

طراحی کارآمد توپولوژی شبکه‌های حسگر بی‌سیم: جایگذاری گره‌ها و ترمیم حفره‌های پوششی شبکه با استفاده از منطق فازی

لیلا رضایی^۱، قاسم میرجلیلی^۲، محسن حیدریان^۳

کارشناسی ارشد مخابرات سیستم، دانشکده مهندسی برق دانشگاه یزد،

استاد، دانشکده مهندسی برق دانشگاه یزد،

استادیار، دانشکده فناوری اطلاعات و مهندسی کامپیوتر دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، heydarian@azaruniv.ac.ir

چکیده

یکی از چالش‌های مهم در طراحی شبکه‌های حسگر بی‌سیم و موثر بر کارایی آنها، نحوه جایگذاری و آرایش حسگرها (WSN Deployment) است. زیرا همپوشانی پوششی (Coverage Overlapping) گره‌ها و برعکس ایجاد حفره‌های پوششی (Hole Coverage) در توپولوژی آنها می‌تواند به شدت کارایی شبکه و نیز طول عمر آن را کاهش دهد. این مقاله یک روش جدید و موثر توزیعی جهت تعمیر حفره‌های پوششی پیشنهاد می‌کند که اساس کار آن مبتنی بر میزان تراکم گره‌ها (Node Density) پس از جایگذاری تصادفی گره‌ها می‌باشد. الگوریتم پیشنهاد شده، Fuzzy Hole Repair Algorithm (FHORA)، قابلیت محدود گره‌ها در جابجایی را در نظر می‌گیرد و می‌تواند گره‌های متحرک مناسب را براساس درجه همپوشانی پوششی آنها با استفاده از یک مدل فازی انتخاب کند. برای تعمیر حفره‌های پوششی، گره‌های با تراکم بالا و انرژی کافی جابجا می‌شوند تا تراکم یکنواخت شبکه‌ای را بدون افزایش درجه پوششی همسایه‌های گره متحرک برقرار نمایند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که جابجایی گره‌ها در روش پیشنهادی در مقایسه با پروتکل‌های مشابه کمتر است. بعلاوه با این روش می‌توان مقدار قابل توجهی از همپوشانی پوششی را به حداقل رسانده و درصد پوشش دهی حفره‌ها را نیز حداکثر نمود.

کلیدواژه

طراحی شبکه‌های حسگر بی‌سیم، آرایش گره‌ها، منطق فازی، حفره پوششی، همپوشانی پوششی.

مقدمه

از آنها مدلسازی‌های مبتنی بر مفاهیم، اصول و قضایای ریاضی است.

به عنوان مثال در یک جایگذاری تصادفی، حسگرها به صورت تصادفی پراکنده می‌شوند که این روش موجب پیاده‌سازی ضعیف‌تر شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌شود. به عبارت دیگر بعضی نواحی خاص در محدوده‌ی نظارتی ممکن است دارای حفره‌های پوششی و همپوشانی پوششی زیادی شوند که به شکل قابل توجهی عملکرد شبکه را کاهش می‌دهد [۱]. اهمیت پوشش مناسب ناحیه‌ها و نیز کاهش حفره‌ها را می‌توان طی مثال‌های زیر بیشتر تشریح کرد:

همپوشانی پوششی جدی: اگر منطقه‌ی خاصی تحت پوشش هیچ حسگری نباشد حفره‌ی پوششی حادث شده و رخداد‌های واقع در آن ناحیه قابل شناسایی و ردیابی نخواهد بود. برعکس

شبکه‌های حسگر تجمع تعداد زیادی از گره‌های حسگر هستند که به صورت مستقل و با همکاری سایر گره‌ها، اهداف خاصی را دنبال می‌کنند. گره‌ها می‌توانند با گره‌های همسایه ارتباط برقرار کرده و اطلاعات خود را در اختیار آنها قرار دهند و در نهایت وضعیت محیط تحت نظر را به یک گره مرکزی به نام چاهک (sink) گزارش دهند [۱].

یکی از جنبه‌های مهم طراحی شبکه‌های حسگر، مسأله جایگذاری و آرایش مناسب حسگرها است. زیرا این آرایش بر تعامل گره‌ها و نیز کارایی مطلوب شبکه تأثیرگذار است. به‌منظور مدل‌سازی و حل مسائل مربوط به جایگذاری و آرایش گره‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم روش‌های متعددی وجود دارد که یکی

^۱ Monitoring Region

الگوریتم ژنتیک

دسته اول روش های مطرح در زمینه آرایش گره ها، مبتنی بر الگوریتم های ژنتیک است. این الگوریتم ها معمولاً برای بهینه سازی ساختار شبکه حسگر بی سیم با در نظر گرفتن بیش از یک هدف به کار می روند. بدین منظور در [۳]، یک الگوریتم ژنتیک چندمنظوره^۳ (MOGA)، برای آرایش بهینه n حسگر ساکن در یک ناحیه دوبعدی، با در نظر گرفتن دو هدف متضاد (حداکثر کردن پوشش ناحیه و حداکثر کردن طول عمر شبکه) ارائه شده است. نتایج حاصل یک بده بستان بین پوشش و طول عمر را نشان می دهند (هرچه پوشش افزایش یابد طول عمر کاهش می یابد). مؤلفین [۳] الگوریتم ژنتیک چندمنظوره پیشنهادی را در سه سناریوی نظارتی خاص به کار بردند و نشان دادند که الگوریتم پیشنهادی انعطاف پذیر است به این معنا که می تواند برای سناریوهای دیگر با مجموعه اهداف طراحی متفاوت نیز به کار رود. برای بهبود روش ارائه شده، در [۴] از یک نسخه ی ساده شده از الگوریتم ژنتیک، به نام الگوریتم ژنتیک میکروبی^۴ برای آرایش گره ها استفاده شد. الگوریتم های ارائه شده در بالا برای سناریوهای پیچیده و مسائل بزرگ مناسب نیستند و موجب کاهش کارایی محاسباتی و کند شدن الگوریتم می گردند. در [۵] به منظور بهبود سرعت و کارایی، استفاده از تکنیک های نرمال سازی پیشنهاد شده است.

در روش اول، سناریوهای جایگذاری که شامل هزاران حسگر می باشند، اندازه ی کروموزوم و اندازه ی جمعیت می تواند بسیار بزرگ شود. این موضوع باعث کند شدن الگوریتم شده و کارایی محاسباتی آن را پایین می آورد. که این مسئله در روش دوم کمی بهبود یافته است ولی از این روش ها فقط به صورت متمرکز می توان استفاده کرد. و پیچیدگی این روش ها به تعداد حسگرها وابسته است. و از همه مهم تر اینکه ویژگی خودسازماندهی را ندارند.

بهینه سازی ازدحام ذرات

دسته دوم روش ها، استفاده از روش بهینه سازی ازدحام ذرات^۵ (PSO) در آرایش گره های شبکه های حسگر بی سیم نسبت به رویکردهای دیگر نسبتاً جدید و محدود است. در اولین تلاش تحقیقاتی در زمینه ی استفاده از این روش، فرض می شود که حسگرها در ابتدا به صورت تصادفی قرار گرفته اند و یک الگوریتم جایگذاری متمرکز مبتنی بر بهینه سازی گروه ذرات به نام (PSO-Grid) پیشنهاد می شود. این ایستگاه مرکزی مکان های بهینه را پس از همگرایی الگوریتم، برای حسگرهای دارای جایگذاری تصادفی خواهد فرستاد تا مساحت تحت پوشش ناحیه مورد نظر بیشینه شود. هر ذره درون دسته مورد استفاده در PSO-

همپوشانی پوششی جدی عبارت است از یک مقدار از تقاطع نواحی پوششی ایجاد شده توسط چندین حسگر که به شکل قابل توجهی عملکرد شبکه را کاهش می دهد. به علاوه، خراب شدن قطعات الکترونیکی، باگ های نرم افزاری و عوامل مخرب نیز می توانند منجر به مرگ تصادفی گره ها شوند. همچنین گره ها ممکن است به دلیل تمام شدن انرژی باتری نیز از کار بیافتند. این موارد همگی باعث می شوند شبکه پوشش مطلوب یا اتصال پذیری خود را از دست بدهد که پیامد آن کاهش کارایی شبکه است.

کاربردهای موردی حیاتی: حسگرها معمولاً در محیط های دوردست یا خطرناک از قبیل میدان جنگ یا بیابان به کار گرفته می شوند، که در این نواحی شارژ دوباره یا تعویض باتری گره غیرممکن است. با این حال، داده های جمع آوری شده توسط حسگرها معمولاً بسیار حیاتی است و ممکن است دارای اهمیت علمی یا استراتژیک ویژه ای باشد. به همین دلیل، پوشش به دست آمده در شبکه های حسگر یک ملاک حیاتی و کلیدی برای کارایی آن بوده و نگهداری از آن برای ایجاد یک شبکه ی ارتباطی کارآمد بسیار ضروری است.

لذا برای اطمینان از این مسئله که ناحیه ی نظارتی به صورت کامل پوشش داده شده است یا خیر، چندین الگوریتم قرارگیری به جای قرارگیری تصادفی ارائه شده اند. روش های جدید مبتنی بر شیوه های اکتشافی، هوش مصنوعی، ریاضیات فازی و غیره هستند و همگی تلاش می کنند با حجم کمی از محاسبات مطلوب ترین پوشش و کمترین حفره را در جای گیری گره ها اعمال کنند.

مابقی این مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است: در بخش ۲، کارهای پیشین مرور و بررسی شده است. و در بخش ۳ فرمول بندی مسائل، الگوریتم پیشنهادی جهت ترمیم حفره های پوششی با استفاده از روش فازی در بخش ۳ توصیف شده است. ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی و مقایسه و نتایج عددی در بخش ۴ انجام شده است و نتیجه گیری ها در بخش ۵ مقاله و تحقیقات آینده در بخش ۶ ارائه شده است.

