

# انتقال داده بهینه در شبکه‌های اینترنت اشیا مبتنی بر حسگر بی‌سیم با تلفیق برنامه‌ریزی خطی و درخت انتشار کمینه

محسن حیدریان و ساغر قربانی

خودشان دارند. سرانجام در سال ۲۰۰۰، فناوری محاسبات مه، برای غلبه به این چالش‌ها توسط سیسکو معرفی شد [۹] تا [۱۱]. فناوری مه بخش کوچکی از ابر محاسباتی است که به صورت محلی، متصدی ارایه خدمات ابر به بخش کوچکتری از کاربران است [۱۲]. مه محاسباتی می‌تواند به صورت محلی بخشی از پردازش‌ها و عملیات مختلف نظیر ذخیره و دسترسی مجدد به داده‌ها را امکانپذیر نماید و ضمن رهاسازی ظرفیت ابر محاسباتی، کارایی شبکه را افزایش دهد [۱۳] و [۱۴].

علاوه بر چالش‌های ذکر شده در بالا، تاکید بر استانداردهای انرژی سبز در شبکه‌های اینترنت اشیا مبتنی بر مه نیز مطرح است [۱۵] و [۱۶]. امروزه، کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی نظیر گاز و نفت و استفاده از انرژی‌های بازگشت‌پذیر مانند انرژی آب و باد، یک امر مهم و حیاتی در طراحی شبکه‌های کامپیوتری است؛ که به نسل شبکه‌های کامپیوتری سبز موسوم هستند [۱۷] تا [۱۹]. در طراحی شبکه سبز مفهومی به نام آگاهی از انرژی معرفی می‌شود که سعی می‌کند انرژی لازم برای انتقال یک بسته را محاسبه و پیش‌بینی کند. لذا شبکه‌های سبز می‌توانند داده بیشتری را با انرژی به مراتب کمتر از شبکه عبور دهند [۱۹] تا [۲۳]. در یک شبکه سبز، بر اساس معماری و ساختار خدمات آن، سعی می‌شود برای انجام خدمات شبکه، انرژی کمتری مصرف شود. در این میان تحلیل و مدل‌سازی خدمات شبکه بر اساس مدل مصرف انرژی یک گام مهم و کلیدی است [۲۲] و [۲۳].

در این تحقیق سعی می‌شود برای اینترنت اشیا پیاده‌سازی شده در محیط مه، هنگام ارایه خدمات، کاهش مصرف انرژی و کاهش ضایعات منابع محقق شود. لذا سعی می‌شود با به کارگیری برنامه‌ریزی خطی و اصول نظریه گراف، مسیریابی در شبکه محاسبه شود که در عین افزایش کارایی شبکه، موجب بهینه‌سازی مصرف انرژی و مصرف درست منابع نیز بشود. الگوریتم جدید ارائه شده به خوبی با شرایط پویایی شبکه و متحرک بودن اشیا و محدودیت‌های مختلف آن سازگار است. توجه شود که برنامه‌ریزی خطی یک روش برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و نظریه گراف نیز یک ابزار برای مدل‌سازی مفید و موثر شبکه بر اساس خدمات آن است. متغیرها و پارامترهایی که در برنامه‌ریزی خطی و مدل‌سازی گراف استفاده می‌شوند، مدل‌سازی بهینه برای کاهش مصرف انرژی را فراهم می‌کنند.

چکیده: در شبکه‌های اینترنت اشیا موبایل (MIoT) مبتنی بر مه، مدیریت مصرف انرژی تحقیقات فراوانی را به خود اختصاص داده است. در شبکه اینترنت اشیا حسگر های بی‌سیم برای تامین انرژی خود از باتری با ظرفیت محدود استفاده می‌کنند لذا عملیاتی مثل جمع‌آوری داده‌ها و مسیریابی که باعث مصرف انرژی می‌شود نیاز به بهینه‌سازی دارد. جهت مدیریت این چالش‌ها می‌توان از اصول طراحی شبکه‌های سبز و روش‌های بهینه‌سازی استفاده کرد و به افزایش طول عمر شبکه، بهینه‌سازی مصرف انرژی و افزایش کارایی شبکه کمک کرد. در این مقاله از روش‌های بهینه‌سازی خطی و الگوریتم‌های مبتنی بر نظریه گراف استفاده می‌شود و یک الگوریتم مسیریابی جدید با عنوان الگوریتم مسیریابی انرژی-آگاه QoS-بهینه (OQEAR) ارائه می‌شود که می‌تواند مصرف بهینه انرژی، کیفیت خدمات دهی، طول عمر شبکه و کارایی را بهبود ببخشد. مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی روش جدید نشان می‌دهد که این الگوریتم در مقایسه با روش‌های موجود می‌تواند داده‌های بیشتری را با طی کردن مسیریهای کوتاه تر از شبکه عبور دهد و به نحو مطلوبی منابع شبکه را به کار بگیرد.

کلیدواژه: انتقال بهینه، درخت کمینه، شبکه حسگر بی‌سیم، طول عمر شبکه.

## ۱- مقدمه

امروزه اینترنت اشیا<sup>۱</sup> (IoT) زیرساخت مهمی برای کاربردهای مهمی نظیر ارتباطات صنعتی، شبکه‌های حسگری، شبکه‌های حسگر بی‌سیم و شبکه‌های خودرویی شده است [۱] تا [۴]. شبکه IoT مجموعه‌ای از تجهیزات و اشیا است که تحت پوشش پروتکل TCP/IP قرار می‌گیرند [۴] و [۵]. در اکثر این کاربردها، چالش‌های زیر اهمیت دارند [۵] تا [۷]:

(۱) چالش انرژی: غالباً گره‌های این شبکه‌ها انرژی خود را از باتری‌های با ظرفیت محدود و غیرقابل تعویض تامین می‌کنند و طول عمر و کارایی این شبکه‌ها به شدت به استفاده مفید از باتری وابسته است [۸].

(۲) چالش منابع: منابع این شبکه‌ها نظیر پهنای باند، دامنه پوشش، فرکانس، توان پردازش، حجم حافظه، نرخ انتقال و غیره غالباً با محدودیت در به کارگیری و تخصیص مواجه هستند [۸].

لذا در این شبکه‌ها، معمولاً گره‌ها نیاز به منابع ابری خارج از شبکه

این مقاله در تاریخ ۱۹ شهریور ماه ۱۴۰۳ دریافت و در تاریخ ۲۱ اردیبهشت ماه ۱۴۰۴ بازنگری شد.

محسن حیدریان (نویسنده مسئول)، دانشکده فناوری اطلاعات و مهندسی کامپیوتر، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران، (email: heydarian@azaruniv.ac.ir)

ساغر قربانی، دانشکده فناوری اطلاعات و مهندسی کامپیوتر، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران، (email: saghar.ghorbani74@gmail.com)

1. Internet of Things

## ۲- تعریف مسئله

### ۲-۱ معماری شبکه

قبل از تعریف رسمی مساله، نخست تعریف غیر رسمی و مفاهیم مرتبط با آن ارائه می‌شود.

حسگرها<sup>۹</sup> (WSN)، لایه دروازه<sup>۱۰</sup> (IoT-GW) و لایه میان‌افزار<sup>۱۱</sup> (IoT-MW) می‌باشد.

(۱) شبکه WSN: این لایه شامل گره‌هایی حسگری است که دارای محدودیت در انرژی و پهنای باند هستند و با هم ارتباط بی‌سیم دارند. این حسگرها داده‌هایی مثل دما، نور، نویز و غیره را از محیط دریافت کرده و برای پردازش‌های آتی به لایه بالاتر یعنی BS<sup>۱۲</sup>/GW ارسال می‌کنند. در واقع شبکه WSN همان بخش لبه را تشکیل می‌دهد و اشیا در سطح IoT را به یکدیگر متصل می‌کند. هر نوع گره شبکه مثل روتر، سرور، دروازه و... که نقش مه محاسباتی برای شبکه داشته باشد.

(۲) IoT-GW به عنوان پلی بین WSN و MW عمل می‌کند. این لایه قابلیت‌های مختلفی از جمله استقرار گره‌های حسگر، انتقال داده، ثبت اطلاعات گره‌های حسگر، تعمیر و نگهداری شبکه، پروتکل‌های جمع‌آوری داده‌ها و ارتباط داده‌ها با MW را مدیریت می‌کند. با توجه به کاربرد و استاندارد IEEE این لایه اتصال را در لایه WSN فراهم می‌کند. لایه IoT-GW شامل BS و GW‌هایی است که نقش لایه مه را ایفا می‌کنند. برای تضمین کیفیت خدمات، در کاربردهای حساس به زمان پاسخ، این لایه پردازش‌ها را به صورت محلی و نزدیک‌تر به لبه شبکه انجام می‌دهد. همان IoT-GW همان شبکه شامل

گره‌های مه است. شبکه اینترنت اشیا موبایل<sup>۱۳</sup> (MIoT) یک شبکه IoT است که مبتنی بر زیر ساخت‌های موبایل بی‌سیم مانند بلوتوث و غیره راه‌اندازی می‌شود و حسگرها و گره‌های شبکه می‌توانند متحرک باشند [۲۵] تا [۲۷].

(۳) IoT-MW: این لایه شامل سرورهای ابر می‌باشد و همان شبکه ابر را تشکیل می‌دهد که سرویس‌ها، امنیت و حریم شخصی را فراهم می‌کنند.

## ۲-۲ تعریف غیر رسمی مساله

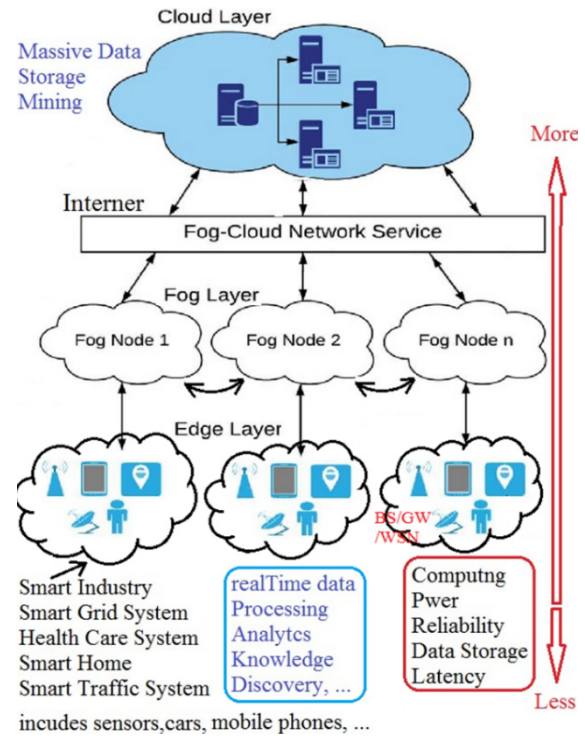
در این تحقیق مساله اصلی عبارت است از محاسبه مسیریابی بین مبدا و مقصدها (گره مرکزی مه و گره‌های متحرک شبکه WSN)، بطوری که این مسیرها بهینه‌ترین مصرف انرژی، کمینه‌کردن طول مسیرها، افزایش نرخ انتقال، افزایش طول عمر شبکه و مصرف کمینه پهنای باند را عملی کنند.

## ۲-۳ مدل شبکه حسگر بی‌سیم برای اتصال اشیا IoT

فرض می‌شود شبکه اولیه IoT (شبکه قرار گرفته در لایه لبه) شامل  $n$  گره حسگر

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\} \quad (۱)$$

و یک گره مرکزی BS تحت عنوان  $f$  است (هر گره معادل یک حسگر است و برعکس). گره  $f$  به عنوان کارگزار مه دارای حافظه و قدرت پردازشی و انرژی نامحدود می‌باشد، که بعد از تشکیل آرایش اولیه شبکه



شکل ۱: معماری سه لایه شبکه مه اینترنت اشیا [۲۴] و [۲۵].

در این تحقیق، شبکه ابر شامل سه لایه است [۲۴] تا [۲۷]:  
لایه ابر<sup>۱</sup>: شامل سرورهای ابر با توان پردازش بالا است و وظایف مهمی مانند mining را به عهده دارد.

لایه مه<sup>۲</sup>: شامل گره‌های مه و ارتباط بین آنها است. لایه مه توسط زیرساخت اینترنت به لایه ابر متصل است.

لایه لبه<sup>۳</sup>: شامل شبکه‌ای از گره‌های بی‌سیم و حسگرهای مختلف است که سیستم‌هایی مانند صنایع هوشمند<sup>۴</sup> را تشکیل می‌دهند و خدماتی مانند پردازش واقعی داده<sup>۵</sup> را ارائه می‌کنند.

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، یک شبکه بی‌سیم از حسگرها و ابزارهای IoT (سیستم‌هایی نظیر صنایع هوشمند) در لایه آخر و در لبه شبکه قرار دارند و لایه مه (شبکه‌ای شامل گره‌های مه<sup>۶</sup>) در وسط به عنوان واسطی برای گره‌های حسگر و ابر مرکزی عمل می‌کند. وظایف شبکه ابر، شبکه مه و سیستم‌های مبتنی بر بی‌سیم IoT در شکل ۱ مشخص شده‌اند هر چقدر به سمت ابر حرکت کنیم، پارامترهای نظیر توان<sup>۷</sup> و تاخیر<sup>۸</sup> افزایش بیشتری خواهد داشت و هر چقدر به سمت مه و سیستم‌های IoT حرکت کنیم، این موارد کاهش خواهند یافت. در قسمت لبه، یک سرور بی‌سیم مه نقش گره مرکزی را داشته و مدیریت شبکه را بر عهده دارد. گره‌های این شبکه شعاع رادیویی پوششی، انرژی و پهنای باند محدودی دارند.

در این تحقیق معماری شبکه بی‌سیم شامل گره‌های IoT یک معماری سه لایه دارد بطوریکه به ترتیب از لایه زیرین به بالا شامل لایه

1. Cloud Layer
2. Fog Layer
3. Edge Layer
4. Smart Industry
5. Real Data Processing
6. Fog Nodes
7. Power
8. Latency

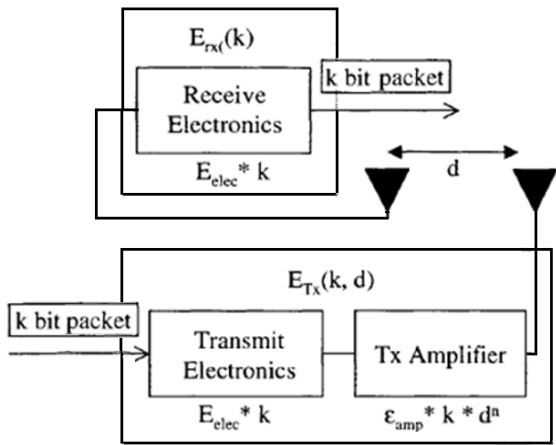
9. Wireless Sensor Network

10. Internet of Things Gateway

11. Internet of Things Middleware Gateway

12. Base Station

13. Mobile Internet of Things



شکل ۲: مدل مصرف انرژی در گره هنگام انتقال بیت‌ها [۲۸] تا [۳۲].

مصرف می‌شود: (۱) روشن و خاموش کردن واحد گیرنده یا فرستنده، (۲) انرژی ثابتی که واحد فرستنده<sup>۴</sup> مصرف می‌کند، و (۳) انرژی که صرف انتقال یا دریافت  $L$  بیت داده در مسیر به طول  $r$  می‌شود.

در این جا از انرژی ثابت مصرفی واحد فرستنده و انرژی راه‌اندازی آن صرف نظر می‌شود و مطابق با (۴) و (۵) فقط مصرف انرژی ناشی از انتقال و یا دریافت داده مد نظر است. هر گرهی انرژی  $ETX$  را برای انتقال  $L$  بیت داده در مسیری به طول  $d < r$  مصرف می‌کند. همچنین به اندازه  $ERX$  برای دریافت  $K$  بیت داده از فاصله  $d < r$  مصرف می‌کند [۲۸] تا [۳۲].

$$E_{Tx}(K, d) = \begin{cases} K \times E_{elec} + K \times \epsilon_{fs} \times d^2, & d \leq r \\ K \times E_{elec} + K \times \epsilon_{mp} \times d^4, & d > r \end{cases} \quad (۴)$$

$$E_{Rx}(k) = K \times E_{elec} \quad (۵)$$

انرژی مصرفی برای انتقال و دریافت داده طبق روابط فوق محاسبه می‌شود. در روابط فوق  $K$ ، تعداد بیت‌های داده‌ای است که ارسال یا دریافت می‌شود.  $E_{elec}$  انرژی مصرفی مدار انتقال میباش که بر حسب  $nJ/bit$  یا نانو ژول بر بیت بوده و مقدار آن ثابت است. دو مقدار  $\epsilon_{fs}$  و  $\epsilon_{mp}$  انرژی لازم جهت تقویت سیگنال ارسالی در طول مسافت (دور و نزدیک) مورد نظر است و بر حسب  $pJ/bit$  یا پیکو ژول بر بیت بیان می‌گردد.

در بعضی از انتقال‌های رادیویی، مقدار  $E_{elec}$  برابر با  $50 nJ/bit$  است.  $d$  فاصله بین گیرنده و فرستنده می‌باشد. همانطور که مقدار معینی است با افزایش مقدار  $d$  انرژی مصرفی گره‌ها افزایش می‌یابد و برعکس. در (۱) مقدار ثابت فضای آزاد<sup>۵</sup> است و  $\epsilon_{mp}$  نیز ثابت اثر محوشدگی چندمسیره<sup>۶</sup> است. مقدار  $d$  به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۸] تا [۳۲]:

$$d_c = \lambda \gamma m d_s = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \quad (۶)$$

اگر  $d(s, p)$  فاصله بین دو گره  $(x_s, y_s)$  و  $(x_p, y_p)$  باشد آن‌گاه می‌توان نوشت:

تغییر نخواهد کرد. گره‌های حسگری به صورت اتفاقی در ناحیه  $A$  به ابعاد  $M \times M$  پراکنده هستند. چون توپولوژی شبکه پویا است، این گره‌ها می‌توانند در ناحیه شبکه جا به جا شوند. گره‌های شبکه همگن هستند یعنی قدرت پردازشی و ذخیره‌سازی و انرژی اولیه یکسان دارند. تمام گره‌ها موقعیت خود را توسط فناوری‌هایی مثل GPS<sup>۱</sup> یا RSSI<sup>۲</sup> تشخیص می‌دهند و همچنین از مختصات گره مرکزی  $f$  یا خبر هستند. محدوده پوشش گره مرکزی مه<sup>۳</sup> می‌تواند حداکثر برابر کل ناحیه  $A$  است.

