

نگهداری پوشش و اتصال در شبکه‌های حسگر بی‌سیم: رویکرد اتوماتای یادگیر سلولی

محمد رضا میبدی
دانشگاه صنعتی امیرکبیر
mmeybodi@aut.ac.ir

مهدي اثنى عشرى
دانشگاه صنعتى اميركبير
esnaashari@aut.ac.ir

رضا قادری
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک
ghaderi_re@yahoo.com

در این مقاله، یک الگوریتم توزیع شده برای کنترل تراکم در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با نام کنترل تراکم جغرافیایی مبتنی بر اتوماتای یادگیر سلولی^۱ (GDC-CLA) ارائه می‌شود. هدف این الگوریتم نگهداری پوشش و اتصال با استفاده از حداقل تعداد گره‌های فعال به نحوی می‌باشد که مجموع انرژی مصرفی گره‌ها حداقل شود. در واقع، GDC-CLA می‌تواند به عنوان یک پروتکل نگهداری انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با طول عمر بالا بکار گرفته شود. با تعیین رابطه بین پوشش و اتصال، بر حل مسئله پوشش کامل ناحیه شبکه بر اساس کمینه کردن تعداد گره‌های فعال تمرکز می‌کنیم. ادامه مقاله بدین صورت سازماندهی شده است که در بخش ۲ مروری بر کارهای مشابه ارائه می‌شود. در بخش ۳ اتوماتای یادگیر سلولی به طور مختصر مرور می‌شود. بخش ۴ تعیین رابطه بین پوشش و اتصال را توضیح می‌دهد. در بخش ۵ الگوریتم کنترل تراکم پیشنهادی شرح داده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها در بخش ۶ آورده شده است. بخش ۷ نیز نتیجه گیری و پیشنهاد کار آینده است.

۲- کارهای مرتبه انجام شده

مسئله پوشش و اتصال یکی از موضوعات اساسی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم است که الگوریتم‌های متتمرکز و توزیع شده زیادی در این زمینه ارائه شده است [2,3,4,5,6,7,8]

در [8] به حل مسئله پوشش و اتصال در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با راهکاری متتمرکز می‌پردازد. این راهکار ترکیبی، متشکل از دو فاز است: یک الگوریتم ژنتیک و یک جستجوی محلی بر پایه دو الگوریتم گراف کلاسیک. الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله پوشش با حداقل تعداد گره‌هایی که برای پوشش کل ناحیه شبکه نیاز است به کار می‌رود. الگوریتم‌های کلاسیک دایجسترا و پریم اتصال گره‌های فعال را تضمین می‌کنند.

پروتکل ASCENT [5] توبولوژی شبکه حسگر را به طور خودکار پیکربندی می‌کند. در ASCENT هر گره بر اساس تعداد همسایه‌های فعال و نرخ اثلاف داده که از طریق ترافیک داده اندازه گیری می‌شود برای خوابیدن یا بیدار ماندن تصمیم گیری می‌کند. در ASCENT پوشش کامل ناحیه تحت نظرات مورد توجه قرار نمی‌گیرد.

مراجع [6,7] به ارائه رابطه‌ای میان محدوده احساس و محدوده ارتباط رادیوئی گره‌ها پرداخته‌اند که با فرض وجود این رابطه، پوشش کامل ناحیه، اتصال ناحیه را تضمین می‌نماید. در این رابطه، شعاع رادیوئی لاقل دو برابر شعاع احساس در نظر گرفته می‌شود.

در [2,3] الگوریتم کنترل تراکم مبتنی بر کاوش توزیع شده‌ای با عنوان PEAS ارائه شده است. در PEAS یک زیرمجموعه از گره‌ها برای نگهداری

چکیده: وجود گره‌های افزونه در شبکه‌های حسگر بی‌سیم به دلایل مختلف از جمله احتمال بالای خرابی در این شبکه‌ها و نیاز به طول عمر بالا بسیار معمول می‌باشد. در چنین شرایطی نیاز به پروتکل‌های مشاهده می‌شود که بتوانند به صورت توزیع شده، زیرمجموعه حداقلی از گره‌ها را به عنوان گره‌های فعال به گونه‌ای انتخاب کنند که کل محیط شبکه توسط این گره‌ها پوشش داده شود. در این مقاله الگوریتم GDC-CLA ارائه شده است که با استفاده از اتوماتای یادگیر سلولی سعی در کمینه کردن تعداد گره‌های فعال در شبکه به گونه‌ای دارد که دو شرط پوشش کل محیط و متصل بودن شبکه برآورده شود. در این الگوریتم، هر گره به یک اتوماتای یادگیر مجهز است که به صورت محلی و براساس انرژی باقیمانده و وضعیت همسایه‌های گره، برای فعال یا غیرفعال بودن آن گره تصمیم‌گیری می‌نماید. نتایج شبیه‌سازی‌ها در محیط شبیه‌ساز J-sim GDC-CLA را به ویژه در مقابل نرخ بالای خرابی‌های غیرمنتظره و اتمام انرژی گره‌ها- مشخص می‌کند.

کلمات کلیدی: شبکه‌های حسگر بی‌سیم، اتوماتای یادگیر سلولی، پوشش شبکه، اتصال گره‌های فعال، نگهداری انرژی

۱- مقدمه

یکی از موضوعات اساسی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مسئله پوشش می‌باشد که مشخص می‌کند چه طور این شبکه به وسیله گره‌های حسگر مورد نظر قرار می‌گیرد [1]. تمرکز این مقاله روی مسئله پوشش محیطی (که در آن هدف اصلی، نظارت کامل ناحیه شبکه است) می‌باشد. مسئله مهم دیگری که در ارتباط تنگاتنگ با مسئله پوشش است، مسئله اتصال گره‌های فعال می‌باشد. دلیل اهمیت مسئله اتصال آن است که در صورت عدم اتصال یک یا چند گره، این گره‌ها امکان انتقال داده‌های جمع‌آوری شده خود به ایستگاه پایه (Sink) را نخواهند داشت.

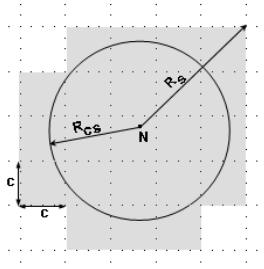
در اغلب موارد، گره‌های حسگر منابع انرژی محدودی دارند و تعویض باتری در آنها به سادگی صورت نمی‌پذیرد؛ بنابراین ذخیره توان در هر گره حسگر نقش حیاتی در افزایش طول عمر شبکه دارد. از آنجایی که یک ویژگی طراحی شبکه‌های حسگر وجود افزونگی در تعداد گره‌های است، برای افزایش طول عمر شبکه و نیز مواجه شدن با خرابی‌های احتمالی گره‌ها می‌توان با غیرفعال کردن برخی از گره‌ها، امکان ذخیره انرژی در گره‌های غیرفعال را فراهم نمود. غیرفعال ساختن برخی از گره‌ها همچنین احتمال تصادم بسته‌ها را نیز بسیار کاهش خواهد داد. بدینهی است که در غیرفعال ساختن گره‌ها دو هدف باید لزوماً مد نظر قرار گیرند؛ پوشش کل محیط و اتصال شبکه. در این مقاله، به الگوریتمی که با غیرفعال ساختن تعدادی از گره‌ها، شرایط فوق را برآورده می‌سازد، الگوریتم کنترل تراکم گفته می‌شود.

