یازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran
senaconf.ir

استفاده از الگوریتم خودپایداری جهت کنترل اتصال و ذخیره انرژی در شبکه های حسگر بی سیم به روش کنترل توپولوژی شبکه

ضرغام حیدری

برق قدرت، بوشهر nariman_azma@yahoo.com

چکیده

علوم کامپیوتر در دنیای صنعتی امروز از نقطه نظرهای مختلف نقشی مهم و حیاتی دارد. یکی از مباحث مهم در علوم کامپیوتر سیستم های توزیع شده است.این سیستم ها در محاسبات با کارایی بالا نقش مهمی ایفا میکنند. یکی از موارد مهمی که در سیستم های توزیع شده نقش به سزایی داشته و بسیار مفید است، بحث خودپایداری است. الگوریتم خودپایداری در علوم مهندسی و رایانه نقش مهمی ایفا میکند. این الگوریتم جهدر مبحث تحمل پذیری خطا به عنوان یک موضوع مهم در شبکه های کامپیوتری، نسبت به به سایر راه حل ها و روش های کلاسیک، تحمل پذیری خطا ی بهتری دارد. علاوه براین مزیت دیگر الگوریتم مذکور این است که، هم از لحاظ زمان و هم از لحاظ فضا ، هم زمان کمتری دارد و هم فضای کمتری نیاز دارد. این ویژگی ها باعث شده است که الگوریتم خودپایداری جهت استفاده در سیستم های توزیع شده که به فرایندهایی با محاسبات کم و حافظه کم تجهیز شده اند بسیار جذاب باشد. شبکه¬های حسگر بی سیم "WSN" با وجود تمام ایراداتی که دارند در زمینه¬های مختلفی از جمله امنیت، صنایع دفاعی، تحقیقات، صنایع کشاورزی، نظارت¬های محیطی و سایر کاربردهای صنعتی بسیار مورد استقبال قرار گرفته¬اند. مصرف انرژی و کنترل اتصال در این شبکه ها از اهمیت و حساسیت بالایی برخوردار است. در این مقاله به بررسی کنترل اتصال و ذخیره انرژی در این شبکه ها پرداخته شده است. یک پروتکل کنترل توپولوژی خودپایداری کارآمد برای WSN معرفی شده است. در روش مذکورضمن برقراری اتصال با حداکثر ذخیره انرژی، قدرت مخابره هر گره کاهش یافته است. کارایی روش ارایه شده با شبیه‌سازی های انجام شده اثبات شده است.

واژه‌های کلیدی

خودپایداری ، محاسبات توزیع شده ،شبکه های حسگر بی سیم ،کنترل اتصال ، ذخیره انرژی.

۱. متن مقاله

در سال های اخیر جهان صنعتی پیشرفته شاهد پیشرفت های چشمگیری در حوزه های برق و رایانه بوده است. در این حوزه ها قطعات و دستگاه های مختلفی با نقش ها و کاربردهای متفاوت وجود دارد. حسگرها به عنوان یک قطعه الکترونیکی ارزشمند ضمن داشتن مزایای متعدد دارای کاربردهای گسترده ای بوده و نقش مهمی در صنایع مختلف دارند. حسگرهای بی‌سیم، دستگاه‌های الکترونیکی بسیار کوچکی هستند که جهت جمع‌آوری داده‌ها از محیط اطراف خود بکار گرفته می‌شوند و در واقع مبدل محسوب می شوند [۱]. آنها همچنین مجهز به یک واحد ارتباطی (معمولا یک فرستنده/گیرنده رادیویی) می‌باشند که به آنها اجازه می‌دهد تا یک شبکه ادهاک را ایجاد کرده و از طریق یک دروازه (GW) یا سینک به ایستگاه مرکزی متصل شوند. متاسفانه این دستگاه‌ها که منابع محدود و قیمت پایینی دارند، بسیار مستعد خرابی هستند [۲-۷].شبکه های حسگر بی سیم علی رغم برخی ایرادات در مواردی همچون نظارت بر محیط، حمل ونقل، جلوگیری از برور حادثه ، امنیت داخلی، تحقیقات صنعتی، کشاورزی صنایع دفاعی و....مورد استفاده قراررگرفته اند. با توجه به مزایایی که دارند در سال های اخیر توجه محققین و پژوهشگران زیادی زا به خود جلب کرده اند و مقاله های زیادی در این رابطه به رشته تحریر درامده است. این شبکه ها از تعداد زیادی گره های حسگر تشکیل شده اند که به جمع آوری داده ها و ارسال آنها می پردازند. ساختار تشکیل دهنده گره ها عبارت از واحدهای پردازش، ارسال و دریافت، حافظه و منبع تغذیه می باشد. منبع تغذیه یک باتری با میزان محدودی انرژی میباشد. بنابراین، در این شبکه ها در مبحث مصرف انرژی ،باید سیاست ها و تدابیر صرفه جویانه انرژی اتخاذ گردد. برای افزایش طول عمر شبکه نیاز به تدابیری داریم که با حفظ کارایی، مصرف انرژی را بهینه سازند. خوشه بندی یکی از تکنیک های بارز در این راستا میباشد. در این تکنیک، روش انتخاب سرخوشه و سپس روش مسیریابی شبکه بر اساس خوشه های تشکیل شده، در رسیدن به هدف نقش بسیار مهمی ایفا میکنند [۸-۱۲]

راندمان ذخیره انرژی فاکتور اساسی و مهم در طول عمر شبکه‌های حسگر بیسیم بوده و یک مشخصه‌ی مهم در طراحی این شبکه‌ها است. در WSN، انرژی به دلیل پردازش، مخابره و دریافت پیام مصرف می‌شود. علاوه بر این، به دلیل مواردی چون شنود بیکار، استراق سمع، و تصادم، بخش زیادی از انرژی تلف می‌شود. شنود بیکار حالتی است که در آن یک گره منتظر پیام می‌ماند. چون گره نمی‌داند که پیام چه موقع از راه خواهد رسید، پس باید هر زمان که در حال مخابره پیام نیست، رادیوی خود را در حالت دریافت قرار دهد. این یعنی، یک گره باید به تمام پیام‌های گره‌های همسایه گوش دهد. چون گره‌ها در اکثر مواقع در این حالت قرار دارند، پس بخش زیادی از انرژی تلف می‌شود. در نتیجه، استراق سمع گره برای بسته‌های بسیار زیادی صورت می‌گیرد. این یعنی اتلاف بخش زیادی از انرژی، به خصوص وقتی که تراکم گره بالا و بار ترافیک سنگین است. تصادم‌ها بخش دیگری از ماهیت مشترک رسانه‌های بی سیم هستند که اتلاف انرژی را افزایش می‌دهند. وقتی تصام اتفاق افتد، گره حسگر باید پیامش را مجدداً ارسال کند و این موضوع منجر به دریافت بیشتر و متعاقباً مصرف انرژی بیشتر می‌شود.

در مقالات مرتبط با WSN، راهکارهای متعددی برای افزایش طول عمر شبکه پیشنهاد شده است که میتوان انها را به سه دسته تقسیم کرد.

کنترل توپولوژی: در این دسته از روش‌ها، حسگرها دامنه‌ی مخابره‌ی خود را کاهش می‌دهند اما اتصال شبکه همچنان برقرار خواهد بود. هدف این دسته از راهکارها این است که مصرف انرژی ناشی از قدرت مخابره، استراق سمع و تصادم را حداقل کند.

مسیریابی انرژی-کارآمد: این دسته از راهکارها قصد دارند تا انرژی مصرف‌شده ناشی از ارسال پشت سر هم پیامها را حداقل کنند. مسیریابی انرژی-کارآمد از طریق کاهش میزان پیام‌های ارسال‌شده و دریافت‌شده، مصرف انرژی را حداقل می‌کند.

حالت خواب: این دسته از روش‌ها مبتنی بر زمان‌بندی فعالیت گره هستند و حالات گره را بین خواب و بیدار تغییر می‌دهند. این دسته از روش‌ها قصد دارند که مصرف انرژی را با حصول اطمینان از اتصال شبکه و کارکرد اپلیکیشن حداقل کنند. بنابراین، این دسته از روش‌ها مصرف انرژی را در حالت شنود بیکار کاهش می‌دهند.

راهکار ارایه شده در این مقاله مبتنی بر دسته‌ی سوم است و کنترل توپولوژی شبکه از طریق کاهش قدرت مخابره صورت گرفته است. چون انرژی مصرف‌شده برای ارسال پیام در اثر افزایش دامنه‌ی مخابره به صورت تصاعدی رشد می‌کند قدرت مخابره یک پارامتر مهم در

دستیابی به کارایی انرژی در WSN است. معمولاً، تمام گره‌ها در WSN از حداکثر قدرت مخابره برای ارسال پیام‌هایشان استفاده می‌کنند حتی اگر گیرنده به فرستنده نزدیک باشد. بنابراین، بخشی از انرژی به دلیل ارسال پیام و همچنین دریافت آن تلف می‌شود، چراکه تمام گره‌های موجود در این دامنه‌ی وسیع از مخابره‌ها، پیام را دریافت خواهند کرد. در این مقاله، یک الگوریتم توزیع‌شده معرفی شده است که قدرت مخابره هر گره را به صورت مستقل کاهش می‌دهد. هدف این است که حداکثر مقدار ممکن از قدرت مخابره را در حالی که اتصال شبکه همچنان برقرار است کاهش داده شود. این کار منجر به ایجاد توپولوژی کارآمدی می شود که در عین حال مسیریابی را تسهیل می‌کند. برای انجام این کار از الگوریتم خودپایداری استفاده شده است. در این رابطه کارهای متعددی توسط محققین مختلف انجام شده است

در مقاله [۱۳] محققان نشان دادند که متوسط دامنه هنگام استفاده از دامنه‌ی مخابره متغیر تقریباً نیم برابر متوسط دامنه در هنگام استفاده از دامنه‌ی مخابره مشترک است. علاوه بر این، هنگام استفاده از توزیع یکنواخت گره‌ها، نتایجی به دست آمد که اغلب در شبکه‌های واقعی مشاهده نمی‌شود. نهایتاً، مقاله [11] نشان داد که در تعدیل متغیر دامنه‌ی مخابره، ظرفیت شبکه به تعداد گره‌های موجود در شبکه وابسته نیست. پس افزایش تعداد گره‌ها، برخلاف استفاده از دامنه مشترک، بر روی ظرفیت شبکه تاثیر ندارد.

در مقاله [۱۴]، به منظور بهینه کردن انرژی گره‌ها در شبکه، قدرت مخابره گره‌ها در شبکه ادهاک تعدیل شده است، در حالی که از اتصال یا اتصال دوطرفه‌ی شبکه اطمینان حاصل شده است. نویسندگان دو الگوریتم CONNECT و BICON-AUGMENT را برای شبکه‌های ایستا ارائه دادند. برای شبکه‌های ادهاک سیار، نویسندگان دو روش ابتکاری توزیع‌شده به نام‌های LINT و LILT را طراحی کرده اند.

در مقاله [15]، محققان یک پروتکل (COMPOW) را برای کنترل قدرت مخابره معرفی کردند. در COMPOW، شبکه توسط یک گراف بی‌جهت نمایش داده می‌شود. در این گراف، دو گره زمانی همسایه محسوب می‌شوند که در محدوده‌ی دامنه هم قرار داشته باشند. در COMPOW، گره‌ها می‌توانند با استفاده از قدرت‌های مخابره‌ی مختلف با هم ارتباط برقرار کنند. هر گره دیمون‌های[1] مسیریابی را اجرا می‌کند (برای هر قدرت یک دیمون).

