه نمودند که در آن توانست از چاله‌های موجود در مسیریابی‌های پویا که مخصوصاً در هنگام استفاده از شبکه‌های حسگر بی‌سیم ایستا ایجاد و باعث رفتارهای نادرست می‌شوند، عبور کند.

۲-۲ خوشه‌بندی مبتنی بر محاسبات ابر و مه

مشکل مقیاس‌پذیری در معماری‌های قبلی اینترنت اشیا در [۳] آورده شده است. در این پروتکل ایستگاه مبنا به گره‌های مه متصل است. در ایستگاه مبنا، محاسبات با منابع محلی انجام می‌شود و همچنین مدل اینترنت اشیا دیگری با ترکیب مزایای شبکه‌های نرم‌افزاری و محاسبات مه در [۲] ارائه شده است. در این روش، فرایندهای پیچیده‌ای را که در پیاده‌سازی کنترل ترافیک و مدیریت منابع به کار گرفته می‌شود تسهیل نموده است. علاوه بر این در [۲۶] معیار سختی^۳ در شبکه‌های حسگر بی‌سیم را ارائه داده است. همچنین مشخص گردید که توزیع ترافیک

امنیت داده‌ها و یکپارچگی: هرچه داده‌های ارسالی مدت زمان بیشتری در شبکه باقی بمانند، بیشتر آسیب‌پذیر خواهند بود حتی اگر داده‌ها رمزنگاری شده باشند. گره‌های مه با ارائه کوتاه‌ترین فاصله ممکن در لبه شبکه در حل این مشکل مؤثر خواهند بود.

در این مطالعه، پروتکل مسیریابی شبکه‌های حسگر بی‌سیم مبتنی بر مه با روش زنجیرسازی پایدار، پیشنهاد شده که در آن شبکه شامل تعدادی گره مه می‌باشد. هر گره مه یک محدوده پوشش دارد که می‌تواند چندین خوشه را پوشش دهد. گره‌های حسگر، داده‌ها را از محیط اطراف دریافت نموده و آنها را به نزدیک‌ترین سرخوشه ممکن ارسال می‌کنند. در هر خوشه، سرخوشه‌ها داده‌های جمع‌آوری شده را به گره‌های مه ارسال می‌کنند و وظیفه جمع‌آوری و تلفیق داده‌ها را دارند. در این مرحله حجم داده‌ها کاهش می‌یابد و پس از آن سرخوشه‌ها داده‌ها را برای ارسال به نزدیک‌ترین گره مه ممکن آماده می‌کنند. سرخوشه‌ها گره مه را به گونه‌ای انتخاب می‌کنند که برای ارسال داده به آن کمترین انرژی را مصرف کنند. اکنون گره‌های مه مستقرشده در لبه شبکه، داده‌های ارسالی از سرخوشه‌ها را جمع‌آوری نموده و در نهایت به ایستگاه اصلی یعنی ابر ارسال می‌کنند. در این مرحله انتخاب مناسب یک گره مه به عنوان نماینده حایز اهمیت است. گره‌های مه داده‌ها را به گره‌های مه مجاور ارسال می‌کنند و در نهایت یک گره مه به عنوان نماینده برای ارسال داده‌ها به ابر انتخاب می‌شود. در این مقاله از الگوریتم پگاسیس [۸] برای ارسال داده‌ها به ابر و انتخاب گره مه مناسب برای ارسال بهره گرفته شده است. همچنین پیاده‌سازی و طراحی مؤثر معماری مه در شبکه‌های حسگر بی‌سیم به منظور بهبود مصرف انرژی در شبکه، مورد مطالعه قرار گرفته است.

در ادامه مقاله بدین صورت سازمان‌دهی شده است: در بخش ۲ یک مرور کوتاه بر کارهای پیشین داشته‌ایم. در بخش ۳ پروتکل پیشنهادی را به همراه جزئیات شرح داده‌ایم. در بخش ۴ عملکرد روش پیشنهادی را در محیط شبیه‌ساز مورد ارزیابی قرار داده‌ایم و نتایج را با پروتکل P-SEP [۹] مقایسه نمودیم. نهایتاً در بخش ۵ نتیجه‌گیری حاصل از پیاده‌سازی پروتکل معرفی‌شده به همراه پیشنهادهایی برای کارهای آینده آورده شده است.

۲- کارهای پیشین

تا به امروز روش‌ها و الگوریتم‌های بسیاری برای بهینه‌سازی عملکرد شبکه‌های حسگر بی‌سیم در زمینه‌هایی مانند طول عمر، مصرف انرژی، ناهمگنی، مقیاس‌پذیری و پشتیبانی از شبکه‌های مجازی مختلف و غیره پیشنهاد شده‌اند. با این حال، تلاش شده تا مفاهیمی که عمدتاً بر پایه الگوریتم لیچ^۱ می‌باشند بهینه‌سازی شوند. در اینجا برخی از روش‌های برجسته به منظور ارائه تصویر کلی از جریان توسعه و همچنین معایب و مزایای مربوط ارائه شده است.

۱-۲ خوشه‌بندی شبکه‌های حسگر بی‌سیم

پروتکل پیشگام برای خوشه‌بندی شبکه‌های حسگر، الگوریتم لیچ [۱۰] و [۱۱] می‌باشد. در این روش شبکه به تعدادی خوشه تقسیم می‌شود که هر خوشه شامل یک سرخوشه است. گره‌ها داده‌ها را به سرخوشه‌ها ارسال نموده و پس از تلفیق به گره چاهک ارسال می‌کنند. در [۱۱] و [۱۲] با اطمینان از تشکیل سرخوشه‌های کافی در طول مرحله نصب، انرژی را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. همچنین در سال ۲۰۰۸، [۱۳] احتمال

2. Converging Casting

3. Robustness

1. LEACH

جدول ۱: مرور پروتکل‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم.

الگوریتم	اهداف	محیط	ویژگی‌ها
LEACH [۱۰]	افزایش طول عمر شبکه	MATLAB	کاهش اتلاف انرژی و تأخیر زمانی
LEACH-C [۱۷]	بهبود و آنالیز الگوریتم لیچ	Ns	بهبود طول عمر سیستم، مناسب برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم همگن
PEGASIS [۸]	بهبود الگوریتم لیچ با الگوریتم‌های حریصانه	Ns۲	توزیع بار انرژی بین گره‌ها، افزایش طول عمر، مرگ گره‌ها به علت زنجیره‌های طولانی
SEP [۱۴]	افزایش طول عمر شبکه	MATLAB	در نظر گرفتن ناهمگونی برای گره‌ها
P-SEP [۹]	افزایش طول عمر شبکه‌های مبتنی بر مه	MATLAB	توزیع یکنواخت گره‌ها، طولانی‌شدن فاصله زمانی سیستم
ICWAQ [۱۸]	افزایش طول عمر شبکه	MATLAB	به حداقل رساندن تأخیر بین سیگنال‌های دریافت‌شده از خوشه‌ها
TSRA [۲۳]	بهبود لیچ با تعیین مسیرهای بهینه	MATLAB	کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های مسیریابی
ALBA-R [۲۰]	بهینه‌سازی لیچ	Ns۲	بهبود نسبت تحویل بسته، کاهش زمان تأخیر
SHE [۲۴]	بهره‌وری انرژی و کیفیت خدمات	OMNet ++	طول عمر شبکه طولانی، عدم توجه به گره‌های ناهمگن
BRIDGE [۲۵]	تحویل مؤثر داده‌ها به گره چاهک	MATLAB	عدم شناسایی و جلوگیری از حفره‌های شبکه‌های حسگر بی‌سیم با دورزدن حفره‌های مسیریابی پویا
UCCGRA [۵]	افزایش طول عمر شبکه	OMNET ++	تعادل مصرف انرژی بین گره‌ها و رفع مشکل نفوذ انرژی
H-Leach [۲۷]	حل مشکلات انرژی	MATLAB	حل مسایل انرژی گره به عنوان نقطه ضعف عمده پروتکل لیچ
EEDCRA [۳۲]	افزایش طول عمر شبکه	MATLAB	استفاده از گره‌های چاهک متحرک برای کاهش هزینه بازسازی مسیر

۳- روش پیشنهادی

در این بخش روش پیشنهادی را جهت مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مبتنی بر مه معرفی می‌کنیم. از آنجایی که افزایش طول عمر شبکه و کاهش انرژی مصرفی از مهم‌ترین فاکتورها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌باشند، هدف این روش رسیدن به اهداف ذکر شده است. در مسیریابی شبکه‌های حسگر بی‌سیم به کمک گره‌های مه، ایده اصلی به کارگیری گره‌های مه و نزدیک‌تر کردن منابع پردازشی به کاربران نهایی تا حد ممکن بوده است [۳۳]. به کمک گره‌های مه سرویس‌های ارائه‌شده توسط ابر به لبه شبکه گسترش پیدا خواهند کرد. در محاسبات مه، تمامی سرویس‌های موجود در ابر مانند محاسبات، پردازش داده‌ها و امکان ذخیره‌سازی به کاربران ارائه می‌شود. در واقع گره‌های مه سرویس‌های ذکر شده را بین کاربران و ابر فراهم می‌کنند [۳۴].