^۱ Geographical Density Control based on Cellular Learning Automata

$\times \times$ را به سلول‌های مربعی با ابعاد c^* تقسیم می‌کنیم. محدوده احساس و محدوده انتقال رادیوئی را که برای همه گره‌های حسگر یکسان می‌باشدند به ترتیب با R_{cs} و R_t نمایش می‌دهیم. یک سلول در صورتی پوشش داده می‌شود که به طور کامل در محدوده احساس یک گره حسگر فعال باشد. برای هر گره حسگر، یک شاعع محاسباتی احساس (که آن را با R_{cs} نمایش می‌دهیم) در نظر می‌گیریم که بر حسب شاعع واقعی احساس (R_t) و اندازه سلول به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$R_{cs} = R_s - \sqrt{2}c \quad (1)$$

که در آن، $\sqrt{2}c$ طول قطر یک سلول می‌باشد. دلیل تعریف رابطه (1) به صورت فوق این است که اگر یکی از رأس‌های هر سلول، کمترین همپوشانی ممکن را با محدوده محاسباتی احساس یک گره داشته باشد، بر اساس شاعع واقعی احساس گره به طور کامل پوشش داده می‌شود. بنابراین همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، یک سلول در صورتی پوشش داده می‌شود که در محدوده شاعع محاسباتی احساس یک گره حسگر فعال باشد (در شکل ۱ سلول‌های تیره رنگ، سلول‌های تحت پوشش گره فعال N بر اساس R_{cs} می‌باشند). پوشش ناحیه شبکه از حاصل تقسیم تعداد سلول‌های پوشش داده شده بر تعداد کل سلول‌های ناحیه به دست می‌آید.



شکل ۱) سلول‌های تحت نظارت گره فعال N بر اساس R_{cs}

بدیهی است که با توجه به این روش سلولی، پوشش محاسبه شده هرگز بیشتر از پوشش واقعی ناحیه شبکه نخواهد بود.

تعیین رابطه بین شاعع احساس و شاعع انتقال رادیوئی هر گره

لم ۱- فرض کنید شبکه حسگری که دارای گره‌های یکسان می‌باشد براساس روش محاسبه سلولی پوشش با سلول‌هایی به ابعاد c^* به طور کامل پوشش داده شده است. در این صورت این شبکه متصل است اگر و تنها اگر $R_t \geq 2R_{cs} + 2c$

اثبات:

شرط لازم: برای اثبات شرط لازم، باید نشان دهیم که اگر شبکه حسگر متصل باشد، آنگاه $R_t \geq 2R_{cs} + 2c$. برای اثبات این مطلب، عکس نقیض این گزاره را ثابت می‌کنیم؛ یعنی نشان می‌دهیم که اگر $R_t < 2R_{cs} + 2c$ آنگاه شبکه لزوماً متصل نمی‌باشد. این مطلب را به کمک یک مثال نقض نشان می‌دهیم. شبکه ارائه شده در شکل ۲ را در نظر می‌گیریم. در این شبکه، یک گره حسگر با شاعع محاسباتی احساس R_{cs} و شاعع انتقال رادیوئی $R_t < 2R_{cs} + 2c$ در نقطه O و مجموعه‌ای از گره‌های حسگر مشابه درون

پوشش و اتصال در حالت فعال باقی می‌مانند و سایر گره‌ها به خواب می‌روند. هر گره در حالت خواب پس از بیدار شدن، وجود گره‌های در حال کار همسایه‌اش را بررسی می‌کند. اگر هیچ گره در حال کاری در محدوده شاعع کاوش گره نباشد، عملیات در حالت فعال را آغاز می‌کند؛ در غیراینصورت مجدداً به خواب برمی‌گردد. PEAS بر اساس تعیین رابطه بین محدوده کاوش و محدوده انتقال رادیوئی، اتصال گره‌های در حال کار را تضمین می‌کند اما تضمینی برای پوشش کامل ناحیه تحت نظارت ندارد. در این الگوریتم یک گره حسگر در حالت کار، تا زمان خرابی و یا اتمام توان باتری به طور پیوسته بیدار می‌ماند. الگوریتم [4] مشابه PEAS عمل می‌کند؛ با این تفاوت که برخلاف PEAS، در این الگوریتم، هر گره پس از اینکه مدت زمانی را در حال کار به فعالیت می‌پردازد، به حالت خواب می‌رود و یکی از گره‌های همسایه جایگزین آن می‌شود. بدین ترتیب توازنی مابین مصرف انرژی گره‌های حسگر برقرار می‌شود.

۳- اتوماتای یادگیر سلولی

اتوماتای یادگیر سلولی (CLA)، ترکیبی از اتوماتای سلولی (CA) [9] و اتوماتای یادگیر (LA) [10,11] است که یک مدل ریاضی قدرتمند برای بسیاری از مسائل نامتمرکز می‌باشد. ایده اساسی CLA، بهره گرفتن از اتوماتای یادگیر برای تعیین احتمال انتقال حالت اتوماتای سلولی است. یک CLA می‌باشد که در آن یک اتوماتای یادگیر به هر سلول اختصاص داده می‌شود. اتوماتای یادگیر مقیم در یک سلول خاص، عمل یا حالت را بر اساس بردار احتمال عمل‌های خود تعیین می‌کند. مشابه CA، CA نیز CLA را تشکیل می‌دهند. برای اطلاعات بیشتر در مورد اتوماتای یادگیر سلولی می‌توان به [12,13] مراجعه نمود.

۴- اطمینان از اتصال بر اساس تعیین رابطه بین پوشش و اتصال

در این بخش روشی برای اطمینان از اتصال شبکه حسگر ارائه می‌شود که در آن با به دست آوردن رابطه‌ای میان شاعع احساس یک گره حسگر و شاعع انتقال رادیوئی آن، شاعع رادیوئی گره به گونه‌ای تعیین می‌شود که در صورت اطمینان از پوشش شبکه، اتصال شبکه نیز فراهم گردد. در حقیقت، با به دست آوردن این رابطه و تعیین شاعع انتقال رادیوئی هر گره بر اساس آن، دیگر نیازی به ارائه الگوریتمی برای حفظ اتصال نخواهد بود، بلکه تنها لازم است که شبکه به طور کامل پوشش داده شود، اتصال شبکه نیز برقرار خواهد بود. به منظور تعیین رابطه مدنظر، لازم است که ابتدا روش محاسبه پوشش محیط را مشخص کنیم.

