طراحی یک الگوریتم مسیریابی آگاه از انرژی مجموعه غالب متصل مبتنی بر زیرساخت شبکه‌های مش بی‌سیم با هدف افزایش طول عمر شبکه

آیدین شفارودی و سیدوحید ازهری

چکیده: شبکه مش بی‌سیم، شبکه‌ای چندجهشه متشکل از مسیریاب‌ها و کاربران مش می‌باشد که امکان یک‌پارچه کردن شبکه‌های بی‌سیم موجود، جهت ارائه سرویس با ویژگی‌های متنوع‌تر و بهتر را فراهم می‌آورد. مسیریاب‌ها به صورت خودکار به برقراری ارتباط بی‌سیم بین یکدیگر می‌پردازند، بنابراین در بسیاری موارد نیاز به اعمال مدیریت و صرف هزینه هنگفت برای راه‌اندازی شبکه وجود ندارد. از طرفی این گونه از شبکه‌ها دارای قابلیت متصل‌کردن شبکه‌های ناهمگون به هم هستند و می‌توانند از استانداردهای متنوعی پشتیبانی کنند. در مواردی که مسیریاب‌های زیرساخت شبکه مش به انرژی برق شهری دسترسی نداشته باشند، استفاده از شبکه مش بی‌سیمی که با باتری و انرژی خورشیدی کار می‌کند، بسیار مفید خواهد بود. در این حالت اساسی‌ترین مشکل، اتمام سریع شارژ باتری‌ها و قطع شبکه است و لذا در این مقاله راهکاری برای افزایش طول عمر شبکه و استفاده بهینه از انرژی باتری گره‌ها پیشنهاد شده که می‌تواند مدت زمان کارکرد شبکه را بسیار بالا ببرد. الگوریتم مسیریابی پیشنهادی، گره‌هایی در شبکه را با بیشترین انرژی باقیمانده مشخص کرده و داده‌ها فقط از میان گره‌های تعیین‌شده عبور می‌کنند تا زمانی که انرژی یک گره به سطح آستانه از پیش مشخص شده نزدیک شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این روش کارایی بهتری نسبت به شیوه‌های متداول مسیریابی و ارسال اطلاعات در این نوع شبکه‌ها دارد.

کلید واژه: شبکه مش بی‌سیم، طول عمر شبکه، مجموعه غالب متصل، مسیریابی آگاه از انرژی.

۱- مقدمه

هم‌زمان با توسعه بسیاری از شبکه‌های بی‌سیم متنوعی که در قالب نسل آینده برای بهبود سرویس‌ها ارائه شده‌اند، شبکه‌های بی‌سیم مش نیز در حال توسعه و پیشرفت هستند. در یک شبکه بی‌سیم مش برقراری ارتباط بین گره‌ها و نگهداری این ارتباط به صورت خودکار بوده و از همین رو به این شبکه‌ها، شبکه‌های با سازمان‌دهی و پیکربندی خودکار نیز می‌گویند. این ویژگی فواید بسیاری برای این شبکه‌ها دارد مانند نگهداری آسان شبکه، پوشش سرویس مطمئن و استحکام شبکه.

این شبکه‌ها دارای سه جزء اصلی هستند: ۱) مشتری‌های مش، ۲) مسیریاب‌های مش و ۳) دروازه‌های مش که در این بین مسیریاب‌های مش کمترین جابه‌جایی را داشته و هسته اصلی شبکه را تشکیل می‌دهند و مشتری‌های مش می‌توانند ثابت یا متحرک بوده و از طریق مسیریاب‌های مش به شبکه دسترسی داشته باشند [۱].

علاوه بر تأمین ارتباط بی‌سیم برای سرویس‌گیرندگان، گره‌های مسیریاب وظیفه ارسال داده‌ها به گره‌هایی که ارتباط مستقیم بی‌سیم با آنها وجود ندارد را نیز بر عهده دارند. این ارتباط از طریق ارسال داده‌ها روی ارتباطات بی‌سیم بین گره‌های مسیریاب صورت می‌گیرد. بنابراین یک گره می‌تواند داده‌های خود را از طریق گره‌های مسیریاب دیگر به گرهی ارسال کند که در فاصله ارسال قرار ندارد. این خاصیت ارسال چندپرشی داده‌ها، از خواص پایه‌ای شبکه‌های مش بی‌سیم است.

مسیریابی داده‌ها در میان شبکه مش توسط مسیریاب‌های زیرساخت انجام می‌گیرد و به مسیریاب‌های دروازه می‌رسد. این مسیریاب‌ها می‌توانند با خارج از شبکه مش ارتباط برقرار کنند. با توجه به مزیت خود پیکربندی شبکه‌های مش بی‌سیم، می‌توان در هر لحظه گره‌هایی را به شبکه اضافه کرد و یا از شبکه حذف نمود. اگر مسیریاب‌ها به باتری و صفحات خورشیدی برای احیای انرژی باتری مجهز باشند، امکان استفاده از آنها در هر نقطه‌ای فراهم خواهد بود ولی در شرایطی که ترافیک ارتباطی بسیار زیاد است، مصرف انرژی در گره‌های مسیریاب، بیشتر از شارژ آنها خواهد بود و این حالت باعث خروج گره‌ها از شبکه و خاموشی آنها می‌شود. بنابراین برای بهبود کارایی شبکه به روشی برای مسیریابی آگاه از انرژی باتری نیازمندیم که بتواند در مواقع پرترافیک، بار داده‌ها را در میان گره‌های پرانرژی به طور یکنواخت توزیع کند تا بتوان طول عمر شبکه را افزایش داد [۲]. با توجه به اهمیت فراوان موضوع مدت زمان کارکرد شبکه و گره‌های مسیریاب، در این مقاله روشی نوین برای افزایش طول عمر شبکه طراحی شده است. طول عمر شبکه مدت زمان کارکرد آن تا زمانی است که اولین مسیریاب به طور کامل انرژی خود را از دست می‌دهد و قادر به فعالیت نمی‌باشد [۳]. الگوریتم مسیریابی پیشنهادی، گره‌هایی در شبکه را با بیشترین انرژی باقیمانده مشخص کرده و داده‌ها فقط از میان گره‌های تعیین‌شده عبور می‌کنند تا زمانی که انرژی یک گره به سطح آستانه از پیش مشخص شده نزدیک شود. روش پیشنهادی توسط نرم‌افزار Matlab با در نظر گرفتن کلیه شرایط محیطی و انرژی باقیمانده در باتری هر یک از گره‌ها شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد که این طرح در مقایسه با سایر روش‌هایی که به طور معمول برای مسیریابی در شبکه‌های مش بی‌سیم به کار می‌روند، کارایی قابل قبولی دارد و برای مسیریابی و ارسال اطلاعات برای استفاده در مدت زمان بسیار طولانی مناسب می‌باشد.