گره‌های مه در مناطق مختلف جغرافیایی قابل توزیع هستند. به طور مثال در مکان‌هایی در سطح شهر مانند پارک‌ها، پایانه‌های اتوبوس و مراکز خرید از جمله جاهایی هستند که گره‌های مه بدون محدودیت می‌توانند مستقر شوند. اپلیکیشن‌های مختلفی از محاسبات مه بهره می‌برند. در زیر مثالی از خانه هوشمند آورده شده که مطابق با مدل پیشنهادی در نظر گرفته شده است:

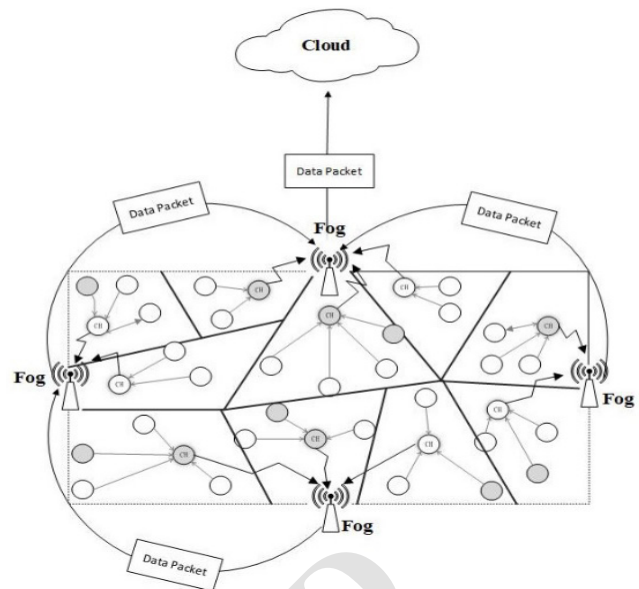
در شکل ۱ مستطیل رسم‌شده محیط یک خانه هوشمند مفروض است که در آن حسگرهای مختلفی جهت حفاظت و کنترل محیط کار گذاشته شده است. برای تأمین امنیت خانه از ابزارهای مختلفی همچون قفل هوشمند و ابزارهای ضبط صدا و تصویر استفاده می‌شود [۳۵]. هر کدام از این ابزارها از حسگرهای مختلفی همچون حسگرهای نور، حسگرهای حساس به حرکت و غیره استفاده می‌کنند. در اینجا حسگرهای ذکر شده در شکل ۱، حسگرهایی هستند که در خانه هوشمند به کار برده شده‌اند. گره‌های مه منابع پردازشی قابل انعطاف‌پذیری هستند که با ساختار سلسله‌مراتبی توزیع‌شده [۳۶] موجب اتصال حسگرها به گره‌های مه می‌شوند و در نتیجه امکان پردازش سریع‌تر داده‌ها و پاسخ‌های بلادرنگ فراهم می‌شود. به طور مثال در صورتی که حسگرها هر گونه حرکت مشکوک را تشخیص دهند، داده‌های مربوط را به نزدیک‌ترین گره مه مستقر در خانه ارسال می‌کنند. سپس گره مه مفروض با پردازش سریع

می‌تواند طول عمر را بهینه کند و یافتن کوتاه‌ترین مسیر و متصل نمودن مسیرها در لبه‌های مجزا^۱ برای هرس کردن فضای جستجو کارآمد باشد. در سال ۲۰۱۶ پروتکل دیگری در زمینه بهینه‌سازی لیچ ارائه گردید [۲۷] که در آن به حل مشکلات انرژی در طول انتخاب سرخوشه‌ها مبادرت شده است. بهینه‌سازی داده‌های جمع‌آوری‌شده و یافتن یک مسیر مناسب برای جمع‌آوری‌کنندگان متحرک داده^۲ در [۲۸] ارائه شده است. در این روش شبکه به سلول‌های شبکه‌ای با اندازه‌های مساوی تقسیم می‌شود. این مطالعه توانسته در توزیع جمع‌آوری‌کنندگان داده و افزایش طول عمر شبکه موفق باشد. در [۲۹] دو پروتکل که بر سه سطح از ناهمگنی متمرکز شده‌اند آمده است. این روش‌ها برای افزایش بهره‌وری انرژی طراحی شده‌اند. آلام و دی در [۳۰] از نویسندگانی هستند که فراتر از شبیه‌سازی گام برداشته‌اند. آنها شبکه‌های حسگر بی‌سیم دودی^۳ را در فضای بیرون با استفاده از ۳ پروتکل مسیریابی intra zone (IARP)، inter zone (IERP) و zone (ZRP) مورد ارزیابی قرار داده‌اند و اظهار داشته‌اند که پروتکل مسیریابی inter zone در مجموع نتایج بهتری در مصرف انرژی در حین ارسال و دریافت داده‌ها و همچنین تعداد بسته‌های ازدست‌رفته داشته است. در سال ۲۰۱۶ HFC [۳۱]، یک چهارچوب ترکیبی از مه و ابر برای مدیریت سریع، مؤثر و خودکار برای شبکه‌های مجازی ارائه داد. این روش به سرویس‌های مختلف ابر اجازه می‌دهد که با زیرساخت‌های مه تعامل برقرار کنند. در نهایت در [۳۲] برای حل مشکلات هات‌اسپات‌ها^۴ با استفاده از حرکت چاهک با رویکرد تنظیم بهره‌وری انرژی در مسیریابی پویا مبتنی بر خوشه‌بندی، مبادرت کرده است. این روش با سازمان‌دهی شبکه به تعدادی خوشه یکسان، انتخاب سرخوشه‌ها در هر خوشه و بهره‌گیری از قوانین ارتباطی به منظور مدیریت فرایند بازسازی مسیرها توانسته به اهداف ذکر شده برسد. در ادامه، جدول ۱ به مقایسه روش‌های خوشه‌بندی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، ابر و مه پرداخته است.

1. Edge Disjoint
2. Mobile Data Collectors
3. Smoke
4. Hotspot

جدول ۲: نمادهای استفاده شده در پروتکل پیشنهادی.

نماد	مفهوم
r	دور فعلی
E	انرژی اولیه گره‌های ساده
p	احتمال سرخوشه شدن گره‌های حسگر
p_N	احتمال وزن دار انتخاب گره‌های ساده به عنوان سرخوشه
p_A	احتمال وزن دار انتخاب گره‌های پرانرژی به عنوان سرخوشه
E_{TX}	انرژی مصرفی توسط فرستنده
E_{RX}	انرژی مصرفی توسط گیرنده
E_{DA}	انرژی لازم جهت جمع‌آوری داده‌ها
E_{elec}	انرژی مصرفی توسط مدار رادیویی
$T_N(r)$	مقدار آستانه برای گره‌های ساده
$T_A(r)$	مقدار آستانه برای گره‌های پرانرژی
$D_{Chain}(FN)$	فاصله گره‌های مه تا ابر
E_f	انرژی اولیه گره‌های مه
$E_{Chain}(FN)$	انرژی گره‌های مه موجود در زنجیره



شکل ۱: ساختار پروتکل پیشنهادی در شبکه حسگر مورد نظر.

که محدوده پوشش مه^۴ (FNC) نامیده می‌شود. هر محدوده پوشش مه شامل موارد زیر است:

- تعدادی گره ساده و پرانرژی که وظیفه جمع‌آوری داده از محیط پیرامون خود را دارند.
 - تعدادی سرخوشه که داده‌های ارسالی از گره‌ها را جمع‌آوری می‌کنند و به گره‌های مه ارسال می‌کنند.
 - تعدادی گره مه که داده‌های سرخوشه‌ها را دریافت و تلفیق می‌کنند و به گره مه مجاور خود ارسال می‌کنند.
- گره چاهک (ایستگاه اصلی) خارج از شبکه و در فاصله نسبتاً دوری واقع شده است، در اینجا گره چاهک همان ابر است. گره‌های مه در نهایت یک گره را به عنوان رهبر^۵ بر اساس الگوریتم پگاسیس [۸] برای ارسال داده‌ها به ابر انتخاب خواهند کرد. در جدول ۲ جهت سهولت، لیستی از نمادهای مورد استفاده در این مطالعه آورده شده است.

