

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۱۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۲۰

نوع مقاله: پژوهشی

دو روش مبتنی بر یادگیری خمینه‌ها در حل مسئله مکان‌یابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم

ژیلا عبدی‌لر

دانشجوی دکتری - دانشکده علوم پایه - دانشگاه شاهد - ایران
پست الکترونیکی: jila.abdilar@shahed.ac.ir

هاجر قهرمانی گل*

استادیار - دانشکده علوم پایه - دانشگاه شاهد - ایران
پست الکترونیکی: h.ghahremanigol@shahed.ac.ir

چکیده

مکان‌یابی حاصل از پیاده‌سازی نشان‌دهنده عملکرد مناسب روش‌هاست. استفاده از فاصله ژئودزیکی منجر به کاهش خطای محاسبه مکان دقیق حسگرها می‌شود. در نهایت روش‌های پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها که از فاصله ژئودزیکی استفاده نمی‌کنند عملکرد بهتری دارد. در حالت داده‌های تصادفی برای تعداد همسایگی ۱۷ در روش ۱ با استفاده از فواصل ژئودزیکی و اقلیدسی خطاهای ۰/۹۵۰۴ و ۱/۸۶۵۴ به دست آمده است. کمترین میزان خطا با استفاده از فاصله ژئودزیکی و اقلیدسی برای $k=21$ برای داده‌های یکنواخت به ترتیب ۰/۰۰۷۰ و ۰/۷۸۲۷ می‌باشد. در روش ۲ برای داده‌های یکنواخت به ازای تمام مقادیر k خطای فاصله ژئودزیکی کمتر از فاصله اقلیدسی است. کمترین خطا برای داده‌های تصادفی با استفاده از فاصله ژئودزیکی و اقلیدسی به ترتیب ۰/۱۰۹۸ و ۰/۲۹۰۱ است.

یکی از چالش‌ها در مورد شبکه‌های حسگر بی‌سیم نحوه مکان‌یابی حسگرهاست. تا کنون الگوریتم‌های مطرح شده در مسئله مکان‌یابی در شبکه‌های حسگر استفاده از فاصله اقلیدسی نقاط بدون در نظر گرفتن موقعیت هندسی نقاط بوده است. در این مقاله از ویژگی‌های هندسی نقاط از جمله فاصله ژئودزیکی استفاده و نشان می‌دهیم اگر حسگرهای لنگر بر روی یک خمینه خاص قرار داشته باشند، الگوریتم‌های مکان‌یابی عملکرد بهتری خواهند داشت. در این مقاله، دو روش پیشنهادی با استفاده از روش‌های یادگیری خمینه‌ها برای حل مسئله آرایه و الگوریتم‌های پیشنهادی بر روی دو دسته از داده‌های تصادفی و یکنواخت بر روی کره بررسی می‌شوند. تعداد ۲۵۶ حسگر در نظر گرفته که دارای ۱۶ حسگر لنگر و ۲۴۰ حسگر دارای مکان نامشخص هستند. بررسی خطای

* نویسنده مسئول

واژه‌های کلیدی: خمینه، روش‌های یادگیری خمینه، شبکه‌های حسگر بی‌سیم، لنگر، فاصله ژئودزیکی.

