

## افزایش توازن بار حول گره چاهک با بهبود خوشه بندی شبکه های حسگر بی سیم

شیمیا پاکدامن تیرانی<sup>۱</sup>، آوید آوخ<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، اصفهان، ایران، sh.pakdaman@sel.iaun.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار - دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، اصفهان، ایران، aavokh@pel.iaun.ac.ir

چکیده - شبکه حسگر بی سیم متشکل از تعداد زیادی گره های حسگر است که در یک محیط به طور گسترده پخش شده و به جمع آوری اطلاعات می پردازند. از جمله چالش های اساسی در این شبکه ها، کاهش تعداد ارسال ها و کاهش انرژی مصرفی می باشد. نظریه نمونه برداری فشرده راهکار نوینی است که منجر به کاهش تعداد ارسال های داده در این شبکه ها می شود. در این مقاله، با استفاده توأم از نمونه برداری فشرده پیوندی و بهبود خوشه بندی شبکه های حسگر بی سیم به استناد بر کارهای قبلی طرح بهبود یافته ای ارائه می شود. کاهش انرژی مصرفی شبکه، افزایش توازن بار حول گره چاهک و افزایش طول عمر شبکه حسگر بی سیم، از جمله اهداف این طرح به شمار می روند. لازم به ذکر است که یکی از ایده های مطرح شده به منظور افزایش طول عمر شبکه، مسئله کنترل موقعیت گره چاهک می باشد. محل این گره نقش به سزایی در کنترل توازن بار شبکه دارد. لذا، جایگاه گره چاهک را بر روی قطر اصلی شبکه تغییر داده تا بهترین مکان برای این گره از نظر میزان مصرف انرژی تعیین گردد. نتایج شبیه سازی های متنوع حاکی از آن است که طرح پیشنهادی در مقایسه با سایر روش ها عملکرد بهتری از نظر میزان مصرف انرژی دارد و در نتیجه طول عمر شبکه را افزایش می دهد.

کلید واژه - تعادل بار، خوشه بندی، شبکه های حسگر بی سیم، مصرف انرژی، نمونه برداری فشرده

### ۱- مقدمه

به مدل رادیویی مرتبه اول برای مصرف انرژی [۱]، در شبکه های حسگر بی سیم، کاهش حجم داده ارسالی در شبکه، میزان مصرف انرژی برای ارسال و دریافت پیام را نیز کاهش می دهد. در نتیجه منجر به افزایش طول عمر شبکه حسگر بی سیم می شود. لذا، در این شبکه ها بسته های مشابه گره های مختلف، می توانند مترکم شده و در نتیجه حجم داده ارسالی کاهش یابد. تراکم داده، برای رسیدن به کارایی بالاتر انرژی و بهبود انتقال داده در بسیاری از پروتکل های مسیریابی استفاده می گردد. یکی از مؤثرترین روش ها برای تراکم داده، استفاده از تئوری نمونه برداری فشرده<sup>۶</sup> است.

تئوری نمونه برداری فشرده روش جدیدی برای جمع آوری داده ها فراهم کرده و جایگزین روش نایکوئیست شده است [۲]. این تئوری ادعا می کند که یک سیگنال تنک<sup>۷</sup> را می توان با نرخ کمتر از نرخ نایکوئیست بازسازی کرد. در واقع، این تئوری، نمونه برداری و فشرده سازی را به وسیله ای اندازه گیری حداقل نمونه هایی که شامل بیشترین اطلاعات در مورد سیگنال هستند، در یک گام ترکیب

شبکه های حسگر بی سیم<sup>۱</sup> (WSNs) متشکل از تعداد زیادی گره بی سیم هستند که هر یک توانایی انجام پاره ای از محاسبات، حس کردن<sup>۲</sup> محیط پیرامون و خود سازماندهی<sup>۳</sup> را دارند. یکی از مهمترین مسائل قابل بحث در شبکه های حسگر بی سیم، چگونگی انتقال اطلاعات از گره های داخل شبکه به گره چاهک<sup>۴</sup> و انتخاب بهترین مسیر ممکن برای انتقال این اطلاعات می باشد. در حقیقت، انتخاب مسیر باید به گونه ای باشد که ضمن توازن بار روی گره های مختلف، طول عمر شبکه را حداکثر کند.

در شبکه های حسگر بی سیم، بیشترین سهم توان مصرفی یک گره متعلق به ارسال داده می باشد. در این راستا، به منظور حداکثر کردن طول عمر شبکه، با دو چالش اساسی روبرو هستیم: (۱) کاهش هزینه های مخابراتی<sup>۵</sup> (شبکه ۲) افزایش توازن بار در شبکه. با توجه

<sup>1</sup> Wireless Sensor Networks

<sup>2</sup> Sensing

<sup>3</sup> Self-organized

<sup>4</sup> Sink node

<sup>5</sup> Communication costs

<sup>6</sup> Compressive sensing

<sup>7</sup> Sparse signal

فشرده<sup>۵</sup> (CDG) را بر مبنای نمونه‌برداری فشرده برای کاهش مؤثر هزینه ارتباطات و افزایش طول عمر شبکه در شبکه‌های حسگر با مقیاس بزرگ پیشنهاد می‌کنند. آن‌ها ظرفیت شبکه را هنگامی که جمع داده با استفاده از نمونه‌برداری فشرده صورت می‌گیرد، تجزیه و تحلیل نموده و ثابت می‌کنند که ظرفیت شبکه با سطح تنگی داده حسگرها متناسب است.

این امکان وجود دارد که تنگی سیگنال‌های طبیعی تغییر کند. در ارتباط با این چالش، نویسندگان در مرجع [۶]، یک روش جمع-آوری داده وفقی با استفاده از نمونه‌برداری فشرده برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم ارائه می‌کنند. این کار به بررسی مدلی برای بازسازی نمونه‌برداری فشرده می‌پردازد و تعداد اندازه‌گیری‌ها بر طبق تغییر داده حس شده تنظیم می‌شود.

