

تحلیل مصرف انرژی در شبکه حسگر بی سیم

با الگوی مبتنی بر حسگری فشرده

محمد رضا قادری^{۱*}، وحید طباطبا وکیلی^۲ و منصور شیخان^۳^۱ و ^۲ دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب^۳ دانشکده برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

مهمترین چالش در شبکه‌های حسگر بی سیم، به کمینه‌رساندن مصرف انرژی در باتری گره‌های حسگر و افزایش طول عمر شبکه است. یکی از روش‌های مؤثر در کاهش مصرف انرژی در این شبکه‌ها، حسگری فشرده است که با کاهش داده‌های ارسالی، موجب کاهش مصرف انرژی در شبکه می‌شود. از طرفی، برای مقابله با چالش مصرف انرژی، شناخت کامل منابع مصرف انرژی در شبکه ضروری است. این موضوع اهمیت پژوهش در خصوص تحلیل مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی سیم را آشکار می‌سازد. برای نیل به این هدف، وجود الگویی که بتواند میزان مصرف انرژی در همه شاخه‌های شبکه را تحلیل کند، ضروری خواهد بود. تاکنون الگوهای مختلفی برای تحلیل مصرف انرژی در شبکه حسگر بی سیم ارائه شده‌اند، اما الگوی کاملی برای تحلیل انرژی مصرفی در شبکه‌های حسگر مبتنی بر حسگری فشرده ارائه نشده‌است. در این مقاله به ارائه الگوی کاملی برای تحلیل مصرف انرژی مبتنی بر حسگری فشرده پرداخته شده‌است. بر این اساس، نخست، الگوهای سیگنال در حسگری فشرده را دسته‌بندی کرده و سپس، تحلیل کاملی از انرژی مصرفی در واحدهای مخابرات و محاسبه، در گره‌های حسگر و همچنین میزان مصرف انرژی در هر دوره زمانی نمونه‌برداری در شبکه حسگر مبتنی بر حسگری فشرده، به عمل آورده‌ایم. روابط کاربردی برای محاسبه مصرف انرژی در همه مؤلفه‌های گره‌های حسگر و نیز مصرف انرژی در شبکه، ارائه شده‌اند. این الگو می‌تواند به طراحی بهینه شبکه‌های حسگر بی سیم مبتنی بر حسگری فشرده با رویکرد بهبود مصرف انرژی کمک مؤثری کند.

واژگان کلیدی: شبکه حسگر بی سیم، حسگری فشرده، الگوی انرژی، تحلیل انرژی، تجزیه داده‌های فشرده

Energy Consumption Analysis based on Compressive Sensing Model in Wireless Sensor Networks

Mohammad Reza Ghaderi^{1*}, Vahid Tabataba Vakili², Mansour Sheikhan³

^{1,2,3}Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch

²Department of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology

Abstract

Nowadays, wireless sensor networks (WSNs) have found many applications in a variety of topics. The main purpose of these networks is to measure environmental phenomena and to send read data in multi-hop paths to the sink to be exploited by users. The most important challenge in WSNs is to minimize energy consumption in sensor batteries and increase network lifetime. One of the most important techniques for reducing energy consumption in WSNs is the compressive sensing (CS) technique. CS reduces network energy consumption by reducing data transmission in the network and increasing the network lifetime. The use of CS technique in a WSN results in the production of different models of CS signals. These models are based on spatial, temporal and spatiotemporal sensors readings. On the other hand, in order to overcome the challenge of energy consumption, the exact recognition of energy resources in the network is essential.

* Corresponding author

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات

* Corresponding author

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات

سال ۱۴۰۲ شماره ۲ پیاپی ۵۶

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۲/۲۹ • تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۷/۲۹ • تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۷/۳۰ • نوع مطالعه: پژوهشی



Energy consumption in a sensor node can be divided into two parts: (a) the energy used for computing; and (b) the energy consumed by the communication. The energy used for the computing consists of three components: (a) sensor energy consumption (data reading), (b) background energy consumption, and (c) energy consumption for processing. The power consumption of the communication includes the following components: (a) energy consumption for data transmission, (b) energy consumption for data receiving, (c) energy consumption for sending messages, and (d) energy consumption for receiving messages. Hence, the existence of a model for analyzing energy consumption in a CS-based WSN is necessary. Several models have been developed to analyze energy consumption in a WSN, but there is not a complete model for analyzing energy consumption in a CS-based WSN.

In this paper, we study all energy consumption components mentioned above in a CS-based WSN and present a complete model for energy consumption analysis. This model can optimize the design of CS-based WSNs energy efficiency improvement approach. To evaluate the proposed model, we use this model to analyze energy consumption in the compressive data gathering technique which is a CS-based data aggregation method. Using this model can optimize the design of CS-based WSNs.

Key words: Wireless sensor network, Compressive sensing, Energy model, Compressive data gathering.

است که ابعاد $M \times N$ دارد ($M < N$). این به آن معنی است که طول بردار اندازه (y) نسبت به طول بردار سیگنال هدف (x) بسیار کوچک تر است. این پدیده، تحقق روش حسگری فشرده را به دنبال دارد. اگر فرض کنیم که x سیگنالی تنک با تنکی k باشد، آن گاه معادله $y = \psi x$ را می توان به صورت $y = \psi \phi \alpha$ نوشت که در آن $x = \phi \alpha$ است. در حالت کلی ϕ یک تبدیل پایه (مانند تبدیل موجک یا تبدیل کسینوسی گسسته) است که به صورت یک ماتریس $N \times N$ نشان داده می شود. در واقع x نمایش k -تنک سیگنال α است که از ضرب آن در ماتریس ϕ به دست آمده است. معادله $y = \psi \phi \alpha$ را می توان به صورت $y = A \alpha$ نیز نشان داد، که در آن ماتریس A که به آن ماتریس حسگری گفته می شود، حاصل ضرب ماتریس های تبدیل و اندازه است ($A = \psi \phi \in \mathbb{R}^{M \times N}$). به طور کلی با استفاده از روش کمینه سازی نرم l_1 [6, 7] و یا سایر روش ها، مانند الگوریتم های مبتنی بر OMP [8, 9] می توان بردار داده های اصلی (α) را از روی بردار اندازه (y) به صورت $\min \|\alpha\|_{l_1}; s.t. y = \psi \phi \alpha$ بازیابی کرد. اما دو شرط اساسی برای ماتریس های ψ و ϕ وجود دارد که نقش مهمی را در بازیابی ثابت و پایدار سیگنال حسگری فشرده ایفا می کنند. این دو شرط عبارتند از خاصیت ایزومتري انحصاری (RIP) برای ماتریس A [10] و همدوسی متقابل بین ماتریس های ψ و ϕ [11]. برای تحقق روش حسگری فشرده، M باید از رابطه $M > C \cdot k \cdot \log N \cdot \mu^2(\psi, \phi)$ تبعیت کند. در این رابطه C یک مقدار ثابت بزرگ تر از یک، k عدد تنکی و $\mu(\psi, \phi)$

۱- مقدمه

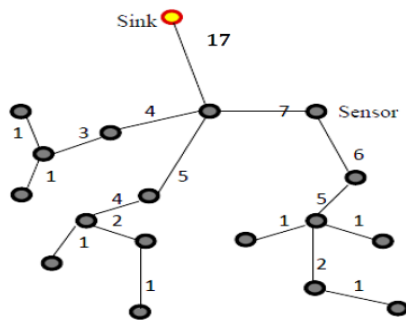
امروزه شبکه های حسگر بی سیم به طور گسترده ای برای اهداف سنسجش و نظارت، از قبیل نظارت های محیطی، مراقبت های نظامی و اتوماسیون صنعتی استفاده می شوند [1, 2]. حسگرها اغلب با باتری هایی تجهیز می شوند که غیرقابل شارژ هستند. بنابراین، بهره انرژی، یک موضوع مهم در شبکه های حسگر بی سیم با رویکرد افزایش عمر مفید شبکه است [3]. مصرف انرژی و الگوکردن آن، موضوعات مهمی در طراحی و پیاده سازی شبکه های حسگر بی سیم هستند که به طراحان شبکه در بهینه سازی انرژی کمک می کنند [4]. مصرف انرژی در یک گره حسگر بستگی به سه عملکرد آن دارد؛ که عبارتند از: حسگری، مخابره (ارسال و دریافت سیگنال ها)، و پردازش سیگنال ها. ارسال و دریافت سیگنال ها بیشترین میزان مصرف انرژی را به خود اختصاص می دهد. به همین دلیل رویکرد پژوهشگران در کاهش مصرف انرژی، بیشتر متوجه کاهش هزینه مخابراتی شبکه است. یکی از روش های کارآمد در کاهش هزینه مخابراتی در شبکه حسگر بی سیم، رویکرد حسگری فشرده است [5]. با به کارگیری روش حسگری فشرده، داده های ارسالی به مقصد کاهش یافته و در نتیجه، مصرف انرژی در شبکه نیز کاهش می یابد.

