تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۰۲/۲۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱۲/۱۲

شناسایی افرازهای مجزا در شبکه‌های حسگر بی‌سیم و متصل کردن آن‌ها با جایگذاری گره‌های تقویتی

همت شیخی*
عضو هیئت علمی دانشکده فناوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی کرمانشاه،کرمانشاه، ایران
پست الکترونیکی: h.sheikhi@kut.ac.ir

سیدوفا بارخدا
عضو هیئت علمی دانشکده فناوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی کرمانشاه،کرمانشاه، ایران
پست الکترونیکی: barkhoda@kut.ac.ir

چکیده

در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، احتمال خرابی و از کار افتادن گره‌ها به دلایل زیادی از قبیل محدودیت منبع تغذیه گره‌ها و یا مشکلات محیط عملیاتی بسیار زیاد است. از دست رفتن یک یا چند گره در شبکه ممکن است باعث قطع ارتباط بخشی از شبکه شود که نتیجه آن ایجاد افرازهای مجزا در شبکه است. یک راه‌حل برای اتصال مجدد این افرازها، جایگذاری گره‌های تقویتی است. در این مقاله، یک روش جدید به منظور برقراری مجدد ارتباط افرازها با جایگذاری گره‌های تقویتی ارائه شده است. روش پیشنهادی از دو مرحله تشکیل شده است که در مرحله اول الگوریتمی برای شناسایی افرازها و در مرحله دوم الگوریتمی برای اتصال آن‌ها ارائه شده است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی به‌صورت میانگین نسبت به روش QTA از ۲/٤ و نسبت به روش RPSNC از ۱/۱ گره تقویتی کمتر برای اتصال افرازها استفاده می‌کند و از این رو عملکرد بهتری دارد.

واژه‌های کلیدی: شبکه حسگر بی‌سیم، افرازهای مجزا، گره‌های تقویتی، گراف.

۱- مقدمه

امروزه با گسترش و پیشرفت فناوری‌های ساخت حسگرها و وسایل ارتباطی با اندازه کوچک و با مصرف انرژی پایین، شبکه‌های حسگر بی‌سیم[1] به‌عنوان اولین انتخاب برای طراحی و پیاده‌سازی نسل‌های آینده سیستم‌های نظارت و دیده‌بانی معرفی شده‌اند [۱]. همچنین شبکه حسگر بی‌سیم گزینه بسیار مناسبی برای استفاده در اینترنت اشیاء[2] است[۲,۳] . از این رو در حال حاضر، پژوهش‌های فراوانی بر روی این نوع شبکه‌ها در حال انجام است. یکی از چالش‌های اساسی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم این است که یک گره ممکن است به دلایل مختلفی از قبیل تمام شدن منبع تغذیه یا معیوب شدن از دسترس خارج شود.

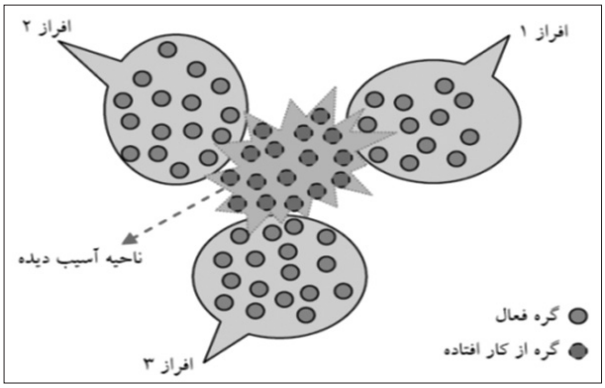
1-WSN
2-IOT

* نویسندهٔ مسئول

خراب شدن گره‌های حسگر در مواردی ممکن است سبب ایجاد افرازهای مجزا در شبکه شود. به‌عنوان مثال اگر گروهی از گره‌ها با هم از دسترس خارج شوند و یا این‌که گره‌هایی که اتصال دهنده چند بخش می‌باشد (cut nodes) معیوب شوند این اتفاق رخ خواهد داد [٤]. در این حالت گره‌های درون هر افراز فعال و در ارتباط با هم هستند اما دسترسی به سایر بخش‌های شبکه حسگر بی‌سیم ندارند. در عمل در این حالت با وجود فعال بودن تعداد زیادی از گره‌های حسگر و نظارت بر بخش زیادی از محیط، هیچ اطلاعاتی به خارج از شبکه و یا بخش‌های دیگر شبکه قابل ارسال نیست و به اصطلاح عمر شبکه به پایان رسیده است.

در شکل ۱ این وضعیت نشان داده شده است. گره‌های روشن و فعال با رنگ سبز و گره‌های از کار افتاده با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند. از آنجا که شبکه‌های حسگر بی‌سیم معمولا در محیط‌های طبیعی و خشن مورد استفاده قرار می‌گیرند، خراب شدن و از کار افتادن دسته‌ای گره‌های یک ناحیه خاص از شبکه رخداد قابل وقوعی است. در شکل ۱ گره‌های واقع در ناحیه آسیب دیده، یا خاموش شده‌اند و یا این‌که از دسترس خارج شده‌اند. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده ناحیه آسیب دیده سبب ایجاد سه افراز مجزا در شبکه شده است. گره‌های واقع در هر کدام از افرازها با یکدیگر می‌توانند ارتباط داشته باشند ولی هیچ دسترسی به سایر بخش‌های شبکه ندارند.