در مقاله [16]، یک الگوریتم توزیع‌شده به نام LMST را برای کنترل توپولوژی معرفی شده است. این الگوریتم دامنه مخابره را بر اساس ساخت درختهای فراگیر تعدیل می‌کند. هر گره یک الگوریتم را برای ساخت درخت فراگیر و تعدیل قدرت مخابره خود اجرا می‌کند و فقط به گره‌های تک‌هاپ را در درخت دسترسی پیدا می‌کند. نویسندگان بسیاری از ویژگیهای LMST را ثابت کردند. اول اینکه، LMST اتصال شبکه را حفظ می‌کند. آنها همچنین ثابت کردند که حداقکر تعداد همسایه‌ها برای هر گره محدود به عدد ۶ است و اینکه توپولوژی می‌تواند به راحتی تبدیل شود تا فقط پیوندهای دوطرفه باقی بمانند. عیب اصلی LMST این است که این روش به ساخت یک درحت فراگیر برای هر گره نیاز دارد، و این موضوع سربار زیادی را تولید می‌کند.

کنترل اتصال یکی از مواردمهم و قابل توجه در شبکه های حسگر بی سیم می باشد. برای افزایش طول عمر شبکه‌های پویا، از کنترل اتصال به عنوان یک تکنیک دو فازی است استفاده می شود [۱۷]. بهبود توپولوژی فعلی شبکه را فاز تولید انجام داده و از برخی ویژگی-های شبکه (اتصال گره، دوطرفه بودن اتصال و غیره) محافظت می‌کند. از طرفی دیگر، هدف فاز نگهداری این است که به شبکه اجازه دهد تا به صورت خود مختار در زمان خرابی گره‌ها و یا قطعی اتصالات واکنش نشان داده و ویژگی‌های توپولوژیکی مطلوب را بازسازی کند [۱۸، ۱۹].

کنترل اتصال معمولا مسائلی از جمله مسایل مربوط به مقیاس‌پذیری، کارآمدی انرژی و تحمل‌پذیری خطا را به همراه دارد. برای حل این مشکلات در شبکه‌های WSN راه‌حل‌های مختلفی مطرح شده‌اند. گروهی منحصرا مبتنی بر خوشه می‌باشند [۲۴-۲۰]. برای افزایش کارآمدی انرژی، از یک تکنیک اضافه دیگری استفاده می‌شود که مبتنی بر توپولوژی فیزیکی از جمله کنترل توان یا زمان‌بندی می‌باشد [۳۰-۲۶]. با این وجود، این راه‌حل‌های هیبرید معمولا محدود به خوشه‌های ۱-پرشی هستند. علاوه بر این، معمولا برای بهبود انعطاف-

[1] Dsemon

پذیری شبکه از پارادایم‌های تحمل‌پذیری خطا از جمله «خود پایداری» [۳۲، ۳۱] استفاده می‌شود. متاسفانه پروتکل‌های مبتنی بر خوشه‌های k-پرشی ($k \geq 1$) با خاصیت خود پایداری ، هیبریدی نمی‌باشند [۳۶-۳۳].

بن-اتمان[۲] و همکارانش [۳۷] یک استراتژی مطرح کردند که با ساخت یک درخت پوشای کمینه آغاز می‌شود. تابع وزن‌گذاری اتصال مبتنی بر انرژی باقی‌مانده گره‌ها است. هر گره باید اطلاعاتی درباره مسیرهای منتهی به ریشه را نگهداری کند؛ سپس بر اساس درخت پوشا، یک مجموعه غالب با اتصال ضعیف ایجاد می‌شود. برای انجام این کار هر گره باید بسته به اینکه غالب یا مغلوب است، دامنه خود را بر اساس نزدیک‌ترین همسایه خود تنظیم کند. این راه‌حل موجب کاهش کل میزان مصرف انرژی می‌شود. با این وجود، برای انجام این کار لازم است گره‌ها از موقعیت دقیق خود آگاه باشند.

کوانگ و همکارانش [۳۸] روشی برای انتخاب مراکز خوشه‌ها بر اساس درجه همگرایی گره‌ها مطرح کردند. در پایان فرآیند انتخاب، هر گره باید دامنه خود را بر اساس فاصله خود از مرکز خوشه تنظیم کند. در این روش مدت زمان انتخاب سرخوشه(cluster head(CH)) از پیش تعیین شده و دامنه سرخوشه بهینه نمی‌باشد. علاوه بر این، فرآیند خودپایداری غیرمستقیم بوده و به انرژی باقی‌مانده سرخوشه ها وابسته است.

بوکتا[۳] و همکارانش [۳۹] پیشنهاد کردند که پیش از عملیات انتخاب سرخوشه، باید بر اساس انرژی باقی‌مانده اعضای خوشه، یک زمان-بندی برای خواب تعریف شود. پس از وقوع خطا، اتصال میان گره‌های نجات یافته به صورت آبشاری بازسازی می‌شود. متاسفانه این فرآیند به صورت مستقیم خود پایدار نبوده و انرژی زیادی را مصرف می‌کند.

افسار و همکارانش [۴۰] سرویس تحمل‌پذیری خطا (FTS) را مطرح کرده‌اند که توسعه‌ای از EEDC [۴۶] می‌باشد. آنها برای شناسایی خطا، تشخیص خطا و بازیابی خطا یک استراتژی مطرح کرده‌اند. در هر خوشه، علاوه بر سر خوشه یک سر خوشه یدکی (SCH) نیز انتخاب می‌شود.

برای دسترسی به یک راه‌حل کارآمد و مقیاس‌پذیر برای ایجاد اتصال، لازم است روش خوشه‌بندی k-پرشی با روش‌های کنترل توان و زمان‌بندی خواب ترکیب شوند. از طرفی دیگر، داشتن یک طرح نگهداری مستقیم برای تحمل‌پذیری خطاهای گذرا ضروری است. برای دستیابی به این اهداف، باید به چالش‌های بزرگی از جمله مشکل حفره انرژی [۴۲-۴۱]، پدیده «کشش پرش» بین-خوشه‌ای [۴۶-۴۳]، کاهش پیام‌های سیگنال‌سازی و پویای‌های کیفیت اتصال پاسخ داده شود. که در این مقاله به این موارد پاسخ داده شده است. همچنین موارد مهمی نظیر ، میزان مصرف انرژی به ویژه در اطراف سینک ، سربار سیگنال‌سازی برای شناسایی خطا، زمان شناسایی خطا و بازیابی (زمان همگرایی)، تعداد دفعات انتخاب (مجدد) سرخوشه ها وتعداد کاندیدهای لازم برای کل فرآیند ترمیم اتصالات کمینه شده است.

پروتکل ارائه شده در [۴۷] روشی توزیع شده برای خوشه بندی و جمع آوری داده ارائه میدهد .این الگوریتم، انرژی هر گره و گره های همسایه آن را در انتخاب سرخوشه در نظر میگیرد. این روش میتواند مصرف انرژی را کاهش دهد و لذا، طول عمر شبکه ها را بهبود دهد .بااین حال، این روش وضعیت چگالی گره ها را نادیده میگیرد که ممکن است به مشکلاتی از قبیل چندپارگی در شبکه ها منجر شود.

در [۴۸] یک پروتکل خوشه بندی و مسیریابی چندگامی بر اساس بهینه سازی ازدحام ذرات برای حل مسأله نقطه کانونی به نام PUDCRPارائه شده است. در این پروتکل، توزیع خوشه ها به منظور ایجاد توازن در انرژی مصرفی و افزایش طول عمر شبکه، به طور پویا با مردن گره ها تغییر میکند. الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات برای تعیین ناحیه هایی که سرخوشه ها در آنها واقع هستند، به کار گرفته میشود.

پروتکل FRRP ارایه شده در [۴۹]یک روش مسیریابی بر اساس منطق فازی است که برای شبکه های موردی متحرک پیشنهاد شده است. در این پروتکل، امتیاز اختصاص داده شده به هر مسیر، بر حسب چهار معیار پهنای باند در دسترس، مقدار انرژی باقیمانده، تعداد گامها و درجه تحرک گرهها محاسبه میگردد. گرههای شبکه به عنوان عاملهایی هوشمند در نظر گرفته میشوند که مسؤول مسیریابی پویا و انتقال داده می باشند. بهینه سازی مصرف منابع شبکه و کاهش هزینه های سربار، موجب ارتقای کارایی در این روش شده اند.

---

[2] Ben-Othman
[3] Boucetta

الگوریتم خوشه بندی مبتنی بر منطق فازی توزیع شده (DFLC) ارائه شده در[۵۰] نیز یک الگوریتم خوشه بندی توزیع شده با استفاده از رویکرد فازی برای شبکه های حسگر میباشد. این الگوریتم، مکانیسمی شبیه به فیلترایجاد میکند و تعداد بسته های داده غیرضروری را کاهش میدهد. در این الگوریتم، انرژی باقیمانده گره، فاصله ازایستگاه پایه و تراکم گرهها به عنوان پارامترهای ورودی روش فازی به کار میروند. این روش، مشکل نقاط کانونی 5در ارتباطات چندگامی را نادیده میگیرد که این موضوع باعث عدم تعادل بار کاری و منجر به مرگ زودهنگام گرههای میانی شود. علاوه براین ،در نظر گرفتن فاصله فیزیکی بین گرهها و ایستگاه پایه در شبکه های پویا بهعنوان یک پارامتر، انتخاب کاملاً مناسبی نیست، زیرا، مکان گرهها در شبکههای پویا، غیرقطعی است. ضمناً، در صورتیکه تمام گرهها برای به دست آوردن فاصله جاری خود تا ایستگاه پایه مجبور به برقراری ارتباط با ایستگاه پایه در هر دور باشند، انرژی قابل ملاحظه ای از شبکه صرف خواهد شد.

روش پیشنهادشده در[۵۱] (EEDCF)، خوشه بندی گرهها با توزیع غیریکنواخت را به روش فازی اجرا میکند. در این روش، سرخوشه ها بر اساس تعداد همسایه ها، میزان انرژی باقیمانده گره مورد بررسی و نیز، مجموع انرژی گرههای همسایه با اعمال قوانین فازی تعیین میشوند. نویسندگان در این مقاله، با استفاده از مدل استنتاج TSK، سعی در بهینه سازی مصرف انرژی در شبکه دارند. به طور مشابه، روش ارائه شده در [۵۲]که FL-EEC/Dنامیده شده است انتخاب سرخوشه را براساس منطق فازی با هدف توزیع متعادل بار و کاهش مصرف انرژی در الگوریتم های مسیریابی سلسله مراتبی انجام میدهد. روش مذکور در بالا بردن کارایی مصرف انرژی مسیریابی های با ساختار سلسله مراتبی مفید می باشد اما در بقیه روشهای مسیریابی کارایی چندانی از خود نشان نمیدهد.

در [۵۳] با استفاده از الگوریتم بهینه سازی فاخته، یک روش مسیریابی آگاه از انرژی بر اساس خوشه بندی با نام COARPپیشنهاد شده است. در این روش، چهار معیار برای انتخاب بهترین سرخوشه ها در هر دور کاری در نظر گرفته میشود که عبارتند از: انرژی باقیمانده گره ها، فاصله تا ایستگاه پایه، فاصله های درون خوشه ای و فاصله های بین خوشه ای. این روش، بهینه سازی مصرف انرژی و نرخ تحویل داده را دنبال میکند. در [۵۴] نویسندگان یک الگوریتم خوشه بندی با استفاده از ابزار فازی C-Means را برای صرفه جویی در مصرف انرژی پیشنهاد داده اند. سرخوشه بر اساس موقعیت حسگر در هر خوشه انتخاب میشود، محل آن با توجه به مرکز ادغام (FC)، نسبت سیگنال به نویز (SNR) و انرژی باقیمانده آن تعیین میشود.