۳-۲ توزیع گره‌های حسگر و مدل انرژی مربوط

در این مقاله اندازه شبکه M در نظر گرفته شده و همچنین شبکه به صورت مستطیل فرض شده است. r بیانگر دور فعلی و r_{max} نشان‌دهنده تعداد کل دوره‌های شبکه می‌باشد. گره‌های ساده به صورت تصادفی در شبکه توزیع شده‌اند و مکان آنها از پیش تعیین شده است. از آنجا که انرژی گره‌های پرانرژی بیشتر از گره‌های ساده است، انرژی هر گره پرانرژی α برابر گره‌های ساده در نظر گرفته شده و همچنین نسبت گره‌های پرانرژی به کل گره‌های موجود در شبکه m است. بنابراین تعداد کل گره‌های پرانرژی در شبکه برابر با $n \times m$ خواهد بود (تعداد گره‌های ساده نیز برابر با $n - n \times m$ خواهد بود). با در نظر گرفتن E_f به عنوان انرژی اولیه گره‌های ساده، انرژی اولیه گره‌های پرانرژی $E_f \times (1 + \alpha)$ به دست می‌آید و نیز انرژی کل گره‌های پرانرژی $n \times m \times E_f \times (1 + \alpha)$ خواهد بود [۹]. ما فرض کرده‌ایم که شبکه شامل تعدادی گره مه باشد که در لبه شبکه قرار گرفته‌اند، مکان ثابتی دارند و بدون حرکت هستند. گره‌های مه با توجه به سطح بالاتر انرژی‌شان محدودیت کمتری در انرژی

داده‌ها (فاصله کم حسگر با گره مه امکان پردازش‌های سریع را فراهم می‌کند) و ارسال آن به گره مه مربوط دیگر، گره مه را باخبر می‌کند. دستور ضبط فیلم یا صدا توسط گره مه نزدیک به حسگرهای مربوط داده می‌شود تا از مکان مشخص شده داده تهیه کنند (قدرت پردازش و حجم حافظه زیاد گره‌های مه، انجام پردازش‌های سنگین را تسهیل می‌کند). گره‌های مه بعد از جمع‌آوری داده‌ها و تجزیه و تحلیل آنها، در صورتی که حرکت مشکوک یا خطرناک تشخیص داده شود آن گاه هشدار را به صدا درمی‌آورند. سپس با انجام یک مسیریابی بین گره‌های مه داده‌های جمع‌آوری شده توسط یک گره مه (نماینده) به ابر ارسال می‌شود تا به صاحب خانه پیامی مبنی بر اعلام خطر ارسال شود و مطابق با آن اقدام‌های لازم صورت گیرد یا به پلیس خبر داده شود.

به عنوان نوآوری تحقیق در این مطالعه بر خلاف روش [۹]، تعداد گره‌های مه بیشتر از یک گره در نظر گرفته شده است. در [۹] گره مرکزی همان گره مه در نظر گرفته شده است که در مرکز شبکه قرار دارد، در حالی که در روش پیشنهادی، گره‌های مه در لبه‌های شبکه مستقر شده‌اند. علاوه بر این در روش پیشنهادی چگونگی ارسال داده‌ها به ابر به کمک الگوریتم پگاسیس که با یافتن مسیر مناسب برای ارسال داده‌ها و گره مه نماینده جهت ارسال داده‌های جمع‌آوری شده همراه می‌باشد نیز آورده شده است.

۳-۱ معماری شبکه حسگر بی‌سیم مبتنی بر مه

در شکل ۱ مدل ارائه شده مبتنی بر مه نشان داده شده است. همان گونه که در شکل مشخص است، شبکه شامل گره‌های پرانرژی (گره‌های خاکستری‌رنگ)، گره‌های ساده (گره‌های سفیدرنگ)، تعدادی سرخوشه و گره‌های مه است. مطابق پروتکل پی‌سپ، فرض شده که گره‌های حسگر در شبکه دارای دو سطح متفاوت انرژی باشند (گره‌های پرانرژی^۱ و گره‌های ساده^۲). گره‌های مه موجود در شبکه (به طور مثال وای‌فای^۳) برای تأمین انرژی از باتری استفاده می‌کنند و سطح انرژی بالاتری نسبت به دیگر گره‌ها در شبکه دارند. همچنین هر گره مه یک محدوده پوشش [۹] دارد

1. Advanced Nodes
2. Normal Nodes
3. WiFi

4. Fog Node Coverage
5. Leader

انرژی سرخوشه بعد از دور r ام به صورت $E_i(r) = E_i(r-1) - E_{TX}$ محاسبه می‌شود و E_i انرژی گره i ام می‌باشد.

به منظور محاسبه مقدار آستانه از (Δ) استفاده می‌شود به طوری که $T_N(r)$ معرف آستانه مربوط به گره‌های ساده و $T_A(r)$ بیانگر آستانه مربوط به گره‌های پرانرژی است و بنابراین خواهیم داشت [9]

$$T_N(r) = \begin{cases} \frac{P_N(r)}{1 - P_N \times (r \bmod \frac{1}{P_N(r)})} & \text{if } N \in G' \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$T_N(r)$ آستانه مربوط به گره‌های ساده می‌باشد که در آن r دور فعلی و G' مجموعه‌ای از گره‌هایی است که در طول $1/P_N$ دور اخیر تا به حال سرخوشه نشده‌اند. به طور مشابه برای گره‌های پرانرژی داریم [9]

$$T_A(r) = \begin{cases} \frac{P_A(r)}{1 - P_A \times (r \bmod \frac{1}{P_A(r)})} & \text{if } A \in G'' \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

که در آن $T_A(r)$ مقدار آستانه برای گره‌های پرانرژی می‌باشد و G'' مجموعه‌ای از گره‌های پرانرژی است که در طول $1/P_A$ دور اخیر تا به حال سرخوشه نشده‌اند [9]. برای ارسال داده‌ها از سرخوشه‌ها به گره‌های مه نیازمند محاسبه فاصله بین گره‌های مذکور هستیم. بدین صورت d_{CH} مشخص‌کننده فاصله بین گره‌های درون شبکه و d_{FN} فاصله بین سرخوشه‌ها و گره‌های مه می‌باشد [9].

الگوریتم ۱ گام‌های پروتکل پیشنهادی را نشان می‌دهد. در این الگوریتم از آنجایی که در هر دور یک گره به عنوان سرخوشه انتخاب می‌شود، با محاسبه آستانه برای گره‌های ساده و پرانرژی می‌توان مشخص نمود که هر گره با چه احتمالی شرایط کاندید شدن برای سرخوشه را دارا می‌باشد. مقادیر $T_N(r)$ و $T_A(r)$ برای محاسبه آستانه گره‌های ساده و پرانرژی است. $D_{Chain}(FN)$ نشان‌دهنده فاصله گره‌های مه تا ابر و $E_{Chain}(FN)$ بیانگر انرژی گره‌های مه موجود در زنجیره متشکل توسط الگوریتم پگاسیس [8] است. همچنین $E_C(N_i)$ بیانگر انرژی فعلی گره i ام می‌باشد.

۴- نتایج آزمایش

ما روش پیشنهادی خود را تحت نرم‌افزار MATLAB مورد ارزیابی قرار داده‌ایم. در جدول ۳ پارامترهای شبکه که در پروتکل ما مورد استفاده قرار گرفته‌اند آورده شده است [9]. در این شبیه‌سازی فرض شده که شبکه شامل تعدادی گره ساده، پرانرژی و مه است. گره‌های مه دارای موقعیتی ثابت و بدون حرکت هستند.

$m = \{0, 1, 2, 3\}$ نسبت گره‌های مختلف برای گره‌های پرانرژی می‌باشد ($m = 0, 1$) بیانگر این است که درصد گره‌های پرانرژی ۱۰٪ کل گره‌های شبکه است. با توجه به این که انرژی گره‌های مه از انرژی سایر گره‌ها بیشتر است، انرژی آنها برابر با $E_i = 25 \times E_f$ فرض گردیده و محدوده پوشش هر گره (d) معادل $(5, 28(m))$ [9] در نظر گرفته شده است. همچنین موقعیت گره چاهک (ابر در این روش) ثابت است و در فاصله دوری از شبکه و بدون حرکت فرض شده است. شبیه‌سازی ما شامل دو سناریو می‌باشد، یکی برای شبکه با تعداد ۱۰۰ گره و اندازه شبکه 100×100 و دیگری برای شبکه با تعداد ۵۰۰ گره و اندازه شبکه 500×500 . موقعیت گره چاهک در سناریوی اول $(50, 175)$ و در سناریوی دوم $(50, 675)$ در نظر گرفته شده است.

مصرفی دارند. هر گره مه تنها می‌تواند با گره مجاور خود ارتباط برقرار کند و در هر دور تنها یک گره برای ارسال داده‌های جمع‌آوری شده به ایستگاه اصلی انتخاب می‌شود. از الگوریتم پگاسیس [8] برای ارسال اطلاعات بین گره‌های مه و ارسال داده‌های تلفیق شده به ایستگاه اصلی استفاده شده است. در الگوریتم پگاسیس با تشکیل زنجیره‌ای بین گره‌ها، این امکان به آنها داده می‌شود که از طریق این زنجیره با همسایگان خود ارتباط داشته باشند. بنابراین با تشکیل زنجیره بین گره‌های مه، داده‌هایی که سرخوشه‌ها به گره‌های مه ارسال می‌کنند، از یک گره مه به گره دیگری ارسال و تلفیق می‌شوند. در نهایت یک گره مه برای انتقال داده‌ها به گره چاهک یا همان ابر انتخاب می‌شود.