برای بیان اصول حسگری فشرده، یک سامانه خطی با رابطه $y = \psi x$ را در نظر می گیریم. در این رابطه، x سیگنال هدف است که به صورت برداری به طول N نشان داده شده و y بردار اندازه ای به طول M است. در این سامانه، ψ ماتریس اندازه در روش حسگری فشرده

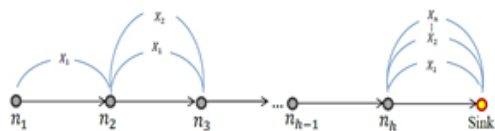
¹-norm minimization

² Orthogonal Matching Pursuit

³ Restricted Isometric Property



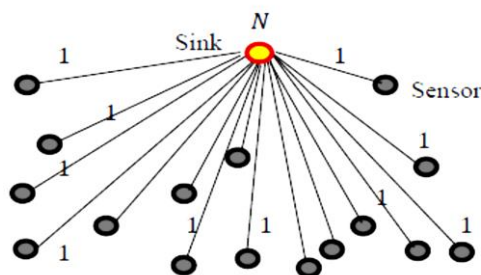
(شکل-۲): مثالی از ارسال داده‌ها به صورت RDG در یک ساختار درختی با ۱۶ گره حسگر
(Figure-2): An example of data transmission in RDG form in tree topology with 16 nodes



(شکل-۳): تجمیع داده در مسیر به صورت RDG
(Figure-3): Data aggregation in the route in RDG form

در پروتکل‌های تجمیع داده در شبکه حسگر که در آنها از روش حسگر فشرده استفاده نمی‌شود، داده‌ها به صورت RDG ارسال می‌شوند. در RDG، تعداد بسته‌های ارسالی در طول مسیر، یکسان نیست و به‌ازای رله شدن بسته‌های داده از یک حسگر به حسگر بعدی در هر مسیر، بسته‌های داده حسگر اولیه در مسیر با بسته‌های حسگر دوم، جمع شده، سپس، بسته‌های حسگر دوم با حسگر سوم در مسیر جمع می‌شود و این موضوع به همین ترتیب ادامه می‌یابد تا مجموع همه بسته‌ها به مقصد برسند. اما به‌کارگیری روش حسگر فشرده، می‌توان با ارسال داده‌هایی که همگی دارای اندازه یکسان هستند، تعداد بسته کمتری را به مقصد فرستاد. روش تجمیع داده‌های فشرده (CDG)^۲ [12] برای تجمیع داده در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با مقیاس بزرگ معرفی شد. در شبکه‌های حسگر با مقیاس بزرگ که ارسال داده‌های قرائت‌شده به مقصد، در مسیرهای چند-جهشی انجام می‌شود، با به‌کارگیری این روش، می‌توان با ارسال داده‌هایی که همگی دارای اندازه یکسان M هستند، علاوه بر متعادل ساختن بار در شبکه، تعداد بسته کمتری را به مقصد فرستاد. شاخص M نشان‌دهنده اندازه بردار فشرده شده از داده‌های قرائت‌شده توسط حسگرها است که بر اساس الگوهای مختلف سیگنال حسگر فشرده، که در بخش بعد به معرفی آن‌ها خواهیم پرداخت، به دست آمده است (در اینجا بدون در نظر گرفتن الگوی سیگنال حسگر فشرده، طول بردار فشرده شده را با M نشان می‌دهیم). شکل (۴) مثالی از ارسال داده به روش CDG را در یک ساختار درختی نشان می‌دهد.

ضریب هم‌دوسی بین ماتریس‌های تبدیل و اندازه است. به‌کارگیری روش حسگر فشرده در شبکه حسگر بی‌سیم، منجر به تولید الگوهای مختلفی از سیگنال حسگر فشرده می‌شود. این الگوها بر اساس قرائت‌های مکانی، زمانی، و مکانی-زمانی حسگرها به دست می‌آیند که در بخش‌های بعدی به بیان آن می‌پردازیم. در حالت معمولی که از روش حسگر فشرده استفاده نشده و داده‌ها بدون فشرده‌سازی به مقصد ارسال می‌شوند، بر اساس توپولوژی شبکه، ارسال داده‌ها می‌تواند به صورت مستقیم (توپولوژی ستاره) یا در مسیرهای چندجهشی انجام شود. در توپولوژی ستاره، هر یک از حسگرهای شبکه، یک بسته داده را در هر دوره نمونه‌برداری به طور مستقیم به مقصد ارسال می‌کند. این توپولوژی در شکل (۱) نشان داده شده است.



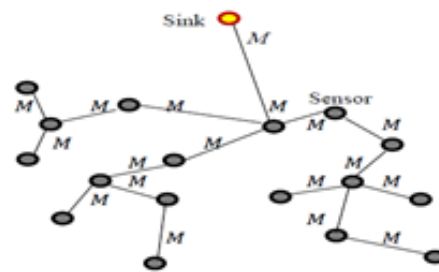
(شکل-۱): ارسال داده در توپولوژی ستاره با روش معمولی
(Figure-1): Data transmission in star topology

اما در شبکه‌های حسگر با مقیاس بزرگ که ارسال داده‌ها به مقصد در مسیرهای چندجهشی رخ می‌دهد، تجمیع ردیفی داده‌ها (RDG)^۱ محقق می‌شود. RDG یک روش مرسوم برای تجمیع داده در شبکه‌های حسگر بی‌سیم در حالت معمولی (بدون استفاده از حسگر فشرده) است. در RDG، گره‌های نزدیک به مقصد نسبت به گره‌هایی که آغاز مسیر واقع شده‌اند، بسته‌های بیشتری را مخابره می‌کنند. این موضوع سبب می‌شود که مصرف انرژی در حسگرها نامتعادل شده و برخی از حسگرها نسبت به حسگرهای دیگر، زودتر باتری خود را از دست بدهند. شکل (۲) مثالی از ارسال داده به صورت RDG را در یک ساختار درختی نشان می‌دهد.

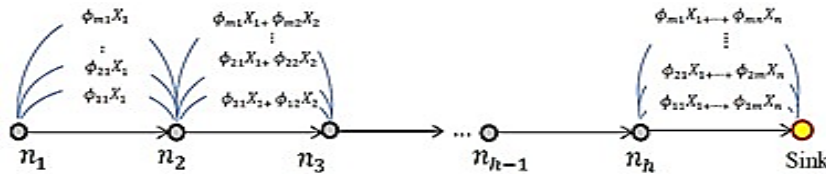
در این حالت اگر مسیری مانند مسیر r را در نظر بگیریم که شامل h حسگر است، برای مخابره داده‌ها به صورت RDG، تعداد ارسال بسته‌ها در مسیر از مرتبه $O(h^2)$ خواهد بود. شکل (۳) مثالی از ارسال داده به صورت RDG را نشان می‌دهد.

² Compressive Data Gathering

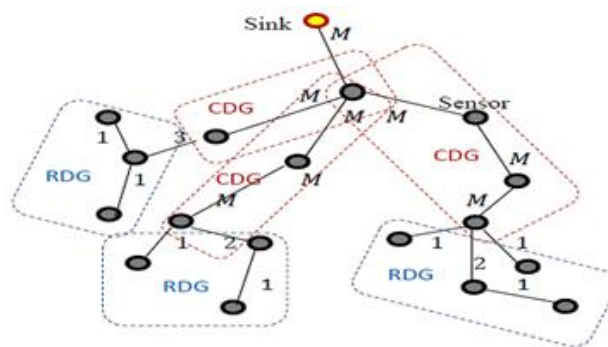
¹ Raw Data Gathering



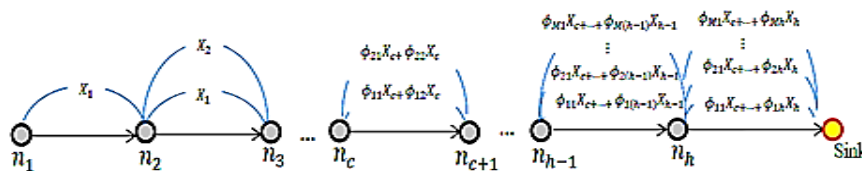
(شکل-۴): مثالی از ارسال داده‌ها به صورت CDG در یک ساختار درختی با ۱۶ گره حسگر ($M < 16$)
 (Figure-4): An example of data transmission in CDG form in a tree topology with 16 nodes



(شکل-۵): ارسال داده در یک مسیر چند-جهشی با h گره حسگر به صورت CDG
 (Figure-5): Data transmission in a multi-hop path with h nodes in CDG form



(شکل-۶): مثالی از HCS در یک ساختار درختی
 (Figure-6): An example of HCS in a tree topology



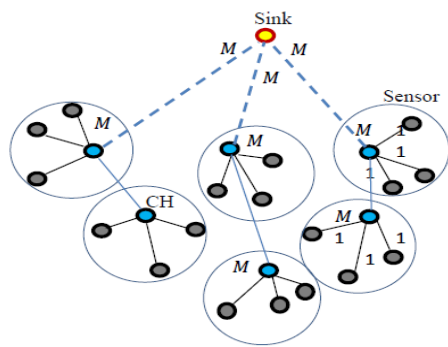
(شکل-۷): مثالی از ارسال داده به صورت HCS در یک مسیر
 (Figure-7): An example of data transmission in HCS form in a route

به‌همین ترتیب، هر گره بالادستی در مسیر، حاصل ضرب‌های خود، یعنی $\phi_{ij}X_j$; ($j=1,2,\dots,h$) را با y_i جمع می‌کند. در نهایت، مقصد i امین جمع، یعنی $y_i = \sum_{j=1}^h \phi_{ij}X_j$; ($i=1,2,\dots,M$) را دریافت خواهد کرد [12]. مقصد، همه M تا y_i در مسیر را دریافت خواهد کرد. اما در روش CDG گره‌های آغاز مسیر، تعداد بسته‌های بیشتری را در قیاس با RDG به مقصد ارسال می‌کنند. بنابراین، کارایی CDG برای گره‌های آغاز مسیر کمتر از RDG است. برای حل این مشکل، روش حسگری

اگر مسیری مطابق شکل (۵) را در نظر بگیریم، در این صورت بر اساس روش CDG، اولین گره در این مسیر یعنی گره n_1 ، قرائت خود (X_1) را در ضرایب ماتریس اندازه M ; ($i=1,2,\dots,M$) ضرب کرده و حاصل ضرب را به گره n_2 ارسال خواهد کرد. گره n_2 نیز به‌همین ترتیب، قرائت خود یعنی X_2 را در ضرایب ϕ_{i2} ; ($i=1,2,\dots,M$) ضرب کرده و حاصل ضرب‌های $\phi_{i1}x_1$ و $\phi_{i2}x_2$ را با هم جمع و این حاصل جمع $(\phi_{i2}x_2 + \phi_{i1}x_1)$ را به گره بعدی ارسال می‌کند.

فصلنامه





(شکل ۸-): مثالی از یک شبکه خوشه‌بندی شده با خوشه‌های یکسان (نقطه چین، مسیرهای چندجهشی را نشان می‌دهد).
 (Figure-8): An example of a clustered network with equal clusters (dashed lines show the multi-hop routes)

در HCDG، حسگرهای درون خوشه‌ها، داده‌ها را به صورت RDG به سرخوشه ارسال می‌کنند، اما سرخوشه‌ها داده‌ها را به صورت CDG در مسیرهای چندجهشی به مقصد می‌فرستند.