در [۵۵] نویسندگان از C-Means برای خوشه بندی شبکه در جهت کاهش خطای کوتاهترین مسیر بین گره های دور استفاده کرده و دقت مکان یابی را برای شبکه های نامنظم شناختی بهبود داده اند. اگرچه استفاده از C-Means میتواند نتایج منطقی تری در تجزیه و تحلیل فازی به دست دهد، گرهها در طول هر انتخاب سرخوشه با این روش انرژی بیشتری مصرف میکنند .

نویسندگان در [۵۶]، پروتکل مسیریابی آگاه از فاصله و انرژی FLDEARرا معرفی نموده اند. این پروتکل تعداد تکرار پیامها را کاهش میدهد و درنتیجه، سربار انتقال داده را کاهش میدهد. در این پروتکل، از دو سیستاستنتاج فازی در مدیریت مسیریابی و بافر استفاده میشود. ازاینرو، این روش نرخ تحویل داده را افزایش و میزان تأخیر در تحویل داده را کاهش میدهد. در [۵۷]خوشه بندی توزیع شده غیرقطعی با استفاده از منطق فازی (DUCF) ارایه شده است.الگوریتم مذکور یک الگوریتم خوشه بندی توزیع شده بر اساس منطق فازی برای شبکه های خوشه ای نابرابر است .در این روش انرژی پایه گره، درجه گره و فاصله بین گره ها و ایستگاه پایه را به عنوان ورودی انتخاب شده و خروجی های آن، احتمال منتخب شدن گره ها به عنوان سرخوشه و نیز، اندازه خوشه ها میباشند

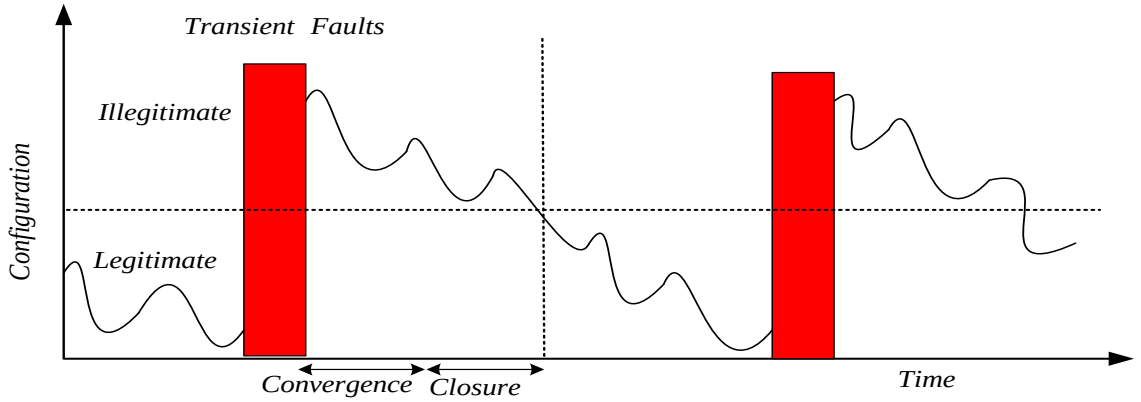
حسگرها به وسیله‌ی باتری و از طریق یک پردازشگر یا رادیو کار می‌کنند. شارژ مجدد یا تعویض باتری‌های حسگرها معمولاً سخت است. بنابراین، انرژی یک مورد کمیاب و نفیس در WSN است و باید ذخیره شود.در این مقاله سعی شده است ضمن کاهش میزان مصرف انرژی به ویژه در اطراف سینک؛ زمان شناسایی خطا و بازیابی (زمان همگرایی) و تعداد کاندیدهای لازم برای کل فرآیند ترمیم اتصالات کمینه شود. لذا ، یک پروتکل کنترل توپولوژی خودپایداری کارآمد را برای WSN معرفی شده است. در این روش ضمن کاهش دادن قدرت مخابره هر گره، اتصال بین گره های شبکه دروضعیت حداکثر ذخیره‌ی انرژی برقرار شده است. کارایی روش ارایه شده با شبیه‌سازی های انجام شده به اثبات رسیده است.ساختار این مقاله بدین صورت است که بعد مقدمه بالا ابتدا الگوریتم خودپایداری ارایه شده و بعد از ان مبحث کنترل اتصال در شبکه های حسگر بی سیم بیان خواهد شد.در قسمت ماقبل اخر بحث ذخیره انرژی و نهایتا در قسمت اخر نتیجه گیری ارایه خواهد شد.

۲- الگوریتم خود پایداری[۵۸]

مفهوم «خود-پایداری» اولین بار در سال ۱۹۷۳ توسط دیکسترا در زمینه سیستم‌های توزیع شده مطرح شد. منظور از سیستم‌های توزیع شده سیستم‌هایی است که شامل مجموعه متناهی از فرآیندهای مستقل بوده که از طریق یک شبکه به یکدیگر متصل می‌باشند و وظیفه آنها به انجام رساندن هدف مشترکی است. در این سیستم‌ها، طراحی الگوریتم‌های خودپایدار (توزیع شده) ممکن است قدری پیچیده به نظر برسد ، با این وجود ، الگوریتم‌های خودپایدار توزیع شده‌ای وجود دارند که حتی ساده‌تر ازالگوریتم همتای غیر- خودپایدار خود می-باشند.

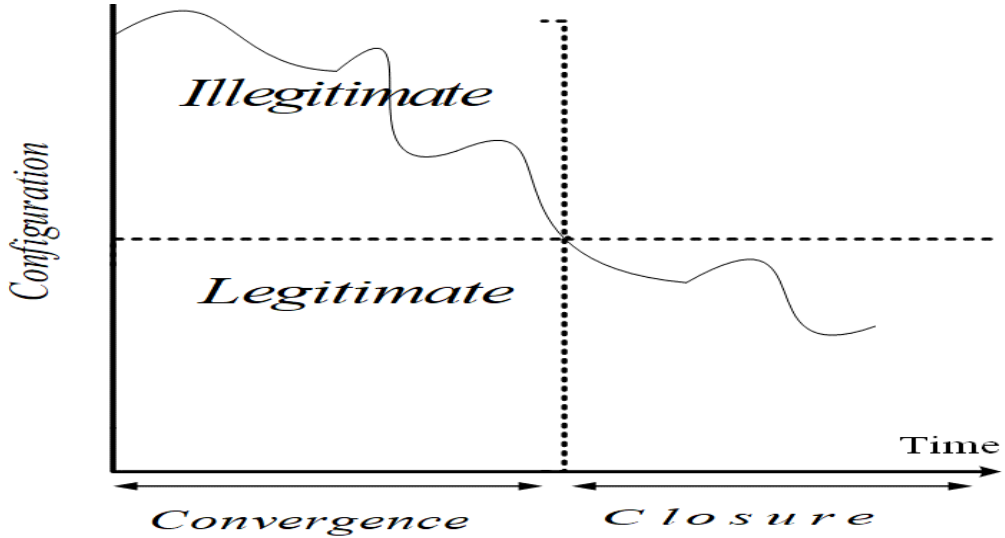
یکی از کاربرد های اصلی خودپایداری در طراحی سیستم‌های توزیع شده‌ای نهفته است که آنها قادر باشند هر تعداد (متناهی) خطای گذرا تحمل کنند. «خطای گذرا» در زمانی که غیر قابل پیش‌بینی است رخ می‌دهد، اما موجب خسارت‌های سخت افزاری جدی نمی-شود.اما این تاثیر نیز می‌تواند در برخی از مشخصه‌های اجزای شبکه مشاهده شود مثلا تعدادی از بیت‌ها در حافظه محلی یک فرآیند تغییر کنند، برخی پیام‌ها در یک اتصال از بین بروند و یا ترتیب فرآیندها جابجا شوند. بنابراین خطای گذرا بر روی وضعیت بخشی که بر روی آن رخ می‌دهد تاثیر گذار است.

از این رو پس از رخداد تعداد متناهی خطای گذرا، پیکربندی یک سیستم توزیع شده می‌تواند تصادفی باشد؛ به این معنی که متغیرهای موجود در حافظه‌های فرآیند ممکن است مقادیر تصادفی (در دامنه تعریف خود) اختیار کنند. اتصال‌های ارتباطی نیز ممکن است حاوی تعداد متناهی پیام تصادفی باشند که قالب آنها کاملا صحیح است فاصله زمانی قبل از آشفتگی گذرای بعدی به اندازه‌ای کافی است که به سیستم اجازه داده شود تا رفتار صحیحی را از سر بگیرد. این موضوع در شکل شماره ۱ نشان داده شده است.



شکل شماره ۱- تحمل پذیری سیستم‌ها با خاصیت خودپایداری

در مقایسه با بسیاری از رویکردهای تحمل‌پذیری خطا (رویکردهای قدرتمند)، روش خودپایداری یک روش غیر پنهانی است: این روش تاثیر خطاها را پنهان نکرده و به سیستم اجازه می‌دهد تا (به صورت موقتی) از مشخصه‌های خود منحرف شود. بنابراین، با خطاها به صورت مستقیم برخورد نمی‌شود، علاوه بر این، همگرایی تنها زمانی تضمین می‌شود که (بدون رخداد هیچ‌گونه خطایی) اندازه پنجره‌ی



زمانی به اندازه کافی بزرگ باشد. از این رو در «اثبات صحت»، نقطه اولیه مشاهدات پس از رخداد «آخرین» خطاها می‌باشد. به همین خاطر، وضعیت سیستم از یک پیکربندی تصادفی آغاز می‌شود، زیرا این وضعیت پس از رخداد خطاهای گذرا تحت تاثیر خطاهای گذرا قرار می‌گیرد؛ در حالی که فرض می‌شود «هیچ خطایی رخ نداده است» (شکل۲).

شکل شماره۲- رخداد خطا در یک مدل

در مقالات چاپ شده به چنین پیکربندی، «پیکربندی اولیه» سیستم گفته می‌شود. سپس با شروع از یک پیکربندی اولیه دلخواه، یک الگوریتم در صورتی خودپایدار خواهد بود که تضمین کند سیستم به صورت خودکار (بدون مداخله عوامل خارجی از جمله انسان) طی سپری شدن مدت زمان متناهی، به یک مجموعه بسته به نام «پیکربندی‌های مطلوب» همگرا شود. توجه داشته باشید که در این تعریف، به طور غیر مستقیم فرض شده است که خطاها موجب تغییر کد الگوریتم نمی‌شوند. این فرضیه در [۳] بر اساس دو آرگومان توجیه شده است.

در حقیقت خاصیت خودپایداری معمولا در مقایسه با روش‌های قدرتمند کلاسیک به عنوان یک روش سبک-وزن برای تحمل‌پذیری خطا در نظر گرفته می‌شود. علت این امر به خاطر آن است که خاصیت خودپایداری یک رویکرد «بهینه» را پیش می‌گیرد، در حالی که الگوریتم‌های قدرتمند کلاسیک از رویکردهای «بدبینانه» استفاده می‌کنند

۱-۲ تعریف رسمی الگوریتم

در مقاله ها و کارهای تحقیقی متفاوت تعاریف مختلفی از خودپایداری ارایه شده است. اما دو تعریف ارایه شده توسط دالو و قوش بیشتر مورد استفاده قرار گرفته اند. تعریف رسمی خود پایداری با استفاده از مفهوم سیستم " S " و گزاره " P " بیان میشود. سیستم S تمایل به اجرا صحیح P دارد سیستم S را خود پایدار می گوییم در صورتیکه دو شرط بسته بودن (Closure) و همگرایی (Convergence) را در خود داشته باشد. مفاهیم بسته بودن و همگرایی به شرح زیر است.

همگرایی : اگر از یک حالت محلی دلخواه شروع کنیم سیستم در صورتی پایدار است که تضمین شود که بعد از گذار چندین حالت ،به یک حالت عمومی مطلوب برسد.