با فرض این که P_N احتمال وزن دار انتخاب گره‌های ساده به عنوان سرخوشه و P_A احتمال وزن دار انتخاب گره‌های پرانرژی به عنوان سرخوشه در دور r ام باشند، به منظور به حداقل رساندن انرژی مصرفی در هر دور، میانگین تعداد سرخوشه‌ها باید ثابت و مساوی با $n \times p$ [9] باشد. p احتمال سرخوشه شدن گره‌های حسگر در دور r ام است که به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$p_N = \frac{p}{1 + \alpha \times m} \quad (1)$$

$$p_A = \frac{p \times (1 + \alpha) \times \frac{E_C}{E_{max}}}{1 + \alpha \times m} \quad (2)$$

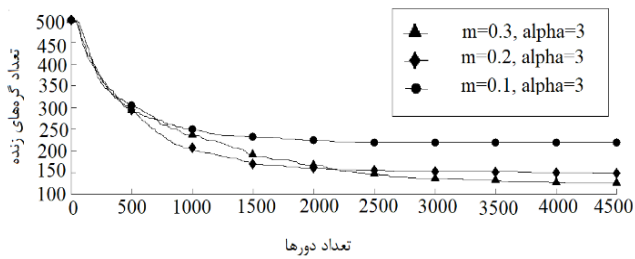
در روابط بالا، E_C انرژی فعلی گره در دور جاری و E_{max} بیشینه انرژی گره‌ها است (در دور اول انرژی گره‌های ساده برابر با E_f و انرژی گره‌های پرانرژی $E_f \times (1 + \alpha)$ خواهد بود). مقدار E_C/E_{max} بیانگر انرژی باقیمانده هر گره در هر دور است [27]. به کمک این مقدار می‌توان در هنگام انتخاب سرخوشه، گره‌هایی را انتخاب کنیم که مقدار انرژی باقیمانده بیشتری دارند. بنابراین احتمال انتخاب شدن گره‌هایی با انرژی باقیمانده بیشتر بالاتر می‌رود. هر گره یک مدار رادیویی دارد که این مدار برای ارسال L بیت داده در طول فاصل d (فاصله بین خوشه‌ها و گره‌های مه می‌باشد) مقدار مشخصی انرژی را برای رسیدن به یک نسبت سیگنال به پارازیت (SNR) قابل قبول مصرف می‌کند. به این میزان انرژی مصرفی، اتلاف انرژی رادیویی می‌گویند. بر اساس مدل رادیویی ارائه شده در [9]، مدل کانال فضای آزاد برای فواصل ارتباطی کمتر از d به کار می‌رود و برای فواصل ارتباطی بزرگ‌تر از d ، از مدل چندلایه استفاده می‌شود. انرژی انتقال به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$E_{TX}(l, d) = l \times E_{elec} + E_{amp} \times D \quad (3)$$

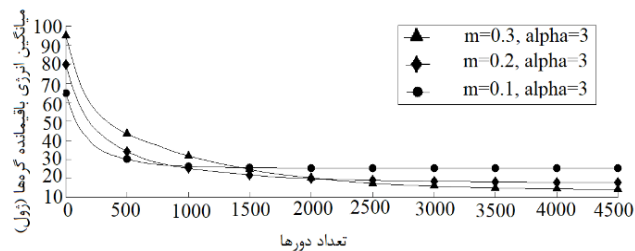
که D ضریب از دست دادن انرژی است. مقدار D در مدل فضای آزاد برابر با d^α و در مدل محوشدن چندگانه برابر با d^α خواهد بود. E_{amp} میزان انرژی مصرفی توسط آمپلی‌فایر است که در فرستنده‌های مختلف متفاوت است. همچنین d فاصله بین فرستنده و گیرنده است و بنابراین انرژی ارسال به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$E_{TX}(l, d) = \begin{cases} L \times E_{elec} + L \times E_{fs} \times d^\alpha & \text{if } d \leq d_c \\ L \times E_{elec} + L \times E_{amp} \times d^\alpha & \text{if } d > d_c \end{cases} \quad (4)$$

که $E_{elec} = E_{TX} + E_{DA}$ [9]، E_{DA} انرژی جمع‌آوری داده‌ها برای هر گره و انرژی مصرفی توسط گیرنده برابر $E_{RX} = L \times E_{elec}$ [9] خواهد بود.



شکل ۲: تعداد گره‌های زنده برای الگوریتم پیشنهادی برای اندازه شبکه ۵۰۰، $\alpha = 3$ ، مقادیر مختلف m و تعداد دور ۴۵۰۰.



شکل ۳: میانگین انرژی باقیمانده برای هر گره در الگوریتم پیشنهادی برای اندازه شبکه ۵۰۰، $\alpha = 3$ ، مقادیر مختلف m و تعداد دور ۴۵۰۰.

جدول ۳: پارامترهای استفاده شده در پروتکل پیشنهادی.

مقادیر	پارامترها
$100^2, 500^2$	M
$100, 500$	n
$0, 1, 2, 3$	m
۴۰۰۰ bit	k
۰/۱	p
۰/۵ Joule	E_f
۵ nJoule/bit	E_{DA}
۵۰ nJoule/bit	E_{elec}
$10 \text{ pJoule}/(\text{bit}/\text{m}^2)$	E_{fs}
$0, 100, 13 \text{ pJoule}/(\text{bit}/\text{m}^2)$	E_{mp}
پارامترهای مربوط به گره‌های مه	
$25 \times 0, 5 \text{ Joule}$	E_c

دریافت کنند. بنابراین انرژی این گره‌ها در زمان کمی به اتمام می‌رسد و با گذشت زمان تعداد گره زنده کمتری کاندیدای سرخوشه شدن خواهند شد. از طرف دیگر، انتخاب مقادیر بزرگ برای m باعث می‌شود تعداد سرخوشه‌های بیشتری در شبکه داشته باشیم و در نتیجه هر خوشه تعداد کمتری از گره‌ها را پوشش می‌دهد. از آنجایی که هر خوشه انرژی ثابتی برای تلفیق داده‌های جمع‌آوری شده مصرف می‌کند، مقداری از انرژی بیهوده تلف می‌شود و بنابراین تعداد گره‌های پرنرزی باید مطابق با اندازه شبکه انتخاب شود. این بدین معنی است که تعداد گره‌های پرنرزی باید نه خیلی کوچک و نه خیلی بزرگ انتخاب شوند.

در شکل‌های ۴ و ۵ عملکرد پروتکل پیشنهادی برای شبکه با اندازه ۵۰۰ و تعداد دور ۴۵۰۰ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که گره‌های زنده و میانگین انرژی باقیمانده گره با افزایش مقادیر α افزایش می‌یابند.

وقتی که شبکه مقادیر بزرگ‌تری از α داشته باشد، تعداد گره‌های زنده در شبکه در دور آخر بیشتر خواهد بود چرا که با افزایش α احتمال انتخاب گره‌های پرنرزی به عنوان سرخوشه افزایش می‌یابد. بنابراین

۱: شبکه حسگر را به کمک گره‌ها به صورت تصادفی تشکیل دهید.

۲: موقعیت گره‌های مه و گره‌های پرنرزی را تعیین نمایید.

۳: شروع حلقه: برای $r=1$ تا r_{max} انجام دهید:

۴: مقدار اولیه CH_{number} را مساوی صفر قرار دهید.

۵: مقادیر p_A, p_N, E_C, E_{max} را مطابق (۱) و (۲) محاسبه کنید.

۶: مقادیر $T_A(r), T_N(r)$ را مطابق (۵) و (۶) محاسبه کنید.

۷: شرط اول: اگر $G'(i) > 0$ و $T_{randN}(r) \leq T_{NR}, E_C(n_i)$ آن گاه:

۸: احتمال انتخاب گره‌های ساده به عنوان سرخوشه را محاسبه کنید.

۹: $CH_{number} = CH_{number} \cup \{n_i\}$ در اینجا بیانگر گره‌های ساده است.

۱۰: پایان شرط اول.

۱۱: شرط دوم: اگر $G'(i) > 0$ و $T_{randN}(r) \leq T_{NR}, E_C(n_i)$ آن گاه:

۱۲: احتمال انتخاب گره‌های پرنرزی به عنوان سرخوشه را محاسبه کنید.

۱۳: $CH_{number} = CH_{number} \cup \{n_i\}$ در اینجا بیانگر گره‌های پرنرزی است.

۱۴: پایان شرط دوم.

۱۵: فاصله بین گره‌ها و سرخوشه‌ها یا همان d_{CH} را محاسبه کنید.

۱۶: فاصله بین سرخوشه‌ها و گره‌های مه یا همان d_{FN} را محاسبه کنید.

۱۷: با توجه به کمترین فاصله داده‌های جمع‌آوری شده را به گره‌های مه

ارسال کنید.

۱۸: انرژی گره‌ها را با توجه به (۳) و (۴) به روز نمایید.

۱۹: داده‌های جمع‌آوری شده از گره‌های مه را با استفاده از الگوریتم پگاسیس به

ابر ارسال کنید.

۲۰: فاصله بین گره‌های مه و ابر را محاسبه کنید.

۲۱: نزدیک‌ترین گره مه به ابر را به عنوان رهبر انتخاب کرده و N_L بنامید.

۲۲: N_L را به زنجیره اضافه کنید.

۲۳: نزدیک‌ترین گره در همسایگی N_L که تا کنون ملاقات نشده را به زنجیره

اضافه نمایید.

۲۴: E_{Chain} و D_{Chain} را محاسبه نمایید.

۲۵: گام‌های ۱۷ تا ۲۲ را برای همه گره‌های مه تکرار نمایید.

۲۶: با توجه به $\min D_{Chain}$ و $\min E_{Chain}$ مناسب‌ترین زنجیره را انتخاب کنید.