مروری بر پژوهش های پیشین

چهار روش مختلف برای جایگذاری حسگرها در شبکه های حسگر مورد استفاده قرار گرفته است که عبارتند از: الگوریتم ژنتیک، میدان پتانسیل مصنوعی، بهینه سازی ازدحام ذرات و هندسه محاسباتی [۱]. در سال های اخیر پژوهش های بسیاری در این زمینه ها صورت گرفته است، برخی از این پژوهش ها به شرح زیر می باشد.

^۴ Microbial Genetic Algorithm
^۵ Particle Swarm Optimization

^۲ Bug
^۳ Multi-Objective Genetic Algorithm

مبتنی بر APF را با نام تشخیص و حل حفره‌ها (HEAL) برای آرایش مجدد شبکه حسگر بی‌سیم متحرک، ارائه می‌دهند. الگوریتم HEAL برای تشخیص، اندازه‌گیری و رفع حفره‌های پوششی در MWSN ها طراحی شده است. این الگوریتم در دو مرحله عمل می‌کند. در مرحله اول، یک الگوریتم تشخیص حفره توزیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد تا حفره‌های پوششی در ناحیه مطلوب را یافته، اندازه‌ی آن‌ها را تخمین‌زده و مرکز آن‌ها را مکان‌یابی نماید. در مرحله دوم، قابلیت جابه‌جایی حسگر مورد استفاده قرار می‌گیرد تا حفره‌های یافته شده پوشانده شوند. این عمل از طریق اعمال یک الگوریتم باز مکان‌یابی توزیعی مبتنی بر APF انجام می‌گیرد تا همپوشانی پوشش به حداقل برسد. روش HEAL در حالت‌های مختلف با تغییر تعداد و اندازه‌ی حفره‌ها شبیه‌سازی شده است. همان‌طور که می‌دانیم آرایش و جایگذاری شبکه‌های حسگر بی‌سیم در نواحی موردنظر، پرتنش یا بسیار پویا مستلزم استفاده از روند آرایش جایگذاری است که ویژگی‌های خودسازمان‌دهی را برای شبکه فراهم آورد. البته این روش از هزینه بالایی برخوردار است. بخشی از این هزینه‌ی بالا به علت قابلیت‌های دریافت وسیعی است که حسگرهای متحرک برای تشخیص محیط خود به آن‌ها نیاز دارند (مانند یک لیزر محدود‌یاب) و بخشی نیز به دلیل حرکت مکرر حسگرها است که طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم را کاهش می‌دهد.

هندس‌ه محاسباتی

دسته چهارم روش‌ها، از ویژگی‌های منحصر به فرد الگوریتم‌های مبتنی بر هندسه محاسباتی در ارزیابی پوشش محلی و تشخیص حفره‌های پوششی بهره می‌برند. یک الگوریتم کارآمد جهت آرایش گره‌های با قابلیت حس کردن مختلف در مرجع [۹] به‌منظور بهبود وضعیت پوشش، معرفی گردیده است. اساس کار این الگوریتم پیدا کردن حفره‌های پوششی به‌وسیله دیگرام ورونوی چندگانه می‌باشد که پس از کشف حفره‌ها، حسگرهای متحرک به‌منظور کاهش حفره‌ها و بیشینه‌سازی پوشش به سمت محل مناسب حرکت می‌کنند. و همچنین چندین مطالعه بر مبنای دو ساختار هندسه محاسباتی: دیگرام ورونوی و مثلث دیلانی انجام شده است. در [۱۰]، نویسندگان تأثیر تراکم بهینه‌ی گره‌ها را با تعداد متناهی گره‌ها و با ناحیه‌ی نامتناهی و تعداد گره‌های نامتناهی موردبررسی قرار می‌دهند. یک الگوی بهینه‌ی قرارگیری مجانبی در [۱۱] ارائه شده است تا اتصال چهارگانه و پوشش کامل با دامنه‌های پوششی و ارتباطی متغیر به‌دست آید. در [۱۲] یک الگوریتم حذف موارد اضافی بر اساس

Grid نشان‌دهنده‌ی یک راه‌حل جایگذاری است که شامل مکان‌های تمامی گره‌های حسگر درون ناحیه موردنظر می‌باشد. بنابراین، PSO-Grid هر ذره‌ی درون دسته را به شکل زیر کدگذاری می‌کند: مکان یک حسگر یکتای z با استفاده از مختصات دکارتی (x_i, y_i) آن توصیف می‌شود و برای N حسگر، ابعاد یک ذره در این دسته، دو برابر تعداد حسگرها یعنی $2N$ می‌باشد. این الگوریتم با ایجاد یک عدد تصادفی برای راه‌حل‌ها یا ذرات آغاز می‌شود.

به‌منظور ارزیابی هر راه‌حل، یعنی جایگاه کنونی یک ذره در فضای جست‌وجو، یک تابع برازش مورد استفاده قرار می‌گیرد. از لحاظ منطقی، تابع برازش انتخاب شده در PSO-Grid عبارت است از پوشش محلی ناحیه موردنظر. محاسبه‌ی مساحت پوشش با ایجاد یک شبکه‌ی یکنواخت بر روی ناحیه موردنظر انجام می‌گیرد. تمامی نقاط شبکه‌ای واقع در ناحیه موردنظر دارای برچسب صفر یا یک هستند بسته به اینکه با فرض مدل حس کردن دوتایی، آیا به‌وسیله‌ی حداقل یک حسگر پوشش داده می‌شوند یا خیر.

نویسندگان عملکرد PSO-Grid را با مقایسه‌ی نتایج آن با یک الگوریتم ژنتیک دارای کدگذاری مشابه، ارزیابی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که هرچند هر دوی این الگوریتم‌ها پس از تعداد بیشینه‌ی تکرارهای مشخص‌شده به راه‌حل‌های نزدیک بهینه همگرا می‌شوند، ولی بهینه‌سازی گروه ذرات بسیار سریع‌تر از الگوریتم ژنتیک همگرا می‌شود [۶].

در [۷] موقعیت مناسب گره‌ها با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل محاسبه گردیده است، به‌نحوی که طول عمر شبکه بیشینه گردد. این الگوریتم در مسائل آرایش گره‌ها در مقایسه با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، کارایی بهتری دارد. این الگوریتم به‌منظور جلوگیری از تخلیه‌ی باتری همه‌ی گره‌ها در یک زمان، به نحوی آرایش را انجام می‌دهد که با کمترین تعداد حسگرهای روشن، به مقدار پوشش رضایت‌بخش برسد و حسگرهای دیگر را برای استفاده‌های بعدی نگه می‌دارد که این امر موجب افزایش طول عمر شبکه می‌گردد. توجه شود که در شبکه‌های حسگر بی‌سیم بیشینه‌سازی پوشش با حداقل تعداد حسگرها یک مسئله چالش برانگیز است.

میدان پتانسیل مصنوعی

دسته سوم روش‌ها، الگوریتم‌های مبتنی بر میدان پتانسیل مصنوعی^۶ (APF) می‌باشند. این الگوریتم‌ها که وابسته به جابه‌جایی هستند، معمولاً الگوریتم‌های آرایش مجدد برای (MWSN)^۷ هستند. در مرجع [۸]، یک الگوریتم توزیعی جامع

^۶ dEtection And Healing Hole

^۷ Artificial Potential Field
Mobile Wirelss Sensor Network

شده است و به این طریق تراکم یکپارچه و یکنواخت شبکه حفظ می شود.

- الگوریتم هایی برای انتخاب گره های متحرک بر اساس بالاترین درجه ی پوششی آن ها طراحی شده اند که می توان آن ها را به شکلی خودکار در هر گونه ناحیه ی نظارتی محدب با حفظ قابل توجه یکپارچگی شبکه اجرا کرد.
- الگوریتم هایی طراحی شده اند تا حفره های پوششی چندگانه ی شبکه با استفاده از تعداد اندکی گره متحرک بدون همپوشانی و طبق ارتباط کنونی شبکه، تعمیر گردند. در این روش، قابلیت جابه جایی گره ها تنها به اندازه یک hop محدود شده است.

در این روش با توجه به محاسن زیادی که نسبت به روش های گذشته داشته ولی معایبی نیز دارد به این ترتیب که در انتخاب گره متحرک فقط میزان درجه همپوشانی را در نظر گرفته است و نحوه ی محاسبه برای انتخاب گره متحرک احتیاج به محاسبات زیادی دارد. از این رو برای بهبود این روش و برطرف کردن معایب آن، این مقاله روشی جدید را ارائه داده است که از منطق فازی استفاده می کند. مهم ترین دستاوردهای حاصل شده در این تحقیق این است که با تغییر روش، مرجع [۱۸] را می توان به شکل خلاصه به این شیوه بیان نمود: استفاده از روش فازی با هدف انتخاب گره نامزد مناسب با در نظر گرفتن پارامترهای انرژی باقیمانده، فاصله نسبت به محل مورد نظر و تعداد گره های پوشش دهنده است که به عنوان ورودی های سیستم فازی در نظر گرفته شده اند. روش جدید موجب بهبود الگوریتم در پارامترهای زیر شده است:

- متوسط درصد ناحیه همپوشانی
- متوسط فاصله جابه جایی
- متوسط درصد ناحیه تعمیر حفره
- متوسط تعداد گره های متحرک

بیان غیررسمی و رسمی مساله

یک شبکه ی حسگر بی سیم همگن دارای پوشش و اتصال پذیری کامل را در نظر بگیرید که در آن گره ها به صورت تصادفی قرار گرفته اند. در هنگام جایگذاری ممکن است بخش هایی از شبکه دارای درجه ی بالاتری از پوشش باشند در حالی که بخش های دیگر به صورت پراکنده پوشش داده شده باشند. پس از جایگذاری و نیز در حین کار کردن شبکه به دلیل مرگ قابل پیش بینی یا غیرقابل پیش بینی تعدادی از گره ها (اتمام انرژی باتری) ممکن است حفره های پوششی به وجود آیند. فرض می شود که هر حسگر، مکان خود و اطلاعات مکانی همسایه های تک گامی خود