در ادامه مقاله، تحقیقات انجام‌شده در مسیریابی آگاه از توان مبتنی بر زیرساخت برای بهینه‌کردن طول عمر شبکه مرور می‌گردد. سپس به شرح

این مقاله در تاریخ ۲۴ اردیبهشت ماه ۱۳۹۲ دریافت و در تاریخ ۴ مهر ماه ۱۳۹۳ بازنگری شد.

آیدین شفارودی، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، (email: aidinelect82@gmail.com).

سیدوحید ازهری، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، (email: azharivs@iust.ac.ir).

روش پیشنهادی می‌پردازیم و در انتها نتایج شبیه‌سازی را مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهیم.

۲- مروری بر تحقیقات انجام‌شده

یک روش مسیریابی که در شبکه‌های بی‌سیم موردی مطرح می‌شود مسیریابی مبتنی بر زیرساخت است. در این نوع روش مسیریابی گره‌ها به دو دسته گره‌های با قابلیت زیرساخت و گره‌های منظم تقسیم می‌شوند و هدف، صرفه‌جویی بیشتر انرژی در گره‌های شبکه است و تنها از گره‌های زیرساخت می‌توان به عنوان گره میانی برای ارسال ترافیک از مبدأ به مقصد استفاده نمود و بقیه گره‌ها فقط می‌توانند به عنوان مبدأ و مقصد باشند. گره‌های زیرساخت به دلیل شرکت در مسیریابی همیشه باید بیدار[1] باشند اما گره‌هایی که جزء گره‌های زیرساخت محسوب نمی‌شوند فقط در صورتی در حالت عملیاتی بیدار قرار می‌گیرند که مبدأ یا مقصد باشند و در غیر این صورت به خواب[2] می‌روند و از این طریق موجب صرفه‌جویی انرژی در شبکه می‌شوند. بنابراین استفاده از مسیریابی مبتنی بر زیرساخت به دلیل خارج‌کردن تعدادی از گره‌های با انرژی محدود و شرکت‌ندادن آنها در مسیریابی مزایایی از جمله کاهش تداخل و همچنین مصرف انرژی کمتر را به همراه دارد [۴]. اما مسأله مهم‌تر و مطلوب ما مسأله بیشینه‌کردن طول عمر شبکه است. Chang و Tassiulas طول عمر شبکه را مدت زمان اندازه‌گیری شده از آغاز به کار شبکه تا زمانی که اولین گره در شبکه از کار بیفتد و انرژی کافی برای برقراری ارتباط در شبکه را نداشته باشد تعریف کرده‌اند [۵]. این تعریف مبنای کار بسیاری از کارهای انجام‌شده در این زمینه است. Wieselthier و همکاران [۶] نشان داده‌اند که کمینه‌کردن توان مصرفی در شبکه ممکن است به افزایش طول عمر شبکه منجر نشده و در مواردی نیز منجر به کاهش طول عمر شبکه شود چرا که درخت انرژی کمینه[3] فقط مصرف کلی انرژی را در کل شبکه در نظر می‌گیرد و به گره‌هایی که از لحاظ میزان انرژی باقیمانده، حیاتی محسوب می‌گردند توجهی نمی‌کند. در [۷] یک تقسیم‌بندی جدید از الگوریتم‌های تشکیل زیرساخت شبکه‌های حسگر بی‌سیم ارائه شده است. نویسندگان بر این عقیده‌اند که تشکیل زیرساخت به وظیفه‌ای که قرار است انجام دهد بستگی دارد. همچنین وجود زیرساخت در این شبکه‌ها باعث کاهش سربار داده ارتباطی، افزایش پهنای باند مؤثر، کاهش مصرف انرژی کل و افزایش طول عمر مؤثر شبکه می‌شود.

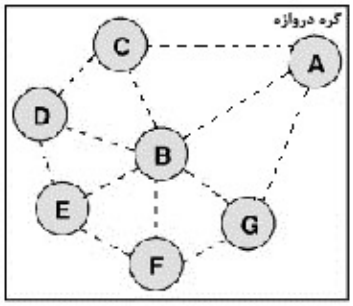
در [۸] الگوریتمی برای انتخاب مسیر با در نظر گرفتن انرژی پیشنهاد شده است. در این روش از تمام مسیرها به طور یکسان استفاده می‌شود و مسیرهایی با انرژی موجود کافی انتخاب می‌گردند تا طول عمر شبکه افزایش یابد. در [۹] برای بهبود کارایی شبکه، زیرساخت مجازی آگاه از باتری مطرح شده است. برای توصیف رفتار باتری، مدلی ساده برای شارژ و تخلیه باتری بیان شده و سپس با استفاده از این مدل، روش مجموعه غالب متصل (CDS)[4] آگاه از باتری مطرح گردیده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با حداقل‌کردن تعداد گره‌های انتخاب‌شده در این روش، می‌توان طول عمر شبکه را تا ۳۰ درصد افزایش داد. Wu و Li یک الگوریتم ساده توزیع‌شده برای محاسبه مجموعه غالب متصل در شبکه‌های بی‌سیم موردی[5] پیشنهاد داده‌اند که در آن اتصال گره‌ها به وسیله فاصله جغرافیایی گره‌ها نسبت به هم تعیین می‌شود [۱۰].

