فصلنامه علمی - پژوهشی فرماندهی و کنترل، سال چهارم، شماره سه، پاییز 1399

جایگذاری بهینه گره‌های مرجع به منظور مکان‌یابی خودکار گره‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم

*دکتر مجتبی رمضان‌زاده [1]، سعید قدیری [2] **

تاریخ دریافت: 99/05/01 **تاریخ پذیرش**: 1399/08/12

چکیده

در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مشخص نمودن مکان جغرافیایی دقیق هر گره یکی از پیش‌نیازهای اصلی شروع به کار و ارسال اطلاعات می‌باشد. در یک محیط جنگی، یکی از روش‌هایی که برای قرار دادن گره‌های شبکه حسگر وجود دارد، پرتاب گره‌ها از توپخانه یا هلی کوپتر است که هر گره به صورت تصادفی در یک مکان قرار خواهد گرفت. تجهیز همه گره‌های شبکه به **GPS** برای دانستن اطلاعات مکانی، هزینه بسیار بالایی خواهد داشت. برای کاهش این هزینه تنها کافیست تعدادی از گره‌ها به عنوان گره مرجع به این سیستم مجهز شوند و با استفاده از الگوریتم انتشار باور، بعد از اندازه‌گیری فاصله دو به دو بین گره‌ها (با استفاده از قدرت سیگنال دریافتی) و دریافت اطلاعات مکانی گره‌های مرجع، می‌توان مکان گره‌های بدون **GPS** را تخمین زد.

از آنجاییکه هزینه ساخت گره‌های مرجع زیاد است، تعداد گره‌های مرجع حائز اهمیت خواهد بود. همچنین مکان قرارگیری گره‌های مرجع تاثیر زیادی بر کاهش خطای اجرای الگوریتم خواهد داشت. در این تحقیق با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه با اهداف 1-کاهش خطا و 2-کاهش تعداد گره‌ها، مکان و تعداد گره‌های مرجع تعیین می گردد. نتایج شبیه‌سازی نشان می دهد استفاده از این روش، تعدادی راه حل متفاوت ارائه خواهد کرد که از لحاظ خطا و مصرف انرژی در محیط‌های گوناگون از الگوریتم‌های مشابه بهتر عمل خواهد کرد.

واژگان کلیدی: شبکه‌های حسگر بی‌سیم، مکان‌یابی، الگوریتم انتشار باور، بهینه‌سازی چندهدفه

[1] نویسنده اول (دانشگاه فرماندهی و ستاد ارتش، تهران) moj_ram@yahoo.com

[2] نویسنده مسئول (دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران) saeed.ghadiri@email.kntu.ac.ir

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23]

1. کلیات

1-1. بیان مسئله

نظارت و آگاهی از تغییرات محیطی، همواره یکی از نیازهای اصلی در یک مجموعه است. گره‌های حسگر با توان مصرفی پایین و قیمت ارزان برای رفع این نیاز ساخته و ارائه شده‌اند. این گره‌ها از نظر اندازه بسیار کوچک بوده و می‌توانند با یکدیگر ارتباط برقرار کنند و برای تامین انرژی آنها معمولا از باطری استفاده می‌شود. این خصوصیات باعث شده که برای بکارگیری گره‌های حسگر در یک محیط، به زیرساخت خاصی نیاز نباشد که این امر باعث محبوبیت بالای این شبکه‌ها شده است **[1, 2]**. هر گره حسگر دارای امکاناتی برای اندازه‌گیری مشخصه‌های محیط است. این گره‌ها با جمع‌آوری اطلاعات از میدان جنگ می‌توانند تعداد، نوع و مکان نیروهای دشمن را به اطلاع نیروهای خودی برسانند. این اطلاعات توسط حسگرهای نور، فشار و صدای هر گره دریافت شده و بعد از پیش‌پردازش به مرکز مخابره می‌شود.

در این شبکه‌ها هر گره به صورت مستقل کار خود را انجام می‌دهد ولی در قدرت پردازش، ظرفیت حافظه و منبع تغذیه محدودیت‌هایی وجود دارد. به این دلیل که در این شبکه‌ها منبع انرژی هر گره با استفاده از باطری تامین می‌شود، مدیریت مصرف انرژی حائز اهمیت است. یکی از پرمصرف‌ترین عملکردها در شبکه‌های حسگر، انتقال اطلاعات بین گره‌هاست. این چالش بزرگ موجب شده است که تحقیقات و پژوهش‌ها در حوزه شبکه‌های حسگر، بیشتر با تاکید بر محدودیت انرژی و کاهش انتقال اطلاعات در این شبکه‌ها صورت پذیرد.

مکان‌یابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم برای تخمین مکان گره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در گره‌های حسگر در ابتدا باید مکان جغرافیایی به صورت دقیق مشخص باشد تا پس از انجام وظایف، گزارشی کامل به ایستگاه مرکزی فرستاده شود. یک شبکه حسگر از هزاران گره تشکیل شده است که اتصال **GPS** به هرکدام از آنها پر هزینه می‌باشد. قرار دادن گره‌ها به صورت دستی در مکان‌های مشخص نیز در مواردی که محیط دسترسی به محیط سخت است، امکان‌پذیر نخواهد بود. در نتیجه بهترین راه‌حل محاسبه مکان فعلی هر گره است. در روش‌های مکانیابی، با استفاده از اطلاعات جغرافیایی چند گره مرجع مجهز به **GPS**، مکان همه گره‌ها تخمین زده می‌شود. روش‌های مکان‌یابی موجب می‌شود که پیاده‌سازی و اجرای شبکه‌های حسگر بی‌سیم به صرفه و اقتصادی باشد. **[3]**.

در روش‌های مکان‌یابی، هر گره ابتدا با استفاده از قدرت سیگنال دریافتی از همسایه‌ها، فاصله خود را از همسایه‌هایش اندازه می‌گیرد. با داشتن اطلاعات مکانی گره‌های مرجع و فاصله هر گره با این گره‌ها می‌توان مکان هر گره را تخمین زد.

جایگذاری گره‌های مرجع به صورت تصادفی ممکن است منجر به افزایش خطای مکان‌یابی گره‌ها شود. در نتیجه ارائه روشی برای جایگذاری صحیح این گره‌ها مساله اصلی این تحقیق است.

1-2. اهمیت و ضرورت موضوع تحقیق

کاهش تعداد گره‌های مرجع و جایگذاری صحیح آن‌ها در میدان جنگ می‌تواند منجر به کاهش هزینه و کاهش خطای تخمین مکان‌یابی شود. از این رو ارائه روشی به این منظور می‌تواند افزایش اطمینان از گزارشات شبکه حسگر و کاهش هزینه پیاده‌سازی آنرا در پی داشته باشد.

1-3. هدف تحقیق

هدف اصلی این پژوهش، ارائه روشی است برای کاهش تعداد گره‌های مجهز به سیستم موقعیت‌یاب جهانی که گره‌هایی گران‌قیمت و پرهزینه هستند. در صورت کاهش تعداد این گره‌ها، هزینه پیاده‌سازی شبکه حسگر نیز کاهش چشم‌گیری خواهد داشت. از طرف دیگر با جایگذاری دقیق گره‌های مرجع، خطای مکان‌یابی دیگر گره‌ها نیز کاهش خواهد یافت.

1-4. پیشینه تحقیق

روش‌های مکان‌یابی با کاهش تجهیزات مورد نیاز و حذف **GPS** از گره‌ها، سعی در کاهش هزینه پیاده‌سازی شبکه حسگر دارند. در این روش‌ها هر گره حسگر فاصله خود را از همسایگان خود در شبکه اندازه‌گیری کند. این بدان معنی است که هر گره به یک فرستنده/گیرنده بی‌سیم مجهز بوده و با

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23]

اندازه‌گیری قدرت سیگنال دریافتی یا تاخیر زمانی دریافت سیگنال را فاصله بین خود و دیگر گره‌ها را تخمین می‌زند **[4]**.