ما در این مقاله به ارائه الگویی برای تحلیل مصرف انرژی مبتنی بر حسگری فشرده خواهیم پرداخت. ادامه این مقاله چنین دنبال می‌شود: نخست، در بخش دوم به معرفی الگوهای سیگنال حسگری فشرده می‌پردازیم و سپس، در بخش سوم مؤلفه‌های مصرف انرژی در شبکه حسگر بی سیم مبتنی بر حسگری فشرده را معرفی می‌کنیم. در بخش چهارم، بر اساس مؤلفه‌های مصرف انرژی، الگویی را به منظور تحلیل مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی سیم مبتنی بر حسگری فشرده ارائه خواهیم کرد. در بخش پنجم نیز به ارزیابی کارایی الگوی پیشنهادی پرداخته و در پایان به نتیجه‌گیری از مطالب ارائه شده می‌پردازیم.

۲- الگوهای سیگنال حسگری فشرده

۲-۱- الگوی سیگنال فشرده مکانی^۲

شبکه حسگر بی سیمی را با N گره حسگر و یک گره مقصد در نظر می‌گیریم. با فرض قابل فشرده بودن سیگنال‌های قرائت شده توسط همه حسگرها (N) در بازه زمانی t ، بر طبق نظریه حسگری فشرده، پایه تبدیلی مانند $\phi_s \in \mathbb{R}^N$ وجود دارد؛ به طوری که داشته باشیم: $x^t = \phi_s \alpha_{s,t}$ ؛ که در این رابطه $t = 1, 2, \dots, T$ ؛ $\alpha_{s,t} \in \mathbb{R}^N$ ؛ $(t = 1, 2, \dots, T)$ نشان دهنده برداری شامل N نمونه قرائت شده توسط همه حسگرهای شبکه در بازه زمانی t ، و $\alpha_{s,t} \in \mathbb{R}^N$ بردار ضرایب قابل فشرده شدن با تنگی‌های

^۲ Spatial

فشرده ترکیبی (HCS)^۱ پیشنهاد شد [13]. برای بهبود روش CDG توسعه یافته است. در واقع پیشنهاد اصلی در HCS این است که در تجمیع داده در مسیری مانند r «فقط زمانی از CDG استفاده شود که اندازه داده‌های تجمیع شده بزرگتر از M باشد» و در غیر این صورت از RDG استفاده شود. به عبارت دیگر، در HCS برای گره‌های آغاز مسیر از RDG استفاده شده و برای بقیه گره‌های مسیر، روش CDG استفاده می‌شود. در نتیجه، HCS می‌تواند تعداد ارسال (و دریافت) در مسیر را کاهش دهد. شکل (۶) مثالی از تجمیع داده در روش HCS را در یک ساختار درختی نشان می‌دهد.

اگر در HCS مسیری مانند شکل (۷) را که در آن تعداد h حسگر قرار دارد، در نظر بگیریم، در این صورت ارسال داده تا گره c ($c \leq M$) به صورت RDG و از گره c تا h به بعد (تا گره h) به صورت CDG خواهد بود. اما به کارگیری روش HCS در شبکه‌های حسگر بزرگ که درصد گره‌های برگ در آنها زیاد است، موجب می‌شود که تعداد ارسال به صورت RDG که تابعی از این درصد است، نیز افزایش یافته و در نتیجه، باعث افزایش هزینه مخابراتی شود.

برای مقابله با افزایش هزینه مخابراتی در HCS، روش دیگری با نام تجمیع سلسله‌مراتبی داده‌های فشرده (HCDG)^۲ پیشنهاد شده است [13]. در HCS، حسگری فشرده روی درخت مسیریابی اعمال می‌شود، اما روش‌های خوشه‌بندی مزایای بیشتری، از جمله کاهش میزان خطا و متعادل ساختن بار ترافیکی نسبت به مسیریابی درختی دارند. در روش HCDG ناحیه حسگری خوشه‌بندی می‌شود و به این ترتیب، در هر خوشه، از ماتریس با اندازه کوچکتری استفاده شده و می‌توان آن را جایگزین ماتریس اندازه کل شبکه نمود. تعداد ارسال در HCDG تابعی از نرخ فشرده‌سازی در خوشه‌هاست. بنابراین، الگوریتم خوشه‌بندی می‌تواند به طور مؤثری روی کارایی HCDG اثرگذار باشد. در ساختار خوشه‌بندی، اندازه خوشه‌ها می‌تواند یکسان و یا غیریکسان باشد و تعداد حسگرهای یکسان یا غیریکسانی را نیز در خود جای دهند. در ساختار خوشه‌بندی، در هر دوره نمونه برداری یکی از حسگرهای هر خوشه به عنوان حسگر سرخوشه (CH) انتخاب می‌شود. سرخوشه‌ها وظیفه تجمیع و ارسال داده به مقصد را بر عهده دارند. شکل (۸) مثالی از یک شبکه حسگر با خوشه‌بندی یکسان را نشان می‌دهد.

^۱ Hybrid Compressive Sensing

^۲ Hierarchical Compressive Data Gathering

$\alpha_s =$ در حوزه مکان است. با تعریف k_t مکان سیگنال X را می توان به صورت $X^T = \phi_s \alpha_s$ نشان داد. به عبارت دیگر، خواهیم داشت: $[x^1, \dots, x^T] = \phi_s [\alpha_{s,1}, \dots, \alpha_{s,T}]$ اگر فرض کنیم که تعداد $m_t < N$ اندازه از نمونه ها در هر بازه زمانی $t = 1, 2, \dots, T$ جمع آوری شده باشند، آنگاه خواهیم داشت: $y^t = \psi_s x^t$ که $y^t \in \mathbb{R}^{m_t}$ نشان دهنده بردار اندازه و $\psi_s \in \mathbb{R}^{m_t \times N}$ نشان دهنده ماتریس اندازه است. در این صورت، مجموعه بردارهای اندازه تولید شده در یک دوره نمونه برداری (T) عبارت است از: $Y = \{y^1, \dots, y^T\} = \{\psi_s x^1, \dots, \psi_s x^T\}$. در نتیجه، اندازه تولید شده در هر دوره نمونه برداری برابر خواهد بود با: $M_{Spatial} = \sum_{t=1}^T m_t$. بنابراین، الگوی سیگنال فشرده مکانی به صورت زیر تعریف خواهد شد:

$$Y = ; Y \in \mathbb{R}^{M_{Spatial}} \quad (1)$$

$\psi_s X$

۲-۲- الگوی سیگنال فشرده زمانی^۱

اگر فرض کنیم سیگنال $x_i \in \mathbb{R}^T ; (i = 1, 2, \dots, N)$ نشان دهنده برداری شامل T نمونه قرائت شده توسط حسگر i ام است، در حوزه زمان قابل فشرده شدن باشد، آنگاه طبق نظریه حسگری فشرده، تبدیل پایه ای مانند $\phi_T \in \mathbb{R}^{T \times T}$ وجود دارد به طوری که: $x_i = \phi_T \alpha_{T,i}$ ، $i = 1, 2, \dots, N$ در این رابطه $\alpha_{T,i} \in \mathbb{R}^T$ بردار ضرایب قابل فشرده شدن با تنگی k_i برای حسگر i ام در حوزه زمان است. با تعریف $\alpha_T = [\alpha_{T,1}, \alpha_{T,2}, \dots, \alpha_{T,N}]$ می توان سیگنال X را با تبدیل در حوزه زمان به صورت $X = \phi_T \alpha_T$ نشان داد: $X = [x_1, \dots, x_N] = \phi_T [\alpha_{T,1}, \alpha_{T,2}, \dots, \alpha_{T,N}]$. هر حسگر i ، بردار اندازه $y_i \in \mathbb{R}^{m_i}$ به طول $m_i < T$ را توسط ماتریس اندازه $\psi_i \in \mathbb{R}^{m_i \times T}$ به ابعاد $m_i \times T$ به صورت $y_i = \psi_i x_i$ تولید می کند. در این حالت اندازه های ارسال شده در شبکه حسگر بی سیم عبارتند از:

$$Y = \{y_1, \dots, y_N\} = \{\psi_1 x_1, \dots, \psi_N x_N\} \quad (2)$$

بنابراین، مجموع کل اندازه قرائت های زمانی حسگرها که بر مبنای روش حسگری فشرده، در هر دوره نمونه برداری T فشرده سازی شده اند برابر است با: $M_{Temporal} = \sum_{i=1}^N m_i$. بنابراین، الگوی سیگنال فشرده زمانی به صورت زیر تعریف خواهد شد:

$$Y = \psi_T X ; Y \in \mathbb{R}^{M_{Temporal}} \quad (3)$$

۲-۳- الگوی سیگنال فشرده مکانی-زمانی^۲

داده های قرائت شده از پدیده های طبیعی، اغلب در حوزه های زمان و مکان، همبستگی نشان می دهند [14].

¹ Temporal
² Spatio- Temporal



(مانند موقعیت مکانی و میزان انرژی باقی مانده در گره حسگر) در شبکه ارسال می کنند. شکل (۱۰) مؤلفه های مصرف انرژی را در گره حسگر نشان می دهد.



(شکل - ۱۰): مؤلفه های مصرف انرژی در گره حسگر

(Figure-10): Energy consumption components in a sensor node

۳-۱- انرژی مصرفی گره بابت محاسبه

انرژی مصرفی بابت محاسبه در هر گره حسگر را می توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$E_{cmp} = E_{sen} + E_{bkg} + E_{prs} \quad (5)$$

در این رابطه E_{sen} انرژی مصرفی بابت حسگری، E_{bkg} انرژی مصرفی پس زمینه (انرژی مصرفی واحد پردازش مرکزی (CPU) در حالت آماده به کار^۳) و E_{prs} انرژی مصرفی بابت پردازش سیگنال است. انرژی مصرفی بابت حسگری را می توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$E_{sen} = B P_{sen} T_{opr} \quad (6)$$

در این رابطه P_{sen} توان مصرفی بابت حسگری است که شامل توان مصرفی در CPU، به علاوه توان مصرفی در مدارهای حسگر است. توان مصرفی بابت حسگری، توانی است که برای قرائت سیگنالی به طول B بایت تلف می شود. داده ای به طول B بایت، نیاز به B اجرای CPU دارد. در این رابطه T_{opr} مدت زمان اجرای یک دستورالعمل (دستورکار^۴) در CPU است.

