

الگوریتم WCDG: یک روش جدید برای کاهش مصرف انرژی، افزایش تعادل بار بین گره‌ها و طول عمر در شبکه‌های حسگر بی‌سیم

سمانه عباسی دره‌ساری و جمشید ابویی

سیگنال‌ها به صورت ذاتی نیز تنک نباشند، می‌توان پایه‌ای برای آنها یافت که ضرایب سیگنال در آن پایه، تنک باشند. در این راستا یکی از روش‌های کاهش حجم داده ارسالی و بهبود مصرف انرژی، نظریه نمونه‌برداری فشرده^۶ (CS) است که برای جمع‌آوری و بازسازی سیگنال‌های تنک در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با مقیاس بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳] و [۴]. در سال‌های اخیر، روش‌های تجمیع داده مختلفی بر مبنای نمونه‌برداری فشرده ارائه شده که با کاهش حجم داده‌های ارسالی، سعی در افزایش طول عمر شبکه داشته‌اند [۵] تا [۱۰]. در [۵] جمع‌آوری داده با بهره‌گیری از نمونه‌برداری فشرده برای دست‌یابی به فشرده‌سازی داده‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم تک‌پرشی^۷ پیشنهاد شده است. در [۶] Luo و همکارانش، تجمیع داده فشرده (CDG) را بر مبنای نمونه‌برداری فشرده برای کاهش مؤثر هزینه ارتباطات و افزایش طول عمر شبکه در شبکه‌های حسگر با مقیاس بزرگ پیشنهاد کردند. آنها ظرفیت شبکه را هنگامی که تجمیع داده با استفاده از نمونه‌برداری فشرده صورت می‌گیرد، تجزیه و تحلیل نموده و ثابت کردند که ظرفیت شبکه با سطح تنکی داده حسگرها متناسب است. در این روش، تنها زمانی که تعداد نمونه‌های اندازه‌گیری مورد نیاز به اندازه کافی کوچک باشد، تعداد کل انتقال‌ها کاهش می‌یابد. با این حال با افزایش تعداد نمونه‌های اندازه‌گیری، تعداد انتقال‌های شبکه از حالتی که از نمونه‌برداری فشرده استفاده نشده است، بیشتر می‌شود. در [۷] نیز نویسندگان یک روش تجمیع داده درون- شبکه‌ای^۹ را پیشنهاد می‌کنند که در آن از نمونه‌برداری فشرده برای بازیابی داده در گره چاهک^{۱۰} استفاده می‌گردد. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که روش تجمیع داده به ساختار شبکه بستگی دارد در حالی که طراحی ماتریس فشرده‌سازی به نوع داده وابسته است. در نتیجه، این روش نمی‌تواند به طور پویا ویژگی‌های همبستگی مکانی و زمانی شبکه را دنبال کند. با معرفی روش تجمیع داده Hybrid-CS در [۸]، مسئله دست‌یابی به گذردهی^{۱۱} بالا با استفاده از نمونه‌برداری فشرده بررسی شده است. نویسندگان این مقاله نشان دادند که اگرچه بهره‌گیری از نمونه‌برداری فشرده ساده ممکن است بهبود چشمگیری در میزان گذردهی حاصل نکند اما روش Hybrid-CS می‌تواند گذردهی بالایی را به ارمغان آورد. در [۱۱]، نمونه‌برداری فشرده برای تجمیع داده‌های درون- شبکه‌ای به عنوان یک روش فشرده‌سازی غیر متمرکز در نظر گرفته می‌شود. مرجع [۱۲] به مسئله جمع‌آوری داده در شبکه‌های حسگر

چکیده: امروزه شبکه‌های حسگر بی‌سیم به طور گسترده در سیستم‌های نظارتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. عمده‌ترین چالش در طراحی این شبکه‌ها، به حداقل رساندن هزینه انتقال داده است. تجمیع داده با استفاده از نظریه نمونه‌برداری فشرده، روشی مؤثر برای کاهش هزینه ارتباطات در گره چاهک می‌باشد. روش‌های تجمیع داده موجود که بر مبنای نمونه‌برداری فشرده عمل می‌کنند، برای هر نمونه اندازه‌گیری نیاز به شرکت تعداد زیادی از گره‌های حسگر دارند که منجر به ناکارآمدی در مصرف انرژی می‌شود. به منظور رفع این مشکل، در این مقاله از اندازه‌گیری‌های تصادفی تنک استفاده می‌گردد. از طرفی، تشکیل درخت‌های مسیریابی با هزینه کمتر و توزیع عادلانه بار در سطح شبکه، میزان مصرف انرژی را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهند. در این راستا الگوریتم جدیدی با عنوان WCDG ارائه می‌شود که با ایجاد درخت‌های مسیریابی وزن‌دار و بهره‌گیری توأم از نمونه‌برداری فشرده، داده‌های گره‌های هر مسیر را تجمیع و برای گره چاهک ارسال می‌کند. در الگوریتم WCDG با در نظر گرفتن قابلیت کنترل توان در گره‌های حسگر، مسیرهای کارآمدی انتخاب می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی‌ها حاکی از آن است که روش پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌ها به طور قابل توجهی عملکرد بهتری از نظر میزان مصرف انرژی و تعادل بار در شبکه دارد.

کلیدواژه: شبکه‌های حسگر بی‌سیم، نمونه‌برداری فشرده، اندازه‌گیری تصادفی تنک، تجمیع داده، درخت‌های مسیریابی وزن‌دار.

۱- مقدمه

شبکه‌های حسگر بی‌سیم (WSNs)^۱ متشکل از تعداد زیادی گره بی‌سیم مستقل هستند که هر یک توانایی انجام پاره‌ای از محاسبات، حس کردن^۲ محیط پیرامون و خودراهبری^۳ را دارند. یکی از مسایل چالش برانگیز در این شبکه‌ها، محدودیت انرژی و طول عمر^۴ گره‌های شبکه است [۱] و [۲]. بر این اساس، هر گره باید تا حد امکان از انرژی به شکل بهینه‌ای استفاده کند تا بتواند طول عمر شبکه را افزایش دهد. از آنجایی که داده گره‌های مختلف از همبستگی مکانی بالایی برخوردار می‌باشند، سیگنال‌های آنها تنک^۵ خواهند بود، به این معنی که تعداد کمی از نمونه‌های آنها غیر صفر و بقیه نمونه‌ها صفر هستند. در صورتی که این

این مقاله در تاریخ ۱۷ دی ماه ۱۳۹۳ دریافت و در تاریخ ۶ تیر ماه ۱۳۹۴ بازنگری شد.

سمانه عباسی دره‌ساری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه یزد، یزد، (email: samaneh_abbasi_d@stu.yazd.ac.ir)

جمشید ابویی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه یزد، یزد، (email: abouei@yazd.ac.ir)

6. Compressive Sensing
7. Single-Hop
8. Compressive Data Gathering
9. In-Network
10. Sink Node
11. Throughput

1. Wireless Sensor Networks
2. Sensing
3. Self-Organized
4. Life Time
5. Sparse

از CDG و ماتریس نمونه‌برداری تنک ارائه می‌شود. با توجه به توزیع گره‌ها به صورت تصادفی در سطح شبکه، طبیعی است که فاصله گره‌ها با یکدیگر متفاوت باشد و این در حالی است که در الگوریتم MSTP [۱۹] این نکته در نظر گرفته نمی‌شود. در این مقاله، برای مدل‌کردن شبکه حسگر بی‌سیم از گراف وزن‌دار استفاده می‌گردد، به طوری که معیار مورد نظر برای تشکیل هر درخت، فاصله اقلیدسی بین گره‌های حسگر است. برای بهبود مصرف انرژی در شبکه حسگر بی‌سیم، با استفاده از روش‌های یافتن کوتاه‌ترین مسیر در گراف وزن‌دار، درخت‌های وزن‌داری با حداقل هزینه تشکیل می‌شوند. پس از آن داده‌ها با استفاده از نمونه‌برداری فشرده ارسال می‌گردند. در این مقاله با در نظر گرفتن قابلیت کنترل توان در گره‌های حسگر، هر گره فرستنده، سطح توان خود را بر اساس فاصله اقلیدسی تا گره مقصد تنظیم می‌کند و در نتیجه از اتلاف بیشتر انرژی در شبکه جلوگیری می‌شود.