روش‌های زیادی برای تخمین مکان گره‌ها ارائه شده است. بسیاری از این روش‌ها از بیان آماری مساله اجتناب کرده‌اند. برخی روش‌ها از تخمین فواصل دیده نشده با اجرای تجانس چند بعدی **[5]**، تابش چندتایی**[6]** و دیگر تکنیک‌ها استفاده کرده‌اند. در روشی دیگر رتبه ماتریس فاصله را کاهش می‌دهند **[7]**. هرچند این الگوریتم‌ها یک بیان آماری از مساله ارائه نمی‌دهند روش‌های کاهش مربعات خطا مانند **[4]** و **[8]** از بیان آماری بهره برده‌اند اما از مدل گوسی برای مدل‌سازی عدم اطمینان استفاده کرده‌اند که در عمل منجر به عملکرد ضعیف آنها خواهند شد. عدم اطمینان غیرگوسی در مساله مکانیابی یک اتفاق معمول است.

از الگوریتم انتشار باور می‌توان به منظور تخمین مکان گره‌ها استفاده کرد. مکانیابی را می‌توان به عنوان یک مساله استنتاج در مدل گرافی در نظر گرفت. این الگوریتم یک روش توزیع شده است که با استفاده از انتقال پیام، به منظور تخمین توزیع حاشیه‌ای در مدل گرافی استفاده می‌شود. الگوریتم انتشار باور با ماهیت توزیع شده خود، الگوریتم مناسبی برای مسائل توزیع شده می‌باشد **[9]**.

از زمان معرفی الگوریتم انتشار باور به منظور مکان‌یابی در شبکه‌های حسگر **[10]**، پژوهش‌های زیادی برای بهبود عملکرد آن معرفی شده است. در **[11]** از نمونه‌برداری محدود شده برای رفع نمونه‌برداری غیرکارآمد این الگوریتم استفاده شده است. در پژوهشی دیگر با بکارگیری تقریب فوریه، تنها ضرایب فوریه به شبکه انتقال داده می‌شود و حجم انتقال داده بین گره‌ها کاهش پیدا می‌کند **[12]**. در **[13]** و **[14]** اضلاع اضافی گراف هرس شده و الگوریتم در درخت پوشای کمینه اجرا می‌شود و در **[15]** از درخت وزن‌دار استفاده می‌شود که منجر به کاهش زمان اجرای الگوریتم خواهد شد. همچنین در **[16]** از آنالیز فاصله به منظور انتقال خود توزیع احتمال به جای نماینده‌هایی از آن استفاده می‌شود که منجر به کاهش خطا و افزایش دقت در اجرای الگوریتم خواهد شد.

1-5. پرسش تحقیق

این پژوهش به این پرسش پاسخ خواهد داد که آیا می‌توان با جایگذاری بهینه گره‌های مرجع به کاهش خطا در الگوریتم مکان‌یابی به روش انتشار باور رسید؟

1-6. روش تحقیق

در این تحقیق جایگذاری گره‌های مرجع در میدان جنگ با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه انجام خواهد شد. مکانیابی گره‌های حسگر نیز با استفاده از الگوریتم انتشار باور صورت می‌پذیرد. با کاهش خطای مکان‌یابی با جایگذاری صحیح گره‌های مرجع می‌توان به افزایش اطمینان گره‌ها دست یافت. همچنین با کاهش تعداد گره‌های مرجع می‌توان به کاهش هزینه شبکه حسگر رسید.

1-7. سازماندهی تحقیق

در ابتدا به معرفی مساله مکانیابی خودکار می‌پردازیم. سپس الگوریتم انتشار باور به عنوان یک الگوریتم توزیع شده معرفی خواهد شد. سپس روش بهینه‌سازی چند هدفه برای جایگذاری گره‌های مرجع معرفی شده و نتایج آن ارائه خواهد شد. در آخر به جمع‌بندی و کارهای آتی پرداخته خواهد شد.

2. ادبیات تحقیق

2-1. مکان‌یابی در شبکه‌های حسگر

فرض کنید تعداد **N** گره در یک محیط پخش شده‌اند. تعدادی گره مرجع با موقعیت معلوم یا مجهز به **GPS** در شبکه قرار داده می‌شود. فرض کنید موقعیت دوبعدی گره **t** را با x_t نشان می‌دهیم. سپس تمامی گره‌ها فاصله نسبی خود را با همسایه‌های خود اندازه‌گیری می‌کنند.

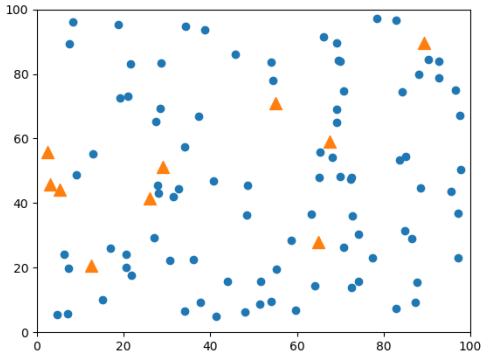
$$d_{tu} = \|x_t - x_u\| + v_{tu} \qquad (1)$$

که در آن d_{tu} فاصله اندازه‌گیری شده بین دو گره، x_i مختصات دو بعدی واقعی گره i و v_{tu} نویز اندازه‌گیری می‌باشد که دارای توزیع گوسین است. ممکن است فاصله تخمین زده شده d_{ut} و d_{tu} متفاوت باشد که باید یکسان شود. برای این منظور فاصله اندازه‌گیری شده بین جفت گره **u** و **t**

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23]

ارسال شده و میانگین آنها به عنوان فاصله یکسان انتخاب می‌شود.

گره‌های مجهز به **GPS** که گره مرجع نامیده می‌شود به علت داشتن تجهیزات قوی‌تر، هزینه بالایی بر پیاده‌سازی شبکه تحمیل می‌کنند. به همین دلیل کاهش تعداد گره‌های مرجع منجر به کاهش چشمگیر هزینه پیاده‌سازی شبکه حسگر خواهد شد. از طرف دیگر مکان قرارگیری گره‌های مرجع نیز تاثیر چشم‌گیری بر تخمین مکان گره‌ها دارد. از این رو بهینه‌سازی مکان قرارگیری این گره‌ها و کاهش تعداد آنها حائز اهمیت است.



شکل 1. موقعیت گره‌ها (نقاط) و گره‌های مرجع (مثلث‌ها)

2-2. مکان‌یابی گره‌ها با استفاده از الگوریتم انتشار باور

مساله مکان‌یابی خودکار را می‌توان به صورت مساله یافتن تخصیص بیشینه‌گر احتمال پسین برای مکان گره‌ها x_t با استفاده از مجموعه مشاهدات $\{d_{tu}\}$ تعریف کرد:

(2)

$$p(x_1, \dots, x_N | \{d_{tu}\}) = \prod_{(t,u)} p(d_{tu} | x_t, x_u) \prod_t P_t(x_t)$$

هدف این است که توزیع احتمال پسین مختصات همه گره‌ها محاسبه شود. حل این مساله با روش‌های معمول به زمانی نمایی نیاز دارد. ولی می‌توان این مساله را با استفاده از الگوریتم انتشار باور حل کرد. برای حل این مسئله، در هر گره یک توزیع احتمال چهار بعدی برای مختصات خود و همسایه مورد نظر ساخته می‌شود. (هر یک از مختصات ها دو بعد) این توزیع، احتمال دیده شدن یک گره همسایه در مخصات‌های مختلف (دو بعد) با توجه به مقدار فاصله اندازه‌گیری شده با جایگذاری گره مبدا در مختصات‌های مختلف (دو بعد) را نشان می‌دهد.