برای هر گره شبکه می‌توان نوشت:

$$\forall S_i \in S : \{ID_i, E_i, RE_i, X_i, Y_i\}, F\{X_F, Y_F\} \quad (۲)$$

که در آن  $ID_i$  شماره منحصر به فرد هر حسگر است که با اندیس  $i \in \{1, 2, 3, \dots, n\}$  در نظر گرفته می‌شود. نشان‌دهنده انرژی اولیه گره‌ها و  $X_i$  و  $Y_i$  مختصات اولیه هر گره را نشان می‌دهد. همچنین  $X_F$  مختصات سرور مرکزی مه را نشان می‌دهد. عبارت  $RE_i$  نشان‌دهنده انرژی باقی مانده هر گره بعد از هر انتقال یا دریافت داده است. توپولوژی شبکه در شرایط زیر ممکن است تغییر کند:

۱. حذف گرهی از شبکه بخاطر خالی شدن باتری آن. در اینصورت خواهیم داشت:

$$RE_i \leq Ed \quad (۳)$$

۲. گاهی لازم است گره جدیدی به شبکه اضافه شود.

۳. در برخی موارد ممکن است حسگرها یا حتی گره مرکزی مه حرکت کنند.

۴. تغییرات محیطی می‌تواند روی پهنای باند ارتباط بی‌سیم تاثیر بگذارد یا موقتاً وقفه ایجاد کند.

پس الگوریتم ارائه‌شده برای این شبکه‌ها باید بتواند با شرایط پویای شبکه سازگار باشد. عبارت  $Ed$  مقدار کمینه‌ای از انرژی است که برای تبادل داده بین دو گره کافی نیست و گره غیر فعال یا خاموش محسوب می‌شود.

## ۲-۴ مدل مصرف انرژی در شبکه

مدل مصرف انرژی رادیویی که برای WSN در این مقاله استفاده می‌شود مطابق مدل‌های منابع [۲۸] تا [۳۲] است. در این شبکه ارسال اطلاعات از طریق امواج رادیویی صورت می‌گیرد. هر گیرنده و فرستنده رادیویی با توجه به توان و تجهیزات فیزیکی خود می‌تواند امواج رادیویی را تا شعاع معینی در اطراف خود ساطع و یا دریافت کند. چون گره‌ها همگن هستند پس همگی دارای شعاع رادیویی  $r$  می‌باشند و این شعاع برای حسگرها ثابت است. شعاع رادیویی گره مرکزی  $F$  به اندازه  $R$  بوده و  $F$  توان تغییر آن را دارد. بنابراین برای این که هر شیء در این شبکه بتواند با اشیاء دیگر در تعامل باشد لازم است حداقل در محدوده پوششی خود، یک شیء دیگر را شناسایی کند. اگر یک شیء در محدوده پوششی هیچ گرهی دیگری قرار نگیرد، یقیناً در پوشش شبکه قرار نخواهد گرفت.

انتقال و یا دریافت داده برای هر گره، با مصرف انرژی همراه است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، این انرژی در سه بخش

4. Transmitter  
5. Multipath Fading  
6. Free Space

1. Global Positioning Sensor  
2. Received Signal Strength Indicator  
3. Fog Node Coverage (FNC)

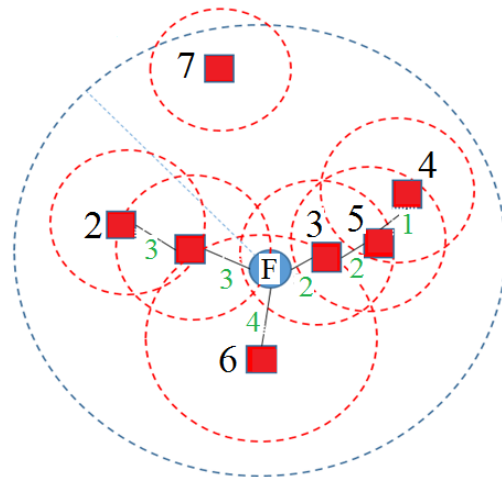
عملیات انتخاب سرخوشه مجدد تکرار می‌شود تا نقش سرخوشه بین تمام گره‌ها تعویض شود. هر چند این پروتکل ساده است و سربار ارتباطی زیادی ایجاد نمی‌کند، اما معیار و چارچوبی برای محاسبه میزان انرژی مصرفی در شبکه ندارد و انرژی گره‌ها را نیز بررسی نمی‌کند.

تا کنون الگوریتم‌های زیادی برای بهبود LEACH ارائه شده‌اند. مثلاً [۳۴] و [۳۶] نمونه متمرکز شده الگوریتم LEACH هستند. آن‌ها الگوریتم LEACH را با اضافه کردن یک سیستم کنترل مرکزی بهبود داده‌اند. مثلاً BS یا گره اصلی مسئول جمع‌آوری اطلاعاتی مانند انرژی و مکان گره‌ها شده است و بر اساس این اطلاعات بهترین سرخوشه‌ها را انتخاب می‌کند. این فرآیند متمرکز می‌تواند سربار زیادی ایجاد کند و در نتیجه فقط در شبکه‌های کوچک قابل استفاده باشد.

در [۳۷] یک الگوریتم جمع‌آوری داده مبتنی بر زنجیره خطی ارائه شده است. ایده اصلی این الگوریتم برای بهبود مصرف انرژی این است که هر گره فقط به نزدیک‌ترین همسایه خود ارسال داده انجام می‌دهد. در این الگوریتم گره‌ها در یک زنجیره خطی سازمان‌دهی می‌شوند. گره‌ها می‌توانند زنجیره را با استفاده از یک الگوریتم حریصانه ایجاد کنند یا این که BS آن را به صورت متمرکز بسازد. دور ترین گره از BS ساختن زنجیره را شروع می‌کند و در هر قدم نزدیک‌ترین گره به خود را به عنوان اتصال‌دهنده خود به زنجیر انتخاب می‌کند. در هر دور از جمع‌آوری داده، گره داده‌هایی را از یکی از همسایگانش دریافت کرده و داده‌های خود را به آن اضافه می‌کند و در امتداد زنجیر برای رسیدن به BS ارسال می‌کند. مزیت این روش نسبت به روش‌های مبتنی بر خوشه‌بندی این است که طول انتقال داده توسط هر گره کوتاه است و هر گره حداکثر دو بسته داده از همسایگانش دریافت می‌کند. در مقابل نقطه ضعف این روش آن است که به اطلاعات سراسری از موقعیت تمام گره‌ها نیاز دارد تا بتواند بهترین همسایه را انتخاب کند و بیشینه فاصله از همسایگان را به حداقل برساند. همچنین در این روش، ارسال داده از گره‌هایی که در آخر زنجیره هستند و از BS دور هستند همراه با تاخیر می‌باشد.

در [۳۸] یک روش بهینه‌سازی ترکیبی برای تخصیص منابع ارتباطی و محاسباتی در محاسبات لبه ارائه شده است؛ که در آن محدودیت‌های تاخیر و انرژی نیز لحاظ شده است. سناریوی مورد بررسی اپلیکیشن‌های واقعیت مجازی گوشی‌های هوشمند هستند که بخشی از محاسبات خود را به طور محلی در خود دستگاه انجام می‌دهند و بخش دیگری را در یک مه یا ابر محاسباتی تخلیه بار می‌کنند. مصرف انرژی کمتر در دستگاه‌های موبایل و همچنین کاهش تاخیر دسترسی به دلیل حساسیت برنامه‌های واقعیت مجازی به زمان پاسخ‌دهی از جمله شرایط ویژه این سناریو می‌باشد. مه یا سرور ابری وظیفه دارد پس از انجام محاسبات لازم نتایج را به دستگاه‌های انتهایی برگرداند. در این شبکه دستگاه‌ها نیز با یکدیگر تبادل دارند. در این پژوهش به منظور بهینه‌سازی همزمان منابع ارتباطی و محاسباتی در سرور، یک روش مبتنی بر برنامه ریزی خطی ارائه شده است که بر انرژی مصرفی دستگاه‌ها و تاخیر انتقال اطلاعات قیود محدودیت اعمال می‌کند.

در [۳۸] و [۳۹] یک روش تجمیع داده در شبکه‌های حسگر بی‌سیم چند لایه ارائه شده است. در این روش مدل شبکه، درختی در نظر گرفته شده که گره‌ها بر اساس موقعیت خود در سطوح این درخت قرار گرفته و می‌توانند با گره‌هایی در سطوح بالایی یا پایینی خود ارتباط برقرار کنند. تجمیع داده روشی برای کاهش موثر حجم داده‌های انتقالی و بهبود طول عمر شبکه است. در این حالت داده برای رسیدن به BS باید در صف منتظر بماند. زمانی که صف داده به مقدار کافی پر شده باشد یا



شکل ۳: نمایشی از یک گره مرکزی F با گره‌های موبایل واقع شده در محدوده آن. این گره مرکزی یک محاسباتی تشکیل داده است.

$$d(s, p) = \sqrt{(x_p - x_s)^2 + (y_p - y_s)^2} \quad (7)$$

اگر  $d(s, p) < r$  باشد در این صورت گره‌های  $s$  و  $p$  یکدیگر را پوشش داده و می‌توانند با هم ارتباط برقرار کنند. در شکل ۳ مشاهده می‌شود هر گره مرکزی  $F$  و هر گره متحرک یک محدوده مشخص را پوشش می‌دهند که شعاع معینی دارد. مثلاً بین دو گره ۴ و ۵ لینک دو طرفه وجود دارد، اما بین دو گره ۷ و  $F$  لینک یک طرفه از  $F$  به گره ۷ وجود دارد زیرا گره  $F$  گره ۷ را پوشش می‌دهد اما گره ۷ گره  $F$  را پوشش نمی‌دهد. با کاهش انرژی محدود باتری در گره، رفته‌رفته دامنه پوشش آن از مقدار  $r$  کمتر شده و نهایتاً با تخلیه انرژی باتری، گره خاموش خواهد شد و از دریافت و ارسال داده منع خواهد شد.

### ۳- کارهای مرتبط

تا کنون الگوریتم‌های مسیریابی و تخصیص منابع مختلفی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم ارائه شده است [۲۸] تا [۳۲]. هدف این الگوریتم‌ها، پاسخ دهی به نیازهای این نوع شبکه‌ها از جمله بهینه‌سازی مصرف انرژی و منابع، کاهش تاخیر ارسال داده و افزایش طول عمر شبکه بوده است [۱۷]. با توجه به نحوه پیاده‌سازی، این الگوریتم‌ها را می‌توان به سه دسته متمرکز، توزیع شده و ترکیبی تقسیم‌بندی کرد [۳۳].

از جمله رایج‌ترین و ابتدایی‌ترین الگوریتم‌های مسیریابی بهینه برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم الگوریتم LEACH است [۱۰] تا [۱۱]. الگوریتم LEACH، که توسط هاینزلمن و همکارانش در سال ۲۰۰۰ معرفی شد، یک الگوریتم مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی توزیع شده است. در الگوریتم LEACH، دور شامل دو فاز است که عبارتند از: تشکیل خوشه و انتقال داده. در هر دور هر گره عددی تصادفی بین ۰ و ۱ انتخاب می‌کند. اگر این عدد از یک مقدار آستانه کمتر باشد، در این صورت، آن گره سرخوشه می‌شود. سپس سرخوشه‌ها پیامی را برای همه همسایگانشان همه‌پراکن می‌کنند تا به آن‌ها اعلام کنند که سرخوشه شده‌اند. بعد از آن هر گره تصمیم می‌گیرد که به نزدیکترین سرخوشه متصل شود. سپس هر گره داده‌های خود را بر اساس مکانیزم TDMA<sup>۱</sup> به سرخوشه خود ارسال می‌کند. در نهایت سرخوشه‌ها داده‌های جمع‌آوری شده را به گره اصلی ارسال می‌کنند. بعد از گذشت یک دوره زمانی،

همسایگان خود آن‌هایی که بزرگترین درجه را دارند و شرط انرژی را نیز دارا می‌باشند را انتخاب کرده و از طریق ارسال پیام به آن‌ها اطلاع می‌دهد که کاندیدای سرخوشه شدن هستند. در این صورت اگر این گره‌ها سرخوشه دیگری پیدا نکنند (یعنی پیامی به عنوان سرخوشه از گره دیگری دریافت نکنند) خود را به عنوان سرخوشه معرفی نمایند. هر گره  $i$  از بین سرخوشه‌هایی که به آن‌ها دسترسی دارد، گره  $i$  را انتخاب می‌کند که دارای بیشترین انرژی باقی مانده باشد. اگر در همسایگی گره  $i$  گره سرخوشه‌ای انتخاب نشود، گره  $i$  قادر به ارسال داده نخواهد بود و از توپولوژی جدا می‌افتد. حتی اگر همسایگان دیگری داشته باشد.

پس از این که خوشه‌ها تشکیل شدند، گره‌های عضو هر کدام طبق TDMA بسته‌های اطلاعاتی خود را به سرخوشه ارسال می‌کنند. سرخوشه‌ها تمام داده‌های دریافتی از اعضای خوشه را تجمیع می‌کنند. پس از این که دریافت داده‌ها توسط سرخوشه‌ها به پایان رسید، سرخوشه‌ها اقدام به ساخت مسیر تا BS می‌کنند تا اطلاعات جمع‌آوری شده را به BS برسانند. گره‌ها هر کدام موقعیت و فاصله خود تا گره BS را می‌دانند. برای تشکیل مسیر تا BS گام بعدی بر اساس میزان فاصله تا BS انتخاب می‌شود. یعنی هر بار گره‌ی فرستنده، گره‌ای را از میان همسایگان خود، به عنوان گام بعدی انتخاب می‌کند که کمترین فاصله تا BS را دارد. این کار تکرار می‌شود تا سرانجام بسته به BS برسد. برای تشکیل مسیر تنها فاصله تا BS ملاک بوده و به انرژی گره‌ها توجهی نمی‌شود.

این الگوریتم از پویا بودن توپولوژی شبکه پشتیبانی می‌کند. به این ترتیب که اگر انرژی گره‌ای تمام شود این گره قبل از خاموش شدن یک پیام به همسایگانش ارسال می‌کند. طبق این پیام اگر گره مرده یک عضو خوشه باشد از جدول همسایگان باقی گره‌ها حذف می‌شود. اما اگر این گره نقش سرخوشه داشته باشد نقش خود را به نزدیکترین همسایه خود که شرط  $Ethreshold$  را دارد واگذار می‌کند. این نوع واگذاری نقش سرخوشه، می‌تواند سبب بروز شرایطی شود که سرخوشه جدید در موقعیتی قرار گیرد که از دسترس برخی از گره‌هایی که قبلاً عضو این خوشه بوده‌اند خارج باشد. در نتیجه تعدادی گره خواهیم داشت که نمی‌توانند سرخوشه داشته باشند و در نتیجه از توپولوژی جدا می‌افتند و گره گم‌شده نامیده می‌شوند. اگر گره‌ای حرکت کند نیز مطابق شرایط قبلی از موقعیت فعلی خود خارج می‌شود و در موقعیت جدید برای همسایگان جدیدش درخواست پیوستن را ارسال می‌کند. به این ترتیب لیست همسایگان خود را به‌هنگام کرده و از بین سرخوشه‌هایی که این همسایگان دارند، نزدیک‌ترین سرخوشه به خود را به عنوان سرخوشه انتخاب می‌کند. در چنین شرایطی اگر گره  $i$  گره‌ی باشد که حرکت کرده است، ولی سرخوشه‌های همسایگان جدیدش هیچ‌کدام در محدوده فرکانسی گره  $i$  نباشند، این گره بدون سرخوشه باقی می‌ماند. به این ترتیب گره  $i$  از توپولوژی جدا می‌افتد و نمی‌تواند داده ارسال کند.

#### ۴-۲ نقاط ضعف

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد مهمترین نقاط ضعف این روش عبارتند از:

(۱) انتخاب سرخوشه سبب می‌شود که خوشه‌های تشکیل شده ناممکن باشند، یعنی تعداد اعضای آن‌ها تفاوت زیادی داشته باشد. لذا توزیع گره‌ها در خوشه‌ها ناموزون بوده و می‌تواند مدیریت ترافیک و مدیریت شبکه را غیر قابل کنترل و نامنظم کند. به عنوان مثال گره‌های دورتر از سرخوشه، پهنای باند کمتری در اختیار خواهند داشت.

(۲) توزیع نامناسب گره‌ها در خوشه‌ها از منظر مصرف انرژی نیز

دوره زمانی آن تکمیل شده باشد انتقال داده‌ها به لایه بالاتر صورت یابد. نودی که می‌خواهد به لایه بالاتر داده ارسال کند از لایه بالایی، گیرنده ایی را انتخاب می‌کند که صف تکمیل‌تری داشته باشد و زودتر انتقال آن صورت گیرد. هدف این روش بهبود کیفیت خدمات از طریق کاهش تاخیر و افزایش طول عمر شبکه است. در این روش گره‌های دور تر از BS چون داده کم‌تری را ارسال می‌کنند زمان انتظار صف آن‌ها کمتر شده و برای گره‌هایی که نزدیک‌تر به BS هستند این زمان بیشتر است. در این روش باقیمانده انرژی نودها کامل استفاده می‌شود.