در ادامه، پس از تشریح مدل شبکه و مدل مصرف انرژی در بخش ۲، خلاصه‌ای از نظریه نمونه‌برداری فشرده و روش‌های تجمیع داده‌ای که از این نظریه بهره می‌گیرند، در بخش ۳ ارائه خواهد شد. در بخش ۴، الگوریتم پیشنهادی WCDG به تفصیل معرفی می‌شود. به منظور ارزیابی الگوریتم ارائه‌شده، در بخش ۵ نتایج شبیه‌سازی و مقایسه آن با سایر روش‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند. در پایان در بخش ۶ به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری کلی از بحث خواهیم پرداخت.

۲- مدل شبکه و مفروضات

در این بخش به بیان مفروضاتی در رابطه با مدل شبکه و مدل مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم پرداخته می‌شود.

۲-۱ مدل شبکه

در این مقاله، شبکه حسگر بی‌سیمی متشکل از n گره حسگر در نظر گرفته می‌شود که هر یک به شکل تصادفی در ناحیه مربعی $A \times Am^2$ پخش می‌گردند. شبکه مفروض توسط یک گراف پیوسته بدون جهت وزن‌دار $G(V, E)$ مدل می‌شود که مجموعه رئوس V بیانگر گره‌های شبکه و مجموعه یال‌های E نشان‌دهنده پیوندهای دوطرفه بی‌سیم بین گره‌ها می‌باشند. 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 می‌توانند به طور مستقیم با هم در ارتباط باشند. گره $s \in V$ به عنوان گره چاهک، وظیفه جمع‌آوری داده‌ها در شبکه را بر عهده دارد. وزن $w(i, j)$ که نشان‌دهنده هزینه ارتباطات بین دو رأس i و j می‌باشد، فاصله اقلیدسی بین دو گره در نظر گرفته می‌شود. به دلیل استفاده از کدهای متعامد در ارسال داده‌ها، تداخلی^{۱۱} در شبکه صورت نمی‌گیرد و بنابراین فرض بر آن است که هیچ بسته‌ای در شبکه گم نخواهد شد.

۲-۲ مدل مصرف انرژی

از آنجایی که تمامی گره‌های حسگر، محاسبات ساده یکسانی را در طول تجمیع داده با استفاده از نمونه‌برداری فشرده انجام می‌دهند، از مصرف انرژی پردازش داده صرف نظر می‌گردد. در این مقاله برای محاسبه میزان انرژی مصرفی هر ارسال از مدل زیر استفاده می‌شود [۲۰]

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

بی‌سیم توزیع شده^۱ از طریق مسیریابی چندپرسی^۲ می‌پردازد که در آن برای مسیریابی از ساختارهای درختی و برای فشرده‌سازی داده از تبدیل موجک^۳ استفاده می‌گردد.

در [۱۳] مؤلفان با استفاده از نمایش تنک سیگنال و مسیریابی مناسب، سعی در به حداقل رساندن تعداد نمونه‌های اندازه‌گیری دارند. با این حال این تحقیق، کمینه‌کردن هزینه ارسال هر نمونه اندازه‌گیری را در نظر نمی‌گیرد. برای حل این مشکل در [۱۴] روش spatially-localized CS توسط انتخاب ماتریس نمونه‌برداری بهینه برای یک پایه فشرده‌سازی داده‌شده، پیشنهاد شده است. در تمامی این مطالعات، اندازه‌گیری‌های تصادفی چگال^۴ مورد بررسی قرار می‌گیرند و این حقیقت که ممکن است تعداد زیادی از عناصر ماتریس نمونه‌برداری صفر باشند، در نظر گرفته نمی‌شود. در [۱۵]، Wang و همکارانش ضمن معرفی اندازه‌گیری‌های تصادفی تنک^۵ توزیع شده، ادعا می‌کنند که هر نمونه اندازه‌گیری به جای دربرگرفتن کل داده حسگرها، تنها به ترکیب تعدادی از مقادیر آنها نیاز دارد. این تحقیق نشان می‌دهد که با استفاده از اندازه‌گیری‌های تصادفی تنک، میزان مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. با این وجود، مقاله مفروض، هزینه انتقال برای جمع‌آوری نمونه‌های اندازه‌گیری در شبکه‌های چندپرسی را در نظر نمی‌گیرد. تحقیقات [۱۶] تا [۱۸] حاکی از آن هستند که قابلیت فشرده‌سازی داده حسگرها و استراتژی مسیریابی بر روی هزینه انتقال شبکه در روش تجمیع داده فشرده تأثیر می‌گذارند. از آنجایی که این مطالعات بر اساس اندازه‌گیری‌های تصادفی تنک عمل می‌کنند، میزان مصرف انرژی را بهبود می‌دهند. با این حال به دلیل تشکیل درخت‌های مسیریابی غیر بهینه برای جمع‌آوری هر نمونه اندازه‌گیری، میزان مصرف انرژی به طور چشم‌گیری بهبود نمی‌یابد.

مرجع [۱۹] روش تجمیع داده کارآمدی را با عنوان MSTP^۶ ارائه می‌دهد که به ترکیب CDG و اندازه‌گیری‌های تصادفی تنک برای کاهش بیشتر تعداد انتقال‌ها و متعادل کردن مصرف انرژی در سراسر شبکه می‌پردازد. این تحقیق همانند [۱۵] گره‌هایی را به صورت تصادفی به عنوان گره‌های اندازه‌گیری^۷ انتخاب می‌کند. هر گره اندازه‌گیری بعد از جمع‌آوری داده‌های گره‌های مورد نظر^۸ خود، آن را در قالب یک نمونه اندازه‌گیری نمونه‌برداری فشرده از طریق کوتاه‌ترین مسیر برای گره چاهک می‌فرستد. الگوریتم MSTP برای تشکیل درخت‌های پوشا با حداقل تعداد بسته‌های ارسالی از الگوریتم جستجوی پهنا-اول (BFS)^۹ بهره می‌گیرد. مؤلفان در [۱۹] با یکسان در نظر گرفتن هزینه ارسال بین تمامی گره‌ها، گراف شبکه را بدون وزن مدل می‌کنند و در واقع، بدون در نظر گرفتن تفاوت انرژی‌های مورد نیاز برای ارسال داده در فواصل مختلف و امکان کنترل توان در گره‌های حسگر، فرض بر آن شده که تمامی گره‌ها از برد مخابراتی یکسانی برخوردار باشند.

در این مقاله، الگوریتم کارآمدی با عنوان WCDG^{۱۰} با بهره‌گیری توأم

1. Distributed WSNs
2. Multi-Hop Routing
3. Wavelet Transformation
4. Dense Random Projection
5. Sparse Random Projection
6. Minimum Spanning Tree Projection
7. Projection Nodes
8. Interest Nodes
9. Breath First Search
10. Weighted Compressive Data Gathering

زیادی با پایه فشرده‌سازی Ψ داشته باشند و یا این که شرایط RIP^2 برای ماتریس $\Theta = \Phi\Psi$ برقرار باشد. ماتریس Φ شرایط RIP از مرتبه $2k$ را برآورده می‌کند اگر یک $\delta_k \in (0, 1)$ وجود داشته باشد به طوری که عبارت زیر برای سیگنال X با نمایش k -تنک برقرار باشد [۳]

$$(1 - \delta_k) \|X\|_p \leq \|\Phi X\|_p \leq (1 + \delta_k) \|X\|_p \quad (3)$$

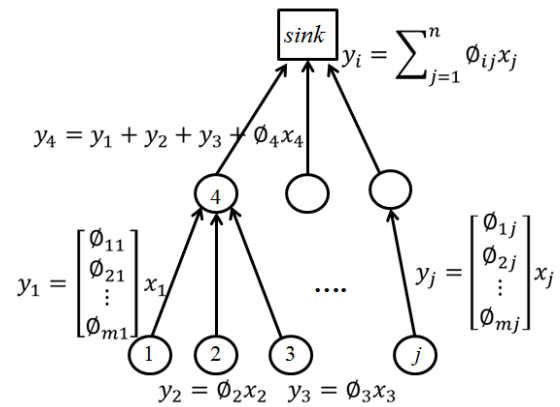
هنگام سر و کار داشتن با بردارها به طور مکرر از مفهوم ℓ_p -norm که به صورت $\|X\|_p = (\sum_{i=1}^n |x_i|^p)^{1/p}$ تعریف می‌شود، استفاده می‌گردد. در اینجا اشاره به این نکته ضروری است که وجود شرایط RIP برای ماتریس‌های تصادفی مانند ماتریس گوسی با عناصر مستقل و توزیع شده به صورت یکنواخت^۳ و ماتریس برنولی با عناصر ± 1 به اثبات رسیده است [۳]. در نهایت می‌توان سیگنال X را به طور کامل از بردار نمونه‌های اندازه‌گیری $Y = [y_1, \dots, y_n]^T$ با حل مسئله بهینه‌سازی محدب^۴ ℓ_1 -norm minimization [۲۱] کرد [۲۱]

$$\min_{\alpha \in \mathbb{R}^n} \|\alpha\|_{\ell_1} \quad \text{subject to} \quad Y = \Phi\Psi\alpha \quad (4)$$

شایان ذکر است که عملکرد عملی نظریه نمونه‌برداری فشرده به میزان تنگی سیگنال و الگوریتم‌های بازسازی وابسته می‌باشد. همچنین طبق این نظریه، افزایش تعداد اندازه‌گیری‌های نمونه‌برداری فشرده منجر به افزایش کیفیت بازیابی داده خواهد شد [۴].

