

## بهینه سازی مصرف انرژی در شبکه های حسگر بیسیم با استفاده از الگوریتم ممتیک

فضل ا... محمدپور<sup>۱</sup>، خدیجه افهامی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد الکترونیکی، گروه مهندسی فناوری اطلاعات، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد الکترونیکی، گروه مهندسی فناوری اطلاعات، تهران، ایران

### چکیده

شبکه های حسگر بیسیم معمولاً از تعداد بسیار زیادی گره حسگر دارای توان مصرفی پایین و ارزان قیمت که با توزیع در محیط مورد نظر به همراه یک یا تعداد بیشتر ایستگاه پایه ۱ که در فاصله ای دور از محیط تحت بررسی یا در نزدیکی آن قرار گرفته، تشکیل می شود. گره های حسگر با همکاری یک دیگر داده های مورد نیاز از محیط را جمع آوری کرده و با استفاده از لینک های بیسیم به ایستگاه پایه ارسال می کنند. روش های مختلفی جهت خوشه بندی گره ها در شبکه های حسگر بی سیم وجود دارند که هر یک دارای مزایا و معایب خاص خود هستند. الگوریتم زمانبندی خواب گره های حسگر به عنوان یکی از موثرترین روش هایی است که با کاهش مصرف انرژی طول عمر بیشتری را برای شبکه های حسگر فراهم می کند. در این پژوهش روشی جهت افزایش طول عمر شبکه مبتنی بر الگوریتم ممتیک ارائه شده و افزایش طول عمر گره های شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. افزایش طول عمر گره ها عملاً افزایش پوشش شبکه را نیز در برداشته و با استفاده از این روش می توان سطح پوشش شبکه را نیز بالا برد. نتایج حاصل از این تحقیق با الگوریتم لیچ مقایسه شده و بهبود ناشی از الگوریتم پیشنهادی با استفاده از شکل ها و نمودارهای مختلف ارائه شده اند.

**واژه های کلیدی:** شبکه های حسگر بیسیم، الگوریتم ممتیک، افزایش طول عمر، بهینه سازی مصرف انرژی، زمان بندی خواب

<sup>1</sup> Base Station

## ۱-مقدمه

شبکه های حسگر بی سیم از تعداد زیادی گره حسگر ارزان قیمت تشکیل می شود که در محیط تحت بررسی توزیع می شوند. گره های حسگر استفاده شده مجهز به یک پردازنده دیجیتال، واحد حسگر، فرستنده و گیرنده بی سیم و یک منبع توان مانند باتری می باشد. انرژی محدود، ظرفیت ارتباط پایین و حجم کم ذخیره سازی و پهنای باند کم از محدودیت های اصلی به شمار می آیند. در شبکه های حسگر بیسیم اغلب برای تامین انرژی مورد نیاز گره ها از باتری استفاده می شود که این باتری ها قابلیت تعویض و شارژ مجدد ندارند. بنابر این طول عمر این شبکه ها ارتباط مستقیم با عمر باتری گره های حسگر دارد، از این نظر نحوه مدیریت انرژی و بهینه سازی مصرف آن از مسائل اساسی در شبکه های حسگر بیسیم می باشد (آکیلدیز، ۲۰۰۲) (عباسی و همکاران، ۲۰۱۴) (پانتازیس و همکاران، ۲۰۱۳). تا کنون چندین راه حل برای مدیریت و کاهش مصرف انرژی شبکه های حسگر ارائه شده است که در بین آنها زمانبندی گره های حسگر با افزایش طول عمر شبکه عملکرد بهتری را نسبت به سایر روش ها از خود نشان داده است. به همین دلیل زمانبندی گره های حسگر به عنوان یک راه حل مناسب برای کاهش مصرف انرژی گره های حسگر بطور گسترده مورد توجه قرار گرفته است. در تمام عملیات موجود در شبکه حسگر، ارسال و دریافت داده، مصرف انرژی بیش از سایر عملیاتها اتفاق می افتد.

پروتکل های لایه های سخت افزار، شبکه و انتقال که برای این منظور شبکه های حسگر بی سیم طراحی شده اند، باید توجه به استفاده موثر از فرکانس رادیویی داشته باشند که برای این منظور به حداقل رساندن تصادمها، کنترل سربار پیامها در مسیریابی، زمان بندی موثر خواب از جمله کارهای الزامی می باشد.

شبکه های حسگر بی سیم در اکثر زمانها در حالت بیکار می مانند و فقط گاهی اوقات داده ارسال می کنند. از طرفی میزان مصرف انرژی برای گوش دادن به خط بیکار معادل با مصرف انرژی در هنگام ارسال و دریافت داده می باشد و از مصرف انرژی در حالت خواب بیشتر است. با استفاده از تکنیک زمان بندی خواب و اثرپذیری آنها می توان اتلاف انرژی را در حالت بیکار کاهش داد و باعث بهره وری شد.

برای کاهش مصرف انرژی در شبکه های حسگر بیسیم زمانبندی خواب گره های حسگر به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرد (کوشانفر و همکاران، ۲۰۰۱). از طرفی برای کاهش تاخیر، بیشتر الگوریتم ها از طرح زمان بندی خواب برای همه گره ها استفاده نمی کنند و از ساختاری که طول بیدار بودن گره را با توجه به حجم ترافیکی ورودی شبکه متعادل می کنند، استفاده می کنند. لذا گره ای که فاصله زمانی بیداریش افزایش می یابد، باید فاصله مسافت خود را از گره اصلی و یا سرخوشه کاهش دهد تا گره ها، داده هایشان را با تاخیر کم از طریق این گره به سرخوشه برسانند.

بر خلاف روشهای مذکور در روش پیشنهادی این مقاله انتخاب گره اصلی به کمک روش تاخیر زمانی بر اساس فاصله گره حسگر از ایستگاه پایه و انرژی باقی مانده در گره انجام می شود که ضمن کاهش سربار انتخاب سرخوشه تعویض نقش سرخوشه در بین گره ها را به صورت عادلانه انجام میدهد که منجر به توزیع بار مصرف انرژی بین گره ها می شود. برای این کار با ترکیب دو پارامتر فاصله گره حسگر از ایستگاه پایه و انرژی باقی مانده در گره تاخیری در گره ها ایجاد می شود، گره های دارای فاصله کمتر نسبت به ایستگاه پایه و انرژی بیشتر زمان تاخیر شان زودتر از سایرین به پایان رسیده و خود را به عنوان سرخوشه اعلام می کنند.

زمانبندی در شبکه های حسگر بیسیم بسیار چالش برانگیز است. دلیل اصلی این چالش ویژگی های ذاتی این شبکه ها می باشد که آن ها را از دیگر شبکه ها بیسیم مانند شبکه های Ad-hoc و شبکه های سلولی متمایز می کند (کمال و همکاران، ۲۰۰۳).

در این راستا برای بهبود بهره‌وری انرژی در شبکه‌های حسگر بیسیم، در این مقاله با ترکیب الگوریتم زمانبندی خواب به روش تاخیر زمانی با الگوریتم‌های تکاملی سعی در کاهش تعداد پیام انتقالی در شبکه‌های حسگر بیسیم و افزایش بهره‌وری انرژی شده است. همچنین در این مقاله برای افزایش طول عمر شبکه و جلوگیری از مصرف سریع انرژی در شبکه، از متغیرهای فاصله زمانی بیداری و فاصله مسافت تا گره اصلی استفاده می‌کنند. لذا قصد داریم با الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی بهبود دو هدف کاهش فاصله بین گره‌ها تا گره اصلی و افزایش مدت زمان همان گره‌ها به بهبود مصرف انرژی بپردازیم.