استفاده از روش حسگری فشرده، تأثیری در انرژی مصرفی گره بابت حسگری ندارد. اما انرژی مصرفی بابت پردازش سیگنال با به کارگیری روش حسگری فشرده در شبکه ای با N حسگر که بردار اندازه فشرده شده ای به طول M (بدون در نظر گرفتن الگوی سیگنال فشرده شده) را تولید می کند، از رابطه زیر به دست می آید [20]:

$$E_{prs} = N \epsilon_{mrd} + M N \epsilon_{add} + M \epsilon_{mwr} \quad (7)$$

در این رابطه ϵ_{mrd} ، ϵ_{add} و ϵ_{mwr} به ترتیب عبارتند از: انرژی مصرفی (به ازای بیت) بابت خواندن، جمع کردن و نوشتن در حافظه واحد پردازش مرکزی (CPU). در روش حسگری فشرده، تعداد عملیات پردازش سیگنال را می توان از رابطه زیر به دست آورد:

I_N یک ماتریس واحد به ابعاد $N \times N$ است. تحت شرایط حسگری فشرده، بیشینه تعداد اندازه هایی که توسط هر گره ارسال می شود، برابر m_t است ($t = 1, 2, \dots, T$). بنابراین، تعداد کل اندازه های ارسالی به مقصد در شبکه حسگر، در حالت حسگری فشرده مکان-زمان برابر خواهد شد با:

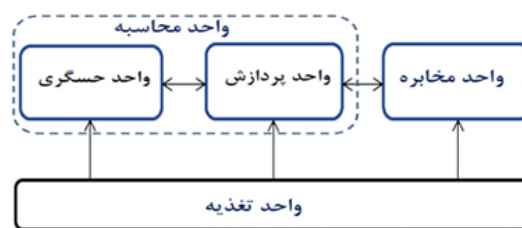
$$M_{Spatio_Temporal} = \sum_{t=1}^T m_t \leq NT$$

در نتیجه، الگوی سیگنال فشرده مکان-زمانی به صورت زیر ارائه می شود:

$$Y = \Psi X; Y \in \mathbb{R}^{M_{Spatio_Temporal}} \quad (4)$$

۳- مؤلفه های مصرف انرژی در شبکه حسگر بی سیم مبتنی بر حسگر فشرده

به طور کلی، هر گره حسگر از چهار واحد: ۱- حسگری، ۲- پردازش، ۳- مخابره و ۴- تغذیه تشکیل می شود [19]. شکل (۹) ساختار کلی یک گره حسگر را نشان می دهد.



(شکل - ۹): ساختار کلی یک گره حسگر [19]

(Figure-9): General structure of a sensor node

بر اساس این ساختار می توان مصرف انرژی را در یک گره حسگر به دو بخش: الف) انرژی مصرفی بابت محاسبه، و ب) انرژی مصرفی بابت مخابره تقسیم بندی کرد. در این تقسیم بندی، انرژی مصرفی بابت محاسبه، شامل سه مؤلفه: ۱- انرژی مصرفی بابت حسگری (قرائت داده ها)، ۲- انرژی مصرفی پس زمینه، و ۳- انرژی مصرفی بابت پردازش است [20]. انرژی مصرفی بابت مخابره نیز شامل مؤلفه های: ۱- انرژی مصرفی بابت ارسال داده، ۲- انرژی مصرفی بابت دریافت داده، ۳- انرژی مصرفی بابت ارسال پیام و ۴- انرژی مصرفی بابت دریافت پیام است. منظور از «داده»، اطلاعاتی است که حسگرها از محیط پیرامونی خود قرائت کرده و منظور از «پیام» اطلاعاتی است که حسگرها برای آگاهی از شرایط خود و سایر حسگرها

² Central Processing Unit

³ Idle

⁴ Background

$$E_{rnd} = (\sum_{(i,j) \in D} w_{ij} E_{Tx_dat} + \sum_{(i,j) \in D} w_{ij} E_{Rx_dat} + \sum_{(i,j) \in D} z_{ij} E_{Tx_msg} + \sum_{(i,j) \in D} z_{ij} E_{Rx_msg}) + \sum_{i \in V} E_{cmp_i} \quad (14)$$

در این رابطه، انرژی مصرفی بابت ارسال یک بسته داده (E_{Tx_dat})، انرژی مصرفی بابت دریافت یک بسته داده (E_{Rx_dat})، انرژی مصرفی بابت ارسال یک بسته پیام (E_{Tx_msg})، و انرژی مصرفی بابت دریافت یک بسته پیام (E_{Rx_msg}) به ترتیب از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$E_{Tx_dat} = (E_{elec} + \epsilon_{amp} d_{ij}^{\gamma}) b_{dat} \quad (15)$$

$$E_{Rx_dat} = E_{elec} b_{dat} \quad (16)$$

$$E_{Tx_msg} = (E_{elec} + \epsilon_{amp} d_{ij}^{\gamma}) b_{msg} \quad (17)$$

$$E_{Rx_msg} = E_{elec} b_{msg} \quad (18)$$

در این روابط b_{dat} اندازه بسته داده، b_{msg} اندازه بسته پیام (بر حسب بیت) و d_{ij} فاصله بین دو گره i و j بر حسب متر است. اگر d_{ij} بزرگ‌تر یا مساوی با d_0 باشد در این صورت $\gamma = 2$ و ϵ_{amp} نیز نشان‌دهنده شاخص ارسال در الگوی انتشار فضای آزاد (ϵ_{fs}) خواهد بود. اگر d_{ij} کوچک‌تر از d_0 باشد، آنگاه $\gamma = 4$ و ϵ_{amp} به عنوان شاخص ارسال در الگوی فیدینگ چندمسیری (ϵ_{mp}) در نظر گرفته خواهد شد. همچنین، E_{cmp_i} در روابط بالا، نشان‌دهنده انرژی مصرفی بابت محاسبه در گره i است. با تعاریف بالا، می‌توان رابطه (14) را به صورت زیر نوشت:

$$E_{rnd} = b_{dat} \sum_{(i,j) \in D} w_{ij} (E_{elec} + \epsilon_{amp} d_{ij}^{\gamma}) + E_{elec} b_{dat} \sum_{(i,j) \in D} w_{ij} + b_{sig} \sum_{(i,j) \in D} z_{ij} (E_{elec} + \epsilon_{amp} d_{ij}^{\gamma}) + E_{elec} b_{msg} \sum_{(i,j) \in D} z_{ij} + \sum_{i \in V} E_{cmp_i} \quad (19)$$

در این رابطه، تعداد بسته داده مخابره شده (w_{ij}) بر اساس روش تجمیع داده، الگوی سیگنال فشرده شده و توپولوژی شبکه تعیین خواهد شد. کل انرژی مصرفی در شبکه را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$E_{Total} = \sum_{r=1}^R E_{rnd} \quad (20)$$

در این رابطه، R نشان‌دهنده «عمر مفید شبکه» است که به صورت «تعداد دور نمونه‌برداری» تعریف می‌شود. در عمل، عمر مفید شبکه را می‌توان به صورت حاصل ضرب $R \times T$ نشان داد که در آن، T زمان یک دوره نمونه‌برداری است. شکل (11) الگوی پیشنهادی مبتنی بر حسگری فشرده را نشان می‌دهد.

$$O_{prs} = MN + N + M \quad (8)$$

بر همین اساس، زمان مورد نیاز برای پردازش سیگنال در این حالت نیز از رابطه $T_{prs} = O_{prs} \times T_{opr}$ به دست خواهد آمد. انرژی مصرفی پس‌زمینه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E_{bkg} = P_{bkg} T_{prs} \quad (9)$$

در این رابطه P_{bkg} توان مصرفی CPU در حالت آماده‌به‌کار و T_{prs} مدت زمان پردازش سیگنال در CPU است. در نتیجه، انرژی مصرفی پس‌زمینه را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$E_{bkg} = P_{bkg} (MN + N + M) T_{opr} \quad (10)$$

۳-۲- انرژی مصرفی گره بابت مخابره

از روابط زیر برای محاسبه انرژی مصرفی بابت مخابره (ارسال و دریافت) یک بسته داده (یا یک بسته پیام) در گره حسگر استفاده می‌کنیم [21]:

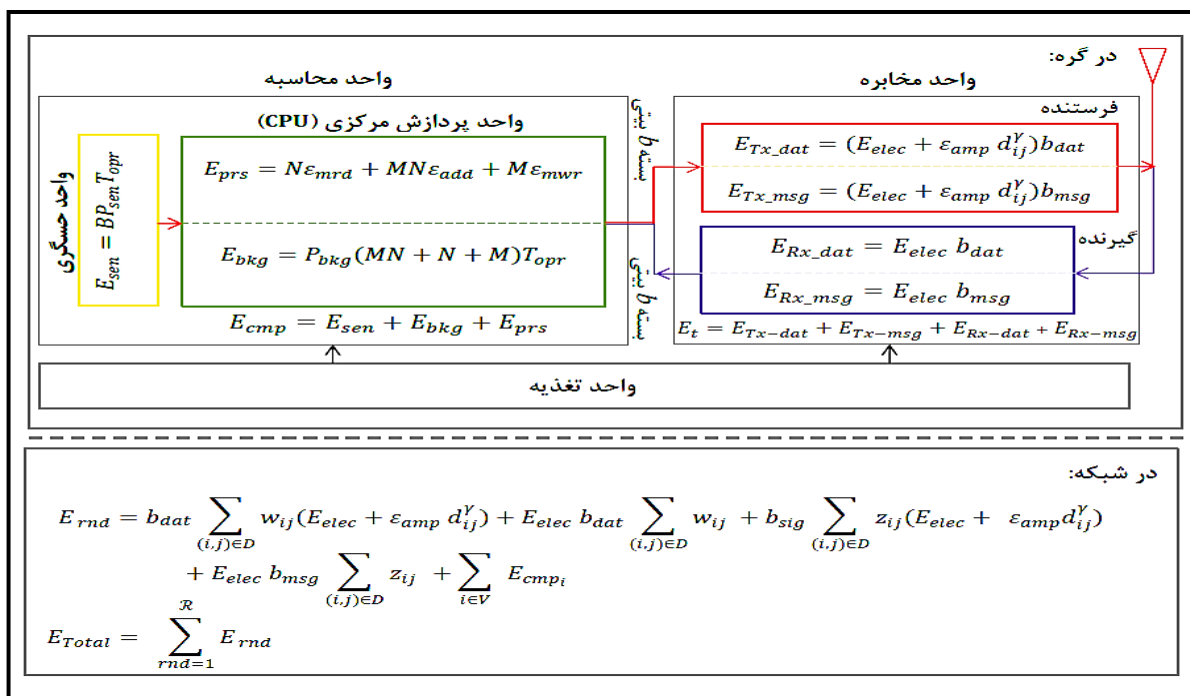
$$E_{Tx}(b, d) = \begin{cases} (E_{elec} + \epsilon_{fs} d^2) b; & d < d_0 \\ (E_{elec} + \epsilon_{mp} d^4) b; & d \geq d_0 \end{cases} \quad (11)$$