در [۴۰] یک روش مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی و کیفیت خدمات ارائه شده است. این روش مبتنی بر مه بوده و برای شبکه‌های LLN تعریف شده است. در این روش برای تعیین تعداد خوشه‌ها از یک روش تشخیص اجتماع استفاده می‌شود و سپس برای همه گره‌ها یک معیار به نام درجه<sup>۱</sup> محاسبه می‌شود و انتخاب سرخوشه‌ها و اعضای خوشه‌ها بر اساس این درجه انجام می‌شود. در محاسبه درجه مواردی مثل باقیمانده انرژی، RSS، شرایط لینک و تعداد اعضای هر خوشه لحاظ می‌شود.

تا کنون الگوریتم‌های مختلفی با به کارگیری روش‌های گوناگون سعی در برطرف کردن نیازمندی‌های این نوع شبکه‌ها و بهبود آن‌ها داشتند. هر یک از این پژوهش‌ها فقط یک چالش را مورد هدف قرار داده است. این روش‌ها غالباً تلاش در کنترل مصرف انرژی، افزایش بهره‌وری شبکه، کاهش تاخیر پاسخگویی و یا افزایش طول عمر شبکه داشته‌اند. در این میان روش‌های کمتری وجود دارد که به طور همزمان بهیگی را در چند معیار مختلف حاصل کنند و چند چالش را مورد هدف قرار دهند. در الگوریتم ارائه شده در این پژوهش سعی شده است که با تلفیق ابزارهای بهینه‌سازی مثل برنامه ریزی خطی و اصول گراف تئوری، عملکرد شبکه حسگر از منظر چندین معیار بهبود داده شود. این روش در کنار استفاده از تکنولوژی و علوم به روزی مثل مه محاسباتی و اصول شبکه سبز، اهدافی چون افزایش طول عمر و کارایی شبکه، بهینه‌سازی مصرف انرژی و پهنای باند، رعایت عدالت در شبکه و کاهش تاخیر دسترسی به سرور مرکزی را دنبال می‌کند.

#### ۴-۱ الگوریتم موجود CRPD

##### ۴-۱ روش و شیوه عمل

الگوریتم CRPD<sup>۲</sup> یک الگوریتم مبتنی بر خوشه‌بندی است [۱۴] که برای شبکه‌هایی با توپولوژی پویا مناسب است. در این الگوریتم، هر گره، مسیر ارتباطی را برای خودش تعیین می‌کند. این الگوریتم در ۴ فاز انجام می‌شود که عبارتند از: (۱) تشخیص همسایگان، (۲) انتخاب سرخوشه و تشکیل خوشه‌ها، (۳) جمع‌آوری داده و تشکیل مسیر، و (۴) تکرار مراحل ۲ و ۳.

بعد از پیاده‌سازی اولیه شبکه و تشخیص همسایگان، نوبت به تعیین سرخوشه می‌رسد. در این الگوریتم گره‌ای به عنوان سرخوشه انتخاب می‌شود که بزرگترین درجه در بین همسایگان را دارد و باقیمانده انرژی آن از یک حد آستانه به نام  $Ethreshold$  بزرگتر باشد. اگر این گره تا پیش از این عضو خوشه‌ای نشده باشد خود را به عنوان سرخوشه، از طریق ارسال پیام به همسایگانش، معرفی می‌کند. اگر گره‌ای که بزرگترین درجه را در بین همسایگانش دارد شرط  $Er > Ethreshold$  نداشته باشد، از بین

1. Rank

2. Clustering Routing Protocol for Dynamic WSN

جدول ۱: پیام‌هایی که گره‌ها می‌توانند ارسال و دریافت کنند.

Message	Description
Hello_Msg1	$TUPLE (ID_F, X_F, Y_F)$
Hello_Msg2	$TUPLE (ID_I, X_I, Y_I, ER_I)$
Route_Msg	$TUPLE (ID, X, ER)$
Detect_Msg	$TUPLE (ID_I, D_{II}, ER_I)$
Dead_Msg	$TUPLE (ID_I)$
Join_Msg	$TUPLE (ID_I, X_I, Y_I, ER_I)$
Accept_Msg	$TUPLE (ID_I, X_I, Y_I, ER_I, D_{IF})$
Leave_Msg	$TUPLE (ID_I)$

جدول ۲: نمونه جدول همسایگان

	Table_Nbr				
	$ID_i$	$X_i$	$Y_i$	$d_i$	$E_{ri}$
Node1	۲۰	۷۵,۲۵	۴۵,۲	۳۰	۱,۵
Node2	۱۰۵	۴۱	۹۰	۲۵	۰,۵

## ۵-۱- مقداردهی اولیه شبکه و شناسایی گره‌های همسایه

### ۵-۱-۱- مدل‌سازی شبکه

فرض می‌کنیم  $G = \{S, E\}$  گراف متناظر شبکه باشد که در آن  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  مجموعه گره‌های شبکه و  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$  مجموعه یال‌های شبکه است. برای هر گره داریم:  $S_i = \{ID_i, E_{ri}, X_i, Y_i, d_i, D_i\}$  که به ترتیب  $ID_i$  شناسه گره  $i$  و  $E_{ri}$  باقی مانده انرژی گره  $i$ ، مختصات گره  $i$  و  $d_i$  فاصله گره  $i$  تا BS بر اساس مسیر موجود می‌باشد؛  $D_i$  پهنای باند درخواستی گره  $i$  است. همچنین برای گره  $F$  که نقش BS را دارد، داریم:  $F = \{ID_F, X_F, Y_F\}$  که نشان دهنده شناسه و موقعیت گره  $F$  است.

### ۵-۱-۲- تبادل پیام بین گره‌ها و تشخیص همسایگان

بعد از این که گره‌ها به صورت اتفاقی در محیط شبکه قرار گرفتند، مطابق پیام‌های جدول ۱، ابتدا از سمت BS یک Hello\_Msg1 دریافت می‌کنند که در این پیام گره BS موقعیت و  $ID_F$  خود را به تمام گره‌های شبکه اعلام می‌کند. گره BS این پیام را با سطح انرژی  $E_{max}$  ارسال می‌کند به نحوی که تمام محیط شبکه حسگر را پوشش دهد تا تمام گره‌ها بتوانند این پیام را دریافت کنند. سپس تمام گره‌ها Hello\_Msg2 را با شعاع رادیویی خود یعنی  $r_i$  ارسال می‌کنند. این پیام شامل  $ID_i$  عدد گره، سطح انرژی باقی‌مانده  $E_{ri}$  و موقعیت گره  $(x_i, y_i)$  می‌باشد. اگر گره  $i$  از Hello\_Msg2 را تا شعاع  $r_i$  ارسال کند، تمام گره‌هایی که در این شعاع قرار دارند این پیام را دریافت کرده و آن را در جدول همسایگان خود ذخیره می‌کنند. تمام گره‌ها بعد از تکمیل جدول همسایگان، فاصله خود را تا تک‌تک همسایگان خود و سرور مه حساب کرده و در جدول همسایگان ذخیره می‌کنند. جدول ۲ نمونه‌ای از Table\_Nbr را نشان می‌دهد.

چالش برانگیز است و باعث می‌شود انرژی برخی از گره‌های شبکه زودتر تمام شود و در نتیجه فروپاشی شبکه سریعتر انجام شده و طول عمر شبکه کاهش یابد.

۳) این الگوریتم معمولاً اندازه شعاع رادیویی گره‌ها را افزایش می‌دهد بنابراین اندازه خوشه‌های تشکیل شده نیز افزایش می‌یابد. یعنی با شعاع رادیویی بزرگتر تعداد خوشه‌های کمتر اما انبوه‌تر تشکیل می‌شود. این امر نیز باعث می‌شود انرژی سرخوشه‌ها به سرعت کاهش یابد و در نتیجه طول عمر شبکه کوتاه شود.

۴) سازوکاری که این روش برای پشتیبانی از تحرک گره‌ها دارد گاهی طبق توضیح یادشده موجب می‌شود که گره‌ها از پوشش سرخوشه خارج شده و منزوی گردند. لذا این گره‌ها نمی‌توانند داده ارسال کنند و این موضوع نرخ ارسال شبکه را کاهش می‌دهد.

همانطور که در مدل مصرف انرژی اشاره شد، حسگرها شعاع رادیویی محدودی دارند و اگر از سرور مرکزی دور باشند نمی‌توانند انتقال داده به سرور را انجام دهند. برای حل این مشکل معمولاً حسگرها از گره‌های همسایه خود کمک می‌گیرند. به این ترتیب که این گره‌ها نقش رله را بازی می‌کنند تا اطلاعات به BS برسد. برای تشکیل توپولوژی و انتخاب گره‌های رله، روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی وجود دارد که در بخش روش‌های موجود به آنها پرداخته شد. این الگوریتم‌ها هر کدام تلاش می‌کنند تا روشی متناسب‌تری را با شرایط خاص WSN‌ها ارائه دهند. این الگوریتم‌ها معمولاً بر اساس خوشه‌بندی یا تشکیل درخت عمل می‌کنند و از نقاط ضعف ذکرشده در بالا برخوردارند. الگوریتم پیشنهادی در این مقاله بخش عمده‌ای از این نقاط ضعف موجود را برطرف می‌کند که در ادامه تشریح می‌شود.

## ۵- روش پیشنهادی

روش پیشنهادی، الگوریتم مسیریابی انرژی-آگاه QoS بهینه (OQEAR)، بر اساس پارامترهای انرژی باقیمانده گره، طول مسیره‌ها، تاخیر مسیر و پهنای باند مسیر اقدام به تشکیل مسیره‌های بهینه بین گره‌ها کرده و تخصیص بهینه منابع به نشست‌ها را عملیاتی می‌کند. پهنای باند و تاخیر مسیره‌ها از پارامترهای کیفیت سرویس (QoS) بوده و طول مسیره‌ها و انرژی باقیمانده در گره نیز، شیوه آگاهی از انرژی را در الگوریتم جدید تضمین می‌کنند.

با توجه به این که گرهز هسته مرکزی شبکه مه است و سایر گره‌های حسگر موبایل داخل مه باید اطلاعات خود را به  $F$  ارسال کنند، لذا لازم است گره‌های موبایل توسط یک فرایند مسیریابی، خود را به گره  $F$  متصل کنند. روش پیشنهادی شامل ۳ مرحله اساسی زیر است:

- ۱) مقداردهی اولیه شبکه و شناسایی گره‌های همسایه
- ۲) مسیریابی بهینه و تشکیل توپولوژی بهینه شبکه
- ۳) مدل جدید تخصیص بهینه پهنای باند به نشست‌ها

در واقع روش پیشنهادی ابتدا یک مسیریابی بهینه بین مبداها و مقصدها محاسبه کرده و سپس در این مسیره‌ها یک سازوکار بهینه مصرف پهنای باند برای انتقال بسته فراهم می‌کند.

```

path(n × ۱) ← ϕ
receive ← ϕ
Candidate ← ϕ
Main_Candidate ← ϕ
message types: Rute_Msg, Detect_Msg
distanceiF = √((Xi - XF)۲ + (Yi - YF)۲)
if (distanceiF ≤ ri)
then
    path(i × ۱) = distanceiF
else if (distanceiF > ri)
then
    receive all Detect_Msg
    receive ← receive ∪ {idj}
    Candidate ← find(dij + dFi)
    Main_Candidate = find_max_Er(Candidate)
    path(i × ۱) ← Main_Candidate

```

شکل ۵: الگوریتم تشکیل مسیر.

آن مقدار کمتری داشته باشد، یعنی طول مسیر موجود تا گره  $F$  در آن اتصال کمینه باشد. همچنین با توجه به متحرک بودن گره‌ها، اتصالات یک مقدار  $d_{Fi} + d_{ij}$  برای آنها کمینه نباشد شکسته می‌شوند و اتصال جدید به جای آنها برقرار می‌شود. یعنی ممکن است یک گره موبایل فرزند از پوشش یک گره موبایل پدر خارج شده و به عنوان فرزند برای گره دیگری ثبت شود زیرا مقدار  $d_{Fi} + d_{ij}$  برای گره  $j$  در اتصال جدید کمتر است. در نهایت مقدار  $d_{Fj}$  به عنوان تأخیر دسترسی گره  $j$  به  $F$  ذخیره می‌شود، تا توسط گره  $j$  و از طریق پیام Detect\_Msg به همسایگان گره  $j$  ارسال شود.

(۳) گام دوم تکرار می‌شود تا زمانی که همه گره‌های قابل پوشش در محدوده مه به درخت افزوده شوند. در این مرحله ممکن است گره‌هایی وجود داشته باشند که تحت پوشش قرار نگیرند. این گره‌ها در موقعیتی قرار گرفته‌اند که در شعاع ارتباطی آنها هیچ گره دیگری وجود ندارد. بنابراین گره رله‌ای برای اتصال به شبکه ندارند. در واقع چنین گره‌ها در جدول همسایگان خود همسایه‌ای ندارند. در شکل ۵، الگوریتم تشکیل مسیر ارائه شده است. با توجه به دستورات با پیچیدگی زمانی خطی  $O(n)$ ، پیچیدگی زمانی این الگوریتم خطی و از مرتبه  $O(n)$  است.

حالات خاصی نیز برای شبکه وجود دارد که الگوریتم برای این که شبکه را در این حالات نیز پشتیبانی کند و عملکرد خوبی داشته باشد به صورت زیر عمل می‌کند:

**حالت اول)** اگر گره‌ای بمیرد: گره‌ای که انرژی کافی برای ارسال یا دریافت اطلاعات به اندازه  $l$  بیت تا فاصله  $r$  را ندارد، گره مرده تلقی می‌شود (برای این که گره  $i$  بتواند داده  $l$  را در بازه  $r_i$  منتقل یا دریافت کند باید شرط  $E_{TX} \leq ER_i \leq E_{dead}$  برقرار باشد، یعنی اولاً گره زنده باشد و ثانیاً انرژی باقی‌مانده آن از انرژی لازم برای انتقال بیشتر باشد). در این صورت گره  $i$  پیام Dead\_Msg را به همسایگان خود ارسال می‌کند و با این پیام شناسه خود را به همسایگان می‌فرستد تا بدانند که این گره مرده است و از توپولوژی حذف شده است. هر گره  $j$  که این پیام را دریافت کند گره  $i$  را از Table\_Nbr خود حذف می‌کند. اگر گره  $i$  نقش رله را برای گره  $j$  داشته باشد، در این صورت گره  $j$  باید رله

```

Set of int Nbr → ϕ
Set of tuples Nbrinfo → {idi, Xi, Yi, ERi}
message type: Hello_Msg, Hello_MsgC
F: broadcast Hello_Msg
if receive Hello_Msg from node i
then
if (id ∉ Nbr)
then
Nbr ← Nbr ∪ {idi, Xi, Yi, ERi}

```

شکل ۴: الگوریتم تشخیص همسایگان.

در شکل ۴ الگوریتم تشخیص همسایگان آورده شده است. با توجه به دستورات با پیچیدگی زمانی خطی  $O(n)$ ، پیچیدگی زمانی این الگوریتم خطی و از مرتبه  $O(n)$  است.

پس از آن که گره‌ها همسایگان خود را شناسایی کردند نوبت به ایجاد یک توپولوژی ارتباطی بین گره‌ها به منظور ارسال داده‌ها می‌رسد. توپولوژی یک شبکه عبارت است از همه اتصالات بین گره‌ها. گره‌هایی در این توپولوژی دخیل خواهند بود که برای آنها  $ER_i \geq E_{dead}$  یعنی انرژی باقیمانده آنها برای ارسال و دریافت داده کافی باشد و به اصطلاح گره زنده باشند. توپولوژی تشکیل شده پویا است  $Ed = E_{dead}$ .

در روش جدید، توپولوژی بهینه بین گره‌ها بر اساس یک الگوریتم مسیریابی بهینه تشکیل می‌شود. به عبارت دیگر اتصالات و گره‌های توپولوژی بهینه، توسط این الگوریتم مسیریابی گزینش می‌شوند. مسیریابی بهینه مبتنی بر یک نوع درخت پوشای کمینه جدید و به صورت ترکیبی (توزیع شده و متمرکز) توسط گره مه و گره‌های حسگر انجام می‌شود. از این درخت را با عنوان درخت کمینه مرکزی  $(CMST)$  یاد می‌شود. در زیر مراحل تشکیل توپولوژی درختی شبکه بر اساس درخت کمینه مرکزی آورده شده است:

(۱) هر گره  $i$  که برای آن  $d_{Fi} \leq r_i$  می‌باشد و گره  $F$  را در جدول همسایگان خود دارد، می‌تواند مستقیماً به  $F$  متصل شود. به این منظور پیام Route\_msg را به  $F$  ارسال می‌کنند. این پیام شامل  $Id_i$  و  $Er_i$  و  $d_{Fi}$  می‌باشد که به ترتیب شناسه گره، انرژی باقیمانده و فاصله تا گره  $F$  می‌باشد. به این ترتیب اتصال دو طرفه بین  $F$  و این گره‌های مجاور تشکیل می‌شود. تأخیر هر یک از این اتصالات یعنی  $d_{Fi}$  نیز ذخیره می‌شود.