## ۲- مروری بر سوابق گذشته

در چند سال اخیر مسائل زمانبندی در شبکه‌های حسگر مقالات و تحقیقات زیادی را به خود اختصاص داده است. تکنیک‌های گسترده‌ای برای افزایش طول عمر حسگرهای پخش شده برای کاربردهای نظارتی از روش خواب استفاده می‌کنند. در این روش‌ها یک زمانبندی خواب برای حسگرها محاسبه می‌شود بطوریکه در هر لحظه فقط یک زیر مجموعه‌ای از گره‌ها فعال هستند و بقیه گره‌ها به حالت خواب می‌روند. چالش‌ها تلاش می‌کنند تا یک زمانبندی خواب طراحی کنند بطوریکه طول عمر شبکه را بیشینه کنند در حالیکه کیفیت مطلوبی از نظارت را نگهداری می‌کنند. این مسئله، به مسئله بیداری خواب اشاره دارد.

میگواردچیان در (کوشانفر و همکاران، ۲۰۰۱) ابتدا از هندسه محاسباتی، دیاگرام ورونی برای حل این مسائل استفاده کرد. نظر به اینکه استفاده از دیاگرام ورونی<sup>۲</sup> برای حل مسائل توزیع شده بسیار مشکل بود، الگوریتم‌های پیشنهادی بسوی حل مسائل متمرکز پیش رفتند. لی در (وان و همکاران، ۲۰۰۳) صحت الگوریتم‌های بالا را اثبات کرد. بعلاوه نشان داد که مسیرهای بهینه‌ای در گراف گابریل<sup>۳</sup> وجود دارد. بنابراین یک الگوریتم توزیع شده برای پیدا کردن مسیر پیشنهاد داد و در ادامه کار نیز الگوریتم‌هایی برای پیدا کردن بهترین مسیر پوشش داده شده با خصوصیت کمترین انرژی مصرفی توسط حسگرها پیشنهاد داد. بدلیل ناپایداری و قرار گرفتن حسگرها، ساختار شبکه حسگر در هر دوره زمانی تغییر می‌کند (وان و همکاران، ۲۰۰۳). هوانگ و همکارانش در (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۵) مسئله پشتیبانی پویا از ساختار شبکه حسگر در بهترین حالت و بدترین حالت بررسی کردند. الگوریتم آنها نشان داد که به ازای هر  $\varepsilon > 0$ ، تقریبی از بهترین فاصله پوشش و  $(\sqrt{2} + \varepsilon)$  تقریبی از بدترین فاصله پوشش است.

در گذشته برای میحث قرارگیری حسگرها در شبکه‌های حسگر توزیع شده، جایگاه خاصی قائل نبوده‌اند و همین امر باعث شده تا بیشتر کارهای انجام شده در گذشته منحصر به میحث ارتباط حسگرها (کان و همکاران، ۱۹۹۹) (استرین و همکاران، ۱۹۹۹) معطوف شود. ترکیب حسگرها برای بدست آوردن یک معماری مناسب (بروکس و همکاران، ۱۹۹۸) (مین و همکاران، ۲۰۱۱) توجه کنند. تیان در (تیان و همکاران، ۲۰۰۲) یک الگوریتم زمانبندی نود پوشش نگهدارنده پیشنهاد کرده است که پس از خاموش شدن نودهای اضافی، مسئله پوشش را گارانتی می‌کند. در این روش، هر نود بر اساس قانون شایستگی که در ادامه گفته می‌شود تصمیم می‌گیرد که خود را خاموش کند یا روشن نگه دارد. این قانون بیان می‌کند که هر نود در صورتی می‌تواند خاموش شود که همسایگان آن بتوانند منطقه تحت پوشش آنرا پوشش دهند. عملیات زمانبندی نودها به چند قسمت تقسیم شده که هر قسمت چندین فاز زمانبندی مخصوص به خود می‌باشد. در هر فاز زمانبندی، نودها اطلاعات موقعیتی خود را تغییر می‌دهند. اگر نودها دارای شعاع حس متفاوتی باشند، شعاع حس خود را نیز تغییر می‌دهند.

<sup>2</sup> Voronoi

<sup>3</sup> Gabriel

هر نود ناحیه تحت پوشش همسایگان خود را محاسبه می کند و بر اساس آن برای خاموش شدن خود تصمیم می گیرد. با توجه به ساختار روش فوق، این روش جزء روشهای هوشمند در قرارگیری و زمانبندی حسگرها است.

میگواردچیان در (پتکنجک و همکاران، ۲۰۰۱) یک تحلیل جدید فرمولی بر روی پوشش مسیرهای شبکه های حسگر پیشنهاد داده که مقدار آن برابر انتگرال هر آنچه است که شبکه حسگر در طول هر دوره زمانی حس می کند. در این روش یک راه حل برای پیدا کردن بیشترین پوشش با کمترین مسیر پیشنهاد شده است. چن در (چن و همکاران، ۲۰۰۱) یک الگوریتم برای روشن یا خاموش کردن نودها بر اساس

ضرورت ارتباط همسایگی پیشنهاد کرد. او در این مقاله سعی در کاهش انرژی مصرف شده بدون تغییر قابل ملاحظه ای در ارتباطات شبکه بود. زو در (خو و همکاران، ۲۰۰۰) روشی در ذخیره انرژی پیشنهاد کرد و به حسگرها اجازه داد تا زمانی که در حال ارسال یا دریافت نباشند، بطور اتوماتیک خاموش شوند.

یک مسئله مرتبط در گسترش شبکه های حسگر، پیدا کردن مکانهای خاص است (بولوسو و همکاران، ۲۰۰۰). در شبکه های حسگر بیسیم، نودها در محیطهای گوناگون و در فواصل مختلفی قرار می گیرند. این مشکل به مبحث پیدا کردن حسگرها بر می گردد و به این دلیل مهم است که در این شبکه ها، حسگرها بر اساس یک الگوی مشخص قرار نمی گیرند زیرا زمانی که حسگرها توسط هواپیما روی یک سطح وسیع ریخته می شوند، حسگرهایی که در زیر آب قرار می گیرند ممکن است توسط جریان آب حرکت داده شوند.

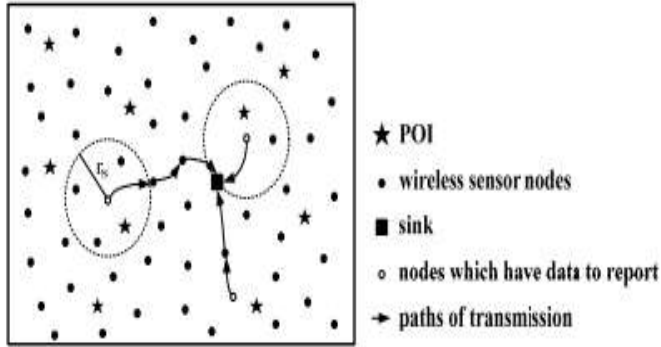
مسئله پوشش مکانهایی از شبکه حسگر بیسیم توسط حسگرهایی مشخص در (کوشانفر و همکاران، ۲۰۰۱) تشریح شده است. دو مبحث پوشش و گسترش، اساسا با هم مرتبط هستند زیرا برای رسیدن به یک پوشش قطعی، یک شبکه ایستا باید بر اساس یک شکل از پیش تعریف شده گسترش یابد. بنابراین گسترش بهینه حسگرها نیازمند پوشش خوبی در نواحی است. در این روش بدلیل اینکه در طول تمام طول عمر شبکه فقط یک بار عمل زمانبندی حسگرها انجام می شود، جزء روشهای غیرهوشمند در نظر گرفته می شود.