بسته بودن : هرگاه گزاره P یک بار در سیستم S تصدیق و محرز شد دیگر گزاره مذکور تحریف نشود و تصدیق خود را از دست ندهد.

علاوه بر تعریف بالا تعریف کامل تری از این الگوریتم می توان به صورت زیر ارایه نمود. هر سیستمی که با توجه به این تعریف خودپایدار باشد با توجه به تعاریف دالو و قوش نیز خودپایدار می باشد. برای بیان این تعریف از مفهوم خودپایداری فرض های زیر در نظر گرفته شده اند.

G :گراف متصل شبکه. A:الگوریتم توزیع D: عامل مخرب (دیمان).

SP : مساله ای که باید در شرایط ایمن و پویا حل شود.

C/L : سری پیکربندی های مطلوب و قابل قبول. $(L \subseteq C)$

الگوریتم توزیع شده برای حل یک مساله در یک گراف متصل با وجود یک عامل مخرب (دیمان)در صورتی خودپایدار است که یک مجموعه نا تهی از پیکربندی های مطلوب وجود داشته باشد به طوریکه سه شرط زیر تحت عناوین **بسته بودن، همگرایی و صحت** را براورده سازد.

الف) بسته بودن: **L** با **A** در **G** با وجود **D** بسته است اگر شرط زیر برقرار باشد.

$$(\forall \gamma \in L \ , \forall \gamma' \in C \quad if \ \gamma \rightarrow \gamma' \ then \ \gamma' \in L) \qquad (1)$$

ب) همگرایی.

A تحت D به L در G همگرا هست در صورتیکه

$$(\forall e \in \varepsilon \ , \quad \exists \gamma \in e \text{ به طوریکه } \gamma \in L \quad) \qquad (2)$$

ج) صحت.

اگر شرایط زیر برقرار باشد **SP** تحت **D** یک حالت مطلوب و قابل قبول **L** را دارد.

$$\forall\, e \in \varepsilon(L)\ ,\ SP(e) \quad \rightarrow\rightarrow\rightarrow \text{ثابت} \quad (3)$$

۳- تقسیم بندی کاربردهای الگوریتم خودپایداری.

در یخش های قبلی تعاریف و ویژگی های الگوریتم خودپایداری ارایه شد. در این یخش به تقسیم بندی کاربردها و شاخه های مطالعاتی این الگوریتم پرداخته شده است. این الگوریتم را می توان از چهار جنبه طبقه بندی کرد.

الف) سطح هم‌گام‌سازی.

راه‌حل‌های خودپابداری را می‌توان بر اساس «سطح هم‌گام‌سازی» به روش های متوالی، سنکرون (همگام) و یا کاملا توزیع شده تقسیم بندی کرد

ب) سطح شناخت

براین اساس الگوریتم خودپایداری به صورت «ناشناس/بینام بودن» کاملا ناشناس/بینام ، ریشه‌دار و یا شناخته شده – مانند دسته‌بندی میگردد..

ج) مدل محاسباتی.

شاید مهم‌ترین معیار، «مدل محاسباتی» باشد که الگوریتم بر اساس آن نوشته شده است. تا کنون سه مدل اصلی به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این سه مدل به ترتیب از ضعیف‌ترین به قوی‌ترین عبارت‌اند از: «مدل انتقال پیام» (کلاسیک) ، «مدل رجیستر» (که به آن مدل حافظه مشترک محلی با اتمیسیتی خواندن/نوشتن نیز گفته می‌شود) و «مدل وضعیت-اتمیک» (که به آن مدل حافظه مشترک محلی با اتمیستی مرکب) نیز گفته می‌شود). دو مورد آخر در واقع انتزاعی از مدل انتقال پیام می‌باشند که در آنها «تبادل پیام میان همسایگان» با «دسترسی مستقیم به وضعیت همسایگان» جایگزین شده است. تفاوت مدل رجیستر و مدل وضعیت-اتمیک در اتمیسیتی آنها می‌باشد. در مدل وضعیت-اتمیک، هر گام اتمیک شامل حداقل یک (یا شاید چند) فرآیند است که وضعیت آن گام و تمام همسایگان آن گام را خوانده و وضعیت خود را بروز رسانی می‌کند. در مدل رجیستر، اتمیسیتی ضعیف‌تر است. هر فرآیند تعدادی رجیستر ارتباطی را نگه داشته و آنها را با همسایگان خود و (شاید) برخی متغیرهای داخلی (غیر-مشترک) به اشتراک می‌گذارد. گام اتمیک شامل یک فرآیند برای انجام محاسبات داخلی است که طی آن عملیات مربوط به خواندن یا نوشتن بر روی یک رجیستر ارتباطی اجرا می‌شود.

د) حل مساله.

پس از مطالعات اولیه انجام شده توسط دیکسترا الگوریتم‌های بسیار زیادی برای حل مسائل مختلفی از جمله «ساختارهای درخت پوشا» ، «گردش علامت/نشانه» «اتحاد و «انتشار اطلاعات همراه با بازخورد» مطرح شدند. مسائل ذکر شده را می‌توان به گروه‌های زیر دسته-بندی کرد:

۱. محاسبه ساختارهای توزیع شده (که به آن «خود-سازمانی» نیز گفته می‌شود) از جمله درخت‌های پوشا و خوشه‌بندی
۲. الگوریتم‌های مسیریابی.
۳. الگوریتم‌های موج از جمله انتقال علامت/نشانه و انتشار اطلاعات همراه با بازخورد .
۴. هم‌گام‌سازی از جمله مسئله اتحاد و هم‌گام‌سازی فاز .
۵. مسائل مربوط به تخصیص منابع از جمله «انحصار متقابل» و شام فیلسوفان .

۳-کنترل اتصالات در شبکه حسگر بی سیم

برای ارایه روش کنترل انصالات در WSN شبکه ای متشکل از تعداد زیادی گره در نظر گرفته شده است باید کنترل اتصال بین گره های شبکه صورت گیرد. لذا هدف کنترل اتصال بین گره ها هست در شبکه مورد نظر فرض شده است که تمامی گره‌ها مجهز به یک رادیوی چند-جهته بوده و یک شناسه (ID) منحصر به فرد دارند ،. تعداد بسته‌هایی که مجددا انتقال داده می‌شوند دارای حد بالایی هستند و اتصالات ضعیف می‌باشند.همچنین هر گره از موقعیت تقریبی خود و همسایگان خود آگاه بوده و قادر به تخمین زدن کیفیت اتصال هستند.

فرض کنید V و E به ترتیب بیانگر گره‌ها و اتصالات میان آنها در ناحیه A باشد. هر اتصال $(u, v) \in E$ بیانگر قابلیت گره u برای برقراری ارتباط با گره v با دامنه انتقال $r_c(u) \in R_c$ است. این قابلیت ارتباط وابسته به $d(u, v)$ و $lq(u, v)$ می‌باشد که به ترتیب بیانگر طول (فاصله اقلیدسی) و کیفیت اتصال (u, v) است. R_c نیز یک مجموعه گسسته از دامنه‌ها (محدوده‌ها)ی انتقال می‌باشد. به بیان ریاضی:

$$E = \{(u, v) \in V: (d(u, v) \leq r_c(u)) \wedge (lq(u, v) \geq \ell)\} \quad (4)$$

در این رابطه ℓ حدآستانه‌ای برای کیفیت اتصال است. $d(u, v)$ و $lq(u, v)$ به ترتیب محاسبه می‌شوند.همچنین فرض شده است که هر گره u می‌تواند تاخیر انتقال $\tau(u, v)$ و زمان گردش $rrt(v)$ اتصالات منتهی به همسایه v را تخمین بزنند و جابجایی گره‌ها تنها به خاطر ناپایداری ناحیه تحت نظارت است

$\hat{\theta}$ بیانگر حداکثر تعداد تلاش‌های مجاز برای انتقال است که توسط برنامه اصلی معین می‌شود. $\varphi_{uv}(t)$ نیز بیانگر تعداد تلاش‌های شکست خورده‌ای است که گره u در زمان t پس از انتقال یک بسته به همسایه v تجربه کرده است. در هر لحظه t :

$$\varphi_{uv}[(u, v) \in V] \Leftrightarrow \{[(\hat{\theta} - (t)] > 0\} \quad (5)$$

بنابراین شبکه‌ی بکار گرفته شده، یک گراف جهت‌دار فضایی در A ایجاد می‌کند که با $G = (V, E)$ نمایش داده می‌شود.

در فرآیند کنترل اتصال شناسایی تغییر توپولوژی، ارزیابی خطا و بازسازی اتصال صورت میگیرد. به هر گره اجازه داده می شود تا در برابر تغییرات توپولوژیکی محلی (ورودها، خروجها، تغییر کیفیت اتصالات و غیره) واکنش نشان دهد. اتصالات خراب توسط گره‌های بهم‌متصل شناسایی شده، در حالی که گره‌های خراب توسط همسایگانشان شناسایی می‌شوند. یک خرابی در اتصالات می‌تواند تاثیرات قابل توجهی بر روی توپولوژی فعلی داشته باشد. بنابراین هنگامی که یک گره نمی‌تواند با ناظر مستقیم خود ارتباط برقرار کند، لازم است «همسایه مفید» (معتمدترین همسایه) خود را بیابد تا اتصال خود را بازسازی کند.شایان ذکر است که در طول این فرآیند، گره تلاش می‌کند تا به خوشه «همسایه مفید» خود ملحق شود. اگر تمام تلاش‌ها با شکست مواجه شوند، گره باید خود را به عنوان یک CH معرفی کرده و سعی کند خوشه جدیدی را در همسایگی k-پرشی ایجاد کند.

۳- راه‌حل کارآمد و مقیاس‌پذیر برای ایجاد اتصال

به منظور داشتن یک راه‌حل کارآمد و مقیاس‌پذیر برای ایجاد اتصال، لازم است روش خوشه‌بندی k-پرشی را با روش‌های کنترل توان و زمان‌بندی خواب ترکیب شود. از طرفی دیگر، داشتن یک طرح نگهداری مستقیم برای تحمل‌پذیری خطاهای گذرا ضروری است. برای دستیابی به این اهداف، باید چالش‌های بزرگی از جمله مشکل حفره انرژی [۴۷-۵۱]، پدیده «کشش پرش» بین-خوشه‌ای [۲۴-۲۶]، برطرف شوند. برای انجام این موارد باید زمان‌بندی بهینه مبتنی بر خوشه در سطح خوشه و تنظیم دامنه انتقال برای بروز رسانی توپولوژی ارتباطی که به اختصار روش (CONSTRUCT) نامیده می شود اجرا شود.این راه‌کار یک پروتکل انتقال پیام متمرکز شده و آسنکرون می‌باشد. این پروتکل هم می تواند مبتنی بر زمان‌بندی قطعی CONSTRUCT-D باشد و هم میتواند مبتنی بر و زمان بندی احتمالاتی(CONSTRUCT-P) باشد.روش CONSTRUCT شامل شش فرآیند کشف (مجدد) همسایه؛ وابستگی مستقیم؛ انتخاب CH و شکل خوشه؛ کمینه‌سازی دامنه انتقال؛ کنترل افزونگی بین-خوشه‌ای (زمان‌بندی بیداری/خواب)؛ حفظ توپولوژی. می باشد

کشف (مجدد) همسایه: گره فعال u باید با کشف مجدد گره‌های قرار گرفته در اطراف خود با فاصله ۱-پرشی، جدول مربوط به همسایگان خود را در هر t_{discov} واحد زمانی بروز رسانی کند. این دوره زمانی بر اساس یک پارامتر تعیین می‌شود. با تحلیل اطلاعات جمع‌آوری شده (شناسه‌ها، وضعیت‌ها، CHها و غیره)

وابستگی مستقیم: اگر گره وابسته u آزاد شود، این گره باید سعی کند تا پس از اکتشاف (مجدد) اطراف خود، به یک خوشه ملحق شود. توجه داشته باشید که همسایه v برای گره u زمانی قابل اعتماد است که وضعیت آن مجاز بوده و سطح اعتماد آن که با $\psi(u, v)$ نمایش داده شده و بر اساس رابطه (۶) محاسبه می‌شود، بالاتر از حدآستانه تعیین شده باشد.

$$\psi(u, v) = a\left(\frac{t_{discov} - \Delta\eta_v}{t_{discov}}\right) + (b \times H_v) + (c \times \Psi_{uv}) \quad (6)$$

$$= 1 - \frac{hp_v}{(k+1)}H_v \quad (7)$$

$$\Psi_{uv} = \frac{x_{uv}}{\Sigma_{w \in N(u)} x_{uw}} \quad (8)$$

در این رابطه $\Delta_{\eta v}$ بیانگر زمان سپری شده از آخرین بروز رسانی همسایه گره v است. a، b و c سه ضریب وزن‌گذاری می‌باشند به طوری که $a + b + c = 1$. χ_{uv} درجه نزدیکی گره u و گره v است. اگر u و v هم‌تیم، هم-خوشه و یا فقط همسایه باشند، این درجه به ترتیب برابر با ۱، ۲ و یا ۳ است.