نمودار ورونی ارائه شده است. نویسندگان چندین الگوی بهینه را در [۱۳] طراحی نموده اند که از قرارگیری شبکه ای تکامل یافته اند تا اتصال k و پوشش کامل را در فضای سه بعدی بدون محدودیت دامنه ی تشخیص یا دامنه ارتباط تضمین کنند. یک روش مبتنی بر چندوجهی در [۱۴] ارائه شده است تا به الگوهای قرارگیری بهینه برای درجه ی بالاتری از اتصال با نسبت های مشخص R_s به R_c به دست آید تا ناحیه ی همپوشانی بین گره های فعال در هر مجموعه ی عملیاتی را بدون همپوشانی در اتصال و پوشش به حداقل می رساند. هر چند تئوری گراف یک نقش حیاتی را برای بهبود پوشش ایفا می کند، ولی استثنائاتی نیز وجود دارد. در [۱۵]، نویسندگان از نمودار ورونی وزن دار افزایشی استفاده می کنند تا مکان جدید حسگر متحرک را در سلول ورونی آن تعیین کنند. با این حال، اگر تعداد گره های به کار گرفته شده کافی نباشد، حفره های پوششی بزرگ ممکن است در شبکه ایجاد شوند. هر چند یک الگوریتم نگهداری اتصال مبتنی بر یک گراف مجاورتی نسبی [۱۶] با فاصله ی جابه جایی گره های متحرک پیشنهاد شده است، این الگوریتم پوششی مبتنی بر بردار نمی تواند کمینه شدن ناحیه ی همپوشانی را تضمین کند. محققین در [۱۷] پوشش مجانبی را تحت یک طرح استقرار یکنواخت با مدل جابه جایی حرکتی تصادفی مورد تحلیل قرار می دهند.

روش هندس محاسباتی از لحاظ توانایی تطبیق با تغییرات در ناحیه مورد نظر از سایر روش ها بهتر بوده و همچنین می توان از این روش هم به صورت متمرکز و هم به صورت توزیعی استفاده نمود. این روش جایگذاری، پیچیدگی و نیاز به تجهیزات کمتری دارد و با توجه به ویژگی منحصر به فرد آن روش مناسبی برای حفره یابی و ترمیم آن می باشد. بر این اساس، در این مقاله روشی توزیعی مبتنی بر هندسه محاسباتی و منطق فازی جهت ترمیم حفره های پوششی در شبکه های حسگر بی سیم ارائه می شود.

هر چند الگوریتم های مختلفی برای آرایش و خودسازماندهی شبکه حسگر بیسیم وجود دارد، ولی تا آنجا که مطالعه گردید هیچ کدام از این مقالات به این مسئله نمی پردازند که چگونه تصحیح و پوشش دوباره ی حفره های پوششی را با کمینه سازی درجه ی همپوشانی پوششی، به حداکثر برسانیم. بنابراین، الگوریتمی را برای کمینه سازی همپوشانی پوششی شبکه با جابه جایی گره ها از نواحی همپوشانی جدی پوششی و تعمیر حفره های پوششی، در مرجع [۱۸] طراحی کردند. روش کار در این تحقیق به این صورت است که:

- یک الگوریتم مبتنی بر برنامه نویسی غیرخطی (NLP) توزیعی برای کمینه سازی همپوشانی پوششی گره ها به دلیل قرارگیری تصادفی پیشنهاد

اگر این مجموعه تنها یک گره $K_h \leq 4$ داشته باشد، یا اگر بیش از یک گره $K_h \leq 4$ داشته و این گره ها ارتباطی با هم نداشته باشد در غیر اینصورت

$\gamma = \begin{cases} 1 & \text{اگر این مجموعه تنها یک گره } K_h \leq 4 \text{ داشته باشد، یا اگر بیش از یک گره } K_h \leq 4 \text{ داشته و این گره ها ارتباطی با هم نداشته باشد} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$

p : تعداد نقاط تقاطع (P_i) بین یک گره نامزد و همسایه‌های تک گامی آن به گونه‌ای که:

$P_j - 1$ یک نقطه‌ی پوششی بوده و توسط دو یا سه حسگر پوشش داده شده باشد.

$\bar{C}_i P_j = R_s - 2$: که در آن C_i مکان همسایه‌های تک گامی یک گره نامزد و R_s برد حس کردن آن می‌باشد.

$\bar{C}_j P_j \leq R_s - 3$: که در آن C_j مکان گره نامزد و R_s برد حس کردن آن می‌باشد.

مجموعه‌ی نقاط تقاطع (P_i) که با تعریف بالا منطبق است V_p نامیده می‌شود.

در روش جدید فرض می‌شود گره‌ها به صورت تصادفی توزیع شده‌اند. به دلیل جایگذاری تصادفی گره‌ها، توزیع یکنواخت گره‌ها را نمی‌توان تضمین کرد. از آنجایی که حفظ پوشش و ارتباط شبکه به شدت ضروری می‌باشد و یک ناحیه کوچک بدون نظارت می‌تواند کل هدف شبکه را از بین ببرد، HORA به بررسی این مسئله می‌پردازد که چگونه می‌توان پوشش حفره‌های ایجاد شده را با کمینه‌سازی درجه همپوشانی پوششی به حداکثر رساند. بدین منظور روشی برای کمینه‌سازی همپوشانی پوششی شبکه با جابجایی گره‌ها از نواحی با همپوشانی زیاد جمعیت و تعمیر حفره‌های پوششی طراحی شده است [۱۸].

بنابراین، هدف روش جدید تعمیر حفره‌های پوششی با جابه‌جا نمودن تعداد اندکی از حسگرها از نواحی دارای همپوشانی وسیع به ناحیه‌ی حفره می‌باشد به گونه‌ای که تراکم یکنواخت گره‌ها را بتوان در کل شبکه برقرار و حفظ نمود. در الگوریتم جدید، یک گره متحرک براساس بالاترین درجه‌ی پوششی (k_h) و در نظر گرفتن پارامترهای انرژی باقیمانده، فاصله نسبت به محل مورد نظر با استفاده از روش فازی انتخاب شده و مکان جدید گره متحرک بدون صدمه به پوشش و ارتباط شبکه با استفاده از روش مرجع [۱۸] محاسبه می‌شود.

روند دقیق الگوریتم تعمیر حفره پیشنهادی در ادامه توصیف شده است.

الگوریتم توزیعی تعمیر حفره‌های پوششی با استفاده از روش فازی برای شبکه‌های حسگر بیسیم (FHORA)

انتخاب یک گره متحرک با استفاده از روش فازی در الگوریتم

را می‌داند. لذا همسایه‌های تک‌گامی نزدیک یک گره مرده، مکان حفره‌های درون شبکه را بر اساس مکان گره‌های مرده، می‌دانند. همچنین فرض می‌شود که برد ارتباطی (R_c) دو برابر برد حس کردن (R_s) باشد. حال چند اصطلاح را که در ادامه مورد استفاده قرار می‌گیرند، تعریف می‌کنیم.

گره‌های مرزی: به همسایه‌های یک گره مرده، گره‌های مرزی گویند

k -cover: پوشش k عبارت است از مقدار اشتراک نواحی پوششی ایجاد شده توسط k حسگر.

مقدار K_h : اگر یک حسگر S_i دارای m همسایه‌ی تک‌گامی S_j با $\forall i = 1, 2, 3, \dots, m$ و $i \neq j$ باشد به گونه‌ای که $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$ تمامی حالات ممکن پوشش k گره S_i با S_j ها برای $m \neq n$ باشند، آنگاه

$$K_h - \text{value} = \max\{k_1, k_2, k_3, \dots, k_n\}.$$

برای مثال، ابتدا تمامی پوشش‌های k ممکن گره را با همسایه‌های تک‌گامی آن را پیدا کرده و بالاترین مقدار این پوشش‌های k همان مقدار K_h است.

گره نامزد (داوطلب): اهر گره‌ای که بخواهد از ناحیه‌ی اضافی $(K_h \geq 4)$ جابه‌جا شود تا حفره را تعمیر کند، گره نامزد نامیده می‌شود. یک گره نامزد با جابه‌جایی به سمت حفره‌ی پوششی مقدار K_h خود را کاهش می‌دهد.

تعریف غیررسمی مساله:

هدف اصلی روش جدید کاهش مقدار K_h گره‌ها با حرکت دادن آن‌ها از ناحیه‌ی اضافی $(K_h \geq 4)$ با در نظر گرفتن کمترین فاصله و بیشترین انرژی برای تعمیر حفره‌های پوششی می‌باشد.

α : کاردینالیته^{۱۲} (تعداد عناصر) مجموعه‌ی همسایه‌های تک‌گامی یک گره نامزد که (۱) ناحیه‌ی همپوشانی مشترک S را دربرنمی‌گیرد و (۲) یک گره با $(k_h \geq 4)$ می‌باشد توسط α نشان داده می‌شود.