کارهای تحقیقاتی کمی شامل به‌کارگیری تئوری نمونه‌برداری فشرده و مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی در شبکه‌های حسگر بی-سیم، می‌باشند [۸] و [۱]. در مرجع [۱]، به طراحی توأم مسیریابی و تراکم داده در شبکه‌های حسگر بی‌سیم پرداخته می‌شود. نویسندگان این مقاله، یک روش مسیریابی خوشه‌بندی جمع‌آوری داده را پیشنهاد می‌کنند. هدف این روش، کاهش میزان مصرف انرژی ارسال داده می‌باشد. در این تحقیق از مدل رادیویی مرتبه اول [۱]، برای پیدا کردن تعداد بهینه خوشه‌ها استفاده می‌شود. نویسندگان مرجع [۸]، خوشه‌بندی شبکه حسگر بی‌سیم را به همراه روش نمونه‌برداری فشرده پیوندی به‌کار می‌گیرند. از آنجایی که تعداد گره‌ها در خوشه‌ها می‌تواند متوازن باشد، پس بار ترافیکی در شبکه متوازن می‌شود. این روش حجم ارسال‌ها را در مقایسه با روش خوشه‌بندی بدون استفاده از تئوری نمونه‌برداری فشرده، کاهش می‌دهد.

در این مقاله، سعی بر آن داریم که با بهره‌گیری توأم از تئوری نمونه‌برداری فشرده پیوندی<sup>۶</sup> و بهبود خوشه‌بندی شبکه‌های حسگر بی‌سیم، الگوریتم ارائه شده توسط مرجع [۸] را بهبود دهیم. در این کار مطابق مرجع [۸]، شبکه خوشه‌بندی شده و با توجه به معیار مشخصی سرخوشه‌ها تعیین می‌گردند. فاصله بین دو گره حسگر

می‌کند. با استفاده از این روش، دیگر نیازی به ذخیره‌سازی تعداد زیادی از نمونه‌ها نیست؛ چرا که بسیاری از نمونه‌ها که دارای ارزش کمی هستند، نادیده گرفته می‌شوند. این روش، منجر به کاهش حجم داده ارسالی توسط گره‌ها در شبکه حسگر بی‌سیم می‌شود. در نتیجه، انرژی کمتری توسط گره‌های شبکه مصرف می‌شود.

در روش نمونه‌برداری فشرده گره‌های دور از گره چاهک، داده اصلی را بدون استفاده از نمونه‌برداری فشرده ارسال می‌کنند؛ اما، گره‌های نزدیک به گره چاهک، داده را با استفاده از روش نمونه-برداری فشرده به این گره ارسال می‌کنند.

آنچه واضح است گره‌هایی که نزدیک به گره چاهک هستند، نسبت به گره‌های دیگر وظایف ارسال بیشتری را انجام می‌دهند. بنابراین، این گره‌ها توان بیشتری را مصرف می‌کنند و انرژی آن‌ها سریع‌تر از بین می‌رود. در این راستا، استفاده از روش خوشه‌بندی<sup>۱</sup> برای مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم ضمن برخورداری از مزایایی همچون تحمل عیب<sup>۲</sup>، توازن بار ترافیکی، تثبیت توپولوژی شبکه، کاهش نرخ مصرف انرژی شبکه را نیز به دنبال خواهد داشت. لذا، با استفاده از تئوری نمونه‌برداری فشرده به همراه این روش، به شکل کارآمدی به هدف افزایش طول عمر شبکه دست خواهیم یافت. در روش خوشه‌بندی، گره‌های داخل شبکه به خوشه‌هایی تفکیک شده که در هر کدام از آن‌ها یک گره به عنوان سرخوشه<sup>۳</sup> (CH) انتخاب می‌شود. در هر خوشه، گره‌ها داده‌هایشان را به سرخوشه ارسال می‌کنند. در نهایت سرخوشه‌ها داده خود را با استفاده از روش نمونه‌برداری فشرده به گره چاهک می‌فرستند. حال، در ادامه به مرور کارهای مرتبط پیشین پرداخته می‌شود.

در سال‌های اخیر، روش‌های تجمیع داده مختلفی بر مبنای نمونه-برداری فشرده ارائه شده است که با کاهش حجم داده‌های ارسالی، سعی در افزایش طول عمر شبکه داشته‌اند [۳]، [۴]، [۵]، [۶]، [۷]. در مرجع [۳]، جمع‌آوری داده با بهره‌گیری از نمونه‌برداری فشرده برای دست‌یابی به فشرده‌سازی داده‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم تک‌پرشی<sup>۴</sup> پیشنهاد می‌شود. در [۴]، Luo و همکارانش، تجمیع داده

<sup>5</sup> Compressive Data Gathering

<sup>6</sup> Hybrid compressive sensing

<sup>1</sup> Clustering

<sup>2</sup> Fault tolerance

<sup>3</sup> Cluster head

<sup>4</sup> Single-hop

## ۲-۱- مدل شبکه

در این مقاله، شبکه حسگر بی سیمی مشتمل بر  $N$  گره حسگر و یک گره چاهک در نظر گرفته می شود.  $N$  گره حسگر به صورت تصادفی با توزیع یکنواخت در شبکه توزیع می شوند. شبکه مفروض توسط یک گراف پیوسته بدون جهت  $G(V, E)$  مدل می شود که مجموعه رئوس  $V$  شامل  $N$  گره حسگر و یک گره چاهک  $v_0$  می باشد. مجموعه یال های  $E$  نشان دهنده پیوندهای دوطرفه بی سیم بین گره ها می باشد. وجود پیوند  $(i, j)$  بین دو گره  $i \in V$  و  $j \in V$  به این معنی است که این دو گره در برد مخابراتی یکدیگر قرار دارند و می توانند به طور مستقیم با هم در ارتباط باشند. گره چاهک  $v_0$  وظیفه جمع آوری داده ها را در شبکه برعهده دارد. به دلیل استفاده از کدهای متعامد در ارسال داده ها، تداخلی<sup>۱</sup> در شبکه صورت نمی گیرد؛ بنابراین، فرض بر آن است که هیچ بسته ای در شبکه گم نخواهد شد.

## ۲-۲- معیارهای بررسی عملکرد شبکه

به منظور تحلیل و ارزیابی عملکرد شبکه، معیارهای متعددی همچون، مصرف انرژی، طول عمر شبکه و واریانس بار به کار برده می شود که به صورت زیر تعریف می شوند.