برای این‌که احتمال به‌وجود آمدن افرازهای مجزا در شبکه کمتر شود باید تحمل پذیری شبکه در برابر خرابی گره‌ها بیشتر شود. تاکنون روش‌های زیادی برای تحمل پذیری شبکه در برابر خرابی گره‌ها پیشنهاد شده است که به دو دسته کلی پیش‌گیرانه و واکنشی تقسیم می‌شوند [٥]. در روش‌های پیش‌گیرانه از قبل باید تمهیداتی بدین منظور انجام گیرد. به‌عنوان مثال با اضافه کردن گره‌های تقویتی، تعداد m مسیر برای دسترسی هر گره به چاهک[3] یا گره‌های دیگر ایجاد شود. بنابراین اگر کمتر از m گره



شکل ۱: افراز بندی شدن یک شبکه حسگر بی‌سیم به علت از کار افتادن دسته‌ای گره‌های یک ناحیه خاص

خراب شوند، هیچ افرازی در شبکه ایجاد نخواهد شد. این راه‌حل‌ها مناسب هستند اما دو مشکل اساسی وجود دارد: اول هزینه بالا به خاطر زیاد بودن تعداد گره‌های تقویتی لازم و دوم این‌که باز هم با معیوب شدن m گره ممکن است شبکه به افرازهای مجزا تقسیم شود. در روش‌های واکنشی بعد از ایجاد افراز در شبکه، راهکارهایی برای رفع مشکل انجام می‌گیرد. برای مثال برخی روش‌ها با افزودن گره‌های تقویتی ارتباط مابین افرازهای مجزا را مجدد برقرار می‌کنند.

مسئلهٔ پیدا کردن بهینه‌ترین تعداد گره تقویتی و مکان آن‌ها برای اتصال افرازهای مجزا به یکدیگر یک مسئلهٔ NP-hard است و بنابراین استفاده از روش‌های اکتشافی برای این کار ترجیح داده می‌شود [٦]. در پژوهش حاضر، یک روش واکنشی و اکتشافی برای مسئله ظهور افرازهای مجزا پیشنهاد شده که شامل دو مرحله است. در مرحله اول، افرازهای مجزا شناسایی می‌شوند. برای این منظور کل شبکه به صورت یک گراف منفصل در نظر گرفته می‌شود. این گراف به همراه ماتریس همجواری آن به‌عنوان پارامترهای ورودی الگوریتم در نظر گرفته می‌شوند. الگوریتم پیشنهادی در این مرحله یک روش جدید است که از پیمایش ژرفایی (DFS) در گراف‌های منفصل برای شناسایی یک به یک افرازها استفاده می‌کند. در نهایت تمامی افرازها در مجموعه‌ای به نام مجموعهٔ افرازها قرار می‌گیرند.

3-Sink

در مرحله دوم، یک الگوریتم بدیع جهت تعیین گره‌های تقویتی لازم برای اتصال مجدد افرازها پیشنهاد می‌شود. گره‌های تقویتی توانایی حس کردن محیط را ندارند و از این رو داده‌ای تولید نمی‌کنند و فقط می‌توانند داده‌های سایر گره‌ها را دریافت و یا ارسال کنند. در این مقاله سعی می‌شود که با استفاده از یک روش اکتشافی از تعداد گره‌های تقویتی کمی برای برقراری ارتباط افرازها استفاده شود. خروجی مرحله اول که همان مجموعه افرازها است به‌عنوان ورودی مرحله دوم در نظر گرفته می‌شود. روش سطح بالا بدین صورت است که ابتدا یک افراز دلخواه از مجموعه افرازها انتخاب شده و گره‌های متعلق به آن، یک مجموعه متصل را تشکیل می‌دهند. سپس در هر دور، یکی از افرازهای باقی مانده در مجموعه افرازها که نزدیک‌ترین فاصله را با یکی از گره‌های موجود در مجموعه متصل دارد انتخاب شده و به آن وصل می‌شود. همان‌طور که می‌دانیم برای اتصال باید تعدادی گره تقویتی جدید در شبکه جایگذاری شود. در اینجا، برای کاهش تعداد این گره‌ها از روشی استفاده می‌شود که در صورت امکان به جای جایگذاری یک گره جدید، ارتباط از طریق گره‌های تقویتی که قبلا جایگذاری شده‌اند، برقرار شود. در نهایت خروجی این مرحله یک شبکه متصل است که از گره‌های تمامی افرازها به همراه گره‌های تقویتی اضافه شده، تشکیل یافته است.

استفاده از تعداد گره تقویتی کمتر برای اتصال مجدد افرازهای مجزا باعث می‌شود که هزینه کلی پیاده‌سازی شبکه کاهش یابد ولی از سوی دیگر این برتری به قیمت کاهش سطح اتصال در شبکه تمام می‌شود. نکته ای که باید در اینجا در نظر گرفته شود، اولویت‌بندی بین این دو موضوع است: کاهش هزینه پیاده‌سازی از طریق گره‌های کمتر و افزایش سطح اتصال از طریق گره‌های بیشتر. در توضیح این مطلب باید گفت که افزایش سطح اتصال این مزیت را دارد که در هنگام شلوغی و ازدحام می‌توان بسته‌ها را از مسیرهای مختلفی عبور داد که نتیجه آن کاهش تاخیر رسیدن بسته‌ها به مقصدهایشان است. ولی برای کاهش تاخیر در هنگام شلوغی، روش‌های جایگزین دیگری مانند استفاده از اولویت بندی بین بسته‌ها و یا حذف داده‌های تکراری وجود دارد که بدون هزینه هستند و به راحتی می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. بنابراین، کاهش هزینه پیاده‌سازی مهم‌تر از افزایش سطح اتصال درشبکه است و به همین دلیل، هدف این مقاله کاهش هزینه با کم کردن تعداد گره‌های تقویتی است.

برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی از شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب استفاده شده است. محیط شبیه‌سازی به‌صورت دوبعدی در نظر گرفته شده که افرازها به‌صورت تصادفی در آن قرار می‌گیرند. در این مقاله، دو نوع شبیه‌سازی بررسی شده است: در نوع اول، تعداد افرازها متغیر و شعاع انتشار گره‌ها ثابت است در حالی که در نوع دوم، تعداد افرازها ثابت وشعاع انتشار متغیر است. برای هر دو نوع شبیه‌سازی، نتایج عددی که همان تعداد گره‌های تقویتی است که برای اتصال افرازها مورد نیاز است از میانگین ۵۰ اجرا به‌دست آمده است. روش پیشنهادی با دو روش RPSNC و QTA که به‌ترتیب در [٦] و [٧] ارائه شده‌اند، مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که روش پیشنهادی به صورت میانگین نسبت به روش QTA از ۲/٤ و نسبت به روش RPSNC از ۱/۱ گره تقویتی کمتر استفاده می‌کند که نتیجه آن کاهش هزینه پیاده‌سازی شبکه با استفاده از روش پیشنهادی است.

کارهای مرتبط انجام شده در زمینه اتصال مجدد افرازهای مجزا در بخش ۲ مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در بخش ۳ روش پیشنهادی با جزئیات شرح داده خواهد شد. در بخش ٤ نحوه ارزیابی کارایی روش پیشنهادی بیان شده و نتایج شبیه‌سازی آن با جدیدترین روش‌های مشابه مقایسه می‌گردد. نتیجه‌گیری در انتها و در بخش ۵ شرح داده خواهد شد.

جدول ۱: روش‌های معرفی شده برای بالا بردن تحمل پذیری شبکه‌های حسگر بی‌سیم در برابر خرابی گره‌ها

نوع روش	نوع عملکرد	الگوریتم‌ها
روش‌های پیشگیرانه	ایجاد مسیرهای مجزا	MACC[8], PFRP and FFRP[9], BBO-based[10], Srivastava et al. [11], GRASP-ARP[12],
	افزایش سطح پوشش	MACC[8], BBO-based[10], Elhoseny et al. [13], DIRT-PCA [14]
روش‌های واکنشی	اتصال مجدد افرازهای مجزا	ORP [15], RPSNC [6], Senturk et al. [16], CIST [17], QTA[7]
	استفاده از گره‌های سیّار	Chanak et al. [18], Parwekar at al. [19]

۲- مرور کارهای مرتبط

در سال‌های اخیرتحقیقات فراوانی در زمینه بالا بردن تحمل پذیری شبکه‌های حسگر بی‌سیم در برابر خرابی گره‌ها انجام شده است. در جدول (۱)، یک دسته‌بندی از این روش‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که قبلا گفته شد، روش‌های تحمل پذیری خطا به دو دسته کلی پیش‌گیرانه و واکنشی تقسیم می‌شوند. در جدول (۱)، برای هر دو دسته تعدادی از الگوریتم‌های موجود معرفی و دسته‌بندی شده است. دو راه‌حل مهم و برجسته در روش‌های پیشگیرانه عبارتند از ایجاد مسیرهای مجزا و افزایش سطح پوشش. در اولی هر گره می‌تواند از m مسیر مجزا با چاهک و یا سایر گره‌ها ارتباط داشته باشد و در دومی هر نقطه هدف در شبکه توسط k گره پوشش داده شده و نظارت می‌شود. برای دسته روش‌های واکنشی نیز دو راه‌حل معروف بیان شده است: اتصال افرازهای مجزا به یکدیگر و استفاده از گره‌های سیّار. در اولی ابتدا باید افرازهای مجزا تشخیص داده شود و سپس با هزینه کم این افرازها مجددا به یکدیگر متصل شوند. در دومی یک یا چند گره سیّار (بیشتر گره چاهک) با جستجو در شبکه گره‌های خاموش، معیوب و یا در آستانه خرابی را شناسایی کرده و کارهای لازم را برای جلوگیری از وقوع مشکل و از کار افتادن کل شبکه انجام می‌دهند. در جدول (۱) برای هر نوع از راه‌حل‌ها تعدادی از الگوریتم‌ها و مقالات ارائه شده در سال‌های اخیر معرفی شده است.

همان‌طور که قبلا ذکر شد در این مقاله یک روش واکنشی برای اتصال مجدد افرازها پیشنهاد می‌شود. از این رو در اینجا، روش‌های قرارگرفته در این دسته مورد بررسی قرار می‌گیرند. در [۱۵] فرض شده که یک شبکه حسگر به دلیل مشکلات محیطی به چند افراز مجزا تبدیل می‌شود. این مقاله دو نوع هم‌بندی را در نظر می‌گیرد: هم‌بندی تورین که گره‌ها فقط می‌توانند بر روی رئوس تورین قرار بگیرند و هم‌بندی غیرتورین که گره‌ها می‌توانند در هر کجای محیط دو بعدی قرار داشته باشند. اضافه کردن گره‌های تقویتی در دو مرحله انجام می‌گیرد.