با مطالعات انجام شده به این نتیجه رسیدیم که شبکه های حسگر بیسیم یکی از تکنولوژی های مطرح در سال های اخیر بوده و بر خلاف سایر شبکه های بیسیم به شدت با محیط اطراف خود در ارتباط هستند. شبکه های حسگر بیسیم با توجه اهداف طراح برای کاربرد های خاصی طراحی میشوند و در صورت نیاز به تغییر کاربری، بازنگری در ساختار و پروتکل های شبکه امری ضروری می باشد. همانطور که در مطالب ارائه مشاهده شد، شبکه های حسگر با توجه به کاربرد و ساختار شبکه می توانند در سه گروه همگن، ناهمگن و ترکیبی قرار بگیرند که در بین آن ها شبکه های همگن به دلیل سادگی در پیاده سازی و طیف کاربرد های بیشتر و با توجه به این نکته که با اعمال تغییر در ساختار و پروتکل های مربوط به این شبکه ها پتانسیل توسعه و تبدیل به دیگر انواع شبکه حسگر وجود دارد، نسبت به سایرین دارای اهمیت بیشتری می باشند. در این شبکه ها با توجه به استفاده از باتری با انرژی محدود برای تامین انرژی گره های حسگر، بحث انرژی و مدیریت مصرف آن از موضوعات مهم می باشد.

### ۳- روش پیشنهادی

برای پیاده سازی الگوریتم پیشنهادی فرض شده که سینک و اکثر گره های حسگر پس از استقرار ثابت هستند و هیچ گونه جابجایی ندارند. علاوه بر این فرض شده که همه گره ها از لحاظ ظرفیت ارتباطی و محدوده حس و توانایی پردازش شبیه به هم بوده و یک شبکه همگن با استفاده از آن ها ساخته می شود. در ضمن مکان همه گره ها مشخص بوده و سینک از مکان گره ها اطلاع دارد. محدوده حسی یک گره سنسور بصورت دیسکی با شعاع  $r_s$  در نظر گرفته می شود. روش پیشنهادی مسئله

نقطه پوشش<sup>۴</sup> در فضای داده شده را در نظر می گیرند. نقطه ای که حوادث در آن رخ می دهد را POI می نامیم و فرض می کنیم که تمام سیگنال های نشان دهنده رویداد یک اتفاق از POI ها صادر می شوند. با توجه به شکل (۱) هر POI بوسیله تعداد گره حسگر احاطه شده است. اگر یک POI در محدوده حسی  $r_s$  از یک گره سنسور قرار گیرد، گره سنسور آن را حس کرده و اطلاعات لازم مربوط به آن را بصورت چند هاپی<sup>۵</sup> به سینک ارسال می کند.



شکل (۱) محدوده پوشش شبکه حسگر بی سیم

### ۱-۳-مدل پوشش حسگر<sup>۶</sup>

فضای نمونه دو بعدی با سایز  $L_x * L_y$  متر مربع را در نظر می گیریم. مجموعه سنسور های  $R$  را بصورت  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  در نظر می گیریم که در آن  $c_i = \{x_i, y_i, r_s\}$  بوده و  $N$  تعداد کلی سنسور های موجود در محیط است و  $x_i$  و  $y_i$  مکان سنسور و  $r_s$  حوزه حسی آن هستند. مجموعه POI های توزیع شده در فضای  $R$  بصورت  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$  تعریف می شود که  $p_j$  مشخصات POI ای است که در موقعیت  $\{x_j, y_j\}$  وجود داشته و  $M$  تعداد کلی POI ها است. در ضمن متغیر باینری  $R_{i,j}$  را بصورت ۱ تعریف می کنیم که این متغیر نشان می دهد که آیا  $c_i$  می تواند  $p_j$  را پوشش دهد یا خیر؟

$$R_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{if } (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 < r_s^2 \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

اگر فاصله بین  $p_j$  و  $c_i$  کمتر از  $r_s$  باشد  $p_j$  توسط  $c_i$  پوشش داده شده و نتیجه رابطه باینری گفته شده برابر یک و در غیر اینصورت صفر است. البته هر  $p_j$  ممکن است توسط  $v$  گره سنسور مختلف پوشش داده شود. اگر هر  $p_j$  توسط چند گره سنسور پوشش داده شود مجموعه منطقی و باینری بصورت ۲ برای پوشش  $p_j$  قابل محاسبه است که در آن  $\Lambda$  به معنی "و" منطقی و  $\vee$  به معنی "یا"<sup>۸</sup> منطقی است

$$\mathcal{R}_{1,j} \vee \mathcal{R}_{2,j} \dots \vee \mathcal{R}_{v,j} = 1 - \overline{\mathcal{R}_{1,j}} \wedge \overline{\mathcal{R}_{2,j}} \dots \wedge \overline{\mathcal{R}_{v,j}} \quad (2)$$

<sup>4</sup> point coverage problem

<sup>5</sup> multi-hop

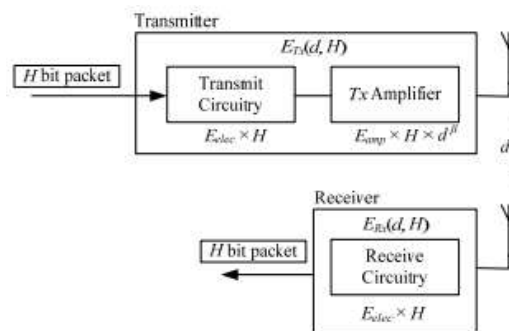
<sup>6</sup> Sensing Coverage Model

<sup>7</sup> and

<sup>8</sup> Or

## ۲-۳- مدل مصرف انرژی

مدل مصرف انرژی در شبکه های حسگر بی سیم باید به گونه ای باشد که در آن مصرف انرژی در کل شبکه یکسان بوده و طول عمر شبکه گسترش پیدا کند. برای مقایسه الگوریتم پیشنهادی با سایر الگوریتم های موجود از مدل هایی که قبلا در این زمینه وجود دارند استفاده می کنیم. مدل مورد نظر در شکل (۲) نشان داده شده است. بدیهی است که مقدار انرژی مصرفی در حالتی که تبادل داده بصورت بی سیم انجام می گیرد نسبت به حالتی که عملیات حسی یا حافظه ای در سنسور رخ می دهد بیشتر است. در این مدل تمام انرژی مصرف شده گره های سنسور را برای تبادل داده در نظر گرفته و از انرژی مصرفی جهت سایر عملیات صرف نظر می کنیم.



شکل (۲) مدل مصرف انرژی

در شکل (۲) پارامتر  $E_{elec}$  انرژی تلف شده در مدار فرستنده یا گیرنده برای ارسال یک بیت بر حسب نانو زول بوده و  $E_{amp}$  انرژی مصرفی تقویت کننده<sup>۹</sup> به ازای هر بیت و  $\beta$  توان مصرفی مسیر می باشد. در نهایت انرژی مصرفی برای ارسال یک بسته  $H$  بیتی بصورت زیر قابل محاسبه است.

$$\begin{aligned} E_{Tx}(d, H) &= E_{elec} \times H + E_{amp} \times H \times d^\beta \\ E_{Rx}(d, H) &= E_{elec} \times H, \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن  $E_{TX}$  و  $E_{RX}$  به ترتیب انرژی مصرفی برای ارسال و دریافت بسته  $H$  بیتی هستند. چون همه گره های حسگر بی سیم بصورت همگن فرض شده اند بنابراین همه گره های سنسور دارای انرژی اولیه یکسان و برابری هستند ولی مقدار انرژی موجود در گره سینک بصورت نامحدود در نظر گرفته می شود.