۳-۲ کاربرد نمونه‌برداری فشرده در شبکه‌های حسگر بی‌سیم

هدف نهایی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، جمع‌آوری تمام داده‌های n گره به صورت $X = [x_1, \dots, x_n]^T$ در گره چاهک می‌باشد که هر کدام از گره‌ها یک نمونه x_i را اندازه‌گیری می‌کنند. در این راستا در صورت عدم استفاده از یک فرآیند تجمیع داده کارا، طبیعی است که گره‌های موجود در نزدیکی گره چاهک، ترافیک سنگینی از داده‌ها را متحمل شده و به سرعت انرژی خود را از دست می‌دهند. این مسئله، منجر به کاهش کارایی و طول عمر شبکه خواهد شد. خوشبختانه نمونه‌برداری فشرده راه حل خوبی را برای رفع این مشکل ارائه می‌دهد. از روش کدگذاری به صورت $Y = \Phi X = x_1\phi_1 + \dots + x_n\phi_n$ برای نشان دادن ایده نمونه‌برداری فشرده استفاده می‌شود. همان گونه که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، ابتدا هر گره i ، نمونه خود را از طریق ضرب کردن در بردار ستونی ϕ_i به یک بردار m بعدی گسترش می‌دهد. سپس به جای داده‌های خام، این بردار کدگذاری شده را برای والد^۵ خود ارسال می‌کند. تجمیع داده در طول مسیر از طریق جمع این بردارهای ستونی در گره صورت می‌گیرد. بنابراین بار ترافیکی بر روی مسیر تجمیع داده همیشه برابر m خواهد بود. بدین ترتیب، گره چاهک به جای n نمونه خام، یک بردار m بعدی را دریافت و با استفاده از الگوریتم‌های بازسازی n نمونه خام را بازیابی می‌نماید. شایان ذکر است که فرآیند کدگذاری در هر گره به صورت انفرادی در یک روش توزیع شده به وسیله عملیات ساده‌ای مانند ضرب و جمع که هزینه محاسباتی کمی دارند، صورت می‌گیرد. در واقع بار محاسباتی اصلی به مرحله کدگذاری در گره چاهک که از لحاظ مصرف انرژی محدودیتی ندارد، منتقل می‌شود.



شکل ۱: CDG در شبکه‌های حسگر بی‌سیم چندپرسی.

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

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 می‌باشند. همچنین انرژی مصرفی برای دریافت یا ارسال یک پیام تک‌بیتی توسط مدارات الکترونیکی و ϵ_{amp} انرژی مصرفی تقویت‌کننده انتقال را بیان می‌کنند. فرض بر آن است که هر گره فرستنده می‌تواند سطح خود را بر اساس فاصله تا گره مقصد تنظیم نماید.

۳-۳ مروری بر نمونه‌برداری فشرده

در این بخش، ابتدا به معرفی نظریه اساسی نمونه‌برداری فشرده و اندازه‌گیری‌های تصادفی تنک می‌پردازیم، سپس چگونگی اعمال نمونه‌برداری فشرده برای تجمیع داده در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱ نظریه نمونه‌برداری فشرده

نظریه نمونه‌برداری فشرده، یک رویکرد جدید فشرده‌سازی و دست‌یابی به سیگنال است که از قابلیت فشرده‌سازی سیگنال‌ها به منظور به حداقل رساندن نمونه‌های مورد نیاز برای بازیابی کل سیگنال بهره‌برداری می‌کند. سیگنال $X = [x_1, \dots, x_n]^T$ ، k -تنک نامیده می‌شود اگر حداکثر دارای k نمونه غیر صفر باشد. در این نمایش، x_i ها بیانگر نمونه‌های سیگنال و $[\cdot]^T$ معرف عملگر ترانهاده می‌باشد. به طور معمول، سیگنال‌های موجود در شبکه‌های حسگر بی‌سیم تنک نیستند اما یک نمایش تنک بر اساس برخی از پایه‌های فشرده‌سازی $\Psi = [\psi_1, \dots, \psi_n]$ به صورت $X = \Psi\alpha$ دارند. در این رابطه، ψ_i ها بردارهای ستونی ماتریس Ψ و $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_n]^T$ معادل تنک سیگنال اصلی X می‌باشند که α_i ها نمونه‌های بردار α را نمایش می‌دهند. نظریه نمونه‌برداری فشرده بیان می‌کند که اگر سیگنال X تحت پایه Ψ دارای نمایش k -تنک بوده به طوری که روابط $X = \sum_{i=1}^k \alpha_i \psi_i$ و $k \ll m$ برقرار باشند، تحت شرایط خاصی می‌توان با استفاده از رابطه $Y = \Phi X$ به جای جمع‌آوری کل نمونه‌های سیگنال X ، تنها $m = O(k \log n)$ نمونه از آن را جمع‌آوری کرد [۴]. ماتریس نمونه‌برداری $\Phi = [\phi_1, \dots, \phi_n]$ با بردارهای سطری ϕ_i دارای ابعاد $m \times n$ است. برای بازسازی کامل سیگنال X از بردار Y باید بردارهای سطری ماتریس نمونه‌برداری Φ ناهم‌دوسی^۱

2. Restricted Isometry Property
3. Independent and Identically Distributed
4. Convex
5. Parent

1. Incoherent

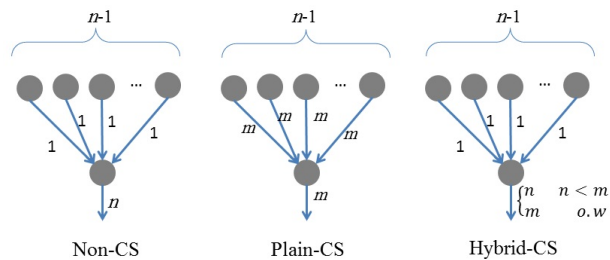
جدول ۱: نشانه‌گذاری‌های الگوریتم WCDG.

گره‌های اندازه‌گیری	$Proj$
ماتریس نمونه‌برداری	Φ
تعداد گره‌های اندازه‌گیری	$nProj$
گره‌های مورد نظر گره اندازه‌گیری i ام	Int_i
مجموعه گره‌های مورد نظر باقیمانده	$intTmp$
گره اندازه‌گیری i ام	P_i
تعداد اعضای مجموعه گره‌های مورد نظر باقیمانده	N_{intTmp}
تعداد اعضای درخت تشکیل شده کنونی	N_{tree}
درخت گره اندازه‌گیری i ام	$projectionTree(i)$

۴- الگوریتم WCDG

در این مقاله از یک ماتریس نمونه‌برداری تصادفی از قبل تعیین شده با شرایطی که در بخش ۳-۳ توضیح داده شد، استفاده می‌گردد. این ماتریس، قبل از توزیع گره‌ها در ناحیه مورد نظر در حافظه گره‌های حسگر ذخیره می‌گردد. هر گره حسگر، یکی از نمونه‌های $x_i, i=1, \dots, n$ را که در شبکه از همبستگی مکانی برخوردارند، نمونه‌برداری می‌کند. طبق نظریه نمونه‌برداری فشرده، گره چاهک برای بازیابی تمام نمونه‌های گره‌های حسگر تنها به m نمونه اندازه‌گیری تصادفی برای جمع‌آوری نمونه‌های اندازه‌گیری در شبکه انتخاب می‌شوند. هر کدام از این گره‌ها باید یک نمونه اندازه‌گیری تصادفی را از تمامی گره‌های شبکه جمع‌آوری و برای گره چاهک ارسال کنند. برای رسیدن به این هدف، هر سطر از ماتریس نمونه‌برداری Φ به یک گره اندازه‌گیری اختصاص داده می‌شود. گره‌هایی با ضرایب ϕ_{ij} غیر صفر، گره‌های مورد نظر برای گره اندازه‌گیری i ام می‌باشند. برای جمع‌آوری داده‌های گره‌های مورد نظر و تجمع آنها در گره اندازه‌گیری، یک درخت وزن‌دار تشکیل خواهد شد. این درخت، گره اندازه‌گیری را به عنوان ریشه خود انتخاب و طبق الگوریتم WCDG گره‌های مورد نظرش را به درخت متصل می‌کند.