روش سلولی محاسبه پوشش

با توجه به آنکه عملاً امکان بررسی پوشش تک‌تک نقاط شبکه وجود ندارد (بررسی بینهایت نقطه در محیط)، برای محاسبه پوشش ناحیه شبکه، از روش سلولی استفاده می‌کنیم. در این روش، پوشش بر اساس موقعیت گره‌ها و محدوده احساس آنها محاسبه می‌گردد؛ بدین صورت که ناحیه شبکه به ابعاد

گره متصل هستند. بنابراین باید گرههای P و D غیر متصل باشند؛ زیرا در غیر اینصورت دو گره S و D از طریق گره P متصل هستند. از آنجا که $\angle SPD > \frac{\pi}{2}$ ، بنابراین طول پاره خط SD بزرگتر از طول پاره خط PD می‌باشد. این با فرض اولیه که S و D کمترین فاصله را در بین همه زوج گرههای غیرمتصل دارا می‌باشند در تناقض است. □

نتیجه با اهمیتی که از لم فوق گرفته می‌شود این است که اگر محدوده انتقال رادیوئی حداقل به اندازه $2R_{cs} + 2c$ باشد پوشش کامل ناحیه، به معنای اطمینان از اتصال گرههای فعال شبکه خواهد بود. در اینصورت برای حل مسئله پوشش و اتصال، می‌توانیم فقط بر حل مسئله پوشش کامل ناحیه شبکه تمرکز کنیم.

۵- الگوریتم کنترل تراکم پیشنهادی

الگوریتم GDC-CLA باید دو نیاز را برآورده سازد؛ پوشش کامل ناحیه و اتصال شبکه. همانگونه که در بخش ۴ بیان شد، با در نظر گرفتن فرض ارائه شده در لم ۱، در صورتی که الگوریتم GDC-CLA پوشش ناحیه را فراهم سازد، اتصال شبکه خود به خود تضمین خواهد شد. برای این الگوریتم مفروضات زیر را در نظر می‌گیریم:

- توزیع اولیه گرهها در سطح ناحیه شبکه باید بتواند پوشش کامل ناحیه را برآورده سازد.
 - هر گره از موقعیت خود در ناحیه آگاه است.
 - رابطه بین محدوده احساس و محدوده انتقال رادیوئی طبق رابطه ارائه شده در لم ۱ می‌باشد.
 - هر گره از تعداد گرههای توزیع شده در ناحیه شبکه آگاه است. این تعداد را با SENSOR_NODES_NUMBER مشخص می‌کنیم.
- در ادامه جزئیات الگوریتم GDC-CLA ارائه می‌شود.

۱-۵ تشریح جزئیات GDC-CLA

در ابتدا گراف شبکه به یک اوتوماتای یادگیر سلوی نگاشت می‌شود. در این نگاشت، هر گره حسگر S_i در شبکه با سلول i از CLA متناظر می‌شود و دو سلول i و j در CLA مجاورند اگر در محدوده شاعع R_{cs} یکدیگر قرار داشته باشند. به عبارت دیگر، دو سلول زمانی مجاورند که دیسکهای با شاعع R_{cs} مربوط به آنها با یکدیگر همپوشانی داشته باشند. بنابراین شاعع همسایگی که آنرا با R_n نمایش می‌دهیم، به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$R_n = 2R_{cs} - \varepsilon \cong 2R_{cs} \quad (2)$$

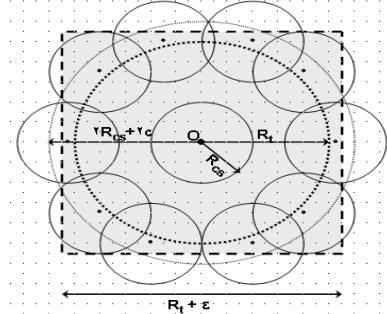
اوتوماتای یادگیر هر سلول i که آن را با LA_i نمایش می‌دهیم، از الگوریتم یادگیری خطی زیر استفاده می‌کند.

$$\begin{aligned} p_i(n+1) &= p_i(n) + a[1 - p_i(n)] \\ p_j(n+1) &= (1-a)p_j(n) \end{aligned} \quad \forall j, j \neq i \quad (3)$$

برای پاسخ مطلوب، و

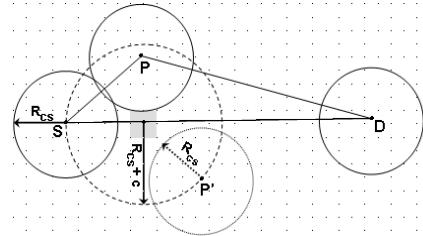
$$\begin{aligned} p_i(n+1) &= (1-b)p_i(n) \\ p_j(n+1) &= \frac{b}{r-1} + (1-b)p_j(n) \end{aligned} \quad \forall j, j \neq i \quad (4)$$

مربعی با مرکز O و با طول ضلع $R_t + \varepsilon < 2R_{cs} + 2c$ و $\varepsilon > 0$ قرار گرفته‌اند؛ به نحوی که ناحیه شبکه (مربع خط چین و با طول ضلع $R_t + R_{cs}$) به طور کامل پوشش داده شده است. از آنجا که مطابق شکل ۲ فاصله بین گره O و هر یک از گرههای دیگر بیشتر از R_t است، این شبکه متصل نمی‌باشد.



شکل ۲) شرط لازم برای آنکه پوشش کامل ناحیه، اتصال شبکه را تضمین نماید، شرط $R_t \geq 2R_{cs} + 2c$ می‌باشد

شرط کافی: برای اثبات شرط کافی، باید نشان دهیم که اگر $R_t \geq 2R_{cs} + 2c$ آنگاه شبکه متصل است. برای این کار از برهان خلف استفاده می‌کنیم؛ بدین منظور فرض می‌کنیم که $R_t \geq 2R_{cs} + 2c$ ، اما شبکه متصل نیست. اگر شبکه غیرمتصل باشد، لااقل یک زوج گره وجود خواهد داشت که هیچ مسیری بین آنها وجود ندارد. فرض کنید (S,D) یک زوج گره غیر متصل با کمترین فاصله در بین همه زوج گرههای غیرمتصل باشند (مطابق شکل ۳).



شکل ۳) شرط کافی برای آنکه پوشش کامل ناحیه، اتصال شبکه را فراهم نماید، شرط $R_t \geq 2R_{cs} + 2c$ می‌باشد

دایره‌ای را با شاعع $R_{cs} + c$ درنظر می‌گیریم که مرکز آن روی خط واصل گرههای S و D است و گره P روی محیط آن قرار دارد. از طریق برهان خلف نشان می‌دهیم که در این حالت، حداقل یک گره مانند P در داخل این دایره قرار خواهد داشت. فرض کنید هیچ گره‌ای داخل دایره مزبور وجود نداشته باشد. در این صورت کمترین فاصله‌ای که یک گره مانند P' می‌تواند نسبت به مرکز دایره داشته باشد به اندازه $R_{cs} + c$ می‌باشد که در این حالت P' روی محیط دایره قرار خواهد داشت. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، از آنجا که کمترین فاصله بین گره P' و هر نقطه از محیط سلول واقع در مرکز دایره، بیشتر از R_{cs} می‌باشد، این سلول توسط هیچ گره‌ای پوشش داده نخواهد شد که با فرض پوشش کامل شبکه در تناقض می‌باشد. بنابراین درون دایره گذرنده از گره S حداقل یک گره مانند P قرار خواهد داشت. از آنجا که فاصله گرههای S و P کمتر از $2R_{cs} + 2c$ می‌باشد ($2R_{cs} + 2c \leq R_t$)، این دو

می شود) پوشش ناحیه تحت نظارتیش بر اساس دریافت بسته های وضعیت همسایه های فعال تضمین نشود، عمل α_1 جریمه می شود؛ در غیر اینصورت عمل α_1 پاداش می گیرد.