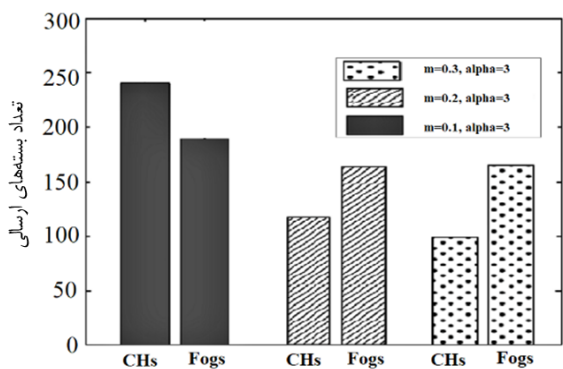
۲۸: پایان حلقه.

الگوریتم روش پیشنهادی.

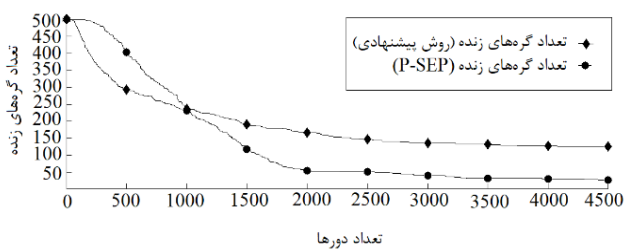
۴-۱ طول عمر و انرژی

برای ارزیابی طول عمر شبکه و انرژی آن ما پروتکل خود را برای تعداد گره‌های زنده، میانگین انرژی مصرفی برای هر گره، میانگین انرژی باقیمانده هر گره در طول ۴۵۰۰ دور و برای مقادیر مختلف m و α مورد ارزیابی قرار دادیم.

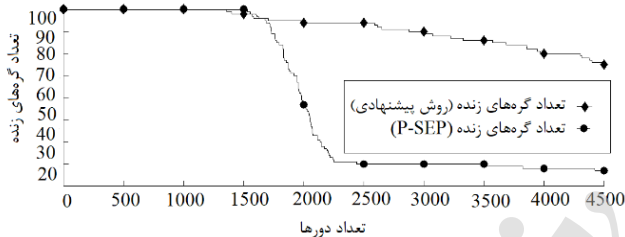
در شکل‌های ۲ و ۳ تعداد گره‌های زنده و میانگین انرژی باقیمانده گره‌ها در طول ۴۵۰۰ دور برای شبکه با اندازه ۵۰۰ نمایش داده شده است. پروتکل مورد نظر برای $\alpha = 3$ و $m = \{0, 1, 2, 3\}$ مورد ارزیابی قرار گرفت. با افزایش درصد گره‌های پرنرزی در شبکه با اندازه ثابت (با توجه به این که $m = 0, 1$ بیانگر این است که تعداد گره‌های پرنرزی ۱۰٪ تعداد کل گره‌ها است)، تعداد کل گره‌های زنده و انرژی باقیمانده گره‌ها کاهش یافته است. این بدیهی است که با افزایش دورها تعداد گره‌های زنده و میانگین انرژی گره‌ها کاهش می‌یابد ولی همان گونه که مشخص است برای مقادیر بزرگ‌تر m گره‌های زنده و میانگین انرژی کمتری در شبکه خواهیم داشت. از یک طرف تعداد کمتر m بدین معنا است که باید تعداد گره‌های ساده بیشتری به عنوان سرخوشه انتخاب شوند. انتخاب گره‌های ساده به عنوان سرخوشه باعث می‌شود که این گره‌ها انرژی بیشتری مصرف کنند چرا که باید داده‌های اطراف را ارسال و



شکل ۷: تعداد بسته‌های ارسالی به گره‌های مه در پروتکل پیشنهادی برای شبکه با اندازه ۵۰۰، $\alpha = 3$ ، مقادیر مختلف m و تعداد دور ۴۵۰۰.



شکل ۸: مقایسه تعداد گره‌های زنده بین پروتکل پیشنهادی و پروتکل P-SEP برای شبکه با اندازه ۵۰۰، $\alpha = 3$ ، $m = 0.3$ و تعداد دور ۴۵۰۰.



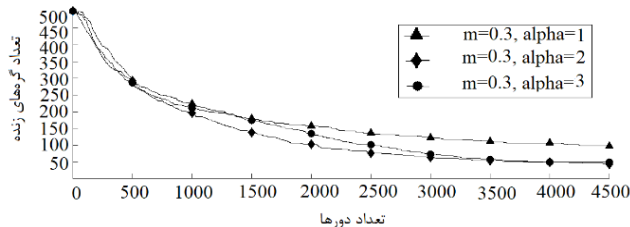
شکل ۹: مقایسه تعداد گره‌های زنده بین پروتکل پیشنهادی و پروتکل P-SEP برای شبکه با اندازه ۱۰۰، $\alpha = 3$ ، $m = 0.3$ و تعداد دور ۴۵۰۰.

۴-۲ مقایسه عملکرد پروتکل‌ها

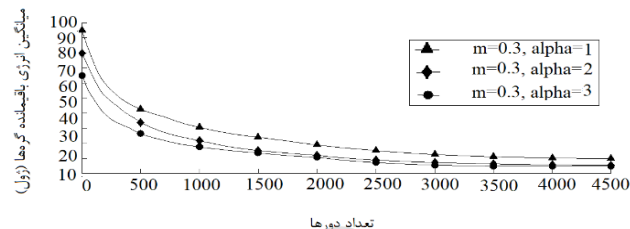
در این مقاله الگوریتم ارائه‌شده در شبکه با اندازه ۵۰۰ و تعداد دور ۴۵۰۰ شبیه‌سازی گردیده و سپس نتایج به دست آمده با خروجی‌های پروتکل پی‌سپ [۹] مقایسه شده است.

شکل‌های ۸ و ۹ تعداد گره‌های زنده را برای پروتکل پیشنهادی و پی‌سپ در حالی که $\alpha = 3$ ، $m = 0.3$ در نظر گرفته شده و اندازه شبکه ۱۰۰ و ۵۰۰ است گزارش می‌دهد. تعداد گره‌های زنده در هر دو پروتکل با افزایش تعداد دورها کاهش می‌یابند اما پروتکل ارائه‌شده توانایی بیشتری در ذخیره گره‌های زنده در شبکه بعد از ۱۴۵۰۰امین دور، داراست. در طی ۶۰۰ دور اول، پی‌سپ عملکرد بهتری داشته ولی با افزایش دورها گره‌های زنده باقیمانده در پی‌سپ کمتر از پروتکل ارائه‌شده است. این بدین معنا می‌باشد که پروتکل پیشنهادی با تقسیم بار انتقال داده بین گره‌های مه، قادر است که گره‌های زنده بیشتری را در شبکه حفظ کند.

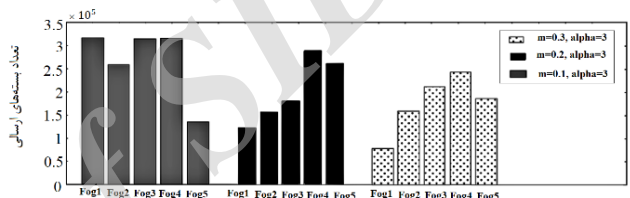
شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تعداد گره‌های مرده در پی‌سپ و پروتکل ارائه‌شده را نشان می‌دهد. کاهش تعداد گره‌های زنده در شبکه، موجب افزایش تعداد گره‌های مرده می‌شود. مطابق شکل تعداد گره‌های مرده در پروتکل پیشنهادی به نسبت پی‌سپ کمتر است. تعداد گره‌های مرده کمتر بدین معنی است که شبکه دیرتر می‌میرد و در نتیجه می‌تواند داده‌های محیط را به مدت طولانی‌تری دریافت کند.



شکل ۴: تعداد گره‌های زنده برای الگوریتم پیشنهادی برای اندازه شبکه ۵۰۰، $m = 0.3$ و مقادیر مختلف تعداد دور ۴۵۰۰.



شکل ۵: میانگین انرژی باقیمانده برای هر گره در الگوریتم پیشنهادی برای اندازه شبکه ۵۰۰، $m = 0.3$ و مقادیر مختلف تعداد دور ۴۵۰۰.



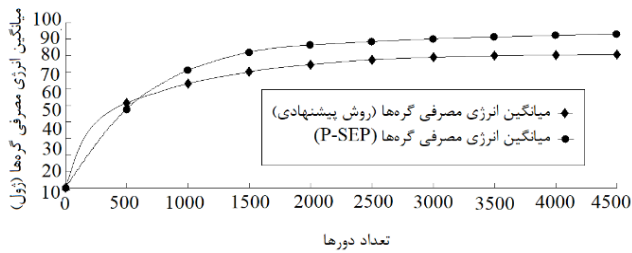
شکل ۶: تعداد بسته‌های انتقالی به گره‌های مه در پروتکل پیشنهادی برای شبکه با اندازه ۵۰۰، $\alpha = 3$ ، مقادیر مختلف m و تعداد دور ۴۵۰۰.