## ۳-۳- کنترل پوشش با استفاده از الگوریتم ممتیک

مسئله مجموعه پوشش<sup>۱۰</sup>

مسئله مجموعه پوشش یکی از مسائل NP کامل<sup>۱۱</sup> است که آن را به گره بهینه سازی زمان بندی<sup>۱۲</sup> اعمال می کنیم. در این ساختار مسئله مجموعه پوشش، شامل پوشش کامل شبکه با حفظ بهره وری انرژی می شود. مسئله مجموعه پوشش به معنی

<sup>9</sup> power amplifier

<sup>10</sup> The Set Covering Problem (SCP)

<sup>11</sup> NP-Complete

<sup>12</sup> node scheduling optimization

یافتن مجموعه ای از گره های حسگر به کمترین هزینه است بطوریکه هر POI حداقل بوسیله یک گره پوشش داده شود بنابراین داریم؛

*Optimization Model:*

$$\min \sum_i g_i \cdot x_i \quad i \in [1, N] \quad (4)$$

*Subject to:*

$$\sum_j \mathcal{R}_{i,j} \cdot x_j \geq 1, \quad j \in [1, M] \\ x_i = 1 \text{ or } 0, \quad i \in [1, N], \quad (5)$$

که  $g_i$  هزینه فعال کردن هر گره است و  $x_i$  ها متغیرهای کلیدی تصمیم گیری هستند که باید بوسیله الگوریتم پیشنهادی مشخص شوند. (به عنوان مثال صفر برای غیر فعال و یک برای فعال). تابع موجود در رابطه ۴ تعداد گره هایی که باید فعال شوند را کمینه می کند. فرض می کنیم هزینه فعال سازی تمامی گره ها یکسان و برابر یک است. محدودیت شرح داده شده در معادله ۵ تصریح می کند که هر  $p_j$  باید با حداقل یک گره پوشش داده شود. هنگامی که شبکه فعال شده است، استفاده از مدل بهینه سازی نشان داده شده در ۴ و ۵ باعث بهبود بهره وری انرژی در شبکه خواهد شد.

#### ۴-۳- الگوریتم پیشنهادی برای شبکه های حسگر بی سیم مبتنی بر خوشه

الگوریتم پیشنهادی شامل دو استراتژی برای بهینه سازی مصرف انرژی است که شامل زمان بندی گره های حسگر بر پایه الگوریتم ممتیک و طرح بیداری<sup>۱۳</sup> است. استراتژی اول گره های اضافی در شبکه های حسگر مبتنی بر خوشه را بر پایه زمان بندی با الگوریتم ممتیک غیر فعال می کند. سپس از طرح بیداری برای مدیریت بهینه سازی بهره وری انرژی در هر مرحله استفاده می شود. الگوریتم ممتیکی از دو بخش عملگرهای الگوریتم ژنتیک و جستجوی محلی ساخته شده است. جمعیت اولیه معمولاً بصورت تصادفی ساخته می شود و پروسه تکاملی بوسیله عملگرهای الگوریتم ژنتیک مانند انتخاب<sup>۱۴</sup>، تقاطع<sup>۱۵</sup> و جهش<sup>۱۶</sup> انجام می گیرد.

هر مشخصه شامل راه حلی با مقدار برازش متناظر است که از تابع برازش به دست می آید. از تابع برازش<sup>۱۷</sup> برای مشخص کردن بهینگی راه حل استفاده می شود. بعد از تکمیل عملیات الگوریتم ژنتیک از جستجوی محلی برای افزایش مقدار برازش استفاده می شود. با تکرار این عملیات جمعیت جدید از افراد برتر تولید می شود و نتایج حاصله به نقطه بهینه نزدیک خواهند شد.

#### ۵-۳- توضیح عملیات ژنتیک

طراحی یک ارائه ژنتیکی<sup>۱۸</sup> برای حل مسئله گفته شده در الگوریتم ژنتیک و ممتیک ضروری به نظر می رسد. ارائه ژنتیکی بهتر باعث افزایش کارایی فرایند تکامل خواهد شد. برای بهینه سازی پوشش مبتنی بر کارایی مصرف انرژی لازم است تا زمان بندی گره ها بصورت مناسبی با ساختار ژنتیک بیان شود. در الگوریتم پیشنهادی در هر لحظه از زمان بندی بهینه گره ها برای فعال سازی یا غیر فعال کردن گره ها استفاده می شود بنابراین طول عمر شبکه افزایش می یابد. راه حل زمان بندی بصورت

<sup>13</sup> wake-up scheme

<sup>14</sup> selection

<sup>15</sup> crossover

<sup>16</sup> mutation

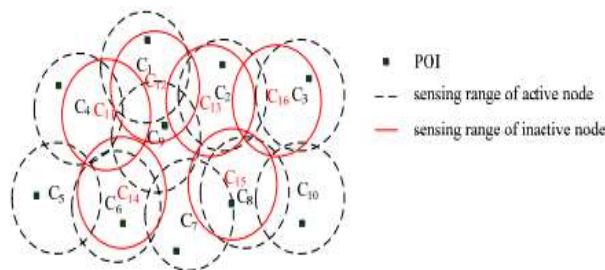
<sup>17</sup> fitness function

<sup>18</sup> genetic representation

باینری با صفرها و یکها بیان می شود وضعیت هر گره آلل<sup>۱۹</sup> بوسیله نمایش داده خواهد شد. به عنوان مثال صفر نشان دهنده گره های حسگر غیر فعال و یک نشان دهنده گره های حسگر فعال می باشد. ساختار ژنتیکی جهت بهینه سازی پوشش با بهره وری انرژی در شکل (۳) نشان داده شده است. در این شکل،  $\Lambda$  نشان دهنده تعداد کروموزوم ها بوده و  $L_{i,j}$  وضعیت گره حسگر  $j$  در کروموزوم  $i$  را نشان می دهد و طول هر کروموزوم نیز برابر  $N$  است. چون تنوع کروموزوم ها باعث تنوع جمعیت خواهد شد بنابراین استفاده از جمعیت اولیه مناسب برای صحت عملکرد الگوریتم پیشنهادی اهمیت ویژه ای دارد. برای دستیابی به جمعیتی با بهترین ژن، می توان در طول اجرای الگوریتم پیشنهادی تعداد جمعیت اولیه را متغیر در نظر گرفت ولی در این پایان نامه این تعداد ثابت فرض شده است. همانطور که در شکل (۴) قابل مشاهده است از شانزده گره حسگر برای تعیین وضعیت محیط استفاده شده است که برخی از آن ها گره های اضافی<sup>۲۰</sup> هستند که با رنگ قرمز نشان داده شده است. برای حفظ انرژی گره ها و رسیدن به سطح پوشش مطلوب، زمان بندی بهینه ای برای گره های حسگر جهت غیر فعال سازی گره های اضافی مورد نیاز است. با توجه به مطالب قبلی از ساختار ژنتیکی 111111111100000 جهت نمایش کروموزومی که وضعیت گره های موجود در این شکل را نشان می دهد استفاده خواهد شد.

	$\ell_{i,1}$	$\ell_{i,2}$	$\ell_{i,3}$	$\ell_{i,j}$	...	$\ell_{i,N}$
chromosome 1	1	0	0	1	...	1
chromosome 2	0	1	0	0	...	0
...						
chromosome $i$	1	1	1	0	...	1
...						
chromosome $\Lambda$	0	1	1	1	...	0

شکل (۳) ساختار ژنتیکی مورد استفاده در الگوریتم پیشنهادی



شکل (۴) محدوده حسی شانزده گره برای پوشش ده POI

### ۳-۶- تابع برازندگی<sup>۲۱</sup>

جهت تعیین مقدار بهینگی و نزدیک شدن به جواب نهایی در کروموزوم موجود در یک مسئله از تابع برازندگی استفاده می شود. بردار پوشش مربوط به هر گره خاص CI بصورت  $Ji=[r_{i,1}, r_{i,2}, \dots, r_{i,M}]$  تعریف می شود. برای تعیین اینکه یک