آنچه که از برایند فعالیت‌های انجام‌شده برمی‌آید این است که با توجه به این که مسیریاب‌های مش بی‌سیم از نظر قابلیت تحرک بر خلاف شبکه‌های موردی ثابت هستند، در اکثر پژوهش‌ها و مقالات، مسئله انرژی برای این گونه از شبکه‌ها در نظر گرفته نشده و ترکیبی از مسایل مدیریت تحرک گره‌های مسیریاب و محدودیت انرژی آنها در شبکه‌های موردی و حسگر بی‌سیم مورد توجه بوده است. با توجه به این که در این مقاله روی شبکه‌های مش بی‌سیمی که به برق شهری متصل نیستند و محدودیت انرژی دارند متمرکز شده‌ایم، لذا لازم است روشی برای افزایش طول عمر شبکه با در نظر گرفتن انرژی هر مسیریاب ارائه گردد.

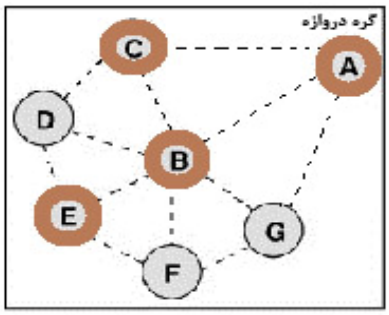
۳- شرح روش پیشنهادی

در این روش به جای این که همه گره‌ها را در مسیریابی شرکت دهیم، با ارائه الگوریتمی خاص، فقط از گره‌های با انرژی باتری باقیمانده بیشتر استفاده خواهیم نمود. فرض می‌شود هر کدام از مسیریاب‌ها به صفحه‌ای خورشیدی متصل هستند و در طول روز امکان احیای انرژی باتری آنها وجود دارد. اندازه این صفحه خورشیدی با توجه به ولتاژ و جریان مصرفی هر گره مش به گونه‌ای تعیین می‌شود که بتواند جوابگوی نیاز هر گره باشد. همچنین برای انرژی باتری گره‌ها، سطح آستانه‌ای در نظر گرفته شده تا در صورتی که انرژی باقیمانده یک گره به این سطح نزدیک شود، به طور موقت خود را از مسیر ارسال اطلاعات خارج کرده و وظیفه مسیریابی را به یکی از گره‌های پرانرژی مجاور خود بسپارد. در این مدت امکان شارژ و احیای انرژی تخلیه‌شده باتری برای این گره وجود خواهد داشت. البته حتی در حالتی که امکان اتصال گره‌ها به صفحه خورشیدی وجود نداشته باشد، روش پیشنهادی، حداکثر طول عمر ممکن برای شبکه را تضمین می‌کند. این طول عمر بیشتر از سایر روش‌های مسیریابی است که بدون توجه به انرژی گره‌ها، داده‌ها را ارسال می‌کنند و نیز روش‌های مسیریابی آگاه از توان که در آنها به طور هم‌زمان، تمام گره‌ها مجبور به روشن‌ماندن و فعالیت هستند. علاوه بر این، روش طرح‌شده انرژی را به طور یکنواخت در کل شبکه مصرف می‌کند و از ایجاد گلوگاه در مسیریابی جلوگیری خواهد نمود. مسیریاب‌های شبکه با هم در ارتباط هستند و با عبور بسته‌های اطلاعاتی از سایر مسیریاب‌ها، بسته را به سمت گره دروازه هدایت می‌کنند. این گره بر خلاف سایر گره‌ها به برق شهری متصل است و محدودیت انرژی ندارد و مقصد نهایی تمامی داده‌های ارسالی از گره‌ها، همین گره است. الگوریتم مسیریابی پیشنهادی، گره‌هایی در شبکه را با بیشترین انرژی باقیمانده مشخص کرده و داده‌ها فقط از میان گره‌های تعیین‌شده عبور می‌کنند تا زمانی که انرژی یک گره به سطح آستانه از پیش مشخص شده نزدیک شود. در این حالت آن گره از حالت انتخاب خارج شده و یکی از گره‌های مجاور خود را که انرژی باقیمانده بیشتری دارد انتخاب می‌کند. انتخاب گره‌های مسیریاب توسط گره دروازه آغاز شده و تا زمانی که انرژی تمام گره‌ها بررسی شود و پیام finish توسط گره دروازه دریافت گردد، ادامه می‌یابد. در ابتدا هر گره انرژی باقیمانده و لیست همسایه‌های گره‌های همسایه خود را تقاضا می‌کند. در این حالت با محاسباتی ساده مشخص می‌شود که کدام همسایه‌های یک گره به هم متصل هستند و کدام‌ها اتصال رادیویی با هم ندارند. در شکل ۱ گره A در همسایگی گره‌های C، B و G قرار دارد. پاسخ این سه گره به درخواست

1. Awake
2. Sleep
3. Minimum Energy Tree
4. Connected Dominating Set
5. Add Hoc



شکل ۱: یک شبکه فرضی مش بی‌سیم.



شکل ۳: تغییر مسیر با افت انرژی گره D.