β : اگر کاردینالیته (تعداد عناصر) مجموعه‌ی همسایه‌های تک‌گامی یک گره نامزد، که $k_h \geq 4$ گره‌های هستند با x نشان داده شود، آنگاه β به شکل زیر تعریف می‌گردد:

$$\beta = \begin{cases} \text{اگر گره نامزد } \square \text{ یک گره مرزی نباشد, } x \\ \text{اگر گره نامزد } \square \text{ یک گره مرزی باشد, } \infty \end{cases} \quad (1)$$

γ : براساس مجموعه همسایه‌های تک‌گامی یک گره نامزد و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$(2)$$

^{۱۲} Cardinality

^{۱۳} Boundary Nodes

^{۱۴} Candidate Node

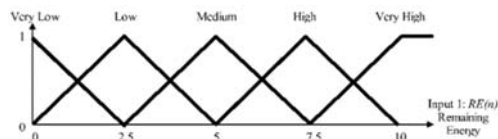
در نهایت، گره نامزدی که بالاترین مقدار را دارد برای جایجایی و پوشش ناحیه موردنظر انتخاب می شود. مثالی از جدول ایجاد شده در هر گره در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. مثالی از جدول ایجاد شده در هر گره

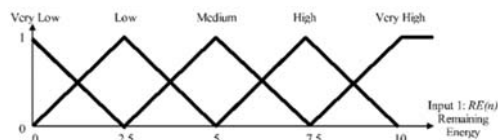
Node ID	Remaining Energy(j)	Distance (m)	NodeCover	
17	4.17	67	4	0.32
6	3.23	76	3	0.28
22	4.1	53.3	5	0.39
73	4.3	48.6	6	0.48
99	3.5	66.09	4	0.31
18	2.3	80.01	2	0.44
4	3.8	49	3	0.37

در این پژوهش از سیستم فازی ممدانی برای تصمیم گیری استفاده شده و برای فازی سازی و غیرفازی سازی از توابع عضویت مثلثی استفاده شده است. در شکل های ۲ تا ۴، نمودار پارامترهای ورودی سیستم فازی نمایش داده شده است. در شکل ۲، انرژی اولیه گره ها ۱۰ ژول و حداقل انرژی صفر در نظر گرفته شده است. این میزان انرژی باقیمانده می تواند در پنج سطح Very High, High, Medium, Low و Very Low قرار گیرد. میزان انرژی باقیمانده هر گره نامزد در شبکه می تواند در یکی از این سطوح یا نهایتاً در دو سطح متوالی قرار گیرد. هر قدر میزان انرژی باقیمانده گره نامزد بالاتر باشد نشان دهنده پر ارزش تر بودن آن گره است. ورودی دوم سیستم فازی پیشنهادی، میزان فاصله گره نامزد تا ناحیه موردنظر است. هر قدر این مقدار برای یک گره نامزد بالاتر باشد اولویت پایین تری به گره نامزد داده می شود. حداکثر میزان فاصله برابر است با قطر محیط ایجاد شده بین گره نامزد و ناحیه موردنظر. در نهایت ورودی سوم سیستم فازی پیشنهادی را درجه پوشش در نظر گرفته ایم. هر قدر این میزان بالاتر باشد نشان از نرخ پوشش بالا بوده و شانس انتخاب گره نامزد را برای جایجایی افزایش می دهد.

در شکل ۵ هزینه تابع عضویت هر قانون فازی در بازه [0,1] مشخص شده است. هر قدر میزان این هزینه بیشتر باشد قانون مذکور ارزش بالاتری دارد.



شکل ۲. میزان انرژی باقیمانده گره نامزد



شکل ۳. فاصله گره نامزد تا محل مورد نظر

ارائه شده در این پژوهش برای انتخاب یک گره متحرک از منطق فازی استفاده خواهد شد که تابع درجه عضویت آن به صورت مثلثی است. در این الگوریتم در گام نخست به جای استفاده از پارامترهای α, β, ρ در مرجع [۱۸] از پارامترهای پیشنهادی و محاسبه ارزش فازی آنها استفاده می شود. زیرا [۱۸] برای انتخاب گره نامزد متحرک نیاز دارد ابتدا محاسبات پیچیده ای انجام دهد و تنها بالاترین درجه ی پوششی (K_h) را مد نظر قرار می دهد. لذا ممکن است با جایجایی گره ای که بالاترین همپوشانی را دارد ولی انرژی کمی دارد به جای بهبود وضعیت، خود موجب ایجاد حفره گردد. در روش جدید هدف این است: انتخاب گره متحرک با بیشترین انرژی باقیمانده، کمترین فاصله نسبت به حفره مورد نظر و نیز بیشترین درجه پوشش (K_h) . در شکل ۲، شمایی از سیستم فازی پیشنهادی نمایش داده شده است. هر گره نامزد در شبکه در هر واحد زمانی یک وضعیت مشخص خواهد داشت که برگرفته از ۳ پارامتر: (۱) انرژی باقیمانده، (۲) فاصله نسبت به محل موردنظر و (۳) درجه پوشش گره خواهد بود. اما این ۳ پارامتر پس از ورود به سیستم فازی پیشنهادی و انجام عملیات فازی و تطابق با قوانین، تبدیل به خروجی سیستم فازی می گردد که به عنوان هزینه گره نامزد n در نظر گرفته خواهد شد که روش محاسبه آن به شرح زیر است: این سیستم جهت محاسبه هزینه برای هر یک از گره های نامزد استفاده می گردد. برای گره (n) ، این هزینه $NC(n)$ توسط سه پارامتر زیر تعریف می گردد:

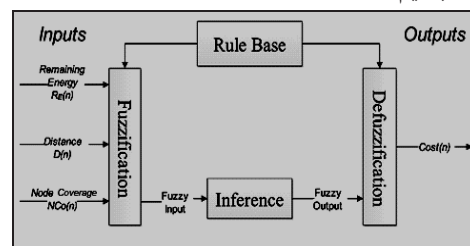
(الف) باقیمانده انرژی (ورودی اول): انرژی باقیمانده گره n .
 (ب) فاصله نسبت به حفره مورد نظر (ورودی دوم): این پارامتر فاصله فاصله اقلیدسی گره n تا محل حفره مورد نظر است.

(ج) درجه پوشش (ورودی سوم): این پارامتر، بیشترین درجه پوشش گره n یا همان مقدار K_h گره n می باشد.

$$NC(n) = \frac{\sum(Rule_n \times C_n)}{\sum(Rule_n)} \quad (2)$$

$Rule_n$: میزان ارزش هر گره

C_n : کسری از عدد یک برای اینکه مقدار دقیق ارزش گذاری را داشته باشیم.

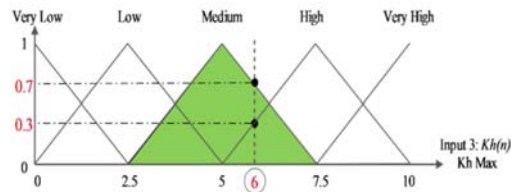


شکل ۱. شمایی از سیستم فازی پیشنهادی

در نهایت برای پارامتر موردی سوم فازی که نشان دهنده حداکثر میزان K_h گره است مطابق شکل ۸ مدل می‌شود. برای گره‌ای با بیشترین درجه پوشش K_h به میزان ۶ مقادیر نظیر شده روی محور Y به شرح زیر است:

$$k_h(6)_{\text{Medium}} = 0.1$$

$$k_h(6)_{\text{High}} = 0.2$$



شکل ۸. مثالی عددی از حداکثر درجه پوشش گره و برآیند فازی آن

$$R_E = 4, \text{ Low \& Medium} \Rightarrow L = 0.4, M = 0.6$$

$$D_n = 7, \text{ Medium \& High} \Rightarrow M = 0.2, H = 0.8$$

$$K_h = 6, \text{ Medium \& High} \Rightarrow M = 0.7, H = 0.3$$

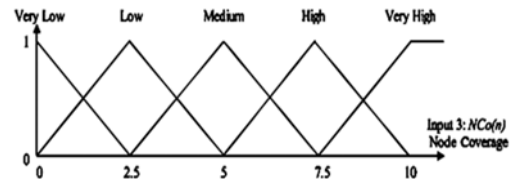
حال به ازای هر فازی از هر پارامتر چند مقدار دیگر خواهیم داشت. پس به ۲۳ حالت زیر می‌رسیم.

به ازای هر مقدار عددی از سه پارامتر ورودی سیستم فازی، یک حالت مشخص قابل تخصیص و تصور است. هر کدام از پارامترها بر اساس تعداد سطوح خود در پارامتر دیگر ضرب می‌شود تا تمامی حالات ممکن به دست آید. نسبت انرژی باقیمانده در ۵ سطح، میزان فاصله گره تا حفره در پنج سطح و بیشترین درجه پوشش (K_h) گره نیز در پنج سطح دسته‌بندی شده است. به جهت در نظر گرفتن حالات ممکن، ۵۳ حالت در نظر گرفته می‌شود که در مجموع ۱۲۵ حالت ممکن است. پس در هر لحظه از کار شبکه با هر میزان ورودی مسلماً در یکی از حالات موجود در این ۱۲۵ حالت جا می‌گیرد.

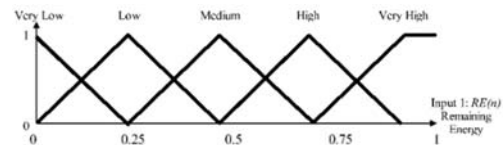
اما طبق جدول شماره ۲، برای هر لحظه ۸ حالت که وابسته به سه پارامتر ورودی می‌باشد را خواهیم داشت. پس از متناظر کردن هر حالت ممکن در جدول یک میزان ارزش خاص به آن قانون اعمال خواهد شد. به عبارتی دیگر ارزش هر یک از ۸ حالت فوق ممکن است متفاوت باشد. پس در کسری از عدد ۱ ضرب می‌شوند (جداول برای بدست آوردن این ضریب در آخر فصل آورده شده‌است) تا مقدار دقیق ارزش‌گذاری را داشته باشیم. حال در معادله پیشنهادی پس از جاگذاری به شرایط عددی زیر خواهیم رسید:

$$NC_{(n)} = \frac{\sum(\text{Rule}_n \times C_n)}{\sum(\text{Rule}_n)}$$

$$NC = \frac{(0.056 \times 0.5) + (0.224 \times 0.25) + (0.024 \times 0.5) + (0.096 \times 0.5) + (0.084 \times 0.5) + (0.336 \times 0.5) + (0.036 \times 0.5) + (0.144 \times 0.5)}{(0.056) + (0.224) + (0.024) + (0.096) + (0.084) + (0.336) + (0.036) + (0.144)}$$



شکل ۴. درجه پوشش

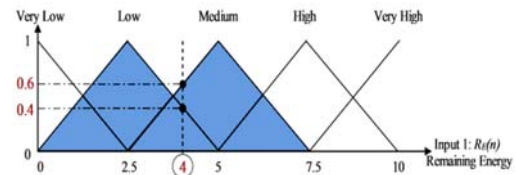


شکل ۵. تابع هزینه

برای درک بهتر از نحوه انتخاب گره متحرک مثالی از یک نمونه از محاسبات پیدا کردن هزینه گره را در ادامه شرح خواهیم داد. فرض کنید گره A دارای نسبت انرژی باقیمانده ۰.۴، میزان فاصله تا محل حفره تناسبی ۷ و نرخ K_h ۶ باشد. طبق نمودار شکل ۶ برای انرژی باقیمانده بر روی دو مثلث Low و Medium قرار دارد. در نقطه ۴ بر روی محور X یک خط عمود رسم می‌کنیم. دو مثلثی که مرکزیت Low و Medium دارند را قطع خواهد کرد. نقاط قطع شده را روی محور Y نظیر می‌کنیم لذا مقادیر عددی زیر را خروجی می‌دهد.