### • مصرف انرژی

از آنجایی که تمامی گره های حسگر، محاسبات ساده یکسانی را در طول فرآیند جمع آوری داده با استفاده از نمونه برداری فشرده انجام می دهند، از مصرف انرژی پردازش داده صرف نظر می گردد. در این مقاله، از مدل مصرف انرژی رادیویی مرتبه اول به صورت زیر، استفاده می شود [۱۰].

$$E_{Tx}(L, d) = E_{elec} \times L + \delta_{amp} \times L \times d^2, \quad (1)$$

$$E_{Rx}(L) = E_{elec} \times L. \quad (2)$$

که  $E_{Tx}(L, d)$  و  $E_{Rx}(L)$  به ترتیب بیانگر انرژی مصرفی برای ارسال و دریافت یک بسته داده  $L$  بیتی بر روی مسیری به فاصله  $d$  می باشند. همچنین،  $E_{elec}$  انرژی مصرفی برای دریافت یا ارسال

به صورت تعداد پرش های کوتاه ترین مسیر بین آن ها تعریف می شود. گره هایی که فاصله آن ها تا گره چاهک کمتر از فاصله آن ها تا سرخوشه مربوطه می باشد، داده هایشان را از طریق هیچ سرخوشه ای به گره چاهک انتقال نمی دهند. بلکه داده را از طریق کوتاه ترین مسیر به این گره می رسانند. همین امر نیز، منجر به کاهش تعداد ارسال های شبکه حسگر بی سیم می شود. مسلماً با توجه به مدل رادیویی مرتبه اول برای مصرف انرژی [۱]، این کاهش حجم داده ارسالی منجر به کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه می شود. در مقاله نویسندگان مرجع [۸]، به مسئله میزان انرژی مصرفی و واریانس بار پرداخته نشده است. لذا، از مدل رادیویی مرتبه اول استفاده کرده و به شبیه سازی های مربوط به انرژی مصرفی و طول عمر شبکه خواهیم پرداخت. همچنین با توجه به نمودارهای به دست آمده، به مقایسه کار خود و محققان مرجع [۸] می پردازیم. جایگاه گره چاهک را نیز در شبکه تغییر می دهیم. چرا که محل این گره نقش به سزایی در کنترل توازن بار دارد. اهمیت این موضوع تا حدی است که امروزه از گره های چاهک متحرک در شبکه های حسگر بی سیم استفاده می شود [۹]. با انتقال این گره از مبدأ مختصات (گوشه شبکه حسگر) به مرکز شبکه، تعداد ارسال ها به طور چشمگیری کاهش خواهد داشت و منجر به کاهش میزان انرژی مصرفی می شود. این مسئله به وضوح در شبیه سازی های انجام شده قابل مشاهده است.

در ادامه، پس از ارائه مدل شبکه و مفروضات در بخش ۲، نظریه نمونه برداری فشرده در بخش ۳ تشریح خواهد شد. در بخش ۴، به ذکر جزئیات طرح پیشنهادی این مقاله خواهیم پرداخت. به منظور ارزیابی طرح ارائه شده، در بخش ۵، نتایج شبیه سازی و مقایسه آن با سایر روش ها مورد بررسی قرار می گیرند. در بخش ۶، به جمع بندی و نتیجه گیری کلی از بحث خواهیم پرداخت.

## ۲- مدل شبکه و مفروضات

در این بخش، مفروضاتی در رابطه با مدل شبکه بیان می شود. سپس، معیارهای بررسی عملکرد شبکه مطرح خواهد شد.

<sup>۱</sup> Interference

حسگر بی سیم تنک نیستند، اما یک نمایش تنک بر اساس برخی از پایه های فشرده سازی  $\Psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N]$  به صورت  $\underline{X} = \underline{\Psi}\underline{\alpha}$  دارند. در این رابطه،  $\psi_i$  ها بردارهای ستونی ماتریس  $\underline{\Psi}$  و  $\underline{\alpha} = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N]^T$  می باشد که  $\underline{X}$  ها نمونه های بردار  $\underline{\alpha}$  را نمایش می دهند. اگر حداکثر  $k$  ( $k \ll N$ ) درایه غیر صفر در بردار  $\underline{\alpha}$  وجود داشته باشد، بردار  $\underline{X}$  در حوزه  $\underline{\Psi}$  اصطلاحاً  $k$ -تنک نامیده می شود. اگر  $k$  کوچک باشد، به جای ارسال  $N$  داده به گره چاهک، می توان تعداد کوچکی از تصاویر<sup>۲</sup> بردار  $\underline{X}$  را به گره چاهک ارسال کرد. این تصاویر به صورت  $\underline{Y} = \underline{\Phi}\underline{X}$  می باشند که  $\underline{\Phi}$  یک ماتریس تصادفی  $M \times N$  ( $M \ll N$ ) برداری از  $M$  تصویر می باشد. نهایتاً در گره چاهک، بعد از جمع آوری  $\underline{Y}$ ، بردار داده اصلی  $\underline{X}$  به وسیله الگوریتم های مشخصی بازیابی می شود [۲]، [۱۱]. حال، در ادامه مسئله به کارگیری نمونه برداری فشرده پیوندی در مسیریابی مبتنی بر خوشه بندی را توضیح می دهیم.

فرض کنید شبکه حسگر بی سیم خوشه بندی شده و هر خوشه نیز دارای یک سرخوشه می باشد. گره های حسگر یک خوشه، داده های خود را از طریق کوتاه ترین مسیر به سرخوشه ارسال می کنند. لازم به ذکر است که در روش نمونه برداری فشرده پیوندی با ساختار خوشه بندی، گره های حسگر برای ارسال داده به سرخوشه ها از تئوری نمونه برداری فشرده استفاده نمی کنند. حال به یک درخت مسیریابی که سرخوشه ها و گره چاهک را شامل شود، نیازمندیم. در واقع این درخت، داده ها را از کلیه سرخوشه ها جمع آوری کرده و به دست گره چاهک می رساند. در اینجا مطابق مرجع [۸] از درخت پوشا با حداقل وزن<sup>۳</sup> (MST) استفاده می شود. این درخت به گونه ای است که کمترین تعداد پرشها<sup>۴</sup> را شامل می شود. لذا، از تعداد ارسال های شبکه کاسته خواهد شد. شایان ذکر است که در روش نمونه برداری فشرده پیوندی، تصاویر داده تولید شده در هر سرخوشه ای از طریق درخت مسیریابی فوق الذکر در  $M$  دور به گره چاهک ارسال می شوند. در هر ارسال، تصویر هر سرخوشه به سرخوشه همسایه آن از طریق تعدادی از گره های واسطه در طول

یک پیام تک بیستی توسط مدارات الکتریکی و  $\delta_{amp}$  انرژی مصرفی تقویت کننده انتقال را بیان می کنند.