<sup>19</sup> allele

<sup>20</sup> redundant

<sup>21</sup> Fitness Function



POI توسط یک سنسور پوشش داده می شود یا نه از یک مدل باینری استفاده خواهد شد. بردار خروجی حاصل از اجتماع باینری  $C_i$  و  $C_j$  جهت بررسی پوشش استفاده می شود بصورت زیر است.

$$\begin{aligned} \varpi(c_i, c_j) &= \pi_i \vee \pi_j \\ &= [\mathfrak{R}_{i,1} \vee \mathfrak{R}_{j,1}, \mathfrak{R}_{i,2} \vee \mathfrak{R}_{j,2}, \dots, \mathfrak{R}_{i,M} \vee \mathfrak{R}_{j,M}], \end{aligned} \quad (6)$$

ساختار برای تعیین بردار پوشش در کروموزوم  $K$  ام از رابطه زیر استفاده می شود

$$\varpi(k) = (\ell_{k,1} \cdot \pi_1) \vee (\ell_{k,2} \cdot \pi_2) \dots \vee (\ell_{k,N} \cdot \pi_N). \quad (7)$$

چون محاسبه مقدار پوشش بصورت باینری انجام می گیرد، بنابراین کارایی روش پیشنهادی افزایش قابل توجهی خواهد داشت و می توان درصد پوشش یک کروموزوم را بصورت زیر محاسبه نمود؛

$$\varepsilon^k = \frac{\|\varpi(k)\|^2}{M}, \quad (8)$$

که در آن صورت کسر نشان دهنده تعداد گره های حسگر فعال موجود در محیط است. نسبت ابزار<sup>۲۲</sup> گره برای کروموزوم  $K$  نیز بصورت زیر محاسبه می شود.

$$N_t^k = \frac{\sum_{g=1}^N \ell_{k,g}}{N}, \quad (9)$$

که در آن صورت کسر نشان دهنده تعداد گره هایی است که برای فعال شدن انتخاب شده اند.  $f_c^k$  را به عنوان مقدار خوبی<sup>۲۳</sup> کروموزوم تعریف کرده و بصورت زیر نشان می دهیم.

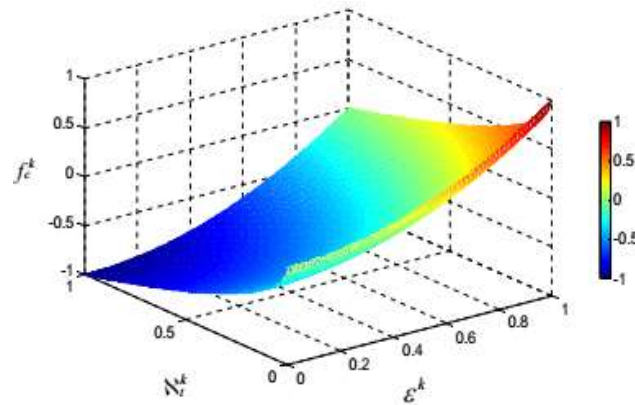
$$f_c^k = \alpha_1 \cdot (\varepsilon^k)^{\lambda_1} - \alpha_2 \cdot (N_t^k)^{\lambda_2}. \quad (10)$$

با جایگذاری روابط داریم

$$f_c^k = \alpha_1 \cdot \left( \frac{\|\varpi(k)\|^2}{M} \right)^{\lambda_1} - \alpha_2 \cdot \left( \frac{\sum_{g=1}^N \ell_{k,g}}{N} \right)^{\lambda_2}, \quad (11)$$

<sup>22</sup> utility ratio

<sup>23</sup> goodness



شکل (۵) ساختار تابع برازندگی

### ۷-۳- عملگر های ژنتیکی

عملگر های ژنتیکی شامل تقاطع، انتخاب و جهش هستند. برای انجام عمل انتخاب از روش های مختلفی استفاده می شود که سه نمونه معروف آن تناسب<sup>۲۴</sup> و چرخه رولت<sup>۲۵</sup> و مسابقه<sup>۲۶</sup> هستند. در روش پیشنهادی از مسابقه جهت انتخاب کروموزوم ها استفاده شده است. این روش از رقابت بین کروموزوم ها استفاده کرده و سپس کروموزوم برنده را جهت انجام تقاطع مشخص می کند. در این روش ده کروموزوم از جمعیت اولیه انتخاب شده و از بین آن ها دو کروموزوم برتر به عنوان والدین انتخاب می شوند و با استفاده از عملگر تقاطع فرزندان جدید را می سازند. به منظور حفظ تنوع جمعیت، تعیین نرخ تقاطع بسیار مهم است. نرخ تقاطع  $R_c$  احتمال تولید کروموزوم جدید از کروموزوم های موجود را مشخص می کند که در الگوریتم پیشنهادی از تقاطع تک نقطه ای<sup>۲۷</sup> استفاده شده است.

جهش عملگری است که از گیر کردن الگوریتم ژنتیک در نقاط بهینه محلی جلوگیری می کند. این عملگر مقدار یک یا چند ژن را در کروموزوم ها تغییر می دهد و با این کار کروموزوم های جدیدی به حوزه کروموزوم<sup>۲۸</sup> ها افزوده می شود. معمولاً عمل جهش بعد از تقاطع انجام می شود و احتمال تغییر یک ژن با  $R_m$  نمایش داده می شود. با توجه به انجام عملیات تقاطع و جهش به ازای هر بار تکرار<sup>۲۹</sup> مقدار تابع برازندگی افزایش خواهد یافت.

<sup>24</sup> proportional fitness

<sup>25</sup> roulette wheel

<sup>26</sup> tournament

<sup>27</sup> single-point crossover

<sup>28</sup> gene pool

<sup>29</sup> iteration

۸-۳- طرح جستجوی محلی<sup>۳۰</sup>

در الگوریتم پیشنهادی از طرح جستجوی ساده ای جهت بهبود نتایج حاصل از عملگرهای ژنتیک استفاده شده است. در الگوریتم پیشنهادی مقدار هر ژن از یک به صفر تغییر می کند و جهت حفظ مقدار جدید مقدار تابع برازندگی بررسی می شود. شبه کد مربوط به این کار در شکل (۶) نشان داده شده است که در آن  $Li, j$  کروموزوم ها و  $Pop_k = \{u_1, u_2, \dots, u_p\}_k$  جمعیت  $K$  برای کروموزوم  $p$  است.

```

Step 1: Input a population  $Pop_k = \{u_1, u_2, \dots, u_p\}_k$  to the local search unit.
Step 2: Let  $u_i$  be the  $i$ -th chromosome in  $Pop_k$ , and  $N$  be the length of  $u_i$ . According to the definition of allele  $\ell_{i,j}$ , we know that  $u_i$  is a binary string composed of  $\ell_{i,j}$ , where  $\forall i, 1 \leq j \leq N$ .
  For  $i=1$  to  $p$  do
    For  $j=1$  to  $N$  do
      If the value of  $\ell_{i,j}$  is equal to one then
        Record the allele  $\ell_{i,j}$  in the array  $S_i$ .
      End
    End
  End
Step 3: For  $y=1$  to  $p$  do
  Let  $h$  be the length of  $S_y$ .
  For  $l=1$  to  $h$  do
     $fitness1 = fit(u_y)$ ; //  $fit()$  is the fitness function.
    In  $u_y$ , let the allele  $c_{tmp}$ , corresponding to the  $l$ th element in  $S_y$ , be zero.
     $fitness2 = fit(u_y)$ ; // Re-evaluate the fitness
    If  $fitness1 > fitness2$  then
      Let  $c_{tmp}$  equal to one.
    End
  End
End
Step 4: Output the improved  $Pop_k$ .

```

## شکل (۶) شبه کد جستجوی محلی

مقدار ژن های روی کروموزوم در صورتی که گره غیر لازمی و فعالی وجود داشته باشد تغییر خواهد نمود. که وجود جستجوی محلی باعث می شود این تغییرات با سرعت بالا تری انجام گیرد. شرط توقف الگوریتم پیشنهادی این است که مقدار کروموزوم پس تعداد تکرار که بوسیله حد آستانه مشخص می شود تغییر نکند.