(۲) هر گره یافته‌شده  $i$  که دارای مسیر به گره  $F$  است اقدام به ارسال پیام Detect\_Msg به سایر گره‌های همسایه خود مانند  $j$  می‌کند که برای آنها  $d_{ij} < r_i$  صدق می‌کند. هر گره یافته‌شده  $j$  ممکن است پیام Detect\_Msg را از یک یا چند همسایه خود دریافت کند. هر گره  $j$  که این پیام را دریافت کند، از بین آنها گره‌ای را برای اتصال انتخاب می‌کند که شرط زیر را داشته باشد:

$$\{e(i, j) \parallel \max(ER_i, \text{from all senders of Detect\_Msg}) = ER_i \text{ \& } \min(dF, \text{of all senders of Detect\_Msg}) = d_{ij} + d_{Fi}\} \quad (\lambda)$$

یعنی گره‌ی انتخاب می‌شود که اولاً  $Er_i$  بزرگ‌تری دارد، ثانیاً  $d_{Fi} + d_{ij}$  برای آن مقدار کمتری داشته باشد، یعنی طول مسیر موجود تا گره  $F$  در آن اتصال کمینه باشد. همچنین با توجه به یعنی گره‌ی انتخاب می‌شود که اولاً  $Er_i$  بزرگ‌تری دارد، ثانیاً  $d_{Fi} + d_{ij}$  برای

*Situation (۱)*  
 message types: Dead\_Msg, Join\_Msg, Accept\_Msg  
 receive  $\leftarrow \phi$   
 if  $(ER_i \leq E_{dead})$   
 then  
 broadcast: Dead\_Msg  
 if  $(S_j \text{ receive Dead\_Msg})$   
 then  
 receive  $\leftarrow \text{receive} \cup \{i\}$   
 $Nbr \leftarrow Nbr \setminus i$   
 if  $(i \in \text{path}(j \times 1))$   
 then  
 go to *Situation (۲)*  
*Situation (۲)*  
 message types: Dead\_Msg, Join\_Msg, Accept\_Msg  
 receive  $\leftarrow \phi$   
 Candidate  $\leftarrow \phi$   
 Main\_Candidate  $\leftarrow \phi$   
 Main\_Candidate  $\leftarrow \phi$   
 if (a new node  $id_i$  come)  
 then  
 broadcast: Join\_Msg  
 if (each node  $j$  receive Join\_Msg)  
 then  
 $Nbr_j \leftarrow Nbr_j \cup \{id_i\}$   
 broadcast: Accept\_Msg  
 if node  $i$  receive Accept\_Msg  
 then  
 receive  $\leftarrow \text{receive} \cup \{id_j\}$   
 Candidate  $\leftarrow \text{find}(d_{ij} + d_{Fj})$   
 $\text{Main\_Candidate} = \text{find\_min\_d}(\text{Candidate})$   
 $\text{Main\_Candidate} = \text{find\_max\_Er}(\text{Main\_Candidate})$   
 $\text{path}(i \times 1) \leftarrow \text{Main\_Candidate}$   
*Situation (۳)*  
 message types: Leave\_Msg  
 if node  $i$  wants to move  
 then  
 broadcast: Leave\_Msg  
 if each node  $j$  receive Leave\_Msg  
 then  
 $Nbr \leftarrow Nbr \setminus i$   
 if  $(i \in \text{path}(j \times 1))$   
 then  
 go to *Situation (۳)*

شکل ۶ الگوریتم حالت‌های خاص.

می‌کند. همچنین گره‌هایی که در فاصله دورتری از  $F$  قرار دارند برای ارسال داده به  $F$  انرژی بیشتری از شبکه مصرف می‌کنند لذا با محدود کردن پهنای باند آن‌ها می‌توان به مصرف کمتر انرژی و افزایش طول عمر شبکه کمک کرد.

این مدل خطی و تابع هدف آن مستقل از زمان است و پارامتر زمان توسط سه پارامتر پهنای باند مصرفی، انرژی مصرفی و فاصله گره از مرکز کنترل می‌شود. به عبارت دیگر گرهی که از مرکز دورتر است تاخیر سرتاسری بیشتری در انتقال دارد و هنگام انتقال و دریافت داده‌ها زمان طولانی‌تری را تجربه کرده و همچنین انرژی بیشتری را مصرف خواهد کرد. لذا به اجبار به این گره دورتر، پهنای باند کمتری تخصیص خواهد شد. با توجه به اینکه پهنای باند به صورت داده بر زمان بوده و نیز مقدار تاخیر تابعی از فاصله  $d$  است، لذا تخصیص بهینه پهنای باند مصرفی بر

جدیدی انتخاب کند. برای این منظور گره  $j$  از میان همسایگان خود گرهایی را که  $ER$  بیشتر و  $d_{Fi} + d_{ij}$  کمتری دارد را به عنوان رله جدید انتخاب می‌کند.

**حالت دوم)** اگر گرهی جدیدی به شبکه اضافه شود: در شرایط خاصی گاهی نیاز می‌شود که گره جدیدی به شبکه اضافه شود و یا گره‌ای در شبکه جابه‌جا شده و حال باید مجدداً گره رله‌ای پیدا کند. در این شرایط گره  $i$  یک پیام Join\_Msg را به تمام گره‌های موجود در  $r_i$  خود ارسال می‌کند. این پیام شامل شناسه گره، باقی‌مانده انرژی گره و موقعیت گره  $i$  می‌باشد. هر گره  $j$  که این پیام را دریافت کند، اطلاعات گره  $i$  را در جدول همسایگان خود بروزرسانی می‌کند. سپس پیام Accept\_Msg را برای گره  $i$  برمی‌گرداند. این پیام شامل  $ER_j$ ،  $ID_j$ ، موقعیت گره  $j$  و  $D_{Fj}$  می‌باشد. گره  $i$  نیز اطلاعاتی که از پیام Accept\_Msg از همسایگان جدیدش به دست می‌آورد را در جدول همسایگان خود ذخیره می‌کند. سپس از بین همسایگان جدیدش، گره‌ای را به عنوان رله انتخاب می‌کند که بیشترین انرژی باقی مانده و کمترین تأخیر مسیری تا گره  $F$  را دارا می‌باشد. طبق شرایط زیر:

$$\{e(i, j) \parallel \max(ER_i, \text{from all senders of Detect\_Msg}) = ER_i \text{ (۹)} \\ \& \min(dF, \text{of all senders of Detect\_Msg}) = d_{ij} + d_{Fj}\}$$

**حالت سوم)** جابه‌جا شدن یک گره در شبکه: در این حالت گره  $i$  قبل از حرکت در شبکه پیام Leave\_Msg را برای تمام همسایگانش ارسال می‌کند. این پیام شامل شناسه گره‌ای است که می‌خواهد حرکت کند. هر گره  $j$  که این پیام را دریافت کند، گره  $i$  را از Table\_Nbr خود حذف می‌کند. هر گره  $j$  که این پیام را دریافت کند چک می‌کند که گره  $i$  برای آن نقش رله داشته یا نه. اگر گره  $i$  نقش رله را برای گره  $j$  داشت حال گره  $j$  باید یک گره رله جدید را از بین همسایگان خود انتخاب کند. در این صورت نیز مانند حالت اول عمل می‌شود. گره  $i$  بعد از حرکت به نقطه دیگری از شبکه منتقل می‌شود و برای ارتباط دوباره با شبکه مانند حالت دوم عمل می‌کند.

در شکل ۶ سه حالت خاص از الگوریتم آورده شده است. این الگوریتم به صورت توزیع شده توسط گره‌های حسگر اجرا می‌شود. با توجه به دستورات با پیچیدگی زمانی خطی  $O(n)$ ، پیچیدگی زمانی این الگوریتم خطی و از مرتبه  $O(n)$  است.

الگوریتم‌های ارائه شده در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ در هر گره به صورت مجزا اجرا می‌شوند و این الگوریتم‌ها شامل ساختارهای حلقه و تو در تو نیستند.

$$\text{Objective Function Max } \sum_{i=1}^n (B_i \times ER_i) / d_i \quad (۱۰)$$

s.t:

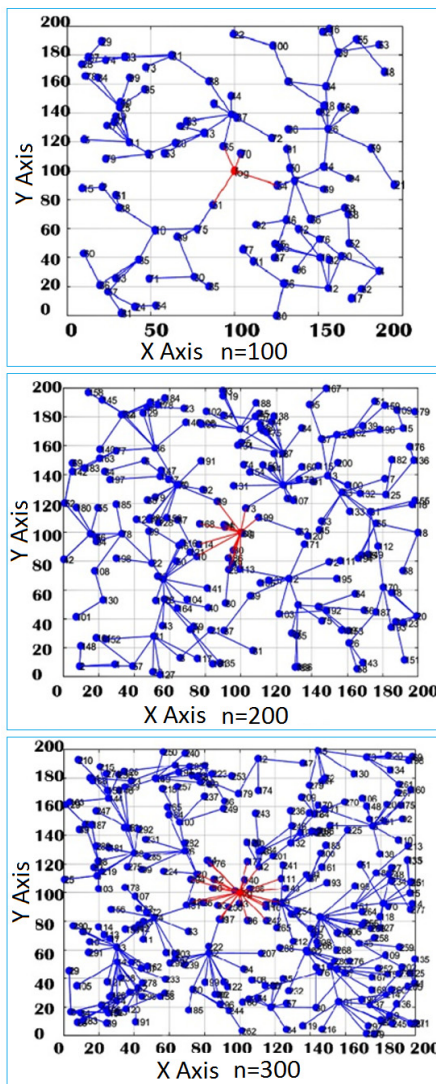
$$\text{Constraint ۱: } \sum_{i=1}^n B_i \leq C \quad (۱۱)$$

$$\text{Constraint ۲: } \forall i, B_i \geq T \quad (۱۲)$$

$$\text{Constraint ۳: } \forall i, B_i \leq D_i \quad (۱۳)$$

**تابع هدف:** متغیر  $B_i$  مقدار پهنای باندی را نشان می‌دهد که به یک گره با اندیس  $i = 1, 2, \dots, n$  تعلق خواهد گرفت. بر طبق این تابع هدف هرچه گره بیشتری داشته باشد و در عین حال  $d_i$  کمتری تا  $F$  داشته باشد، پهنای باند بیشتری دریافت می‌کند و بر عکس. این تابع هدف باعث می‌شود که گره‌هایی که کمتری دارند، بخاطر تخصیص  $B_i$  کمتر، دیرتر دشارژ شوند و این موضوع به افزایش طول عمر شبکه کمک





شکل ۷: توپولوژی و مسیر درختی (CMST) تشکیل شده در شبکه‌ای به ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ برای شبکه‌های دارای ۱۰۰ و ۲۰۰ و ۳۰۰ گره حسگر.

گره مرکزی به عنوان ریشه عمل کرده و همه گره‌ها بر روی یک توپولوژی درختی توزیع شده‌اند. گره قرمز رنگ در مرکز، سرور مه را نشان می‌دهد و اتصالات قرمز رنگ نیز لینک‌های مستقیم با مه را نشان می‌دهد. در ادامه به مقایسه و ارزیابی روش پیشنهادی OQEAR با روش CRPD می‌پردازیم.

زمانیکه شبکه به دلیل از دست دادن تعداد زیادی از گره‌ها و اتصالات خود (خاموش شدن گره‌ها به دلیل دشارژ شدن باتری) امکان ارسال و دریافت داده بین گره‌ها را از دست می‌دهد، عمر شبکه به اتمام خواهد رسید. هر چقدر گره‌ها داده بیشتری را با مصرف انرژی کمتری انجام دهند، طول عمر شبکه و کارایی شبکه افزایش خواهد یافت. برعکس، هر چقدر گره‌ها داده کمتری را با مصرف بیشتری از انرژی انجام دهند، طول عمر شبکه و کارایی آن کمتر خواهد شد. طول عمر بیشتر شبکه زمانی معنا دار است که داده بیشتری را عبور دهد. به عبارت دیگر پایدار ماندن شبکه بدون انتقال داده، امری بی‌پهلو است. لذا طول عمر بهینه شبکه زمانی رخ می‌دهد که انتقال داده‌های بیشتری در مقادیر کمتری از مصرف انرژی، پهنای باند و تاخیر حاصل شود. در مدل خطی ارائه شده جدید، طول عمر شبکه به صورت ریاضی مدل‌سازی و محاسبه خواهد شد.

اساس فاصله و انرژی، به صورت موثر و بهینه، زمان انتقال داده را کنترل و بهینه خواهد کرد. این امر در شبیه‌سازی‌ها به خوبی نشان داده خواهد شد. به عبارت دیگر بدون اینکه متغیر زمان در مدل خطی وارد گردد، مقدار آن توسط پارامترهای پهنای باند و تاخیر و انرژی، کمینه خواهد شد. **قید ۱:** مقدار  $C$  همان یا ظرفیت پهنای باند شبکه است. قید ۱ نشان می‌دهد که مجموع پهنای باند اختصاص داده شده به گره‌های موبایل نمی‌تواند از ظرفیت نهایی یا یک ظرفیت معین بیشتر شود.

**قید ۲:** مقدار  $T$  یک مقدار آستانه برای پهنای باند است که حتی به دورترین گره‌های مه نیز اختصاص داده می‌شود. به عبارت دیگر الگوریتم جدید هرچند به گره‌های نزدیکتر پهنای باند بیشتری اختصاص می‌دهد، اما از گره‌های دور نیز غافل نمی‌شود و عدالت را رعایت می‌کند. مقدار  $T$  را می‌توان بر اساس یک مکانیزم مشخص به دلخواه تعیین کرد. مثلاً  $T$  را می‌توان طوری انتخاب کرد که دورترین گره‌ها به اندازه  $1/10$  یا  $1/5$  برابر نزدیک‌ترین گره‌ها از منابع  $F$  استفاده کنند. لذا در این حالت خواهیم داشت:

$$T = \text{Max}(B_i) / 10 \quad (14)$$

**قید ۳:** مقدار  $D_i$  تقاضای هر گره برای پهنای باند را نشان می‌دهد. پس از حل مدل خطی بالا، مقدار  $B_i$  نباید از  $D_i$  تجاوز کند. یعنی به هر گره بیشتر از درخواستش، پهنای باند اختصاص نمی‌یابد.

این روش خطی می‌تواند ویژگی‌های جدیدی را نیز تحلیل کند بدون آنکه لازم باشد ویژگی‌های قبلی را نادیده بگیرد. مدل‌های خطی، سازگاری بسیار بالایی برای حل مساله‌های چندمتغیره و چندهدفه دارند. روش‌های حل آنها نیز معمولاً ساده و مبتنی بر روش‌های بهینه‌سازی نظیر جبر خطی و روش سیمپلکس است.

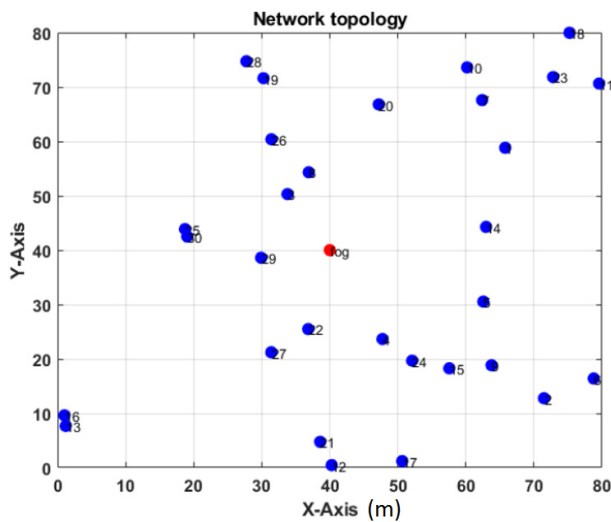
## ۶- شبیه‌سازی و مقایسه نتایج

این بخش به بررسی عملکرد دو الگوریتم موجود و پیشنهادی اختصاص دارد. به این منظور الگوریتم مورد نظر بر روی داده‌های تصادفی که در نرم‌افزار Matlab تولید و شبیه‌سازی شده‌اند، اجرا می‌گردد. سپس از معیارهای ارزیابی و مقایسه عملکرد با روش ارائه شده در [۳۳] برای بررسی نتایج حاصل از اجرای الگوریتم، استفاده می‌شود. در ادامه ابتدا مجموعه داده و معیارهای ارزیابی جدید مورد نظر برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم را معرفی می‌کردد، سپس به کمک این معیارها عملکرد الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم معرفی شده در [۳۳] مقایسه می‌گردد. نرم‌افزار Matlab محیط برنامه‌نویسی مناسبی برای اجرای ابزارهای مرتبط با گراف و بهینه‌سازی خطی است. این دستورات قابلیت تولید توپولوژی شبکه، پردازش گراف و حل مدل‌های بهینه‌سازی خطی را دارا هستند.

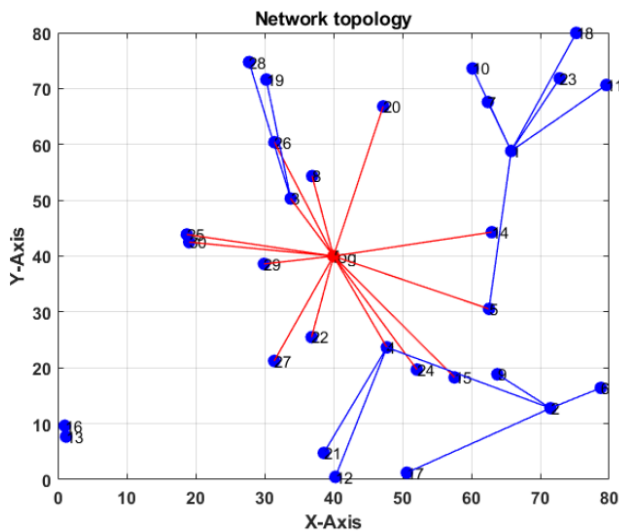
### ۶-۱- شبیه‌سازی توپولوژی و مسیرهای بهینه در روش

#### جدید OQEAR

در شکل ۷ نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی برای سه حالتی که گره‌های شبکه به تعداد ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ باشند، آورده شده است. همانطور که در شکل ۴ مشخص است، الگوریتم پیشنهادی CMST همبندی و پوشش شبکه را به خوبی حفظ کرده و تمام گره‌ها دارای مسیر تا مه مرکزی هستند.



شکل ۸: محیط شبکه با ابعاد  $80 \times 80$  برای ۳۰ گره که به صورت تصادفی در این محیط قرار گرفته‌اند.



شکل ۹: تشکیل مسیره‌های درختی اولیه بین گره مرکزی مه و سایر گره‌ها.

## ۶-۴ مثال بررسی رفتار گره‌ها و محاسبه مقادیر الگوریتم پیشنهادی

برای درک بهتر عملکرد الگوریتم پیشنهادی هنگام حرکت پویای گره‌ها، تخصیص پهنای باند و طول مسیره‌ها، یک سناریو کوچک را مورد بررسی قرار گرفت. در این سناریو مطابق شکل ۸ تعداد  $n = 30$  گره به صورت تصادفی در شبکه با ابعاد  $80 \times 80$  پراکنده شده‌اند و گره مه در مرکز شبکه واقع شده است. شعاع رادیویی گره‌ها ۳۰ فرض شده است.