(3)

$$P_o(x_t, x_u) = \exp\left(-\frac{||x_t - x_u||^2}{2R^2}\right)$$

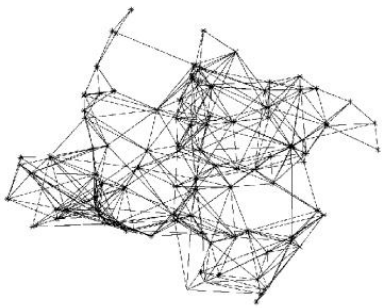
که در آن P_o احتمال دیده شدن دو همسایه، **x**ها مختصات هر کدام و **R** شعاع پوشش ارتباطی می‌باشد. با استفاده از این مدل، با نزدیک شدن دو گره، احتمال دیده شدن آنها نیز افزایش می‌یابد. حال با استفاده از این مدل و فاصله اندازه گرفته شده، تابع پتانسیل تکی و تابع پتانسیل بین دو گره را به صورت‌های زیر تعیین می‌کنیم:

$$\emptyset_t(x_t) = P_t(x_t) \quad (4)$$

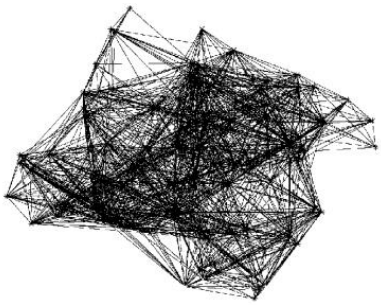
(5)

$$\Psi_{tu}(x_t, x_u) = \begin{cases} P_o(x_t, x_u) P_v(d_{tu} - ||x_t - x_u||) & \textit{if observed} \\ 1 - P_o(x_t, x_u) & \textit{othwerwise} \end{cases}$$

که در آن P_v احتمال نویز ، d_{tu} مقدار اندازه‌گیری فاصله می‌باشد. در حالت دوم همانطور که قابل مشاهده است، تابع پتانسیلی بین گره‌هایی که یکدیگر را پوشش نمی‌دهند نیز تعریف شده است. می‌توان بین گره‌هایی که به صورت مستقیم به یکدیگر متصل نیستند، اطلاعاتی رد و بدل کرد. این اطلاعات در مورد فاصله بین آنها و علّت عدم پوشش یکدیگر در شبکه است. گراف‌های متصل کامل برای بسیاری از الگوریتم‌های استنتاج بسیار سخت بوده و تخمین مدل را با مشکل مواجه می‌کنند. بر اساس آزمایشات تجربی اینگونه به نظر می‌رسد که با حذف اتصال گره‌های دور از هم مقدار کمی از اطلاعات از دست خواهد رفت **[10]**. در نتیجه با تعیین گراف‌های تک قدمه و دو قدمه می‌توان به مدل خوبی رسید. در شکل 2 گراف تک قدمه و دو قدمه را مشاهده می‌کنید. همانطور که انتظار می‌رود گراف دوقدمه گرافی متراکم‌تر است.



[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23]



شکل 2. گراف تک قدمه و گراف دو قدمه برای یک شبکه حسگر

حال با تعیین شدن تابع‌های پتانسیل تکی و دوتایی، می‌توان الگوریتم انتشار باور را به کار گرفت و با رد و بدل شدن پیام‌ها، به جواب رسید.

(6)

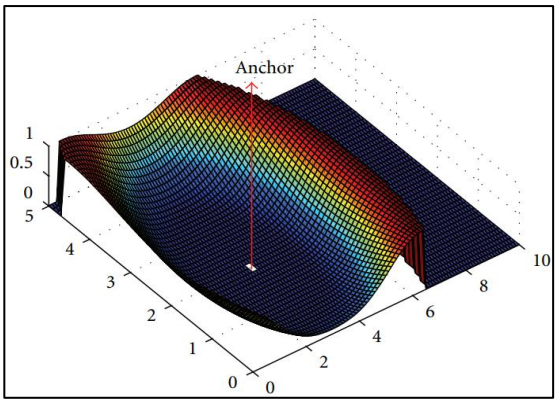
$$m_{tu}^{n}(x_u) = \sum_{x_t} \Psi_{tu}(x_t, x_u)\emptyset_t(x_t) \prod_{v \in N_t/u} m_{vt}^{n-1}(x_t)$$

(7)

$$B_t(x_t) = \emptyset_t(x_t) \prod_{v \in N_t} m_{vt}(x_t)$$

که در آن $m_{tu}^{n}(x_u)$ پیام ارسالی از گره t به گره u و $B_t(x_t)$ باور گره t در مورد خودش می‌باشد. در تکرار اول از این الگوریتم لازم است که برای همه پیام‌ها $m_{tu}^{n}(x_u) = 1$ و $B_t(x_t) = P_t(x_t)$ قرار بگیرد. الگوریتم انتشار باور تا جایی تکرار می‌شود که همگرا شود. سپس بیشینه‌گر احتمال در توزیع احتمال باور مختصات برای هر گره یافت شده و به عنوان مختصات گره پذیرفته می‌شود. پیام فرستاده شده توسط گره مرجع با گره‌های دیگر متفاوت است. چون این گره مختصات خود را می‌داند، نیازی نیست یک توزیع احتمال چهار بعدی تشکیل شود.

در شکل 3 می‌توان پیام فرستاده شده توسط یک گره مرجع را مشاهده کرد. همانطور که در شکل پیداست مکان‌هایی که با فاصله اندازه‌گیری شده مطابقت بیشتری دارند، دارای احتمال بیشتری می‌باشند.



شکل 3. پیام فرستاده شده توسط یک گره مرجع

دو مرحله برای اجرای انتشار باور برای مساله مکان‌یابی وجود دارد. ابتدا نمونه‌گیری از توزیع حاشیه‌ای $\widehat{P}(x_t)$ و سپس استفاده از این نمونه‌ها برای تخمین پیام خروجی m_{tu} از گره.

هر پیام حاوی یک توزیع احتمال مختصات دو بعدی می‌باشد. انتقال این اطلاعات بسیار سنگین و هزینه بر است. الگوریتم انتشار باور ناپارمتری[2] (**NBP**) **[10]** برای این مشکل راه حلی ارائه داده است که از روشی مبتنی بر ذرات استفاده می‌کند

در **NBP** هر پیام با استفاده از نمونه‌های برآورد احتمال (ترکیبی از گوسین ها) ساخته می‌شود. در ابتدا **M** نمونه وزن‌دار از توزیع احتمال باور گره **t** براشته می‌شود. $\{w_t^{(i)}, x_t^{(i)}\}$ سپس با استفاده از این نمونه‌ها و مقدار فاصله اندازه‌گیری شده، هر پیام به صورت زیر محاسبه می‌شود:

(8)

$$m_{tu}^{(i)} = x_t^{(i)} + (d_{tu} + v)[\sin(\theta^i); \cos(\theta^i)]$$
$$\theta^i \sim U[0, 2\pi)$$

این معادله نشان می‌دهد که به ازای هر نقطه نمونه‌برداری شده از توزیع احتمال مختصات x_t، یک نقطه به صورت تصادفی از دایره‌ای به مرکز x_t و شعاع $d_{tu} + v$ انتخاب می‌شود و به عنوان پیام به همسایه فرستاده می‌شود. این نقاط در گره همسایه، پیام را بازسازی می‌کنند. بدین صورت که هر نقطه در پیام $(m_{tu}^{(i)})$ نشان‌دهنده مرکز یک گوسین با ارتفاع وزن آن $(w_{tu}^{(i)})$ می‌باشد و واریانس $\sum_{tu}$.

$$w_{tu}^{(i)} = P_o(m_{tu}^{(i)}) w_t^{(i)} / m_{ut}^{n-1}(x_t^{(i)}) \quad (9)$$