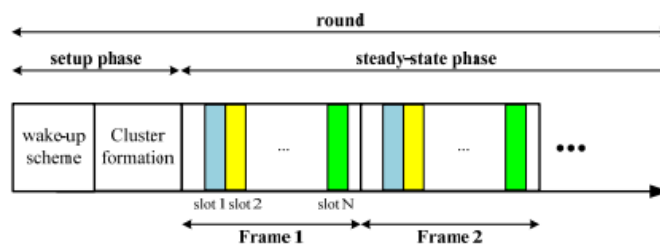
## ۹-۳- طرح بیداری

با توجه به بهینه سازی انرژی جهت پوشش شبکه طرح جدیدی برای بیدار کردن گره های حسگر برای پوشش POI مبتنی بر حفظ انرژی گره های موجود در شبکه ارائه شده است.

<sup>30</sup> Local Search Scheme

در شبکه های حسگر مبتنی بر خوشه هر گره حسگر خود را درون یک خوشه قرار می دهد و در هر خوشه فقط یک گره به عنوان سرخوشه انتخاب می شود. در این شبکه ها جهت تبادل داده بین گره ها و سرخوشه از TDMA<sup>۳۱</sup> استفاده می شود. در این شبکه ها هر سرخوشه نیز می تواند بطور مستقیم با ایستگاه مرکزی تبادل داده نموده و پیام ها را مبادله کند. سرخوشه زمان بندی TDMA را مشخص کرده و به سایر گره های موجود در خوشه اطلاع می دهد.

در ضمن سرخوشه می تواند بازه های زمانی<sup>۳۲</sup> هر گره را تنظیم کند. پس از این تنظیمات گره ها داده ها را با توجه به زمانبندی انجام شده به سرخوشه ارسال می کنند. نمونه ای از این زمان بندی در شکل (۷) نشان داده شده است



شکل (۷) زمان بندی گره ها

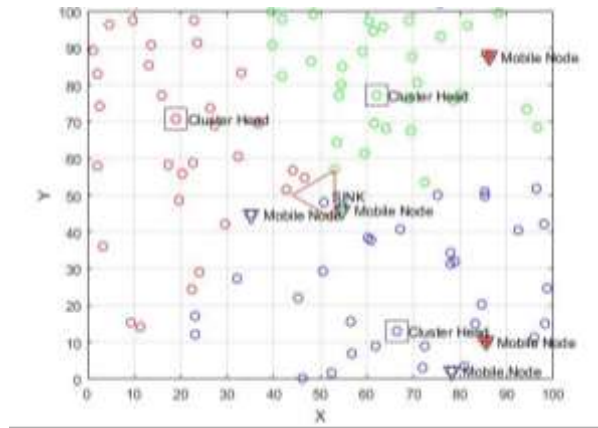
وقتی سینک متوجه که نابودی یا مرگ یک گره شد بهترین گره را جهت جانشین کردن با گره مرده انتخاب و سپس آن را بیدار می کند.

### ۱۰-۳- نتایج حاصل از اجرای الگوریتم پیشنهادی

در ادامه نتایج حاصل از اجرای الگوریتم پیشنهادی با تعداد یکصد گره ثابت و پنج گره سیار نشان داده شده است. در این شبیه سازی فرض شده که مکان سینک ثابت بوده و کل فضای که گره ها در آن توزیع شده اند دارای طول و عرض یکصد متر در یکصد متر می باشد. محدوده حسی هر گره پنج متر و طول پیام های رد و بدل شده هشت بیت است. شکل (۸) توزیع گره ها در محیط را نشان می دهد. گره های حسگر بصورت تصادفی و با توزیع نرمال در محیط پخش شده اند و هر یک از آن ها عملیات حس مربوط به محیط را بر عهده دارد.

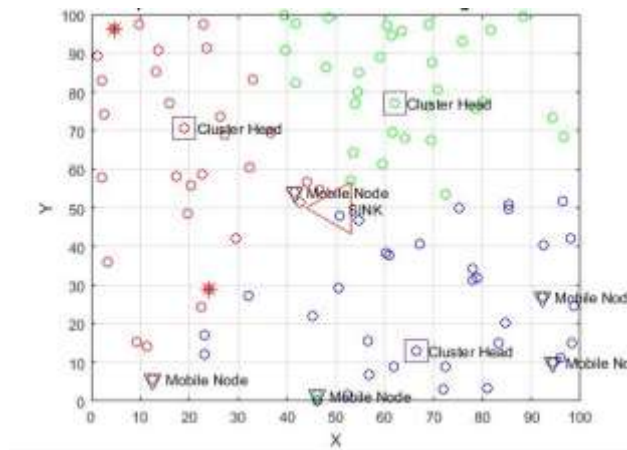
<sup>31</sup> Time Division Multiple Access

<sup>32</sup> time slot



شکل (۸) توزیع گره ها در محیط

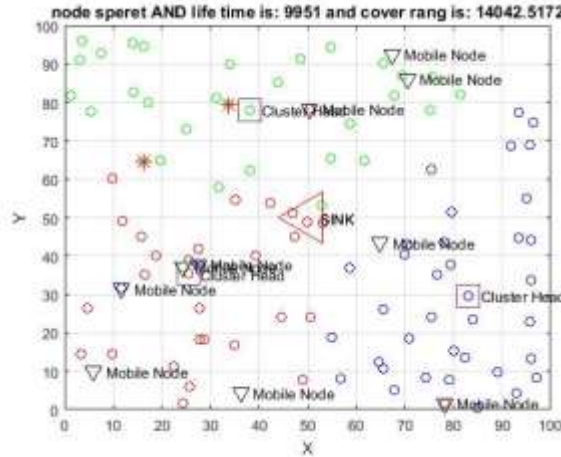
با گذر زمان مکان گره های سیار تغییر کرده و به دلیل تبادل داده فی مابین گره ها، برخی گره های حسگر ممکن است بواسطه تخلیه انرژی بمیرند. شکل (۹) تغییرات قابل انجام در ساختار شبکه را نشان می دهد.



شکل (۹) تغییرات قابل انجام در ساختار شبکه

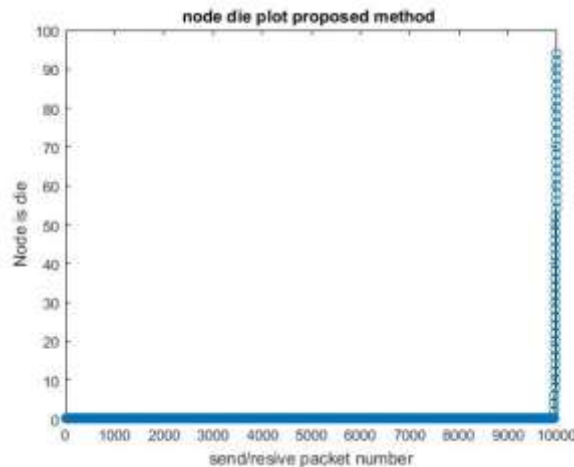
با گذر زمان تعداد گره های زنده کاهش یافته و طول عمر و پوشش شبکه تغییر می کند. مصرف انرژی هر گره را می توان در سه بخش تقسیم بندی نمود. بخش اول مربوط به فعال بودن اجزای گره و توانایی حس اتفاقات رخ داده در محیط پیرامون گره است. بخش دوم انرژی مصرفی جهت ارسال داده به سرخوشه یا سینک یا سایر گره ها می شود و در نهایت هنگام دریافت داده یا اطلاعاتی که گره به آن نیاز دارد نیز مقداری از انرژی گره مصرف خواهد شد. بیشترین مصرف انرژی صرف ارسال و یا دریافت داده می شود و از انرژی ای که جهت حس اتفاقات پیرامون گره مصرف شده صرف نظر می کنیم. بنابراین انرژی مصرفی در گره با استفاده از رابطه شماره ۳ قابل محاسبه است. و کاهش انرژی با توجه به این رابطه انجام می گیرد. با تبادل داده مابین گره ها یا سرخوشه ها انرژی گره تحلیل رفته و سپس گره خواهد مرد. با مرگ گره ساختار شبکه تغییر کرده

و تعداد گره های زنده موجود در شبکه کاهش خواهد یافت. همانطور که قبلا گفته شد شکل (۱۰) تغییر پوشش شبکه را نشان می دهد. منظور از تغییر پوشش، مرگ برخی از گره ها و کاهش فضای قابل حس توسط گره ها می باشد.