شبه‌کد الگوریتم WCDG در شکل ۳ نشان داده شده است. گراف شبکه $(G(V, E))$ ، گره‌های اندازه‌گیری $(Proj)$ و ماتریس نمونه‌برداری (Φ) به عنوان ورودی‌های الگوریتم WCDG هستند. همچنین در جدول ۱ پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم WCDG تشریح می‌شوند. برای ایجاد درخت وزن‌دار مربوط به هر کدام از گره‌های اندازه‌گیری، الگوریتم به تعداد این گره‌ها تکرار می‌شود. برای گره اندازه‌گیری i ام، ماتریس $projectionTree(i)$ شامل سه سطر است که سطر اول، گره‌های درخت، سطر دوم والد هر گره و سطر سوم فاصله اقلیدسی بین هر گره و والد آن را مشخص می‌کند. با داشتن طول پیوندهای درخت و با استفاده از مدل انرژی تعریف شده در بخش ۲-۲ می‌توان مجموع انرژی مصرفی گره‌های درخت را محاسبه کرد. گره‌های مورد نظر مرتبط با گره اندازه‌گیری i ام در مجموعه $intTmp$ قرار می‌گیرد. برای تشکیل درخت i ام، ابتدا گره اندازه‌گیری با هزینه صفر به عنوان تنها گره درخت که هیچ والدی ندارد در نظر گرفته می‌شود. اگر گره اندازه‌گیری، یکی از گره‌های مورد نظر باشد باید از مجموعه $intTmp$ حذف شود. سپس این درخت با اضافه کردن گره‌های مورد نظری که می‌توانند به طور مستقیم و با یک پرش به درخت کنونی متصل شوند، گسترش می‌یابد. این فرآیند توسط حلقه `while` در خط ۵ تا ۱۸ شبه‌کد صورت می‌گیرد. گره مورد نظر با



شکل ۲: مقایسه سه روش تجمع داده با استفاده از نمونه‌برداری فشرده در شبکه‌های چندپرسی.

شایان ذکر است که اعمال کدگذاری نمونه‌برداری فشرده به طور مستقیم در هر گره ممکن است بهترین انتخاب نباشد. برای روشن‌تر شدن مسئله، شکل ۲ را در نظر بگیرید. در این شکل، اعداد کنار هر پیوند، تعداد بسته‌های ارسالی توسط آن پیوند را نشان می‌دهد. در روش Non-CS به دلیل عدم استفاده از استراتژی تجمع داده، هر کدام از $n-1$ گره، یک بسته برای گره n ام ارسال می‌کنند. لذا پیوند خروجی این گره بایستی n بسته را برای والد خود ارسال نماید. این در حالی است که با اعمال اصول نمونه‌برداری فشرده (Plain-CS)، هر گره نیاز دارد که m بسته را برای والد خود ارسال کند که نهایتاً منجر به افزایش ترافیک غیر ضروری در انتقال‌های مراحل اولیه می‌شود. در این روش، تعداد کل انتقال‌ها برای جمع‌آوری داده‌های تمامی گره‌ها برابر $m \times n$ بسته داده می‌باشد. مشاهده می‌شود که با افزایش m ، تعداد بسته‌های ارسالی به شکل ناکارآمدی افزایش خواهد یافت. بنابراین واضح است که اعمال نمونه‌برداری فشرده در تمامی گره‌ها مناسب نیست. در این راستا روش دیگری به نام Hybrid-CS ارائه شده که از مزایای هر دو روش قبلی بهره می‌برد. در این روش تا زمانی که نمونه‌های خروجی کمتر از m نمونه باشند، تجمع داده با استفاده از نمونه‌برداری فشرده، اعمال نمی‌گردد. در غیر این صورت در پیوندهای بعدی از نمونه‌برداری فشرده استفاده می‌شود. به عبارت دیگر در پیوندهایی که $n \geq m$ است، با استفاده از نمونه‌برداری فشرده، تنها m بسته ارسال می‌گردد. در $[8]$ با استفاده از اندازه‌گیری‌های تصادفی چگال هر سه روش فوق مقایسه و برتری عملکرد Hybrid-CS نسبت به دو روش دیگر نشان داده شده است.

۳-۳- تجمع داده با اندازه‌گیری‌های تصادفی تنک

در تجمع داده با استفاده از اندازه‌گیری‌های تصادفی تنک، ماتریس نمونه‌برداری شامل عناصر صفر زیادی است. بنابراین برای هر کدام از نمونه‌های اندازه‌گیری نیازی نیست که گره‌های مربوط به عناصر صفر داده‌های خود را ارسال کنند. در $[15]$ نشان داده شده که با استفاده از اندازه‌گیری‌های تصادفی تنک برای تجمع داده، هزینه انتقال هر نمونه اندازه‌گیری از $O(n)$ برای اندازه‌گیری‌های تصادفی چگال به $O(\log n)$ برای اندازه‌گیری‌های تصادفی تنک کاهش می‌یابد. نویسندگان این مقاله بیان کردند که مصالحه‌ای بین تعداد عناصر غیر صفر هر سطر ماتریس Φ و تعداد سطرهای آن وجود دارد. در این مقاله برای توزیع یکنواخت عناصر غیر صفر در ماتریس Φ و تا حد امکان افزایش میزان تنکی هر سطر آن، تعداد عناصر غیر صفر هر سطر ماتریس برابر $[n/m]$ در نظر گرفته می‌شود. همچنین لازم است که در ماتریس Φ هیچ ستون صفری وجود نداشته باشد. علت این امر آن است که هر ستون ماتریس Φ مربوط به یک گره حسگر می‌باشد و اگر تمامی مؤلفه‌های ستونی صفر باشند، به این معنا است که از داده گره حسگر متناظر با آن ستون صرف نظر شده است.

کنونی است. حال، گره مورد نظری که توسط یک مسیر چندپرسی به درخت متصل شده است از مجموعه $intTmp$ حذف می‌شود. تا زمانی که تمامی گره‌های مورد نظر به درخت متصل نشده باشند مراحل فوق تکرار شده و مرحله به مرحله، گره‌های مورد نظر تک‌پرسی و گره‌های مورد نظر چندپرسی به درخت متصل خواهند شد. پس از تشکیل درخت مسیریابی، هر گره با توجه به شناختی که از گره‌های فرزندان و والد خود دارد طبق CDG گره x_j را در ضریب ϕ_{ij} مربوط به خود ضرب و آن را با داده‌های فرزندان خود تجمیع می‌کند. سپس بسته داده تجمیع شده را برای گره والد خود ارسال می‌نماید. هنگامی که ریشه درخت، نمونه اندازه‌گیری $\sum_{j=1}^n \phi_{ij} x_j$ را دریافت نمود آن را در قالب یک بسته داده از طریق کوتاه‌ترین مسیر برای گره چاهک ارسال می‌کند. در این مرحله نیز برای پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر ممکن از الگوریتم dijstra [۲۲] استفاده می‌شود. به طور مشابه گره‌های اندازه‌گیری دیگر نیز نمونه اندازه‌گیری مربوط به خود را تجمیع و برای گره چاهک ارسال می‌کنند. بنابراین در حالت کلی m درخت در شبکه موجود است که هر یک از آنها یکی از اندازه‌گیری‌های تصادفی y_i را تشکیل می‌دهند.