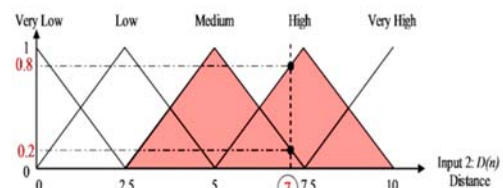
$$R_E(4)_{\text{Low}} = 0.4$$

$$R_E(4)_{\text{Medium}} = 0.6$$



شکل ۶. مثالی عددی از فاصله گره و دو مقدار عددی برآیند فازی آن به ازای فاصله گره تا مرکز حفره نیز یک مقدار عددی برای هر گره خواهیم داشت. این میزان در بازه بین ۰ تا ۱۰ محدود است. به‌عنوان مثال برای گره مذکور این میزان فاصله تناسبی برابر با مقدار ۷ است برآیند محور Y آن‌ها مطابق شکل ۷ به شرح زیر است:

$$R_E(7)_{\text{Medium}} = 0.2, D_n(7)_{\text{High}} = 0.8$$



شکل ۷. مثالی عددی از میزان فاصله گره تا حفره و برآیند فازی آن

کنید (X_n, Y_n) مکان جدید گره متحرک باشد که باید آن را محاسبه نمود. جابه‌جایی این گره به مکان جدید باید شرایط زیر را رعایت نماید:

شرط ۱: ارتباط کنونی با همسایه‌های تک گامی گره متحرک از بین نرود.

شرط ۲: پوشش کنونی حاصل از گره متحرک از دست نرود.

شرط ۳: درجه پوششی همسایه‌های تک گامی گره متحرک افزایش نیابد.

براین اساس و باتوجه به شروط فوق، از روابط مطرح شده در مرجع [۱۰] جهت محاسبه مکان جدید گره متحرک استفاده می‌شود.

ارزیابی عملکرد و مقایسه و نتایج عددی

پروتکل پیشنهادی با استفاده از ns-2.34 شبیه‌سازی شده که در آن ۱۰۰۰ گره به‌صورت تصادفی در سطح ناحیه‌ای با اندازه‌ی ۳۰۰ متر در ۳۰۰ متر قرار می‌گیرند. براساس فرض، برد ارتباطی دو برابر برد حس کردن می‌باشد و IEEE 802.15.4 MAC با مدل انتشاری TwoRayGround در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. انرژی اولیه یک گره برابر با ۵۰ ژول و مصرف انرژی به‌دلیل جابه‌جایی برابر با ۱ ژول در متر در نظر گرفته شده است. این شبیه‌سازی برای ۲۰ توپولوژی تصادفی مختلف اجرا شده و مقدار متوسط نتایج، ارائه شده است.

نتایج شبیه سازی

در این بخش الگوریتم پیشنهادی جدید با الگوریتم HORA مقایسه خواهد شد مشاهده خواهد شد با توجه به معیارهای مورد ارزیابی ذیل، الگوریتم پیشنهادی عملکرد بهتری خواهد داشت.

- متوسط درصد ناحیه همپوشانی: برابر است با حاصل جمع درصدی از ناحیه‌ی حس کردن هر گره که با سایر گره‌ها همپوشانی دارد تقسیم بر تعداد گره‌ها.
- متوسط بیشترین درجه همپوشانی (مقدار K_h): جمع مقدار K_h ها تقسیم بر تعداد گره‌ها.
- متوسط فاصله جابجایی: میزان جابجایی گره‌های متحرک تقسیم بر تعداد گره‌ها.
- متوسط درصد ناحیه بازایی حفره‌ها: حاصل جمع درصد نواحی تعمیر یافته بخش بر تعداد حفره‌ها.

در شکل‌های ۹ و ۱۰، به ترتیب تغییرات مقدار K_h و متوسط درصد ناحیه‌ی همپوشانی به ازای تعداد گره‌های متفاوت و تعداد حفره‌های متفاوت، قبل و بعد از جابجایی گره‌ها نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده‌شده است، اگر حفره‌های پوششی بیشتری وجود داشته باشند، متوسط مقدار K_h بعد از جابه‌جایی کاهش بیشتری در روش پیشنهادی می‌یابد.

$$NC = \frac{0.44}{1} = 0.44$$

میزان ارزش گره با توجه به ورودی‌های داده شده برای این گره برابر ۰,۴۴ است.

جدول ۲. نشان‌دهنده هر قانون و مقدار عددی آن است.

Rules	Value	Result
$R_{ELow} \times D_{nMedium} \times K_{hMedium}$	$0.4 \times 0.2 \times 0.7$	0.056
$R_{ELow} \times D_{nHigh} \times K_{hMedium}$	$0.4 \times 0.8 \times 0.7$	0.224
$R_{ELow} \times D_{nMedium} \times K_{hHigh}$	$0.4 \times 0.2 \times 0.3$	0.024
$R_{ELow} \times D_{nHigh} \times K_{hHigh}$	$0.4 \times 0.8 \times 0.3$	0.096
$R_{EMedium} \times D_{nMedium} \times K_{hMedium}$	$0.6 \times 0.2 \times 0.7$	0.084
$R_{EMedium} \times D_{nHigh} \times K_{hMedium}$	$0.6 \times 0.8 \times 0.7$	0.336
$R_{EMedium} \times D_{nMedium} \times K_{hHigh}$	$0.6 \times 0.2 \times 0.3$	0.036
$R_{EMedium} \times D_{nHigh} \times K_{hHigh}$	$0.6 \times 0.8 \times 0.3$	0.144
Sum of All Rule	=	1

تعیین ناحیه‌ی تحرک

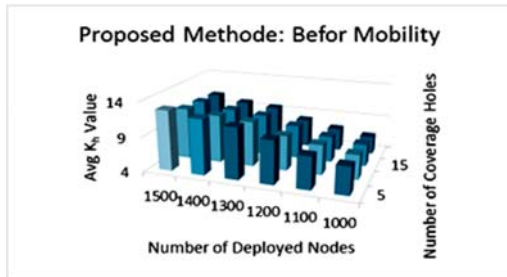
ناحیه‌ی تحرک یا جابه‌جایی (R) به ناحیه‌ای می‌گویند که یک گره متحرک باید به آن انتقال یابد تا ارتباط و پوشش کنونی آن از بین نرود. به‌منظور عدم ایجاد اختلال در پوشش و ارتباط کنونی، هر گره نامزد در ابتدا ناحیه‌ی تحرک خود را قبل از جابه‌جایی برای تعمیر حفره، تعیین می‌کند. بنابراین، هر گره نامزد که بخواهد برای تعمیر یک حفره جابه‌جا شود، نزدیک‌ترین گره نامزد تک گامی خود را به‌عنوان یک گره کمکی انتخاب می‌کند.

فرض کنید که U برد ارتباطی گره کمکی یک گره متحرک و V ناحیه‌ی coverage -۱ گره متحرک باشد. اگر E ناحیه‌ی coverage -۰ گره مرده‌ای باشد که با U همپوشانی دارد و توسط گره متحرک احاطه شده است، آنگاه ناحیه‌ی تحرک برابر است با $R = (V \cap U) \cup E$. واضح است که یک گره متحرک، پوشش و ارتباط کنونی خود را از دست نخواهد داد به شرطی که جابه‌جایی آن درون ناحیه‌ی تحرک R محدود شده باشد [۱۶].

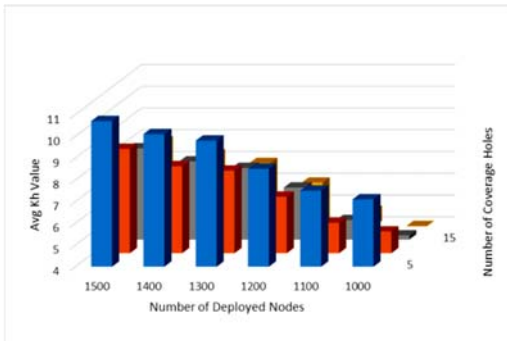
محاسبه‌ی مکان جدید

هر گره متحرک پس از انتخاب حسگر متحرک و تعیین ناحیه‌ی تحرک، باید دریابد که مکان جدید جابه‌جایی آن کدام است. مکان جدید را می‌توان با استفاده از برنامه‌نویسی غیرخطی (NLP) به گونه‌ای محاسبه نمود که در آن کمینه‌سازی میزان همپوشانی نواحی پوششی به‌عنوان هدف انتخاب شده و شرایط جابه‌جایی به‌عنوان محدودیت‌ها در نظر گرفته می‌شوند. فرض

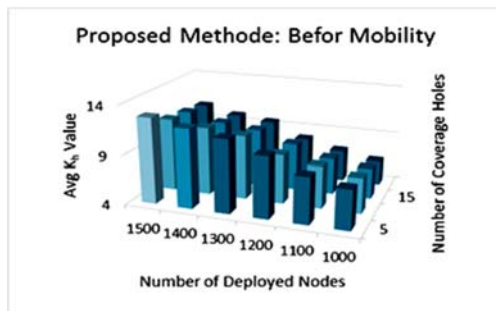
ناحیه‌ی همپوشانی بعد از جابه‌جایی به حداقل می‌رسد بدون اینکه متوسط مقدار K_h در ناحیه‌ی تحت نظارت، افزایش یابد. به عبارت دیگر، نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی عملکرد بهتری دارد.