سپس گره u باید یک پیام JOIN-REQ برای تمام همسایگان قابل اعتماد خود ارسال کرده و در طول t_{join} واحد زمانی منتظر پاسخ بماند. t_{join} بر اساس بالاترین زمان گردشی که گره u در طول فرآیند کشف (مجدد) همسایه تجربه کرده تخمین زده می‌شود.

گره v پس از دریافت پیام JOIN-REQ، اگر در فاصله حداکثر (k-1)-پرش از مرکز خوشه خود قرار گرفته باشد ($hp_v < k$)، آنگاه باید با یک پیام JOIN-ACK پاسخ دهد.

گره u به خوشه اولین همسایه قابل اعتماد (مفیدترین همسایه) که با ارسال پیام JOIN پاسخ داده است، ملحق می‌شود. بنابراین هر دو هم‌تیمی یک فرومون TREE بر روی اتصال خود می‌ریزند. فرآیند ریزش فرومون در بخش بعدی به طور دقیق‌تری بحث شده است.

انتخاب مرکز خوشه و شکل خوشه: هدف این فرآیند ایجاد خوشه‌های جدید است. جهت ایجاد یک درخت پوشا با ریشه CH و یال-هایی که اتلاف انرژی و تاخیر را کمینه می‌کنند، میتوانیم از یک رویکرد مبتنی بر استیگمرجی استفاده کنیم. استیگمرجی پارادایم مشهوری است که معمولا در بهینه‌سازی کلونی مورچگان مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵۲-۵۴]. منطق قرار گرفته در پشت استراتژی ما، استفاده از مورچه‌های متافوریک (یعنی همان پیام‌ها) برای کمک به گره‌ها در یافتن بهترین مسیر (از لحاظ تاخیر) جهت رسیدن به CHها و اتصال به سایر خوشه‌ها می‌باشد. این مسیر باید تنها شامل اتصال‌های متقارنی باشد که بهترین توازن را میان طول و کیفیت مسیر برقرار می‌کنند.

لازم به ذکر است به منظور غلبه بر مسئله حفره انرژی [۴۹، ۵۱] در داخل شبکه هسته (همسایگی ۱-پرشی سینک) از یک استراتژی به نام «سینک-به-عنوان-CH»[4] [۵۵] استفاده شده است. این استراتژی به سینک اجازه می‌دهد تا یک خوشه ۱-پرشی ایجاد کرده و همانند یک CH کامل عمل کند.

$$\text{Score}(u) = a\left(\frac{n-1}{n}\right) + \beta\left(\frac{Er(u)}{Ei}\right) + \delta\,(1 - CC(u)) + \gamma(s^t(u)) \quad (9)$$

$$CC(u) = \frac{\Sigma_{i=1}^{n} \Sigma_{j=1}^{n} w_i \times w_j \times \sigma_{ij}}{(\Sigma_{i=1}^{n} \Sigma_{j=1}^{n} w_i \times w_j) \times \max_{i,j} (\sigma_{ij})} \quad (10)$$

$$(u) = \begin{cases} 1, & \text{اگر } p = 0 \\ e^{-\lambda t}, & \text{در غیر صورت} \end{cases} S^t \quad (11)$$

$$MTBD\,(u) = \frac{\Sigma_c^p (\tau_c^{(a)} - \tau_c^{(d)})}{p} \quad (12)$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBD\,(u)} \quad (13)$$

n بیانگر تعداد همسایه‌ها، Er(u) بیانگر انرژی باقی‌مانده u، Ei بیانگر انرژی باقی‌مانده و CC(u) بیانگر ضریب خوشه‌بندی وزن‌دار است [۵۶]. w_i برابر با وزنی (شاخص کیفیت) است که گره u به اتصال مربوط به همسایه i تخصیص می‌دهد. σij نیز بیانگر وزنی است که همسایه i به اتصال مربوط به همسایه j داده است. $S^t(u)$ بیانگر پایداری سریع گره u است.

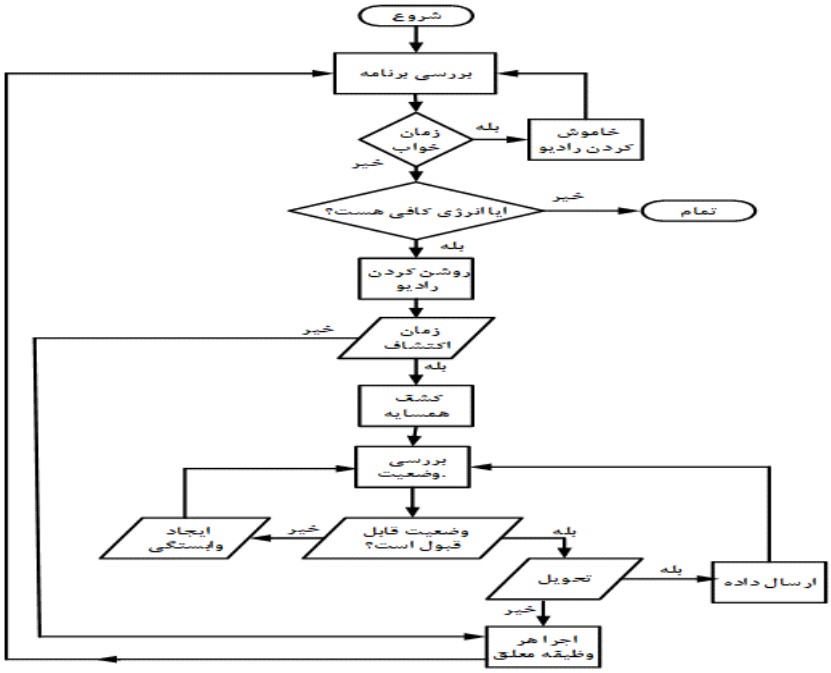
MTBD(u) برابر با متوسط زمان میان دو خروج متوالی از یک خوشه است. $\tau_c^{(a)}$ بیانگر زمان ورود به خوشه c و $\tau_c^{(d)}$ بیانگر زمان خروج از خوشه c است. p برابر با تعداد خوشه‌هایی است که گره u تاکنون به آنها تعلق پیدا کرده است.

λ نرخ خروج است. α، β، δ، و γ چهار ضریب وزن‌گذاری می‌باشند به طوری که $\alpha + \beta + \delta + \gamma = 1$ و $\beta > \max(\alpha, \delta, \gamma)$.

در شکل شماره۳ فلوچارت پروتکل CONSTRUCT نشان داده شده است.

---

[4] Sink-as-CH



شکل شماره ۳ فلوچارت پروتکل CONSTRUCT

۳-۱ میانگین زمان همگرایی

به منظور ارزیابی میانگین زمان ارزیابی، چندین شبکه متشکل از یک سینک استاتیک و جمعیتی از گره‌های سنسوری با توزیع تصادفی و یکنواخت را پیاده‌سازی شده است. پارامترهایی پیاده‌سازی استفاده در جدول 1 ارائه شده است.

برای تزریق خطا، به منظور ایجاد تغییرات واقعی در پارامتر میانگین زمان بین شکست‌ها (MTBF)، از توزیع‌های ویبول و یکنواخت استفاده شده است که به طور خلاصه در جدول ۲ ارائه شده است. علاوه بر این، هنگامی که لازم بود خطای تزریق شده کیفیت اتصال را تغییر دهد، برای تغییر تصادفی پارامترهایی همچون نسبت دریافت بسته (PRR)، نسبت سیگنال به نویز مداخله‌ای (SINR) و شاخص کیفیت اتصال (LQI) [۶۳، ۶۴] از توزیع یکنواخت استفاده شد

جدول ۱. پارامترهای کلی شبیه‌سازی

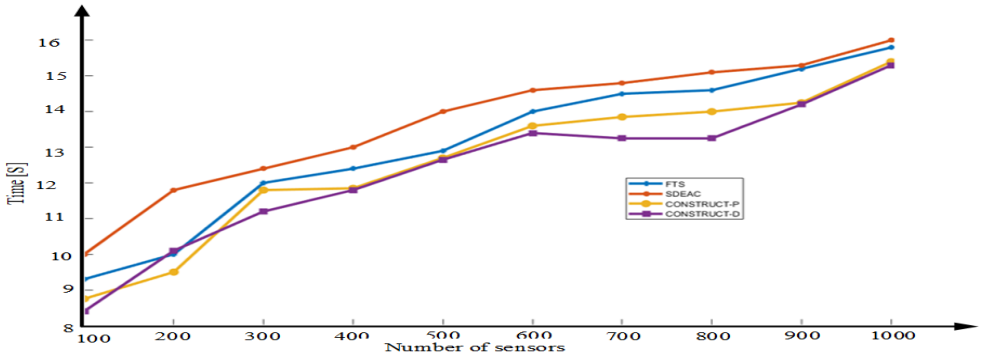
پارامتر	مقدار
افق پیاده‌سازی	1000 m × 1000 m
تعداد سنسور	100–1000
موقعیت سینک	(450; 200)
دامنه انتقال سنسورها	{15; 35; 54; 70; 83; 98; 117; 127} m
دامنه انتقال سینک	250m
انرژی اولیه سنسورها	0.2 J
میزان دشارژ در ثانیه	0.1 μJ
E_{elec}	50 nJ/bit
e_{fs}	10 nJ/bit/m^2
e_{amp}	0.0013 nJ/bit/m^4

d_0	87 m
طول پیام	2000 bits
زمان سرویس CH	5 s
nitrmax	200

جدول ۲ پارامترهای تزریق خطا

عامل	−	+
مقیاس	U(1,5)	U(6,10)
MTBF	W α = W(100, 500), β = 3]	[W α = W(600, 1000), β = 3]
بومی سازی	1	U(2,10)
اندازه شبکه	U(100, 500)	U(600, 1000)
k	1	U(2, 4)
نوع	0 (برای اتصال)	1 (برای گره)
سطح گره	U(0, 2)	3

این موضوع که فاکتورهای توصیف شده در جدول ۲ چگونه روی میانگین زمان همگرایی تاثیر گذار هستندبررسی شده است. هر آزمایش برای ۱۰۰ بار تکرار شده و نتایج بدست آمده دارای بازه اطمینان ۹۵٪ هستند. نتایج بدست آمده از آزمایشات با نتایج بدست آمده از دو پروتکل FTS (مطرح شده در [۴۱]) و SDEAC (مطرح شده در [۳۸، ۳۹]) مورد مقایسه قرار گرفت.در شکل ۴ تاثیر اندازه شبکه یعنی تعداد سنسورها بر روی میانگین زمان همگرایی نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است میانگین زمان همگرایی بر اساس اندازه شبکه برای هر پروتکل کاهش می‌یابد. علت این امر این است که درجه گره‌ها افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، قابلیت آنها برای بازسازی اتصالات سریع‌تر است. با این وجود، CONSTRUCTION-D دارای پایین‌ترین میانگین زمان همگرایی است. به طور مشابه، میانگین زمان همگرایی بدست آمده با استفاده از CONSTRUCT-P کمتر از میانگین زمان‌های بدست آمده توسط پروتکل‌های SDEAC و FTS است، زیرا این دو پروتکل کیفیت اتصال را مد نظر قرار نمی‌دهند.