هر گره حسگر فعال پس از ارسال بسته وضعیت به اندازه مدت زمان T به همسایه های خود تضمین می دهد که ناحیه تحت نظارت خود را پوشش خواهد داد؛ به عبارت دیگر در این مدت تحت هیچ شرایطی اجازه غیرفعال شدن و رفتن به حالت "SLEEP" را ندارد. بر این اساس، برای گره هایی که در حالت "WAIT_FOR_SLEEP" قرار دارند و با دریافت بسته های وضعیت از همسایه های فعال اطمینان حاصل می کنند که ناحیه تحت نظارت شان توسط همسایه ها پوشش داده می شود (هر زمان برای گره s_i در فاصله زمانی τ_0 این اطمینان حاصل گردد، می تواند به حالت "SLEEP" برود)، مدت زمان خوابیدن با توجه به پارامتر T تعیین می شود. (یعنی با توجه به مدت زمان تضمین همسایه های فعال که براساس زمان آخرین بسته های وضعیت دریافتی از آنها مشخص می شود)

به استثنای مورد خاصی که در بخش ۲-۱-۵ مورد بحث قرار می گیرد، زمان تصمیم گیری در مورد انتخاب عمل جدید، پس از انتخاب عمل اولیه بر اساس معادله (۵)، به صورت زیر تعیین می شود:

- اگر گره s_i در حالت "WAIT_FOR_SLEEP" باشد و عمل α_1 جریمه شود، در اینصورت LA_i با توجه به بردار احتمال جدید خود، یکی از اعمال α_0 یا α_1 را انتخاب می کند. همانند آغاز کار و انتخاب عمل اولیه، اگر عمل انتخابی α_0 باشد گره s_i به حالت "WORK" می رود و اگر عمل انتخابی α_1 باشد، به حالت "WAIT_FOR_SLEEP" وارد خواهد شد.

- اگر گره s_i در حالت "WORK" باشد و عمل α_0 جریمه شود، تصمیم گیری برای انتخاب عمل جدید در هنگام ارسال بسته وضعیت بعدی انجام می شود؛ این تصمیم گیری مشابه زمانی است که گره s_i در حالت "WAIT_FOR_SLEEP" قرار دارد، با این تفاوت که اگر این گره به حالت "WAIT_FOR_SLEEP" وارد شود، با توجه به تضمین به همسایه های خود، باید تا پایان مدت زمان این تضمین تمامی وظائف یک گره حسگر در حالت "WORK" را به استثنای ارسال بسته وضعیت انجام دهد و اجازه غیرفعال شدن ندارد.

۱-۱-۵ فاصله زمانی بین ارسال بسته های وضعیت

با توجه به اینکه در ابتدا و بلا فاصله پس از اولین بیدار شدن، گره های حسگر هیچ اطلاعی از همسایه های خود ندارند، گره های فعال، ارسال دو بسته وضعیت متواتی را با فاصله زمانی τ_0 آغاز می کنند. به عبارت دیگر فاصله زمانی بین اولین و دومین بسته وضعیت ارسالی یک گره فعال τ_0 خواهد بود؛ اما از این پس و تا پایان زمان اجرای الگوریتم، زمان ارسال بسته وضعیت بعدی با درنظر گرفتن حجم ترافیک بار شبکه به صورت وفقی و براساس رابطه زیر تعیین خواهد شد.

$$\tau = \frac{N_2}{N_1} \times \tau_0, \quad N_2 \neq 0 \quad (6)$$

برای پاسخ نامطلوب. در این روابط، a و b به ترتیب پارامترهای پاداش و جریمه می باشند. اگر $p_i(n)$ احتمال عمل انتخابی α_i ($\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r\}$) مجموعه عمل های اتومات است) در زمان n باشد، احتمال این عمل در زمان $n+1$ است.

LA_i از نوع L_{R-P} ^۱ است ($a = b$) و دو عمل α_0 و α_1 دارد. α_0 عمل فعال و α_1 عمل خواب می باشد. برای هر گره s_i احتمال انتخاب هر یک از اعمال α_0 و α_1 را در آغاز بر اساس رابطه (۵) در نظر می گیریم:

$$P_0 = \frac{N_1}{SENSOR_NODES_NUMBER} \quad (5)$$

$$P_1 = 1 - P_0$$

در این رابطه، N_1 به نحوی تعیین می گردد که از حداقل تعداد گره های مورد نیاز برای پوشش کامل ناحیه به اندازه کافی بزرگ تر باشد؛ تا اینکه یک توزیع اولیه مناسب از گره های فعال برای پوشش ناحیه داشته باشیم.

برای آنکه گره های همسایه بتوانند از وضعیت یکدیگر اطلاع داشته باشند، در طول اجرای الگوریتم بسته های با عنوان بسته های وضعیت میان آنها رد و بدل می شود (زمان ارسال این بسته ها توسط هر گره در ادامه توضیح داده خواهد شد). هر بسته وضعیت شامل محل قرار گیری گره در ناحیه شبکه و شناسه گره می باشد. هر گره حسگر بر اساس بسته های وضعیت دریافتی از همسایه های فعال خود، برای هر همسایه، محل قرار گیری و زمان دریافت آخرين بسته وضعیت را نگه می دارد. گره های حسگر در آغاز هیچ اطلاعی از همسایه های خود ندارند و با دریافت بسته های وضعیت، اطلاعات در مورد همسایه های فعال خود را به روز رسانی می کنند.

همانند الگوریتم PEAS [۳]، در ابتدا گره های حسگر در حالت "SLEEP" قرار دارند. هر گره s_i پس از یک مدت زمان تصادفی در بازه $(0, \tau_0)$ بیدار می شود. τ_0 بیشینه دوره تناوب ارسال بسته های وضعیت در گره های فعال می باشد. گره s_i بعد از بیدار شدن، بر اساس احتمالات اولیه LA مربوط به خود (معادله (۵))، یکی از دو عمل α_0 یا α_1 را انتخاب می کند. اگر این گره عمل α_0 را انتخاب نماید، به حالت "WORK" رفته و بسته وضعیت خود را برای تمامی همسایه های خود ارسال می نماید. در صورتی که عمل α_1 انتخاب شود، گره بلا فاصله به حالت "SLEEP" نمی رود، بلکه منتظر دریافت بسته های وضعیت همسایه های فعال احتمالی خود می ماند و در واقع به حالت "WAIT_FOR_SLEEP" وارد می شود.