در شکل‌های ۴ و ۵ با ارائه شبکه‌ای متشکل از ۲۴ گره حسگر به توصیف الگوریتم WCDG و مقایسه آن با الگوریتم MSTP [۱۹] پرداخته می‌شود. در این شبکه، گره‌های ۱۲، ۱۴ و ۲۴ به صورت تصادفی به عنوان گره‌های اندازه‌گیری انتخاب شده‌اند. برای مقایسه دو الگوریتم، درخت تشکیل شده مربوط به یک گره اندازه‌گیری (گره ۲۴) مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به ماتریس نمونه‌برداری با شرایط ذکر شده در بخش ۳-۳، گره‌های مورد نظر برای گره اندازه‌گیری ۲۴، گره‌های ۱۲، ۱۳، ۸، ۱۴، ۷ و ۲۳ می‌باشند. در هر دو الگوریتم، گره اندازه‌گیری ۲۴ باید درختی شامل تمامی گره‌های ذکر شده تشکیل دهد. گره‌های ۱۲ و ۱۴ گره‌های مورد نظر تک‌پرسی هستند که در هر دو الگوریتم به طور مستقیم به گره ۲۴ متصل می‌شوند. بنابراین درخت کنونی، گره‌های ۲۴، ۱۲ و ۱۴ را در بر می‌گیرد. گره‌های مورد نظر بعدی گره ۲۳ و ۷ هستند که باید هر کدام از آنها از طریق گره‌ای از درخت تشکیل شده کنونی که فاصله کمتری با آنها دارد به درخت متصل شوند. به همین ترتیب گره ۲۳ به گره ۱۴ و گره ۷ به گره ۱۲ متصل می‌گردد. در این مرحله باید یکی از دو گره مورد نظر ۲ یا ۸ که با درخت کنونی فاصله چندپرسی دارند به درخت اضافه شوند. از آنجایی که الگوریتم MSTP بر اساس تعداد جهش‌ها عمل می‌کند، بین گره ۸ و ۲ که فاصله دوجبهشی با درخت کنونی دارند، تفاوتی قابل نمی‌شود و گره ۸ را با استفاده از الگوریتم BFS به درخت کنونی متصل می‌کند. در این صورت، مسیر بهینه‌ای از نظر میزان مصرف انرژی حاصل نمی‌شود. این در حالی است که در الگوریتم WCDG، گره ۲ زودتر از گره ۸ به درخت، متصل می‌گردد و علت این امر آن است که گره ۲ از فاصله اقلیدسی کمتری با درخت تشکیل شده کنونی برخوردار است. بدین ترتیب مسیری با طول پیوندهای کوتاه‌تر تشکیل می‌شود که با توجه به مدل مصرف انرژی، کارایی بیشتری را نتیجه خواهد داد. از طرفی، عدم امکان کنترل توان در الگوریتم MSTP، دلیل دیگری بر مصرف بیشتر انرژی این الگوریتم خواهد شد. به همین ترتیب در هر دو الگوریتم، درخت‌های گره‌های اندازه‌گیری ۱۲ و ۱۴ نیز تشکیل می‌شوند. در شکل‌های ۴ و ۵ درخت مربوط به هر گره اندازه‌گیری با نماد متفاوتی نمایش داده شده است. پس از این که گره‌های اندازه‌گیری داده‌های گره‌های مورد نظر خود را بر اساس CDG تجمیع کردند، آن را از طریق کوتاه‌ترین مسیر برای گره چاهک ارسال می‌کنند. این مسیر در شکل‌های ۴ و ۵ با خطوط جهت‌دار نشان داده شده‌اند. همان گونه که در این شکل‌ها ملاحظه

Input: $G(V, E), Proj, \Phi$

Output: $projectionTree(i), i = 1, \dots, nProj$

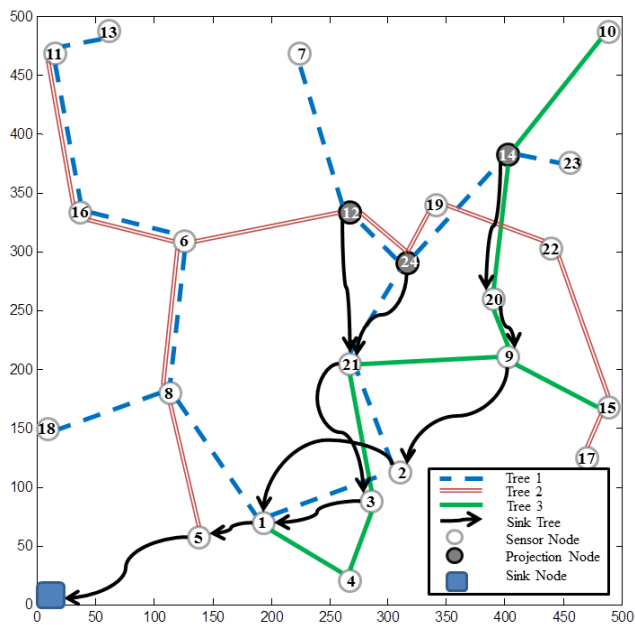
```

1: for  $i = 1$  to  $nProj$ 
2:    $intTmp \leftarrow Int_i$ 
3:    $tree \leftarrow [p_i, -1, 0]^T$ 
4:   while ( $intTmp$  is not empty)
5:     do
6:       for  $C = 1$  to  $N_{intTmp}$ 
7:         for  $k = 1$  to  $N_{tree}$ 
8:           if  $adj(intTmp(C), tree(1, k))$ 
9:              $dist \leftarrow [distance(intTmp(C), tree(1, k)) \quad tree(1, k)]^T$ 
10:          end if
11:        end for
12:       if ( $N_{dist} > 0$ )
13:          $m \leftarrow \min(dist)$ 
14:          $tree \leftarrow [intTmp(C) \quad dist(2, m) \quad dist(1, m)]^T$ 
15:          $rem(intTmp, C)$ 
16:       end if
17:     end for
18:   while ( $N_{dist} > 0$ )
19:     if ( $N_{intTmp} = 0$ )
20:       break while
21:     end if
22:      $Cst \leftarrow \infty, P \leftarrow []$ 
23:     for  $l = 1$  to  $N_{intTmp}$ 
24:       for  $k = 1$  to  $N_{tree}$ 
25:          $Cst \leftarrow \min(Cst, Cost(dijkstra \text{ shortest path}$ 
26:            $(tree(1, k), intTmp(l))))$ 
27:          $P \leftarrow path(\min Cst)$ 
28:       end for
29:     for all Nodes  $n$  in path  $P$ 
30:        $tree \leftarrow [n \quad pred(n) \quad distance(n, pred(n))]^T$ 
31:     end for
32:      $rem(intTmp, \min Cst)$ 
33:   end while
34:    $projectionTree(i) \leftarrow tree$ 
35: end for
36: return  $projectionTree(i)$ 

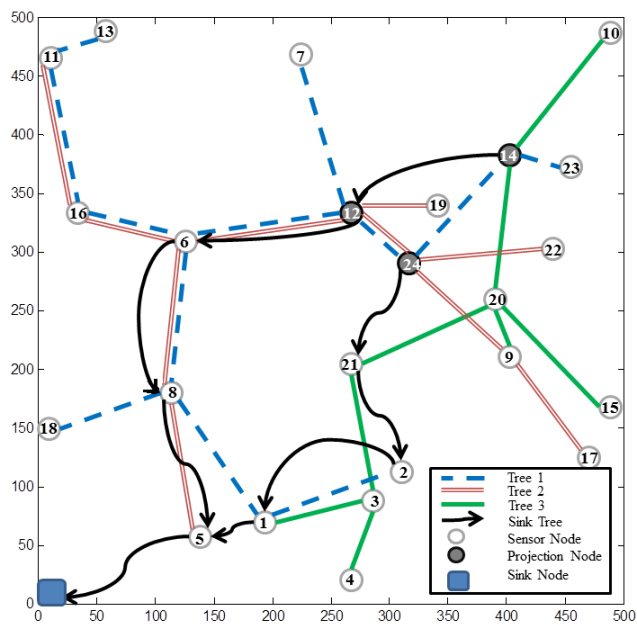
```

شکل ۳: شبه‌کد الگوریتم WCDG.