شکل ۴. میانگین زمان همگرایی نسبت به اندازه شبکه

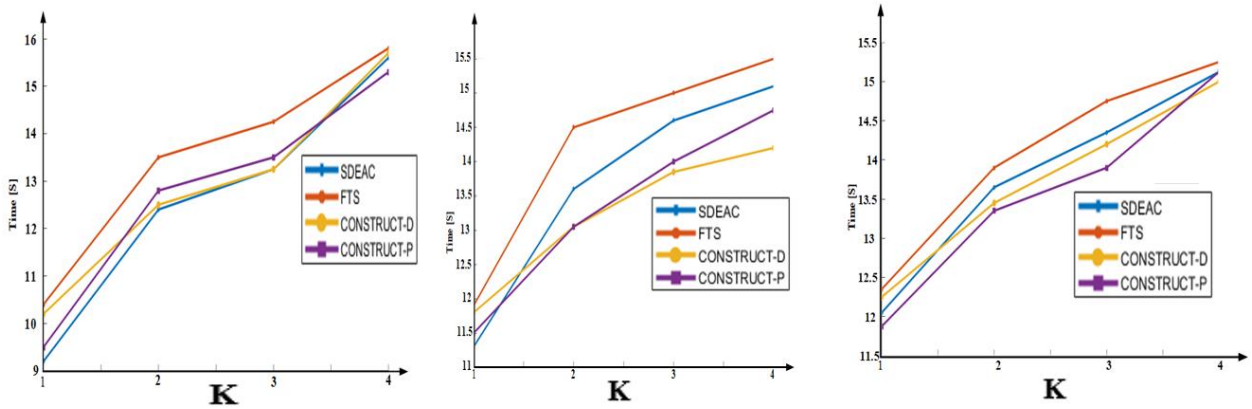
همچنین در رابطه با پیچیدگی فضایی پروتکل CONSTRUCT با پروتکل های FTS و SDEAC مقایسه شده است که نتایج در جدول شماره ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. مقایسه عملکردهای تحلیلی

پروتکل	روش	زمان	پیام	فضا

CONSTRUCT	هیبریدی (k-پرشی)	O(n)	O(n)	O(n logn)
FTS	هیبریدی (۱-پرشی)	O(n)	O(n)	O(n logn)
SDEAC	غیر هیبریدی (k-پرشی)	O(n)	O(n)	O(n logn)

در شکل ۵ تاثیر پارامتر k بر روی میانگین زمان همگرایی نشان داده شده است.k $(k \geq 1)$ برابر با بیشتر فاصله میان مرکز خوشه و یک عضو در خوشه می‌باشد. با این وجود، CONSTUCT زمان‌های همگرایی کمتری را دارد. این نتایج بیشتر به خاطر استفاده از استراتژی بکار گرفته شده است که به طور مستقیم از این استراتژی برای کاهش تاخیر دریافت پیام استفاده شده است تا توازن خوبی بین طول اتصال و کیفیت اتصال برقرار شود.

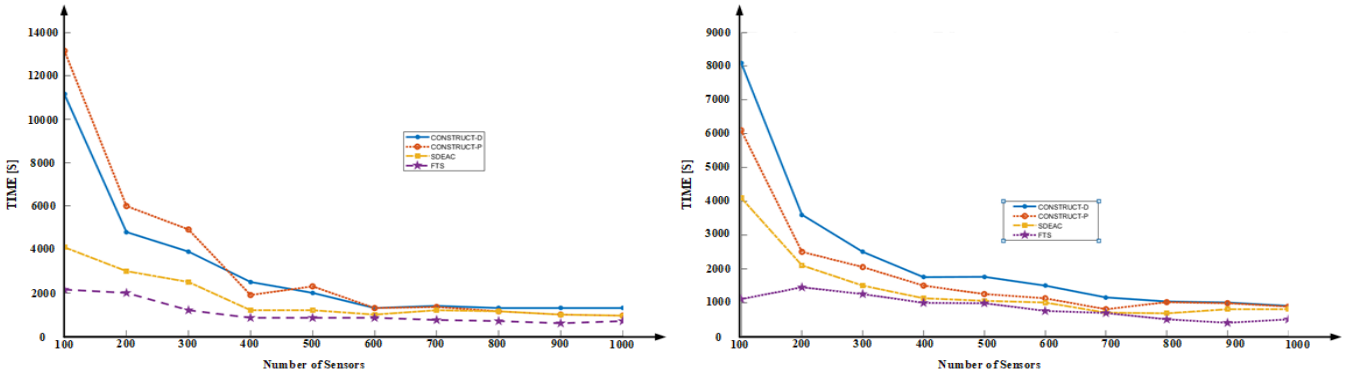


(a) (b) (c)

شکل ۵. تاثیر پارامتر k بر روی میانگین زمان همگرایی (الف) اندازه شبکه n= 100؛ (ب) اندازه شبکه n = 500؛ (ج) اندازه شبکه n = 1000.

۲-۳ کارآمدی انرژی

هدف این سری از آزمایشات ارزیابی قابلیت هر پروتکل برای ایجاد تاخیر در اتمام باتری و افزایش طول عمر شبکه است. برای این منظور، شبیه‌سازی‌ها را تا مرگ اولین همسایه سینک (FSND)، بدون تزریق خطاانجام شده است. نحوه تاثیرگذاری اندازه شبکه بر روی طول عمر آن مورد ارزیابی قرار گرفته است.تعداد تکرار هر آزمایش برابر با ۱۰۰ تکرار می باشد. نتایج بدست آمده دارای بازه اطمینان 95% است. در شکل ۶. کارآمدی انرژی نسبت به اندازه شبکه نشان داده شده است.شکل ۶- (الف) تا زمان FSND برای k = 1؛ و شکل ۶-(ب) تا زمان FSND برای k = 4 می باشد

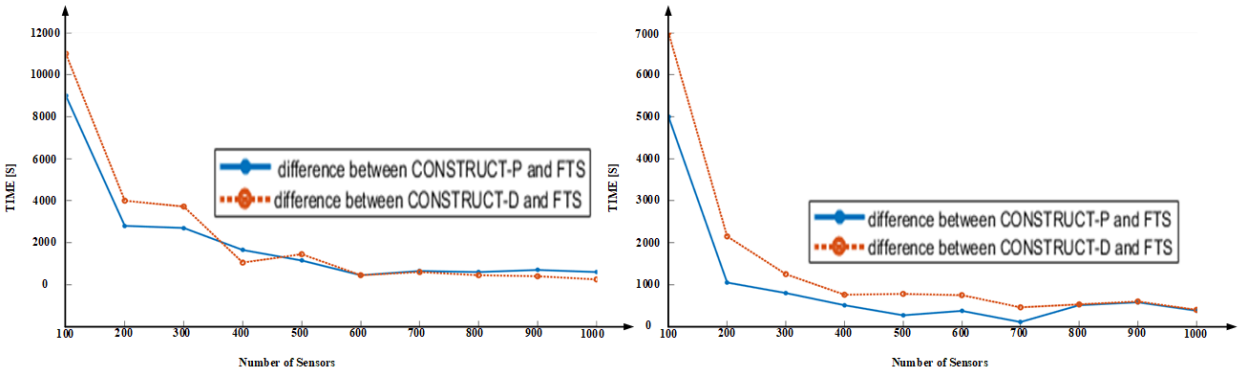


(b) (a)

شکل ۶. کارآمدی انرژی نسبت به اندازه شبکه؛ (الف) تا زمان FSND برای k = 1؛ (ب) تا زمان FSND برای k = 4

شکل ۶ مشخص میکند که صرف نظر از پروتکل استفاده شده، با افزایش اندازه شبکه، طول عمر آن کاهش می‌یابد.زیرا هر چه درجه یک گره بزرگتر باشد، آن گره تمایل بیشتری برای تبادل پیام خواهد داشت و در نتیجه باتری آن زودتر به اتمام می‌رسد. CONSTRUCT با زمان‌بندی فعالیت گره‌ها و کمینه‌سازی دامنه‌های آنها، به گره‌ها این امکان را می‌دهد تا اتلاف‌های انرژی را کاهش داده و طول عمر شبکه را افزایش دهند. FTS برخلاف SDEAC و CONSTRUCT برای شناسایی خطاها از طرح سیگنال‌سازی مبتنی بر ضربان قلب استفاده می‌کند. هزینه این استراتژی به ویژه هنگامی که اتصالات ضعیف می‌باشند بسیار زیاد است .

میزان اختلاف زمان همگرایی بین روش CONTRUCT و روش های FTS و SEDAC با افزایش تعداد سنسورها کم می شود این مساله به وضوح در شکل شماره ۷ نشان داده شده است.همچنین با افزایش مقدار K نیز این اختلاف کمتر می شود شکل ۷-الف برای حالت k=1 و شکل ۷-ب برای حالت k=4 می باشد.



(b) (a)

۴- ذخیره انرژی در شبکه بی سیم

عمر شبکه‌های حسگر بیسیم اساساً به راندمان ذخیره‌ی انرژی وابسته است. در این قسمت یک پروتکل کنترل توپولوژی خودپایداری کارآمد را برای WSN معرفی شده است. با کاهش قدرت مخابره هر گره اتصال شبکه در کنار حداکثر ذخیره‌ی انرژی برقرار می شود. مدلی که قرار است ذخیره انری در آن بررسی شود یک شبکه ادهاک بیسیم که از n حسگر تشکیل شده است. هر گره حسگر از یک پوشش چندجهتی استفاده می‌کند، به نحوی که پیام یک حسگر توسط تمام حسگرهایی که در دایره‌ای با مرکزیت آن حسگر قرار دارند، دریافت می‌شود. این دایره «دامنه مخابره» نامیده می شود.

۴-۱ الگوریتم خودپایدار ذخیره انرژی.

الگوریتم خودپایداری توزیع‌شده قدرت مخابره گره‌ها را کاهش می‌دهد و یک توپولوژی خاص را برای تسهیل مسیریابی ایجاد می‌کند. به همین منظور، ابتدا یک درخت فراگیر را طوری ساخته می شود که مسیر بین گره u تا ریشه r در درخت معادل با کمترین مسیر وزنی از u به r در گراف است. هر گره وزن فاصله‌ی خود از ریشه را ذخیره می‌کند. دوم اینکه، از این وزن برای ساخت یک MWCDS(مجموعه غالب متصل با حداقل وزن) استفاده شده که ستون فقرات را نمایش می‌دهد. نهایتاً، هر گره بسته به اینکه به ستون فقرات متعلق باشد یا نه، دامنه مخابره خودش را مشخص می‌کند. حسگری که در ستون فقرات قرار ندارد گره مغلوب نامیده می شود. این حسگر نزدیکترین همسایه خود در ستون فقرات (بر حسب فاصله اقلیدسی) را به عنوان گره غالب خود انتخاب می‌کند. آنگاه، دامنه مخابره خود را به فاصله اقلیدسی بین خود و گره غالبش کاهش می‌دهد. حسگری که در ستون فقرات قرار دارد، به منظور دسترسی به تمام همسایه‌های خود در ستوان فقرات و تمام گره‌های مغلوب خود، دامنه مخابره‌ی خود را کاهش می‌دهد.در نتیجه، تمام پیوندهای ارتباطی بین یک گره مغلوب و گره غالب و همچنین تمام پیوندهای ارتباطی در ستون فقرات دوجهتی هستند.