عمل انتخابی اتوماتیک یادگیر هر گره به صورت زیر پاداش یا جریمه دریافت می کند:

- اگر گره s_i در حالت "WORK" باشد، در صورتی که با دریافت بسته های وضعیت در طول زمان τ_0 از همسایه های فعال، اطمینان حاصل کند که ناحیه تحت نظارت شان توسط همسایه ها پوشش داده می شود، عمل α_0 خود را جریمه می کند؛ ولی اگر تا پایان مدت زمان τ_0 این اطمینان حاصل نشود، عمل α_0 پاداش می گیرد.
- در صورتی که گره s_i در حالت "WAIT_FOR_SLEEP" باشد و تا پایان مدت زمان τ_0 (به استثنای حالت خاصی که در بخش ۲-۱-۵ بحث

^۱ Linear Reward-Penalty

بدین ترتیب با احتمال بالایی همسایه می‌توانند جایگزین گره s_i گردند. از این پس مدت زمان انتظار گره s_i در حالت "WAIT_FOR_SLEEP" برای دریافت بسته‌های وضعیت همسایه‌های

فعال، قبل از بهروز رسانی LA_i طبق رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$\tau' = T + Cn \times \tau_0 \quad (7)$$

که در آن Cn با توجه به پارامتر جریمه b تعیین می‌گردد و کوچکترین عدد صحیح مشتبی است که در رابطه زیر صدق می‌کند.

$$(1-b)^{Cn} < Prob_0 \quad (8)$$

در این رابطه $Prob_0$ احتمال کوچکی است. دلیل تعیین τ' به صورت فوق آن است که زمان کافی برای فعال شدن همسایه‌های s_i و در نتیجه احتمال بالای جایگزینی این همسایه‌ها با گره s_i وجود داشته باشد.

از آنجایی که ممکن است سطح انرژی باقیمانده گره s_i قبل از ارسال اولین بسته وضعیت و تضمین به همسایه‌ها، به ۵۰٪ انرژی اولیه و یا کمتر از آن "WAIT_FOR_INACTIVE" رسانیده باشد، در اینصورت گره s_i به حالت "WAIT_FOR_SLEEP" وارد نمی‌شود و در حالت قبلی خود یعنی "WAIT_FOR_SLEEP" باقی ماند. با توجه به این که گره s_i قبل از تصمیم گیری برای انتخاب عمل a_0 می‌ماند. در این کار را مجدداً انجام نخواهد داد. در طول عمر شبکه هرگز حداقل به مدت τ_0 در حالت "WAIT_FOR_SLEEP" قرار داشته است، قبل از بهنگام کردن اتوماتای یادگیر خود، حداکثر به اندازه $\tau_0 - \tau'$ منتظر دریافت بسته‌های وضعیت همسایه‌ها خواهد ماند. از این زمان به بعد، برای گره s_i در حالت "WAIT_FOR_SLEEP" مدت زمان انتظار قبل از بهروز رسانی LA_i همان τ' خواهد بود.

اگر از لحظه تغییر مدت زمان انتظار قبل از بهروز رسانی اتوماتای یادگیر، تنها یکبار عمل a_1 مربوط به LA_i جریمه شود، بدان معناست که با وجود زمان کافی، جایگزینی گره s_i با همسایه‌ها انجام نگرفته است؛ بنابراین مجدداً مدت زمان انتظار قبل از بهنگام کردن اتوماتای یادگیر گره s_i به اندازه $\tau_0 - \tau'$ خواهد شد.

در شکل ۴ دیاگرام انتقال حالت در الگوریتم GDC-CLA آورده شده است.

```

For each node  $s_i$  corresponding with cell  $i$  in CLA do in parallel
    Initialize
    WakeupAfter(Random(0,  $\tau_0$ ))
    Select an action according equation (5)
    If (the action is  $a_0$ ) then
        ChangeModeTo(WORK)
    else /* the action is  $a_1$  */
        ChangeModeTo(WAIT_FOR_SLEEP)
    End if
    While (Not SensorDead) do
        While (the node is in WORK Mode) do
            If (RemainingEnergy > 0.5 * InitialEnergy) then
                Broadcast StatusPacket
            else If (FirstTime) /* RemainingEnergy <= 0.5 * InitialEnergy */
                Expire previous LA and create new LA with probability vector (0 /* $a_0$ */, 1 /* $a_1$ */)
                ChangeModeTo(WAIT_FOR_INACTIVE)
                stay in WAIT_FOR_INACTIVE mode until end of assurance to neighbors
                ChangeModeTo(WAIT_FOR_SLEEP)
            End if
            Update LA's probability vector
        End while
        While (the node is in WAIT_FOR_SLEEP Mode) do
            If (the node is covered with neighbors And (Not AssuranceToNeighbors)) then
                ChangeModeTo(SLEEP)
            End if
            Update LA's probability vector
        End while
        If (the node is in SLEEP Mode) then
            WakeupAfter(SleepTime)
            ChangeModeTo(WAIT_FOR_SLEEP)
        End if
    End While
End for

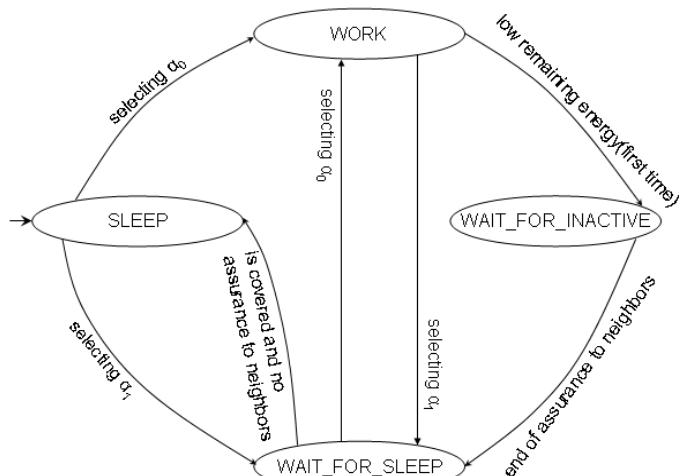
```

که در آن پارامتر N_2 ، تعداد گره‌های فعالی است که سیگنال رادیویی بسته‌های وضعیت ارسالی آنها توسط گره s_i در فاصله زمانی τ_0 گذشته احساس شده است.