$$E_{Rx}(b, d) = E_{elec} b \quad (12)$$

در این روابط، E_{Tx} انرژی ارسال و E_{Rx} انرژی دریافت برای ارسال و دریافت یک بسته b بیتی (داده یا پیام) است که دو حسگر با فاصله d از یکدیگر، ارسال و یا دریافت می‌کنند. همچنین، E_{elec} میزان مصرف انرژی به ازای بیت در مدارهای فرستنده و گیرنده گره حسگر، ϵ_{fs} و ϵ_{mp} به ترتیب شاخص تقویت‌کننده ارسال برای الگوی فضای آزاد و الگوی محو چند-مسیری را نشان می‌دهند. آستانه d_0 نیز از رابطه $d_0 = \sqrt{\epsilon_{fs} / \epsilon_{mp}}$ به دست می‌آید.

۴-۲- الگوی انرژی

انرژی مصرفی شبکه در هر دوره نمونه‌برداری را می‌توان معادل مجموع انرژی‌های مصرفی بابت مخابره و محاسبه در نظر گرفته و به صورت زیر نشان داد:



(شکل-11): الگوی پیشنهادی برای تحلیل مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی سیم مبتنی بر حسگر فشرده
(Figure-11): Proposed model for energy consumption analysis in CS-based WSNs

۵ - ارزیابی الگوی پیشنهادی

باید به این نکته توجه داشت که انرژی مصرفی بابت محاسبه در گره حسگر، بستگی به شاخص‌های حسگرهایی دارد که در شبکه استفاده شده‌اند. به عبارت دیگر، تحلیل مصرف انرژی بابت محاسبه، بر مبنای نوع حسگرها صورت می‌گیرد. شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار متلب^۱ انجام شده و هنگام شبیه‌سازی، شبکه‌ای با کاربرد خاص و در شرایط محیطی ویژه در نظر نبوده، و بنابراین، هیچ اطلاعی از شرایط محیطی و قیود شبکه وجود نداشته‌است. همچنین، برای محاسبه انرژی مصرفی بابت «مخابره» نیز به دلیل عدم اطلاع از کاربرد شبکه حسگر و شرایط محیطی آن، تنها الگوی کانال و افت ناشی از کانال که یک امر کلی و قابل تعمیم است، در نظر گرفته شده‌است. بر این اساس، الگوی کانال بر مبنای فاصله بین حسگرها در مسیر و توان ارسال در فرستنده حسگرها، در دو حالت کلی «فضای آزاد» و «فیدینگ چندمسیری» بررسی و محاسبه شده‌اند. از این رو در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در این مقاله، قیودی که وابسته به شرایط محیطی و نوع حسگرها و کاربرد آنهاست، در نظر گرفته نشده‌است. در این مقاله، به منظور اجتناب از پیچیدگی الگو، از تأثیر عوامل محیطی در کانال مخابراتی، صرف‌نظر شده و در خصوص شرایط کانال، فقط به تأثیر شاخص

^۱ MATLAB

مهم «افت» کانال در دو حالت: «فضای آزاد» و «فیدینگ چندمسیری» پرداخته شده‌است. در روابط مربوط به انرژی مصرفی بابت محاسبه و مخابره، M مقداری معلوم فرض می‌شود که باتوجه به نرخ فشرده‌سازی و الگوی سیگنال حسگر فشرده‌شده تعیین شده‌است. بنابراین، در این قسمت بدون در نظر گرفتن الگوی سیگنال حسگر فشرده، فقط به کاربرد الگوی پیشنهادی برای تحلیل انرژی مصرفی بابت مخابره می‌پردازیم. تحلیل انرژی مصرفی بابت مخابره، مستقل از نوع گره حسگر است و به دو عامل الگوی انتشار (Ψ) و تعداد بسته‌های مخابره‌شده (W_{ij}) بستگی دارد. تعداد بسته‌های مخابره‌شده پیام نیز به ساختار و پروتکل‌های به کار گرفته‌شده در شبکه وابسته است. به‌طور کلی برای تحلیل انرژی مصرفی بابت مخابره کافی است تعداد بسته‌های مخابره‌شده را به منظور قراردادن در رابطه (۱۵) به‌دست‌آوریم.

به‌منظور تحلیل کارایی روش حسگر فشرده در کاهش مصرف انرژی در شبکه، نخست، مصرف انرژی را در حالتی که از حسگر فشرده استفاده نمی‌شود، بررسی می‌کنیم. در این حالت فرض می‌شود که از هیچ رمزگذاری تبدیلی نیز در شبکه استفاده نمی‌شود. در برخی روش‌های تجمیع داده، صرفاً از رمزگذاری تبدیل (که به مفهوم حسگر در حوزه تبدیل، مانند حوزه تبدیل کسینوسی گسسته است) استفاده شده، و در برخی دیگر از

نوع توپولوژی، مجموع تعداد ارسال‌ها در شبکه برابر با جمع ارسال‌ها در مسیرهایی است که در هر دوره نمونه-برداری در شبکه پدید آمده‌اند؛ اما در روش CDG، تجمع داده در مسیری مانند r که شامل h گره حسگر است، از مرتبه $O(Mh)$ است [12] بنابراین، تعداد ارسال بسته‌های داده در مسیر r ام از رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$w_r(CDG) = \sum_{(i,j) \in A} w_{ij} = Mh \quad (23)$$

در این رابطه w_{ij} نشان‌دهنده تعداد ارسال بین دو حسگر جهش i و j در مسیر r ام است. بر اساس توپولوژی شبکه، مجموع ارسال‌ها در کل شبکه برابر با جمع ارسال‌ها در همه مسیرهایی است که در هر دوره نمونه‌برداری پدید آمده‌اند، یعنی: $w_{tot}(CDG) = \sum_{r \in R} w_r(CDG)$ که در این رابطه R تعداد کل مسیرهای پدیدآمده در هر دوره نمونه‌برداری است. تعداد کل اندازه مورد نیاز در مقصد برای بازیابی دقیق سیگنال‌ها، برابر مجموع اندازه‌های تولیدشده در همه مسیرها است. اگر فرض کنیم که تعداد اندازه تولیدشده در همه مسیرها یکسان و برابر M باشد، در این صورت، تعداد کل اندازه دریافتی توسط مقصد در هر دوره نمونه‌برداری برابر $M \times R$ است. نیاز به یادآوری است که در توپولوژی چندجهشی، تعداد دریافت در هر مسیر، همواره یکی کمتر از تعداد ارسال است. زیرا حسگر آغازین در مسیر (حسگر منبع) بسته‌ای را دریافت نمی‌کند. اما سایر حسگرهای مسیر، بسته‌های داده را، هم دریافت و هم ارسال می‌کنند. انتخاب مقدار M بر مبنای مسیر و تعداد حسگر واقع در آن صورت می‌گیرد. CDG در بهترین حالت، با اطمینان می‌تواند در شرایطی که $M = h/5$ است، سیگنال‌های دریافتی توسط مقصد را به دقت بازیابی کند [12, 13]. اما در روش HCS که ترکیبی از CDG و RDG است، تعداد ارسال در مسیری مانند مسیر r ام در هر دوره نمونه‌برداری از رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$w_r(HCS) = \sum_{(i,j) \in A} w_{ij} + \sum_{(k,l) \in A} w_{kl} = \frac{c^2+c}{2} + m(h-c) \quad (24)$$

در این رابطه w_{ij} عبارت از فواصلی است که ارسال در آنها بین گره‌های i و j به صورت RDG صورت گرفته و منظور از w_{kl} فواصلی است که ارسال در آنها بین گره‌های k و l به صورت CDG انجام می‌شود. جمع کل داده‌های ارسالی در هر دوره نمونه‌برداری در شبکه از مجموع داده‌های ارسالی در همه مسیرها به دست خواهد آمد. تأثیر پروتکل‌های مسیریابی در میزان مصرف انرژی، به طور مستقیم به طول مسیر ارسال بسته‌های داده از حسگر

روش‌های ارائه‌شده در خصوص مسیریابی و تجمع داده، نه از تبدیل رمزگذاری و نه از روش حسگری فشرده، استفاده نمی‌شود. به‌منظور این که مقایسه‌ای بین روش‌هایی که از حسگری فشرده در تجمع داده استفاده می‌کنند، با روش‌هایی که نه از روش حسگری فشرده و نه از رمزگذاری تبدیل استفاده می‌کنند، صورت پذیرد، نخست، مصرف انرژی در روش‌های خالص تجمع داده (روش‌های بدون استفاده از رمزگذاری تبدیل و حسگری فشرده)، بررسی و ارزیابی شده و سپس، به مصرف انرژی در روش‌های مختلف مسیریابی و تجمع داده که مبتنی بر حسگری فشرده هستند، پرداخته شده تا به این وسیله نشان داده شود که همواره استفاده از روش حسگری فشرده (فارغ از نوع پروتکل مسیریابی)، موجب بهره‌وری مصرف انرژی در شبکه خواهد شد.