پیوندی که هزینه درخت را کمینه می‌کند به درخت کنونی متصل می‌گردد. گره‌ای که گره مورد نظر توسط آن به درخت متصل می‌شود، والد گره مورد نظر است. حال آن گره‌هایی که بدون پرش به درخت متصل شده‌اند، از مجموعه $intTmp$ حذف می‌گردند. در واقع مجموعه $intTmp$ گره‌های مورد نظر باقیمانده را نشان می‌دهد. اگر در این مجموعه گره مورد نظر دیگری وجود نداشته باشد، شرط شکست حلقه بی‌نهایت خط ۴ برآورده شده و نیازی به اجرای بقیه الگوریتم نخواهد بود اما اگر گره‌های مورد نظر دیگری وجود داشته باشند که هنوز به درخت متصل نشده و در فاصله چندپرسی از درخت قرار گرفته باشند، نزدیک‌ترین آنها از طریق کوتاه‌ترین مسیر به درخت متصل خواهد شد. این فرآیند توسط دو حلقه تو در تو در خط‌های ۲۳ و ۲۴ شبه‌کد اجرا می‌شود. از آنجایی که گراف شبکه وزن‌دار است، به منظور یافتن کوتاه‌ترین مسیر از الگوریتم dijstra [۲۲] استفاده می‌گردد. حلقه for خط ۲۹ تمامی گره‌های موجود در مسیر P را به درخت اضافه می‌کند. این مسیر، کوتاه‌ترین مسیر از گره مورد نظر با فاصله چندپرسی تا درخت



شکل ۵: اجرای الگوریتم WCDG در شبکه‌ای با ۲۴ گره و ۳ گره اندازه‌گیری.



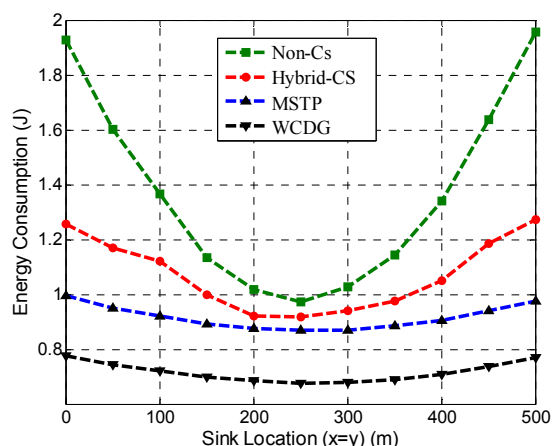
شکل ۴: اجرای الگوریتم MSTP در شبکه‌ای با ۲۴ گره و ۳ گره اندازه‌گیری.

از آنجایی که مصرف انرژی حاصل از ارسال داده به مراتب بیشتر از مصرف انرژی ناشی از اطلاعات مسیریابی و دریافت داده است، تنها مصرف انرژی حاصل از ارسال داده در شبکه در نظر گرفته می‌شود. در این راستا $E_{elec} = 50 \text{ nJ/bit}$ ، $\epsilon_{amp} = 100 \text{ pJ/bit/m}^2$ و طول بسته‌های داده برابر 1024 بیت فرض شده است [۲۰].

یکی از عوامل ارزیابی میزان کارآمدی شبکه‌های حسگر بی‌سیم، توزیع عادلانه بار در شبکه است. اگر تفاوت بار بین حسگرهای شبکه زیاد باشد، انرژی برخی از حسگرها به سرعت تخلیه می‌شود در حالی که سایر گره‌های حسگر به درستی مورد بهره‌برداری قرار نمی‌گیرند. این امر حاکی از آن است که تعادل بار و استفاده عادلانه از تمامی منابع شبکه به شکل مناسبی تحقق نیافته است. بر این اساس در مقاله برای مقایسه میزان تعادل بار گره‌های حسگر بی‌سیم در الگوریتم‌های مختلف از مفهوم آماری واریانس انرژی گره‌ها استفاده می‌شود.

به منظور ارزیابی بهتر الگوریتم‌ها از منظرهای مختلف، شبیه‌سازی‌های این بخش در قالب سه سناریو ارائه می‌شوند. نتایج نمودارهای هر سناریو از متوسط‌گیری نتایج ده بار اجرای برنامه با ماتریس‌های نمونه‌برداری Φ متفاوت و گره‌های اندازه‌گیری متفاوت حاصل شده‌اند.

در سناریوی اول در حالتی که تعداد گره‌های حسگر شبکه، 1000 گره و تعداد گره‌های اندازه‌گیری برابر با 100 گره فرض می‌شوند، مکان گره چاهک بر روی قطر اصلی شبکه، تغییر داده خواهد شد تا بهترین مکان برای این گره از نظر میزان مصرف انرژی تعیین گردد. نتایج این سناریو در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. این نتایج بیانگر آن است که زمانی که گره چاهک در مرکز شبکه قرار بگیرد، میزان مصرف انرژی کمتر و تعادل بار در شبکه بیشتر می‌شود. علت امر آن است که در این حالت، درختی که گره‌های اندازه‌گیری را به گره چاهک متصل می‌کند، درخت کوتاه‌تری خواهد بود. از طرفی، تعداد گره‌هایی که در همسایگی گره چاهک قرار دارند افزایش می‌یابد و در نتیجه، طول عمر شبکه نیز افزایش خواهد یافت. همچنین همان طور که مشاهده می‌شود میزان مصرف انرژی و واریانس بار در روش پیشنهادی از سایر روش‌ها کمتر بوده که این مسئله حاکی از بهبود مصرف عادلانه انرژی در شبکه حسگر بی‌سیم می‌باشد. در الگوریتم ارائه‌شده در این مقاله با توجه به مدل مصرف انرژی، هر گره بر اساس فاصله اقلیدسی از گره مقصد، سطح توان



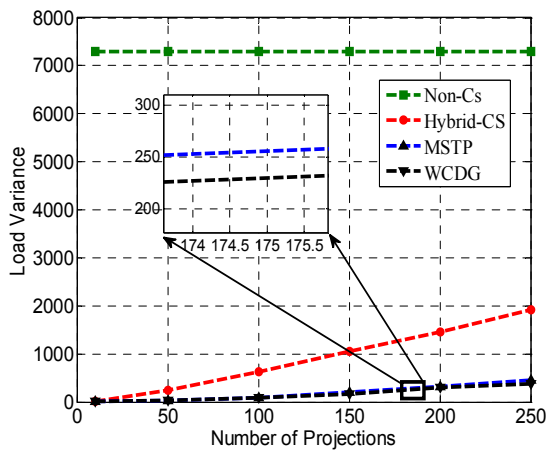
شکل ۶: مقایسه میزان مصرف انرژی در چهار روش Non-Cs، Hybrid-CS، MSTP و WCDG با تغییر مکان گره چاهک.

می‌شود، الگوریتم پیشنهادی در این مقاله، سعی در انتخاب مسیریابی کارآمدتری می‌نماید. در این مثال با محاسبه میزان انرژی مصرفی، مشاهده می‌شود که انرژی در الگوریتم WCDG نسبت به MSTP به مقدار 38.53% درصد بهبود یافته است. انرژی مصرفی در دو الگوریتم WCDG و MSTP به ترتیب برابر 0.0611 و 0.0994 ژول می‌باشد.

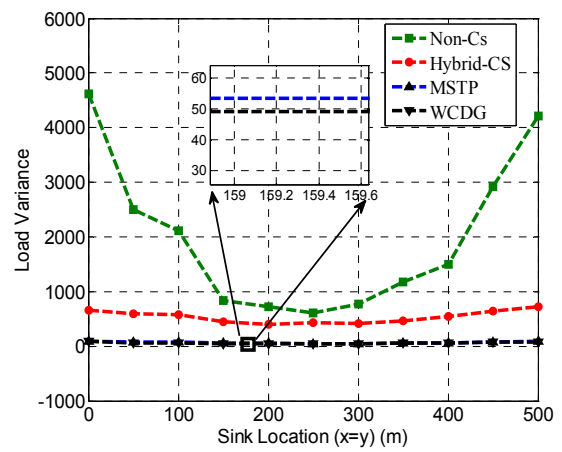
۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم WCDG، در سناریوهای مختلفی این الگوریتم با ۳ الگوریتم Hybrid-CS، Non-CS، و MSTP در شبکه‌های حسگر بی‌سیم وزن‌دار از نظر مصرف انرژی، تعادل بار و طول عمر شبکه مقایسه می‌شود. در اینجا شبکه حسگر بی‌سیمی با ابعاد $500 \times 500 \text{ m}^2$ مورد بررسی قرار می‌گیرد که گره‌ها در آن به صورت تصادفی با توزیع یکنواخت توزیع می‌شوند. همچنین فرض بر آن است که داده‌های شبکه بر اساس پایه فشرده‌سازی تبدیل موجک یا تبدیل کسینوسی گسسته^۱ (DCT) نمایش تنکی داشته باشند. برای پیاده‌سازی الگوریتم‌ها از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.