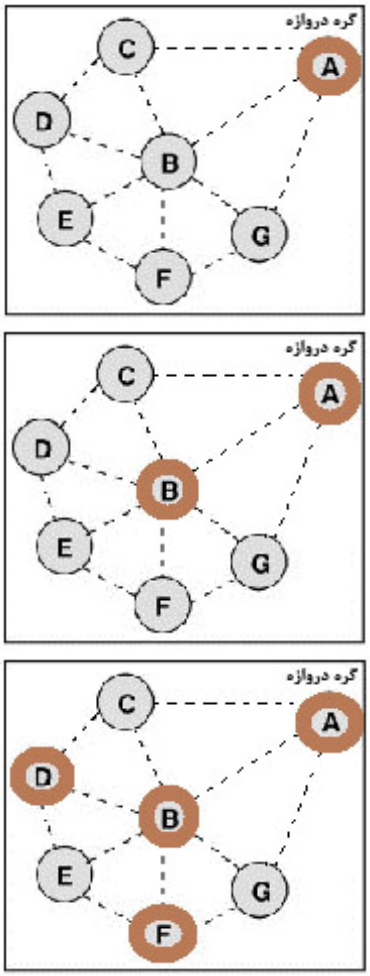
گره A به این صورت است

$$N(\mathrm{B}) = \{\mathrm{A},\mathrm{C},\mathrm{D},\mathrm{E},\mathrm{F},\mathrm{G}\}$$
$$N(\mathrm{C}) = \{\mathrm{A},\mathrm{D},\mathrm{B}\} \qquad (۱)$$
$$N(\mathrm{G}) = \{\mathrm{A},\mathrm{B},\mathrm{F}\}$$

چون در مجموعه همسایه‌های گره B، C و G قرار دارند، پس این دو گره به گره B متصل هستند و همین طور به علت عدم وجود G در مجموعه C، این دو گره، دو همسایه غیر متصل A خواهند بود. الگوریتم پیشنهادی از میان گره‌های متصل، فقط یک گره که انرژی بیشتری دارد و از میان گره‌های غیر متصل، همه را انتخاب می‌کند و نشان آنها را T قرار می‌دهد. گره‌ای که به علت انرژی کمتر انتخاب نشود، نشان F خواهد گرفت و در تمام فرایند انتخاب مسیر برای تمام گره‌ها، ممنوع برای انتخاب است. هر گره‌ای که انتخاب شود مانند گره دروازه، روش مشابهی را ادامه می‌دهد تا جایی که حالتی برای انتخاب باقی نماند. سپس از گره نهایی به سمت گره‌های قبلی پیام finish برمی‌گردد. هر گاه این پیام را گره دروازه دریافت کند، تشکیل مسیر به اتمام رسیده و عملیات ارسال اطلاعات انجام می‌گیرد. در شکل ۲ مراحل انتخاب مسیر از گره دروازه تا انتهای شبکه نشان داده شده است. اگر انرژی گره B از گره‌های C و G بیشتر باشد و همچنین انرژی گره‌های D و F از گره E بیشتر باشد، مسیر شکل ۳ به دست خواهد آمد. در این حالت گره‌های A، B، D و F مسیریابی خواهند کرد و فقط این گره‌ها جدول مسیر را ذخیره خواهند نمود. ارسال داده‌های یک گره انتخاب‌نشده توسط گره مجاور انتخاب‌شده که تعداد جهش کمتری تا گره دروازه دارد، صورت می‌گیرد.

اگر پس از گذشت مدتی، انرژی یکی از گره‌های انتخاب‌شده به سطح آستانه نزدیک شود، نشان خود را F کرده و از میان گره‌های همسایه، طبق الگوریتم، گره(های) پرانرژی‌تر که نشان F دارند را انتخاب می‌کند. اگر انرژی گره D افت کند، مسیر مانند شکل ۳ خواهد شد.

با توجه به این که در الگوریتم پیشنهادی، روشی توزیع‌شده، ساده و سریع برای تعیین گره‌های مجموعه غالب طرح گردیده که بر اساس انرژی باقیمانده در هر مسیریاب عمل می‌کند، مسئله متصل‌بودن گره‌های انتخاب‌شده حائز اهمیت است.



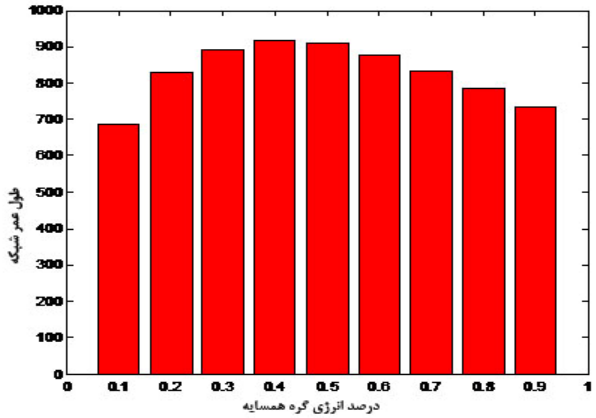
شکل ۲: مراحل انتخاب مسیر.

فرض می‌کنیم گراف $G=(V,E)$ نمایانگر گراف شبکه می‌باشد. زیرمجموعه V' که از روش پیشنهادی به وجود آمده، یک مجموعه غالب از گراف G را تشکیل می‌دهد و باید اثبات کنیم گراف $G'=G-V'$، یک گراف متصل است.

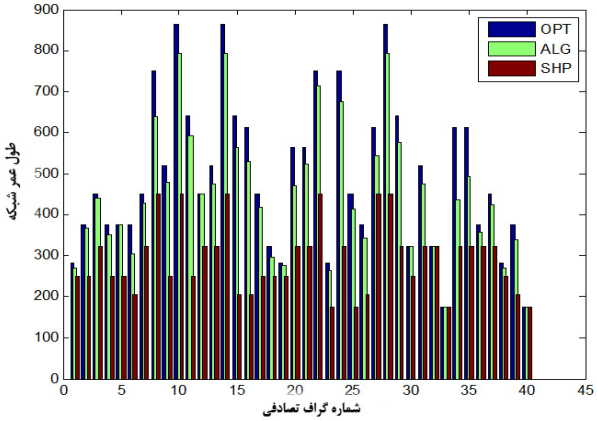
این نظریه را با برهان خلف اثبات می‌کنیم. فرض می‌کنیم G' غیر متصل است و u و v، دو رأس غیر متصل از مجموعه گراف‌های G' هستند و همچنین $\mathrm{dis}\,G(u,v)=k+1>1$ و $\{v,v_1,v_2,\ldots,v_k,u\}$ کوتاه‌ترین مسیر بین رئوس u و v در گراف G است. واضح است که رئوس $v_1,v_2,\ldots,v_k$ مجزا هستند و بین آنها حداقل یک v_i با نشان F وجود دارد. دو رأس مجاور v_{i+1},v_i,v_{i-1} در گراف G متصل نیستند [۱۱]. بر طبق الگوریتم، نشان v_i باید T شود که این خلاف فرض است و در نتیجه فرض خلف باطل و حکم ثابت است.