ابتدا گره مه و سایر گره‌های شبکه اقدام به شناسایی موقعیت سایر گره‌ها می‌کنند. مطابق شکل ۹ نیز اجرای الگوریتم درختی CMST باعث تشکیل یک مسیر درختی بین گره مرکزی مه و سایر گره‌ها تشکیل می‌شود. گره‌های ۱۳ و ۱۶ نتوانسته‌اند در شعاع رادیویی هیچ گره‌ای قرار گیرند.

با توجه به اینکه تعدادی از گره‌ها یا همه آنها می‌توانند جابجا شوند، مسیر درختی تشکیل شده می‌تواند به صورت پویا تغییر کند. شکل ۱۰ درخت پویای بعدی را نمایش می‌دهد. مسیر درختی در هر لحظه و بر اساس نیاز می‌تواند توسط الگوریتم CMST درخواست و تشکیل شود.

جدول ۳: مشخصات و مقادیر مرتبط با پارامترهای شبیه‌سازی.

Parameter Name	Value
Network Area	$200 \times 200$
N	۱۰۰-۳۰۰
The coordinate of fog	(۱۰۰ و ۱۰۰)
Number of moving nodes	$0.25n$
Data packet size	۵۱۲ byte
$E_{elec}$	۵۰ nJ/bit
$\epsilon_{fs}$	$10 \text{ pJ/bit/m}^2$
$\epsilon_{mp}$	$0.0013 \text{ pJ/bit/m}^4$
Do	۸۶ m
$E_i$	۱ Joules
$r_i$	۳۰ m
T	$0.25 D_i$
$D_i$	۴۰۹۶ bps
C	۴۰۰۰۰

## ۶-۲ پارامترهای مقایسه‌ای شبیه‌سازی

برای مقایسه دو الگوریتم OQEAR و CRPD، پارامترهای زیر را مورد محاسبه و ارزیابی قرار می‌دهیم:

**نرخ انتقال داده:** برابر با حجم داده منتقل شده به گره مقصد تقسیم بر زمان انتقال است. انتقال داده بیشتر در زمان کمتر به معنای برتری یک الگوریتم است.

**متوسط طول مسیره‌های ساخته شده در شبکه:** کاهش طول مسیر انتقال بین مبدا و مقصد به معنای برتری یک الگوریتم است.

**انرژی مصرفی:** انتقال داده بیشتر و ثابت نگه داشتن انرژی مصرف شده به معنای برتری یک الگوریتم است.

**نسبت داده‌های منتقل شده به انرژی مصرفی:** پارامتری برای درک و مقایسه مصرف انرژی در انتقال یک داده با حجم ثابت است.

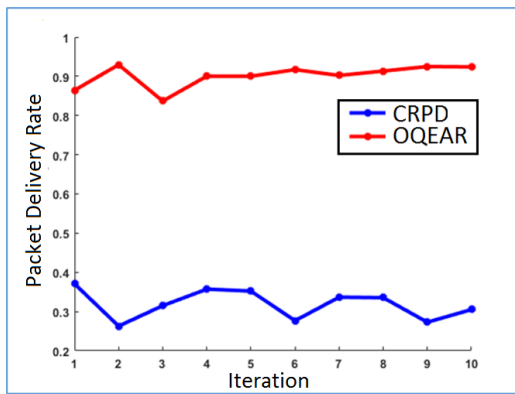
**نسبت مسیره‌های طی شده به انرژی مصرف شده:** پارامتری برای درک و مقایسه نسبت انرژی مصرف شده به ازای مقصدهای دورتر است.

**تعداد گره‌های گم شده:** گره‌هایی که نمی‌توانند به شبکه ملحق شوند، گم شده محسوب می‌شوند. کاهش این پارامتر نشانه برتری یک الگوریتم در ساخت توپولوژی شبکه است.

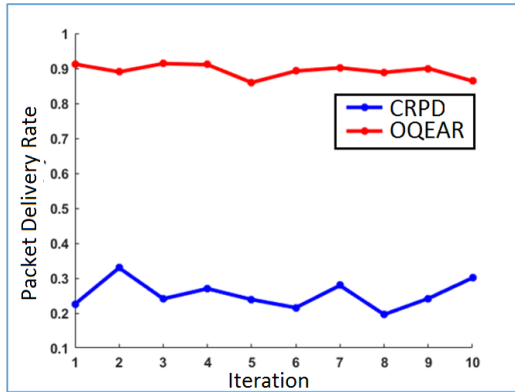
**طول عمر شبکه:** زمان مرگ اولین گره را نشان می‌دهد. افزایش طول عمر شبکه نشانه برتری یک الگوریتم است.

## ۶-۳ پارامترها و مشخصات شبیه‌سازی

تعیین ضرایب و مقادیر مرتبط با پارامترهای شبیه‌سازی مطابق جدول ۳ است. ابعاد شبکه  $200 \times 200$  است. تعداد گره‌ها در سه مرحله انجام می‌شود و مقادیر ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ خواهد بود. در هر مرحله از تغییرات توپولوژی شبکه، یک چهارم گره‌ها جابجا خواهند شد. اندازه هر بسته ۵۱۲ بایت خواهد بود و اندازه داده‌ای که باید از گره منتقل شود، مضربی از ۵۱۲ بایت است. برای انجام دقیق و یکسان شبیه‌سازی، فرض می‌شود هر گره در هر انتقال، دارای ۴۰۹۶ بایت داده برای انتقال است. ظرفیت کل گره مرکزی  $C = 40000$  می‌باشد. شعاع پوششی هر گره برابر با ۳۰ متر و شعاع پوششی گره مرکزی نیز ۸۶ متر در نظر گرفته شده است. طبق مدل مصرف انرژی، انرژی لازم برای انتقال یک بیت از گره مبدا به گره مقصد، تابعی از طول مسیر و پهنای باند مسیر است.



(الف)



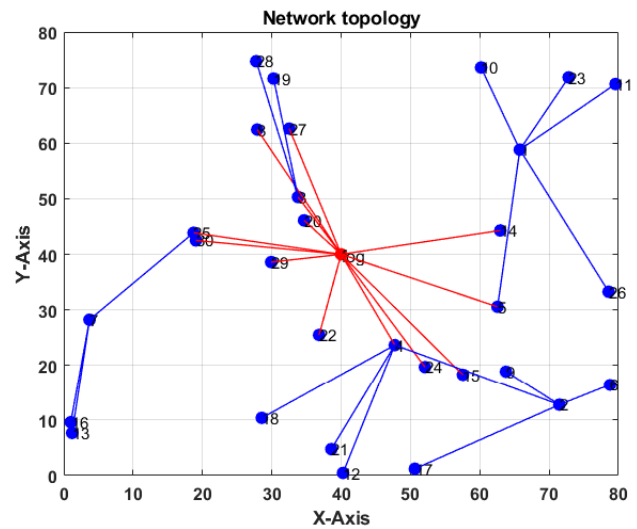
(ب)

شکل ۱۱: نرخ انتقال داده برای حالتی که ۱۰۰ گره در شبکه وجود دارد، (الف) نتیجه ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم و (ب) نتیجه ۲۰۰ بار اجرای الگوریتم.

اندازه ۱۰۰ گره). محور عمودی نیز میانگین نرخ انتقال داده نسبی را نمایش می‌دهد. یعنی نسبت مقدار داده‌ای که در واقعیت در شبکه منتقل شده و به سرور مه رسیده است، نسبت به مقدار داده‌ای که در حالت ایده‌آل انتظار می‌رود در شبکه منتقل شود. شکل ۱۱- الف نتیجه بعد از ۱۰۰ بار اجرا و شکل ۱۱- ب نتیجه بعد از ۲۰۰ بار اجرای الگوریتم روی شبکه‌های با اندازه ۱۰۰ را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است نرخ انتقال در روش OQEAR نسبت به نرخ انتقال در CRPD تقریباً ۱۶۶ درصد بیشتر است.

در شکل ۱۲ نیز متوسط طول مسیرهای ساخته‌شده در شبکه توسط هر دو الگوریتم قابل مشاهده است. همانطور که دیده می‌شود در ۱۰۰ دور اجرا تمام مسیرهای ساخته‌شده توسط الگوریتم جدید OQEAR طول کوتاه‌تری دارند و دلیل این امر یافتن کوتاه‌ترین مسیرهای ممکن از هر گره تا مه در الگوریتم جدید می‌باشد، اما در الگوریتم CRPD در هنگام تشکیل خوشه‌ها به طول مسیرهای ایجاد شده توجهی نمی‌شود و انتخاب بر اساس کوتاه‌ترین مسیر نمی‌باشد. لذا الگوریتم OQEAR تأخیر انتقال تا سرور مه را کاهش می‌دهد. در شکل ۱۲- ب سه مورد مشاهده می‌شود که الگوریتم OQEAR طول مسیرهای بیشتری داشته است، این موارد می‌تواند به دلیل شرایط خاص موقعیت گره‌ها در توپولوژی شبکه باشد.

شکل ۱۳ انرژی مصرفی در هر دو الگوریتم را نشان می‌دهد. انرژی مصرفی در الگوریتم OQEAR بیشتر نشان داده شده است. اما طبق شکل ۱۱ مشاهده کردیم که نرخ انتقال الگوریتم OQEAR نیز بیشتر بوده است. لذا نمی‌توان ادعا کرد که OQEAR انرژی بیشتری را مصرف کرده است، باید مشخص شود در ازای مصرف این مقدار بیشتر انرژی، نرخ انتقال چقدر بیشتر شده است. با توجه به نمودارها می‌توان تخمین زد که حدوداً مصرف انرژی OQEAR دو برابر بوده است.



شکل ۱۰: دومین درخت پویای تشکیل شده پس از جابجایی گره‌های شبکه که شامل مسیرهای متفاوت جدیدی بین ریشه و گره‌ها است.

جدول ۴: مشخصات گره های ۱ الی ۵ هنگام درخواست انتقال داده بر اساس طول مسیر تا مه، پهنای باند درخواستی و انرژی باقی مانده آنها.

مسیر	پهنای باند تخصیص یافته	پهنای باند درخواستی	فاصله تا مه	باقی مانده انرژی	شناسه
{۱،F}	۲۴۱۲	۲۴۱۲	۲۷،۱۶۰	۰،۵۶۱	۱
{۲،۱۶،F}	۶۹۲،۳۳۳	۲۰۷۷	۴۴،۶۹۷	۰،۳۷۴	۲
{۳،F}	۳۰۹۳،۳۳۳	۴۰۴۳	۲۲،۸۳۱	۰،۳۰۴	۳
{۴،F}	۲۵۰۴	۲۵۰۴	۲۱،۸۱۸	۰،۳۲۹	۴
{۵،F}	۱۹۷۶	۱۹۷۶	۲۱،۴۵۷	۰،۵۴۱	۵

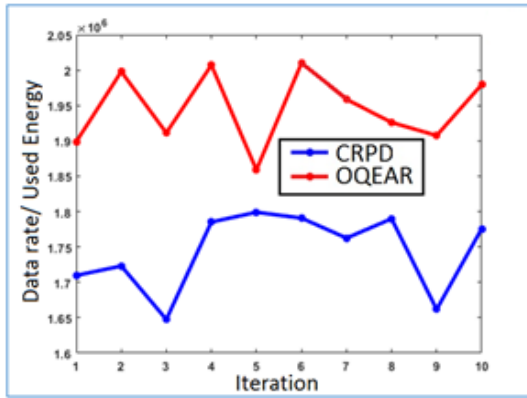
پس از تشکیل مسیر درختی بین گره مرکزی مه و سایر گره‌ها، مدل خطی بهینه‌سازی بر اساس مقدار پهنای باند درخواستی هر گره، فاصله آن گره تا مرکز، پهنای باند قابل دسترس مسیر، مقدار انرژی باقیمانده در آن گره و مقدار داده‌ای که قصد دارد انتقال دهد، به آن گره پهنای باند بهینه‌ای را تخصیص می‌کند. در جدول ۴ مقدار پهنای باند بهینه تخصیص یافته به ۵ گره ۱ الی ۵ که متقاضی انتقال داده بوده‌اند، به صورت نمونه درج شده است.

### ۶- محاسبه پارامترهای مقایسه ای در شبکه با اندازه

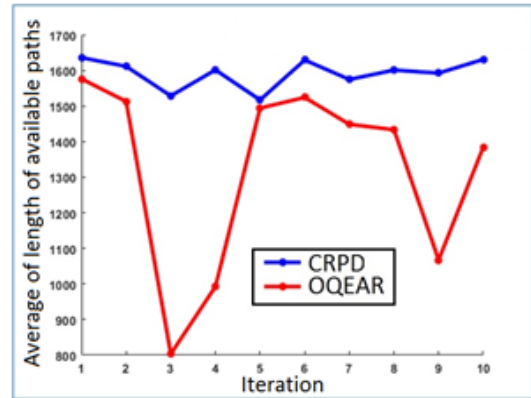
$$n=100$$

سناریوی شبیه سازی: تعداد گره‌های شبکه برابر ۱۰۰ در نظر گرفته شد و ابعاد شبکه ۲۰۰×۲۰۰ است. یک‌صد گره به صورت تصادفی در محدوده شبکه توزیع گردید. هر یک از الگوریتم‌ها ۱۰۰ بار (و نیز ۲۰۰ و ۳۰۰ بار) بر روی شبکه اجرا شد. در هر ۱۰۰ بار اجرا، انتقال داده بر روی درختی که بین ریشه مرکزی و گره‌های انتهایی است انجام یافت. سپس پارامترهای مقایسه‌ای محاسبه گردید. فرایند یادشده ده مرتبه تکرار گردید و میانگین پارامترهای مقایسه‌ای در این ده سری محاسبه شد و نتایج ثبت گردید. فرایند ده سری اجرا برای شبکه‌های با اندازه ۲۰۰ و ۳۰۰ گره نیز مجدداً اجرا شد و نتایج را ثبت گردید. شکل‌های ۱۱ تا ۳۱ ارزیابی پارامترهای مقایسه‌ای و ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها را برای این محاسبات نشان می‌دهند.

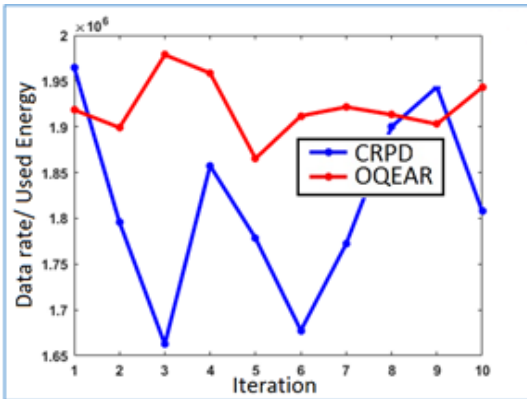
در شکل ۱۱، محور افقی تعداد ۱۰ توپولوژی مختلفی را که الگوریتم‌ها روی آنها اجرا شده است را نشان می‌دهد (۱۰ سری تکرار برای شبکه با



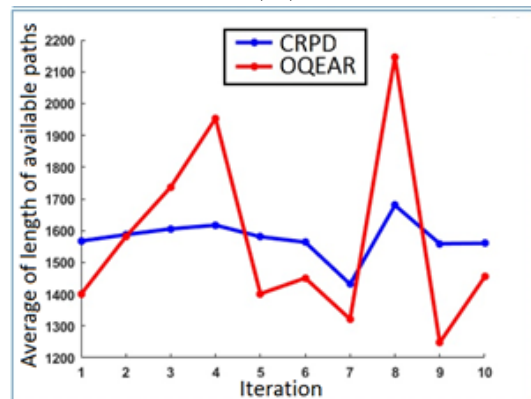
(الف)



(ب)



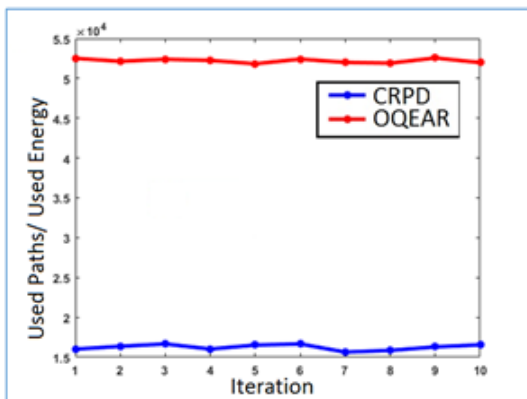
(ب)



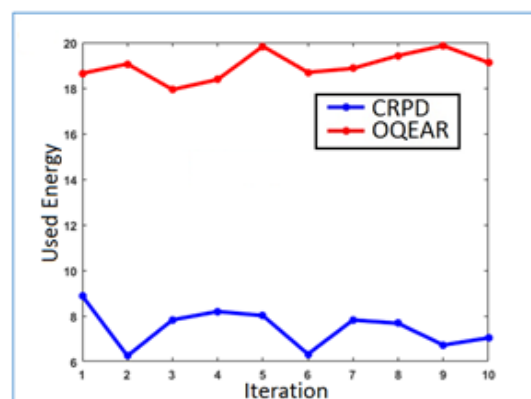
(ب)

شکل ۱۴: نسبت داده‌های انتقال یافته به انرژی مصرف شده در شبکه برای حالتی که ۱۰۰ گره در شبکه وجود دارد، (الف) نتیجه ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم و (ب) نتیجه ۲۰۰ بار اجرای الگوریتم.

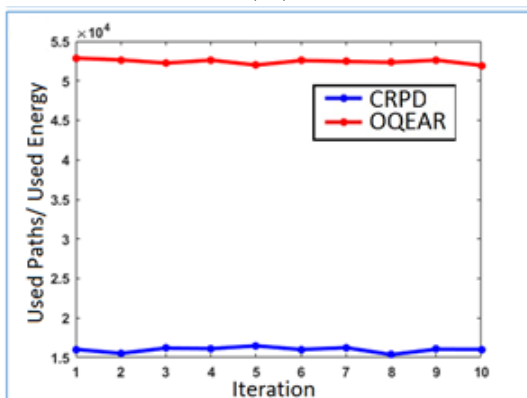
شکل ۱۲: متوسط طول مسیرهای ساخته شده در شبکه برای حالتی که ۱۰۰ گره در شبکه وجود دارد، (الف) نتیجه ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم و (ب) نتیجه ۲۰۰ بار اجرای الگوریتم.