گره‌های ساده که میزان انرژی کمتری نسبت به گره‌های پرانرژی دارند، قادرند انرژی بیشتری را حفظ کنند و در نتیجه شبکه طول عمر بالاتری خواهد داشت و می‌تواند انرژی بیشتری ذخیره کند.

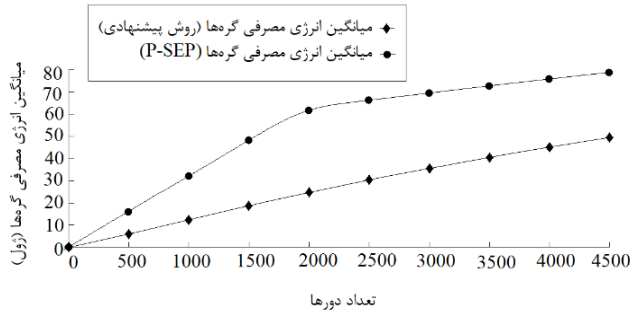
شکل ۶ تعداد بسته‌های ارسالی به گره‌های مه طی ۴۵۰۰ دور با در نظر گرفتن $\alpha = 3$ و مقادیر مختلف m را گزارش می‌کند. در حالی که درصد گره‌های پرانرژی در شبکه کمتر باشد تعداد گره‌های انتخاب‌شده به عنوان سرخوشه کاهش می‌یابد و بنابراین تعداد کمتری خوشه با اندازه‌های بزرگ‌تر برای پوشش گره‌ها در شبکه خواهیم داشت.

سرخوشه‌ها در نتیجه برخی فاکتورها مانند فاصله آنها از گره‌های مه در شبکه، گره مه مناسب برای ارسال داده‌ها را انتخاب می‌کنند. هنگامی که $m = 0.1$ باشد گره‌های مه ۱، ۳ و ۴ بیشتر از سایر گره‌ها برای ارسال داده توسط سرخوشه‌ها انتخاب می‌شوند. با افزایش m بسته‌ها به طور مناسب‌تری بین گره‌های مه توزیع می‌شوند و بنابراین گره‌های مه با درصد خوبی به صورت بهینه در شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

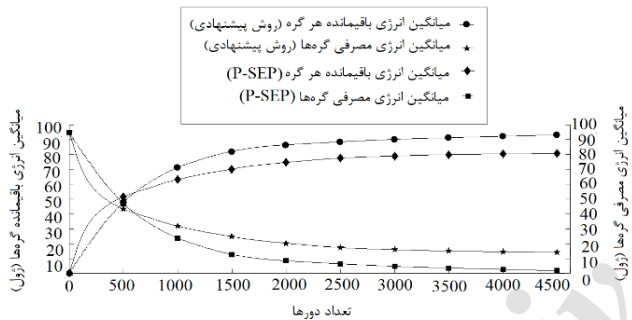
شکل ۷ میانگین بسته‌های ارسالی به سرخوشه‌ها را در شبکه با اندازه ۵۰۰، تعداد دور ۴۵۰۰، $\alpha = 3$ و مقادیر مختلف m نشان می‌دهد. طبق نتایج هنگامی که $m = 0.1$ است تعداد بسته‌های بیشتری به سرخوشه‌ها و گره‌های مه ارسال می‌شود. با افزایش m میانگین بسته‌های ارسالی به سرخوشه‌ها کاهش می‌یابد. وقتی تعداد سرخوشه‌ها افزایش می‌یابد، بسته‌ها به شکل مناسب‌تری بین سرخوشه‌ها تقسیم می‌شوند. هر سرخوشه قبل از ارسال داده‌ها به گره‌های مه آنها را تلفیق می‌کند. وقتی خوشه داده کمتری دریافت می‌کند بعد از تلفیق، داده کمتری برای ارسال خواهد داشت و بنابراین شیب کاهش میانگین بسته‌های داده به شکل ملایم‌تری خواهد بود. این بدین معنا است که شبکه می‌تواند انرژی بیشتری ذخیره کند و دوره پایداری طولانی‌تری داشته باشد.



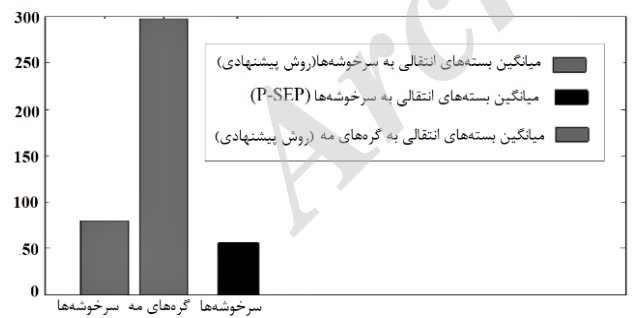
شکل ۱۴: مقایسه میانگین انرژی مصرفی بین پروتکل پیشنهادی و پروتکل P-SEP برای شبکه با اندازه ۵۰۰، $\alpha = 3$ ، $m = 0.3$ و تعداد دور ۴۵۰۰.



شکل ۱۵: مقایسه میانگین انرژی مصرفی بین پروتکل پیشنهادی و پروتکل P-SEP برای شبکه با اندازه ۱۰۰، $\alpha = 3$ ، $m = 0.3$ و تعداد دور ۴۵۰۰.



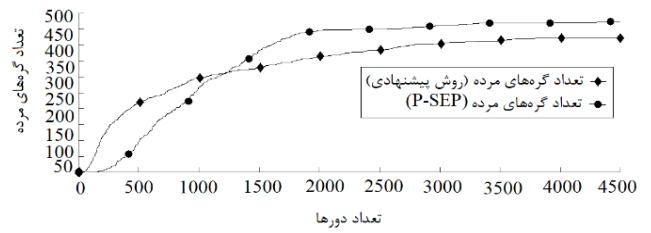
شکل ۱۶: مقایسه میانگین انرژی مصرفی و میانگین انرژی باقیمانده بین پروتکل پیشنهادی و پروتکل P-SEP برای شبکه با اندازه ۵۰۰، $\alpha = 3$ ، $m = 0.3$ و تعداد دور ۴۵۰۰.



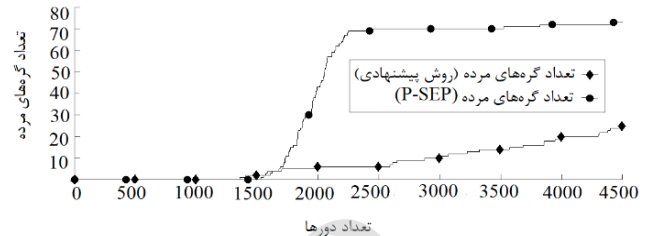
شکل ۱۷: مقایسه بسته‌های ارسالی به گره‌های مه بین پروتکل پیشنهادی و پروتکل P-SEP برای شبکه با اندازه ۵۰۰، $\alpha = 3$ ، $m = 0.3$ و تعداد دور ۴۵۰۰.

پیشنهادی نسبت به پی‌سپ بیشتر بوده است. با توجه به این که الگوریتم ارائه شده انرژی مصرفی کمتری دارد، قابل نتیجه‌گیری است که این روش از نظر حفظ انرژی بهینه‌تر عمل می‌کند و دوره پایداری بیشتری دارد و نیز قادر است طول عمر شبکه را نسبت به پی‌سپ بیشتر افزایش دهد.

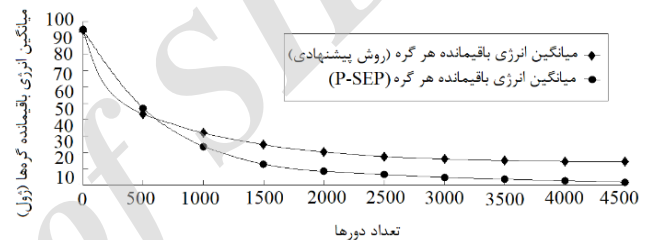
شکل ۱۷ میانگین بسته‌های ارسالی به سرخوشه‌ها و گره‌های مه را برای شبکه با اندازه ۵۰۰، $\alpha = 3$ ، $m = 0.3$ برای پروتکل‌های پیشنهادی و پی‌سپ نشان می‌دهد. تعداد دورها ۸۰٪ تعداد کل دورها (۴۵۰۰) در نظر گرفته شده و بنابراین هر دو پروتکل به تعداد کافی گره زنده برای ارسال



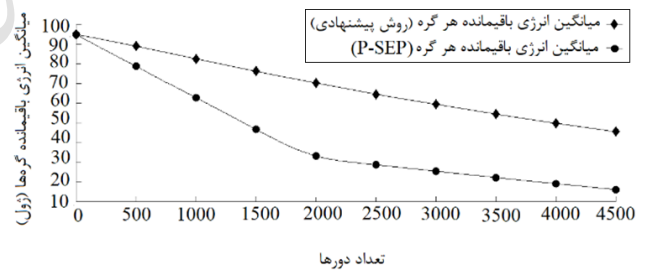
شکل ۱۰: مقایسه تعداد گره‌های مرده بین پروتکل پیشنهادی و پروتکل P-SEP برای شبکه با اندازه ۵۰۰، $\alpha = 3$ ، $m = 0.3$ و تعداد دور ۴۵۰۰.