٤- تجزیه و تحلیل نتایج شبیه‌سازی

روش پیشنهادی توسط نرم‌افزار Matlab شبیه‌سازی گردید. صحت عملکرد این روش در چند گراف مشبک و همچنین ۴۰ گراف تصادفی بررسی شد. در هر مورد الگوریتم ارائه‌شده با روش‌های کوتاه‌ترین مسیر و بهینه مقایسه گردید. الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر یکی از رایج‌ترین روش‌های مسیریابی در این گونه شبکه‌ها است، خصوصاً زمانی که بحث مصرف توان در میان است. مشکل این روش برای بیشینه‌کردن طول عمر شبکه این است که به گره‌های بحرانی هیچ نگاهی نداشته و باتری گره‌هایی را که بر سر کوتاه‌ترین مسیر تعداد زیادی از گره‌های دیگر هستند را سریع تخلیه کرده و این امر باعث می‌شود که این گره‌ها، گلوگاه شده و طول



شکل ۴: مقایسه تأثیر ضرایب انرژی همسایه بر طول عمر شبکه.



شکل ۵: مقایسه طول عمر الگوریتم‌های مورد آزمایش.

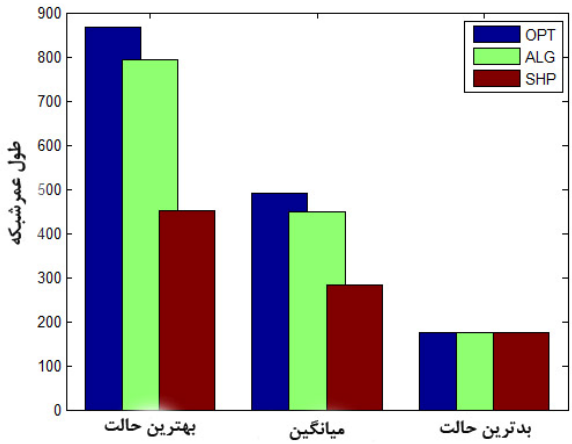
عمر شبکه به شدت کاهش یابد. برای پیاده‌سازی روش بهینه برای بیشینه‌کردن طول عمر شبکه، برنامه‌ریزی خطی مسأله را توسط یک حل‌کننده برنامه‌ریزی ریاضی حل می‌کنیم. ما برای این منظور از ابزار CPLEX بهره گرفته‌ایم که یکی از رایج‌ترین حل‌کننده‌ها در این زمینه محسوب می‌گردد. یافتن سطح مناسبی برای آستانه که مطابق آن به بیشینه ممکن طول عمر شبکه نزدیک شویم، توسط چندین آزمایش بررسی شده است. مقدار آستانه برای خروج یک گره از حالت انتخاب و نیز بازگشت آن به مجموعه مسیریاب‌ها پس از احیای انرژی باتری آن، درصدی از بیشترین انرژی باقیمانده یکی از همسایه‌های آن گره در نظر گرفته شده و هدف یافتن بهترین ضریب در آزمایش‌ها و گراف‌های شبکه متعدد است. در کلیه موارد، اثر انرژی خورشیدی در نظر گرفته نشده تا صحت عملکرد الگوریتم با دقت بیشتری متمرکز روی انرژی باقیمانده باتری‌ها باشد و عدم وابستگی روش پیشنهادی به مقدار شارژ خورشیدی بررسی گردد. در ادامه آزمایش در یک گراف مشبک با ۴۰ گره، اثر انرژی خورشیدی را بر روی الگوریتم امتحان و نتایج را با روش‌های بهینه و کوتاه‌ترین مسیر مقایسه نمودیم.

هدف این است که با آزمایش‌هایی مقدار دقیقی از آستانه‌ای که تحت تأثیر انرژی همسایه‌های یک گره است، به دست آید. بدین صورت که هر گره زمانی از بین گره‌های انتخاب‌شده برای مسیریابی خارج شود که انرژی باقیمانده آن کمتر از درصدی از بیشترین انرژی یکی از همسایه‌هایش باشد. طول عمر شبکه در حالات ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸ و ۰/۹ از مقدار بیشترین انرژی باقیمانده یکی از گره‌های همسایه بررسی شد. . به عنوان مثال، اگر انرژی باقیمانده گره مجاور ۶۰ ژول باشد، ۰/۱ آن، یعنی ۱۰ درصد از ۶۰ ژول، که برابر است با ۶ ژول. در این حالت مقدار آستانه، ۶ ژول انتخاب می‌شود. بنابراین ،در حالت ۵۰ درصد انرژی باقیمانده، مقدار آستانه ۳۰ ژول خواهد بود.