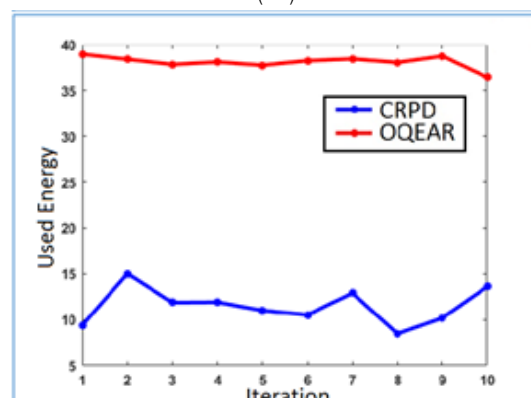
(الف)



(الف)



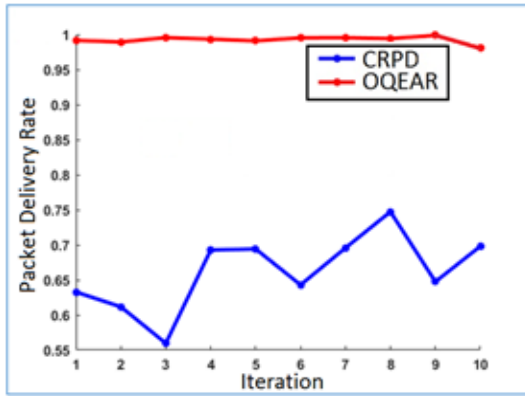
(ب)



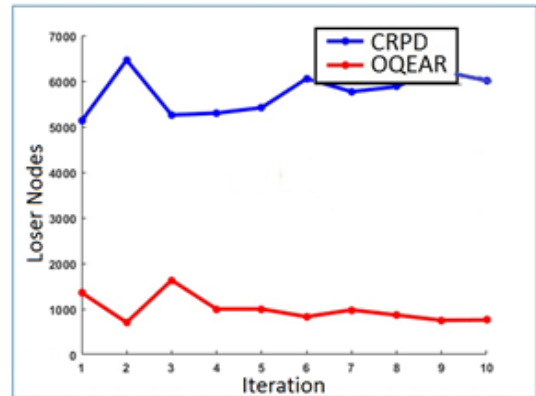
(ب)

شکل ۱۵: نسبت مسیرهای طی شده به انرژی مصرف شده در شبکه برای حالتی که ۱۰۰ گره در شبکه وجود دارد، (الف) نتیجه ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم و (ب) نتیجه ۲۰۰ بار اجرای الگوریتم.

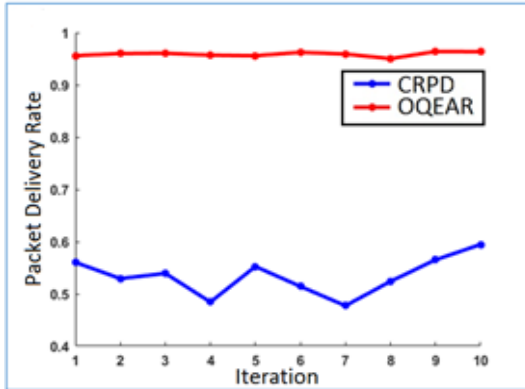
شکل ۱۳: متوسط انرژی مصرف شده در شبکه برای حالتی که ۱۰۰ گره در شبکه وجود دارد، (الف) نتیجه ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم و (ب) نتیجه ۲۰۰ بار اجرای الگوریتم.



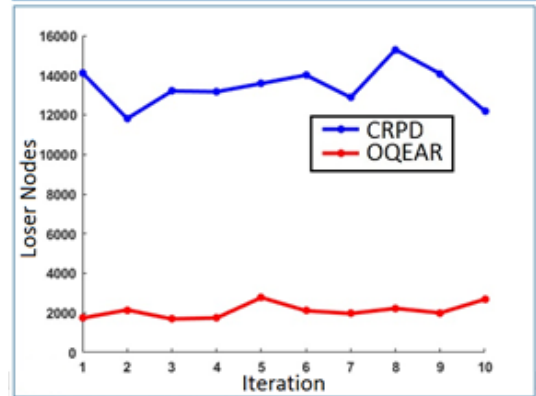
(الف)



(الف)



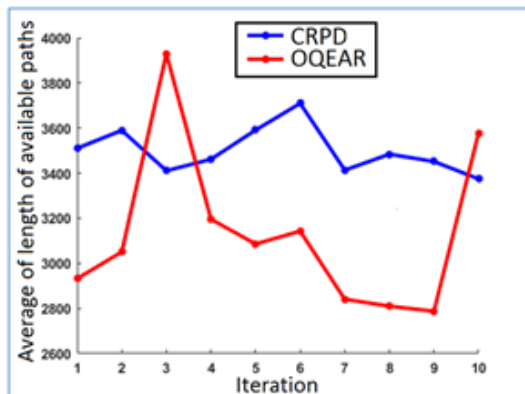
(ب)



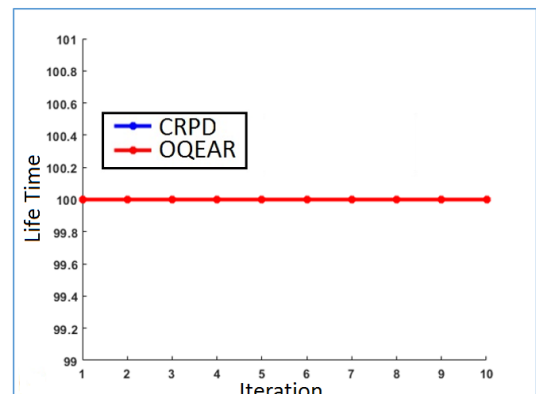
(ب)

شکل ۱۸: نرخ انتقال داده، برای حالتی که ۲۰۰ گره در شبکه وجود دارد، (الف) نتیجه ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم و (ب) نتیجه ۲۰۰ بار اجرای الگوریتم.

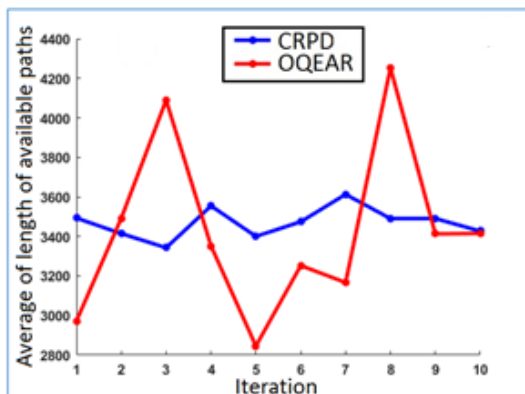
شکل ۱۶: تعداد گره‌های گم‌شده در شبکه برای حالتی که ۱۰۰ گره در شبکه وجود دارد، (الف) نتیجه ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم و (ب) نتیجه ۲۰۰ بار اجرای الگوریتم.



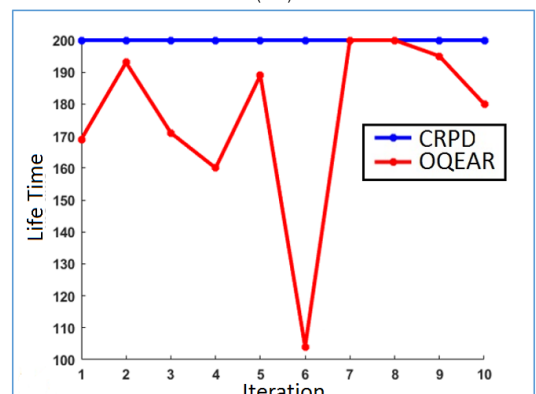
(الف)



(الف)



(ب)



(ب)

شکل ۱۹: متوسط طول مسیرهای ایجادشده در شبکه برای حالتی که ۲۰۰ گره در شبکه وجود دارد، (الف) نتیجه ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم و (ب) نتیجه ۲۰۰ بار اجرای الگوریتم.

شکل ۱۷: طول عمر شبکه برای حالتی که ۱۰۰ گره در شبکه وجود دارد، (الف) نتیجه ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم و (ب) نتیجه ۲۰۰ بار اجرای الگوریتم.

## ۶-۶ تکرارهای ۲۰۰ گره‌ای

در ادامه مطابق با بخش قبلی، معیارهای شبیه سازی را برای ده سری اجرا در شرایطی که شبکه بزرگتر باشد و ۲۰۰ گره حسگر در شبکه موجود باشد، بررسی می‌کنیم. در شکل ۱۸ نرخ انتقال داده برای هر دو الگوریتم نشان داده شده است. که در حالت ۲۰۰ گره نیز نرخ انتقال الگوریتم OQEAR بیشتر است. از مقایسه شکل‌های ۱۸ - الف و ۱۸ - ب به ترتیب برای ۱۰۰ و ۲۰۰ دور اجرا مشخص می‌شود که الگوریتم OQEAR نرخ انتقال را در محدوده هموار و مشخصی حفظ کرده است ولی در الگوریتم CRPD نرخ انتقال برای ده حالت مختلف توپولوژی، مقدار پایینی داشته است. این موضوع نشان می‌دهد که نرخ انتقال در CRPD وابستگی بیشتری به شرایط توپولوژیکی شبکه دارد.

نرخ انتقال تابعی از پهنای باند مصرفی شبکه است. لذا الگوریتم OQEAR می‌تواند پهنای باند مصرفی مسیرها را به نحو مطلوبتری استفاده کند. همچنین این الگوریتم می‌تواند پهنای باند را به صورت مناسب بین نشست‌ها توزیع کند.

شکل ۱۹ نیز متوسط طول مسیرهای ساخته شده در هر دو الگوریتم را نشان می‌دهد، که به‌طور کلی برای ۲۰۰ گره حسگر نیز در الگوریتم جدید مسیرهای کوتاه‌تری برای گره‌ها تا سرور مه ایجاد شده است.

شکل ۲۰ انرژی مصرف شده در شبکه برای حالتی که ۲۰۰ گره در شبکه وجود دارد را نشان می‌دهد، از آنجایی که نرخ انتقال OQEAR بیشتر از CRPD است، مصرف بیشتر انرژی آن توجیه پذیر است. در شکل‌های بعدی که نسبت داده انتقالی به انرژی مصرفی بررسی می‌شود نیز صحت این موضوع تأیید می‌شود.

مطابق شکل ۲۱ الگوریتم جدید برای ۲۰۰ گره در شبکه نیز داده‌های بیشتری را با صرف انرژی کمتر در شبکه منتقل کرده است. این موضوع به نحوه تشکیل مسیرها و تخصیص پهنای باند نیز مرتبط است. مصرف منابع کمتر در شبکه و افزایش نرخ انتقال داده یک امتیاز مهم برای روش OQEAR محسوب می‌شود و می‌تواند این روش را به عنوان یک روش برای مصرف بهینه انرژی مورد تأیید قرار دهد. امروزه ابداع الگوریتم‌های جدید برای کاهش مصرف انرژی، یک چالش جهانی در شبکه‌های کامپیوتری سبز است.

بر طبق شکل ۲۲ الگوریتم جدید برای ۲۰۰ گره در شبکه نیز مسیرهای بیشتر اما کوتاه‌تری را با صرف انرژی کم‌تر طی کرده است. این موضوع نیز به دلیل تشکیل مسیرهایی با کوتاه‌ترین فاصله ممکن میسر شده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که تأخیر انتقال هم کاهش می‌یابد. در واقع الگوریتم OQEAR با صرف انرژی کمتری، بخش بزرگتری از شبکه را با تعداد بیشتری گره پوشش می‌دهد.

بر اساس مقایسه عملکرد دو الگوریتم شکل ۲۳، مشخص است که تعداد گره‌های گم شده برای الگوریتم OQEAR در حالتی که شبکه ۲۰۰ گره دارد نیز بسیار کم‌تر است. در الگوریتم CRPD با افزایش تعداد دور اجرا به ۲۰۰ در شکل ۲۳ - ب مشاهده می‌شود که تعداد گره‌های گم شده نیز بیشتر می‌شود. پس پوشش شبکه در الگوریتم جدید بیشتر است، زیرا تعداد گره گم شده کم‌تری دارد.

مطابق نمودارهای شکل ۲۴ به درستی نمی‌توان تعیین کرد که طول عمر شبکه در کدام الگوریتم بیشتر بوده است، زیرا طول عمر ارتباط مستقیم با نرخ انتقال داده، پوشش موجود شبکه و مصرف انرژی دارد. مثلاً در اجرای اول هر دو الگوریتم در شکل ۲۴ - الف، زمان مرگ اولین گره در شبکه برای الگوریتم OQEAR حدود ۵۰ و برای الگوریتم CRPD حدود ۸۸

در شکل ۱۴ نسبت داده‌های منتقل شده به انرژی مصرف شده نشان داده شده است. همان‌طور که پیداست این نسبت برای الگوریتم OQEAR بیشتر است، به این معنی که داده‌های بیشتری را با صرف انرژی کمتری منتقل کرده است. بنابراین در اینجا دلیل بیشتر بودن مصرف انرژی در الگوریتم جدید OQEAR قابل توجیه است.

در شکل ۱۵ نیز نسبت طول مسیرهایی که برای انتقال داده در شبکه طی شده است به انرژی مصرفی طی این انتقال‌ها نشان داده شده است. طبق نمودارها برآورد می‌شود که الگوریتم OQEAR برای طی کردن مسیرهای بیشتر اما کوتاه‌تر، انرژی کمتری مصرف کرده است. این مقایسه نیز مصرف بیشتر انرژی در الگوریتم جدید را توجیه می‌کند، زیرا این مصرف بیشتر به خاطر انتقال داده بیشتر در طول مسیرهای کوتاه‌تر بوده است. استفاده از توان و ظرفیت شبکه بدون مستهلک کردن و تبدیل به ضایعات کردن منابع آن، امتیاز مهمی در روش جدید است.

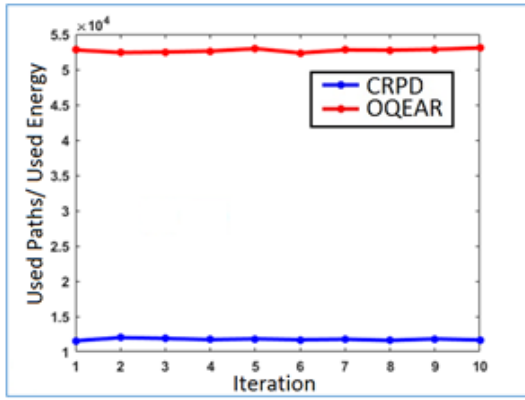
در شکل ۱۶ تعداد گره‌های گم شده قابل مشاهده است. گره گم شده به گره‌ای گفته می‌شود که نتوانسته است مسیری به مقصد خود پیدا کند و از انتقال داده باز مانده است. مطابق شکل ۱۶ - الف طی ۱۰۰ بار اجرا، تعداد گره‌های گم شده در الگوریتم CRPD تقریباً ۳ برابر OQEAR است و در شکل ۱۶ - ب مشاهده می‌شود که بعد از ۲۰۰ دور اجرا تعداد گره‌های گم شده در هر دو الگوریتم افزایش داشته است اما همچنان برای CRPD حدود ۳ برابر OQEAR می‌باشد. دلیل نرخ بالای گره‌های گم شده در الگوریتم CRPD در فصل دوم توضیح داده شده است. نرخ بالای گره‌های گم شده قابلیت اعتماد شبکه را کاهش می‌دهد، زیرا این موضوع نرخ از دست رفتن داده‌ها را نیز افزایش داده و سبب می‌شود اطلاعات نواحی خاصی از شبکه از دست برود.

گم شدن گره‌های شبکه را می‌توان به نوعی تبدیل کردن منابع شبکه به ضایعات دانست. زیرا این گره‌ها هم وجود دارند و هم در دسترس هستند اما الگوریتم CRPD ظرفیت استفاده از آنها را به هدر می‌دهد زیرا نحوه ساخت خوشه‌ها و انتخاب سرخوشه‌ها در آن، قابلیت استفاده از این گره‌ها را ندارد.

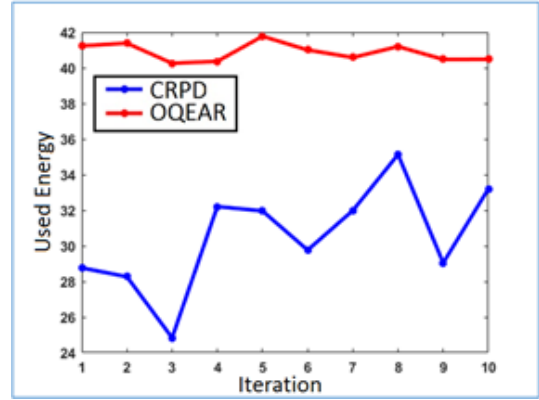
در نهایت در شکل ۱۷ طول عمر شبکه مشاهده می‌شود. طبق تعریف این معیار زمان مرگ اولین گره را نشان می‌دهد. در شکل ۱۷ - الف هیچ گره‌ای در هر دو الگوریتم، نمرده است و طول عمر در تمام حالت‌ها برابر ۱۰۰ دور اجرای کامل می‌باشد. اما در شکل ۱۷ - ب در حالت ۲۰۰ دور اجرا باعث تمام شدن انرژی بعضی گره‌ها شده است. مشاهده می‌شود که در الگوریتم CRPD هیچ گره‌ای نمرده است در حالی که در الگوریتم OQEAR گره مرده وجود دارد که باعث کاهش طول عمر شده است.

دلیل این امر با انتقال داده بیشتر و نرخ گره کم شده کمتر در شبکه قابل توجیه است. به عبارت دیگر، روش OQEAR در مدت زمان کمتری توانسته داده‌های مورد نظر را از شبکه عبور دهد. روش CRPD نیز همین مقدار داده را در زمان طولانی‌تر و با صرف انرژی بسیار بیشتری از طریق مسیرهای بسیار طولانی‌تر از شبکه عبور داده است.