بنابراین، انرژی مصرفی بابت محاسبه، فقط بستگی به انرژی مصرفی بابت حسگری خواهد داشت. به عبارت دیگر، در این حالت انرژی مصرفی عبارت است از: $E_{cmp_Non_CS} = E_{sen}$ که در این رابطه انرژی مصرفی بابت قرائت یک سیگنال B بیتی را می‌توان از رابطه $E_{sen} = BP_{sen} T_{opr}$ به دست آورد. در شبکه حسگر با توپولوژی ستاره که در آن از روش حسگری فشرده استفاده نمی‌شود، اگر i نشان‌دهنده گره‌های حسگر و j نشان‌دهنده گره مقصد باشد، در این صورت تعداد بسته‌های ارسالی به مقصد در هر دوره نمونه‌برداری برابر تعداد کل حسگرهای شبکه خواهد بود. یعنی:

$$w_r(star) = \sum_{(i,j) \in A} w_{ij} = N \quad (21)$$

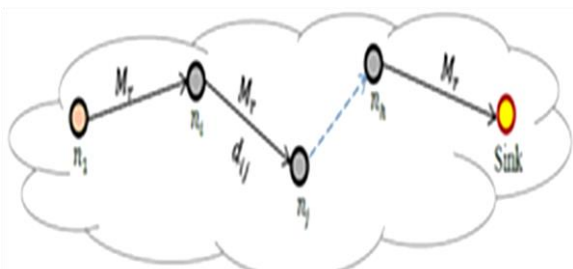
در این رابطه w_{ij} نشان‌دهنده تعداد ارسال بین حسگرهای i و j در مسیر r ام است. در این شبکه، بر اساس نوع توپولوژی، مجموع تعداد ارسال‌ها در شبکه برابر با جمع ارسال‌ها در مسیرهایی است که در هر دوره نمونه-برداری در شبکه پدید آمده‌اند.

اما در همین حالت، اگر شبکه حسگر به صورت چندجهشی داده‌ها را به مقصد ارسال کند، در این صورت بسته‌های داده به صورت RDG به مقصد ارسال خواهند شد. در RDG تعداد بسته‌های ارسال‌شده در مسیری مانند r که شامل h گره حسگر باشد از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$w_r(RDG) = \sum_{(i,j) \in A} w_{ij} = \frac{h^2+h}{2} \quad (22)$$

در این رابطه w_{ij} نشان‌دهنده تعداد ارسال بین حسگرهای i و j در مسیر r ام است. در این شبکه، بر اساس

برای ارزیابی الگوی پیشنهادی، شبیه‌سازی‌ها بر اساس شاخص‌ها و مفروضات مندرج در جدول (۱) صورت می‌پذیرند. در این قسمت برای ارزیابی الگوی پیشنهادی، این الگو را در روش CDG به کار می‌بریم. این روش برای تجمیع داده در شبکه حسگر با پروتکل‌های مسیریابی تخت و نیز مسیریابی سلسله‌مراتبی (خوشه‌بندی ناحیه حسگری) کاربرد فراوانی دارد. در مرجع [30] کاربرد این روش در تجمیع داده با مسیریابی خوشه‌بندی شده مطالعه شده‌است. در این ارزیابی، شبکه حسگر را در نظر می‌گیریم که تعداد N گره حسگر در آن به‌طور تصادفی و یکنواخت توزیع شده‌اند. فرض می‌کنیم که گره‌های حسگر از نوع Mica2 باشند. بنابراین، از شاخص‌های این حسگر برای تحلیل انرژی مصرفی استفاده می‌کنیم [25]. این گره حسگر شامل پردازشگر Atmel Atmega 128L است. مشخصات Mica2 در جدول (۱) نشان داده شده‌است. همچنین شاخص‌های انرژی شبکه را نیز مطابق جدول (۱) در نظر می‌گیریم. براساس شاخص‌های ارسال (ϵ_{mp}) و (ϵ_{fs}) در شبکه، $d_0 = 88m$ خواهد شد. در این ارزیابی از الگوی انتشار فضای آزاد ($\gamma = 2$) استفاده شده‌است. طول بسته‌های داده و پیام را به ترتیب 1024 و 64 بیت در نظر می‌گیریم. در این ارزیابی به نحوه مسیریابی داده‌ها در شبکه نمی‌پردازیم و برای سادگی، تحلیل را در مسیری مانند r انجام می‌دهیم. مطابق شکل (۱۲) مسیری به طول h و میانگین فاصله حسگرها را در این مسیر $d_{ij} = 50m$ متر در نظر می‌گیریم. حسگرهای مسیر، داده‌های فشرده شده را به‌صورت CDG به مقصد ارسال می‌کنند.

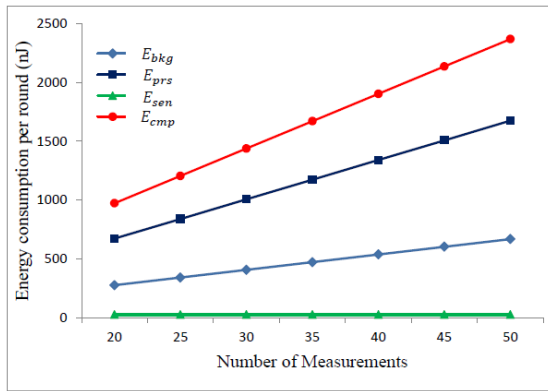


شکل (۱۲): مسیری با h حسگر رله در روش CDG
(Figure-12): A route with h hop sensors in CDG technique

شکل (۱۳) نمودار تغییرات انرژی مصرفی بابت محاسبه E_{cmp} در این مسیر را به‌ازای مقادیر مختلفی از h در یک دوره نمونه‌برداری، همراه با مؤلفه‌های آن نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که انرژی مصرفی بابت حسگری (قرائت داده‌ها) کمترین و انرژی مصرفی بابت پردازش داده، بیشترین میزان مصرف انرژی را به خود اختصاص

منبع به مقصد مرتبط می‌شود. هر چه پروتکل مسیریابی به پیمایش مسیرهای کوتاه‌تری برای رله کردن بسته‌های داده بین حسگرهای واقع در مسیر منجر شود، میزان مصرف انرژی در حسگرهای فرستنده در مسیر کاهش می‌یابد. به‌ازای فواصل بین حسگر فرستنده و حسگر گیرنده، برای مقادیر کمتر از مقدار آستانه (d_0)، از الگوی «فضای آزاد» (توان دوم فاصله: d^2) و برای فواصل بیشتر از مقدار آستانه (d_0)، از الگوی «فیدینگ چندمسیری» (توان چهارم فاصله: d^4) برای محاسبه مصرف انرژی استفاده شده‌است. بنابراین، هر چه پروتکل مسیریابی منجر به پیمایش مسیرهای کوتاه‌تر شود، میزان مصرف انرژی با شدت بیشتری کاهش خواهد یافت.

هدف از نگارش این مقاله، ورود به پروتکل‌های مسیریابی یا ارائه روشی جدید برای مسیریابی نبوده‌است، بلکه هدف اصلی از نگارش این مقاله، تعریف یک الگوی جامع برای محاسبه کلیه انرژی‌های مصرفی در یک شبکه حسگر بی‌سیم است که تجمیع داده در آن براساس حسگری فشرده انجام می‌شود. این الگو، فارغ از این که پروتکل مسیریابی و تجمیع داده در شبکه حسگر به چه صورتی باشد، به‌طور کامل کاربرد داشته و می‌تواند انرژی مصرفی در گره‌ها و در شبکه را محاسبه نماید. همان‌گونه که در متن مقاله تشریح شده‌است، انرژی مصرفی در شبکه، در بخش‌های محاسباتی و مخابراتی ارزیابی می‌شوند. از منظر انرژی مصرفی بابت مخابره، هر چه طول بسته‌ها بزرگتر باشد، انرژی بیشتری برای مخابره مصرف خواهد شد. عوامل دیگری از قبیل فاصله بین حسگر فرستنده و گیرنده نیز در میزان مصرف انرژی بابت مخابره مؤثرند که براساس نوع الگوی کانال (فضای آزاد یا فیدینگ چندمسیری) تأثیر مصرف انرژی بابت مخابره متفاوت خواهد بود؛ اما در خصوص مصرف انرژی بابت محاسبه، هنگامی که از روش حسگری فشرده استفاده می‌شود، شاخص مهم و تأثیرگذار در مصرف انرژی، طول بسته‌های فشرده شده است که براساس الگوی سیگنال حسگری فشرده تعیین شده که در این مقاله آن را با M نشان داده‌ایم. اگر چه با کاهش M انرژی مصرفی بابت محاسبه و مخابره کاهش می‌یابد، بازیابی دقیق سیگنال نیز می‌تواند تحت‌الشعاع قرار گیرد. بنابراین، باتوجه به عدد تنکی سیگنال (k)، انتخاب مقدار مناسبی برای M با برقراری مصالحه‌ای بین بازیابی دقیق سیگنال و بهبود مصرف انرژی انجام خواهد شد.