### • طول عمر شبکه

طول عمر به معنای مدت زمانی است که یک شبکه می تواند وظایف خود را انجام دهد. در اینجا، First Node Dies (FND) به عنوان یک معیار ارزیابی عملکرد شبکه برای محاسبه طول عمر شبکه استفاده می شود. این معیار به صورت تعداد دورهایی که همه گره های حسگر داده هایشان را به گره چاهک ارسال می کنند تا زمانی که اولین گره در شبکه، انرژی خود را به طور کامل از دست بدهد، تعریف می شود.

### • تعادل بار

$\Gamma_i$  به صورت تعداد بسته های داده ارسال شده توسط گره نام در هر دور تعریف می شود. به منظور ارزیابی تعادل بار شبکه حسگر بی سیم از پارامتر واریانس بار<sup>۱</sup> استفاده خواهیم کرد که با توجه به رابطه (۳) محاسبه می گردد.

$$S_N^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Gamma_i - \bar{\Gamma})^2 \quad (3)$$

$\bar{\Gamma}$  متوسط تعداد بسته های داده ارسال شده توسط گره های شبکه در هر دور می باشد که با استفاده از رابطه (۴) بدست می آید.

$$\bar{\Gamma} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Gamma_i \quad (4)$$

### ۳- نظریه نمونه برداری فشرده

نظریه نمونه برداری فشرده، یک رویکرد جدید فشرده سازی و دست یابی به سیگنال است که از قابلیت فشرده سازی سیگنال ها، به منظور به حداقل رساندن نمونه های مورد نیاز برای بازیابی کل سیگنال بهره برداری می کند. بردار  $\underline{X} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ ،  $k$ -تنک نامیده می شود اگر حداکثر دارای  $k$  درایه غیر صفر باشد. در این نمایش،  $[.]^T$  معرف عملگر ترانهاده می باشد. چنانچه شبکه ای مشتمل بر  $N$  گره حسگر باشد، هر درایه بردار  $\underline{X}$ ، داده مربوط به یک گره حسگر است. به طور معمول، بردارهای موجود در شبکه های

<sup>2</sup> Projections

<sup>3</sup> Minimum spanning tree

<sup>4</sup> Hop

<sup>1</sup> load variance

درخت مسیریابی به سمت گره چاهک ارسال می کند. معمولاً مسیره های چندپرسی<sup>۲</sup> متعددی بین دو سرخوشه وجود دارد. لذا، مسئله ساخت درخت مسیریابی که همه سرخوشه ها را به گره چاهک متصل کرده و شامل کمترین تعداد پیوندها باشد، NP-hard است.

طرح پیشنهادی شامل دو قسمت اساسی می باشد که عبارت اند از: (۱) انتخاب  $C$  سرخوشه از بین  $N$  گره حسگر و تقسیم شبکه به  $C$  خوشه. (۲) ساخت درخت مسیریابی که همه سرخوشه ها را به گره چاهک متصل می کند.

نسبت فشردده سازی<sup>۳</sup> را به صورت  $(\rho = \frac{N}{M})$  تعریف می کنیم.  $N$ ،  $C$ ،  $\rho$  و مختصات گره چاهک به عنوان ورودی های طرح در نظر گرفته می شوند.

در ابتدا، مجموعه  $C$  سرخوشه به صورت تصادفی از بین  $N$  گره شبکه حسگر انتخاب می شوند. سپس، مراحل تشریح شده در زیر اجرا خواهند شد.

(۱) فاصله تک تک گره ها را تا  $C$  سرخوشه انتخاب شده می سنجیم. هر گره حسگر به عضویت خوشه ای که کوتاه ترین فاصله را تا سرخوشه آن دارد، در خواهد آمد.

(۲) برای هر خوشه، سرخوشه جدیدی انتخاب خواهد شد به طوری که مجموع فاصله همه گره های حسگر در این خوشه به سرخوشه جدید حداقل باشد.

(۳) دو مرحله بالا تا زمانی که دیگر تغییری در سرخوشه ها رخ ندهد، تکرار می شوند.

(۴) در این مرحله، گره چاهک را به عنوان یک سرخوشه در نظر می گیریم. فاصله تک تک گره ها را تا گره چاهک و سرخوشه مربوط به آن ها اندازه می گیریم. اگر فاصله هر گره تا گره چاهک کمتر از فاصله آن تا سرخوشه مربوطه باشد، به عضویت خوشه گره چاهک در خواهد آمد.

حال، به درخت مسیریابی که همه سرخوشه ها را به گره چاهک متصل می کند نیازمندیم که به ترتیب زیر ساخته می شود. در اینجا از درخت پوشا با حداقل وزن (MST) استفاده خواهیم کرد. گراف

درخت مسیریابی ارسال می شود. بنابراین، در هر دور، سرخوشه تصویر خودش و تصاویر دریافت کرده از سرخوشه های فرزندش را جمع آوری می کند و آن را از طریق درخت مسیریابی به گره چاهک ارسال می کند. زمانی که گره چاهک همه  $M$  دور تصاویر را از سرخوشه ها دریافت کرد، داده اصلی همه گره های حسگر بازیابی می شود.

#### ۴- بهبود خوشه بندی شبکه های حسگر بی سیم

در این بخش، الگوریتم ارائه شده در مرجع [۸] را مبنای کار خود قرار داده و طرح بهبود یافته ای پیشنهاد می کنیم. با بهبود خوشه بندی شبکه های حسگر بی سیم، سعی بر افزایش توازن بار حول گره چاهک داریم. همچنین، کاهش تعداد ارسال ها، کاهش میزان انرژی مصرفی و افزایش طول عمر شبکه های حسگر بی سیم از جمله اهداف طرح پیشنهادی می باشند. حال، به ذکر جزئیات طرح بهبود یافته می پردازیم.