الگوریتم ارایه شده خودپایدار است و به انرژی مصرف‌شده در حسگرها وابسته است. چون این انرژی بر حسب زمان تغییر می‌کند، خطر اثر پینگ‌پونگ وجود دارد: مجموعه MWCDS می‌تواند همیشه تغییر کند و از این رو، الگوریتم هیچگاه پایدار نمی‌شود. برای اجتناب از این مشکل، به جای استفاده از انرژی مصرف‌شده‌ی جاری، از متغیری استفاده میشودکه انرژی مصرف‌شده در ساخت MWCDS را ذخیره می‌کند.

الگوریتم به شش بخش اصلی تقسیم می‌شود و هر بخش به صورت یک الگوریتم خودپایداری معرفی می‌شود. در هر الگوریتم، حسگرها می‌توانند متغیرهای الگوریتم‌های قبلی را بخوانند و همچنین می‌توانند متغیرهای الگوریتم جاری را بخوانند و بنویسند. این موضوع تضمین می‌کند که اگر یک بخش خودپایدار است پس کل الگوریتم خودپایدار خواهد بود.

این شش بخش به صورت زیر هستند:

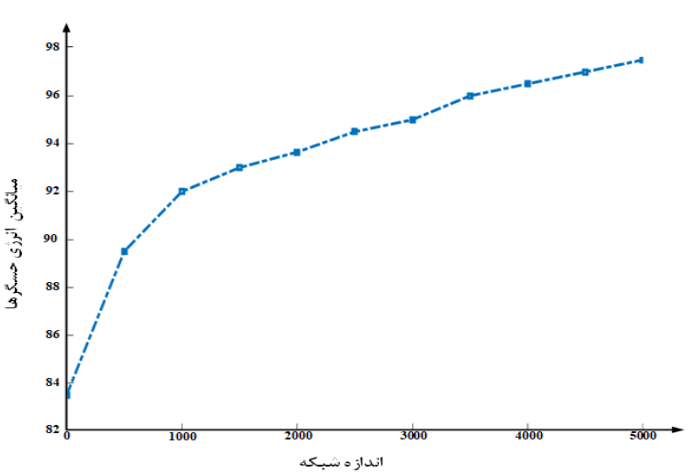
۱. بهنگام کردن انرژی مصرف شده در حسگرها: که به دلیل پیام‌های ارسالی گره رهبر انجام می‌شود.
۲. بهنگام کردن حالت: هر گره حالت محلی خود را به تمام همسایه‌های خود ارسال می‌کند.
۳. ساخت درخت فراگیر بر اساس انرژی‌های حسگر
۴. ساخت MWDS : این الگوریتم حسگرهایی با حداقل وزن موضعی را انتخاب می‌کند
۵. ساخت MWCDS : این الگوریتم حسگرهایی را انتخاب می‌کند که به عنوان اتصال دهنده بین حسگرهای موجود در MWDS عمل می‌کنند.
۶. کاهش دامنه محاسباتی

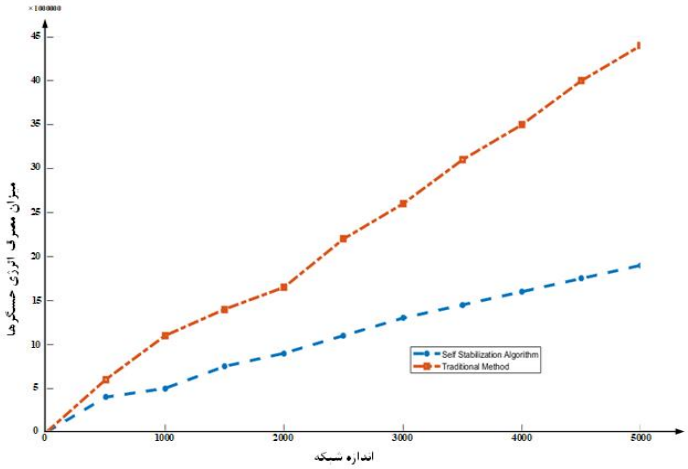
۲-۴ نتایج شبیه سازی

در این قسمت، به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم خودپایداری توزیع‌شده شبیه‌سازی ارایه شده است. در هر آزمایش، ۹ شبکه مختلف با اندازه‌های ۵۰۰ تا ۵۰۰۰ با نمو ۵۰۰ حسگر مطالعه شده است. برای هر اندازه، ۱۰۰ شبیه‌سازی انجام شد ه و فواصل اطمینان در سطح ۹۵ درصد محاسبه شده است. گره‌های حسگر به صورت تصادفی در مربع ۲۰۰ در ۲۰۰ متر توزیع شده و حداکثر دامنه‌ی مخابره‌ی هر گره برابر با ۲۵ متر است و انرژی باتری مقداری تصادفی بین ۱ و ۱۰۰ درصد است. نتایج شبیه سازی در شکل های شماره ۶ و ۷ ارایه شده است. هدف اصلی کاهش مصرف انرژی است. برای نشان دادن کارایی الگوریتم، متوسط انرژی مصرف‌شده در شبکه را با به‌کارگیری ستون فقرات برای مسیریابی پیام، محاسبه شده است. همچنین، انرژی مصرف‌شده در شبکه را در حالت مسیریابی بهینه (با استفاده از کوتاه‌ترین مسیر) و بدون کاهش دامنه مخابره، محاسبه می‌کنیم. تابع مصرف انرژی مبتنی بر مدل مصرف انرژی فوق‌الذکر و داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها است. متوسط انرژی مصرف‌شده در شبکه برای برقراری ارتباطات با استفاده از کوتاه‌ترین مسیر برابر است با، مجموع انرژی مصرف‌شده در ارسال‌ها و انرژی مصرف‌شده در دریافت‌ها می باشد. شکل ۶ انرژی مصرف‌شده در شبکه را بر اساس تعداد

حسگرهای موجود در شبکه نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که نتیجه استفاده از الگوریتم خودپایداری بهتر از مسیریابی بهینه با حداکثر دامنه است..

شکل ۶ درصد انرژی حسگرهای ستون فقرات را بر اساس تعداد حسگرهای شبکه نشان می‌دهد.همچنین نشان می‌دهد که الگوریتم خودپایداری کارآمد است. وهرچقدر اندازه شبکه بزرگتر باشد این الگوریتم نتایج بهتری را ارائه خواهد داد.با استفاده از الگوریتم خودپایداری ارایه شده انرژی مصرف‌شده در برقراری ارتباطات کاهش پیدا خواهد کرد. علاوه بر این، تنها حسگرهایی با بیشترین سطح باتری مسئول مسیریابی پیام خواهند شد

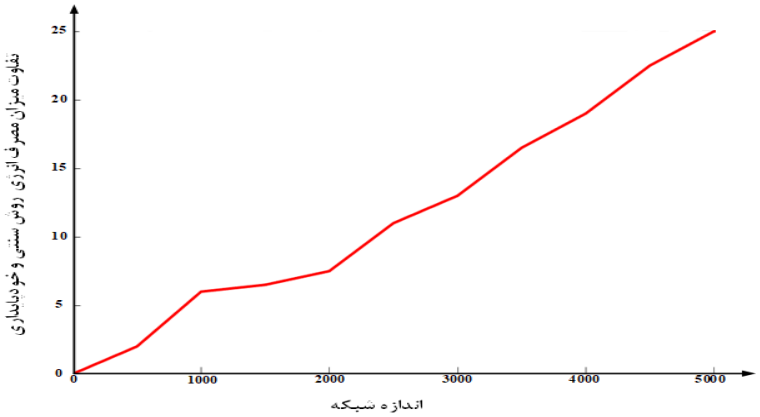




شکل ۶- مقایسه مصرف انرژی بین الگوریتم خودپایداری و مدل معمولی.

شکل شماره۷- متوسط انرژی حسگرهای غالب

همچنین با استقاده از نتایج بدست امده مشخص است که اختلاف بین دو روش در شبکه های با تعداد حسگر بالاتر ، بیشتر است. به عبارت دیگر الگوریتم خودپایداری در شبکه های با اتعداد سنسور بالاتر بهتر عمل میکند و مطلوبیت بهتری نسبت به سایر روش ها دارد.که این موضوع به وضوح در شکل شماره ۸ نشان داده شده است



شکل ۸ . اختلاف انرژی مصرفی نسبت به اندازه شبکه (تعداد حسگرها)

۵- نتیجه گیری

سیستم های توزیع شده یکی از مباحث مهم در علوم کامپیوتر است. یکی از موارد مهمی که در سیستم های توزیع شده نقش به سزایی داشته و بسیار مفید است، بحث خودپایداری است. این الگوریتم نسبت به به سایر راه حل ها و روش های کلاسیک، تحمل پذیری خطا ی بهتری دارد. شبکه‌های WSN با وجود تمام ایراداتی که دارند در زمینه‌های مختلفی از جمله امنیت، دفاع، تحقیقات، صنعت، کشاورزی و یا نظارت‌های محیطی بسیار مورد استقبال قرار گرفته‌اند. مصرف انرژی و کنترل اتصال در این شبکه ها از اهمیت و حساسیت بالایی برخوردار است. در این مقاله به بررسی کنترل اتصال و ذخیره انرژی در شبکه‌های WSN پرداخته شد. به منظور ایجاد یک توپولوژی ارتباطی کارآمد در یک شبکه WSN با گره‌های استاتیک از ترکیب روش های اصلی کنترل اتصال استفاده شد و از خاصیت خود-پایداری برای حفظ اتصال گره‌های فعال در زمان وقوع خطا استفاده گردیدکه منجر به کمینه کردن زمان همگرایی شد.همچنین در این مقاله نشان داده شد که با استفاده از الگوریتم خودپایداری میزان مصرف انرژی کاهش یافته و الگوریتم خودپایداری بهتر از مسیریابی بهینه با حداکثر دامنه است .هرچقدر اندازه شبکه بزرگتر باشد این الگوریتم نتایج بهتری را ارائه خواهد داد. کارایی روش ارایه شده با شبیه‌سازی های انجام شده به اثبات رسید