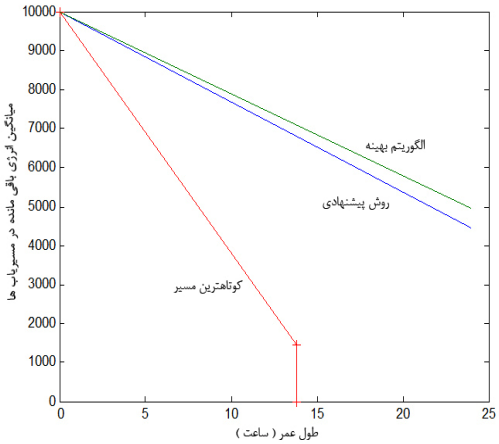
نتایج نشان داد ۵۰ درصد از انرژی همسایه‌های یک گره، آستانه مناسبی برای تعیین زمان فعالیت آن برای بیشینه‌شدن طول عمر خواهد بود. در نمودار شکل ۴ رابطه سایر ضرایب با طول عمر شبکه بر حسب ثانیه رسم شده است. با ضریب ۵۰ درصد انرژی همسایه برای سطح آستانه، طول عمر بیشینه و ۱۷۷ ثانیه و با ضریب ۱۰ درصد کمترین طول عمر، ۱۳۶ ثانیه به دست آمد.

این آزمایش برای سایر شبکه‌های مشبک و همچنین شبکه‌های تصادفی متعدد تکرار شد و نتیجه مشابهی برای بهترین ضریب انرژی آستانه به دست آمد. در شرایطی که تمام لینک‌ها دوطرفه بوده و ظرفیت هر لینک ۱۰ Mbps و سایر گره‌ها همگی دارای ترافیک تولیدی ۰/۶ Mbps بوده و باتری آنها دارای مقدار اولیه ۱۰۰ ژول و توان ارسال و دریافت برابر ۰/۵ Watt/Mbps می‌باشد، طول عمر در شبکه مشبک ۳×۳ برای کوتاه‌ترین مسیر، ۶۰۰ ثانیه و برای الگوریتم پیشنهادی، ۹۱۷ ثانیه برای روش بهینه، ۱۰۰۰ ثانیه به دست آمد. در این حالت کل ترافیک شبکه که وارد گره دروازه می‌شد، ۴/۸ مگابیت بر ثانیه و ترافیک یک گره تصادفی مانند گره ۲ در روش کوتاه‌ترین مسیر ۱/۸، بهینه ۱/۲ و در روش پیشنهادی به علت تغییر ساختار مسیریاب‌های زیرساخت به ترتیب ۱/۸، ۰/۶، ۱/۲ و ۱/۲ مگابیت بر ثانیه بود. با شرایط مشابه و یک شبکه مشبک ۴×۳، کل ترافیک شبکه که وارد گره دروازه می‌شد، ۱۵ مگابیت بر ثانیه برای کوتاه‌ترین مسیر، ۱۱ مگابیت بر ثانیه برای روش بهینه و بین ۱۱ تا ۱۵ مگابیت بر ثانیه برای روش پیشنهادی متغیر بود. ترافیک گره ۲ در روش کوتاه‌ترین مسیر ۳، در روش بهینه ۲/۷ و در روش پیشنهادی به علت تغییر ساختار مسیریاب‌های زیرساخت به ترتیب ۳/۳ و ۳/۲ مگابیت بر ثانیه بود. با افزایش تعداد گره‌های مسیریاب و همچنین ترافیک تولیدی هر گره به ۱ Mbps، در ۴۰ شبکه تصادفی عملکرد الگوریتم بررسی شد. نمودار شکل ۵ مقایسه‌ای از طول عمر الگوریتم‌های مورد آزمایش را در این حالت نشان می‌دهد. نتایج نشان داد میانگین طول عمر در روش بهینه ۴۹۲، پیشنهادی ۴۴۸ و کوتاه‌ترین مسیر ۲۸۲ ثانیه می‌باشد. همچنین الگوریتم پیشنهادی ۹۱/۲ درصد و کوتاه‌ترین مسیر ۵۹/۴ درصد بهینه عمل کرده‌اند. از طرفی در روش پیشنهادی، انرژی در اکثر گره‌ها به طور کاملاً مساوی تخلیه شده‌اند و ترافیک کاملاً توزیع‌شده و متقارن است و به گره خاصی ترافیک غیر ضروری منتقل نشده است. در شبکه مشبک با ۴۰ گره مسیریاب، فرض می‌کنیم تمام لینک‌ها دوطرفه بوده و ظرفیت هر لینک ۱۰ Mbps و گره‌ها همگی دارای ترافیک تولیدی ۱ Mbps بوده و باتری آنها دارای مقدار اولیه ۱۰۰۰۰ ژول است. انرژی خورشیدی ورودی از یک صفحه خورشیدی با توان ۳ وات تأمین می‌شود. توان ارسال و دریافت را نیز برابر ۱ Watt/Mbps فرض کرده‌ایم. آزمایش در طول ۲۴ ساعت انجام شده و باتری‌ها ۱۰ ساعت در طول این روز می‌توانند شارژ شوند.

در میان شبکه‌های تصادفی مورد آزمایش، در بهترین حالت طول عمر در روش بهینه ۸۶۶، کوتاه‌ترین مسیر ۴۵۱ و الگوریتم مطرح‌شده ۷۹۳ ثانیه بود. در این حالت الگوریتم پیشنهادی ۹۲ درصد و کوتاه‌ترین مسیر ۵۲ درصد بهینه عمل کردند و در بدترین حالت طول عمر در هر سه روش ۱۷۴ ثانیه بود. حتی در این حالت نیز طول عمر روش پیشنهادی همانند بهینه از روش کوتاه‌ترین مسیر کمتر نبود. طول عمر شبکه‌های مورد آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است. شکل ۶ نمودار حالات مختلف



شکل ۶: مقایسه طول عمر الگوریتم‌های مورد آزمایش در حالات مختلف.



شکل ۷: تأثیر انرژی خورشیدی در طول عمر الگوریتم‌های مورد آزمایش.

جدول ۱: تأثیر افزایش مسیریاب‌ها بر طول عمر شبکه.