FPRN: در این مرحله از حداقل تعداد گره تقویتی برای برقراری ارتباط مابین افرازهای مجزا از یکدیگر استفاده می‌شود.

SPRN: در این مرحله برای بالا بردن تحمل پذیری در برابر خرابی تعدادی گره تقویتی دیگر به کار می‌رود تا ارتباط بین افرازها در صورت خرابی یک گره تقویتی از بین نرود. نقطه قوت این الگوریتم این است که اتصال افرازهای مجزا از طریق چندین مسیر مختلف انجام می‌شود که این موضوع سبب بالا رفتن سطح اتصال شبکه می‌شود. اما نقطه ضعف اساسی این روش این است که هر افراز به صورت یک گره مجازی در نظر گرفته می‌شود که مختصات x و y آن به ترتیب از میانگین x و y همه گره‌های حسگر موجود در آن افراز به‌دست می‌آید. هر چند چنین فرضی باعث ساده شدن حل مسئلهٔ اتصال افرازها می‌شود اما در واقع چون این گره مجازی وجود خارجی ندارد، ممکن است سبب شود که گره‌های تقویتی بیشتری برای اتصال افرازها استفاده شوند. دلیل این موضوع این است که دو افراز خاص ممکن است گره‌های واقعی خیلی نزدیکی به یکدیگر داشته باشند اما فاصله گره‌های

مجازی نشـــان‌دهنده آن‌ها زیـــاد باشـــد. در این صورت الگوریتـــم تصمیم می‌گیرد که ارتباط این دو افراز از طریق ســـایر افرازها برقرار شـــود که فاصله دورتری از این دو افراز دارند. از این رو، گره‌های تقویتی بیشتری باید برای برقراری اتصال آن دو افراز جایگذاری شوند.

در [٦] الگوریتمـــی دو مرحلـــه‌ای به نـــام RPSNC برای حل مسئله افرازهای مجزا پیشـــنهاد شده است. در مرحله اول با اســـتفاده از یک روش کدگذاری شـــبکه فضایی [٢٠] تعدادی مکان بالقوه برای جایگذاری گره‌های تقویتی پیشنهاد می‌شود به نحوی که افرازها به هم متصل شوند. سپس در مرحله دوم با استفاده از برنامه‌نویسی خطی تعداد کمتری از مکان‌های بالقوه را بدون این‌که مشکلی در اتصال افرازهای مجزا به‌وجود بیاید انتخاب کرده و گره‌های تقویتی را در آن مکان‌ها قرار می‌دهد. انتخاب مکان‌های بالقوه بدین روش و در دو مرحله باعث تحمیل سربار پردازشی زیادی به شبکه حسگر بی‌سیم می‌شـــود. از طرفی ممکن است که الگوریتم نتواند در مرحله دوم تمامی مکان‌های بالقوه اضافی که در مرحله اول مشخص شده‌اند را حذف نماید.

روش‌های ارائه شـــده در مقـــالات [١٦,١٧] یک درخت اشـــتاینر (SMT) بین افرازهای مجزا ایجـــاد کرده و مکان گره‌های تقویتی برای ایجاد درخت اشـــتاینر را مشـــخص می‌کنند. در [١٦] علاوه بر ایجاد درخت اشتاینر، ایده استفاده از تعداد محدودی گره تقویتی ســـیّار به نام MDC نیز داده شـــده که در شبکه حرکت کرده و داده‌های افرازها را جمع آوری می‌کنند. الگوریتمی به نام QTA در [٧] معرفی شـــده اســـت که بر اساس روش اشتاینر چهار ضلعی است. ابتدا افرازهای مجزا شناســـایی می‌شوند و سپس برای ارتباط آن‌ها تعدادی چهار ضلعی انتخاب شده و گره‌های اشتاینر این چهار ضلعی‌ها پیدا می‌شـــوند. در نهایت افرازهایی که به وسیله گره‌های اشتاینر متصل نشده‌اند، با ایجاد درخت پوشـــای کمینه (MST) متصل می‌شـــوند. در هر سه مقاله [٧, ١٦,١٧]، ایده اســـتفاده از درخت اشـــتاینر برای اتصال افرازها خلاقانه اســـت. همان‌طور که گفته شـــد، در مقالات [٧, ١٦]، نوآوری‌هایی نیز مانند استفاده از گره‌های اشتاینر چهار ضلعی و گره‌های تقویتی سیّار مطرح شده است. نکته قابل تامل این اســـت که معمولا زمانی از درخت اشـــتاینر اســـتفاده می‌شـــود که بخواهیم تعدادی گره را به یکدیگر متصـــل کنیم و نه تعـــدادی افراز که هرکدام خود شـــامل چندین گره هســـتند. بنابرایـــن برای اتصـــال افرازها باید تغییرات مناسبی در روش اشتاینر داده شود که هیچ کدام از مقالات [٧, ١٦,١٧] این موضوع را در نظر نگرفته‌اند. عدم توجـــه به این موضوع باعث افزایش تعداد گره‌های تقویتی انتخاب شده توسط الگوریتم می‌شود.