۲-۱-۵ ایجاد توازن در مصرف انرژی گره‌ها با نگهداری

گره‌های Alive

در [3] PEAS در حال کار تا زمان خرابی و یا اتمام توان باقی باشی به طور پیوسته بیدار می‌ماند. این جنبه از الگوریتم PEAS باعث عدم توازن مصرف انرژی بین گره‌های حسگر خواهد شد. در صورتی که احتمال بالای خرابی برای گره‌های حسگر را در کنار این مسئله در نظر بگیریم، نتیجه می‌تواند کاهش چشمگیر طول عمر شبکه باشد. برای رفع این مشکل، در GDC-CLA هرگاه انرژی باقیمانده گره فعال s_i به ۵۰٪ انرژی اولیه خود و یا کمتر از آن برسد، این گره LA قبلی خود را منقضی و یک LA با بردار احتمال جدید ایجاد می‌کند. در این LA جدید، احتمال اعمال a_0 و a_1 به ترتیب τ_0 و $1 - \tau_0$ می‌باشد؛ بدین معنا که گره s_i قصد غیرفعال شدن و رفتن به حالت "SLEEP" را دارد. توجه به این نکته لازم است که این اتفاق در طول عمر شبکه در هر گره تنها یک بار رخ می‌دهد. به عبارت دیگر، گره‌ای که یک بار اتوماتی خود را به صورت فوق تغییر داده است، در طول عمر شبکه هرگز این کار را مجدداً انجام نخواهد داد. در صورتی که گره فعال s_i اتوماتی خود را به صورت فوق تغییر داد، به حالت "WAIT_FOR_INACTIVE" می‌رود و تا پایان مدت زمان تضمین به همسایه‌های خود در این حالت باقی ماند. در حالت مذکور، گره s_i بدون توجه به بسته‌های وضعیت دریافتی از همسایه‌ها، تمامی وظایف یک گره حسگر در حالت "WORK" را به استثنای ارسال بسته وضعیت انجام می‌دهد و در واقع همچنان یک گره فعال خواهد بود. پس از اتمام زمان فعالیت گره s_i به حالت "WAIT_FOR_SLEEP" وارد می‌شود. حداکثر زمان انتظار برای دریافت بسته‌های وضعیت همسایه‌ها برای گره‌ای که از حالت "WAIT_FOR_INACTIVE" به حالت "WAIT_FOR_INACTIVE" وارد شده است T می‌باشد. در واقع زمان T حداکثر مدت زمان خوابیدن برای یک گره در حالت "SLEEP" می‌باشد.



شکل ۴) دیاگرام انتقال حالت عملیات

در هر گره حسگر

جدول ۱) تعدادی از مقادیر پارامترهای استفاده شده در GDC-CLA

MAX SPEED	R _s	R _t	τ_0	N ₁	Prob ₀
2 m/s	17.071 m	30 m	1.27 s	25	0.1

۲-۱-۶ معیارهای ارزیابی

معیارهایی که برای ارزیابی الگوریتمها در نظر گرفته می‌شوند عبارتند از: (i) تعداد گرههای فعال شبکه؛ (ii) درصد پوشش ناحیه؛ (iii) مجموع انرژی مصرفی گرههای حسگر؛ (iv) تعداد گرههای حسگر Alive (گرههایی که هنوز در اثر اتمام انرژی یا خرابی از کار نیفتاده‌اند) در طول زمان فعالیت شبکه؛ (v) طول عمر شبکه که همانند [7] بر حسب پوشش و به صورت زیر تعریف می‌شود: فاصله زمانی بین آغاز کار شبکه تا زمانی که پوشش کامل ناحیه توسط گرههای حسگر فعال فراهم می‌شود. معیار دیگری که می‌توان در نظر گرفت، درصد تحويل بسته شناسائی هدف به گره ایستگاه پایه می‌باشد که براساس نتایج آزمایشات، درصد تحويل بسته‌های شناسائی هدف با شماره ترتیب متمایز به گره ایستگاه پایه در الگوریتم‌های PEAS، PECAS و GDC-CLA تقریباً 100% می‌باشد.

۲-۶ نتایج شبیه سازی ها

به منظور ارزیابی معیارهای ذکر شده در بخش قبل، سه آزمایش روی الگوریتم GDC-CLA پیشنهادی و الگوریتم‌های PEAS [3] و PECAS [4] انجام گرفته است:

۱-۲-۶ آزمایش اول

در این آزمایش زمان اجرای شبیه سازی را 1000s در نظر می‌گیریم و آزمایش برای تعداد ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ گره حسگر انجام می‌شود. شکل (a). میانگین تعداد گرههای فعال شبکه در طول زمان اجرا را برای سه الگوریتم نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که علیرغم افزایش تعداد کل گرههای حسگر در محیط، تعداد گرههای فعال در الگوریتم GDC-CLA افزایش محسوسی ندارد. بر اساس نتایج این آزمایش، تعداد گرههای فعال در الگوریتم GDC-CLA مطابق شکل (a).6. به طور میانگین بیش از ۵۵% در مقایسه با PEAS و بیش از ۶۹% در مقایسه با PECAS کاهش یافته است. در شکل (b).6. میانگین درصد پوشش ناحیه شبکه در طول زمان اجرا برای هر سه الگوریتم نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود GDC-CLA به ازای تعداد گرههای مختلف، برخلاف PEAS و PECAS پوشش کامل ناحیه را فراهم می‌کند؛ در نتیجه GDC-CLA اتصال گرههای فعال را تضمین می‌کند. شکل (c).6. مجموع انرژی مصرفی گرههای حسگر را در الگوریتم‌های مختلف نمایش می‌دهد. مطابق این شکل GDC-CLA به طور میانگین در مقایسه با PEAS بیش از 30% و در مقایسه با PECAS بیش از 55% کاهش مصرف انرژی را نشان می‌دهد.

۲-۲-۶ آزمایش دوم

به منظور ارزیابی تحمل پذیری الگوریتم‌ها در برابر خرابی‌های غیرمنتظره در این آزمایش در زمان‌های تصادفی، خرابی گرههای حسگر را به شبکه تزریق می‌کنیم؛ برای اینکه تأثیر خرابی‌ها در شبکه پرtraکم حسگر تا حد زیادی

با توجه به اینکه تا قبل از زمان جریمه شدن عمل انتخابی اتماتای یادگیر هر سلوو i ، LA_i عمل جدیدی انتخاب نمی‌کند، هر گره s_i که از حالت "SLEEP" به "WAIT_FOR_SLEEP" وارد می‌شود، پس از بیدار شدن دوباره به حالت قبلی خود یعنی "WAIT_FOR_SLEEP" بر می‌گردد. شکل ۵ شبکه کد الگوریتم ارائه شده را نشان می‌دهد.

۲-۵ ارسال داده به گره ایستگاه پایه

گرههای فعال در صورت شناسائی یک هدف، بسته‌ای حاوی اطلاعات مرتبط با هدف شناسائی شده را ایجاد و آن را برای گره ایستگاه پایه ارسال می‌دارند. این بسته شامل شناسه گره حسگر، موقعیت گره، شماره ترتیب بسته ارسالی و داده مربوط به هدف شناسائی شده می‌باشد.