تعداد گره‌ها	طول عمر روش بهینه	طول عمر روش کوتاه‌ترین مسیر	طول عمر روش پیشنهادی	درصد بهینگی کوتاه‌ترین مسیر	درصد بهینگی روش پیشنهادی
۱۰	۱۴۴۱	۹۵۱	۱۳۸۶	۶۶	۹۶٫۲
۴۰	۱۰۵۱	۴۴۱	۹۶۷	۴۱٫۷	۹۲
۱۰۰	۶۸۹	۱۸۹	۶۳۱	۲۷٫۴	۹۱٫۶
۱۵۰	۳۱۸	۴۵	۲۸۹	۱۴٫۲	۹۰٫۸

ذکرشده را نسبت به طول عمر شبکه در آزمایش گراف‌های تصادفی نشان می‌دهد. مقدار سطح آستانه، ۵۰ درصد بیشترین انرژی باقیمانده همسایه هر گره برای خروج یک گره از حالت انتخاب قرار داده شد.

با توجه به امکان شارژ باتری‌ها توسط صفحات خورشیدی متصل به آنها، آستانه بازگشت یک گره به جریان مسیریابی، ۷۰ درصد بیشترین انرژی باقیمانده همسایه هر گره در نظر گرفته شد تا گره‌هایی که از حالت انتخاب خارج می‌شوند، فرصت کافی برای شارژ مناسب و بازگشت با انرژی قابل قبول را داشته باشند. در صورتی که سطح آستانه رفت و بازگشت گره‌ها یکسان قرار داده شود، احتمال قطع و وصل‌های مکرر و در زمان‌های کوتاه برای یک گره دور از انتظار نیست و در این حالت تغییر مداوم و بی‌نتیجه مسیریاب‌ها و جدول مسیریابی رخ خواهد داد که بازدهی و عملکرد الگوریتم را کاهش می‌دهد.

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر در ۱۳ ساعت و ۵۲ دقیقه متوقف شد ولی الگوریتم‌های بهینه و پیشنهادی پس از گذشت ۲۴ ساعت همچنان به کار خود ادامه می‌دادند. مطابق شکل ۷ میانگین انرژی باقیمانده در مسیریاب‌ها برای روش کوتاه‌ترین مسیر ۱۴۳۵٫۵ ژول، برای روش بهینه پس از ۲۴ ساعت ۴۹۴۷٫۶ ژول و برای الگوریتم پیشنهادی بعد از ۲۴ ساعت ۴۴۵۲٫۸ ژول محاسبه شد. با وجود افزایش ترافیک شبکه و تعداد مسیریاب‌ها، الگوریتم پیشنهادی همچنان حدود ۹۰ درصد بهینه است و کارایی خود را حفظ کرده در حالی که روش کوتاه‌ترین مسیر در این شرایط حدود ۲۹ درصد بهینه است و بیش از ۳۰ درصد نسبت به حالات قبل، افت کارایی داشته است.

برای بررسی اثر افزایش تعداد گره‌های مسیریاب‌های شبکه زیرساخت مش بر طول عمر روش پیشنهادی، در شرایط مصرف انرژی و میزان مقدار اولیه باتری یکسان برای تمام گره‌ها، آزمایش مسیریابی برای محاسبه طول عمر انجام گرفت. طول عمر روش‌های بهینه و کوتاه‌ترین مسیر و الگوریتم پیشنهادی در شبکه‌هایی با تعداد گره‌های ۱۰، ۴۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ مقایسه شدند. فرض شده تمام شبکه‌ها مشبک و ترافیک تولیدی هر گره ثابت است. آزمایش با این فرض انجام می شود که تمام لینک‌ها دوطرفه بوده و ظرفیت هر لینک Mbps ۱۰ است. همچنین، سایر گره‌ها همگی دارای ترافیک تولیدی Mbps ۰٫۲ بوده و باتری آنها دارای مقدار اولیه ۵۰۰ ژول و توان ارسال و دریافت، برابر Watt/Mbps ۰٫۵ می‌باشد. نتایج آزمایش در جدول ۱ آمده و مقادیر طول عمر درج‌شده در جدول بر حسب ثانیه می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش تعداد گره‌ها، با این که روش کوتاه‌ترین مسیر به شدت افت کارایی از خود نشان می‌دهد، ولی روش پیشنهادی همچنان بیش از ۹۰ درصد بهینه عمل می‌نماید. با افزایش ۱۱۰ گره مسیریاب، روش پیشنهادی ۱٫۲ درصد افت کارایی داشت در حالی که روش کوتاه‌ترین مسیر ۲۷٫۵ درصد از بهینگی خود را از دست داد.

الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر، یکی از رایج‌ترین الگوریتم‌های مسیریابی برای شبکه‌های بی‌سیم مش است، خصوصاً زمانی که بحث مصرف توان نیز پیش کشیده شود زیرا کوتاه‌ترین مسیر از مبدأ به مقصد از لحاظ فاکتور مصرف کلی انرژی مناسب محسوب می‌گردد. مشکل این روش برای بیشینه‌کردن طول عمر شبکه این است که به گره‌های بحرانی هیچ نگاهی نداشته و باتری گره‌هایی را که بر سر کوتاه‌ترین مسیر تعداد زیادی از گره‌های دیگر هستند را سریع تخلیه کرده و این امر باعث می‌شود که این گره‌ها، گلوگاه شده و احتمالاً طول عمر کلی شبکه به واسطه همین گلوگاه‌ها کاهش یابد. اما روش انتخاب مجموعه غالب متصل، شبکه زیرساخت کوچک‌تری را برمی‌گزیند، به این ترتیب تعداد کل گره‌های انتخاب‌شده در شبکه کاهش می‌یابد. هر چقدر تعداد گره کمتری به عنوان مسیریاب زیرساخت شبکه انتخاب شود، بازدهی الگوریتم بالاتر خواهد بود.