در ایـــن مقاله هدف این اســـت که روشـــی برای اتصال افرازهای مجزا در شـــبکه‌های حسگر بی‌سیم ارائه شود که مشکلات بیان شده در کارهای قبلی را نداشته باشد. با توجه به مطالب بیان شده، در روش پیشنهادی باید تمامی گره‌های حســـگر موجود در هر افراز برای برقراری اتصال با سایر افرازها مورد بررسی قرار گیرند. همچنین روش پیشنهادی بایـــد تلاش کند که برای برقراری اتصال یک افراز جدید، از گره‌های تقویتی جایگذاری شده در مراحل قبلی نیز استفاده کند. این ایده‌ها سبب کاهش تعداد گره‌های تقویتی و در نتیجه کاهش هزینه اتصال افرازها به یکدیگر می‌شوند.

٣- روش پیشنهادی

در این پژوهش، یک شـــبکه حســـگر بی‌سیم متشکل از تعدادی گره با شـــعاع انتشار یکســـان در نظر گرفته شده اســـت. هر گره فقط می‌تواند برای گره‌هایی که در شـــعاع انتشـــارش قرار دارند داده ارســـال کند و فقط از گره‌هایی داده دریافت می‌کند که در شـــعاع انتشار آن‌ها قرار دارد. در ابتدا گره‌های حســـگر به‌صورت کاملا متصل در شبکه پخش می‌شـــوند. منظور از متصل این است که هر گره به صورت مســـتقیم و یا چندگامه می‌تواند داده‌ها را برای هر گره دیگری ارسال کند. با از کار افتادن گره‌ها امکان این‌که افرازهای مجزا در شـــبکه ایجاد شود، وجود دارد. در این مقاله، دو مرحله برای اتصال مجدد این افرازها معرفی شده

جدول ۲: نمادها و توابع استفاده شده

نماد یا تابع	توضیح
G(V,E)	گراف G با مجموعه گره‌های V و مجموعه یال‌های E
Adj(G)	ماتریس مجاورت گراف G
P	مجموعه افرازها
P_k	افراز شماره k که شامل تعدادی گره است
ConnectedWSN	مجموعه‌ای از گره‌های حسگر و تقویتی متصل به‌یکدیگر
RelayNodes	مجموعه‌ای از گره‌های تقویتی مورد نیاز برای اتصال دو افراز
nearestPartition (ConnectedWSN, P)	تابعی که نزدیک‌ترین افراز (موجود در P) به ConnectedWSN را برمی‌گرداند
Connect (ConnectedWSN, P_{near})	تابعی که گره‌های تقویتی مورد نیاز برای اتصال افراز Pnear به ConnectedWSN (قرار گرفته بر روی یک خط مستقیم بین آن دو) را برمی‌گرداند.

اســت: مرحله شناسایی افرازها و مرحله اتصال افرازها و بهینه‌ســازی روش از نظر تعداد گره تقویتی استفاده شده. برای بیان روش از تئوری گراف استفاده شده است که در ابتدا نحوه نمایش دادن شــبکه به‌صــورت یک گراف بیان خواهد شد.

۳-۱ قالب کاری

یک شبکه حسگر بی‌ســیم را می‌توان به‌صورت گراف G(V,E) نمایــش داد، جایی که V معــادل مجموعه گره‌های حسگر و E معادل مجموعه ارتباطات مستقیم بین گره‌های حسگر اســت. اگر دو گره V_i و V_j در شعاع انتشار یکدیگر قرار داشته باشند با یکدیگر ارتباط مستقیم داشته و یک یال بین آن‌ها وجود دارد. در جدول ۲ نمادها و توابع اســتفاده شده در الگوریتم‌ها نشان داده شده است.

۳-۲ شناسایی افرازها

در ایــن مرحلــه باید افرازهــای منفصــل موجود در شبکه شناســایی و شماره‌گذاری شــوند. برای این‌کار به ماتریس همجــواری گراف (Adj(G)) نیاز اســت. ابتدا یک رأس V_{rand} به‌صورت تصادفی انتخاب شــده ودر افراز P1 قرار می‌گیرد. ســپس با استفاده از پیمایش ژرفایی (DFS) تمامی رئوس قابل دسترس با شروع از V_{rand} به P1 افزوده می‌شوند. در ادامه از میان رئوس باقی‌مانده یک رأس دیگر به‌صورت تصادفی انتخاب شده و این روال برای P2 انجام می‌شود. این کار تا زمانی که هیچ رأسی باقی نمانده باشد ادامه می‌یابد. در الگوریتم ســطح بالای ۱ روال انجام کار به‌ترتیب بیان شده است. خروجی این الگوریتم مجموعه P است که هرعنصر P_k در آن خود یک مجموعه نشان‌دهنده افراز شماره k است و عناصرش گره‌های آن افراز هستند.

Algorithm 1

Input: G(V,E), Adj(G).
Output: P.
1. k=0; Vtemp = V;
2. **while** (Vtemp != Ø)
3. k = k+1;
4. P_k = Ø;
5. select a random node (V_{rand}) in Vtemp and remove it from Vtemp;
6. add V_{rand} to Pk;
7. use Adj(G) and run DFS with starting from V_{rand} and add all explored nodes to P_k and remove them from Vtemp;
8. **end while**;
9. **return P;**

۳-۳ اتصال افرازهای مجزا

در بخــش پیشــین الگوریتمی برای شناســایی تمامی افرازهای مجزا ارائه شــد. حال باید این افرازها به یکدیگر متصل گردند. روش‌های ارائه شــده قبلــی معمولا به این صــورت عمل می‌کنند که هر افــراز را با یک گره واقعی و یا مجازی (با یک مختصات فرضی به‌دســت آمده از روی مکان ســایر گره‌ها) نمایش می‌دهند و از این طریق فاصله

اقلیدوسی میان افرازها را به‌دست می‌آورند. سپس با استفاده از روش‌هایی مانند ایجاد درخت پوشای کمینه (MST) یا درخت اشتاینر (SMT) گره‌های نمایش‌دهنده افرازها را به یکدیگر متصل می‌کنند. در انتها درخت به‌دست آمده با اضافه کردن گره‌های تقویتی جدید به شبکه پیاده‌سازی می‌شود. در اینجا سعی شده است با ارائه یک روش جدید از تعداد گره‌های تقویتی کمتری نسبت به روش‌های مشابه استفاده شود.