شکل (۱۰) تغییر پوشش و طول عمر شبکه با گذر زمان

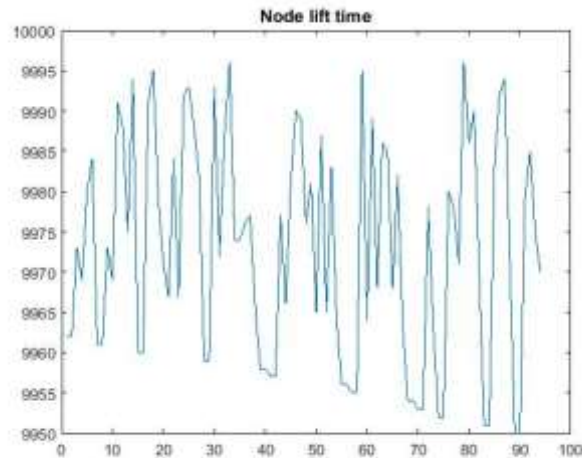
شکل (۱۱) مرگ گره ها را نشان می دهد. مشاهده می شود که با تبادل داده در گذر زمان، انرژی گره ها تخلیه شده و آن ها خواهند مرد. این شکل نیز به راحتی از رابطه شماره ۳ موجود در این بخش قابل استخراج است. چراکه به ازای هر تبادل داده در شب که، مقداری از انرژی گره تحلیل می رود و در نهایت با کاهش انرژی موجود در گره، مرگ آن فراخواهد رسید.



شکل (۱۱) مرگ گره ها

هر گره با توجه به وجود POI در اطراف خود اقدام به تبادل داده می کند. با توجه به اینکه توزیع POI ها در محیط بصورت تصادفی هستند پس گره ها نیز بصورت تصادفی اقدام به تبادل داده خواهند نمود. با توجه به رابطه شماره ۴ موجود در همین

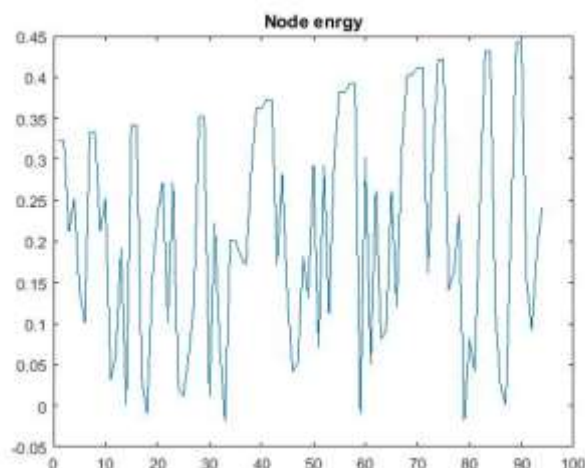
فصل سعی داریم تا تعداد گره های فعال در اطراف POI به کمترین مقدار کاهش یابد. هرچند که تعداد گره های فعال در اطراف POI را کاهش می دهیم ولی تبادل داده با صرف انرژی همراه بوده و باعث کاهش سطح انرژی گره می شود که این کاهش با رابطه شماره ۳ قابل نمایش است. شکل (۱۲) مرگ اولین گره را نشان می دهد. در این شکل محور افقی شماره گره و محور عمودی تعداد دفعات تبادل داده را نشان می دهد. در این شکل طول عمر هر گره نشان داده شده است. با تبادل داده بین گره ها انرژی هر گره تحلیل رفته و گره خواهد مرد. مرگ گره بواسطه تخلیه انرژی موجود در باتری آن انجام می شود. با بررسی شکل (۱۲) مشاهده می شود که گره هایی که تبادل داده بیشتری داشته و یا سرخوشه شده اند نسبت به سایر گره ها مصرف انرژی بیشتری داشته و به نسبت مرگ سریع تری را دارند. به عنوان مثال گره نود و ششم مصرف انرژی بیشتر و مرگ سریع تری داشته است. مصرف انرژی با توجه به رابطه شماره ۳ و شانس انتخاب به عنوان سرخوشه توسط روابط ۶ تا ۹ تعیین می شود که این مسئله افزایش مصرف انرژی و مرگ سریع تر گره را در پی دارد. برای محاسبه میانگین انرژی باقی مانده در هر گره در هر تبادل داده انرژی گره را ذخیره کرده و بر تعداد کل دفعات تبادل داده تقسیم می کنیم. شکل (۱۳) میانگین انرژی موجود در گره ها را نشان می دهد.



شکل (۱۲) طول عمر گره ها

بدیهی است که گره هایی که انرژی بیشتری را دارند دیرتر خواهند مرد. ذخیره انرژی گره به دلیل اینکه گره مدت زمان زیادی را در خواب به سر می برد دیر تر تخلیه و مصرف شده و در نتیجه طول عمر گره بالا می رود. بطور کلی رابطه زیر میانگین انرژی باقی مانده در گره را نشان می دهد.

$$\text{مانده باقی انرژی} = \frac{\text{جمع حاصل انرژی باقی مانده در گره در هر تبادل داده}}{\text{تعداد کلی دفعات تبادل داده}}$$



شکل (۱۳) میانگین انرژی موجود در گره ها

#### ۴- ملاک ارزیابی الگوریتم پیشنهادی

برای مقایسه الگوریتم های مختلف حفظ انرژی در شبکه های حسگر بی سیم ملاک های مختلفی را می توان معرفی نمود که با استفاده از آن ها می توان الگوریتم های مورد نظر را بررسی کرده و مزایا و معایب هر یک را برشمرد. برای بررسی الگوریتم پیشنهادی این پایان نامه از پارامتر هایی چون سطح پوشش شبکه، طول عمر شبکه، استفاده می کنیم. سپس پارامتر های گفته شده را با الگوریتمی لیچ مقایسه کرده و نتایج را در قالب نمودار نشان می دهیم.

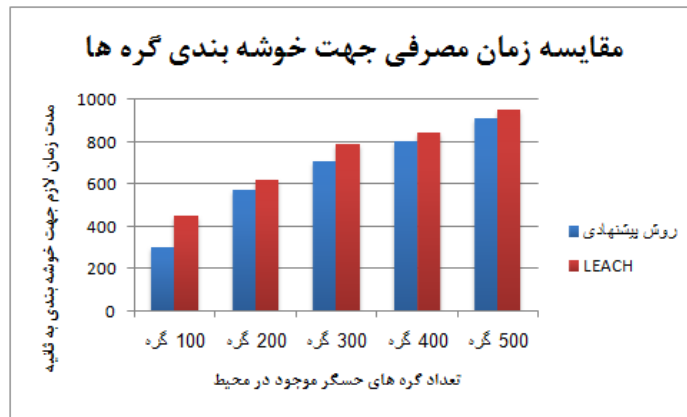
#### ۴-۱- ارزیابی الگوریتم پیشنهادی

مصرف انرژی در شبکه حسگر بی سیم در متد پیشنهادی این مقاله بررسی شد و نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی این مقاله با الگوریتم لیچ<sup>۳۳</sup> مقایسه شده است. شکل (۱۴) مدت زمان لازم جهت انجام الگوریتم لیچ را در مقایسه با روش پیشنهادی نشان می دهد. با توجه به این شکل مشاهده می شود که روش پیشنهادی زمان اجرای کمتری دارد طول عمر شبکه را نسبت به الگوریتم لیچ نشان می دهد.