[2] Nonparametric Belief Propagation

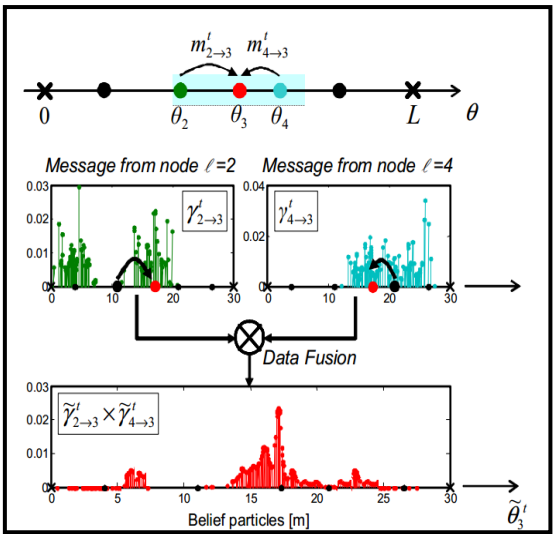
[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23]

$$\sum_{tu} = M^{-\frac{1}{3}}.Covar[m_{tu}^{(i)}] \quad (10)$$

سپس همه پیام‌ها از همه همسایه‌ها تجمیع شده و با اضافه شدن تابع پتانسیل تکی گره، باور گره را می‌سازد. تجمیع این پیام‌ها و ساخت این باور بسیار پیچیده است و نمونه‌گیری از آن مشکل خواهد بود. بنابراین از جمع ترکیب گاوسین‌ها استفاده کرده و نمونه پیام‌های دریافتی از همه همسایه‌ها را وزن‌دهی دوباره کرده و سپس از آنها نمونه گرفته می‌شود. به این عمل نمونه‌برداری ترکیبی اهمیت‌دار گویند. فرض کنید همسایه‌های $\mathbf{u}$ که به صورت مستقیم مشاهده شده اند را با G_u^0 نمایش می‌دهیم. همچنین مجموعه همه همسایه‌های $\mathbf{u}$، G_u در نظر گرفته شده است. برای اینکه $\mathbf{N}$ نمونه داشته باشیم، یک مجموعه با $\mathbf{kN}$ نمونه وزن‌دار با بیرون کشیدن $kN/|G_u^0|$ نمونه از هر پیام ورودی ساخته و دوباره وزن‌دهی می‌کنیم. سپس از این مجموعه با وزن جدید نمونه گیری با جایگذاری کرده که حاصل آن نمونه‌هایی با وزن‌های برابر از ضرب همه پیام‌های ورودی خواهد بود.

در انتشار باور ناپارمتری، هر پیام را می‌توان با نمونه‌ها یا با یک تابع ساخت. هر دو نوع برای حل مساله مکانیابی ضروری است. پیام در طول یال‌های مشاهده شده را با نمونه‌ها نشان داده و در طول یال‌های مشاهده نشده را با تابع $1 - P_o(x_t, x_u)$ ارائه می‌دهند. از این تابع به این دلیل استفاده می‌شود که تنها در محل کوچکی غیر صفر بوده و در بقیه موارد تقریبا احتمال برابر دارد که با تعداد نمونه‌های زیاد قابل بازسازی نیست.

در شکل 4 فرض شده است که گره‌ها به جای فضای دو بعدی، در یک فضای یک بعدی قرار دارند. مکان گره دوم نقطه 10، مکان گره سوم در نقطه 17 و گره چهارم در نقطه 20 واقع شده است. گره‌های 2 و 4 به گره 3 پیام می‌فرستند. در آخر این پیام‌ها تجمیع شده و توزیع احتمال باور گره 3 را تشکیل می‌دهند.



شکل4. انتقال پیام انتشار باور در یک فضای یک بعدی [17]

3-2. بهینه‌سازی چند هدفه تکاملی

بیشتر مسائل در دنیای واقعی شامل بیش از یک هدف می‌شوند. وجود چند هدف متناقض در بسیاری از مسائل طبیعی بوده و چون هیچ جوابی را نمی‌توان به عنوان جواب بهینه در مسائل چند هدفه لحاظ کرد، حل این مسائل منجر به یافتن چند راه حل خواهد شد. مساله جایگذاری گره‌های مرجع با اهداف کاهش خطای میانگین و کاهش تعداد گره‌های مرجع یک مساله دو هدفه است. در بهینه‌سازی چند هدفه، یک راه حل دست‌یافتنی وجود ندارد که بتواند تمامی توابع هدف را به صورت همزمان بهینه کند. درنتیجه، باید به یک مجموعه جواب رسید که به آن مجموعه بهینه پرتو[3] گفته می‌شود. این مجموعه شامل راه‌حل‌هایی است که در هیچ یک از اهداف موجود نمی‌توانند بهتر شوند مگر اینکه در هدف یا اهدافی دیگر عملکرد بدتری داشته باشند **[18]**.

برای حل مسائل چند هدفه راه‌حل‌های مختلفی وجود دارد ولی یکی از محبوب‌ترین راه‌حل‌ها استفاده از الگوریتم‌های تکاملی است. الگوریتم‌های تکاملی نوعی روش جستجوی تصادفی مبتنی بر جمعیت رو به تکامل از راه‌حل‌های کاندید می‌باشند که معمولا برای بهینه‌سازی بکار گرفته می‌شوند؛ این جمعیت از نسلی به نسلی دیگر تکامل پیدا می‌کند. تکامل شامل انتخاب تعدادی از جمعیت و ترکیب برخی از آن‌ها برای ساخت راه حل‌های جدیدی است. روش‌های تکاملی به

[3] Pareto Optimal

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23]

خانواده حل کننده‌های مسائل به‌صورت سعی و خطا تعلق دارند و به‌عنوان روش‌های بهینه‌سازی سراسری با طبیعت غیر قطعی و فرا ابتکاری شناخته می‌شوند **[19]**.

الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب **NSGA [20]** سعی در حل مساله چند هدفه با ایده مرتب‌سازی راه‌حل‌ها بر اساس غلبه و بهینه پرتو دارد. فلوچارت اجرای الگوریتم در شکل 5 نشان داده شده است. در این الگوریتم پس از اجرای جهش و برش با استفاده از مرتب‌سازی بر اساس غلبه، راه‌حل‌های مرغوب به نسل بعد انتقال پیدا خواهند کرد. برای این منظور در این الگوریتم از روش زیر برای انتخاب تعدادی راه‌حل از جمعیت برای استفاده در عملگرها استفاده می‌شود:

1. با استفاده از روش مرتب کردن جمعیت بر اساس شرط‌های غلبه، تعدادی پرتو و راه‌حل‌های متعلق به آن بدست می‌آید.
2. از پرتو بهینه اول شروع کرده و تمام راه‌حل‌های آن را به جمعیت بعدی اضافه کن. این کار را تا جایی ادامه بده که یک پرتو تعداد بیشتری راه‌حل از جای خالی باقی‌مانده داشته باشد.
3. با استفاده از فاصله ازدحامی راه‌حل‌های پرتو آخر را مرتب‌سازی کن.
4. جای خالی برای جمعیت بعدی را با استفاده از بهترین راه‌حل‌های مرحله قبل پر کن.

در مرحله 3 محاسبه فاصله ازدحامی در یک پرتو صورت زیر انجام خواهد شد:

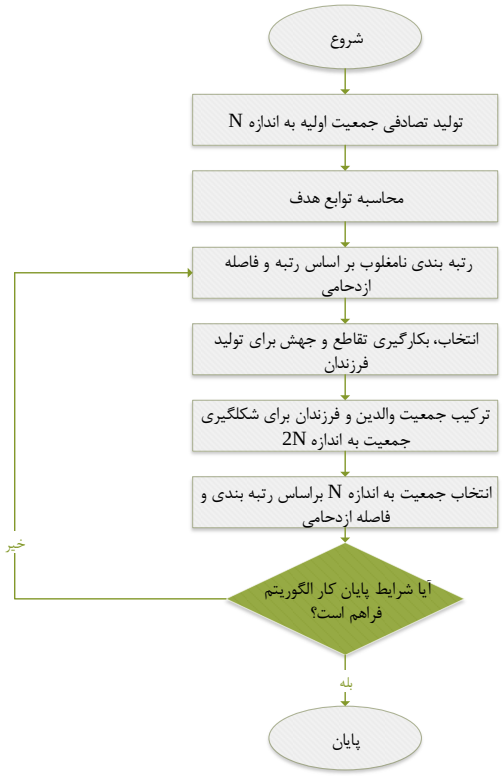
- برای راه‌حل‌های اول و آخر (راه‌حل‌های مرزی) مقدار فاصله ازدحامی بی نهایت است.

$$\boldsymbol{CD(d_1) = \infty, CD(d_n) = \infty} \qquad (11)$$

- مقدار فاصله ازدحامی برای هر راه حل:

$$\boldsymbol{CD(d_k) = \frac{f_m(k+1) - f_m(k-1)}{f_m^{max} - f_m^{min}}} \qquad (12)$$

با این روش راه‌حل‌های خوب و دارای تنوع انتخاب شده و الگوریتم از آنها برای تولید جمعیت جدید استفاده می‌کند. در نتیجه راه‌حل‌هایی با مقدارهای متفاوت برای هدف‌های مختلف ارائه خواهد شد.