در الگوریتم ۲ روش استفاده شده برای اتصال افرازها نمایش داده شده است. ورودی الگوریتم ۲ مجموعه P است که هر عنصر آن یک افراز است که خود شامل تعدادی گره متصل است. خروجی الگوریتم ۲ مجموعه ConnectedWSN است. این مجموعه در ابتدا هیچ عنصری ندارد اما در انتهای الگوریتم، مجموع تمام گره‌های موجود در تمام افرازها به علاوه تمام گره‌های تقویتی است که برای برقراری ارتباط مجدد بین افرازها به شبکه اضافه می‌شوند.

Algorithm 2

Input: P.
Output: ConnectedWSN.
1. ConnectedWSN = Ø;
2. add all nodes in P1 to ConnectedWSN;
3. remove P1 from P;
4. **while** (P != Ø)
5. relayNodes = Ø;
6. P_{near} = nearestPartition(ConnectedWSN, P);
7. relayNodes = connect(ConnectedWSN, P_{near});
8. add all nodes in both relayNodes and P_{near} to ConnectedWSN;
9. remove P_{near} from P;
10. **end while**;
11. **return** ConnectedWSN;

روش کار الگوریتم ۲ به این صورت است که ابتدا گره‌های موجود در P1 به ConnectedWSN اضافه می‌شوند و خود P1 نیز از P حذف می‌شود. در اینجا هیچ تفاوتی وجود ندارد که از کدام افراز شروع کنیم و از این رو، افراز $(P1)_1$ انتخاب شده است. سپس تا زمانی که افراز مجزایی باقی مانده باشد الگوریتم تکرار می‌شود. در هر تکرار، نزدیک‌ترین افراز مجزای باقی‌مانده در P به گره‌های ConnectedWSN شناسایی می‌شود (P_{near}) و گره‌های تقویتی مورد نیاز برای برقراری یال بین این دو مجموعه مشخص می‌شوند. سپس این گره‌های تقویتی و همچنین گره‌های P_{near} به ConnectedWSN اضافه می‌گردند. خود P_{near} نیز از P حذف می‌شود. هنگامی‌که که تمام افرازها به یکدیگر متصل شوند الگوریتم خاتمه پیدا کرده و ConnectedWSN برگشت داده می‌شود. یکی از مزیت‌های این الگوریتم این است که در هر مرحله برای پیدا کردن نزدیک‌ترین افراز از گره‌های تقویتی اضافه شده در مراحل قبل هم استفاده می‌شود و نزدیک‌ترین افراز را به یکی از گره‌های تقویتی اضافه شده و یا یکی از گره‌های حسگر متصل شده، شناسایی می‌کند.

۳-٤ تحلیل پیچیدگی زمانی الگوریتم‌ها

ابتدا پیچیدگی زمانی الگوریتم ۱ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این الگوریتم از روش پیمایش DFS برای پیداکردن افرازهای مجزا در شبکه حسگر بی‌سیم استفاده شده است. در اینجا شبکه حسگر بی‌سیم به‌صورت یک گراف نمایش داده شده است که در این گراف هر رأس معادل یک گره حسگر و هر یال بین دو رأس نشان‌دهنده این است که حسگرهای معادل آن دو رأس در شعاع انتشار یکدیگر قرار دارند. بنابراین پارامترهای ورودی الگوریتم گراف G(V,E) و ماتریس همجواری Adj(G) در نظر گرفته شده است. با توجه به این نوع طراحی، مسئله پیدا کردن افرازهای مجزا در یک شبکه معادل مسئله پیداکردن مؤلفه‌های همبندی در یک گراف است. الگوریتم ۱ این کار را با استفاده از پیمایش DFS انجام می‌دهد. مرتبهٔ زمانی الگوریتم DFS برای گراف G(V,E) برابر O(|V| + |E|) است. در اینجا |V| و |E| به ترتیب نشان‌دهنده تعداد رئوس و تعداد یال‌های گراف G هستند. دلیل این مرتبه زمانی این است که روش DFS در بدترین حالت تمامی رئوس را پیمایش کرده و همچنین نیاز به بررسی تمامی یال‌ها دارد.