#### ۴-۱- طرح بهبود یافته

در طرح بهبود یافته، مطابق مرجع [۸]، شبکه حسگر خوشه بندی شده و برای هر خوشه نیز سرخوشه ای مشخص می شود. در یک خوشه، هر گره حسگر داده خود را از طریق کوتاه ترین مسیر به سرخوشه ارسال می کند. مسیرهایی که گره های حسگر به منظور ارسال داده هایشان به سرخوشه مربوطه استفاده می کنند یک درخت کوتاه ترین مسیر<sup>۱</sup> را در هر خوشه شکل می دهد. تعداد کل ارسال های درون خوشه ای برابر با مجموع فاصله همه گره های حسگر از سرخوشه مربوط به آن ها می باشد. همچنین، فاصله بین دو گره حسگر به صورت تعداد پرش های کوتاه ترین مسیر بین آن ها تعریف می شود.

داده های جمع آوری شده از گره ها به وسیله تئوری نمونه برداری فشردده در سرخوشه ها فشردده می گردد. تصاویر داده تولید شده در هر سرخوشه ای از طریق یک درخت مسیریابی و در  $M$  دور به گره چاهک ارسال می شود. هر سرخوشه ای، تصویر داده خودش را با تصاویر دریافت کرده از سرخوشه های دیگر جمع کرده و از طریق

<sup>2</sup> Multihop

<sup>3</sup> Compressive ratio

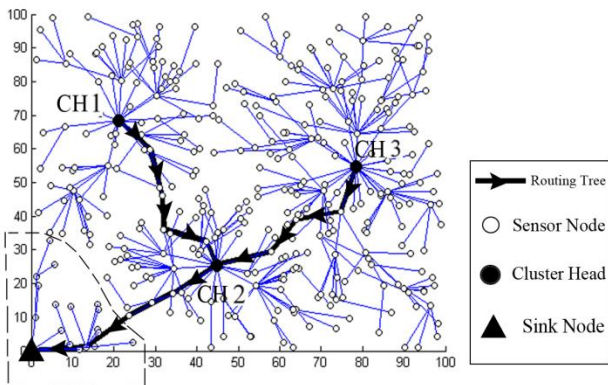
<sup>1</sup> Shortest path tree



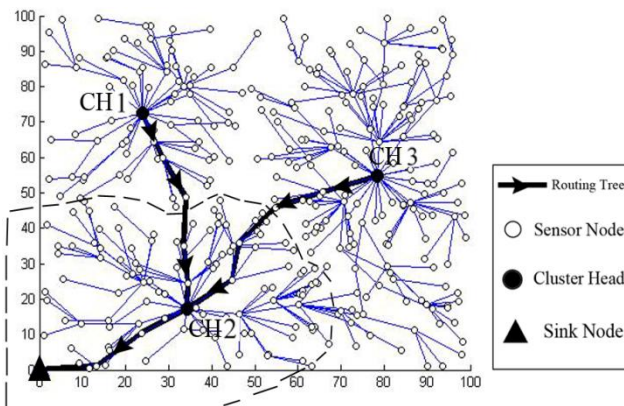
انرژی آن به سرعت تخلیه نمی شود. لذا، تعادل بار در شبکه به شکل مناسبی تحقق یافته است.

شکل (۲) را در نظر بگیرید. همان طور که در محدوده خط چین مشاهده می شود، گره هایی وجود دارند که فاصله آن ها تا گره چاهک کمتر از فاصله آن ها تا سرخوشه دو می باشد. این گره ها، داده خود را ابتدا به سرخوشه دو ارسال کرده، سپس، از طریق آن به گره چاهک انتقال می دهند. همین امر موجب شده که در مقایسه با طرح بهبود یافته، توازن بار حول گره چاهک کاهش یابد. همچنین، انرژی سرخوشه دو با سرعت بیشتری تخلیه می شود. در نتیجه، استفاده عادلانه از تمامی منابع شبکه به شکل مناسبی تحقق نیافته است.

لازم به ذکر است که اگر مکان گره چاهک در شبکه تغییر کند، تأثیرگذاری طرح بهبود یافته بر روی تعداد ارسال ها متفاوت است. اگر گره چاهک در گوشه شبکه حسگر قرار گرفته باشد، تعداد



شکل ۱: اجرای طرح بهبود یافته در شبکه ای با ۳۵۰ گره



شکل ۲: اجرای الگوریتم پیشنهادی محققان مرجع [۸] در شبکه ای با ۳۵۰ گره

$G_{CH}(V_{CH}, E_{CH})$  را در نظر بگیرید. شامل گره چاهک  $v_0$  و مجموعه  $C$  سرخوشه به دست آمده از طرح بالا می باشد. لازم به ذکر است که بین هر جفت از گره ها در  $V_{CH}$  یک یال وجود دارد. لذا،  $G_{CH}$  یک گراف کامل است. طول هر یال  $(CH_i, CH_j)$  در  $E_{CH}$  برابر با طول کوتاه ترین مسیر بین  $CH_i$  و  $CH_j$  در گراف  $G$  است. سپس، درخت پوشا با حداقل وزن گراف  $G_{CH}$  را به دست می آوریم. در این درخت مسیریابی، هر یال، کوتاه ترین مسیر متناظرش در گراف  $G$  می باشد.