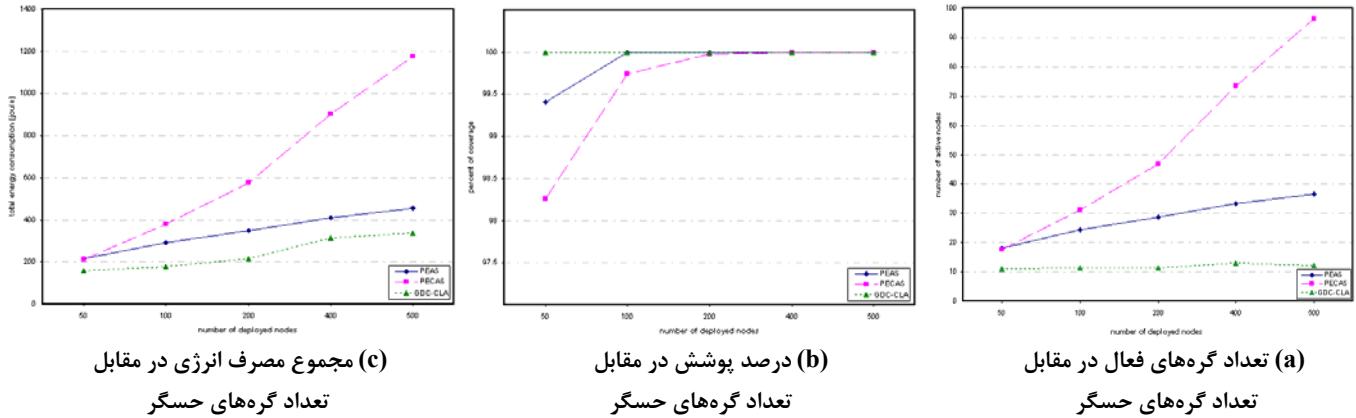
۶- ارزیابی کارایی

۱-۶ آماده‌سازی شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی و ارزیابی کارایی الگوریتم GDC-CLA پیشنهادی از شبیه‌ساز J-sim استفاده شده است. نتایج به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی با نتایج آزمایشات الگوریتم‌های PEAS [3] و PECAS [4] مورد مقایسه قرار گرفته است. از یک ناحیه شبکه $50 \times 50 \text{ m}^2$ استفاده می‌شود که گرههای حسگر ایستا به طور تصادفی از ابتدا بر اساس توزیع یکنواخت در این ناحیه قرار گرفته‌اند. گره ایستگاه پایه در مرکز این ناحیه قرار دارد. به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها از جنبه پیگردی اهداف در ناحیه تحت نظرارت، هدف متحركی را در نظر می‌گیریم که براساس مدل تحرك Random Waypoint با سرعتی بین ۰ تا MAX_SPEED در ناحیه حرکت می‌کند [14]. نتایج ارائه شده در بخش ۶، از اجرای شبیه‌سازی هر یک از نمونه‌ها تا ۲۵ مرتبه به طور میانگین به دست آمده است.

۱-۶ تنظیم پارامترهای مورد استفاده

برای هر گره مدل انرژی مورد استفاده [7] را در نظر می‌گیریم که در آن نسبت مصرف انرژی برای حالت‌های انتقال، دریافت(و بیکار) و خواب به ترتیب ۰/۰۱ : ۴: ۲۰ می‌باشد. هر گره محدوده احساس حدود ۱۷m دارد. اندازه سلوو مربعی را $5 \times 5 \text{ m}^2$ قرار می‌دهیم؛ بنابراین با توجه به معادله (۱) شعاع احساس محاسباتی ۱۰m و در نتیجه طبق معادله (۲) شعاع همسایگی ۲۰m خواهد بود و بر اساس لم ۱ محدوده انتقال رادیوئی باید حداقل ۳۰m باشد. انرژی اولیه هر گره حسگر به طور تصادفی در محدوده $28 \sim 35 \text{ ژول}$ به منظور شبیه سازی واریانس طول عمر باتری انتخاب می‌شود. همانند [3] PEAS، هر گره ظرفیت ارتباطی بی‌سیم پائین ۲۰Kbps و اکشن سریع گرههای حسگر به تغییرات توپولوژی گرههای فعال شبکه که در اثر خرابی‌های غیرمنتظره، اتمام انرژی و حتی کاهش سطح انرژی گرههای حسگر (طبق بخش ۱-۵) می‌تواند ایجاد شود و با توجه به نتایج آزمایشات، مقدار پارامتر T را ۱۰s و نرخ پارامترهای پاداش و جریمه را $0/75$ در نظر می‌گیریم؛ بنابراین مقدار ثابت Cn از رابطه (۸) برابر ۲ خواهد شد. در جدول ۱ مقدار تعدادی از پارامترهای استفاده شده در GDC-CLA آورده شده است.



شکل ۶) نتایج آزمایش اول

در نظر گرفته شده است. تزریق خرابی‌های غیرمنتظره گرههای حسگر با نرخ ۴/۱۷ خرابی در هر 1000s صورت می‌گیرد. در جدول ۲ نتایج این آزمایش آورده شده است.

جدول ۲) نتایج آزمایش سوم

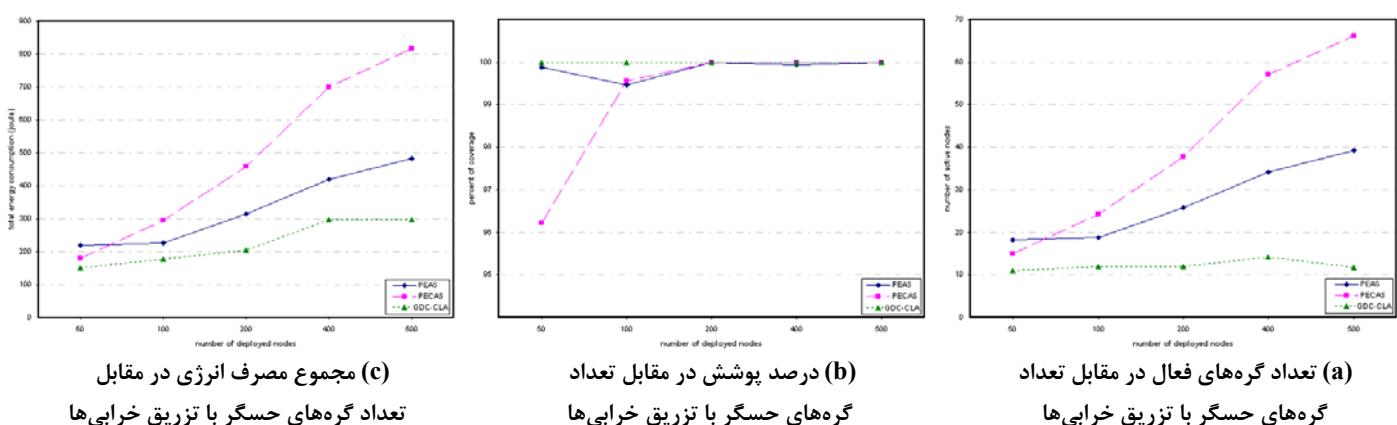
	تعداد گرههای فعال (میانگین)	درصد پوشش (میانگین)	طول عمر پوشش (بر حسب ثانیه)
PEAS	20.56	96.67	9000
PECAS	46.44	99.93	12000
GDC-CLA	13.68	99.998	22000

همانطور که مشاهده می‌شود، GDC-CLA در مقایسه با PECAS و PEAS میانگین تعداد گرههای فعال کمتری دارد و طول عمر بسیار بیشتری را فراهم می‌کند. همچنین GDC-CLA با وجود خرابی‌های غیرمنتظره و اتمام انرژی گرهها در مقایسه با دو الگوریتم دیگر پوشش بهتری را نشان می‌دهد و تقریباً پوشش کامل ناحیه شبکه را فراهم می‌کند.