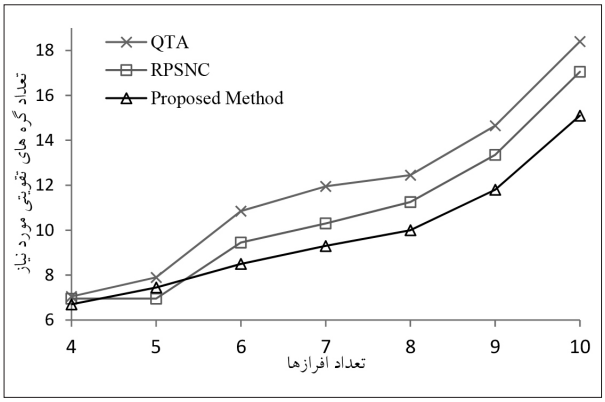
در ادامه پیچیدگی زمانی الگوریتم ۲ تحلیل می‌شود که پارامتر ورودی آن مجموعه افرازها (P) است. در این

الگوریتم حلقه while در خط ٤ به تعداد افرازها یعنی |P| بار اجرا می‌شود. دستور اصلی در این حلقه، فراخوانی تابع nearestPartition (ConnectedWSN, P) است که در خط ٦ نوشته شده است. این تابع نزدیک‌ترین افراز باقی‌مانده در P به ConnectedWSN را به عنوان خروجی برمی‌گرداند. تابع باید برای این کار، فاصله بین تمامی گره‌های موجود در ConnectedWSN را با تمامی گره‌های موجود در افرازهای موجود در P مقایسه کرده و نزدیک‌ترین افراز به ConnectedWSN را برگرداند. در بدترین حالت زمان اجرای این تابع برابر |V|×|V| است زیرا باید فاصله بین تمامی گره‌ها با یکدیگر را مقایسه کند. همان‌طور که گفته شد این تابع در حلقه while قرار دارد که تعداد تکرار آن به تعداد افرازها است. بنابراین مرتبه زمانی الگوریتم ۲ برابر O(|P|×|V|×|V|) است.

۴- ارزیابی کارایی

جهت بررسی کارایی الگوریتم ارائه شده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی با دو روش RPSNC و QTA که دربخش ۲ معرفی شده‌اند، مقایسه شده است. پارامترهای شبیه‌سازی مشابه [٦] در نظر گرفته شده است. ابعاد محیط ۱۵۰۰ متر در ۱۵۰۰ متر می‌باشد که افرازها به‌صورت تصادفی در آن قرار می‌گیرند. از آنجا که در اینجا تعداد گره‌های درون هر افراز اهمیتی ندارد، فرض می‌شود که هر افراز تنها یک گره دارد. معیار مقایسه روش‌ها، تعداد گره‌های تقویتی اضافه شده برای برقراری اتصال مابین افرازها است. در اینجا، دو نوع شبیه‌سازی بررسی شده است:

- افرازهای متغیر: در این نوع، تعداد افرازها از ٤ تا ۱۰ تغییر می‌کند درحالی که شعاع انتشار گره‌ها همواره ۱۰۰ متر است.
- شعاع‌های انتشار متغیر: در این نوع، تعداد افرازها همواره ۱۰ عدد است ولی برای شعاع انتشار گره‌ها چهار مقدار ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ در نظر گرفته شده است.

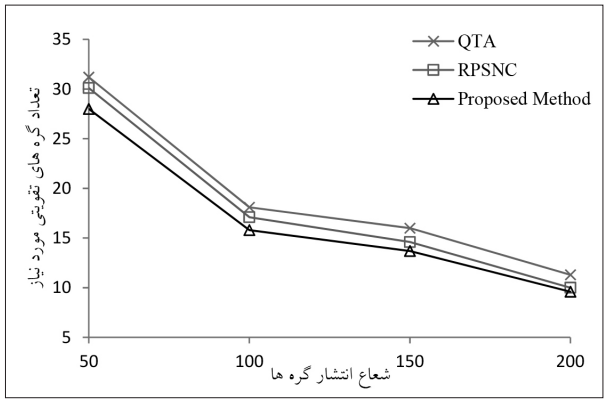


شکل ۲: نمودار مقایسه تعداد گره‌های تقویتی لازم برای تعداد افرازهای مختلف

نتایج شبیه‌سازی که میانگین ۵۰ اجرا می‌باشد برای هر دو نوع شبیه‌سازی در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. در شکل ۲ شعاع انتشار ۱۰۰ متر و تعداد افرازها متغیر در نظر گرفته شده، درحالی که در شکل ۳ تعداد افرازها ۱۰ و شعاع انتشار متغیر در نظر گرفته شده است. در هر دو شکل، میانگین تعداد گره‌های تقویتی لازم برای اتصال افرازها نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است، روش پیشنهاد شده در این مقاله همواره به تعداد گره‌های تقویتی کمتری نسبت به دو روش RPSNC و QTA نیاز دارد. این برتری به این دلیل است که روش پیشنهاد شده در هر مرحله برای اتصال یک افراز مجزای جدید از گره‌های تقویتی که در مراحل قبل برای اتصال افرازهای قبلی جایگذاری شده‌اند نیز استفاده می‌کند و بنابراین، به گره‌های کمتری برای اتصال افراز جدید نیاز دارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی برای اتصال مجدد افرازهای مجزا در شبکه‌های حسگر بی‌سیم پیشنهاد شده است. این روش از جایگذاری گره‌های تقویتی برای برقراری اتصال استفاده می‌کند. در روش پیشنهادی، ابتدا شبکه حسگر بی‌سیم به‌صورت یک گراف نمایش داده شده و سپس با استفاده از الگوریتم ۱ که از پیمایش ژرفایی ماتریس همجواری استفاده می‌کند، افرازهای مجزا شناسایی می‌شوند. الگوریتم ۲ به منظور اتصال افرازهای شناسایی شده



شکل ۳: نمودار مقایسه تعداد گره‌های تقویتی لازم برای شعاع‌های انتشار مختلف

توسط الگوریتم ۱، پیشنهاد شـــده است. در این الگوریتم، ابتدا یک افراز انتخاب و ســـپس افرازهای دیگر یک به یک و بـــا افزودن تعداد گره تقویتی کمی به افراز اولیه که مدام در حال بزرگ شـــدن است، متصل می‌شوند. مقایسه نتایج شبیه‌ســـازی روش ارائه شده نســـبت به دو روش مشابه RPSNC و QTA نشان می‌دهد که روش پیشنهادی از تعداد گره تقویتی کمتری برای اتصال افرازها استفاده می‌کند.