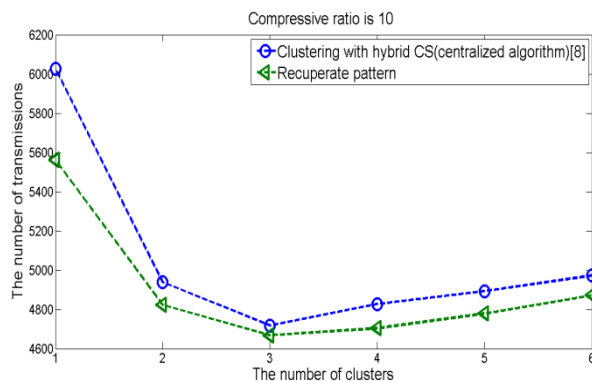
در شکل های (۱) و (۲) با ارائه شبکه ای متشکل از ۳۵۰ گره حسگر به توصیف طرح بهبود یافته و مقایسه آن با الگوریتم ارائه شده در مرجع [۸] پرداخته می شود. همان طور که در این شکل ها قابل مشاهده است، شبکه حسگر خوشه بندی شده و گره ها در درون خوشه ها داده هایشان را از طریق کوتاه ترین مسیر به سرخوشه مربوطه ارسال می کنند. در شکل (۱)، گره چاهک به عنوان یک سرخوشه در نظر گرفته شده است. گره هایی که فاصله آن ها تا گره چاهک کمتر از فاصله آن ها تا سرخوشه مربوطه می باشد ( این گره ها در شکل (۱) داخل محدوده خط چین قرار گرفته اند)، داده هایشان را مستقیماً و بدون انتقال به هیچ سرخوشه دیگری به این گره ارسال می کنند. همین امر موجب شده که تعداد ارسال های شبکه کاهش یابد. لذا، با توجه به مدل مصرف انرژی رادیویی مرتبه اول، با کاهش ارسال و دریافت داده ها، میزان انرژی مصرفی نیز کاهش یافته و منجر به افزایش طول عمر شبکه می شود.

یکی از عوامل ارزیابی میزان کارآمدی شبکه های حسگر بی سیم، توزیع عادلانه بار در شبکه است. اگر تفاوت بار بین حسگرهای شبکه زیاد باشد، انرژی برخی از حسگرها به سرعت تخلیه می شود در حالی که سایر گره های حسگر به درستی مورد بهره برداری قرار نمی گیرند. این امر حاکی از آن است که تعادل بار و استفاده عادلانه از تمامی منابع شبکه به شکل مناسبی تحقق نیافته است.

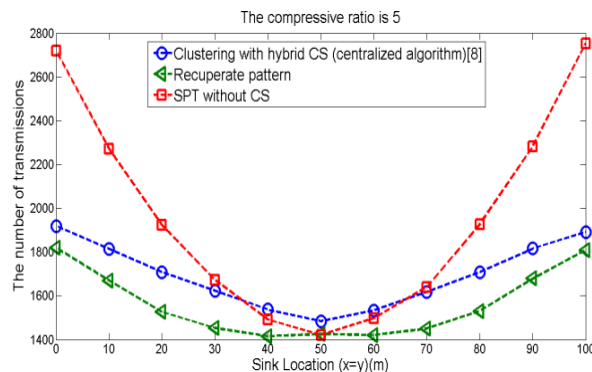
حال، با توجه به اینکه داده گره های درون محدوده خط چین شکل (۱) به سرخوشه (۲) منتقل نشده و سپس از طریق آن به گره چاهک ارسال شود، توازن بار حول گره چاهک افزایش یافته است. در واقع، از تعداد بسته های ارسالی به سرخوشه دو کاسته شده و

در سناریوی دوم، ۴۰۰ گره حسگر به صورت تصادفی در شبکه توزیع می شوند. نسبت فشرده سازی برابر با ۵ می باشد. نویسندگان مرجع [۸] انرژی مصرفی شبکه حسگر بی سیم را در کار خود لحاظ نکرده اند. لذا، بر آن شدیم تا الگوریتم ارائه شده توسط آن ها را با طرح بهبود یافته از نظر مصرف انرژی مقایسه کنیم.

شایان ذکر است که محل گره چاهک نقش به سزایی در کنترل توازن بار در شبکه دارد. مکان این گره را بر روی قطر اصلی شبکه تغییر می دهیم تا بهترین مکان برای آن از نظر میزان مصرف انرژی تعیین گردد. با توجه به شکل (۴) تعداد ارسال های شبکه برای طرح پیشنهادی کمتر از دو روش دیگر می باشد. هر چه مکان گره چاهک به مرکز شبکه نزدیک تر شود، از تعداد ارسال ها کاسته خواهد شد.



شکل ۳: مقایسه تعداد ارسال ها در دو روش طرح بهبود یافته و الگوریتم ارائه شده در مرجع [۸] با تغییر تعداد خوشه ها



شکل ۴: مقایسه تعداد ارسال ها در سه روش طرح بهبود یافته، الگوریتم ارائه شده در مرجع [۸] و SPT without CS با تغییر مکان گره چاهک

ارسال های شبکه برای طرح پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم مرجع [۸] کاهش چشم گیری دارد. اما اگر گره چاهک در مرکز شبکه واقع باشد، تعداد ارسال ها برای طرح بهبود یافته در مقایسه با الگوریتم مرجع [۸] کاهش چندانی نخواهد داشت.

## ۵- نتایج شبیه سازی

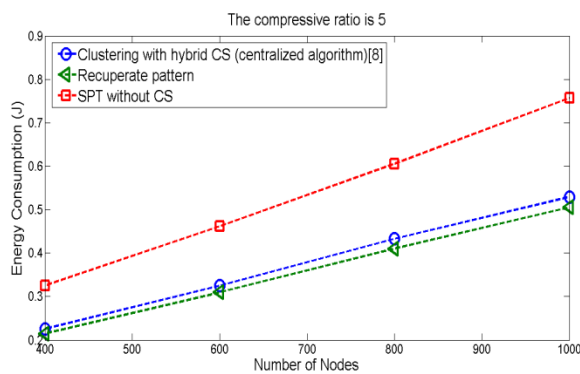
در این بخش، به منظور ارزیابی عملکرد طرح پیشنهادی، در سناریوهای مختلفی، آن را با الگوریتم ارائه شده در مرجع [۸] و روش جمع آوری داده درخت کوتاه ترین مسیر بدون استفاده از تئوری نمونه برداری فشرده<sup>۱</sup> (SPT without CS) مقایسه می کنیم. معیارهای بررسی عملکرد شبکه، مصرف انرژی، First Node Die، تعداد ارسال ها و واریانس بار می باشند. در سناریوی اول، شبکه حسگر بی سیمی با ابعاد  $20 \times 10$  واحد مربع و در سناریوهای بعدی با ابعاد  $100 \times 100 m^2$  مورد بررسی قرار می گیرد. گره ها در شبکه به صورت تصادفی با توزیع یکنواخت توزیع می شوند. برای پیاده سازی الگوریتم ها، از نرم افزار MATLAB استفاده شده است. برای محاسبه میزان انرژی مصرفی ناشی از ارسال و دریافت داده ها در شبکه از مدل رادیویی مرتبه اول استفاده می گردد. در این راستا،  $E_{elec} = 50 nJ / bit$ ،  $\epsilon_{amp} = 100 pJ / bit / m^2$  و طول بسته های داده برابر  $1024$  بیت فرض شده است [۱]. انرژی اولیه همه گره های حسگر ۲ ژول در نظر گرفته می شود.