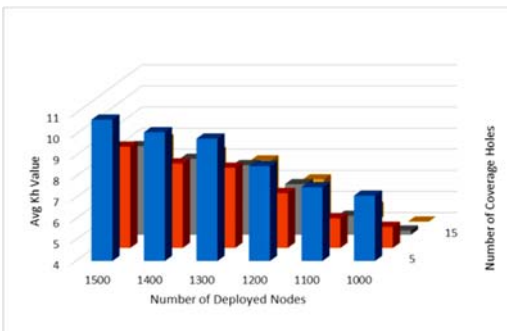
شکل ۱۰- الف. متوسط درصد ناحیه همپوشانی قبل از جابجایی



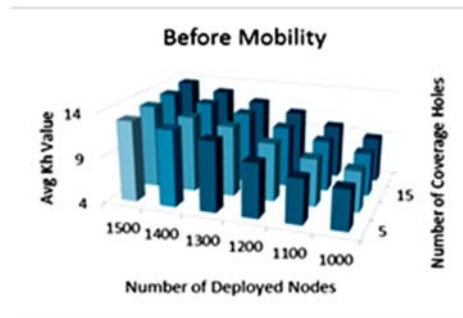
شکل ۱۰- ب. متوسط درصد ناحیه همپوشانی بعد از جابجایی برای الگوریتم HORA



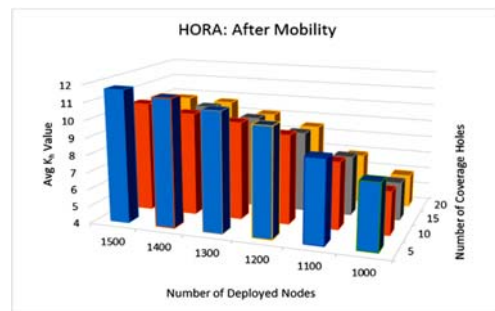
شکل ۱۰- ج. متوسط درصد ناحیه همپوشانی قبل از جابجایی



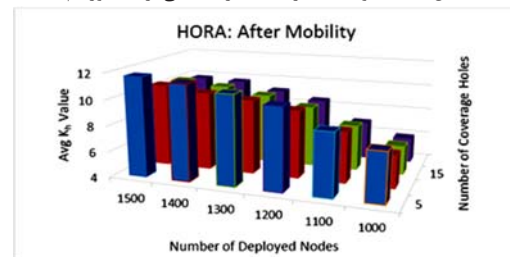
شکل ۱۰- د. متوسط درصد ناحیه همپوشانی بعد از جابجایی برای الگوریتم پیشنهادی



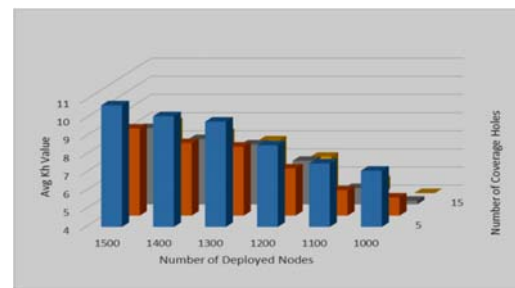
شکل ۹- الف. متوسط مقدار K_h قبل از جابجایی



شکل ۹- ب. متوسط مقدار K_h بعد از جابجایی برای الگوریتم HORA



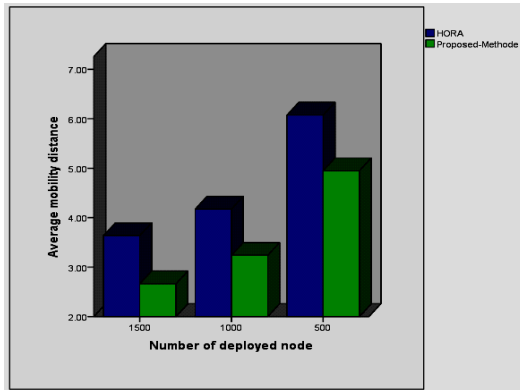
شکل ۹- ج. متوسط مقدار K_h قبل از جابجایی



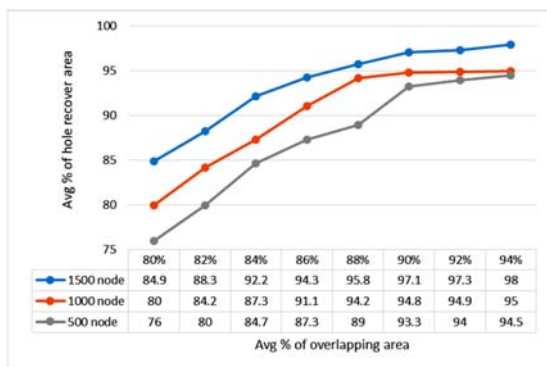
شکل ۹- د. متوسط مقدار K_h بعد از جابجایی برای الگوریتم پیشنهادی همچنین می‌توان نتیجه گرفت عملکرد از لحاظ متوسط مقدار K_h بعد از جابجایی برای تعداد گره‌های جایگذاری شده کمتر، بهتر است. همینطور مشخص است که متوسط مقدار K_h پس از جابه‌جایی کاهش بیشتری نسبت به روش HORA می‌یابد. به شکل مشابه، همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، متوسط درصد ناحیه‌ی همپوشانی بیشتر خواهد یافت اگر حفره‌های پوششی بیشتری وجود داشته باشند. به علاوه، متوسط درصد ناحیه‌ی همپوشانی بیشتر کاهش می‌یابد اگر تعداد کمتری گره جایگذاری شده باشند. براساس نتایج شبیه‌سازی، متوسط

جدول ۳. مقایسه متوسط فاصله جابجایی

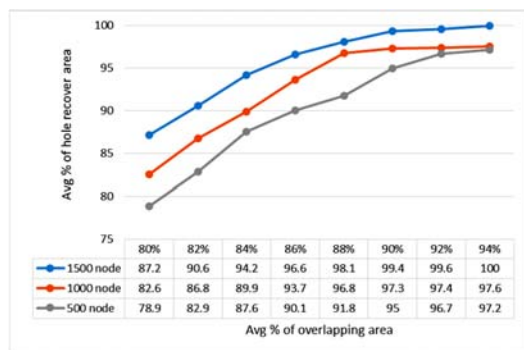
	HORA	Proposed Method
1500 node	3.6375	2.6625
1000 node	4.175	3.2375
500 node	6.075	4.95
میانگین	4.629	3.6166



شکل ۱۲. مقایسه متوسط فاصله جابجایی

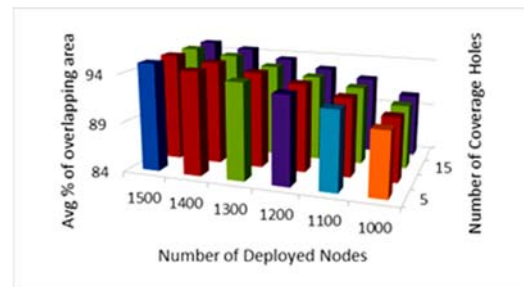


شکل ۱۳-الف. متوسط درصد ناحیه تعمیر حفره با درجات مختلف ناحیه هم پوشانی برای الگوریتم HORA

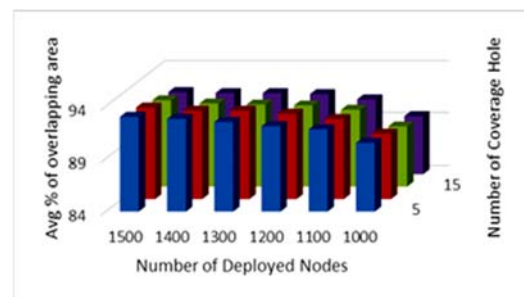


شکل ۱۳-ب. متوسط درصد ناحیه تعمیر حفره با درجات مختلف ناحیه هم پوشانی برای الگوریتم پیشنهادی

در الگوریتم، درصد های مختلف ناحیه هم پوشانی بر فاصله جابه جایی گره های متحرک و درصد بازایی حفره ها تأثیر می گذارد. همان طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، متوسط فاصله جابه جایی گره ها با افزایش متوسط درصد ناحیه هم پوشانی، کاهش می یابد. متوسط فاصله جابه جایی کمتر خواهد شد اگر تعداد بیشتری گره جایگذاری شده باشد. هنگامی که تعداد گره های جایگذاری شده ۵۰۰ تا باشد، فاصله جابه جایی طولانی تر برای تعمیر حفره های پوششی مورد نیاز است چراکه حفره های پوششی بزرگتر و بیشتری به دلیل تراکم کم گره ها به وجود خواهد آمد. و با توجه به در نظر گرفتن متوسط فاصله جابه جایی و انرژی باقیمانده به عنوان ورودی های فازی در روش پیشنهادی، فاصله جابه جایی نسبت به روش HORA کاهش یافته است. همان طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، متوسط درصد بازایی حفره ها نیز در روش پیشنهادی افزایش خواهد یافت و اگر گره های بیشتری با هم هم پوشانی داشته باشند. و همچنین اگر تعداد بیشتری گره جایگذاری شود، درصد بهتری از حفره های پوششی تعمیر خواهد شد چراکه گره های بیشتر، هم پوشانی پوششی بالاتری را ایجاد می کنند. بنابراین، این مسئله نشان می دهد که الگوریتم پیشنهادی برای شبکه های حسگر بی سیم بسیار مناسب است. چراکه گره ها معمولاً به صورت متراکم جایگذاری می شوند.