شکل5. فلوچارت اجرای الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب

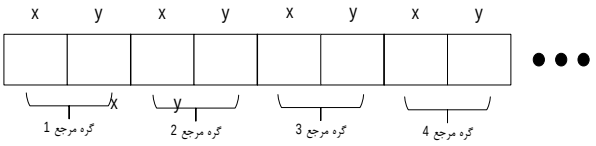
3. جایگذاری گره‌های مرجع با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه

3-1. معرفی

برای حل مساله مکان‌یابی خودکار می‌توان دو هدف را در نظر گرفت. هدف اول کاهش مجموع خطای مکان تخمین‌زده شده از مکان حقیقی گره‌ها و هدف دیگر ، کاهش تعداد گره‌های مرجع مورد استفاده می‌باشد. کاهش تعداد گره‌های مرجع منجر به کاهش هزینه کلی شبکه حسگر خواهد شد؛ به این دلیل که گره‌های مرجع باید مجهز به سیستم موقعیت‌یاب جهانی و دیگر تجهیزات باشند.

برای حل مساله به روش تکاملی در ابتدا باید کروموزم مساله تعیین شود. چون به دنبال مکان گره‌های مرجع می‌باشیم، یک کروموزوم دارای تعداد $\boldsymbol{2N}$ ژن می‌باشد که $\boldsymbol{N}$ تعداد گره‌های مرجع می‌باشد.

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23]



شکل 6. کرومزوم راه‌حل‌ها

همانطور که در شکل 6 قابل مشاهده است، هر گره مرجع دارای دو مقدار به عنوان مختصات **x** و **y** می‌باشد. این نکته قابل توجه است که در جمعیت ممکن است کروموزوم‌هایی با طول‌های مختلف وجود داشته باشد زیرا بعضی راه حل‌ها تعداد گره مرجع کمتر و برخی دیگر تعداد گره مرجع بیشتری دارند.

کرومزوم یافت شده توسط الگوریتم تکاملی به الگوریتم انتشار باور ناپارمتری داده می‌شود تا گره‌های مرجع را جایگذاری کند. سپس گره‌های حسگر تخمین خود را با استفاده از الگوریتم انتشار باور ناپارمتری معرفی شده در قسمت قبل محاسبه می‌کنند. میانگین خطای گره‌های حسگر به عنوان مقدار برازش الگوریتم تکاملی برای یکی از هدف‌ها مورد استفاده قرار خواهد گرفت. هدف دیگر نیز مقدار طول کرومزوم تقسیم بر 2 می‌باشد که بیانگر تعداد گره‌های مرجع معرفی شده توسط کرومزوم مربوطه است.

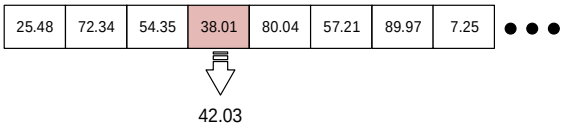
برای اجرای یک الگوریتم تکاملی یک سری اطلاعات پیش‌فرض به صورت روش در جهش و برش تزریق می‌شود. این کار موجب خواهد شد الگوریتم تکاملی بهتر با محیط مساله وفق یافته و جواب‌های بهتری را تولید نماید. در ادامه به معرفی جهش و برش برای اجرای این الگوریتم خواهیم پرداخت.

3-2. جهش

جهش[4] عملگری است که تنها از یک والد استفاده کرده و با تغییری کوچک بر روی کروموزم یک فرزند تولید می‌کند. نرخ جهش مقداری است که بوسیله آن تعداد جهش‌ها در جمعیت مشخص می‌شود. برای اعمال جهش در مساله مکان‌یابی چند هدفه با استفاده از الگوریتم انتشار باور، می‌توان از جهش با دامنه‌های حقیقی استفاده کرد. برای این منظور از جهش گوسی استفاده می‌شود. این روش به شرح زیر است:

- با استفاده از نرخ جهش، تعدادی والد با جایگذاری از جمعیت نمونه‌گیری کن.
- درون هر والد یک ژن را انتخاب کن.
- مقدار درون ژن را با استفاده از جهش گوسی تغییر بده.

برای تغییر با جهش گوسی یک عدد تصادفی در توزیع نرمال با واریانس معلوم تولید شده و به مقدار ژن اضافه خواهد شد. قابل توجه است که جهش گوسی در 68 درصد مواقع مقداری انتخاب می‌کند که فاصله کمتری از مقدار واریانس به میانگین جهش داشته باشد. این بدان معنی است که در 32 درصد مواقع به اکتشاف بیشتری پرداخته و 68 درصد مواقع استخراج آن بیشتر است. می‌توان با استفاده از روش‌هایی واریانس جهش را به صورت تطبیقی کم و زیاد کرد. بدین صورت که اگر برازش جمعیت در طول چند نسل تغییر زیادی نداشته باشد مقدار این واریانس افزایش یابد.



شکل7. جهش گوسی

3-3. تقاطع

تقاطع روشی است که در آن راه‌حل جدیدی با استفاده از ترکیب اطلاعات دو یا چند والد تولید می‌شود. تقاطع روش مهمی در الگوریتم‌های ژنتیک بوده که باعث پیشرفت الگوریتم به سوی جواب‌های بهینه خواهد شد. روش‌های تقاطع معمولا با یک نرخ تقاطع مورد استفاده قرار می‌گیرند که نرخ تقاطع نسبت تعداد والدی است که برای این منظور مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

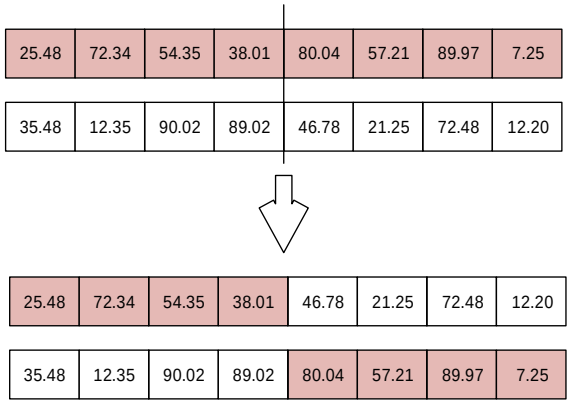
برای حل مساله جایگذاری گره‌های مرجع چند هدفه، و با توجه به ماهیت خاص مساله که در آن کرومزوم‌ها طول متفاوت دارند می‌توان از تقاطع‌های تک‌نقطه‌ای، دو نقطه‌ای و چند نقطه‌ای استفاده کرد. تقاطع در مساله مکان‌یابی را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد.

در صورت برابر بودن طول دو کروزوم والد:

[4] Mutation

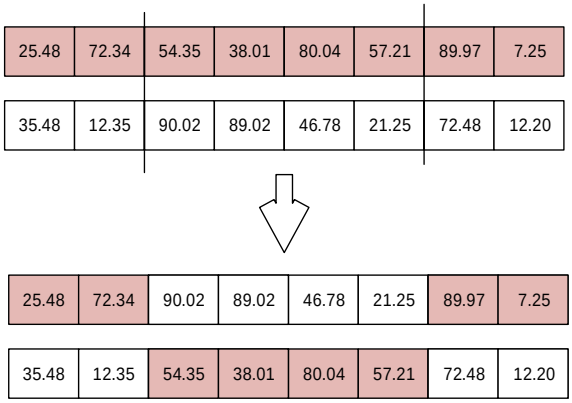
[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23]

در روش تک نقطه‌ای یک عدد زوج به صورت تصادفی در بازه $[0, l-1]$ تولید می‌شود که در آن l طول کروموزم است؛ این عدد نشانگر نقطه تقاطع بین دو والد می‌باشد. عدد زوج به این دلیل انتخاب می‌شود که تقاطع از این نقاط منطقی است. زیرا اطلاعات مکانی یک گره مرجع به صورت دوتایی به هم پیوسته هستند.



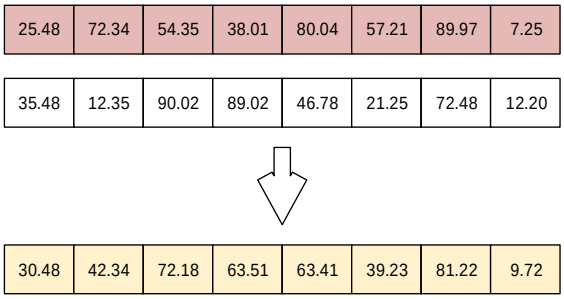
شکل 8. تقاطع تک‌نقطه‌ای طول یکسان

در روش دوم دو عدد زوج تصادفی در بازه $[0, l-1]$ تولید می‌شود. در شکل زیر روش دو نقطه‌ای را می‌توان مشاهده کرد. در روش دو نقطه‌ای اطلاعات به صورت ضربدری بین دو کروموزم به اشتراک گذاشته می‌شود.



شکل9. تقاطع دو نقطه‌ای طول یکسان

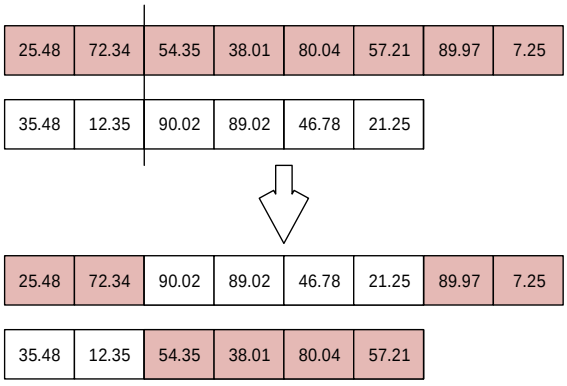
روش سوم روش تقاطع حسابی است که در آن یک فرزند تولید می‌شود. مقادیر دو کروموزوم با یکدیگر جمع شده و تقسیم بر دو خواهند شد.



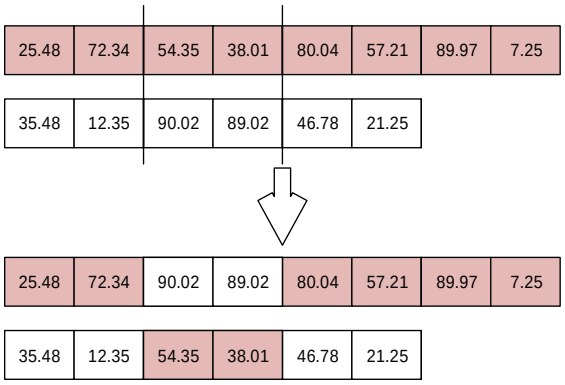
شکل 10. تقاطع حسابی طول یکسان

در صورت متفاوت بودن طول دو کروزوم والد:

مجموعه راه‌حل‌ها، دارای کرومزوم‌هایی با طول متفاوت هستند. این بدان دلیل است که تعداد گره‌های مرجع متفاوتی در مساله ممکن است وجود داشته باشد. در این حالت روش تک نقطه‌ای، دو نقطه‌ای و حسابی به شکل‌های زیر انجام می‌پذیرید:

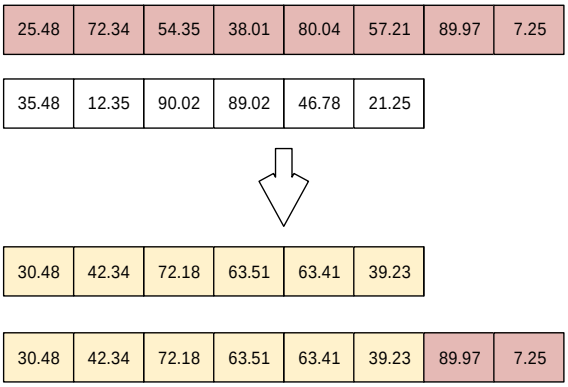


شکل 11. تقاطع تک نقطه‌ای طول متفاوت



شکل 12. تقاطع دو نقطه‌ای طول متفاوت

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23]



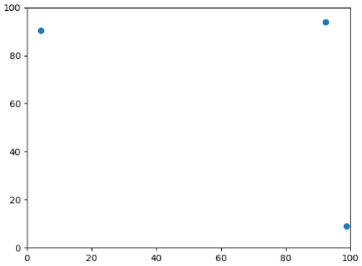
شکل 13. تقاطع حسابی طول متفاوت

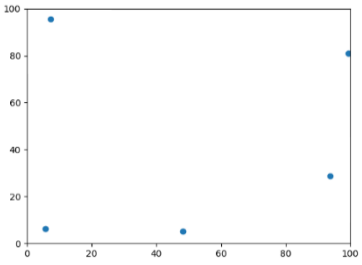
4. یافته‌ها

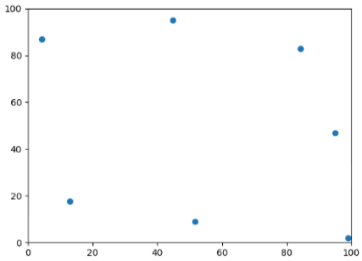
در این پژوهش الگوریتم انتشار باور و الگوریتم جایگذاری گره‌های مرجع با استفاده از زبان **python 3.6** پیاده‌سازی گردید. تمامی اجراها با استفاده از رایانه با پردازشگر **Core i7** با مقدار رم 8 گیگابایت انجام گردید.

4-1. نتایج

نتایج بهینه‌سازی الگوریتم چند هدفه برای یافتن گره‌های مرجع در یک محیط مربعی 100 متر در 100 متر به صورت زیر است.نکته‌ای که قابل توجه است این است که همواره گره‌های مرجع در اطراف محیط پراکنده شده‌اند که باعث رسیدن به جواب‌های بهتر و خطای میانگین کمتر در همه موارد است.

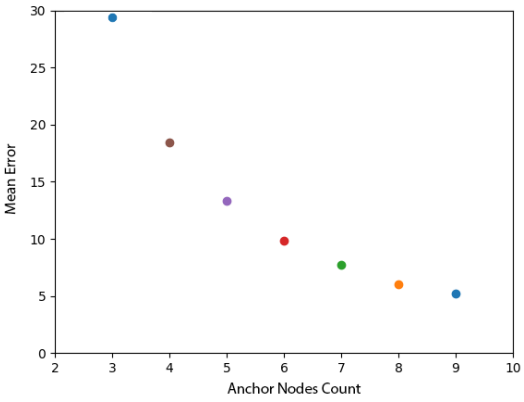




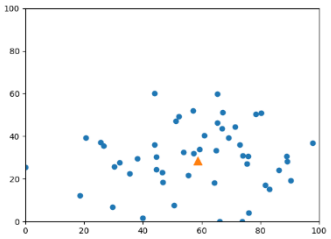


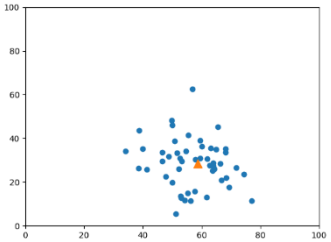
شکل 14. مکانیابی گره‌های مرجع از بالا: با 3 گره - با 5 گره - با 7 گره

پرتو برای دو هدف تعداد گره‌های مرجع و میانگین خطا به شکل 15 است. قابل توجه است که میانگین خطای الگوریتم با کاهش تعداد گره‌های مرجع به صورت نمایی افزایش خواهد یافت. تا جایی که میانگین خطا با تعداد 3 گره مرجع در حدود 30 متر است.

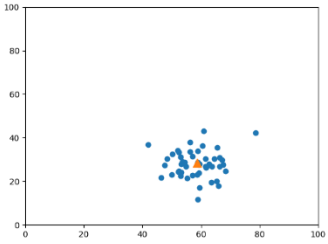


شکل15. مقادیر هدف‌های میانگین خطا و تعداد گره‌های مرجع در الگوریتم چند هدفه



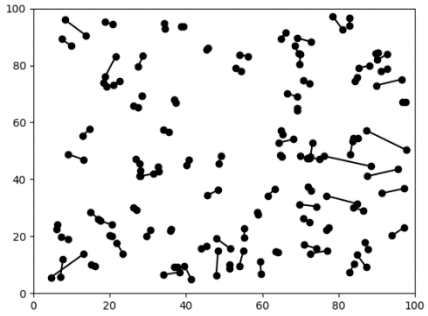


[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23]

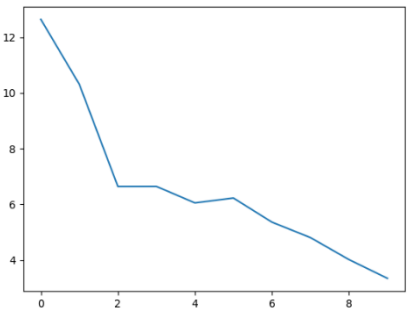


شکل 16. باور یک گره در طول تکرارها از بالا: تکرار 1 – تکرار 4 – تکرار 8

مقادیر باور یک گره در طول اجرای الگوریتم انتشار باور به صورت شکل 16 است. همانطور که قابل مشاهده است باور گره در طول تکرارها به سمت مختصات اصلی گره سوق پیدا می‌کنند. همچنین میانگین خطا در طول اجرا کاهش داشته و بعد از 9 تکرار به زیر 4 متر می‌رسد که در یک محیط 100 متر در 100 متر بسیار ناچیز است. این خطا باعث می‌شود که گزارش دریافتی از گره‌های حسگر دقیق‌تر بوده و اشتباه کمتری داشته باشد.

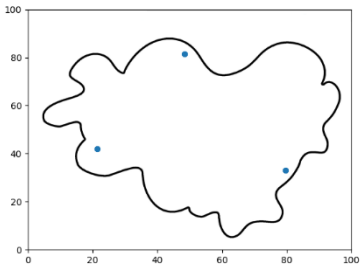


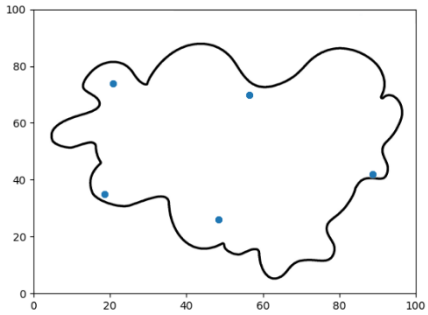
شکل 17. خطای مکان‌یابی گره‌ها

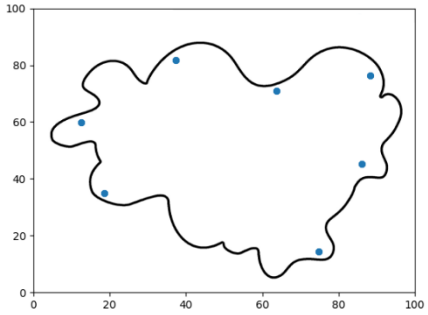


شکل 18. میانگین خطا در طول اجرا با 9 گره مرجع

نتایج اجرای الگوریتم در یک محیط غیر مربعی که ممکن است یک محیط کوهستانی در محیط جنگی باشد به شکل زیر است:







شکل 21. مکانیابی گره‌های مرجع از بالا با 3-5-7 گره

4-2. مقایسه

در این قسمت روش پیشنهادی از لحاظ مصرف انرژی و دقت تخمین با روش **DV-Hop [21]** و **UED[22]** مورد مقایسه قرار خواهد گرفت. روش **DV-Hop** روشی است که از لحاظ امکانات مورد استفاده مشابه الگوریتم انتشار باور با گره‌های مرجع است. زیرا تنها از اطلاعات فاصله بین همسایگان و اطلاعات مختصاتی گره‌های مرجع استفاده می‌کند. در این روش میانگین فاصله هرگام تا گره‌های مرجع محاسبه شده و با استفاده از تعداد گام‌های هر گره تا گره‌های مرجع، مختصات یک گره تخمین زده می‌شود. در این روش گره‌های مرجع در دور محیط جایگذاری می‌شوند. روش **UED** با فرض تخمین خطاهای اندازه‌گیری و محدود کردن آن برای هر گره، مکان گره‌ها را محاسبه می‌کند

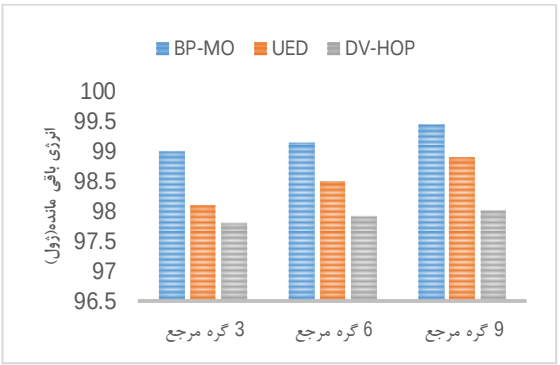
[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23]

یک ناحیه 100 متر در 100 متر به عنوان محیط در نظر گرفته شده است. تعداد 100 گره و سه آزمایش مختلف با تعداد 3، 6 و 9 گره به عنوان گره‌های مرجع انتخاب شده است. برای هر آزمایش 10 مرتبه اجرا انجام شده است تا مقادیر میانگین حاصل از آنها به عنوان نتایج قابل اطمینان معرفی شود.برای مقایسه این روش‌ها از لحاظ انرژی مصرفی باید مقادیر مصرف انرژی را مشخص کرد. در جدول 1 این مقادیر مشخص شده‌اند.

جدول 1. مقدار انرژی مصرفی برای هر عمل در شبکه حسگر [23]

نام مشخصه	مقدار و واحد
مقدار انرژی اولیه	100 ژول
انرژی مصرفی ارسال داده	0,03 ژول
انرژی مصرفی دریافت داده	0,01 ژول
انرژی مصرفی اجرای یک خط به وسیله پردازشگر	0,001 ژول
شعاع ارسال و دریافت	15 متر

در این بخش روش پیشنهادی جایگذاری گره‌های مرجع با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه مورد استفاده قرار گرفته است. در نتیجه گره‌های مرجع جایگذاری شده و سپس الگوریتم انتشار باور برای مکانیابی گره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از پایان اجرای الگوریتم مقدار انرژی باقی‌مانده گره‌ها محاسبه می‌شود. در شکل 20 مقایسه انرژی باقی مانده روش پیشنهادی و روش **DV-Hop** مشاهده می‌شود.



شکل 20. میانگین مقدار انرژی باقی‌مانده گره‌ها پس از انجام الگوریتم‌ها

همانطور که قابل مشاهده است انرژی مصرفی روش **BP-MO** بسیار کمتر بوده و میانگین باقی‌مانده انرژی در گره‌ها بیشتر است. این مسئله به این علت است که در انتشار باور تنها اطلاعات به همسایگان مخابره می‌شود و بیشتر محاسبات توزیع احتمال و ساخت پیام‌ها انجام خواهد شد. ولی در **DV-Hop** و **UED** اطلاعات باید تا گره‌های مرجع مخابره شده و بازگردد و محاسبات کمتری خواهد داشت. در نتیجه به دلیل اینکه مقدار انرژی مصرفی پردازشگر بسیار کمتر از ارسال و یا دریافت اطلاعات است، میانگین مصرف انرژی روش مبتنی بر انتشار باور بسیار کمتر خواهد بود.

در این قسمت مقدار خطای روش پیشنهادی با روش های دیگر مورد مقایسه قرار می‌گیرد. همچنین در این بخش مقایسه روش پیشنهادی با روش جایگذاری گره‌های مرجع به صورت تصادفی (**BP-RAND**) و روش جایگذرای گره‌های مرجع (**BP-PLA**) در گوشه‌های محیط انجام خواهد گرفت. روش جایگذاری گره‌های مرجع در گوشه‌های محیط روشی است که در آن به صورت تصادفی گره‌های مرجع را دور محیط قرار می‌دهند. برای این منظور چهار الگوریتم اجرا شده و مقدار خطای میانگین مختصات تخمینی از مختصات واقعی محاسبه خواهد شد.

جدول 2. خطای میانگین گره‌ها

	3 گره مرجع	6 گره مرجع	9 گره مرجع
BP-RAND	45.247	18.245	12.208
BP-PLA	28.654	12.833	5.954
BP-MO	29.784	10.226	4.435
UED	28.623	11.215	7.547
DV-Hop	25.435	15.134	8.547

جدول نشان‌دهنده خطای میانگین گره‌ها در الگوریتم‌های مختلف با تعداد گره‌های مرجع مختلف است. همانطور که قابل مشاهده است، در تعداد 3 گره مرجع الگوریتم **DV-Hop** نسبت به دیگر الگوریتم‌ها بهتر عمل کرده است. این بدان معنی است که در صورت وجود اطلاعات کم، الگوریتم انتشار باور ممکن است به اشتباه بیفتد. البته این نکته حائز اهمیت است که میانگین خطای 25 متر در یک محیط 100 متر در 100 متر بسیار بالاست. استفاده از **BP-Rand** در این تعداد گره منجر به خطای بسیار بالایی شده است.در تعداد 6 گره مرجع اما اوضاع کاملا تغییر پیدا کرده است. الگوریتم **BP-MO** با جایگذاری گره‌های مرجع در مکان‌های صحیح منجر به کاهش خطا شده و از چهار روش دیگر عملکرد بهتری دارد. روش

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23]

UED با میانگین خطای نسبتا خوبی روشی بهتر نسبت به سه روش دیگر است. الگوریتم **BP-RAND** هم از بقیه روش‌ها عملکرد بدتری داشته است. این بدان معنی است که اگر گره‌های مرجع به صورت تصادفی در محیط قرار گیرند الگوریتم انتشار باور نمی‌تواند عملکرد خوبی داشته باشد. در تعداد 9 گره نیز عملکرد **BP-MO** با میانگین خطای 4 متر بهترین گزینه است که خطای قابل قبولی در محیط مورد نظر است. در روش **DV-Hop** و **UED** گره‌های مرجع به صورت دستی در اطراف محیط قرار داده شده‌اند.

5. نتیجه‌گیری

الگوریتم انتشار باور به عنوان یک الگوریتم توزیع شده برای مکانیابی گره‌های حسگر در مواردی که تجهیز همه گره‌ها به سیستم موقعیت‌یاب جهانی امکان‌پذیر نیست، معرفی شده است. در پژوهش‌های پیشین به جایگذاری گره‌های مرجع به عنوان عاملی برای کاهش خطا و کاهش هزینه پرداخته نشده است. در این پژوهش با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه با اهداف کاهش خطای تخمین و کاهش تعداد گره‌های مرجع، مساله جایگذاری گره‌های مرجع مورد توجه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد با استفاده از این روش، مصرف انرژی و خطای تخمین کاهش می‌یابد. اجرا و دریافت نتایج در محیط 3 بعدی، کاهش اضلاع گراف با استفاده از درخت پوشا، کاهش تعداد ذرات الگوریتم انتشار باور ناپارامتری با استفاده از روش تخمین توزیع می‌توانند از موضوعات تحقیقات آتی باشند.

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23]

6. مراجع

[1] J.Bachrach and C.Taylor, Handbook of Sensor Networks: Algorithms and Architectures, 2005.

[۲] ملکیان بروجنی. احمد ، فتحی. محمود، مزینی. ناصر (1398)، معماری مقیاس‌پذیر اینترنت اشیاء نظامی جهت مدیریت بی‌درنگ صحنه نبرد مبتنی بر محاسبات لبه، فصلنامه علمی پژوهشی فرماندهی و کنترل, دوره 3, شماره2.

[3] S. Verma and R.K.Abrol, "Approaches of Self Localization in Wireless Sensor Networks and Directions in 3D," *International Journal of Computer Applications*, vol. 50, no. 11, 2012.

[4] R. L. Moses, D. Krishnamurthy and R. M. Patterson, "A Self-Localization Method for Wireless Sensor Networks," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2003.

[5] A.J.Kearsley, R.A.Tapia and M. W. Trosset, "The solution of the metric STRESS and SSTRESS problems in multidimensional scaling using Newton's method," *Computational Statistics*, vol. 13, no. 3, 1998.

[6] A. Savvides, H. Park and M. B. Srivastava, "The bits and flops of the n-hop multilateration primitive for node localization problems," in *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, Atlanta, Georgia, USA, 2002.

[7] K. Langendoen and N. Reijers, "Distributed localization in wireless sensor networks: a quantitative comparison," *Computer Networks*, vol. 43, no. 4, pp. 499-518, 2003.

[8] N.Patwari, A.O.Hero, M.Perkins, N.S.Correal and R.J.O'Dea, "Relative location estimation in wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Signal Processing* , vol. 51, no. 8, pp. 2137 - 2148, 2003.

[9] J.Pearl, Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference, Morgan Kaufmann, 1988.

[10] A.T.Ihler, J.W.Fisher, R.L.Moses and A.S.Willsky, "Nonparametric belief propagation for self-calibration in sensor networks," in *Third International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, Berkeley, CA, USA, 2004.

[11] V.Savic and S.Zazo, "Nonparametric Boxed Belief Propagation for Localization in Wireless Sensor Networks," in *IEEE Third International Conference on Sensor Technologies and Applications*, Athens, 2009.

[12] C.Na and H.Wang, "Fourier density approximation for belief propagation in wireless sensor networks," in *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, Seoul, 2008.

[13] V.Savic, A.Poblacion, S.Zazo and M.Garcia, "Indoor positioning using nonparametric belief propagation based on spanning trees," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, pp. 520-525, 2010.

[14] V.Savic and S.Zazo, "Nonparametric Generalized Belief Propagation Based On Psedo-Junction Tree for Cooperative Localization in WSN," *ADVANCES IN SIGNAL PROCESSING*, 2013.

[15] W. Li and Z. Yang, "A new variant of sum-product algorithm for sensor self-localization in wireless networks," in *IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, Xi'an, 2013.

[16] H.Chhade, A.Gring and F.Abdallah, "Non Parametric Distributed Inference in Sensor Networks Using Box Particle Messages," *MATHEMATICS IN COMPUTER SCIENCE*, vol. 8, no. 3-4, pp. 445-478, 2014.

[17] D.Fontanella, M.Nicoli and L.Vandendorpe, "Bayesian Localization in Sensor Networks: Distributed Algorithm and Fundamental Limits," *Communications (ICC), 2010 IEEE International Conference on*, pp. 1-5, 2010.

[18] J. Branke, K. Deb and K. Miettinen, Multiobjective Optimization: Interactive and Evolutionary, Springer Science & Business Media, 2008.

[19] A.E.Eiben and J. E.Smith, Introduction to Evolutionary Computing, 2nd ed., New York:

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23]

Springer-Verlag, 2008.

[20] K.Deb, A.Pratap, S.Agarwal and T.Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 12, pp. 182 - 197, 2002.

[21] D. Niculescu and B. Nath, "Ad hoc positioning system (APS) using AOA," in *Twenty-second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, San Francisco, CA, USA, 2003.

[22] G. M. B. D. O. A. Z. a. J. X. Shi, "Robust localization using range measurements with unknown and bounded erros," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, pp. 4065-4078, 2017.

[23] C. D. V. Soto, J. Nolazco and C. Mex-Perera, "Wireless Sensor Network Energy Model and Its Use in the Optimization of Routing Protocols," *Energies*, 2020.

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23]