مراجع

[1] Selmic, R.R., Phoha, V.V., Serwadda, A.: ‘WSN platforms’, in Selmic, R.R., Phoha, V.V., Serwadda, A. (Eds.): ‘Wireless sensor networks: security, coverage, and localization’ (Springer International Publishing, Cham, 2016), pp. 197–215
[2] Younis, M., Senturk, I.F., Akkaya, K., et al.: ‘Topology management techniques for tolerating node failures in wireless sensor networks: a survey’, Comput. Netw., 2014, 58, pp. 254–283
[3] Kakamanshadi, G., Gupta, S., Singh, S.: ‘A survey on fault tolerance techniques in wireless sensor networks’. Proc. Int. Conf. Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT), Noida, India, October 2015, pp. 168–173
[4] Huang, Y., Martnez, J.-F., Sendra, J., et al.: ‘Resilient wireless sensor networks using topology control: a review’, Sensors, 2015, 15, (10), pp. 24735–24770
[5] Rossi, P.S., Ciuonzo, D., Ekman, T.: ‘HMM-based decision fusion in wireless sensor networks with noncoherent multiple access’, IEEE Commun. Lett., 2015, 19, (5), pp. 871–874
[6] Rossi, P.S., Ciuonzo, D., Kansanen, K., et al.: ‘On energy detection for MIMO decision fusion in wireless sensor networks over NLOS fading’, IEEE Commun. Lett., 2015, 19, (2), pp. 303–306
[7] Ciuonzo, D., Rossi, P.S.: ‘Distributed detection of a non-cooperative target via generalized locally-optimum approaches’, Inf. Fusion, 2017, 36, pp. 261–274
[8] Hamouda, E., Gerdes, J.: ‘Chapter 10: mobile wireless sensor networks: challenges and business applications’, in Mitton, N., Simplot-Ryl, D. (Eds.): ‘Wireless sensor and robot networks’ (World Scientific, Lille, 2014), pp. 249– 265
[9] Ojha, T., Misra, S., Raghuwanshi, N.S.: ‘Wireless sensor networks for agriculture: the state-of-the-art in practice and future challenges’, Comput. Electron. Agric., 2015, 118, pp. 66–84
[10] Rashid, B., Rehmani, M.H.: ‘Applications of wireless sensor networks for urban areas: a survey’, J. Netw. Comput. Appl., 2016, 60, pp. 192–219
[11] Fahmy, H.M.A.: ‘WSNs applications’, in (Eds.): ‘Wireless sensor networks: concepts, applications, experimentation and analysis’ (Springer, Singapore, 2016), pp. 69–213
[12] Pule, M., Yahya, A., Chuma, J.: ‘Wireless sensor networks: a survey on monitoring water quality’, J. Appl. Res. Technol., 2017, 15, (6), pp. 562–570
[14] R. Ramanathan and R. Rosales-Hain. Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment. In Proceedings of the Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM’00), pages 404–413, March 2000.
[13] Javier Gomez and Andrew T. Campbell. Variable-range transmission power control in wireless ad hoc networks. IEEE Trans. Mob. Comput., 6(1):87–99, 2007.

[15] Swetha Narayanaswamy, Vikas Kawadia, R. S. Sreenivas, and P. R. Kumar. The compow protocol for power control in ad hoc networks: Theory, architecture, algorithm, implementation, and experimentation, 2002.
[16] Ning Li, Jennifer C. Hou, and Lui Sha. Design and analysis of an mst-based topology control algorithm. IEEE Transactions on Wireless Communications, 4(3):1195–1206, 2005
[17] Shahid, A., Qureshi, H.K.: 'A survey on topology maintenance techniques to extend the lifetime of wireless sensor networks', in Shaikh, F.K., Chowdhry, B.S., Zeadally, S., et al. (Eds.): 'Communications in computer and information science' (Springer, Berlin, 2013), pp. 96–107
[18] Mao, G.: 'Connectivity of dynamic networks', 'Connectivity of communication networks', (Springer International Publishing, Cham, 2017), pp. 201–211
[19] Aziz, A.A., Sekercioglu, Y.A., Fitzpatrick, P., et al.: 'A survey on distributed topology control techniques for extending the lifetime of battery powered wireless sensor networks', IEEE Commun. Surv. Tutor., 2013, 15, (1), pp. 121–144
[20] Afsar, M.M., Tayarani-N, M.-H.: 'Clustering in sensor networks: a literature survey', J. Netw. Comput. Appl., 2014, 46, pp. 198–226
[21] Bhowmik, S., Basu, D., Giri, C.: 'k-Fault tolerant topology control in wireless sensor network', in Thampi, S.M., et al. (Eds.): 'Advances in intelligent systems and computing', (Springer International Publishing, Cham, 2014), pp. 371–377
[22] Singh, S.K., Kumar, P., Singh, J.P.: 'A survey on successors of LEACH protocol', IEEE. Access., 2017, 5, pp. 4298–4328
[23] Mazumdar, N., Om, H.: 'A distributed fault-tolerant multi-objective clustering algorithm for wireless sensor networks', in Nath, V. (Ed.): 'Lecture notes in electrical engineering' (Springer, Singapore, 2017), pp. 125–137
[24] Krishnan, R., Perumal, G.: 'H2b2h protocol for addressing link failure in WSN', Cluster Comput., 2017, pp. 1–10
[25] Mir, Z.H., Ko, Y.-B.: 'Collaborative topology control for many-to-one communications in wireless sensor networks', IEEE Access., 2017, 5, pp. 15927–15941
[26] Tseng, C.C., Ting, K.C., Wang, H.C., et al.: 'Construction and analysis of a green clustered architecture for RNG-based wireless ad hoc networks', Int. J. Ad Hoc Ubiquit. Comput., 2015, 19, (1/2), pp. 62–74
[27] Zebbane, B., Chenait, M., Badache, N.: 'A group-based energy-saving algorithm for sleep/wake scheduling and topology control in wireless sensor networks', Wirel. Pers. Commun., 2015, 84, (2), pp. 959–983
[28] Oladimeji, M.O., Turkey, M., Dudley, S.: 'HACH: heuristic algorithm for clustering hierarchy protocol in wireless sensor networks', Appl. Soft Comput., 2017, 55, pp. 452–461
[29] Chen, H., Lv, Z., Tang, R., et al.: 'Clustering energy-efficient transmission protocol for wireless sensor networks based on ant colony path optimization'. Proc. Int. Conf. Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS), Dalian, China, July 2017, pp. 15–19
[30] Dolev, S.: 'Self-stabilization' (The MIT Press, Cambridge, 2000)
[31] Dijkstra, E.W.: 'Self-stabilizing systems in spite of distributed control', Commun. ACM, 1974, 17, (11), pp. 643–644
[32] Erciyes, K.: 'Self-stabilization', in 'Distributed graph algorithms for computer networks' (Springer, London, 2013), pp. 97–104
[33] Ba, M., Flauzac, O., Haggar, B.S., et al.: 'Self-stabilizing k-hops clustering algorithm for wireless ad hoc networks'. Proc. Seventh Int. Conf. Ubiquitous Information Management and Communication – ICUIMC 13, Kota Kinabalu, Malaysia, January 2013, pp. 38:1–38:10

[34] Ba, M., Flauzac, O., Makhloufi, R., et al.: 'Fault-tolerant and energy-efficient generic clustering protocol for heterogeneous WSNs', Int. J. Adv. Netw. Serv., 2013, 6, (3–4), pp. 235–245
[35] Ba, M.: 'Vers une structuration auto-stabilisante des réseaux ad hoc: cas des réseaux de capteurs sans fil', PhD thesis, Université de Reims Champagne Ardenne, 2014
[36] Guizani, B., Ayeb, B., Koukam, A.: 'A stable k-hop clustering algorithm for routing in mobile ad hoc networks'. Proc. Int. Wireless Communications and Mobile Computing Conf. (IWCMC), Dubrovnik, Croatia, August 2015, pp. 659–664
[37] Ben-Othman, J., Bessaoud, K., Bui, A., et al.: 'Self-stabilizing algorithm for efficient topology control in wireless sensor networks', J. Comput. Sci., 2013, 4, (4), pp. 199–208
[38] Kuang, X.-H., Liu, L., Liu, Q., et al.: 'A clustering approach based on convergence degree chain for wireless sensor networks', Secur. Commun. Netw., 2014, 8, (10), pp. 1878–1889
[39] Boucetta, C., Idoudi, H., Saidane, L.A.: 'Adaptive scheduling with fault tolerance for wireless sensor networks'. Proc. 81st Vehicular Technology Conf. (VTC Spring), Glasgow, UK, May 2015, pp. 1–5
[40] Afsar, M., Tayarani-N., M.-H., Aziz, M.: 'An adaptive competition-based clustering approach for wireless sensor networks', Telecommun. Syst., 2015, 61, (1), pp. 181–204
[41] Afsar, M.M., Tayarani-N., M.-H.: 'A novel energy-efficient and distancebased clustering approach for wireless sensor networks', in Snasel, V., et al. (Ed.): 'Advances in intelligent systems and computing' (Springer, Cham, 2013), pp. 177–186
[42] Li, J., Mohapatra, P.: 'Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problem in sensor networks', Pervasive Mob. Comput., 2007, 3, (3), pp. 233–254
[43] Asharioun, H., Asadollahi, H., Wan, T.-C., et al.: 'A survey on analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problem in coronabased wireless sensor network', Wirel. Pers. Commun., 2014, 81, (1), pp. 161–187
[44] Peleg, D.: 'Low stretch spanning trees', in Diks, K., et al. (Eds.): 'Lecture notes in computer science' (Springer, Berlin, Heidelberg, 2002), pp. 68–80
[45] Elkin, M., Emek, Y., Spielman, D.A., et al.: 'Lower-stretch spanning trees', SIAM J. Comput., 2008, 38, (2), pp. 608–628
[46] Pundir, P., Ramakrishna, G.: 'On minimum average stretch spanning trees in grid graphs', Electron. Notes Discrete Math., 2016, 55, pp. 131–134
[47] M. Liu, Y. Zheng, J. Cao, G. Chen, L. Chen and H. Gong, "EADEEG: An Energy-Aware Protocol for Data Gathering Applications in Wireless Sensor Networks," Journal of Software, Vol. 18, No. 5, pp. 1092-1109, 2007.
[48] D. Ruan and J. Huang, "A PSO-Based Uneven Dynamic Clustering Multi-Hop Routing Protocol for Wireless Sensor Networks," Sensors, Vol. 19, No. 8, pp. 1-24, 2019.
[49] S. Ghasemnezhad and A. Ghaffari, "Fuzzy Logic Based Reliable and Real-time Routing Protocol for Mobile Ad hoc Networks," Wireless Personal Communications, Vol. 98, Issue 1, pp. 593-611, 2018.
[50] A. Alaybeyoglu, "A Distributed Fuzzy Logic-based Root Selection Algorithm for Wireless Sensor Networks," Computers and Electrical Engineering, Vol. 41, pp. 216–225, 2015.
[51] Y. Zhang, J. Wang, D. Han, H. Wu and R. Zhou, "Fuzzy-Logic Based Distributed Energy-Efficient Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks," Sensors, Vol. 17, pp. 1-21, 2017.
[52] A. Hamzah, M. Shurman , O. Al-Jarrah and E. Taqieddin, "Energy-Efficient Fuzzy-Logic-Based Clustering Technique for Hierarchical Routing Protocols in Wireless Sensor Networks," Sensors, Vol. 19, pp. 1-23, 2019.
[53] M. Khabiri and A. Ghaffari, "Energy-aware Clustering-based Routing in Wireless Sensor Networks Using Cuckoo Optimization Algorithm," Wireless Personal Communications, Vol. 98,

Issue 3, pp. 2473-2495, 2018.
[54] D.M.S. Bhatti, N. Saeed and H. Nam, "Fuzzy C-Means Clustering and Energy Efficient Cluster Head Selection for Cooperative Sensor Network," Sensors, Vol.16, No. 9, pp. 1-17, 2016.
[55] N. Saeed and H. Nam, "Cluster Based Multidimensional Scaling for Irregular Cognitive Radio Networks Localization," IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 64, pp. 2649–2659, 2016.
[56] Z. Mottaghinia and A. Ghaffari, "Fuzzy Logic Based Distance and Energy-aware Routing Protocol in Delay-tolerant Mobile Sensor Networks," Wireless Personal Communications, Vol. 100, Issue 3, pp. 957-976, 2018.
[57] B. Baranidharan and B. Santhi, "DUCF: Distributed Load Balancing Unequal Clustering in Wireless Sensor Networks Using Fuzzy Approach," Applied Soft Computing, Vol. 40, pp. 495–506, 2016.
[58] Zargham Heidari, Hamed Gorginpour,Mehdi Shahparasti, "A Comprehensive review of self-stabilization algorithm", Majlesi Journal of Mechatronic Systems,September.2021