در سناریوی اول، تعداد گره های حسگر برابر با ۱۰۰۰ و نسبت فشرده سازی برابر با ۱۰ فرض می شوند. تعداد خوشه ها از ۱ تا ۶ خوشه تغییر می کند. گره چاهک در گوشه شبکه حسگر (مختصات (۰،۰)) قرار گرفته است. شکل (۳)، تغییرات تعداد ارسال های شبکه حسگر را به ازاء تغییر تعداد خوشه ها نشان می دهد. تعداد ارسال ها در طرح پیشنهادی این مقاله کمتر از الگوریتم مرجع [۸] می باشد. با افزایش تعداد خوشه ها، تعداد ارسال ها ابتدا کاهش یافته ولی از یک حد آستانه ای، افزایش آن منجر به افزایش تعداد ارسال ها خواهد شد. اگر تعداد خوشه ها در طرح پیشنهادی برابر با ۳ باشد، کمترین تعداد ارسال ها را خواهیم داشت و در واقع ( $C=3$ ) همان تعداد خوشه بهینه است.

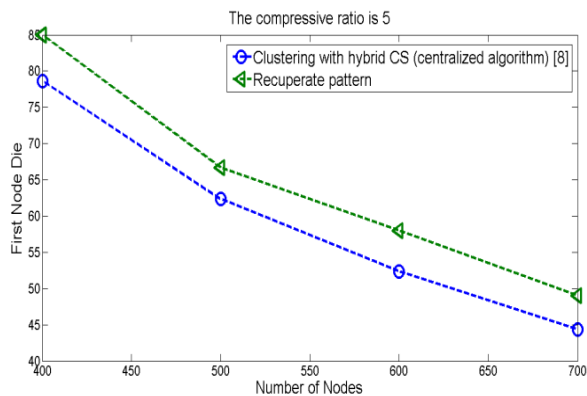
<sup>1</sup> Shortest path tree without cs

چرا که با زیاد شدن گره‌ها در شبکه، تعداد ارسال‌ها افزایش یافته و طبق مدل رادیویی مرتبه اول، مصرف انرژی نیز افزوده می‌شود. با توجه به این شکل، طرح پیشنهادی کمترین میزان انرژی مصرفی را نسبت به دو روش دیگر دارد.

شکل (۷) تغییرات First Node Die را به ازاء تغییر تعداد گره‌های حسگر نشان می‌دهد. تعداد ارسال‌ها و میزان انرژی مصرفی در طرح بهبودیافته کمتر از الگوریتم مرجع [۸] می‌باشد. لذا، First Node Die برای این طرح بیشتر از الگوریتم مرجع [۸] است. مسلماً هر چه تعداد گره‌های حسگر افزایش یابد، تعداد ارسال‌ها در شبکه زیاد شده و انرژی گره‌ها سریع‌تر به پایان می‌رسد. همین امر موجب کاهش First Node Die در شبکه حسگر می‌شود.



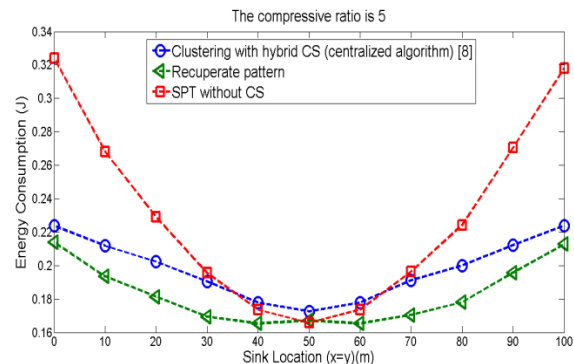
شکل ۶: مقایسه میزان مصرف انرژی در سه روش طرح بهبودیافته، الگوریتم ارائه شده در مرجع [۸] و SPT without CS با تغییر تعداد گره‌های حسگر



شکل ۷: مقایسه First Node Die در دو روش طرح بهبودیافته و الگوریتم ارائه شده در مرجع [۸] با تغییر تعداد گره‌های حسگر

شکل (۵) تغییرات انرژی مصرفی را به ازاء تغییر مکان گره چاهک نشان می‌دهد. در این شکل طرح پیشنهادی کمترین میزان انرژی مصرفی را نسبت به دو روش دیگر دارد. لازم به ذکر است که در روش جمع‌آوری داده درخت کوتاه‌ترین مسیر بدون استفاده از نمونه‌برداری فشرده، یک درخت کوتاه‌ترین مسیر، داده همه گره‌های حسگر را جمع‌آوری کرده و به دست گره چاهک می‌رساند. به دلیل اینکه در روش جمع‌آوری داده ذکر شده، از تئوری نمونه‌برداری فشرده استفاده نشده است، تعداد ارسال‌ها در شبکه بسیار زیاد می‌شود. پس منجر به افزایش انرژی مصرفی در شبکه می‌گردد. در طرح بهبودیافته، گره‌هایی که فاصله آن‌ها تا گره چاهک کمتر از فاصله آن‌ها تا سرخوشه مربوطه می‌باشد، داده خود را مستقیماً به گره چاهک ارسال می‌کنند. همین امر، موجب کاهش تعداد ارسال‌ها در شبکه می‌گردد. لذا، مصرف انرژی برای طرح پیشنهادی کمتر از الگوریتم مرجع [۸] می‌باشد. با توجه به شکل، زمانی که گره چاهک در مرکز شبکه قرار بگیرد، میزان مصرف انرژی کمتر می‌گردد. علت امر آن است که در این حالت، درخت مسیریابی که سرخوشه‌ها را به گره چاهک متصل می‌کند، کوتاه‌تر خواهد بود. این درخت تعداد پرش‌های کمتری را شامل شده و منجر به کاهش تعداد ارسال‌ها می‌شود. در نتیجه، مصرف انرژی کاهش یافته و طول عمر شبکه افزایش می‌یابد.