---

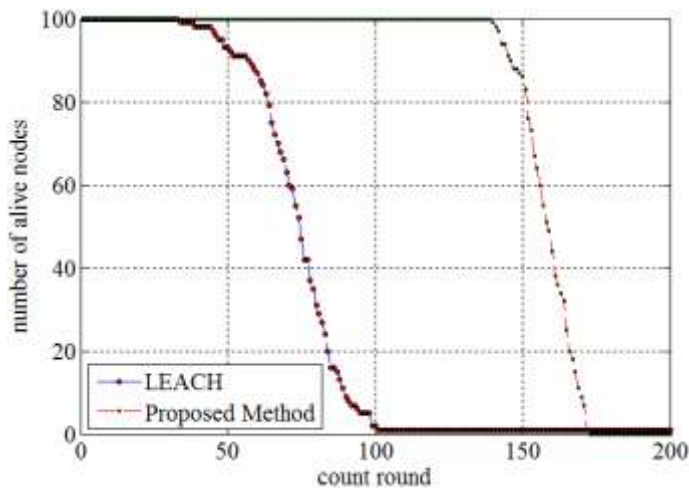
<sup>33</sup> LEACH





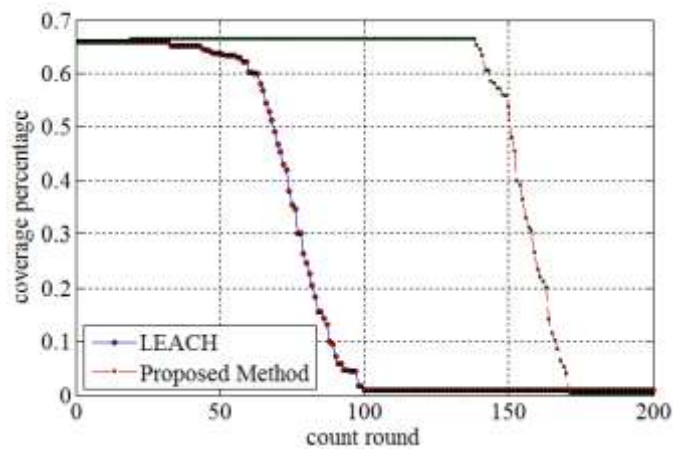
شکل (۱۴) مقایسه زمان مصرفی جهت خوشه بندی گره ها در الگوریتم پیشنهادی و روش لیچ

طول عمر شبکه در حالتی که از الگوریتم پیشنهادی این پایان نامه استفاده شده و حالتی که از لیچ استفاده شده با هم متفاوت است که این تفاوت در شکل (۱۵) نشان داده شده است. به عبارتی الگوریتم پیشنهادی مصرف انرژی در گره را کاهش داده و بواسطه این کاهش مصرف انرژی طول عمر شبکه را افزایش داده است.



شکل (۱۵) مقایسه طول عمر شبکه مابین الگوریتم لیچ و الگوریتم پیشنهادی

شکل (۱۶) مقدار پوشش مربوط به شبکه را در حالتی که از الگوریتم پیشنهادی استفاده شده با حالتی که از لیچ استفاده شده مقایسه کرده است.



شکل (۱۶) مقایسه میزان پوشش شبکه مابین الگوریتم لیچ و الگوریتم پیشنهادی

## ۵- جمع بندی

در این مقاله افزایش طول عمر شبکه با استفاده از الگوریتم ممتیک بررسی شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. طرح پیشنهادی از یک روش ترکیبی الگوریتم زمانبندی خواب با الگوریتم های تکاملی که سعی در کاهش تعداد پیام انتقالی در شبکه های حسگر بیسیم و افزایش بهره وری انرژی دارد استفاده می شود. این طرح به کمک در نظر گرفتن فاصله زمانی بیداری گره و فاصله مسافت گره از گره اصلی و محاسبه انرژی باقی مانده گره بنا شده است. در این طرح با در نظر گرفتن انرژی باقی مانده در گره ها به عنوان پارامتر انتخاب گره و حرکت آن به سمت گره اصلی، بار مصرف انرژی به طور مساوی میان گره ها توزیع می شود. در کارهای گذشته به اهداف به صورت همزمان توجه نمی شد و ما در این کار به صورت همزمان به دو پارامتر فاصله زمانی بیداری گره و فاصله مسافت گره توجه نمودیم تا به بهینه نمودن دو هدف یعنی کاهش تعداد پیام های ارسالی بین گره ها و افزایش طول عمر شبکه بیانجامد. در آینده می توان با ترکیب الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات و روش فازی نسبت به افزایش طول عمر و سطح پوشش شبکه اقدام نمود.

## ۶-منابع

1. Akyildiz, I.F., et al., *Wireless sensor networks: a survey*. Computer Networks, 2002. 38(4): p. 393-422
2. Abbasi, A.Z., N. Islam, and Z.A. Shaikh, *A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture*. Computer Standards & Interfaces, 2014. 36(2): p. 263-270.
3. Pantazis, N.A., S.A. Nikolidakis, and D.D. Vergados, *Energy-Efficient Routing Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey*. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2013. 15(2): p. 551-591
4. S. Meguerdichian, F. Koushanfar, M. Potkonjak, and M. Srivastava "Coverage Problems in Wireless Ad-Hoc Sensor Network," Proc. IEEE INFOCOM '01, pp. 1380-1378, 2001
5. Al-Karaki, J.N. and A.E. Kamal, *Routing techniques in wireless sensor networks: a survey*, in *Wireless Communications, IEEE*. 2004. p. 6-28.
6. X.-Y. Li, P.-J. Wan, O. Frieder "Coverage in Wireless AdHoc Sensor Networks," Proc. IEEE Trans. Computers, vol.52, no. 6, JUNE 2003.
7. H. Huang and A.W. Richa, "Dynamic Coverage in Ad-Hoc Sensor Networks," Mobile Networks and Applications 10, 9-17, 2005.
8. J. M. Kahn, R. H. Katz and K. S. J. Pister, "Mobile networking for smart dust", ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networks, pp. 271-278, 1999
9. D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann and S. Kumar, "Next century challenges: Scalable coordination in sensor networks", Proc. ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networks, 1999.
10. R. R. Brooks and S. S. Iyengar, "Multi-Sensor Fusion: Fundamentals and Applications with Software", Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, 1998.
11. S. S. Iyengar, L. Prasad and H. Min, "Advances in Distributed Sensor Technology", Prentice-Hall, 2011.
12. Di Tian and Nicolas D. Georganas. "A coverage-preserving node scheduling scheme for Large wireless sensor networks". In Proceedings of the First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA), Atlanta, Georgia, USA, September 2002.
13. S. Meguerdichian, F. Koushanfar, G Qu, and M. Potkonjak "Exposure in Wireless Ad-Hoc Sensor Networks," Proc. of 4th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (01 pp. 139-150, July 2001.
14. B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnana, R. Morris, Span: "An Energy-Efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks", 01 2001.
15. Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin, "Adaptive Energy Conserving Routing for Multihop Ad hoc Networks", Technical Report 527, USC/ISI, Oct.2000.
16. N. Bulusu, J. Heidemann and D. Estrin, "GPSless low-cost outdoor localization for very small devices", IEEE Personal Communication Magazine, vol. 7, no. 5, pp. 34-28, Oct 2000.