ملموس باشد، نرخ ۵۰% خرابی گرههای حسگر در طول زمان اجرا را درنظر می‌گیریم. همانند آزمایش ۱ زمان اجرای شبیه سازی 1000s و تعداد گرههای حسگر توسعه یافته ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ گره می‌باشد. مشابه آزمایش ۱، شکل (a) نشان می‌دهد که میانگین تعداد گرههای فعال در الگوریتم GDC-CLA در حضور خرابی نیز با افزایش تعداد گرههای حسگر توسعه یافته افزایش چندان محسوسی ندارد. مطابق شکل (b) GDC-CLA به طور میانگین به نسبت PEAS بیش از ۵۱% و نسبت به PECAS بیش از ۶۰% کاهش تعداد گرههای فعال را نشان می‌دهد. همچنان با وجود خرابی‌ها، برخلاف PEAS و PECAS GDC-CLA پوشش کامل ناحیه را فراهم می‌کند. همانطور که در شکل (c) مشاهده می‌شود، GDC-CLA از لحاظ کاهش انرژی مصرفی گرهها به طور میانگین نسبت به PEAS بیش از ۳۱% و در مقایسه با PECAS بیش از ۴۶% بیهوده را نشان می‌دهد.

۳-۲-۶ آزمایش سوم

در آزمایش سوم علاوه بر معیارهای درصد پوشش ناحیه و تعداد گرههای فعال، معیارهای (iv) و (v) یعنی تعداد گرههای حسگر Alive و طول عمر شبکه مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. برای این آزمایش تعداد گرههای حسگر برابر ۲۵۰ مورد است.



شکل ۷) نتایج آزمایش دوم

- [2] Ye, F., Zhong, G., Lu, S., Zhang, L., "Energy efficient robust sensing coverage in large sensor networks", *Technical report*, UCLA, 2002.
- [3] Ye, F., Zhong, G., Lu, S., Zhang, L., "Peas: A robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks", *In The 23nd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, 2003.
- [4] Gui, C., Mohapatra, P., "Power conservation and quality of surveillance in target tracking sensor networks", *In the Proceedings of the International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 129-143, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2004.
- [5] Cerpa, A., Estrin, D., "Ascent: Adaptive self-configuring sensor networks topologies", *In Proceedings of the IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 3, No. 3, pp. 272-285, July 2004.
- [6] Wang, X., Xing, G., Zhang, Y., Lu, C., Pless, R., Gill, C., "Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks", *In ACM Sensys '03*, Nov 2003.
- [7] Zhang, H., Hou, J . C., "Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks", *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, Vol. 1, pp. 89–124, March 2005.
- [8] Quintao, F. P., Nakamura, F. G., Mateus, G. R., "A hybrid approach to solve the coverage and connectivity problem in wireless sensor networks", *University of Minas Gerais Belo Horizonte*, MG . Brazil, 2005.
- [9] Fredkin, E., "Digital machine: A informational process based on reversible cellular automata", *Physica D45*, pp. 245-70, 1990.
- [10] Narendra, K. S., Thathachar, M. A. L., "Learning automata: An introduction", *In Proceedings of the Prentice Hall*, 1989.
- [11] Thathachar, M. A. L., Sastry, P. S., "Varieties of learning automata: An overview", *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, Vol. 32, No. 6, PP. 711-722, 2002.
- [12] Beigy, H., Meybodi, M. R., "A mathematical framework for cellular learning automata", *Advances on Complex Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 1-25, 2004.
- [13] Beigy, H., Meybodi, M. R., "Asynchronous cellular learning automata", *Automatica, Journal of International Federation of Automatic Control*, Vol. 44, No. 5, May 2008.
- [14] "J-sim sensor network framework", <http://www.j-sim.org/v1.3/sensor/JSim.pdf>

در هر لحظه در طول فعالیت شبکه، پارامتر SENSOR_NUMBER برابر با مجموع تعداد گرههای Alive و تعداد گرههای از کارافتاده می باشد. از کارافتادن گرههای حسگر می تواند به علت اتمام انرژی باتری و یا خرابی های غیرمنتظره باشد. با توجه به اینکه نرخ توزیع خرابی ها در هر سه الگوریتم یکسان می باشد، برای ارزیابی معیار تعداد گرههای Alive، تعداد گرههای از کارافتاده به علت اتمام انرژی را در نظر می گیریم. در پایان طول عمر شبکه، به ترتیب 57 و 146 گره از کارافتاده به علت اتمام انرژی وجود دارد که این تعداد برای PEAS, GDC-CLA و PEAS, به ترتیب ۹ و ۱۴ گره می باشد. به عبارت دیگر GDC-CLA در مقایسه با دو الگوریتم دیگر، مدت زمان بیشتری گرههای Alive شبکه حسگر را نگهداری می کند و بدین ترتیب، میانگین مدت زمان قابل استفاده بودن هر گره را افزایش می دهد.

۷- نتیجه گیری و پیشنهاد کار آینده

در این مقاله، راهکاری برای نگهداری پوشش و اتصال با تعدادی کمینه از گرههای فعال در شبکه های حسگر بی سیم ارائه شد؛ در راهکار ارائه شده، گرههای فعال به گونه ای انتخاب می شوند که تا حد امکان مصرف انرژی گرهها حداقل شود و در نتیجه طول عمر شبکه بیشینه گردد. در ابتدا رابطه ای بین پوشش و اتصال ارائه شد که براساس آن، پوشش کامل ناحیه شبکه، اتصال شبکه را نیز تضمین می کند؛ بدین ترتیب حل مسئله پوشش کامل ناحیه، مسئله اتصال شبکه را نیز حل می نماید. بر این اساس، الگوریتم توزیع شده GDC-CLA ارائه شد که بر پایه اتماتای یادگیر سلولی عمل می کند. نتایج شبیه سازی ها برتری GDC-CLA را در مقایسه با الگوریتم های PEAS و PEAS از لحاظ کمینه کردن تعداد گرههای فعال، کاهش مصرف انرژی گرهها، افزایش طول عمر شبکه و نگهداری گرههای Alive حسگر مشخص می کند. نتایج آزمایشات نشان می دهد که GDC-CLA برخلاف PEAS، حتی در حضور خرابی های غیرمنتظره گرهها و اتمام انرژی باتری آنها هنوز پوشش تقریباً کامل ناحیه شبکه را فراهم می کند. به عنوان یک پیشنهاد برای کارهای آتی می توان با بکار گرفتن اتماتای یادگیر سلولی، حل مسئله پوشش و اتصال را به فضای سه بعدی تعمیم داد.

مراجع

- [1] Huang, C. F., Tseng, Y. C., "The coverage problem in a wireless sensor network", *Mobile Networks and Applications*, Vol. 10, No. 4, pp. 519-528, January 2005.