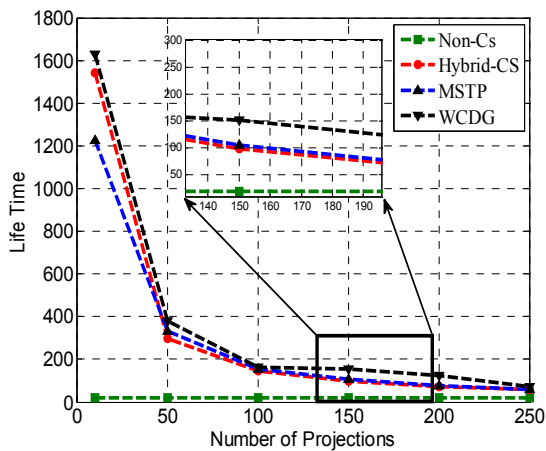
1. Discrete Cosine Transform



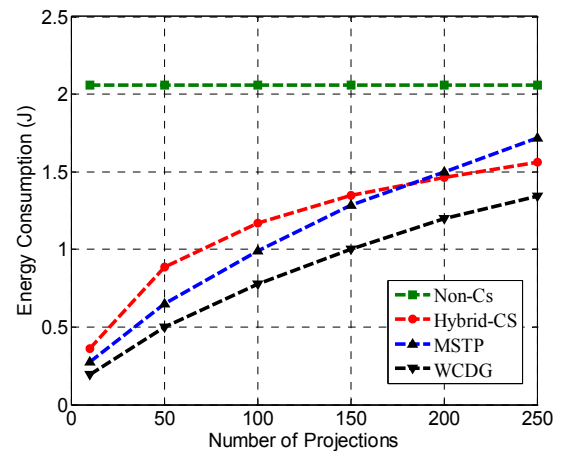
شکل ۹: مقایسه میزان تعادل بار در چهار روش Non-CS، Hybrid-CS، MSTP و WCDG با فرض $m = 10, 50, 100, 150, 200, 250$.



شکل ۷: مقایسه میزان تعادل بار در چهار روش Non-CS، Hybrid-CS، MSTP و WCDG با تغییر مکان گره چاهک.



شکل ۱۰: مقایسه طول عمر شبکه در چهار روش Non-CS، Hybrid-CS، MSTP و WCDG با فرض $m = 10, 50, 100, 150, 200, 250$.



شکل ۸: مقایسه میزان مصرف انرژی در چهار روش Non-CS، Hybrid-CS، MSTP و WCDG با فرض $m = 10, 50, 100, 150, 200, 250$.

به دلیل انتخاب مسیرهای کارآمدتر توسط الگوریتم WCDG، طول عمر شبکه از بقیه روش‌ها بیشتر خواهد بود.

در سناریوی سوم، شبکه‌هایی با چگالی مختلف در نظر گرفته شده که برای هر کدام از آنها تعداد متفاوتی از اندازه‌گیری‌های تصادفی نمونه‌برداری فشرده m مورد بررسی قرار می‌گیرد. در واقع برای شبکه‌ها با اندازه‌های متفاوت نسبت فشرده‌سازی برابر $1/4$ در نظر گرفته شده است. همچنین در این سناریو، گره چاهک در مختصات $(0, 0)$ قرار دارد. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب انرژی مصرفی و واریانس بار شبکه را نشان می‌دهند. در هر چهار الگوریتم با کاهش تعداد گره‌های حسگر، تعداد بسته‌های ارسالی در شبکه کاهش یافته و در نتیجه، میزان انرژی مصرفی نیز کاهش می‌یابد. همچنین، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم WCDG از سایر الگوریتم‌ها از لحاظ مصرف انرژی و تعادل بار بهتر عمل می‌کند.

۶- نتیجه‌گیری

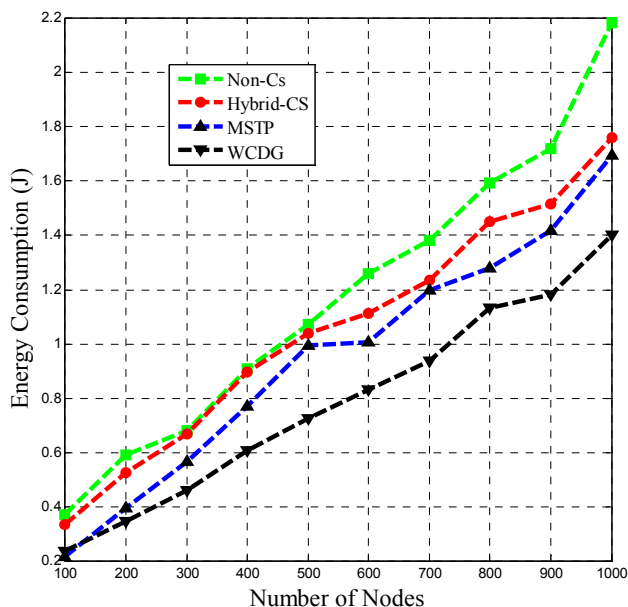
در این مقاله، سعی بر آن شد که با استفاده توأم از نظریه نمونه‌برداری فشرده و درخت‌های مسیریابی وزن‌دار، میزان مصرف انرژی در شبکه کاهش و تعادل بار بین گره‌ها افزایش یابد. برای تحقق این هدف با بهره‌گیری از ماتریس نمونه‌برداری تنک، الگوریتم جدیدی با عنوان WCDG ارائه شد که در آن پس از این که گره‌های اندازه‌گیری، داده‌های گره‌های مورد نظر خود را از طریق یک درخت مسیریابی وزن‌دار

خود را تنظیم می‌کند. بنابراین برای ارسال داده به گره‌ای با فاصله کوتاه نیازی به تنظیم سطح توان در حالت بیشینه نمی‌باشد و در نتیجه در تشکیل درخت‌های مسیریابی درخت‌های کارآمدتری ایجاد می‌شوند.

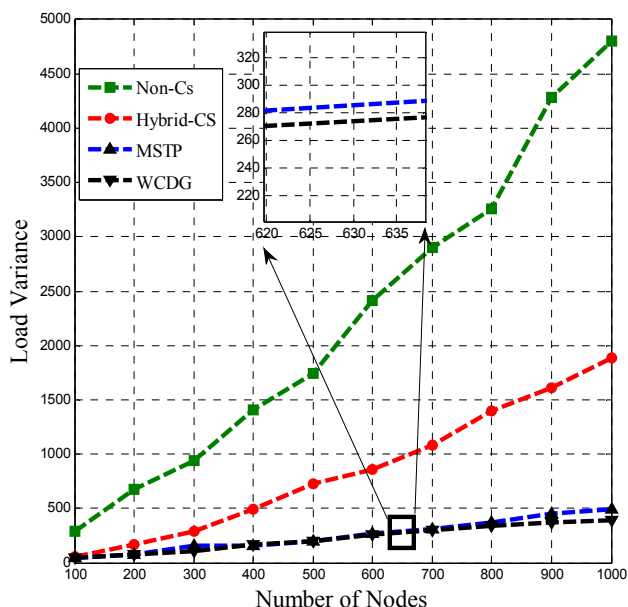
در سناریوی دوم به منظور بررسی اثر تعداد اندازه‌گیری‌های نمونه‌برداری فشرده بر عملکرد شبکه، با فرض شبکه‌ای با ۱۰۰۰ گره و با تغییر تعداد نمونه‌ها، میزان مصرف انرژی و تعادل بار در چهار روش مقایسه می‌شوند. در این سناریو، گره چاهک در مختصات $(0, 0)$ قرار دارد. با تعریف نسبت m/n به عنوان نسبت فشرده‌سازی داده‌های شبکه، شبیه‌سازی‌ها با نسبت‌های فشرده‌سازی $1/4, 1/5, 1/10, 1/20$ و $1/100$ انجام شده است. شکل‌های ۸ و ۹ نتایج به دست آمده در این سناریو را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش تعداد اندازه‌گیری‌های نمونه‌برداری فشرده، میزان مصرف انرژی شبکه نیز کاهش می‌یابد زیرا تعداد درخت‌های مسیریابی و تعداد بسته‌های ارسالی برای گره چاهک، کاهش خواهد یافت. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که میزان مصرف انرژی در روش Non-CS از تمامی روش‌ها بیشتر و میزان مصرف انرژی الگوریتم WCDG از الگوریتم‌های Non-CS و Hybrid-CS کمتر می‌باشد. در این مقاله، طول عمر شبکه به عنوان تعداد دفعات تکرار حس کردن داده‌های شبکه تا زمانی که انرژی اولین گره در شبکه به اتمام برسد، تعریف می‌شود. انرژی اولیه تمام گره‌ها برابر ۲ ژول در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۰ طول عمر شبکه برای الگوریتم‌های مختلف مقایسه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود،