مراجع

1. Mahmood, Muhammad A., Aeah, Winston K. G., Welch, I., “Reliability in Wireless Sensor Networks: A Survey and Challenges Ahead”, Computer Networks, Vol. 79, pp. 166-187, 2015.
2. Wu, F., Aeah, Xu L., Kumari, S., Li, X., Shen, J., Choo, Kim-Kwang R., Wazid, M., Das, Ashok K., “An Efficient Authentication and Key Agreement Scheme for Multi-Gateway Wireless Sensor Networks in IoT Deployment”, Journal of Network and Computer Applications, Vol. 89, pp. 72-85, 2017.
3. Kocakulak, M., Butun, I., “An Overview of Wireless Sensor Networks Towards Internet of Things”, in Proceedings of 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC), Las Vegas, NV, USA, 2017.
4. Lee, S., Younis, M., Lee, M., “Connectivity Restoration in a Partitioned Wireless Sensor Network with Assured Fault Tolerance”, AD Hoc Networks, Vol. 24, pp. 1-19, 2015.
5. Younis, M., Senturk, Izzet F., Akkaya, K., Lee, S., Senel, F., “Topology Management Techniques for Tolerating Node Failures in Wireless Sensor Networks: A Survey”, Computer Networks, Vol. 58, pp. 254-283, 2014.
6. Uwitonze, A., Huang, J., Ye, Y., Cheng, W., “Connectivity Restoration in Wireless Sensor Networks via Space Network Coding”, Sensors, Vol. 17, pp. 1-21, 2017.
7. Chen, H., Shi, K., “Quadrilateral Steiner Tree Based Connectivity Restoration for Wireless Sensor Networks”, Chinese Journal of Computers, Vol. 37, pp. 457–469, 2014.
8. Nitesh, K., Jana, Prasanta K., “Relay Node Placement with Assured Coverage and Connectivity: A Jarvis March Approach”, Wireless Personal Communication, Vol. 98, pp. 1361-1381, 2018.
9. Han, X., Cao, X., Lioyd, Errol L., Shen, C., “Fault-Tolerant Relay Node Placement in Heterogeneous Wireless Sensor Networks”, IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 9, pp. 643-656, 2010.
10. Gupta, Govind P., Jha, S., “Biogeography-Based Optimization Scheme for Solving the Coverage and Connected Node Placement Problem for Wireless Sensor Networks”, Wireless Networks, Vol. 25, pp. 1-11, 2018.
11. Srivastava, Akhilesh K., Gupta, Suneet K., “EERP: Energy-Efficient Relay Node Placement for k-Connected Wireless Sensor Networks Using Genetic Algorithm”, Ambient Communications and Computer System, pp. 3-10, 2019.
12. Sitanayah, L., Brown, Kenneth N., Sreenan, Cormac J., “A Fault-Tolerant Relay Placement Algorithm for Ensuring KVertex-Disjoint Shortest Paths in Wireless Sensor Networks”, Ad Hoc Networks , Vol. 23, pp. 145-162, 2014.
13. Elhoseny, M., Tharwat, A., Yuan, X., Hassanien, Aboul, E., “Optimizing k-Coverage of Mobile WSNs”, Expert Systems with Applications, Vol. 92, pp. 142-153, 2018.
14. Yu, J., Wan, S., Cheng, X., Yu, D., “Coverage Contribution Area based k-Coverage for Wireless Sensor Networks”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 66, pp. 8510-8523, 2017.
15. Al-Turjman, Fadi, M., Hassanein, Hossam S., Alsalih, Waleed M., Ibnkahla, M., “Optimized Relay Placement for Wireless Sensor Networks Federation in Environmental Applications”, Wireless Communications and Mobile Computing, Vol. 11, pp. 1677-1688, 2011.
16. Senturk, Izzet F., Akkaya, K., Senel, F., Younis, M., “Connectivity Restoration in Disjoint Wireless Sensor Networks Using Limited Number of Mobile Relays”, in Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Communication (ICC), Budapest, Hungary, 2013.
17. Senel, F., Younis, M., “Optimized Connectivity Restoration in a Partitioned Wireless Sensor Network”, in Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), Kathmandu, Nepal, 2011.
18. Chanak, P., Banerjee, I., Sherratt, R. S., “Mobile Sink Based Fault Diagnosis Scheme for Wireless Sensor Networks”, The Journal of System and Software, Vol. 119, pp. 45-57, 2016.
19. Parwekar, P., Rodda, S., Kaur, P., “Mobile Sink as Checkpoints for Fault Detection Towards Fault Tolerance in Wireless Sensor Networks” Journal of Global Information Management, Vol. 26, pp. 78-89, 2018.
20. Li, Z., Wu, C., “Space Information Flow: Multiple Unicast” in Proceeding of IEEE International Symposium on Information Theory, Cambridge, MA, USA, 2012.