شکل ۱۱: مقایسه تعداد گره‌های مرده بین پروتکل پیشنهادی و پروتکل P-SEP برای شبکه با اندازه ۱۰۰، $\alpha = 3$ ، $m = 0.3$ و تعداد دور ۴۵۰۰.



شکل ۱۲: مقایسه میانگین انرژی باقیمانده بین پروتکل پیشنهادی و پروتکل P-SEP برای شبکه با اندازه ۵۰۰، $\alpha = 3$ ، $m = 0.3$ و تعداد دور ۴۵۰۰.



شکل ۱۳: مقایسه میانگین انرژی باقیمانده بین پروتکل پیشنهادی و پروتکل P-SEP برای شبکه با اندازه ۱۰۰، $\alpha = 3$ ، $m = 0.3$ و تعداد دور ۴۵۰۰.

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ میانگین انرژی گره‌ها در طی ۴۵۰۰ دور با $\alpha = 3$ ، $m = 0.3$ و اندازه شبکه ۱۰۰ و ۵۰۰ نمایش داده شده است. هنگامی که تعداد دور افزایش می‌یابد انرژی گره‌ها کاهش می‌یابد.

پروتکل پیشنهادی نتایج بهتری در حفظ انرژی در شبکه دارد زیرا گره‌های مه داده‌ها را از سرخوشه‌ها جمع‌آوری می‌کنند و هر سرخوشه می‌تواند داده‌ها را به نزدیک‌ترین گره در همسایگی‌اش ارسال کند.

شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مصرف انرژی در شبکه را نشان می‌دهد. همان گونه که مشخص است، پروتکل پیشنهادی مصرف انرژی کمتری نسبت به پی‌سپ در طی ۴۵۰۰ دور دارد و بنابراین در پروتکل ارائه شده گره‌ها با نرخ کمتری انرژی از دست می‌دهند و انرژی بیشتری در شبکه ذخیره خواهد شد.

شکل ۱۶ میانگین انرژی باقیمانده و انرژی مصرفی گره‌ها را تحت شبکه با اندازه ۵۰۰، $\alpha = 3$ ، $m = 0.3$ برای پروتکل پیشنهادی و پی‌سپ نشان می‌دهد. انرژی گره‌ها در شبکه بعد از گذشت ۴۵۰۰ دور در پروتکل

موجود در خوشه خود را به نزدیک‌ترین گره مه مجاور خود ارسال می‌کند. سپس گره‌های مه داده‌های جمع‌آوری شده از سرخوشه‌ها را تلفیق و به نزدیک‌ترین گره مه در همسایگی خود ارسال می‌کنند. در نهایت گره مهی که به ابر نزدیک‌تر است تمام داده‌ها را از شبکه جمع‌آوری کرده و به گره چاهک یا همان ابر ارسال می‌کند. اضافه کردن گره‌های مه در شبکه باعث می‌شود که از ارسال همه داده‌ها به ابر برای پردازش جلوگیری شود و تنها داده‌هایی که توسط گره‌های مه قابل پردازش نیستند به ابر ارسال می‌گردند و در نتیجه حجم محاسبات در خوشه‌ها و همچنین ابر کاهش می‌یابد. همان گونه که در این مقاله نشان داده شد، این روش در بهینه‌سازی مصرف انرژی موفق بوده و همچنین توانسته که طول عمر شبکه را به کمک انرژی بیشتر گره‌های مه افزایش دهد. گره‌های مه محدودیت کمتری در میزان انرژی دارند و در نتیجه شبکه قادر است برای تعداد دور بیشتری داده ارسال کند. در این مقاله مکان گره‌های مه ثابت و در لبه شبکه در نظر گرفته شده است. همچنین این گره‌ها بی‌سیم بوده و از باتری به عنوان منبع انرژی استفاده می‌کنند. از آنجا که داده‌ها در شبکه آسیب‌پذیری بالایی در برابر حمله مهاجمان دارند، راه حل‌های زیادی برای حفظ امنیت داده‌ها ارائه شده است. ما در نظر داریم در کارهای آینده به مبحث امنیت و تلفیق داده‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم و به مقایسه امنیت در روش ارائه‌شده و روش‌های موجود بپردازیم.

مراجع

- [1] A. V. Dastjerdi and R. Buyya, "Fog computing: helping the internet of things realize its potential," *Computer*, vol. 49, no. 8, pp. 112-116, Aug. 2016.
- [2] S. Tomovic, K. Yoshigoe, I. Maljevic, and I. Radusinovic, "Software defined fog network architecture for iot," *Wireless Personal Communications*, vol. 92, no. 1, pp. 181-196, Jan. 2017.
- [3] X. Sun and N. Ansari, "Edgeiot: mobile edge computing for the internet of things," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 12, pp. 22-29, Dec. 2016.
- [4] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "Internet of things (iot): a vision, architectural elements, and future directions," *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645-1660, Sep. 2013.
- [5] H. Xia, R. H. Zhang, J. Yu, and Z. K. Pan, "Energy-efficient routing algorithm based on unequal clustering and connected graph in wireless sensor networks," *International J. of Wireless Information Networks*, vol. 23, no. 2, pp. 141-150, Jun. 2016.
- [6] S. Ivanov, S. Balasubramaniam, D. Botvich, and O. B. Akan, "Gravity gradient routing for information delivery in fog wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 46, pp. 61-74, Aug. 2016.
- [7] M. Firdhous, O. Ghazali, and S. Hassan, "Fog computing: will it be the future of cloud computing," in *Proc. 3rd Int. Conf. on Informatics & Application, ICLA'14*, pp. 8-15, Kuala Terengganu, Malaysia, Oct. 2014.
- [8] S. Lindsey and C. S. Raghavendra, "Pegasis: power-efficient gathering in sensor information systems," in *Proc. Aerospace Conf. IEEE*, vol. 3, pp. 1125-1130, Big Sky, MT, USA, Mar. 2002.
- [9] P. G. V. Naranjo, M. Shojafar, H. Mostafaei, Z. Pooranian, and E. Baccarelli, "P-sep: a prolong stable election routing algorithm for energylimited heterogeneous fog-supported wireless sensor networks," *the J. of Supercomputing*, vol. 73, no. 2, pp. 733-755, Feb. 2017.
- [10] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in *Proc. 33rd Annual Hawaii Int. Conf. on System Sciences*, 10 pp., Maui, HI, USA, 7-7 Jan. 2000.
- [11] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 1, no. 4, pp. 660-670, Dec. 2002.
- [12] W. B. Heinzelman, *Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Networks*, Ph.D Thesis, Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, 2000.

جدول ۴: مقایسه مرگ اولین گره، برخی از گره‌ها (SND)، نیمی از گره‌ها (HND) و تعداد گره‌های مرده در دور ۴۵۰۰م (DN) بین پروتکل پیشنهادی و پروتکل P-SEP برای شبکه با اندازه ۵۰۰.

پروتکل	FND	SND	HND	DN
روش پیشنهادی	۴۳	۱۹۴	۷۳۲	۳۹۵
	$m = 0.3, \alpha = 3$			
	۳۳	۱۴۵	۵۴۸	۳۶۹
	$m = 0.2, \alpha = 3$			
	۲۱	۱۶۹	۴۸۶	۳۴۳
	$m = 0.1, \alpha = 3$			
P-SEP	۱۹۲	۴۹۹	۹۸۱	۴۷۳
	$m = 0.3, \alpha = 3$			
	۱۰۱	۳۰۴	۶۱۶	۴۹۹
	$m = 0.2, \alpha = 3$			
	۴۲	۱۸۵	۳۸۲	۴۹۹
	$m = 0.1, \alpha = 3$			

داده طی این دوره‌ها در شبکه دارند. مطابق شکل ۱۷، میانگین بسته‌های ارسالی به سرخوشه‌ها در الگوریتم ارائه‌شده نسبت به پی‌سپ کمتر است که این نشان می‌دهد سرخوشه‌ها در روش پیشنهادی کمتر درگیر فرایند تلفیق قرار می‌گیرند و محاسبات به صورت محلی در گره‌های مه انجام می‌شوند.

جدول ۴ مرگ اولین گره (FND)، مرگ برخی از گره‌ها که معادل ۲۰٪ آنهاست (SND)، مرگ نصف گره‌ها (HND) و تعداد گره‌های مرده در دور آخر (DN) را نشان می‌دهد. نتایج عددی بیانگر این است که مقادیر FND، SND و HND برای پروتکل پی‌سپ نسبت به پروتکل پیشنهادی بهتر است ولی در آخر تعداد گره‌های مرده در پروتکل پی‌سپ بیشتر از پروتکل ارائه‌شده است. این بدین معنی است که پروتکل بیان‌شده تلاش می‌کند که انرژی بیشتری را در شبکه با سازگار کردن خود برای افزایش طول عمر شبکه، ذخیره کند. پروتکل پیشنهادی سرخوشه‌ها و گره‌های مه مناسبی را برای انتقال داده انتخاب می‌کند. با افزایش m ، FND دیرتر اتفاق می‌افتد چرا که تعداد گره‌های پرنانرژی بیشتری در شبکه خواهیم داشت. پروتکل ارائه‌شده در پایان دور ۴۵۰۰م تعداد گره زنده بیشتری نسبت به پی‌سپ دارد.