مراجع

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393-422, Mar. 2002.
- [2] J. P. Amaro, F. J. T. E. Ferreira, R. Cortesao, N. Vinagre, and R. P. Bras, "Low cost wireless sensor network for in-field operation monitoring of induction motors," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Industrial Technology, ICIT'10*, pp. 1044-1049, Mar. 2010.
- [3] E. Candes and M. Wakin, "An introduction to compressive sampling," *Signal Processing Magazine*, vol. 25, no. 2, pp. 21-30, Mar. 2008.
- [4] D. Donoho, "Compressed sensing," *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 52, no. 4, pp. 4036-4048, Apr. 2006.
- [5] 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.
- [6] C. Luo, F. Wu, J. Sun, and C. W. Chen, "Compressive data gathering for large-scale wireless sensor networks," in *Proc. the 15th Annual Int. Conf. on Mobile Computing and Networking*, pp. 145-156, Sep. 2009.
- [7] C. Luo, F. Wu, J. Sun, and C. W. Chen, "Efficient measurement generation and pervasive sparsity for compressive data gathering," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 9, no. 12, pp. 3728-3738, Dec. 2010.
- [8] J. Luo, L. Xiang, and C. Rosenberg, "Does compressed sensing improve the throughput of wireless sensor networks?," in *Proc. 2010 IEEE Int. Conf. on Communications, ICC'10*, 6 pp., May 2010.
- [9] J. Wang, S. Tang, B. Yin, and X. Y. Li, "Data gathering in wireless sensor networks through intelligent compressive sensing," in *Proc. 31st Annual IEEE Int. Conf. on Computer Communications, INFOCOM'12*, pp. 603-611, Mar. 2012.
- [10] X. Wu, Y. Xiong, P. Yang, S. Wan, and W. Huang, "Sparsest random scheduling for compressive data gathering in wireless sensor networks," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 13, no. 10, pp. 5867-5877, Oct. 2014.
- [11] G. Yang, M. Xiao, and S. Zhang, "Data aggregation scheme based on compressed sensing in wireless sensor network," in *Information Computing and Applications*, vol. 307, pp. 556-561, 2012.
- [12] G. Shen, et al., "Novel distributed wavelet transforms and routing algorithms for efficient data gathering in sensor webs," in *Proc. NASA Earth Science Technology Conf., ESTC'08*, 8 pp., Jun. 2008.
- [13] G. Quer, R. Masiero, D. Munaretto, M. Rossi, J. Widmer, and M. Zorzi, "On the interplay between routing and signal representation for compressive sensing in wireless sensor networks," in *Proc. Information Theory and Applications Workshop*, pp. 206-215, Feb. 2009.
- [14] S. Lee, S. Pattem, M. Sathiamoorthy, B. Krishnamachari, and A. Ortega, "Spatially-localized compressed sensing and routing in multi-hop sensor networks," in *Proc. Geosensor Networks Springer Berlin Heidelberg*, vol. 5659, pp. 11-20, Jul. 2009.
- [15] W. Wang, M. Garofalakis, and K. Ramchandran, "Distributed sparse random projections for refinable approximation," in *Proc. the 6th Int. Conf. on Information Processing in Sensor Networks*, vol. ???, pp. 331-339, Apr. 2007.
- [16] S. Lee, S. Pattem, M. Sathiamoorthy, B. Krishnamachari, and A. Ortega, "Compressed sensing and routing in multi-hop networks," University of Southern California CENG, Technical Report, 2009.
- [17] X. Wang, Z. Zhao, Y. Xia, and H. Zhang, "Compressed sensing for efficient random routing in multi-hop wireless sensor networks," *International J. of Communication Networks and Distributed Systems*, vol. 7, no. 3, pp. 275-292, Dec. 2011.
- [18] M. T. Nguyen, and K. A. Teague, "Tree-based energy-efficient data gathering in wireless sensor networks deploying compressive sensing," in *Proc. the 23rd Wireless and Optical Communication Conf., WOCC'14*, 6 pp., May 2014.
- [19] D. Ebrahimi and C. Assi, "Compressive data gathering using random projection for energy efficient wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 16, pp. 105-119, May 2014.
- [20] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in *Proc. the 33rd Hawaii Int. Conf. on System Sciences*, vol. 8, 10 pp., Jan. 2000.
- [21] E. J. Candes and T. Tao, "Near-optimal signal recovery from random projections: Universal encoding strategies?," *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 52, no. 12, pp. 5406-5425, Dec. 2006.
- [22] E. W. Dijkstra, "A note on two problems in connexion with graphs," in *Proc. Numerische Mathematik 1*, vol. 1, no. 1, pp. 269-271, Dec. 1959.



شکل ۱۱: مقایسه میزان مصرف انرژی در چهار روش Non-CS، Hybrid-CS، MSTP و WCDG با فرض تعداد گره‌های مختلف.



شکل ۱۲: مقایسه میزان تعادل بار در چهار روش Non-CS، Hybrid-CS، MSTP و WCDG با فرض تعداد گره‌های مختلف.

جمع‌آوری می‌کنند، داده‌های تجمع‌شده را توسط یک ساختار درختی برای گره چاهک ارسال می‌نمایند. نتایج شبیه‌سازی‌های متنوع انجام‌شده حاکی از آن است که الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های Non-CS، Hybrid-CS و MSTP انرژی مصرفی شبکه را کاهش و میزان تعادل بار در شبکه را افزایش می‌دهد. این مهم در شبکه‌هایی با چگالی گره متفاوت به خوبی دیده می‌شود. در تمامی روش‌ها زمانی که گره چاهک در مرکز شبکه قرار گرفته باشد، میزان انرژی مصرفی شبکه کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که تعداد اندازه‌گیری‌های نمونه‌برداری فشرده نه تنها در کیفیت بازایی داده، بلکه بر روی مصرف انرژی شبکه‌های حسگر نیز تأثیر می‌گذارد به طوری که هرچه تعداد اندازه‌گیری‌های نمونه‌برداری فشرده کمتر باشد، میزان مصرف انرژی در شبکه نیز کاهش خواهد یافت.

جمشید ابویی مدارک کارشناسی مهندسی برق گرایش الکترونیک و کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش مخابرات سیستم خود را به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۱ و ۱۳۷۴ با رتبه بالا از دانشگاه صنعتی اصفهان دریافت نمود. وی مقطع دکتری مهندسی برق خود را در سال ۱۳۸۸ در دانشگاه واترلو در کانادا به پایان رسانده است و پس از آن به دوره فوق دکتری مهندسی برق در آزمایشگاه چندرسانه‌ای دانشگاه تورنتو در کانادا وارد گردید و در سال ۱۳۸۹ موفق به اخذ درجه فوق دکتری از دانشگاه مذکور گردید. هم‌اکنون دکتر ابویی در دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه یزد به عنوان استادیار مشغول به فعالیت می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارت‌اند از: شبکه‌های حسگر بی‌سیم و شبکه‌های موردی، با تأکید خاص بر روی بهره‌وری انرژی و تخصیص منابع بهینه.

سمانه عباسی دره‌ساری در سال ۱۳۸۹ مدرک کارشناسی مهندسی برق گرایش مخابرات خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد و در سال ۱۳۹۴ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق مخابرات گرایش سیستم خود را از دانشگاه یزد دریافت نمود. وی از سال ۱۳۹۱ به عنوان عضو فعال در آزمایشگاه تحقیقاتی WINEL در دانشگاه یزد مشغول بود. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند ایده‌های نو در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، بهینه‌سازی انرژی و به طور خاص کاربرد نمونه‌برداری فشرده در شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌باشد.