

## مسیریابی انرژی آگاه در شبکه‌های حسگر بی سیم با استفاده از الگوریتم جست و جوی هارمونی

مهدی رضایی نژاد<sup>۱</sup>، مجید رحیمی نسب<sup>۲</sup>، سید عبدالمجید موسوی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد نرم افزار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک، گروه کامپیوتر، اراک، ایران

m.rezaeinejad@yahoo.com

<sup>۲</sup> و <sup>۳</sup> استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه لرستان، لرستان، ایران

rahiminasab.m@lu.ac.ir

mousavi.m@lu.ac.ir

**چکیده:** در حال حاضر، مسیریابی انرژی آگاه، یکی از مهم ترین زمینه های تحقیقاتی در شبکه های حسگر بی سیم محسوب می گردد. افزایش طول عمر شبکه، چالش انگیزترین نیاز در این نوع شبکه هاست. هدف این تحقیق، معرفی الگوریتم جست و جوی هارمونی، به عنوان یک الگوریتم فراکتشافی موفق برای مسیریابی در شبکه های حسگر بی سیم، در راستای افزایش طول عمر در این نوع شبکه هاست. برای این منظور، در سفارشی کردن این الگوریتم برای مسیریابی، دو معیار کاهش مصرف انرژی و توزیع مناسب مصرف انرژی بین گره های حسگر که منجر به افزایش طول عمر شبکه می شوند، در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه سازی ها، توانایی این الگوریتم را در یافتن مسیر بهینه و برقراری توازن مناسب بین دو معیار ذکر شده، به خوبی نشان می دهد. همچنین جهت مقایسه روش پیشنهادی با دیگر روش ها در شرایط کاملاً یکسان، یک پیاده سازی با الگوریتم ژنتیک انجام شده است. نتایج مقایسات، ناظر بر عملکرد بهتر الگوریتم جست و جوی هارمونی، نسبت به الگوریتم ژنتیک، در افزایش طول عمر شبکه است.

**واژه های کلیدی:** شبکه های حسگر بی سیم، مسیریابی انرژی آگاه، الگوریتم های فراکتشافی، الگوریتم جست و جوی هارمونی، الگوریتم ژنتیک.

## ۱. مقدمه

پروتکل‌های مسیریابی، افزایش این پارامتر می‌باشد. جهت افزایش طول عمر شبکه می‌بایست علاوه بر کاهش مصرف انرژی، توزیع مناسب مصرف انرژی بین گره‌های حسگر را نیز مد نظر قرار داد؛ لذا در سفارشی کردن<sup>۶</sup> الگوریتم جست‌وجوی هارمونی برای مسیریابی، دو معیار کاهش مصرف انرژی و توزیع مناسب مصرف انرژی بین گره‌های حسگر که منجر به افزایش طول عمر شبکه می‌شوند، در نظر گرفته شده است.

الگوریتم جست‌وجوی هارمونی، یک الگوریتم فرااکتشافی است که اخیراً (۲۰۰۱) توسعه یافته است [۲]. این الگوریتم با الهام از نحوه شکل‌گیری و چگونگی عملکرد یک ارکستر موسیقی به دنبال راه حل بهینه و یا به عبارت ملموس‌تر، بهترین هماهنگی بین اجزای دخیل در راهبری یک پروسه است. نحوه عملکرد این الگوریتم در بخش دوم توضیح داده شده است. پیش از این، از توانایی‌های الگوریتم جست‌وجوی هارمونی در حل مسائلی مانند رنگ‌آمیزی گراف<sup>۷</sup> [۳]، فروشنده دوره‌گرد<sup>۸</sup> [۴] و بهبود پروتکل مسیریابی کوتاه‌ترین مسیر<sup>۹</sup> [۵] توسط نویسندگان این مقاله استفاده شده است. در زمینه شبکه‌های حسگر بی‌سیم، از الگوریتم جست‌وجوی هارمونی برای مسائلی مانند خوشه‌بندی<sup>۱۰</sup> [۶]، پوشش<sup>۱۱</sup> [۷] و مکان‌یابی<sup>۱۲</sup> [۸] استفاده شده، اما تاکنون از توانایی‌های این الگوریتم جهت مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم استفاده نشده است.

این الگوریتم را می‌توان برای حل مسائل بهینه‌سازی گسسته و پیوسته مورد استفاده قرار داد. واضح است که مسئله مورد نظر در اینجا، یک مسئله بهینه‌سازی ترکیبی گسسته است، لذا این الگوریتم برای حل مسئله موجود، باید سفارشی شود.

در این تحقیق، جهت کاهش مصرف انرژی در طول مسیر، با در نظر گرفتن یک الگوی مصرف انرژی مناسب، سعی شده است کوتاه‌ترین مسیر بین گره مبدأ و گره مقصد، البته با کمترین

یکی از ابزارهای کسب اطلاعات محیطی که تحقیقات گسترده‌ای را نیز به خود معطوف کرده، شبکه‌های حسگر بی‌سیم<sup>۱</sup> [۱] است. با وجود پیشرفت‌های صورت‌گرفته در این نوع شبکه‌ها، گره‌های حسگر به تعداد زیاد و اندازه کوچک، هنوز هم برای تأمین انرژی خود، متکی به باتری‌هایی با توان اندک هستند. همچنین معمولاً به دلیل به کارگیری این نوع شبکه‌ها در محیط‌های خشن و غیرقابل دسترس، امکان شارژ مجدد یا تعویض گره‌های حسگر وجود ندارد؛ بنابراین یکی از مهم‌ترین مسائل در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، مسئله مدیریت بهینه انرژی است.

همچنین از آنجا که کارایی شبکه‌های حسگر بی‌سیم، به شدت به طول عمر شبکه<sup>۲</sup> و پوشش شبکه‌ای آن وابسته است، پروتکل‌های ارائه‌شده در این نوع شبکه‌ها، باید افزایش طول عمر شبکه را مورد توجه قرار دهند. بنا به تعریف، مدت زمان به پایان رسیدن انرژی اولین گره از ابتدای شروع به کار شبکه، طول عمر شبکه نامیده می‌شود. جهت افزایش طول عمر شبکه، باید دو معیار کاهش مصرف انرژی و توزیع صحیح مصرف انرژی بین گره‌های حسگر را مد نظر قرار داد. از آنجا که پروتکل‌های مسیریابی، کارایی شبکه را تا حد زیادی تحت تأثیر قرار می‌دهند، نیاز به ارائه الگوریتم‌های مسیریابی انرژی آگاه<sup>۳</sup> برای افزایش طول عمر شبکه از طریق برقراری توازن مناسب بین دو معیار ذکر شده، به خوبی احساس می‌شود.

هدف این تحقیق، معرفی الگوریتم جست‌وجوی هارمونی<sup>۴</sup>، به عنوان یک الگوریتم فرااکتشافی<sup>۵</sup> موفق، برای مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، در راستای افزایش طول عمر در این نوع شبکه‌ها می‌باشد. همان‌گونه که ذکر شد، مهم‌ترین چالش در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، طول عمر شبکه است که هدف نهایی همه پروتکل‌های مطرح‌شده در این نوع شبکه‌ها، از جمله

6. Customize
7. Graph Coloring Problem
8. Traveling Salesman Problem(TSP)
9. Open Shortest Path First(OSPF)
10. Clustering
11. Coverage
12. Localization

1. Wireless sensor networks
2. Life time network
3. Energy aware
4. Harmony Search Algorithm
5. Meta-heuristic algorithm

در ادامه، به معرفی چند تحقیق مشابه در خصوص مسیریابی انرژی آگاه در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با استفاده از الگوریتم‌های فرااکتشافی پرداخته شده است. در [۹]، تحقیقی جهت طراحی یک مسیریابی چندهدفه در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با استفاده از الگوریتم ژنتیک صورت گرفته است. در این مسیریابی، دو معیار انرژی و تأخیر زمانی، قیود در نظر گرفته شده برای مسیریابی‌اند. روش پیشنهادی، یک مسیریابی بلادرنگ را ارائه می‌دهد. در [۱۰]، یک مسیریابی انرژی آگاه در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات مطرح شده است. در این تحقیق، با استفاده از یک الگوریتم ازدحام ذرات چندمرحله‌ای، محدودیت‌هایی مانند اتصال<sup>۵</sup> و همه‌پنخشی<sup>۶</sup> در نظر گرفته شده است. در [۱۱]، روشی دیگر با استفاده از شبکه‌های عصبی ارائه شده است. این تحقیق با استفاده از خوشه‌بندی گره‌های حسگر، سعی در افزایش طول عمر شبکه دارد. در [۱۲ و ۱۳]، مسیریابی چندهدفه در شبکه‌های حسگر بی‌سیم چندرسانه‌ای با هدف نهایی افزایش طول عمر شبکه و با استفاده از الگوریتم ژنتیک مطرح شده است. همچنین در [۱۴]، تلاش شده است یک روش مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با استفاده از یک الگوریتم ترکیبی ژنتیک و اجتماع مورچه‌ها در راستای تعادل مصرف انرژی در کل شبکه ارائه شود.

در تمامی این تحقیق‌ها، سعی شده با استفاده از یک الگوریتم فرااکتشافی و با تعریف یک تابع برازندگی مناسب، اهداف مورد نظر در مسیریابی مانند افزایش طول عمر شبکه، کاهش مصرف انرژی، کاهش تأخیر زمانی و دیگر موارد، تحقق یابد. همان‌گونه که پیش‌تر مطرح شد، هدف اصلی این تحقیق، سفارشی کردن الگوریتم جست‌وجوی هارمونی جهت مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم به منظور توزیع مناسب مصرف انرژی (که منجر به افزایش طول عمر شبکه می‌گردد) است که تاکنون تلاشی در این زمینه صورت نگرفته است.

تعداد گام، مد نظر قرار گیرد. همچنین جهت کنترل توزیع مناسب مصرف انرژی در طول مسیر، به متوسط انرژی باقی‌مانده گره‌ها توجه شده است؛ بنابراین هر چقدر انرژی مصرف‌شده در مسیر، کمتر و متوسط انرژی باقی‌مانده گره‌های شرکت‌کننده در مسیریابی بیشتر باشد، به این معنی است که انرژی (کم) مصرف‌شده بین گره‌های پرانرژی‌تری توزیع می‌شود، نیز انرژی گره‌های حسگر به نحو مطلوب‌تری کاهش می‌یابد و انرژی حسگرها دیرتر تمام می‌شود؛ این امر منجر به افزایش طول عمر شبکه می‌گردد. واضح است که مسیریابی با توجه به این دو معیار مستقل، یک مسئلهٔ بهینه‌سازی چندهدفه<sup>۱</sup> و از جمله مسائل غیر چند جمله‌ای سخت<sup>۲</sup> می‌باشد که برای حل آن می‌توان از روش‌های تقریبی<sup>۳</sup> سود جست.

نیاز به ایجاد توازن مناسب بین کاهش مصرف انرژی و افزایش متوسط انرژی باقی‌مانده گره‌های شرکت‌کننده در مسیریابی، به نحو مؤثری در تابع برازندگی<sup>۴</sup> الگوریتم جست‌وجوی هارمونی مد نظر قرار گرفته شده است. همچنین در پالایش مناسب راه حل‌های محلی، انرژی باقی‌مانده همسایه بعدی و فاصلهٔ تا آن، نیز در نظر گرفته شده است. نحوهٔ به کارگیری این الگوریتم جهت یافتن راه حل‌هایی مناسب برای افزایش طول عمر شبکه، در بخش سوم (روش پیشنهادی) توضیح داده شده است.

نتایج شبیه‌سازی‌ها، توانایی این الگوریتم را در یافتن مسیر بهینه و برقراری توازن مناسب بین دو معیار ذکرشده، به خوبی نشان می‌دهد. نیز جهت سنجش توانایی الگوریتم جست‌وجوی هارمونی برای مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، در مقابل دیگر الگوریتم‌های فرااکتشافی، در شرایط کاملاً یکسان، یک پیاده‌سازی با الگوریتم ژنتیک نیز انجام شده است. نتایج مقایسات، ناظر بر عملکرد بهتر الگوریتم جست‌وجوی هارمونی، نسبت به الگوریتم ژنتیک در افزایش طول عمر شبکه است.

1. Multiple Objective Combinatorial Optimization
2. NP-hard
3. Approximation algorithms
4. Fitness function

5. Connectivity constraint
6. Broadcast constraint

هر کدام از نوازندگان در ارکستر موسیقی، یک متغیر در الگوریتم جست‌وجوی هارمونی است. همان‌گونه که هر نوازنده در یک بازه خاص می‌تواند نت‌ها را اجرا کند، هر متغیر نیز از یک بازه خاص انتخاب می‌شود. هارمونی حاصل‌شده در ارکستر موسیقی، در واقع یک بردار جواب<sup>۲</sup> (راه حل) و تمرین‌های متوالی نوازندگان، تعداد تکرار<sup>۳</sup> در الگوریتم جست‌وجوی هارمونی می‌باشد. همان‌گونه که هر هارمونی در ارکستر موسیقی پس از تولید، می‌بایست از نظر زیبایی‌شناسی بررسی شود، هر راه حل در الگوریتم جست‌وجوی هارمونی نیز باید با تابع برازندگی<sup>۴</sup> مورد ارزیابی قرار گیرد. نوازندگان در هر بار تکرار تمرین، سعی در بهتر کردن هارمونی جدید دارند، به این معنی که هارمونی‌های جدید، می‌بایست از نظر زیبایی‌شناسی از هارمونی‌های پیشین بهتر باشند.

در الگوریتم جست‌وجوی هارمونی، جهت حفظ بهترین راه حل‌های پیشین، از حافظه هارمونی<sup>۵</sup> استفاده می‌شود. این حافظه به صورت یک ماتریس پیاده‌سازی می‌شود که هر سطر آن یک راه حل می‌باشد و درایه‌های آن، متغیرهای (نوازندگان) در نظر گرفته شده برای هر راه حل است؛ بنابراین، تعداد ستون‌های این ماتریس، در واقع ابعاد راه حل را نشان می‌دهد. ستون آخر ماتریس جهت ذخیره مقدار تابع برازندگی هر سطر (راه حل) در نظر گرفته می‌شود. به تعداد سطرهای ماتریس حافظه هارمونی، اندازه حافظه هارمونی<sup>۶</sup> گفته می‌شود. در ادامه به جای عبارت اندازه حافظه هارمونی، از HMS استفاده می‌شود. نمایی از ماتریس حافظه هارمونی در شکل (۱) آورده شده که  $n$  ابعاد راه حل است.

$$HMS \left\{ \begin{bmatrix} \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots \end{bmatrix} \right\}_{HMS \times (n+1)}$$

شکل (۱): نمایی از ماتریس حافظه هارمونی

2. Solution Vector
3. Iteration
4. Fitness function
5. Harmony Memory
6. Harmony Memory Size(HMS)

ادامه مقاله بدین صورت سازمان‌دهی شده است: بخش دوم به معرفی الگوریتم جست‌وجوی هارمونی و بخش سوم به تشریح روش پیشنهادی اختصاص داده شده است. در بخش چهارم، تحلیل خروجی‌های مربوط به شبیه‌سازی‌ها و مقایسه آن با دیگر روش‌ها بررسی شده است. در بخش پنجم نیز، نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای تحقیقات فرارو ذکر شده است.

## ۲. معرفی الگوریتم جست‌وجوی هارمونی

الگوریتم جست‌وجوی هارمونی، ابتدا در سال ۲۰۰۱ میلادی توسط Geem مطرح شد [۲]. اگرچه این الگوریتم، یک الگوریتم نسبتاً جدید است، تاکنون آثار و مزایای آن در کاربردهای گوناگون به اثبات رسیده است. این الگوریتم در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی از جمله توابع بهینه‌سازی، بهینه‌سازی مهندسی، طراحی شبکه توزیع شده آب‌رسانی، مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی، مسیریابی و غیره به کار گرفته شده است. همچنین امکان ترکیب این الگوریتم با دیگر الگوریتم‌ها از قبیل الگوریتم ازدحام ذرات، مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵-۱۷].

مجموعه نوازندگان یک ارکستر موسیقی را در نظر بگیرید. ترکیب مناسب نت‌های اجرا شده توسط هر نوازنده، در نهایت به یک موسیقی زیبا تبدیل می‌شود. هر ترکیب از نت‌های نواخته شده توسط نوازندگان، یک هارمونی نامیده می‌شود. هر هارمونی پس از تولید، باید از نظر زیبایی‌شناسی<sup>۱</sup> بررسی شود، به این معنی که آیا هارمونی حاصل‌شده، همان موسیقی مورد نظر است یا خیر. تمرین‌های متوالی تا زمانی که هارمونی مورد نظر ایجاد شود، ادامه می‌یابد. واضح است که نوازندگان در هر بار تکرار تمرین، سعی می‌کنند از نظر زیبایی‌شناسی، هارمونی بهتری نسبت به هارمونی پیشین تولید کنند. در اینجا سعی شده است هر کدام از توضیحات ذکرشده در خصوص عملکرد ارکستر موسیقی، با اجزای الگوریتم جست‌وجوی هارمونی، متناظر شود.

### 1. Aesthetics

در باره مورد دوم، در یک ارکستر موسیقی، یک نوازنده می تواند نت هایی را که در تمرین های پیشین اجرا کرده، با تغییر جزئی اجرا کند. در موسیقی، این عمل را تنظیم گام<sup>۲</sup> می گویند. به همین صورت، در الگوریتم جست و جوی هارمونی نیز، یک متغیر می تواند مقداری را که قبلاً از طریق پارامتر HMC انتخاب شده، اندکی تغییر دهد. اینکه این تغییر چگونه صورت می گیرد، بستگی به نوع مسئله مورد نظر دارد. به هر حال با توجه به گسسته یا پیوسته بودن مسئله، می توان مقدار مناسبی را به متغیر مورد نظر افزود یا از آن کسر کرد.

در ادامه برای مورد دوم، از کلمه PA استفاده می شود. در واقع PA جهت پالایش جواب های محلی مورد استفاده قرار می گیرد. PA با احتمال نرخ تغییر گام<sup>۳</sup> مورد استفاده قرار می گیرد. در ادامه نوشتار از کلمه PAR استفاده خواهد شد. این مقدار همواره عددی بین صفر و یک در نظر گرفته می شود. کوچک بودن PAR باعث کندی در همگرایی می شود، زیرا موجب می شود زیرفضاهای کوچکی از کل فضای راه حل، مورد جست و جو قرار بگیرد. از طرفی، بزرگ بودن PAR باعث می شود که الگوریتم جست و جو بیشتر به صورت تصادفی عمل کند. معمولاً  $PAR = [0.1, 0.5]$  در نظر گرفته می شود.

در باره مورد سوم، همان گونه که در یک ارکستر موسیقی، یک نوازنده می تواند به صورت تصادفی نت هایی را اجرا کند، در الگوریتم جست و جوی هارمونی نیز یک متغیر می تواند مقادیری را به صورت تصادفی<sup>۴</sup> برگزیند. در ادامه نوشتار، برای مورد سوم از عبارت تصادفی سازی استفاده می گردد. تصادفی سازی در واقع برای افزایش تنوع راه حل ها مورد استفاده قرار می گیرد. اگرچه PAR نیز نقش مشابهی را ایفا می کند، توسط یک فضای معین محدود شده است و این امر، الگوریتم را به سمت جست و جوی محلی و گیر افتادن در بهینه های محلی هدایت می کند. استفاده از تصادفی سازی، الگوریتم را به سمت یک جست و جوی سراسری و یافتن پاسخ بهینه سراسری می برد.

همان گونه که هر نوازنده در ارکستر موسیقی، سه انتخاب جهت نواختن نت ها دارد که عبارت اند از: ۱. نت های مشهور را دقیقاً از حافظه اش اجرا کند؛ ۲. تا اندازه ای شبیه به نت های مذکور را اجرا کند (با تغییر اندکی در نت ها)؛ ۳. نت های تصادفی ایجاد کند، در الگوریتم جست و جوی هارمونی نیز هر متغیر به سه حالت می تواند انتخاب شود: ۱. استفاده از متغیرهای موجود در حافظه هارمونی؛ ۲. ایجاد اندکی تغییر در متغیرها؛ ۳. ایجاد یک متغیر به صورت تصادفی.

در اینجا سعی می شود توضیحاتی درباره موارد ذکر شده ارائه گردد. در خصوص مورد اول، همان گونه که در یک ارکستر موسیقی، هر نوازنده می تواند نت هایی را که در طول تمرین های گذشته اجرا کرده و از نظر زیبایی شناسی، نسبتاً مناسب بوده اند، دوباره اجرا کند، در الگوریتم جست و جوی هارمونی نیز یک متغیر می تواند مقدار مناسبی را که قبلاً اختیار کرده و در حال حاضر در حافظه هارمونی وجود دارد، انتخاب نماید. ذکر شدنی است که موقعیت هر متغیر در تمام سطوح ماتریس حافظه هارمونی یکسان است؛ بنابراین زمانی که یک متغیر، مورد اول را برمیگزیند، در واقع یکی از متغیرهای موجود در همان ستون حافظه هارمونی انتخاب می گردد.

احتمال انتخاب مورد اول برای متغیرها را نرخ توجه به حافظه هارمونی<sup>۱</sup> می گویند که در ادامه نوشتار به جای آن از کلمه HMCR استفاده می شود. این مقدار همواره عددی بین صفر و یک است. اگر HMCR خیلی کوچک و نزدیک به صفر انتخاب شود، همگرایی به کندی صورت می پذیرد و اگر خیلی بزرگ و نزدیک به یک باشد، راه حل های خوبی حاصل نمی شود. معمولاً  $HMCR = [0.7, 0.95]$  در نظر گرفته می شود. در ادامه این نوشتار، برای مورد اول از کلمه HMC استفاده می شود. HMC تضمین می کند متغیرهای مناسبی که در طول تکرارهای پیشین حاصل شده اند، همواره حفظ می شوند. با مطالعه مورد دوم خواهید دید که این مقادیر حفظ شده، در طول تکرارهای بعدی، احتمالاً به مقادیر مناسب تری تبدیل خواهند شد.

2. Pitch Adjustment(PA)

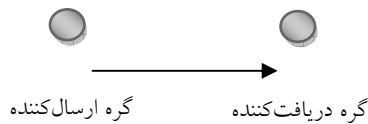
3. Pitch Adjustment Rate(PAR)

4. Randomization

1. Harmony Memory Considering Rate (HMCR)

رادیویی‌اش قرار دارد، انتقال داده داشته باشد. توان حسگرها متغیر و حداکثر برد رادیویی گره‌های حسگر، یکسان است. تمام محاسبات در چاهک انجام می‌شود. چاهک، ثابت و اندازه بسته‌های ارسالی یکسان است.

الگوی مصرف انرژی مطابق [۱۸] و از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.



$$E_r = (E_{elec} * l) + (E_{amp} * l * d^{\alpha}), \quad (1)$$

$$E_R = (E_{elec} * l)$$

که در آن،  $E_r$ ، انرژی مصرفی برای گره ارسال‌کننده اطلاعات است.  $E_{elec}$ ، انرژی لازم برای ارسال یا دریافت یک بیت اطلاعات می‌باشد که به مسافت بستگی ندارد.  $E_{amp}$ ، انرژی لازم جهت تقویت سیگنال ارسالی در طول مسافت مورد نظر است.  $l$ ، طول پیام می‌باشد.  $d$ ، مسافت تا گره دریافت‌کننده اطلاعات است.

$E_R$ ، انرژی مصرفی برای گره دریافت‌کننده اطلاعات می‌باشد. همان‌گونه که پیش‌تر توضیح داده شد، هدف این تحقیق، سفارشی کردن الگوریتم جست‌وجوی هارمونی جهت مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم است به نحوی که منجر به افزایش مهم‌ترین پارامتر در این نوع شبکه‌ها، یعنی طول عمر شبکه شود. همچنین گفته شد که برای افزایش طول عمر شبکه، باید دو معیار کاهش مصرف انرژی و افزایش متوسط انرژی باقی‌مانده گره‌های حسگر شرکت‌کننده در مسیریابی، مورد توجه قرار گیرد. برای این منظور، شبکه حسگر بی‌سیم را به صورت یک گراف و برای هر گره، یک شماره منحصر به فرد در نظر گرفته می‌شود. در ادامه، مراحل روش پیشنهادی توضیح داده شده است.

**پر کردن حافظه هارمونی:** هر سطر از ماتریس حافظه هارمونی را یک مسیر بین مبدأ و مقصد در نظر بگیرید به گونه‌ای که درایه‌های هر سطر، شماره گره‌های گراف باشد. تعداد سطرهای ماتریس حافظه هارمونی نیز به تعداد HMS باشد. ماتریس حافظه هارمونی دارای  $(n+1)$  ستون می‌باشد که  $n$ ، حداکثر طول یک مسیر است. حداکثر طول مسیر در این مسئله می‌تواند به اندازه تعداد کل گره‌های گراف باشد، لذا  $n$ ، تعداد کل

سه مورد ذکر شده در الگوریتم جست‌وجوی هارمونی، به صورت شبه کد زیر خلاصه‌سازی شده‌اند:

```
begin
    Define fitness function , HMCR , PAR & HMS
    Generate Harmony Memory with random
    harmonies
    while ( t < max number of iterations )
        while ( i <= HMS )
            while ( j <= number of variables )
                if (rand < HMCR)
                    Choose a value from HM for
                    the variable j
                    if (rand < PAR)
                        Adjust the value by pitch
                    else Choose a random value
                end if
            end while
        end while
        Accept the new harmony (solution) if
        better
    end while
    Find the current best solution
End
```

نحوه عملکرد الگوریتم جست‌وجوی هارمونی بدین صورت است که ابتدا تابع برازندگی و مقادیر مناسب برای پارامترهای HMCR، HMS و PAR تعیین می‌شود، سپس تمام سطرهای حافظه هارمونی به صورت تصادفی ایجاد می‌گردد و مقدار تابع برازندگی برای هر سطر، محاسبه و در ستون آخر ماتریس حافظه هارمونی ذخیره می‌شود. سپس به تعداد تکرار لازم یا تا زمان رخداد یک شرط خاص، تمام حافظه هارمونی پویش شده و به ازای هر سطر، با توجه به سه جزء اصلی ذکر شده، مقدار مناسبی برای هر درایه (متغیر) تعیین می‌شود.

سپس، اگر مقدار تابع برازندگی این راه حل جدید، از مقدار تابع برازندگی بدترین راه حل موجود در حافظه هارمونی، بهتر باشد، جایگزین آن می‌شود. در نهایت، راه حلی که بهترین مقدار تابع برازندگی را داشته باشد، به عنوان بهترین راه حل موجود شناخته می‌شود.

### ۳. روش پیشنهادی

پیش‌فرض‌ها: یک شبکه حسگر بی‌سیم با گره‌های ثابت را در نظر بگیرید. هر گره حسگر می‌تواند با گره‌هایی که در برد

که در آن، NI حداکثر تعداد تکرار الگوریتم است. این مقدار معادل تعداد تکرار نسل در الگوریتم ژنتیک است. HMS تعداد سطرهای حافظه هارمونی است. Rnd یک عدد تصادفی بین صفر و یک است. HMCR و PAR نیز اعدادی بین صفر و یک هستند که قبلاً تعیین شده‌اند. در شبه کد فوق، به تعداد NI بار همه سطرهای حافظه هارمونی پویش می‌شوند و به ازای هر سطر از حافظه، با استفاده از سه پارامتر تصادفی‌سازی، HMC و PA، یک راه حل جدید تولید می‌شود.

توجه به این نکته مهم است که این راه حل جدید، یک راه حل موقت است که در نهایت با ارضای تابع برازندگی، اگر از بدترین پاسخ موجود در حافظه هارمونی بهتر باشد، جایگزین آن سطر می‌شود و بدین صورت نیست که جایگزین سطر اصلی شود. واضح است که اولین گره راه حل موقت، یعنی گره مبدأ تغییر نخواهد کرد. درایه‌های دوم به بعد در راه حل موقت با استفاده از سه پارامتر تصادفی‌سازی، HMC و PA تولید می‌شوند. در ذیل، توضیحاتی در خصوص هر پارامتر آورده شده است:

- تصادفی‌سازی: این پارامتر دقیقاً مشابه انتخاب یک درایه جهت تولید تصادفی یک مسیر برای پر کردن اولیه حافظه هارمونی است که قبلاً توضیح داده شد، یعنی زمانی که نیاز به تولید تصادفی یک درایه باشد، باید با رعایت دو شرط اساسی، یک درایه تصادفی انتخاب کرد. دقت شود که درایه معادل راه حل موقت در سطر اصلی، نمی‌تواند جزء انتخاب‌ها باشد. در این هنگام ممکن است حالتی به وجود بیاید که به بن‌بست برسیم، یعنی هیچ انتخابی نداشته باشیم که دو شرط اساسی را ارضا کند. در این حالت، یک گام به عقب برمی‌گردیم، یعنی درایه ماقبل را از نو تولید می‌کنیم و به تولید ادامه مسیر می‌پردازیم.
- HMC: فرض کنید می‌خواهیم درایه پنجم راه حل موقت را با استفاده از پارامتر HMC تولید کنیم، برای این کار باید یکی از درایه‌های موجود در ستون پنجم حافظه هارمونی را به صورت تصادفی انتخاب کنیم به طوری که دو شرط اساسی رعایت شود.

گره‌های گراف در نظر گرفته می‌شود. ستون آخر ماتریس، جهت ذخیره‌سازی مقدار تابع برازندگی برای هر سطر می‌باشد.

طبق الگوریتم جست‌وجوی هارمونی، ابتدا باید تمام سطرهای حافظه هارمونی به صورت تصادفی تولید شوند. توجه به این نکته چنان اهمیت دارد که پس از تولید هر سطر، باید دو مورد مسیر بودن سطر و عدم وجود دور در طول مسیر، رعایت شده باشد؛ بنابراین باید بدین صورت عمل کرد: درایه اول را گره مبدأ در نظر می‌گیریم، حال به صورت تصادفی، یکی از گره‌های همسایه را (یعنی گره‌هایی که در برد رادیویی قرار دارند) انتخاب می‌کنیم (شرط اساسی اول). با مد نظر قرار دادن این شرط، مسیر بودن راه حل تضمین می‌شود.

حال گره انتخابی را از مجموعه گره‌های قابل انتخاب جهت تشکیل بقیه مسیر حذف می‌کنیم (شرط اساسی دوم). این شرط از ایجاد دور در مسیر جلوگیری می‌کند. این کار را تا انتخاب شدن گره مقصد ادامه می‌دهیم. چنانچه در حین تولید مسیر، به خاطر رعایت دو شرط اساسی اول و دوم، به بن‌بست رسیدیم و یکی از شرط‌ها قابل اجرا نبود، مسیر حذف، و مسیر جدیدی به جای آن تولید می‌شود. با استراتژی بیان‌شده در فوق، در پایان به تعداد HMS عدد مسیر با طول متفاوت و بدون دور داریم. پس از تولید سطرها، با استفاده از تابع برازندگی، مقدار برازندگی هر سطر تعیین، و در درایه آخر سطر مربوط، ذخیره می‌شود.

تابع برازندگی در رابطه (۲) آمده است:

$$(2) \quad + (\text{انرژی مصرف شده در طول مسیر} / 1) = \text{تابع برازندگی متوسط انرژی گره‌های شرکت‌کننده در مسیریابی}$$

با در نظر گرفتن تابع برازندگی به صورت بیان‌شده، دو معیار کاهش مصرف انرژی و توزیع مناسب مصرف انرژی جهت یافتن راه حل مناسب، در نظر گرفته می‌شوند. ادامه الگوریتم پیشنهادی به صورت زیر است:

```
for (i=0 ; i<NI ; i++)
for (j=0 ; j<HMS ; j++)
for each index in row
{
If Rnd < HMCR Then using HMC
If Rnd < PAR Then using PA
Else
using Randomization
}
```

مقدار آن از بدترین مقدار تابع برازندگی موجود در حافظه هارمونی (که در ستون آخر ذخیره شده‌اند) بهتر باشد، راه حل موقت، جایگزین سطر معادل آن می‌شود.

**بهبود الگوریتم جست‌وجوی هارمونی:** همان‌طور که در توضیحات مربوط به پر کردن اولیه حافظه هارمونی اشاره شد، طبق الگوریتم جست‌وجوی هارمونی، سطرهای حافظه هارمونی به صورت تصادفی تولید می‌شوند. در اینجا با ایجاد تغییری در این قسمت، سعی در بهبود الگوریتم اصلی داریم و آن اینکه انتخاب تصادفی گره بعدی را (البته با رعایت دو شرط اساسی) با احتمال ۰/۵ انجام می‌دهیم و به احتمال ۰/۵ گرهی را به عنوان گره بعدی انتخاب می‌کنیم که بهترین وزن را در بین همسایگان داشته باشد. این امر باعث تولید راه حل‌های اولیه مناسب‌تر با مقدار تابع برازندگی بیشتر می‌شود که موجب تسریع در همگرایی می‌گردد.

#### ۴. شبیه‌سازی و تحلیل خروجی‌ها

برای شبیه‌سازی روش پیشنهادی، از نرم‌افزار مطلب استفاده شده است. شبکه حسگر بی‌سیم را به صورت یک گراف و در فضایی به مساحت ۲۰۰ متر در ۲۰۰ متر در نظر می‌گیریم. حسگرها به صورت تصادفی در این محیط پخش می‌شوند. گره مقصد به صورت ثابت و در مختصات (۱۹۰، ۱۹۰) در نظر گرفته شده است. جهت تعیین فاصله بین گره‌ها از رابطه اقلیدسی استفاده می‌گردد. اطلاعات مربوط به فاصله بین گره‌ها در ماتریسی ذخیره می‌شود. از این ماتریس می‌توان به عنوان ماتریس اتصال جهت آگاهی از برقرار بودن اتصال بین هر دو گره نیز استفاده کرد.

در تمام شبیه‌سازی‌ها، گرافی واحد با تعداد ۷۰ گره در نظر گرفته شده است. همچنین ماتریسی جهت ذخیره میزان انرژی گره‌ها در نظر گرفته شده که پس از هر دور مسیریابی، اطلاعات آن به‌روز می‌شود.

انرژی اولیه گره‌ها به صورت تصادفی بین ۰/۴ تا ۰/۵ ژول در نظر گرفته شده است. مقادیر پیش‌فرض در الگوی مصرف انرژی بدین صورت است:

$$E_{elec} = 50n \text{ J/bit} E_{fs} = 10_p \text{ J/bit/m}^2 l = 4000 \text{ bit}$$

توجه شود که خود درایه مورد نظر نیز جزء گزینه‌های انتخابی است. در این حالت نیز ممکن است به حالت بن‌بست برسیم؛ بنابراین مشابه توضیحات ذکر شده در پارامتر تصادفی‌سازی عمل می‌کنیم.

• PA: پیش از توضیح پارامتر PA، لازم است در اینجا به یک نکته اشاره شود و آن نحوه تخصیص وزن به یال‌های گراف می‌باشد. وزن یال بین دو گره A و گره B از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$\text{انرژی باقی‌مانده گره B} = \frac{\text{وزن یال بین گره A و گره B}}{\text{مسافت بین گره A و گره B}} \quad (3)$$

در این روش وزن‌دهی، انرژی باقی‌مانده گره بعدی، جهت توزیع مناسب مصرف انرژی در نظر گرفته شده است که در نهایت، موجب افزایش طول عمر شبکه می‌شود. همچنین در نظر گرفتن مسافت بین دو گره، موجب کاهش مصرف انرژی می‌گردد. در واقع هرچه وزن یک یال بیشتر باشد، ارزش آن یال نیز بیشتر است.

چنانچه نیاز به تولید یک درایه از طریق پارامتر PA باشد، طبق شبه کد فوق، ابتدا باید درایه را از طریق پارامتر HMC تولید کنیم. حال، درایه تولید شده از طریق پارامتر HMC را به این صورت بهبود می‌بخشیم که باید گرهی جایگزین این گره شود که علاوه بر ارضای دو شرط اساسی، وزن بهتری با درایه قبلی داشته باشد. در واقع، پارامتر PA جهت بهبود نتایج موجود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. از طریق پارامتر PA، توزیع مصرف انرژی مد نظر قرار گرفته شده است که در نهایت به افزایش طول عمر شبکه می‌انجامد. توجه شود که اگر پس از تولید درایه توسط پارامتر HMC، هیچ انتخابی برای PA وجود نداشت، از همان گره تولید شده از طریق HMC استفاده می‌کنیم و به سراغ درایه بعدی می‌رویم.

تولید درایه‌های راه حل موقت تا زمان رسیدن به مقصد، ادامه پیدا می‌کند. پس از آماده شدن راه حل موقت که یک راه حل جدید است، مقدار تابع برازندگی را برای آن محاسبه می‌کنیم. اگر



مشخصات سخت‌افزاری سیستم مورد استفاده جهت شبیه‌سازی عبارت‌اند از:

CPU=2.60GHz Dual-Core, RAM=1 GB

همچنین از پارامترهایی با مقادیر زیر استفاده شده است:

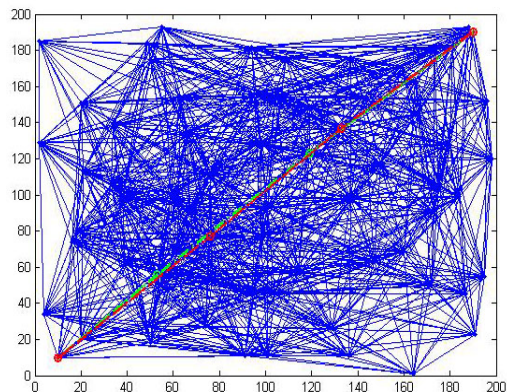
HMCR= [0.5, 0.9], PAR= [0.2, 0.6],

ProbMutation= [0.05, 0.5]

همان‌گونه که پیش‌تر ذکر شد، هدف از این تحقیق، سفارشی کردن الگوریتم جست‌وجوی هارمونی جهت مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم است. چنانچه برای تابع برازندگی الگوریتم جست‌وجوی هارمونی، بدون در نظر گرفتن متوسط انرژی باقی‌مانده گره‌های حسگر و تنها با مد نظر بودن انرژی مصرفی در طول مسیر، از رابطه (۴) استفاده شود، الگوریتم جست‌وجوی هارمونی با موفقیت مشابه یک الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر مانند دایجسترا عمل می‌کند و کوتاه‌ترین مسیر بین گره مبدأ و مقصد را می‌یابد.

(۴) (انرژی مصرف شده در طول مسیر/۱) = تابع برازندگی

نتیجه اجرای الگوریتم جست‌وجوی هارمونی با استفاده از تابع برازندگی فوق و الگوریتم دایجسترا روی گراف نمونه، در شکل (۲) نشان داده شده است. گره مبدأ در مختصات (۱۰، ۱۰) در نظر گرفته شده است.



شکل (۲): اجرای الگوریتم جست‌وجوی هارمونی مانند الگوریتم‌های یافتن کوتاه‌ترین مسیر دایجسترا

مسیر سبز رنگ مربوط به الگوریتم دایجسترا و مسیر قرمز رنگ،

مربوط به الگوریتم جست‌وجوی هارمونی است که از نظر مسافت و تعداد گام با هم برابرند؛ بنابراین، الگوریتم جست‌وجوی هارمونی به خوبی قادر به یافتن کوتاه‌ترین مسیر بین مبدأ و مقصد است و می‌توان از این الگوریتم برای مسیریابی در این نوع شبکه‌ها سود جست.

با در نظر گرفتن تابع برازندگی مطابق رابطه (۴)، تنها مصرف انرژی مد نظر گرفته شده و پارامتر دیگر، یعنی توزیع مناسب مصرف انرژی که در افزایش طول عمر شبکه بسیار تأثیرگذار می‌باشد، نادیده گرفته شده است. برای در نظر گرفتن کاهش مصرف انرژی و توزیع مناسب مصرف آن، با در نظر گرفتن متوسط انرژی باقی‌مانده گره‌های حسگر در تابع برازندگی و استفاده از رابطه (۲)، مجدداً شبیه‌سازی را انجام می‌دهیم. با مقایسه نتیجه اجرای دو حالت پیش‌گفته روی گراف نمونه، اهمیت معیار توزیع مناسب مصرف انرژی بین گره‌های حسگر، به خوبی آشکار می‌شود.

حالت اول، اجرای الگوریتم جست‌وجوی هارمونی روی گراف نمونه، تنها با در نظر گرفتن مصرف انرژی و حالت دوم، سعی در ایجاد توازن بین مصرف انرژی و توزیع مناسب مصرف انرژی بین گره‌های شرکت‌کننده در مسیریابی است. همان‌گونه که ذکر شد، بنا به تعریف، طول عمر شبکه، مدت زمانی است که از ابتدای شروع به کار شبکه، طول می‌کشد تا انرژی اولین گره به پایان برسد.

در این شبیه‌سازی، تعداد مسیریابی‌های مستقل، با در نظر گرفتن مبدأ به صورت تصادفی و ارسال یک بسته اطلاعات را که شامل ۴۰۰۰ بیت است و قبل از اینکه اولین گره از بین برود، طول عمر شبکه در نظر می‌گیریم. نتیجه این مقایسات در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱) مقایسه اجرای الگوریتم جست‌وجوی هارمونی در حالت اول و دوم

۱۳۸۶	حالت اول	طول عمر شبکه
۱۹۱۴	حالت دوم	
۰/۰۹۵۲	حالت اول	متوسط مصرف انرژی پس از ۱۳۸۶ دور مسیریابی (ژول)
۰/۱۰۶۹	حالت دوم	
۰/۰۸۹	حالت اول	انحراف معیار انرژی باقی‌مانده کل گره‌های حسگر پس از ۱۳۸۶ دور مسیریابی
۰/۰۸۰	حالت دوم	

مشخصات گراف، تابع برازندگی و دیگر موارد یکسان است. تنها تفاوت دو روش، نوع الگوریتم فرااکتشافی است که در روشی، الگوریتم جست‌وجوی هارمونی و در دیگر روش، الگوریتم ژنتیک است. مقادیر اولیه پارامترهای این دو الگوریتم در ابتدای بخش آمده است. البته هیچ راه حل سیستماتیکی برای یافتن مقدار بهینه این پارامترها وجود ندارد و تعیین بهینه این مقادیر، خود یک مسئله بهینه‌سازی است؛ بنابراین، این مقادیر با آزمون و خطا تعیین می‌شود [۲۰]. جمعیت اولیه دو الگوریتم نیز یکسان در نظر گرفته می‌شود. تعداد تکرار تولید نسل را برای دو روش، یکسان و برابر عددی بزرگ در نظر می‌گیریم، لذا شرایط مقایسه این دو روش، کاملاً یکسان و تنها تفاوت آن‌ها ساختار الگوریتم مورد استفاده است. حال، دو الگوریتم بر روی گراف نمونه اجرا می‌کنیم و تا زمانی که برای اولین بار، ماکزیمم مقدار تابع برازندگی تولید شود، اجرای برنامه ادامه پیدا می‌کند. متوسط زمان یافتن مسیر بهینه و متوسط تعداد تولید نسل برای دو الگوریتم، در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲): مقایسه سرعت همگرایی الگوریتم جست‌وجوی هارمونی و الگوریتم ژنتیک روی گراف نمونه

الگوریتم	متوسط زمان همگرایی (ثانیه)	متوسط تعداد تولید نسل
جست‌وجوی هارمونی	۰/۸۲	۸۵۶/۲۹
ژنتیک	۱/۴۳	۱۴۱۳/۵۱

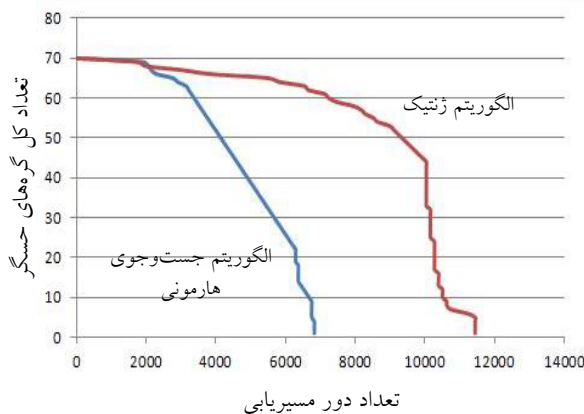
همان‌گونه که دیده می‌شود، الگوریتم جست‌وجوی هارمونی نسبت به الگوریتم ژنتیک، سریع‌تر و با متوسط تعداد تولید نسل کمتر، راه حل بهینه را می‌یابد. مطابق توضیحاتی که در خصوص روش کار الگوریتم جست‌وجوی هارمونی در بخش دوم مطرح شد، در هر بار تکرار تولید نسل، بدترین راه حل‌های موجود در حافظه هارمونی، جای خود را به جواب‌های بهتری می‌دهند و به نحو مؤثری، بهترین راه حل‌های موجود در حافظه هارمونی در نسل‌های آتی حفظ می‌شوند، اما در الگوریتم ژنتیک، سعی می‌شود تعدادی از جواب‌های بهتر به نسل بعدی منتقل شود، لیکن هیچ روش سیستماتیکی جهت تعیین این تعداد وجود ندارد و ممکن است جواب‌های مناسبی در نسل فعلی داشته باشیم که به نسل بعد منتقل نشوند؛ لذا به نظر می‌رسد الگوریتم

برای مقایسه دو حالت ذکرشده، سه معیار طول عمر شبکه، متوسط مصرف انرژی و انحراف معیار انرژی باقی‌مانده کل گره‌های حسگر، پس از مرگ اولین گرهی که در هر کدام از حالت‌ها اتفاق بیفتد، در نظر گرفته شده است. هر چقدر توزیع مصرف انرژی بین گره‌های حسگر، بهتر انجام شود، انحراف معیار انرژی باقی‌مانده گره‌های حسگر، کمتر است. همان‌گونه که دیده می‌شود، در حالت دوم با کاهش انحراف معیار، متوسط مصرف انرژی افزایش یافته است، لذا در این حالت با برقراری توازن مناسب بین دو معیار مصرف انرژی و توزیع مناسب مصرف انرژی، در نهایت طول عمر شبکه افزایش یافته است. در حالت دوم با اینکه متوسط مصرف انرژی بیشتر شده، اما با در نظر گرفتن انرژی گره‌های شرکت‌کننده در مسیریابی، در واقع از گره‌هایی با انرژی بیشتر جهت مسیریابی استفاده شده است. این مسئله، افزایش طول عمر شبکه را به همراه دارد. با توجه به این آزمایش، کارایی تابع برازندگی رابطه (۲) جهت توزیع مناسب مصرف انرژی، کاملاً ملموس است و الگوریتم جست‌وجوی هارمونی با استفاده از این تابع برازندگی، به خوبی می‌تواند مسیر بهینه را بیابد.

نتایج آزمایش‌های فوق، توانایی الگوریتم جست‌وجوی هارمونی جهت مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم و همچنین کارایی تابع برازندگی رابطه (۲) را به خوبی نشان می‌دهد، اما به منظور سنجش توانایی الگوریتم جست‌وجوی هارمونی برای مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، در مقابل دیگر الگوریتم‌های فرااکتشافی، یک شبیه‌سازی با الگوریتم ژنتیک نیز انجام گرفته و نتایج دو الگوریتم با یکدیگر مقایسه شده است. این شبیه‌سازی مطابق [۱۹] انجام شده است. معیار مقایسه دو روش، سرعت همگرایی، طول عمر شبکه، مصرف انرژی و انحراف معیار انرژی باقی‌مانده کل گره‌های حسگر (که معیاری برای سنجش توزیع مناسب مصرف انرژی بین گره‌های حسگر است) است.

برای مقایسه سرعت همگرایی دو الگوریتم جست‌وجوی هارمونی و ژنتیک برای یافتن راه حل بهینه، متوسط زمان اجرای ۱۰۰ بار اجرای مستقل این الگوریتم‌ها را روی گراف نمونه در نظر می‌گیریم. تمامی شرایط آزمایش برای دو روش مانند

جدول (۳) و شکل (۳) گویای این واقعیت‌اند که توزیع مصرف انرژی در الگوریتم جست‌وجوی هارمونی، نسبت به الگوریتم ژنتیک بهتر است. الگوریتم جست‌وجوی هارمونی با صرف انرژی بیشتر، سعی در توزیع مناسب انرژی دارد که در نهایت، منجر به افزایش طول عمر می‌گردد. هر چند الگوریتم جست‌وجوی هارمونی با فدا کردن میزان انرژی بیشتر، سعی در به تأخیر انداختن مرگ اولین گره و افزایش طول عمر دارد. این امر باعث می‌شود با ادامه حیات شبکه و با فرض عدم جایگزینی گره‌های مرده، روند مرگ دیگر گره‌ها با شتاب بیشتری صورت بگیرد. شکل (۴) روند حیات کل شبکه را نشان می‌دهد.



شکل (۴): روند حیات کل شبکه

همان‌گونه که در شکل (۴) نشان داده شده، در الگوریتم جست‌وجوی هارمونی، به دلیل صرف انرژی بیشتر جهت افزایش طول عمر شبکه، از طول عمر کل شبکه کاسته و تعداد گره‌های زنده در هر لحظه کمتر شده است؛ لذا در کاربردهایی مانند پایش دوره‌ای آب و هوا که به تأخیر انداختن زمان مرگ آخرین گره حسگر مهم است، الگوریتم ژنتیک بهتر عمل می‌کند. در عوض برای کاربردهای پایشی یا ردیابی که به تعویق انداختن زمان اولین مرگ، مهم‌تر از زمان آخرین مرگ است، الگوریتم جست‌وجوی هارمونی، انتخاب مناسب‌تری می‌باشد.

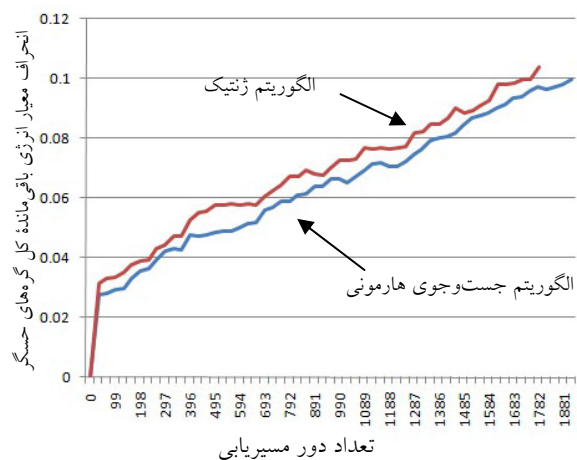
همان‌گونه که در آزمایش قبل ملاحظه شد، الگوریتم ژنتیک برای یافتن جواب بهینه، نیازمند تولید نسل بیشتری است؛ بنابراین در شرایط کاملاً یکسان و با در نظر گرفتن تعداد تولید نسل برابر، نسبت به الگوریتم جست‌وجوی هارمونی، راه‌حلی با کیفیت

جست‌وجوی هارمونی با این تکنیک و با حفظ جواب‌های خوب، در زمان کمتر و با تعداد تکرار نسل کمتری به راه حل بهینه همگرا می‌شود. علاوه بر این موضوع، حجم محاسبات بیشتر الگوریتم ژنتیک نسبت به الگوریتم جست‌وجوی هارمونی در هر بار تکرار تولید نسل، می‌تواند دلیل دیگر این امر باشد.

برای مقایسه دو الگوریتم از نظر طول عمر شبکه، مصرف انرژی و انحراف معیار انرژی باقی‌مانده کل گره‌های حسگر، لازم است دو الگوریتم در شرایط کاملاً یکسان روی گراف نمونه اجرا شوند. برای مقایسه عادلانه لازم است تعداد تولید نسل و جمعیت اولیه در دو الگوریتم، برابر در نظر گرفته شود. جدول (۳) نتیجه اجرا و شکل (۳) توزیع مصرف انرژی پس از هر دور مسیریابی را برای دو الگوریتم نشان می‌دهد.

جدول (۳) مقایسه اجرای الگوریتم جست‌وجوی هارمونی و الگوریتم ژنتیک روی گراف نمونه

۱۹۱۴	جست‌وجوی هارمونی	طول عمر شبکه
۱۷۵۲	ژنتیک	
۰/۱۱۵	جست‌وجوی هارمونی	متوسط مصرف انرژی پس از ۱۷۵۲ دور مسیریابی (ژول)
۰/۱۰۹	ژنتیک	
۰/۰۹۷	جست‌وجوی هارمونی	انحراف معیار انرژی باقی‌مانده کل گره‌های حسگر پس از ۱۷۵۲ دور مسیریابی
۰/۰۹۹	ژنتیک	



شکل (۳): نحوه توزیع مصرف انرژی پس از هر دور مسیریابی

حسگر بی‌سیم سفارشی کرد. همچنین کارآیی تابع برازندگی در نظر گرفته شده جهت کاهش مصرف انرژی و توزیع مناسب مصرف انرژی در آزمایش‌های انجام‌شده قابل ملاحظه است. الگوریتم جست‌وجوی هارمونی قادر است با ایجاد توازن مناسب بین کاهش مصرف انرژی و افزایش متوسط انرژی گره‌های شرکت‌کننده در مسیریابی، مسیر بهینه بین گره مبدأ و گره مقصد را بیابد.

الگوریتم جست‌وجوی هارمونی در شرایط کاملاً برابر نسبت به الگوریتم ژنتیک، راه حل بهینه را سریع‌تر می‌یابد. دلیل این امر، تفاوت ساختاری این دو الگوریتم، جهت تولید نسل بعدی است. همچنین حجم بیشتر محاسبات در الگوریتم ژنتیک نسبت به الگوریتم جست‌وجوی هارمونی، دلیل دیگر این امر است.

همچنین نتیجه شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد الگوریتم جست‌وجوی هارمونی نسبت به الگوریتم ژنتیک در شرایط برابر، طول عمر شبکه را افزایش می‌دهد. الگوریتم جست‌وجوی هارمونی با فدا کردن انرژی مصرفی بیشتر، از گره‌های حسگر مناسب‌تری (پرانرژی‌تری) جهت مسیریابی استفاده می‌کند و باعث توزیع مناسب‌تر مصرف انرژی توسط حسگرها می‌شود. این امر، افزایش طول عمر شبکه را به همراه خواهد داشت. هرچند الگوریتم جست‌وجوی هارمونی در مقایسه با الگوریتم ژنتیک، طول عمر را افزایش می‌دهد، جهت افزایش متوسط انرژی باقی‌مانده گره‌های حسگر شرکت‌کننده در مسیریابی که منجر به توزیع مناسب‌تر انرژی مصرفی و افزایش طول عمر می‌گردد، انرژی بیشتری مصرف می‌کند. این عمل باعث می‌شود سطح کلی انرژی شبکه کاهش یابد و در ادامه حیات شبکه پس از مرگ اولین گره، سرعت مرگ گره‌های حسگر سریع‌تر شود؛ لذا تعداد گره‌های زنده در هر لحظه و نیز عمر کلی شبکه کاهش می‌یابد. این خصلت باعث می‌شود الگوریتم جست‌وجوی هارمونی برخلاف الگوریتم ژنتیک، برای کاربردهایی که در آن‌ها مرگ آخرین گره مهم است، کارآیی مناسبی نداشته باشد. با توجه به اینکه الگوریتم ژنتیک برای یافتن جواب بهینه، نیازمند تولید نسل بیشتری است، بدین سبب در شرایط کاملاً یکسان و با در نظر گرفتن تعداد تولید نسل برابر، نسبت به الگوریتم جست‌وجوی

کمتر (یعنی جواب‌هایی با مقدار تابع برازندگی کمتر) تولید می‌شود؛ لذا راه حل‌های تولید شده توسط الگوریتم جست‌وجوی هارمونی با تعداد تولید نسل مشابه، از نظر مصرف انرژی و توزیع مصرف انرژی مناسب‌ترند که منجر به نتایج فوق می‌گردد.