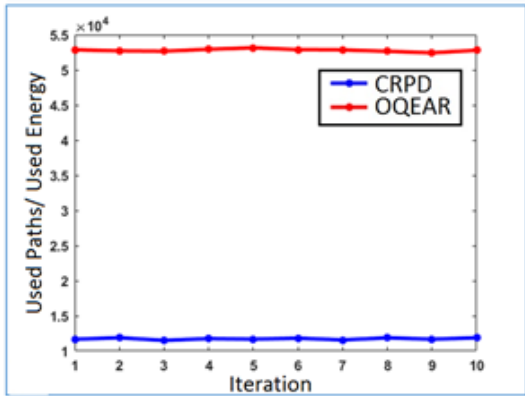
لذا می‌توان ادعا کرد که روش OQEAR می‌تواند منابع شبکه را با سرعت بیشتر و با صرف انرژی کمتر برای داده‌های بیشتری استفاده کند که به معنای بهینگی مطلوب در مصرف منابع و انرژی است. روش CRPD با گم کردن بسیار وسیع گره‌ها، امکان استفاده بهینه از گره‌های شبکه را ندارد لذا عدم مرگ گره‌ها در این روش بیشتر به دلیل ناکارآمدی در استفاده از منابع شبکه است.



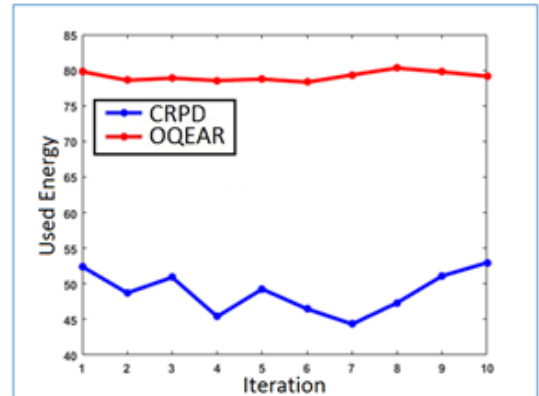
(الف)



(ب)



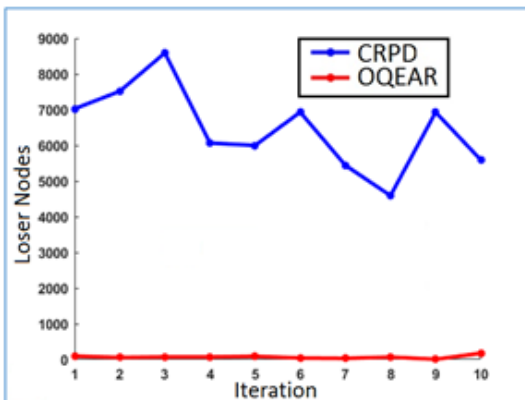
(ب)



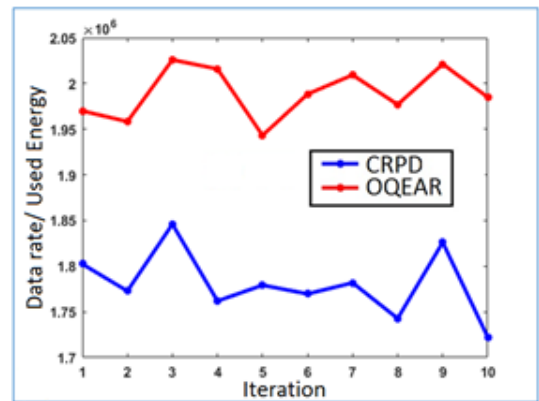
(ب)

شکل ۲۰: انرژی مصرف شده در شبکه برای حالتی که ۲۰۰ گره در شبکه وجود دارد، (الف) نتیجه ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم و (ب) نتیجه ۲۰۰ بار اجرای الگوریتم.

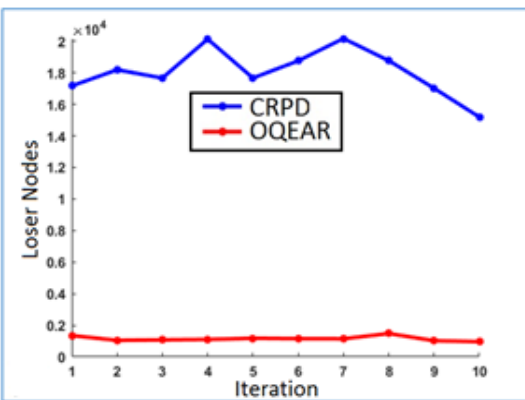
شکل ۲۱: نسبت مسیریابی طی شده برای ارسال داده به انرژی مصرف شده در شبکه، برای حالتی که ۲۰۰ گره در شبکه وجود دارد، (الف) نتیجه ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم و (ب) نتیجه ۲۰۰ بار اجرای الگوریتم.



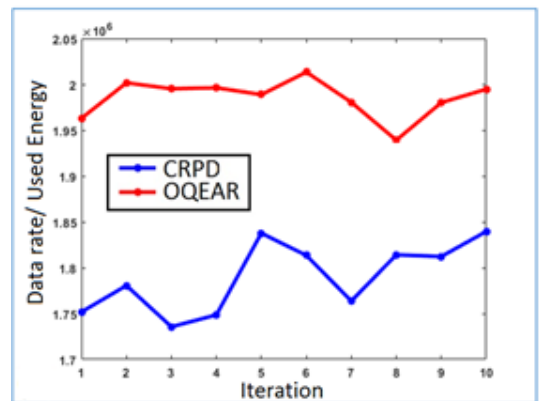
(الف)



(ب)



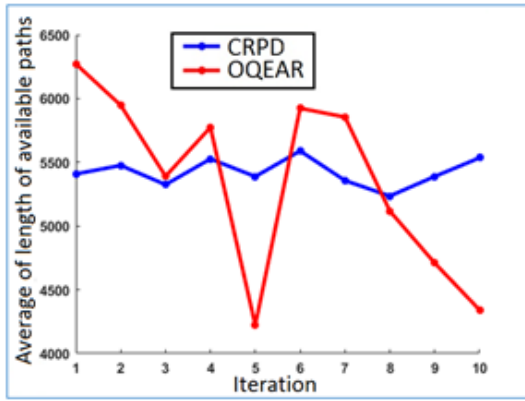
(ب)



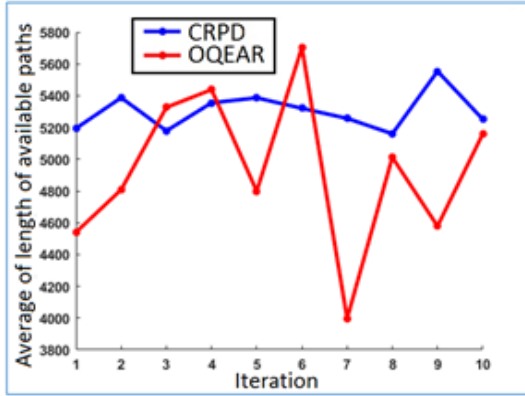
(ب)

شکل ۲۲: تعداد گره‌های گم شده در شبکه، برای حالتی که ۲۰۰ گره در شبکه وجود دارد، (الف) نتیجه ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم و (ب) نتیجه ۲۰۰ بار اجرای الگوریتم.

شکل ۲۳: نسبت داده‌های ارسال شده به انرژی مصرف شده در شبکه، برای حالتی که ۲۰۰ گره در شبکه وجود دارد، (الف) نتیجه ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم و (ب) نتیجه ۲۰۰ بار اجرای الگوریتم.

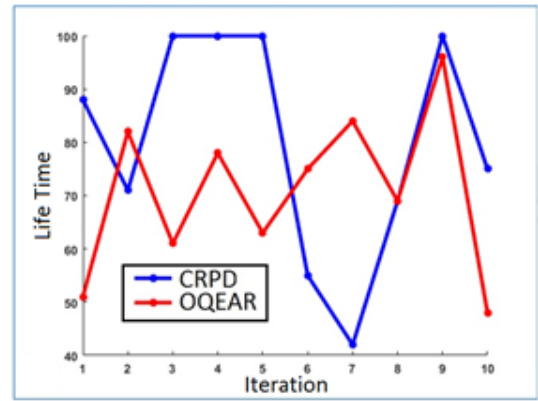


(الف)

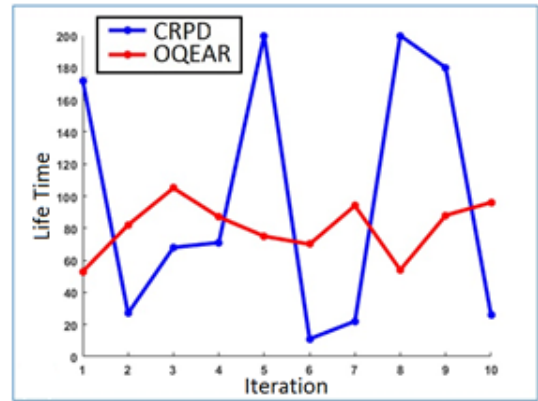


(ب)

شکل ۲۶: متوسط طول مسیرهای ایجادشده در شبکه، برای حالتی که ۳۰۰ گره در شبکه وجود دارد، (الف) نتیجه ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم و (ب) نتیجه ۲۰۰ بار اجرای الگوریتم.

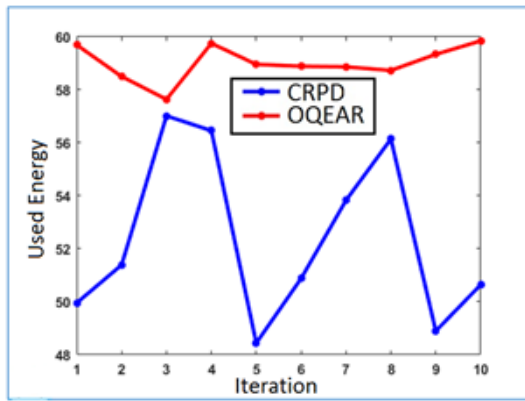


(الف)

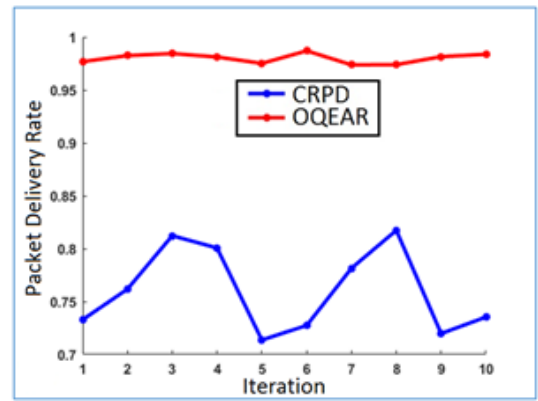


(ب)

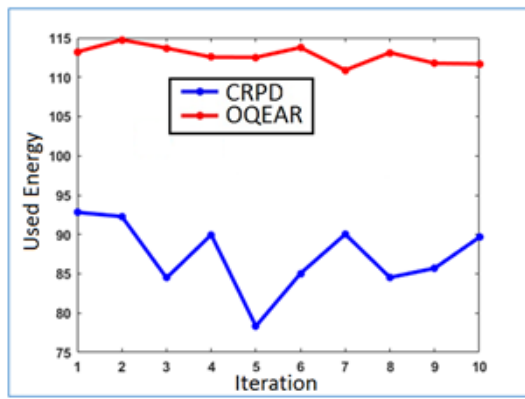
شکل ۲۴: طول عمر مفید شبکه، برای حالتی که ۲۰۰ گره در شبکه وجود دارد، (الف) نتیجه ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم و (ب) نتیجه ۲۰۰ بار اجرای الگوریتم.



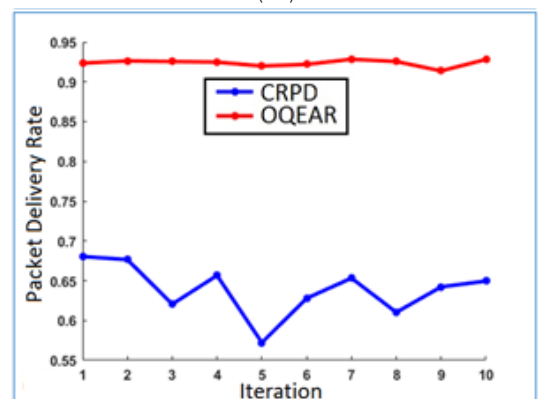
(الف)



(الف)



(ب)

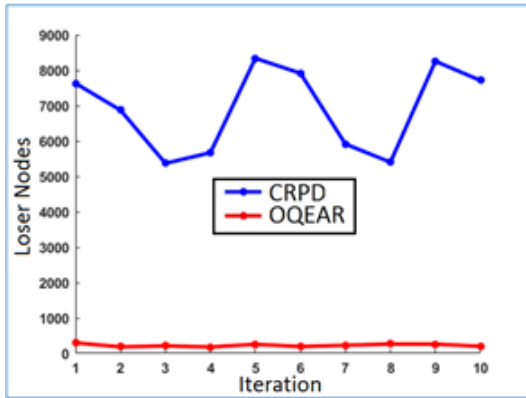


(ب)

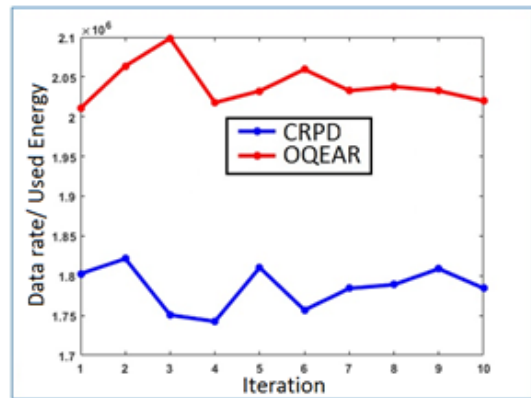
شکل ۲۷: انرژی مصرفشده در شبکه، برای حالتی که ۳۰۰ گره در شبکه وجود دارد، (الف) نتیجه ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم و (ب) نتیجه ۲۰۰ بار اجرای الگوریتم.

شکل ۲۵: نرخ انتقال داده در شبکه، برای حالتی که ۳۰۰ گره در شبکه وجود دارد، (الف) نتیجه ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم و (ب) نتیجه ۲۰۰ بار اجرای الگوریتم.

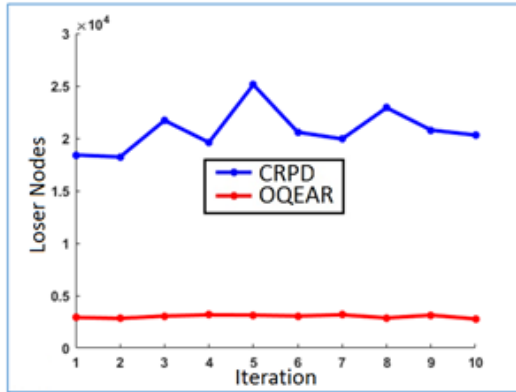




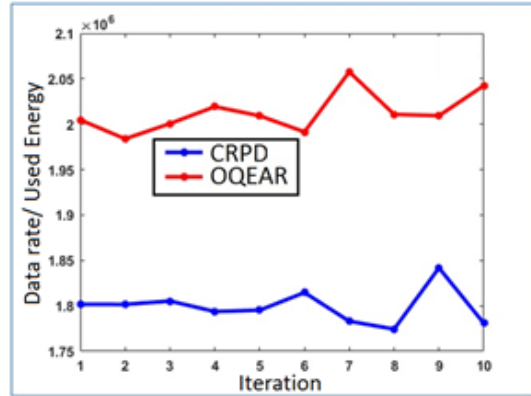
(الف)



(الف)



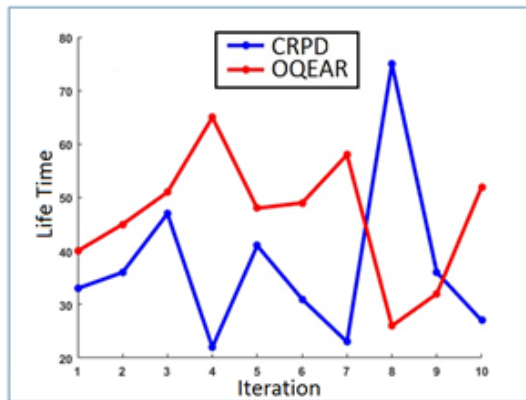
(ب)



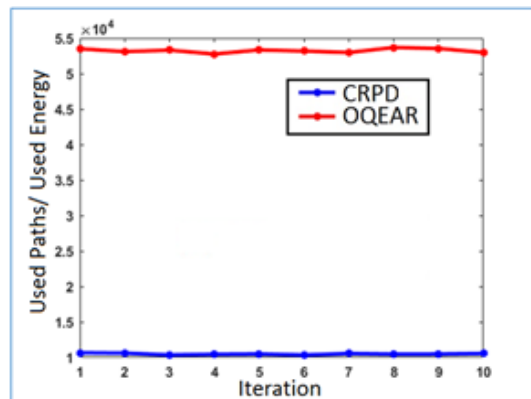
(ب)

شکل ۲۸: نسبت داده‌های ارسال شده در شبکه به انرژی مصرفی، برای حالتی که ۳۰۰ گره در شبکه وجود دارد، (الف) نتیجه ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم و (ب) نتیجه ۲۰۰ بار اجرای الگوریتم.

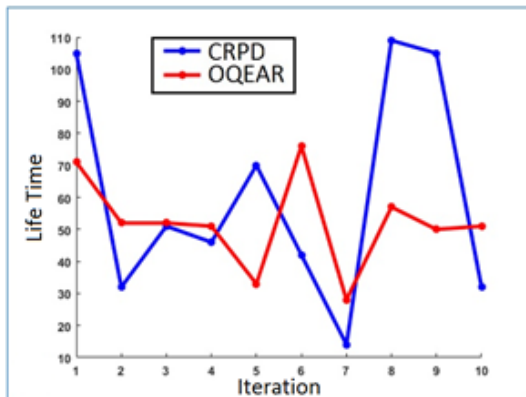
شکل ۲۹: نسبت مسیریهای طی شده برای ارسال داده به سرور به انرژی مصرفی، برای حالتی که ۳۰۰ گره در شبکه وجود دارد، (الف) نتیجه ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم و (ب) نتیجه ۲۰۰ بار اجرای الگوریتم.