(شکل-۱۵): انرژی مصرفی بابت محاسبه در مسیری به طول

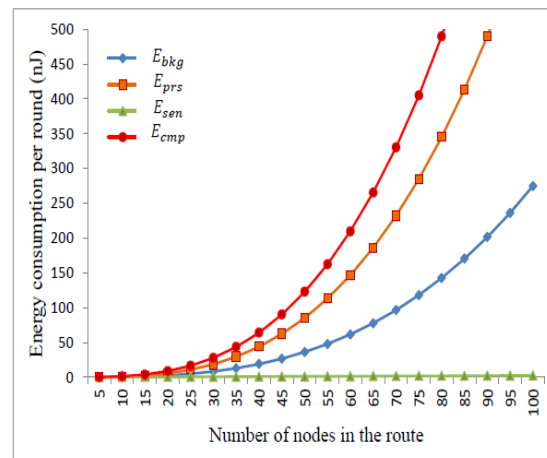
$h=100$ و به ازای مقادیر مختلفی از M_r در CDG

(Figure-15): Computation energy consumption in the route when $h=100$ for various amounts of M_r in CDG technique

مؤید این نتیجه، پژوهش‌هایی است که در خصوص کاهش زمان آماده به کار در CPU صورت گرفته است [26-29]. شکل (۱۴) نمودار تغییرات انرژی مصرفی بابت مخابره را به ازای مقادیر مختلفی از h در یک دوره نمونه برداری همراه با مؤلفه‌های آن نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که انرژی مصرفی بابت ارسال و دریافت پیام در مقایسه با انرژی مصرفی بابت ارسال و دریافت داده بسیار ناچیز است. بنابراین، در اغلب موارد، می‌توان از انرژی مصرفی بابت ارسال و دریافت پیام در شبکه صرف نظر کرد. همچنین، نتایج حاصل از شکل (۱۳) نشان می‌دهد که بیشترین میزان مصرف انرژی بابت مخابره، مربوط به ارسال داده است. شکل‌های (۱۳) و (۱۴) انرژی مصرفی بابت «مخابره» را نشان می‌دهند. نمودارهای این شکل‌ها نشان‌دهنده میزان انرژی مصرفی بابت مخابره است که از فرمول‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۵) تا (۱۸) به دست آمده‌اند. در این روابط به دلیل اینکه میزان مصرف انرژی بابت مخابره با توان دوم یا چهارم فاصله (d^2 یا d^4) رابطه مستقیم دارد، بنابراین، نمودارهای به دست آمده در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) به صورت غیرخطی (نمایی) حاصل خواهند شد. بنابراین، در روش‌های تجمیع داده باید سعی بر این باشد که تعداد بسته‌های ارسالی داده و همچنین، اندازه این بسته‌ها کاهش یابد تا انرژی کمتری بابت مخابره داده مصرف شود. این نتیجه یکی از دلایل استفاده از روش‌های حسگری فشرده در شبکه حسگر بی سیم است.

برای بررسی تأثیر طول بردار اندازه (M_r) در میزان انرژی مصرفی در مسیری مانند r در روش CDG، مسیری به طول ثابت $h=100$ را در نظر می‌گیریم. در این حالت مقدار انرژی مصرفی بابت محاسبه (همراه با

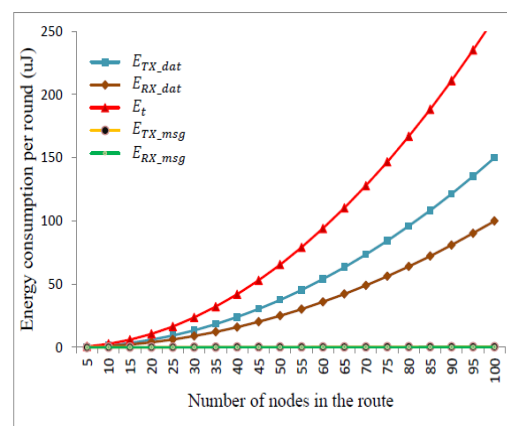
می‌دهند. همچنین آهنگ افزایش انرژی مصرفی بابت پردازش سیگنال، بسیار سریع‌تر از انرژی مصرفی بابت حسگری است. از طرفی مشاهده می‌شود که انرژی مصرفی بابت پس‌زمینه نیز مقدار قابل توجهی از انرژی مصرفی بابت محاسبه را به خود اختصاص می‌دهد. این موضوع بسیار حائز اهمیت است و می‌توان چنین نتیجه گرفت که با به کارگیری پروتکل‌های مناسبی در شبکه، می‌توان مدت زمان آماده به کار بودن CPU را کاهش داد تا به این ترتیب، انرژی مصرفی بابت پس‌زمینه کاهش یابد. اگرچه مصرف انرژی بابت حسگری و پردازش سیگنال اجتناب‌ناپذیر است، با کاهش انرژی بابت پس‌زمینه که مربوط به حالت آماده به کار CPU است، انرژی مصرفی بابت محاسبه به شدت کاهش می‌یابد.



(شکل-۱۳): انرژی مصرفی بابت محاسبه به ازای طول‌های

مختلفی از مسیر و $M_r = 5$ در روش CDG

(Figure-13): Computation energy consumption for various lengths of route and $M_r = 5$ in CDG technique



(شکل-۱۴): انرژی مصرفی بابت مخابره به ازای طول‌های

مختلفی از مسیر و $M_r = 5$ در روش CDG

(Figure-14): Communication energy consumption for various lengths of route and $M_r = 5$ in CDG technique

کمترین مقدار را دارند. افزایش مقدار M_r علاوه بر افزایش انرژی مصرفی بابت محاسبه، موجب افزایش انرژی مصرفی بابت مخابره نیز می شود. برای داده های محیطی، رابطه ای به صورت $3k \leq M \leq 4K$ بین تنگی سیگنال و طول بردار اندازه وجود دارد [13]. از طرفی همان طور که پیش تر بیان شد، CDG در بهترین حالت به ازای $M = \frac{N}{5}$ می تواند بازیابی دقیق سیگنال را تضمین کند. اگر چه با کاهش M انرژی مصرفی بابت محاسبه و مخابره کاهش می یابد، اما بازیابی دقیق سیگنال نیز تحت الشعاع قرار می گیرد. بنابراین، با توجه به عدد تنگی سیگنال (k)، انتخاب مقدار مناسبی برای M با برقراری مصالحه ای بین بازیابی دقیق سیگنال و بهبود مصرف انرژی صورت خواهد پذیرفت. در تحلیل های قبل، برای سادگی در محاسبات، میانگین فاصله بین گره های حسگر در مسیری به طول h برابر ۵۰ متر در نظر گرفته شد. در این قسمت به بررسی تأثیر فاصله بین گره های حسگر در میزان انرژی مصرفی می پردازیم.

مؤلفه های آن) را به ازای مقادیر مختلفی از طول بردار اندازه (M_r) به دست می آوریم. شکل (۱۵) نمودار تغییرات انرژی مصرفی بابت محاسبه در این حالت را نشان می دهد. مشاهده می شود که انرژی مصرفی بابت حسگری همواره مقداری ثابت و مستقل از M_r است. اما انرژی مصرفی بابت پردازش و پس زمینه، با افزایش M_r افزایش می یابد. مشاهده می شود که به ازای همه مقادیر M_r ، انرژی مصرفی بابت حسگری کمترین مقدار و انرژی مصرفی بابت پردازش بیشترین مقدار را دارند. شکل (۱۶) نمودار تغییرات انرژی مصرفی بابت مخابره (و مؤلفه های آن) را به ازای مقادیر مختلفی از M_r در مسیری به طول ثابت h نشان می دهد. شکل های (۱۵) و (۱۶) انرژی مصرفی بابت «محاسبه» در مسیری به طول $h=100$ (شامل ۱۰۰ حسگر) و به ازای مقادیر مختلفی از M_r (طول بسته های داده در مسیر r) را نشان می دهند. نمودارهای این شکل ها از فرمول های (۶) تا (۱۰) به دست آمده اند که با رجوع به این روابط آشکار می شود روابط یاد شده، همگی روابطی خطی هستند. در این حالت نیز انرژی مصرفی بابت ارسال داده بیشترین مقدار و انرژی مصرفی بابت دریافت پیام

(جدول ۱-): شاخص های ورودی شبیه ساز و فرضیات

(Table-1): Simulator parameters and assumptions

فرضیات	شاخص های ورودی شبیه ساز							
	شاخص های شبکه		شاخص های الگوی انرژی			مشخصات گره های حسگر		
حسگرها ثابت هستند	شاخص های شبکه		شاخص های الگوی انرژی			الگوی حسگر: Mica2		
سینک ثابت است						الگوی پردازشگر: Atmel Atmega 128L		
حسگرها موقعیت مکانی خود را می دانند.						شاخص های حسگر و پردازشگر		
حسگرها انرژی باقی مانده را محاسبه می کنند.	تعداد حسگر در مسیر	h	انرژی ارسال یک بیت	E_{elec}	50 nJ/bit	توان مصرفی حسگری	P_{sen}	15.01 mW
توان حسگرها متناسب با فاصله تغییر می کند.	تعداد کل مسیرها	r	ضریب تقویت فرستنده	ϵ_{mp}	0.0013 pJ/bit/m ⁴	توان مصرفی پس زمینه	P_{bkg}	9.6 mW
تمام حسگر مشخصه منحصر به خود را دارند.	میانگین فاصله بین حسگرهای مسیر	d_{ij}	ضریب تقویت فرستنده	ϵ_{fs}	10 pJ/bit/m ²	زمان پردازش	T_{opr}	1/(7.4 × 10 ⁶) Sec.
سینک محدودیت انرژی ندارد.	تنگی سیگنال ها	k	طول بسته داده	b_{dat}	1024 bits	انرژی مصرفی خواندن	ϵ_{mrd}	0.26 nJ
میزان انرژی اولیه در همه حسگرها یکسان است.	طول داده های فشرده شده در مسیر	M_r	طول بسته پیام	b_{msg}	64 bits	انرژی مصرفی جمع کردن	ϵ_{add}	3.30 nJ
حسگرهای مجاور موقعیت یکدیگر را می دانند.	تعداد کل گره های حسگر شبکه	N	برد آستانه	d_o	88 m	انرژی مصرفی نوشتن	ϵ_{mwr}	4.3 nJ