شکل ۱۱-الف. متوسط فاصله جابجایی با درجات مختلف هم پوشانی برای الگوریتم HORA



شکل ۱۱-ب. متوسط فاصله جابجایی با درجات مختلف هم پوشانی برای الگوریتم پیشنهادی

مقایسه پیچیدگی الگوریتم‌ها

تغییری که در الگوریتم HORA به وجود آمده است در مرحله انتخاب گره متحرک است. به این ترتیب که برای انتخاب گره در این روش ابتدا پارامترهایی را بر اساس موقعیت همسایگی (گره مرزی و غیره) و میزان همپوشانی بدست آورده و در فرمول قرار داده که در نتیجه، گره با بیشترین مقدار همپوشانی انتخاب خواهد شد.

در روش پیشنهادی این مرحله با استفاده از روش فازی انجام می‌شود. به این ترتیب که دو پارامتر انرژی و فاصله به پارامتر همپوشانی افزوده شده و یک روش فازی بر اساس این سه پارامتر به کار گرفته می‌شود. به این صورت که بجای استفاده از پارامترهای روش قبلی یعنی α ، β و ρ برای انتخاب گره نامزد متحرک، از سه پارامتر پیشنهادی و محاسبه ارزش فازی آنها استفاده می‌شود.

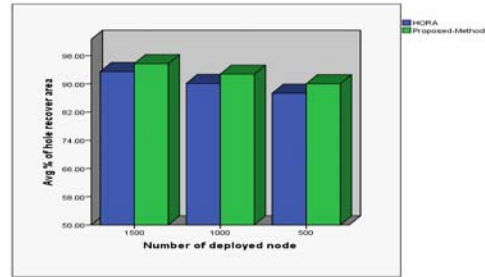
سیستم فازی: این سیستم جهت محاسبه هزینه برای هر یک از گره‌های نامزد استفاده می‌گردد. برای گره n این هزینه $NC(n)$ توسط سه پارامتر زیر تعریف می‌گردد:

الف) باقیمانده انرژی (پارامتر اول): انرژی باقیمانده گره n (برای تعیین این پارامتر نیاز به محاسبه نیست و از قبل مشخص است).

ب) فاصله نسبت به حفره مورد نظر (پارامتر دوم): این پارامتر فاصله اقلیدسی گره n تا محل حفره مورد نظر است (این پارامتر نیز شامل پیچیدگی زمانی ثابت می‌باشد و به صورت یک پیچیدگی از مرتبه $O(n^k)$ نیست).

ج) درجه پوشش (پارامتر سوم): این پارامتر، بیشترین درجه پوشش گره n یا همان مقدار K_{i1} گره n می‌باشد (این مقدار توسط روش موجود از قبل محاسبه می‌شود که نشان داده می‌شود پیچیدگی زمانی الگوریتم جدید هم‌ارز این پیچیدگی خواهد بود).

بدین ترتیب هر گره نامزد در شبکه در هر واحد زمانی یک وضعیت مشخص خواهد داشت که بر گرفته از سه پارامتر انرژی باقیمانده، فاصله نسبت به محل مورد نظر و درجه پوشش گره خواهد بود. اما این سه پارامتر پس از ورود به سیستم فازی پیشنهادی و انجام عملیات فازی و تطابق با قوانین، تبدیل به

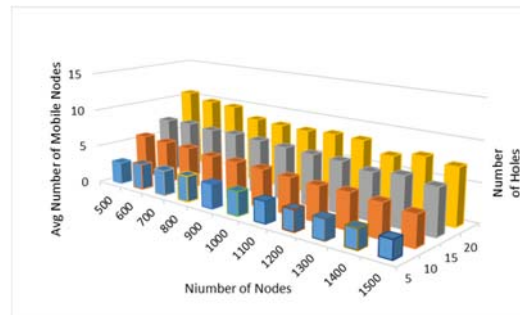


شکل ۱۴. مقایسه متوسط درصد ناحیه تعمیر حفره

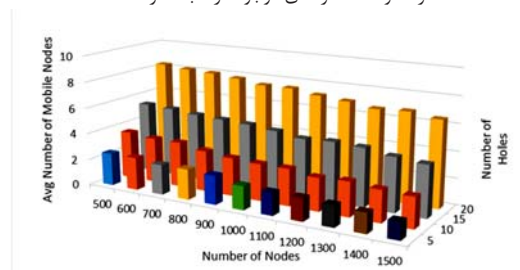
جدول ۴. مقایسه متوسط درصد ناحیه تعمیر حفره

	HORA	Proposed Method
1500 node	93.4875	95.7125
1000 node	90.1175	92.7625
500 node	90.05	97.35
میانگین	91.21	95.25

آزمون دیگری را که می‌توان لحاظ نمود، نرخ تعداد جابجایی به ازای تعداد حفره‌های شبکه و همچنین در شبکه‌هایی با تعداد گره متفاوت است. بر این اساس هر قدر تعداد گره‌های شبکه بالاتر باشد نرخ تعداد تحرک پایینتری در روش پیشنهادی را داریم.



شکل ۱۵- الف. نمودار متوسط تعداد گره‌های متحرک شبکه به تعداد حفره‌ها و تعداد گره‌های موجود در شبکه در HORA



شکل ۱۵- ب. نمودار متوسط تعداد گره‌های متحرک شبکه به تعداد حفره‌ها و تعداد گره‌های موجود در شبکه در روش پیشنهادی

به دلیل اینکه الگوریتم پایه نرخ انرژی مصرفی به ازای هر بار تحرک گره را ثابت فرض نموده است لذا مجموع مترائت تحرک گره‌ها نیز تاثیری در ارزیابی انجام شده ندارد.

نتیجه گیری

شبکه های حسگر بیسیم علاوه بر مزایای فراوانی که دارند با چالش های مختص خود نیز روبه رو هستند. به ترتیب اولویت می توان مصرف انرژی، پوشش، مسیریابی، قابلیت اطمینان و کاربرد را در این مورد ذکر نمود. اما در سال های اخیر تحقیقات گسترده ای در این حوزه انجام شده است که با توجه به کاربرد شبکه، هر ایده پیشنهادی تاحدی توانسته است نیازهای کیفیت خدمات را در این شبکه مرتفع سازد. یکی از چالش های مهم در شبکه حسگر بیسیم، تأمین پوشش شبکه است. براساس نتایج تحقیقات واضح است که در توزیع قطعی یا چینی گره های شبکه، مسئله پوشش در بعد ریاضی پیش از جایگذاری قابل بحث است. اما در توزیع تصادفی با چالش هایی از جمله داشتن پوشش مازاد برخی نقاط یا وجود نقاطی بدون پوشش یا با حداقل پوشش روبه رو هستیم. در این پژوهش روش های اخیر در حوزه ایجاد یک جایگذاری و آرایش مناسب و قابل قبول گره ها در شبکه پس از جایگذاری تصادفی بررسی شد.

در الگوریتم پایه با نام HORA معیاری برای انتخاب گره یا گره های مناسب جهت انتقال به مکان مورد نظر استفاده کرده است که توانسته است نسبت به سایر روش های موجود در محیط شبیه سازی یکسان، عملکرد بهتری داشته باشد. روش پیشنهادی جدید بر روی الگوریتم HORA در نظر گرفته شده است که در آن پارامترها را بر اساس یک رویکرد فازی با یکدیگر ترکیب نموده و ویژگی های بهتری را برای انتخاب گره مناسب در نظر گرفته ایم. براساس روش پیشنهادی، گره یا گره هایی که از لحاظ میزان انرژی باقیمانده گره، فاصله تا حفره و درجه همپوشانی وضعیت بهتری دارند، به عنوان گره مناسب در نظر گرفته است. در الگوریتم پایه ممکن بود گره های که برای انتقال به مکانی انتخاب شده است فاقد انرژی لازم برای فعالیت بوده و از فاصله زیادی نسبت به مکان مدنظر برخوردار باشد. مصرف انرژی گره ارتباط مستقیمی با نرخ فاصله گره تا مکان مورد نظر دارد، لذا انتخاب گره مناسب با انرژی بالا و حداقل فاصله نسبت به حفره می تواند مشکلات روش پایه را مرتفع سازد. این در روش پیشنهادی پس از انجام شبیه سازی به اثبات رسیده است. در روش پیشنهادی توانسته ایم با تلفیق پارامترهای فوق مناسب ترین گره را به مکان مدنظر انتقال دهیم.

با انجام نتایج شبیه سازی الگوریتم پایه و پیشنهادی در چندین آزمون با شرایط مختلف مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته اند. نتایج حاکی از آن است که روش پیشنهادی در معیارهای زیر توانسته است نسبت به روش پایه عملکرد بهتری داشته باشد:

- متوسط درصد ناحیه همپوشانی
- متوسط فاصله جابجایی

خروجی سیستم فازی می گردند که به عنوان هزینه گره نامزد n یا همان $NC(n)$ در نظر گرفته خواهد شد و از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$NC(n) = \frac{\sum(Rule_n \times C_n)}{\sum(Rule_n)}$$

در نهایت گره نامزدی که بالاترین مقدار $NC(n)$ را دارد برای جابجایی و پوشش ناحیه مورد نظر انتخاب می شود. توجه به این نکته نیز الزامی است که مقدار $NC(n)$ برای هر گره بر اساس گره های همسایه آن محاسبه می شود که همسایگان هر گره نیز در یک محاسبه تعدادی ثابت هستند. لذا پیچیدگی زمانی $NC(n)$ نیز از مرتبه ثابت خواهد بود نه از مرتبه چند جمله ای یا نمایی. به عنوان مثال در هر گره نامزد جدولی مطابق جدول ۱ ایجاد می گردد که پس از بازه های زمانی مختلف به روز خواهد شد.