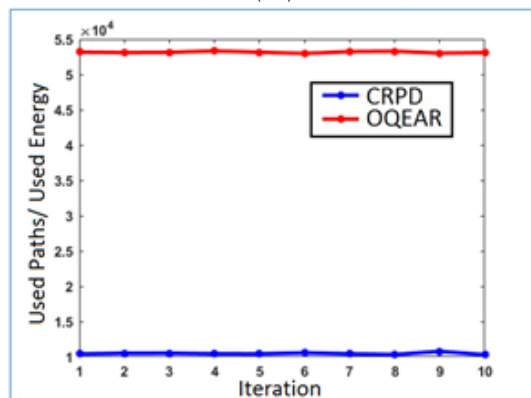
(الف)



(الف)



(ب)



(ب)

شکل ۳۰: طول عمر شبکه برای حالتی که ۳۰۰ گره در شبکه وجود دارد، (الف) نتیجه ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم و (ب) نتیجه ۲۰۰ بار اجرای الگوریتم.

شکل ۳۱: نسبت مسیریهای طی شده برای ارسال داده به سرور به انرژی مصرفی، برای حالتی که ۳۰۰ گره در شبکه وجود دارد، (الف) نتیجه ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم و (ب) نتیجه ۲۰۰ بار اجرای الگوریتم.

در شکل ۳۱-ب کمی کاهش داشته است، که این موضوع به دلیل تعداد بیشتر ارسال در ۲۰۰ بار اجرا می‌باشد.

در بسیاری از تحقیقات، طول عمر شبکه را به صورت میانگین مدت زمان مرگ همه گره‌های شبکه اندازه‌گیری می‌کنند و تابعی از شرایط و منابع مختلف شبکه است. بررسی جامع این پارامتر را به یک تحقیق مستقل دیگر موکول می‌گردد.

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک الگوریتم مسیریابی تشکیل دهنده درخت جدید به نام CMST ارائه گردید. این الگوریتم جدید می‌تواند مسیر درختی بهینه بین گره مرکزی مه و سایر گره‌های شبکه را با بیشترین تعداد گره پوشش داده شده و کوتاهترین مسیرها را تشکیل دهد. همچنین یک روش جدید تخصیص بهینه پهنای باند بهینه به مسیرها به نام OQEAR ارائه گردید. این روش جدید پارامترهای QoS را حمایت می‌کند زیرا پهنای باند شبکه را به صورت بهینه و عادلانه به گره‌های دور و نزدیک تخصیص می‌دهد و همچنین تاخیر در انتقال داده را از طریق انتخاب کوتاهترین مسیرها کمینه می‌کند. روش جدید به ازای مصرف انرژی کمتر، می‌تواند داده بیشتری را با سرعت بیشتر در طول مسیرهای کوتاهتر منتقل کند. لذا این روش یک روش آگاه از انرژی نیز محسوب می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد این روش در مقایسه با تعدادی از روش‌های مهم موجود، کارایی بیشتری دارد.

## مراجع

- [1] M. Tanveer and A. Badshah, "CMAF-IIoT: Chaotic map-based authentication framework for industrial Internet of things," *Internet of Things*, vol. 23, Article ID: 100902, Oct. 2023.
- [2] Q. Qi, Z. Xu, and P. Rani, "Big data analytics challenges to implementing the intelligent industrial Internet of things (IIoT) systems in sustainable manufacturing operations," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 190, Article ID: 122401, May 2023.
- [3] V. R. Kebbade, "Industrial internet of things (IIoT) forensics: The forgotten concept in the race towards industry 4.0," *Forensic Science International*, vol. 5, Article ID: 100257, Jul. 2022.
- [4] H. K. Apat and R. N. Sahoo, "A comprehensive review on Internet of Things application placement in Fog computing environment," *Internet of Things*, vol. 23, Article ID: 100866, Oct. 2023.
- [5] F. Safara, A. Soury, T. Baker, I. A. Ridhawi, and M. Aloqaily, "PriNergy: A priority-based energy-efficient routing method for IoT systems," *The Journal of Supercomputing*, vol. 76, no. 11, pp. 8609-8626, Nov. 2020.
- [6] J. Lin, W. Yu, N. Zhang, X. Yang, H. Zhang, and W. Zhao, "A survey on internet of things: Architecture, enabling technologies, security and privacy, and applications," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 4, no. 5, pp. 1125-1142, Mar. 2017.
- [7] T. D. Nguyen, J. Y. Khan, and D. T. Ngo, "An effective energy-harvesting-aware routing algorithm for WSN-based IoT applications," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Communications*, 6 pp., Paris, France, 21-25 May 2017.
- [8] P. Maheshwari, A. K. Sharma, and K. Verma, "Energy efficient cluster based routing protocol for WSN using butterfly optimization algorithm and ant colony optimization," *Ad Hoc Networks*, vol. 110, Article ID: 102317, 2021.
- [9] P. G. V. Naranjo, Z. Pooranian, M. Shojafar, M. Conti, and R. Buyya, "FOCAN: A fog-supported smart city network architecture for management of applications in the Internet of everything environments," *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 132, pp. 274-283, Oct. 2019.
- [10] W. B. Heinzelman, *Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Networks*, PhD. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [11] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor

است. اما در مقابل داده‌های گم‌شده در الگوریتم CPRD در همین اجرا حدود ۷ برابر الگوریتم OQEAR است.

همین موضوع خود سبب نرخ انتقال کم‌تر و در نتیجه مصرف انرژی کم‌تر در شبکه می‌شود، که عامل انرژی نیز تأثیر مستقیم بر طول عمر شبکه دارد. اما این نتیجه حاصل می‌شود که با افزایش اندازه شبکه از ۱۰۰ گره به ۲۰۰ گره، الگوریتم CRPD هم دچار مرگ گسترده گره‌ها می‌شود. اما روش CRPD در مقایسه با روش OQEAR همچنان از نرخ انتقال داده پایین، مصرف زیاد انرژی و مسیرهای طولانی رنج می‌برد.

## ۷-۶ تکرارهای ۳۰۰ گره‌ای

در ادامه مقایسه دو الگوریتم را برای حالتی که اندازه شبکه خیلی بزرگ است و شبکه ۳۰۰ گره دارد، بررسی می‌کنیم. مطابق شکل ۲۵ در این حالت نیز الگوریتم جدید نرخ انتقال بیشتری را دارا است. نرخ انتقال بیشتر یعنی از منابع موجود شبکه به خوبی استفاده شده، پوشش شبکه به خوبی حفظ شده و پهنای باند کافی در اختیار گره‌ها بوده است. همانطور که مشاهده می‌شود نرخ انتقال برای الگوریتم OQEAR تغییرات منظمی دارد، درحالی‌که برای الگوریتم CRPD نرخ انتقال با پرش‌ها و نامنظمی بیشتری همراه است. این موضوع نشان می‌دهد که نرخ انتقال در الگوریتم CRPD به توپولوژی و موقعیت قرار گرفتن گره‌ها وابسته‌تر است و با تغییر موقعیت گره‌ها در شبکه عملکرد الگوریتم تأثیر بیشتری می‌پذیرد.

در شکل ۲۶ نیز متوسط طول مسیرهای ایجاد شده برای تمام گره‌ها تا رسیدن به مه مرکزی نشان داده شده است. نتایج این مقایسه نیز نشان می‌دهد که برای هر دو الگوریتم طول مسیرهای تشکیل شده بستگی زیادی به موقعیت گره‌ها در شبکه دارد و با تغییر آن نیز نتایج مختلف حاصل می‌شود. اما در اکثر موارد الگوریتم OQEAR مسیرهایی با طول کوتاه‌تر ایجاد کرده است.

از نظر انرژی مصرفی نیز برای حالتی که شبکه ۳۰۰ گره حسگر دارد، الگوریتم OQEAR مصرف انرژی بیشتری بعد از ۱۰۰ بار و ۲۰۰ بار اجرا داشته است. اما از مقایسه نمودارهای شکل ۲۵ و شکل ۲۷ می‌توان دریافت که دلیل مصرف انرژی بیشتر، نرخ انتقال بیشتر در شبکه بوده است. همچنین مصرف انرژی در الگوریتم OQEAR آهنگ منظم‌تری نسبت به CPRD داشته است. این موضوع نشان می‌دهد که موقعیت قرار گرفتن گره‌ها در عملکرد الگوریتم CPRD تأثیرگذاری بیشتری دارد.

شکل ۲۸ نشان می‌دهد که اگرچه الگوریتم OQEAR انرژی بیشتری مصرف کرده است، اما در مقابل کارایی و نرخ انتقال بیشتری داشته است.

شکل ۲۹ نیز نسبت مسیرهای طی شده در حین ارسال داده‌ها به سرور مه، به انرژی که برای این کار مصرف شده است را نشان می‌دهد. در حالتی که شبکه ۳۰۰ گره دارد نیز الگوریتم OQEAR تعداد مسیرهای بیشتری را با صرف انرژی کم‌تری طی کرده است. دلیل بیشتر بودن مسیرهای طی شده، نرخ انتقال بیشتر در این الگوریتم است، و دلیل کم‌تر بودن انرژی مصرفی نیز انتخاب مسیرهایی با طول کوتاه‌تر در هر بار ارسال داده‌ها بوده است.

شکل ۳۰ گره‌های گم‌شده در هر دو الگوریتم را نشان می‌دهد. در حالتی که شبکه ۳۰۰ گره حسگر دارد نیز گره‌های گم‌شده الگوریتم CRPD بیشتر هستند.

شکل ۳۱ زمان مرگ اولین گره را در هر دو الگوریتم نشان می‌دهد. برای حالت شکل ۳۱-الف زمان مرگ اولین گره طول عمر مفید شبکه برای الگوریتم OQEAR بیشتر بوده است، اما با افزایش تعداد اجرا به ۲۰۰

- [30] B. Sureshand and S. C. Prasad, "An energy efficient secure routing scheme using LEACH protocol in WSN for IoT networks," *Measurement: Sensors*, vol. 30, Article ID: 100883, Dec. 2023.
- [31] A. M. K. Abdulzahra, A. Kadhum, and M. A. Qurabat, "Optimizing energy consumption in WSN-based IoT using unequal clustering and sleep scheduling methods," *Internet of Things*, vol. 22, Article ID: 100765, Jul. 2023.
- [32] M. V. Babu and C. N. S. Kumar, "AE-LEACH: An incremental clustering approach for reducing the energy consumption in WSN," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 93, Article ID: 104602, Sept. 2022.
- [33] S. Wang, J. Yu, M. Atiquzzaman, H. Chen, and L. Ni, "CRPD: a novel clustering routing protocol for dynamic wireless sensor networks," *Personal and Ubiquitous Computing*, vol. 22, pp. 545-559, 2018.
- [34] F. Y. Okay and S. Ozdemir, "Routing in fog-enabled IoT platforms: A survey and an SDN-based solution," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 6, pp. 4871-4889, Dec. 2018.
- [35] F. Bajaber and I. Awan, "Adaptive decentralized re-clustering protocol for wireless sensor networks," *Journal of Computer and System Sciences*, vol. 77, no. 2, pp. 282-292, Mar. 2011.
- [36] D. Kumar, T. C. Aseri, and R. Patel, "EEHC: Energy efficient heterogeneous clustered scheme for wireless sensor networks," *Computer Communications*, vol. 32, no. 4, pp. 662-667, Mar. 2009.
- [37] S. Lindsey, C. Raghavendra, and K. M. Sivalingham, "Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics," *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, vol. 13, no. 9, pp. 924-935, Sept. 2002.
- [38] A. A. Suwaili and O. Simeone, "Energy-efficient resource allocation for mobile edge computing-based augmented reality applications," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 3, pp. 398-401, Jun. 2017.
- [39] X. Li, et al., "Adaptive aggregation routing to reduce delay for multi-layer wireless sensor networks," *Sensors*, vol. 18, no. 4, Article ID: 1216, Apr. 2018.
- [40] A. S. M. Sanwar Hosen, et al., "A QoS-aware data collection protocol for LLNs in fog-enabled internet of things," *IEEE Trans. on Network and Service Management*, vol. 17, no. 1, pp. 430-444, Mar. 2019.
- محسن حیدریان** تحصیلات خود در مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد را به در رشته ریاضی کاربردی (گرایش کامپیوتر) در سال‌های ۱۳۷۸ و ۱۳۸۱ در دانشگاه تبریز به پایان رسانده است. در سال ۱۳۸۸ از رشته ریاضی کاربردی گرایش سیستم‌های کامپیوتری از دانشگاه تبریز فارغ التحصیل شده است و اکنون استاد دانشکده فناوری اطلاعات و مهندسی کامپیوتر در دانشگاه شهید مدنی آذربایجان می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: شبکه‌های کامپیوتری، امنیت شبکه‌های کامپیوتری، استفاده از هوش مصنوعی و سایر الگوریتم‌ها مانند بهینه‌سازی خطی، الگوریتم‌های ژنتیک و ریاضیات فازی در امنیت شبکه و مهندسی ترافیک. ایشان همچنین در فعالیت‌های صنعتی متعددی در صنایع خودروسازی، کنترل کیفی و صنایع اندازه‌گیری مشارکت و تعامل داشته و پروژه‌های صنعتی متعددی را به اتمام رسانده است.
- ساغر قربانی** فارغ‌التحصیل مقطع کارشناسی رشته فناوری اطلاعات از موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان در سال ۱۳۹۷ و فارغ‌التحصیل مقطع کارشناسی ارشد در رشته مهندسی فناوری اطلاعات از دانشگاه شهید مدنی آذربایجان در سال ۱۴۰۰ می‌باشند. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شبکه‌های کامپیوتری و مهندسی ترافیک هستند.
- networks," in *Proc. of the 33rd Annual Hawaii Int. Conf. on System Sciences*, vol. 2, 10 pp., Maui, HI, USA, 7-7 Jan. 2000.
- [12] E. N. Szykiewicz, A. Sikora, J. Kolodziej, and P. Szykiewicz, "Modelling and simulation of secure energy aware fog sensing systems," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 101, Article ID: 102011, May. 2020.
- [13] R. Oma, S. Nakamura, D. Duolikun, T. Enokido, and M. Takizawa, "An energy-efficient model for fog computing in the internet of things (IoT)," *Internet of Things*, vol. 1-2, pp. 14-26, Sept. 2018.
- [14] J. Yao and N. Ansari, "Energy-aware task allocation for mobile IoT by online reinforcement learning," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Communications*, 6 pp., Shanghai, China, 20-24 May. 2019.
- [15] Y. Zou, J. Zhu, and R. Zhang, "Exploiting network cooperation in green wireless communication," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 61, no. 3, pp. 999-1010, Mar. 2013.
- [16] A. Hazra, P. Rana, and M. Adhikari, "Fog computing for next-generation Internet of Things: Fundamental, state-of-the-art and research challenges," *Computer Science Review*, vol. 48, Article ID: 100549, May 2023.
- [17] S. Murugesan, "Harnessing green IT: Principles and practices," *IT Professional*, vol. 10, no. 1, pp. 24-33, Jan./Feb. 2008.
- [18] N. Chen, et al., "Spectral graph theory-based virtual network embedding for vehicular fog computing: A deep reinforcement learning architecture," *Knowledge-Based Systems*, vol. 257, Article ID: 109931, Dec. 2022.
- [19] R. Das and M. M. Inuwa, "A review on fog computing: Issues, characteristics, challenges and potential applications," *Telematics and Informatics Reports*, vol. 10, Article ID: 1100049, Jun. 2023.
- [20] G. Anastasi, M. Conti, M. D. Francesco, and A. Passarella, "Energy conservation in wireless sensor networks: A survey," *Ad hoc Networks*, vol. 7, no. 3, pp. 537-568, May 2009.
- [21] K. Verma and A. Kumar, "Rank based mobility-aware scheduling in Fog computing," *Informatics in Medicine Unlocked*, vol. 24, Article ID: 100619, 2021.
- [22] R. Naha and S. Garg, "Multiple linear regression-based energy-aware resource allocation in the fog computing environment," *Computer Networks*, vol. 216, Article ID: 109240, Oct. 2022.
- [23] N. Potu and S. Bhukya, "Quality-aware energy efficient scheduling model for fog computing comprised IoT network," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 97, Article ID: 107603, Jan. 2022.
- [24] M. Qin, M. Li, and R. O. Yahya, "Dynamic IoT service placement based on shared parallel architecture in fog-cloud computing," *Internet of Things*, vol. 23, Article ID: 100856, Oct. 2023.
- [25] Y. Sellami, Y. Imine, and A. Gallais, "A verifiable data integrity scheme for distributed data sharing in fog computing architecture," *Future Generation Computer Systems*, vol. 150, pp. 64-77, Jan. 2024.
- [26] H. Sabireen and V. Neelanarayanan, "A review on fog computing: architecture, fog with IoT, algorithms and research challenges," *ICT Express*, vol. 7, no. 2, pp. 162-176, Jun. 2021.
- [27] M. Abbasi, E. M. Pasand, and M. R. Khosravi, "Intelligent workload allocation in IoT-Fog-cloud architecture towards mobile edge computing," *Computer Communications*, vol. 169, pp. 71-80, Mar. 2021.
- [28] A. Ahmad, N. Javaid, M. Imran, M. Guizani, and A. A. Alhamed, "An advanced energy consumption model for terrestrial wireless sensor networks," in *Proc. Int. Wireless Communications and Mobile Computing Conf.*, pp. 790-793, Paphos, Cyprus, 5-9 Sept. 2016.
- [29] Y. Zhou, N. Wang, and W. Xiang, "Clustering hierarchy protocol in wireless sensor networks using an improved PSO algorithm," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 2241-2253, 2017.