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, vol. 38, pp. 393–422, 2002.
- [2] Z. Xiong, A. Liveris, and S. Cheng, "Distributed source coding for sensor networks," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 21, pp. 80–94, 2004.
- [3] J. Lee, and W. Cheng, "Fuzzy-logic-based clustering approach for wireless sensor networks using energy predication," *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, pp. 2891–2897, 2012.
- [4] M. A. Zahhad, O. Amin, M. Farrag, and A. Ali, "An energy consumption model for wireless sensor networks," *IEEE 5th International Conference on Energy Aware Computing Systems & Applications*, Cairo, Egypt, Dec. 2015.
- [5] J. Haupt, W. Bajwa, M. Rabbat, and R. Nowak, "Compressed sensing for networked data," *Signal Processing Magazine*, vol. 25, pp. 92–101, 2008.
- [6] E. Candes and M. Wakin, "An introduction to compressive sampling," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 25, pp. 21–30, 2008.
- [7] M. B. Wakin, M. F. Duarte, S. Sarvotham, D. Baron, and R. G. Baraniuk, "Recovery of jointly sparse signals from few random," in *Proc. 15th ACM MobiCom*, Beijing, China, pp. 145–156, Sep. 2009.
- [8] J. Tropp and A. Gilbert, "Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 53, pp. 4655–4666, Dec. 2007.
- [9] A. Kulkarni and T. Mohsenin, "Low overhead architectures for OMP compressive sensing reconstruction algorithm," *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 64, pp. 1468–1480, 2017.
- [10] D. L. Donoho, M. Elad, and V. N. Temlyakov, "Stable recovery of sparse over complete representations in the presence of noise," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 1, pp. 6–18, Jan. 2006.
- [11] E. Candes and J. Romberg, "Sparsity and incoherence in compressive sampling," *Inverse Problems*, vol. 23, pp. 969–985, Apr. 2007.
- [12] C. Luo, et al., "Compressive data gathering for large-scale wireless sensor networks," in *Proc. of the 15th annual international conference on Mobile computing and networking (Mobicom)*, pp. 145–156, 2009.
- [13] K. C Lan and M. Z. Wei, "A compressibility-based clustering algorithm for hierarchical compressive data gathering," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, pp. 2550–2562, Apr. 2017.
- [14] B. Ali, N. Pissinou, and K. Makki, "Identification and validation of spatio-temporal associations in wireless sensor networks," in *Proc. SENSORCOMM*, Athens, Greece, pp. 496–501, Jun. 2009.

به همین منظور، مسیری را به طول ثابت $h=100$ در نظر می‌گیریم. فرض می‌کنیم که نرخ فشرده‌سازی در این حالت 5 باشد. با توجه به شاخص‌های انرژی شبکه (مطابق جدول ۱)، بیشینه فاصله بین حسگرها به گونه‌ای فرض شده که الگوی انتشار، الگوی فضای آزاد باشد. شکل‌های (۱۷) و (۱۸) به ترتیب نمودار تغییرات انرژی مصرفی بابت مخابره داده و مخابره پیام را نسبت به تغییرات فاصله بین حسگرهای مسیر در روش CDG نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده از شکل‌های (۱۷) و (۱۸) در می‌یابیم که انرژی مصرفی بابت دریافت داده و پیام، مستقل از فاصله بین حسگرها بوده و افزایش فاصله بین گره‌های مسیر موجب افزایش انرژی مصرفی بابت ارسال داده و پیام می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در شبکه حسگر با مقیاس بزرگ که طول مسیرها نیز افزایش می‌یابد، باید فاصله بین حسگرها را کاهش داد. این امر مستلزم به-کارگیری تعداد حسگرهای بیشتری در شبکه خواهد بود. بنابراین، ضروری است که مصالحه‌ای بین تعداد حسگرهای شبکه و فاصله بهینه بین حسگرها به وجود آورد.

۶- نتیجه گیری

برای طراحی بهینه شبکه‌های حسگر بی‌سیم با رویکرد کاهش مصرف انرژی، شناخت منابع مصرف انرژی و ارائه الگوی مصرف انرژی در این شبکه‌ها ضروری است. تاکنون الگوهای مختلفی برای تحلیل انرژی مصرفی در شبکه حسگر بی‌سیم پیشنهاد شده‌است، اما این الگوها بر مبنای حسگری فشرده نبوده‌اند. از این رو در این مقاله، الگوی کاملی برای تحلیل انرژی مصرفی در شبکه حسگر بی‌سیم مبتنی بر حسگری فشرده ارائه شده‌است. در این مقاله درباره الگوهای سیگنال حسگری فشرده و روش‌های تجمیع داده در شبکه حسگر بی‌سیم بحث شده‌است. در این پیشنهاد منابع مصرف انرژی در شبکه حسگر بی‌سیم مبتنی بر حسگری فشرده، به دو دسته انرژی مصرفی بابت مخابره و انرژی مصرفی بابت محاسبه تقسیم‌بندی شده و به همراه مؤلفه‌های آنها، الگو شده‌اند. برای ارزیابی الگوی پیشنهادی، انرژی مصرفی در روش CDG مبتنی بر حسگری فشرده بر اساس الگوی پیشنهادی بررسی شد. استفاده از این الگو می‌تواند به طراحی بهینه شبکه‌های حسگر بی‌سیم مبتنی بر حسگری فشرده کمک مؤثری نماید.

sensor networks," 10th International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, Maui, HI, USA, 2014.

[28] N. N. Minh and M. K. Kim, "Reducing idle listening time in pipeline-forwarding MAC protocols of wireless sensor networks," IEEE International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), Hanoi, Vietnam, 2016.

[29] S.H. Lee and L. Choi, "ZeroMAC: Toward a zero sleep delay and zero idle listening media access control protocol with ultralow power radio frequency wakeup sensor," International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 13, pp. 1-21, 2017.

[30] M. R. Ghaderi, V. T. Vakili, and M. Sheikhan, "FGAF CDG: fuzzy geographic routing protocol based on compressive data gathering in wireless sensor networks," Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, pp. 1-23, Published online 17 May 2019 (<https://doi.org/10.1007/s12652-019-01314-1>).



محمد رضا قادری هم اکنون

دانشجوی دکتری مهندسی
مخابرات در دانشگاه آزاد اسلامی

واحد تهران جنوب است. وی
مدرک کارشناسی خود را در

رشته مهندسی برق- مخابرات در سال ۱۳۷۱ از
دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی و در سال ۱۳۹۳
مدرک کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی
مخابرات- سیستم از دانشگاه تهران گرفته است.
زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان عبارتند از:
شبکه های حسگر بی سیم و حسگر فشرده.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

st_mr_ghaderi@azad.ac.ir



وحید طباطبای وکیلی استاد

دانشگاه های علم و صنعت ایران و آزاد
اسلامی واحد تهران جنوب است.

نام برده مدرک کارشناسی خود را در
رشته مهندسی برق در سال ۱۳۴۹ از

دانشگاه شریف و در سال ۱۳۵۲ مدرک کارشناسی ارشد
خود را از دانشگاه منچستر انگلستان و در سال ۱۳۵۶
مدرک دکتری تخصصی خود را در رشته مهندسی برق از
دانشگاه بردفورد انگلستان دریافت کرده است. زمینه های
پژوهشی مورد علاقه ایشان عبارتند از: سیستم های سلولی
موبایل، سیستم های CDMA، سیستم های مخابراتی باند
پهن و پردازش و رمزگذاری مکان- زمان.

[15] M. Leinonen and S. Member, "Sequential compressed sensing with progressive signal reconstruction in wireless sensor networks," IEEE Transactions on Wireless Communication, vol. 14, pp. 1622-1635, Mar. 2015.

[16] M. Duarte and R. Baraniuk, "Kronecker product matrices for compressive sensing," in Proc. IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process., Dallas, TX, USA, pp. 3650-3653, Mar. 2010.

[17] M. Mahmudimanesh, A. Khelil, and N. Suri, "Balanced spatio-temporal compressive sensing for multi-hop wireless sensor networks," IEEE 9th Int. Conf. on Mobile Ad hoc and Sensor Systems, Las Vegas, USA, Oct. 2012.

[18] X. Li, X. Tao, and Z. Chen, "Spatio-temporal compressive sensing based data gathering in wireless sensor networks," IEEE Wireless Communications Letters, vol. 7, pp. 198-201, Apr. 2018.

[19] M. A. Zahhad, O. Amin, M. Farrag, and A. Ali, "Survey on energy consumption models in wireless sensor networks," Open Transactions on Wireless Communications, vol. 1, pp. 63-79, 2014.

[20] C. Karakus, A. C. Gurbuz, and B. Tavli, "Analysis of energy efficiency of compressive sensing in wireless sensor networks," IEEE Sensors Journal, vol. 13, pp. 1999-2008, May 2013.

[21] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 1, pp. 660-670, 2002.

[22] C. Zhou, M. Wang, W. Qu, and Z. Lu, "A wireless sensor network model considering energy consumption balance," Mathematical Problems in Engineering, vol. 2018, pp. 1-8, 2018.

[23] A. Ali, M. Abo-Zahhad, and M. Farrag, "Modeling of wireless sensor networks with minimum energy consumption," Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 42, pp. 2631-2639, Jul. 2017.

[24] M. Ahmad Jan, P. Nanda, and X. He, "Energy evaluation model for an improved centralized clustering hierarchical algorithm in WSN," in Proc. International Conference on Wired/Wireless Internet Communication, WWIC, pp. 154-167, 2013.

[25] V. Shnayder, M. Hempstead, B. Chen, G. W. Allen, and M. Welsh, "Simulating the power consumption of large-scale sensor network applications," in Proc. ACM Conf. Embedded Netw. Sensor Syst., pp. 188-200, 2004.

[26] F. Z. Djiroun and D. Djenouri, "MAC protocols with wake-up radio for wireless sensor networks: a review," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 19, pp. 587-618, 2017.

[27] A. Rasul and T. Erlebach, "Reducing idle listening during data collection in wireless

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

vakily@iust.ac.ir



منصور شیخان استاد دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب است. نامبرده مدرک کارشناسی خود را در رشته مهندسی برق- الکترونیک در سال ۱۳۶۷ از دانشگاه فردوسی مشهد

و مدارک کارشناسی ارشد و دکتری تخصصی خود را به ترتیب در سالهای ۱۳۶۹ و ۱۳۷۵ در رشته مهندسی مخابرات از دانشگاه آزاد اسلامی گرفته است. زمینه های پژوهشی موردعلاقه ایشان عبارتند از: سیستم های هوشمند، پردازش سیگنال گفتار، امنیت در شبکه های مخابراتی و شبکه های عصبی.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

msheikh@azad.ac.ir

فصلنامه



سال ۱۴۰۱ شماره ۴ پایانی ۵۴

۲۱۰