۵- نتیجه‌گیری

مسیریابی داده‌ها در میان شبکه مش، توسط مسیریاب‌های زیرساخت انجام می‌گیرد و به مسیریاب‌های دروازه می‌رسد. این مسیریاب‌ها می‌توانند با خارج از شبکه مش ارتباط برقرار کنند. اگر مسیریاب‌ها به

باتری و صفحات خورشیدی برای احیای انرژی باتری مجهز باشند، امکان استفاده از آنها در هر نقطه‌ای فراهم خواهد بود ولی در شرایطی که ترافیک ارتباطی بسیار زیاد است، مصرف انرژی در گره‌های مسیریاب بیشتر از شارژ آنها خواهد بود و این حالت باعث خروج گره‌ها از شبکه و خاموشی آنها می‌شود. بنابراین برای بهبود کارایی شبکه به روشی برای مسیریابی آگاه از انرژی باتری نیازمندیم که بتواند در مواقع پرترافیک، بار داده‌ها را در میان گره‌های پرانرژی به طور یکنواخت توزیع کند تا بتوان طول عمر شبکه را افزایش داد. به این منظور روشی ارائه شد که در آن تمام گره‌ها به طور هم‌زمان مسیریابی نمی‌کنند و فرصتی برای احیا و شارژ انرژی باتری خود خواهند داشت. گره‌ها باید به گونه‌ای انتخاب شوند که همواره تمامی گره‌ها برای ارسال اطلاعات به گره دروازه، حداقل یک مسیر مطمئن و پرانرژی داشته باشند. الگوریتم پیشنهادی توسط نرم‌افزار Matlab شبیه‌سازی و با الگوریتم‌های رایج کوتاه‌ترین مسیر و بهینه از نظر بیشینه طول عمر مقایسه شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد الگوریتم مطرح‌شده به خوبی قادر به افزایش زمان بهره‌برداری از شبکه است و توزیع انرژی عادلانه‌ای بین همه گره‌های شبکه دارد.

مراجع

[1] G. Aggelou, *Wireless Mesh Networking*, McGrow-Hill Ltd, 2009.

[2] T. D. Todd, A. A. Sayegh, M. N. Smadi, and D. Zhao, "The need for access point power saving in solar powered WLAN mesh network," *IEEE Network*, vol. 22, no. 3, pp. 4-10, May/Jun. 2008.

[3] P. Kaushik and J. Singhai, "Energe - efficient routing algorithm for maximizing the minimum lifetime of wireless sensor network: a review," *Int. J. of Adhoc, Sensor & Ubiquitous Computing, IJASUC*, vol. 2, no. 2, pp. 25-36, Jun. 2011.

[4] D. M. Shrestha and Y. B. Ko, "On construction of the virtual backbone in wireless mesh networks," in *Proc. of the 8th Int.l Conf. Advanced Communication Technology, ICACT,* vol. 1, 6 pp., 20-22 Feb. 2006.

[5] J. Chang and L. Tassiulas, "Energy conserving routing in wireless ad - hoc networks," in *Proc. of IEEE INFOCOM*, vol. 1, pp. 22-31, 2000.

[6] J. Wieselthier, D. Nguyen, and A. Ephremides, "Energy - aware wireless networking withdirectional antennas: the case of session - based broadcasting and multicasting," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol. 1, no. 3, pp. 176-191, Jul.-Sep. 2002.

[7] R. Asgarnezhad and J. A. Torkestani, "A survey on backbone formation algorithms for wireless sensor networks: (a new classification)," in *Proc. Australasian Telecommunication Networks and Applications Conf., ATNAC*4 pp., 9-11 Nov. 2011.

[8] I. Joe, "A path selection algorithm with energy efficiency for wireless sensor networks," in *Proc. 5th ACIS Int. Conf. on Software Engineering Research, Management, & Applications, SERA'07*, pp. 419-423, 20-22 Aug. 2007.

[9] C. Ma, Y. Yang, and Z. Zhang, "Constructing battery - aware virtual backbones in sensor networks," in *Proc. Int. Conf. on Parallel Processing, ICPP,* pp. 203-210, 14-17 Jun. 2005.

[10] J. Wu, M. Gao, and I. Stojmenovic, "On calculating power - aware connected dominating sets for efficient routing in ad hoc wireless networks," in *Proc. Int. Conf. on Parallel Processing,* . pp. 346-354, 3-7 Sep. 2001.

[11] Y. Zhang and J. Luo, *Wireless Mesh Networking: Architectures, Protocols and Standards*, Boca Raton, FL: Auerbach Publications, 2007.

آیدین شفارودی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق-الکترونیک در سال ۱۳۸۷ از دانشگاه گیلان و در سال ۱۳۹۱ مقطع کارشناسی ارشد مهندسی فناوری اطلاعات و ارتباطات- مخابرات امن را از دانشگاه علم و صنعت ایران به پایان رساند. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده شامل موضوعاتی مانند: شبکه‌های کامپیوتری بی‌سیم، پردازش تصویر و سیگنال‌های دیجیتال، امنیت شبکه‌های مخابراتی، طراحی و شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل مدارهای الکترونیکی می‌باشد.

سیدوحید ازهری در سال ۱۳۷۹ مدرک کارشناسی مهندسی کامپیوتر-سخت‌افزار خود را از دانشگاه علم و صنعت ایران و در سال ۱۳۸۲ مدرک کارشناسی ارشد معماری کامپیوتر خود را از دانشگاه تهران دریافت نمود. از تابستان سال ۱۳۸۰ الی بهار ۱۳۸۳ نام‌برده به عنوان عضو محقق نیمه وقت در مرکز تحقیقات مخابرات ایران به کار مشغول بود و پس از آن به دوره دکترای مهندسی برق و کامپیوتر در دانشگاه مک‌مستر کانادا وارد گردید و در سال ۱۳۸۶ موفق به اخذ درجه دکتری در مهندسی برق و کامپیوتر از دانشگاه مذکور گردید. دکتر ازهری از بهمن سال ۱۳۸۶ در دانشکده مهندسی کامپیوتر دانشگاه علم و صنعت ایران در تهران مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشکده می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند شبکه‌های کامپیوتری بی‌سیم می‌باشد.