اگر دو الگوریتم را بدون در نظر گرفتن محدودیت تعداد تولید نسل روی گراف نمونه اجرا کنیم، هر دو روش راه حل‌های مناسبی تولید می‌کند و نتیجه اجرا روی گراف نمونه تقریباً یکسان خواهد بود؛ هر چند همان‌گونه که دیده شد، الگوریتم جست‌وجوی هارمونی سریع‌تر به جواب بهینه همگرا می‌شود.

## ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

در این تحقیق، الگوریتم جست‌وجوی هارمونی به عنوان یک الگوریتم فرااکتشافی موفق، جهت مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم و در راستای افزایش طول عمر در این نوع شبکه‌ها معرفی شد. در سفارشی کردن این الگوریتم برای مسیریابی، دو معیار کاهش مصرف انرژی و توزیع مناسب مصرف انرژی بین گره‌های حسگر که منجر به افزایش طول عمر شبکه می‌گردند، در نظر گرفته شد.

جهت کاهش مصرف انرژی در طول مسیر، با در نظر گرفتن یک الگوی مصرف انرژی مناسب، سعی شد کوتاه‌ترین مسیر بین گره مبدأ و گره مقصد، البته با کمترین تعداد گام، مد نظر قرار گیرد. همچنین جهت کنترل توزیع مناسب مصرف انرژی در طول مسیر، متوسط انرژی باقی‌مانده گره‌ها مد نظر قرار گرفته شد.

نیاز به ایجاد توازن مناسب بین کاهش مصرف انرژی و افزایش متوسط انرژی باقی‌مانده گره‌های شرکت‌کننده در مسیریابی، به نحو مؤثری در تابع برازندگی الگوریتم جست‌وجوی هارمونی مد نظر قرار گرفته شد. همچنین در پالایش مناسب راه حل‌های محلی، انرژی باقی‌مانده همسایه بعدی و فاصله تا آن نیز در نظر گرفته شد. جهت بررسی توانایی‌های الگوریتم جست‌وجوی هارمونی در افزایش طول عمر شبکه، این الگوریتم با الگوریتم ژنتیک مقایسه گردید.

نتیجه شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد الگوریتم جست‌وجوی هارمونی را می‌توان به نحو مناسبی جهت مسیریابی در شبکه‌های

الگوریتم‌های فرااکتشافی مبتنی بر جمعیت، جهت حل مسائل چندهدفه، عملکرد خوبی دارند؛ بنابراین در روش پیشنهادی می‌توان قیود دیگری مانند تأخیر انتها به انتها، پهنای باند و مانند آن را نیز مورد بررسی قرار داد. الگوریتم جست‌وجوی هارمونی، قابلیت موازی‌سازی دارد، لذا در کاربردهای بلادرنگ می‌توان از این توانایی الگوریتم نیز بهره برد. الگوریتم پیشنهادی یک الگوریتم متمرکز است که تمام محاسبات در چاهک انجام می‌شود. سازگار کردن روش پیشنهادی به صورت توزیع‌شده می‌تواند موضوع تحقیق‌های آتی باشد.

هارمونی راه حل‌های با کیفیت کمتری تولید می‌شود که منجر به نتایج فوق می‌گردد. در ادامه، پیشنهادهایی جهت پیشبرد تحقیق و کارهای فرارو ارائه می‌شود. الگوریتم جست‌وجوی هارمونی به دلیل ساختار ساده‌ای که دارد، قابل ترکیب با دیگر الگوریتم‌های فرااکتشافی است [۱۷]؛ لذا به منظور تقویت الگوریتم جست‌وجوی هارمونی جهت حل مسئله حاضر، می‌توان از دیگر الگوریتم‌های فرااکتشافی سود جست. نحوه این ترکیب می‌تواند کاملاً ابتکاری باشد. مثلاً می‌توان از الگوریتم اجتماع مورچه‌ها جهت تعیین مسیرهای اولیه به منظور مقداردهی اولیه حافظه هارمونی استفاده کرد.

## مراجع

- [1] Akyildiz, I. F., Su, W. Y. and Sankarasubramaniam, E.; *Wireless sensor networks: a survey*, Journal of Computer Networks, Vol.38, No.4, pp.393-422, 2002.
- [2] Geem, Z.W., Kim, J.H. and Loganathan, G.V.; *A new heuristic optimization algorithm: Harmony search*, Simulation, Vol.76, No.2, pp.60-68, 2001.
- [3] RezaeiNejad, M., Mousavi, S.A., RahimiNasab, M. and Samiei, H.R; *Solving graph coloring problem using harmony search algorithm*, First CSUT Conference on Computer, Communication and Information Technologies, Tabriz University, Iran, pp. 955-961, 2011.
- [4] RezaeiNejad, M., Mousavi, S.A., RahimiNasab, M. and Samiei, H.R; *Solving traveling salesman problem (TSP) using harmony search algorithm*, The Fifth Iran Data Mining Conference, Amirkabir University of Technology Tehran, Iran, pp.1-7, 2011.
- [5] RezaeiNejad, M., Mousavi, S.A., RahimiNasab, M. and Samiei, H.R; *Improving shortest path protocol using harmony search algorithm*, The Fifth Iran Data Mining Conference, Amirkabir University of Technology Tehran, Iran, pp.1-7, 2011.
- [6] Hoang, D.C., Yadav, P., Kumar, R. and Panda, S.K.; *A Robust Harmony Search Algorithm Based Clustering Protocol for Wireless Sensor Networks*, IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC), pp.1-5, 2010.
- [7] EbrahimNezhad, S., Kamali, H.J. and Moghaddam, M.E.; *Solving K-Coverage Problem in Wireless Sensor Networks Using Improved Harmony Search*, International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA), pp.49-55, 2010.
- [8] Manjarres, D., Ser. J.D., Lopez, S.G., Vecchio, M., Torres, I.L. and Valcarce, R.L.; *On the Application of a Hybrid Harmony Search Algorithm to Node Localization in Anchor-based Wireless Sensor Networks*, International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA), pp.1014 – 1019, 2011.
- [9] Pourkabirian, A. and Haghghat, A.T.; *Energy-aware, delay-constrained routing in wireless sensor networks through genetic algorithm*, 15th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks, pp.1-5, 2007.
- [10] Yuan, P., Ji, C., Zhang, Y. and Wang, Y.; *Optimal Multicast Routing in Wireless Ad Hoc Sensor Networks*, International Conference on Networking. Sensing & Control, pp.367-371, Vol.1, 2004.

- [11] Nehra, N.K., Kumar, M. and Patel, R.B.; *Neural Network Based Energy Efficient Clustering and Routing in Wireless Sensor Networks*, First International Conference on Networks and Communications, pp.34-39, 2009.
- [12] Niansheng, C., Zhi, L., Zongwu, K. and Xiaoshan, G.; *A QoS Multicast Routing Algorithm Based on Genetic Algorithm of Game Selection*, Ninth International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering and Science, pp.308-311, 2010.
- [13] Dong, W., Ke, Z., Chen, N. and Sun, Q.; *QoS Routing Algorithm for Wireless Multimedia Sensor Networks*, 4<sup>th</sup> International Symposium on Advances in Computation and Intelligence, pp.512-524, 2009.
- [14] Xirong, B., Shi, Z. and Dingyu, X.; *Research and Simulation on Genetic Ant Colony Routing in Wireless Sensor Network*, 4<sup>th</sup> International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, pp.1-5, 2008.
- [15] Lee, K.S. and Geem, Z.W.; *A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.194, No. 36–38, pp.3902–3933, 2005.
- [16] *Harmony Search Algorithm*, <http://www.hydroteq.com>
- [17] Hong, L. and Li, L.; *A Novel Hybrid Particle Swarm Optimization Algorithm Combined with Harmony Search for High Dimensional Optimization Problems*, Intelligent Pervasive Computing. IPC. The International Conference on, 2007.
- [18] Heinzelman, W.R., Chandrakasan, A.P. and Balakrishnan, H.; *An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks*, IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol.1, No.4, pp.660-670. 2002.
- [19] Abeysundara, S., Giritharan, B. and Kodithuwakku, S.; *A Genetic Algorithm Approach to Solve the Shortest Path Problem for Road Maps*, Proceedings of the International Conference on Information and Automation, 2005.
- [20] Yang, X.S.; *Book: Introduction to Mathematical Optimization: From Linear Programming to Metaheuristics*, Cambridge International Science Publishing, 2008.