در سناریوی سوم، گره چاهک در گوشه شبکه حسگر (مختصات (۰,۰)) قرار گرفته است. نسبت فشرده‌سازی برابر با ۵ می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌گردد، با افزایش تعداد گره‌های حسگر، انرژی مصرفی رشد کرده است.



شکل ۵: مقایسه میزان مصرف انرژی در سه روش طرح بهبودیافته، الگوریتم ارائه شده در مرجع [۸] و SPT without CS با تغییر مکان گره چاهک



جدول (۱): مقایسه واریانس بار در دو روش طرح بهبودیافته و الگوریتم ارائه شده در مرجع [۸] با تغییر تعداد گره‌های حسگر

Data Aggregation Method	$N=400$	$N=600$	$N=800$	$N=1000$	$N=1200$
Clustering with hybrid CS (centralized algorithm) [8]	182.8	249.1	300.6	362.4	427.7
Recuperate pattern	169.7	230.0	284.6	346.4	410.8

لازم به ذکر است، هرچه مکان گره چاهک به مرکز شبکه نزدیک‌تر شود، از میزان انرژی مصرفی کاسته خواهد شد.

### مراجع

- [1] X. Wu, Y. Xiong, W. Huang, H. Shen, and M. Li, "An efficient compressive data gathering routing scheme for large-scale wireless sensor networks," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 39, no. 6, pp. 1935-1946, Aug. 2013.
- [2] M. Balouchestani, K. Raahemifar, and S. Krishnan, "Compressed sensing in wireless sensor networks: survey," *Canadian Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 1-4, Feb. 2011.
- [3] J. Haupt, W. U. Bajwa, M. Rabbat, and R. Nowak, "Compressed sensing for networked data," *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 25, no. 2, pp. 92-101, Mar 2008.
- [4] C. Luo, F. Wu, J. Sun, and C. W. Chen, "Compressive data gathering for large-scale wireless sensor networks," in *Proc. the 15th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, sep 2009, pp. 145-156.
- [5] C. Luo, F. Wu, J. Sun, and C. W. Chen, "Efficient measurement generation and pervasive sparsity for compressive data gathering," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 12, pp. 3728-3738, Dec. 2010.
- [6] J. Wang, S. Tang, B. Yin, and X.Y. Li, "Data gathering in wireless sensor networks through intelligent compressive sensing," in *Proc. 2012 IEEE INFOCOM*, Mar 2012, PP. 603-611.
- [7] X. Wu, Y. Xiong, P. Yang, S. Wan, and W. Huang, "Sparsest random scheduling for compressive data gathering in wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 10, pp. 5867-5877, Oct 2014.
- [8] R. Xie and X. Jia, "Transmission-efficient clustering method for wireless sensor networks using compressive sensing," *IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems*, vol. 25, no. 3, pp. 806-815, Mar. 2014.
- [9] M. Emre Keskin, I. Kuban Altinel, N. Aras, and C. Ersoy, "Wireless sensor network lifetime maximization by optimal sensor deployment, activity scheduling, data routing and sink mobility," *Ad Hoc Networks*, vol. 17, pp. 18-36, Jun. 2014.
- [10] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication protocol for Wireless Microsensor Networks," in *Proc. the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*, Jan. 2000.
- [11] S. Qaisar, R. Bilal, W. Iqbal, M. Naureen, and S. Lee, "Compressive sensing: from theory to applications, a survey," *Communications and Networks*, vol. 15, no. 5, pp. 443-456, Oct. 2013.

حال تعداد گره‌ها را از ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ تغییر می‌دهیم. به‌منظور ارزیابی تعادل بار طرح پیشنهادی و الگوریتم مرجع [۸]، پارامتر واریانس بار را محاسبه می‌کنیم. نتایج به‌دست آمده در جدول (۱) قابل مشاهده است. هر چه تعداد گره‌های حسگر شبکه افزایش یابد، تعداد بسته‌های داده ارسال شده نیز زیاد می‌شود. لذا، این پارامتر روند صعودی خواهد داشت. با توجه به جدول (۱)، واریانس بار برای طرح بهبودیافته به ازاء همه مقادیر  $N$ ، کمتر از الگوریتم دیگر می‌باشد. لذا، این طرح وضعیت بهتری از نظر تعادل بار نسبت به الگوریتم مرجع [۸] دارد.

### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، سعی بر آن شد که با استفاده توأم از نظریه نمونه‌برداری فشرده پیوندی و بهبود خوشه‌بندی شبکه حسگر بی‌سیم، میزان مصرف انرژی و تعداد ارسال‌ها در شبکه کاهش و توازن بار حول گره چاهک افزایش یابد. برای تحقق این اهداف، به استناد بر کارهای قبلی طرح بهبودیافته‌ای ارائه شد که در آن، شبکه حسگر خوشه‌بندی شده و گره‌های حسگر از طریق کوتاه‌ترین مسیر داده خود را به سرخوشه مربوطه ارسال می‌کنند. منتها، گره‌هایی که فاصله آن‌ها تا گره چاهک کمتر از فاصله آن‌ها تا سرخوشه مربوطه می‌باشد، داده خود را مستقیماً به گره چاهک ارسال می‌کنند. در نهایت داده سرخوشه‌ها از طریق یک مسیر یابی که همه سرخوشه‌ها و گره چاهک را پوشش می‌دهد، به این گره ارسال می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌های متنوع انجام شده حاکی از آن است که طرح پیشنهادی در مقایسه با روش خوشه‌بندی با نمونه‌برداری فشرده پیوندی و روش جمع‌آوری داده درخت کوتاه‌ترین مسیر بدون استفاده از تئوری نمونه‌برداری فشرده (SPT without CS)، انرژی مصرفی شبکه را کاهش می‌دهد. همچنین، تعداد ارسال‌های شبکه برای طرح پیشنهادی کمتر از روش خوشه‌بندی با نمونه‌برداری فشرده پیوندی می‌باشد.



چهارمین کنفرانس ملی ایده های نو در مهندسی برق  
۲۰ و ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)



چهارمین کنفرانس ملی ایده های نو در مهندسی برق

۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)





چهارمین کنفرانس ملی ایده های نو در مهندسی برق  
۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