۵- نتیجه‌گیری

پروتکل ارائه‌شده به عنوان یک پروتکل مبتنی بر مه برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم ارائه شده است. این پروتکل روشی را برای انتخاب بهینه سرخوشه‌ها در شبکه با توجه به انرژی باقیمانده در گره‌ها ارائه کرده است. گره‌های مه داده‌ها را بین ابر و شبکه حسگر بی‌سیم انتقال می‌دهند. انتخاب یک گره مه به عنوان نماینده بر اساس الگوریتم پگاسیس، این پروتکل را از نظر حفظ انرژی کارآمدتر می‌کند. در این روش سه سطح برای انرژی گره‌ها در نظر گرفته شده که شامل گره‌های ساده، گره‌های پرنانرژی و گره‌های مه می‌باشد. در پروتکل پیشنهادی برخلاف روش پی‌سپ، با بهره‌گیری از تعداد گره مه بیشتر توانسته نتیجه بهتری به دست آورد. در این روش چگونگی انجام مسیریابی بین گره‌های مه و یافتن بهترین راه برای ارسال داده‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج الگوریتم پیشنهادی، انرژی بیشتری در مقایسه با پروتکل پی‌سپ در شبکه ذخیره می‌کند. این پروتکل تعداد گره‌های زنده درون شبکه را ۷۴٪ بهبود و انرژی مصرفی را ۹٪ در مقایسه با پی‌سپ کاهش می‌دهد. در پروتکل بیان‌شده، سرخوشه‌ها داده‌های جمع‌آوری شده از دیگر گره‌های

1. First Node Die
2. Some Node Die
3. Half Node Die
4. Dead Node

- [28] G. Xie, K. Ota, M. Dong, F. Pan, and A. Liu, "Energy-efficient routing for mobile data collectors in wireless sensor networks with obstacles," *Peer-to-Peer Networking and Applications*, vol. 10, no. 3, pp. 472-483, May 2017.
- [29] M. Aslam, E. U. Munir, M. M. Rafique, and X. Hu, "Adaptive energy efficient clustering path planning routing protocols for heterogeneous wireless sensor networks," *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 12, pp. 57-71, Dec. 2016.
- [30] S. Alam and D. De, "Cloud-site virtual network in cloud and fog computing," *CSIT Trans. on ICT*, vol. 5, no. 1, pp. 119-124, Mar. 2017.
- [31] R. Moreno-Vozmediano, R. S. Montero, E. Huedo, and I. M. Llorente, "Cross-site virtual network in cloud and fog computing," *IEEE Cloud Computing*, vol. 4, no. 2, pp. 46-53, Apr. 2017.
- [32] J. Wang, J. Cao, S. Ji, and J. H. Park, "Energy-efficient cluster-based dynamic routes adjustment approach for wireless sensor networks with mobile sinks," *The J. of Supercomputing*, vol. 73, no. 7, pp. 3277-3290, Jul. 2017.
- [33] T. H. Luan, L. Gao, Z. Li, Y. Xiang, G. Wei, and L. Sun, "Fog computing: focusing on mobile users at the edge," arXiv preprint arXiv:1502.01815, 11 pp., Mar. 2016.
- [34] F. Bonomi, R. Milito, J. Zhu, and S. Addepalli, "Fog computing and its role in the internet of things," in *Proc. the 1st Edition of the MCC Workshop on Mobile Cloud Computing*, ACM, pp. 13-15, Helsinki, Finland, 13-17 Aug. 2012.
- [35] J. Yang, X. Shi, M. Marchese, and Y. Liang, "An ant colony optimization method for generalized TSP problem," *Progress in Natural Science*, vol. 18, no. 11, pp. 1417-1422, Nov. 2008.
- [36] F. Karatas and I. Korpeoglu, "Fog-based data distribution service (F-DAD) for internet of things (IoT) applications," *Future Generation Computer Systems*, vol. 93, pp. 156-169, Apr. 2019.
- [13] Y. Liu, J. Gao, Y. Jia, and L. Zhu, "A cluster maintenance algorithm based on leach-dchs protocol," in *Proc. IEEE Int. Conf. Networking, Architecture, and Storage, NAS'08*, pp. 165-166, Chongqing, China, 12-14 Jun. 2008.
- [14] G. Smaragdakis, I. Matta, and A. Bestavros, *Sep: A Stable Election Protocol for Clustered Heterogeneous Wireless Sensor Networks*, Tech. Rep., Boston University Computer Science Department, pp. 1-11, May 2004.
- [15] D. Singh and C. K. Panda, "Performance analysis of modified stable election protocol in heterogeneous WSN," in *Proc. Int. Conf. on Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization, EESCO'15*, 5 pp., Visakhapatnam, India, 24-25 Jan. 2015.
- [16] A. A. Malluh, K. M. Elleithy, Z. Qawaqneh, R. J. Mstafa, and A. Alanazi, "Em-sep: an efficient modified stable election protocol," in *Proc. the IEEE Zone 1 Conf. of the American Society for Engineering Education*, 7 pp., Bridgeport, CT, USA, 3-5 Apr. 2014.
- [17] J. Wang, X. Yang, T. Ma, M. Wu, and J. U. Kim, "An energy-efficient competitive clustering algorithm for wireless sensor networks using mobile sink," *International J. of Grid and Distributed Computing*, vol. 5, no. 4, pp. 79-92, Dec. 2012.
- [18] D. Karaboga, S. Okdem, and C. Ozturk, "Cluster based wireless sensor network routing using artificial bee colony algorithm," *Wireless Networks*, vol. 18, no. 7, pp. 847-860, Oct. 2012.
- [19] E. Baccarelli, N. Cordeschi, and V. Polli, "Optimal self-adaptive qos resource management in interference-affected multicast wireless networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 21, no. 6, pp. 1750-1759, Jan. 2013.
- [20] C. Petrioli, M. Natì, P. Casari, M. Zorzi, and S. Basagni, "Alba: loadbalancing geographic routing around connectivity holes in wireless sensor networks," *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, vol. 25, no. 3, pp. 529-539, Mar. 2014.
- [21] S. Tanwar, N. Kumar, and J. W. Niu, "Eemhr: energy-efficient multilevel heterogeneous routing protocol for wireless sensor networks," *International J. of Communication Systems*, vol. 27, no. 9, pp. 1289-1318, Mar. 2014.
- [22] D. Jiang, Z. Xu, W. Li, and Z. Chen, "Topology control-based collaborative multicast routing algorithm with minimum energy consumption," *International J. of Communication Systems*, vol. 30, no. 1, Article No. e2905, 10 Jan. 2017.
- [23] H. Orojloo and A. T. Haghghat, "A tabu search based routing algorithm for wireless sensor networks," *Wireless Networks*, vol. 22, no. 5, pp. 1711-1724, Jul. 2016.
- [24] D. R. Chen, "An energy-efficient qos routing for wireless sensor networks using self-stabilizing algorithm," *Ad Hoc Networks*, vol. 37, no. 2, pp. 240-255, Feb. 2016.
- [25] P. Kar and S. Misra, "Detouring dynamic routing holes in stationary wireless sensor networks in the presence of temporarily misbehaving nodes," *International J. of Communication Systems*, vol. 30, no. 4, pp. 1-17, Jun. 2017.
- [26] A. A. Rahat, R. M. Everson, and J. E. Fieldsend, "Evolutionary multipath routing for network lifetime and robustness in wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 52, pp. 130-145, 29-29 Apr. 2016.
- [27] A. Razaque, et al., "H-LEACH: hybrid-low energy adaptive clustering hierarchy for wireless sensor networks," in *Proc. IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conf., LISAT'16*, 4 pp., Farmingdale, NY, USA, 29-29 Apr. 2016.

الهام میرزوند بروجنی در سال ۱۳۹۱ مدرک کارشناسی علوم کامپیوتر خود را از دانشگاه خوارزمی و در سال ۱۳۹۶ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی فناوری اطلاعات را از دانشگاه قم دریافت نمود. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده شامل مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، محاسبات ابری و محاسبات مه می‌باشد.

دادمهر رهبری در سال ۱۳۸۵ مدرک کارشناسی مهندسی کامپیوتر خود را از دانشگاه علم و صنعت ایران و در سال ۱۳۸۸ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد دریافت نمود. او در سال ۱۳۹۵ به دوره دکتری مهندسی فناوری اطلاعات در دانشگاه قم وارد گردید و هم‌اکنون به صورت تمام وقت مشغول تحصیل می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: زمانبندی و مدیریت منابع در محیط ابر و مه، یادگیری ماشین و امنیت اطلاعات.

محسن نیکرایی در سال ۱۳۸۱ مدرک کارشناسی مهندسی کامپیوتر خود را از دانشگاه علم و صنعت ایران دریافت نمود. ایشان مدرک کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی کامپیوتر خود را در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۲ از دانشگاه تهران دریافت نمودند. دکتر نیکرایی از سال ۱۳۹۵ در گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات دانشگاه قم به عنوان عضو هیأت علمی مشغول فعالیت می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده شامل زمانبندی و مدیریت منابع در محیط ابر و مه می‌باشد.