به ازای هر مقدار عددی از سه پارامتر ورودی، در سیستم فازی حالتی متصور می شود. هر کدام از پارامترها بر اساس تعداد سطوح خود در پارامتر دیگر ضرب می شود تا تمامی حالات ممکن به دست آید. نسبت انرژی باقیمانده در ۵ سطح، میزان فاصله گره تا حفره در پنج سطح و بیشترین درجه پوشش (K_h) گره نیز در پنج سطح دسته بندی شده می شوند. به جهت در نظر گرفتن حالات ممکن کلاً ۵ حالت در نظر گرفته می شود که در مجموع ۱۲۵ حالت ممکن است. پس در هر لحظه از کار شبکه با هر میزان ورودی مسلماً در یکی از حالات موجود در این ۱۲۵ حالت جا می گیرد. با توجه به استفاده از توابع عضویت مثلثی برای هر لحظه ۸ حالت را که وابسته به سه پارامتر ورودی بود را خواهیم داشت. پس از متناظر کردن هر حالت ممکن در جدول یک میزان ارزش خاص به آن قانون اعمال خواهد شد. به عبارت دیگر ارزش هر یک از ۸ حالت فوق ممکن است متفاوت باشد. پس در کسری از عدد ۱ ضرب می شوند تا مقدار دقیق ارزش گذاری حاصل شود.

توضیحات فوق نشان می دهد که اگر پیچیدگی زمانی الگوریتم موجود برابر با $O(n^k)$ باشد، آنگاه پیچیدگی زمانی الگوریتم جدید برابر با $T+O(n^k)$ که مقدار T یک مقدار ثابت است و شامل پارامتر پیچیدگی n نمی باشد. این موضوع نشان می دهد که پیچیدگی زمانی الگوریتم جدید قابل قبول و نسبت به پیچیدگی زمانی الگوریتم قبلی فقط با یک مقدار ثابت افزایش داشته است. با توجه به نظریه پیچیدگی زمانی الگوریتم ها مشخص است که $T+O(n^k)$ هم راز با $O(n^k)$ است.

اغلب کاربردها خواهند داشت. این موضوع یعنی بر اهمیت شدن نقش حسگرها باعث می‌گردد که اطلاعاتی که حسگرها به دست می‌دهند از درجه بالایی از اهمیت برخوردار باشند. این امر باعث می‌شود تا برای اطمینان از عملکرد صحیح این سیستمها یک سری موارد نظیر کلاس‌بندی حسگرها، محاسبه قابلیت اعتماد، تحمل‌پذیری خطا، ترکیب حسگرها و... حائز اهمیت گردد. می‌توان شبکه را در ابتدا خوشه‌بندی کرد و فقط از سرخوشه‌ها که دارای انرژی کافی‌اند برای تعمیر حفره‌ها استفاده کرد که در این صورت قابلیت اطمینان شبکه افزایش خواهد یافت.

محاسبه مکان جدید بهینه با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی کرد.

می‌توان شرایط انتخاب برای مکان جدید را با یک تابع با یکدیگر ترکیب کرد و مکان جدید بهینه مناسبی را یافت.

- متوسط درصد ناحیه تعمیر حفره
- متوسط تعداد گره‌های متحرک

با توجه به اینکه پارامترهای ورودی فازی افزایش یافته است واضح است که زمان اجرای الگوریتم و پیچیدگی افزایش یافته است ولی با بهبودهای حاصل شده قابل چشم‌پوشی می‌باشد. در مرجع [۱۸] خلاصه‌ای از ارزیابی با روش‌های دیگر آمده است که نتایج روش جدید نیز به این مقایسه افزوده شده است.

جدول ۵. خلاصه ارزیابی

پروتکل	متوسط فاصله جابجایی	متوسط تعداد گره‌های متحرک
DCM	بلندترین	کمتر
Minimax	کوتاهتر	خیلی بیشتر
HORA	کوتاه	کمتر
2-hop HORA	کوتاه تر	بیشتر
روش پیشنهادی	کوتاه تر	کمترین

در روش پیشنهادی با توجه به کاهش متوسط فاصله جابجایی و تعداد گره‌های متحرک و در نظر گرفتن انرژی باقیمانده در انتخاب گره متحرک مقدار انرژی باقیمانده نسبت به روش HORA و 2-hop HORA در این روش بیشتر شده و طول عمر بهبود یافته است.

تحقیقات آینده

- در نظر گرفتن معیارهای مختلف بعنوان ورودی فازی با توجه به کاربرد شبکه می‌توان برای انتخاب گره متحرک معیارهای مختلفی بعنوان ورودی فازی در نظر گرفت. ممکن است شبکه در جایی استفاده شود که جهت حرکت نیز حائز اهمیت باشد یا در جایی استفاده شود که اتصال اهمیت بیشتری دارد دارد یا مصرف توان و یا موارد دیگر این نوع طراحی با استفاده از منطق فازی این قابلیت را دارد که روش جدید ورودی فازی را با توجه به کاربرد شبکه انتخاب نماید و همچنین این قابلیت را داراست که با توجه به اهمیت ضربی به آن اختصاص دهد که با توجه به آن معیار و ضریب آن هر گره ارزش‌گذاری می‌شود. انتخاب گره متحرک به بهترین نحو با توجه به کاربرد شبکه و معیار حائز اهمیت صورت می‌گیرد.
- خوشه‌بندی در شبکه و تعمیر حفره‌ها فقط از طریق سرخوشه‌ها

در واقع با بالا رفتن قابلیت‌های محاسباتی و ارتباطات بی‌سیم شبکه‌های حسگر نقش بسیار مهمتری را در

- Computing*, vol. 9, issue 3, pp. 435-448, 2010.
- [12] B. C̃arbunar, A. Grama, J. Vitek, and O. C̃arbunar, "Redundancy and Coverage Detection in Sensor Networks," *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, vol. 2, issue 1, pp.94-128, 2006.
- [13] C. Zhang, X. Bai, J. Teng, and D. Xuan, "Constructing Low- Connectivity and Full-Coverage Three Dimensional Sensor Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 28, issue 7, pp. 984-993, 2010.
- [14] Z. Yun, X. Bai, D. Xuan, and T. H. Lai, "Optimal Deployment Patterns for Full Coverage and k-Connectivity ($k \leq 6$) Wireless Sensor Networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 18, issue 3, pp. 934-947, 2010.
- [15] H. Mahboubi, J. Habibi, A.G. Aghdam, and K. Sayrafian-Pour, "Distributed Deployment Strategies for Improved Coverage in a Network of Mobile Sensors With Prioritized Sensing Field," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, issue 1, pp. 451-461, 2013.
- [16] T. Razafindralambo and D. Simplot-Ryl, "Connectivity Preservation and Coverage Schemes for Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 56, issue 10, pp. 2418-2428, 2011.
- [17] X. Wang, S. Han, Y. Wu, and X. Wang, "Coverage and Energy Consumption Control in Mobile Heterogeneous Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 58, issue 4, pp.975-988,2013.
- [18] Prasan Kumar Sahoo, and Wei-Cheng Liao, "HORA:A Distributed Coverage Hole Repair Algorithm for Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 14, 2015, pp. 961-965
- [19] G. Chen, *Fuzzy logic in data modeling: semantics, constraints, and database design*, vol. 15. Springer Science & Business Media, 2012
- [1] Dina S. Deif, and Yasser Gadallah, "Classification of Wireless Sensor Networks Deployment Techniques", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, pp 1-22, 2014.
- [2] C. Ma, J. He, H. H. Chen, and Z. Tang, "Coverage Overlapping Problems in Applications of IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks," in *Proc. IEEE WCNC*, pp. 4364-4369, Shanghai, 2013.
- [3] D. B. Jourdan and O. L. de Weck, "Layout optimization for a wireless sensor network using a multi-objective genetic algorithm," in *Proc. IEEE Semi-annual Vehicular Technology Conference-Spring (VTC'04-Spring)*, vol. 5, pp. 2466-2470, 2004.
- [4] B. Carter and R. Ragade, "A probabilistic model for the deployment of sensors," in *IEEE Sensors Applications Symposium (SAS'09)*, pp.7-12, 2009.
- [5] Y. Yoon and Y. H. Kim, "An efficient genetic algorithm for maximum coverage deployment in wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2013.
- [6] W. Xiaoling, S. Lei, Y. Jie, X. Hui, J. Cho, and S. Lee, "Swarm based sensor deployment optimization in ad hoc sensor networks," in *Proc. International Conference on Embedded Software and Systems (ICCESS'05)*. Springer, pp. 533-54, 2005.
- [7] S. Mini, Siba K. Udgate, and Samrat L. Sabat, "Sensor Deployment and Scheduling for Target Coverage Problem in Wireless Sensor Networks," *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 636-644, March 2014
- [8] M. R. Senouci, M. Abdelhamid, and K. Assnoute, "Localized movement-assisted sensor deployment algorithm for hole detection and healing," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, accepted for publication, May 2013 (early access article).
- [9] H. Mahboubi, K. Moezzi, A. G. Aghdam and K. Sayrafian-Pou, "Distributed Deployment Algorithms for Efficient Coverage in a Network of Mobile Sensors With Nonidentical Sensing Capabilities," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 8, pp. 3998-4016, October 2014
- [10] J. Wu and N. Sun, "Optimum Sensor Density in Distortion-Tolerant Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, issue 6, pp. 2056-2064, 2012.
- [11] X. Bai, Z. Yun, D. Xuan, and T. H. Lai, "Optimal Patterns for Four- Connectivity and Full Coverage in Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Mobile*