۱. مقدمه

شبکه‌های حسگر بی‌سیم کاربرد فراوانی در حوزه مخابرات و ارتباطات راه دور دارد. امروزه شبکه‌های حسگر بی‌سیم به منبعی ضروری از داده‌ها در مورد رویدادها و پدیده‌ها تبدیل شده است و از آن‌ها می‌توان در طیف وسیعی از خدمات استفاده کرد [۱۵]. شبکه‌های حسگر بی‌سیم در بسیاری از زمینه‌ها مانند نظارت نظامی، تشخیص محیطی، خانه‌های هوشمند و محلی‌سازی و ردیابی هدف مورد استفاده قرار می‌گیرند [۸] [۱۳]. محاسبه موقعیت مکانی یک حسگر حوزه تحقیقاتی جذاب در شبکه‌های حسگر بی‌سیم است. برای مکان‌یابی حسگرها از الگوریتم‌های محلی‌سازی و همچنین حسگرهای لنگر که موقعیت آن‌ها مشخص است استفاده می‌شود. موقعیت حسگرهای لنگر را می‌توان با نشان دادن آن‌ها در موقعیتی که مختصات آن را می‌دانیم یا با استفاده از سیستم تعیین موقعیت تعیین کرد. توجه داشته باشید که استفاده از این سیستم برای تمام حسگرها مقرون به صرفه نیست و همچنین ممکن است به دلیل وجود مشکلات محیطی کارایی لازم را نداشته باشد. بنابراین اکثر حسگرها از موقعیت خود آگاه نیستند. حسگرهایی که اطلاعات مکان نامشخصی دارند، گره‌های غیرلنگر نامیده می‌شوند و مختصات آن‌ها توسط الگوریتم تعیین مختصات تخمین زده می‌شود [۱۴]. الگوریتم‌های مکان‌یابی را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: الگوریتم‌های توزیع شده و الگوریتم‌های متمرکز. در بیشتر الگوریتم‌های متمرکز برای حل مسئله مکان‌یابی به جفت فاصله بین حسگرها نیاز داریم، مانند الگوریتم مقیاس‌گذاری چند بعدی. در این مقاله برای حل مسئله مکان‌یابی حسگرها از روش‌های یادگیری خمینه‌ها استفاده شده است. فرض می‌کنیم حسگرهای لنگر بر روی یک خمینه خاص قرار

داشته باشند. برای این که با کاهش خطای اندازه‌گیری موقعیت دقیق حسگرها را مشخص کرد، استفاده از فاصله ژئودزیکی برای محاسبه فاصله بین حسگرها پیشنهاد می‌شود. در این مقاله، دو روش پیشنهادی برای حل مسئله مکان‌یابی حسگرها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم ارائه می‌دهیم و هر دو را بر روی داده‌ها پیاده‌سازی می‌کنیم. بررسی خطای مکان‌یابی حاصل از پیاده‌سازی نشان‌دهنده عملکرد مناسب روش‌هاست. الگوریتم‌ها را بر روی دو دسته از داده‌های تصادفی و یکنواخت که بر روی کره قرار دارند، بررسی می‌کنیم. تعداد ۲۵۶ حسگر در نظر می‌گیریم که دارای ۱۶ حسگر لنگر و ۲۴۰ حسگر دارای مکان نامشخص هستند. در نهایت با محاسبه میزان خطای اجرای الگوریتم‌ها برای داده‌های یکسان مقایسه می‌شود. همچنین نشان می‌دهیم استفاده از فاصله ژئودزیکی منجر به کاهش خطای محاسبه مکان دقیق حسگرها می‌شود. در نهایت نشان می‌دهیم روش‌های پیشنهادی نسبت به سایر روش‌هایی که از فاصله ژئودزیکی استفاده نمی‌کنند عملکرد بهتری دارد و خطای مکان‌یابی کمتر است. در این مقاله نشان می‌دهیم که با استفاده از روش‌های پیشنهادی ۱ و ۲ خطای مکان‌یابی نسبت به سایر روش‌های پیشنهادی که در مقدمه ارجاع داده شده است دارای خطای کمتری است. در نتایج آزمایشگاهی این مقاله نشان می‌دهیم که مقدار خطای روش پیشنهادی ۱ با استفاده از فاصله ژئودزیکی کمتر از فاصله اقلیدسی است. برای مثال برای تعداد همسایگی $k=17$ در حالت داده‌های تصادفی با استفاده از فواصل ژئودزیکی و اقلیدسی خطاهای 0.9504 و 1.8654 محاسبه شده است. از آن جا که مناسب‌ترین مقدار برای تعداد همسایگی ۱ واحد بیشتر از تعداد لنگرهاست برای تعداد همسایگی $k=17$ خطا را ذکر کردیم. کمترین میزان خطا با استفاده از فاصله ژئودزیکی و اقلیدسی برای $k=21$ برای داده‌های یکنواخت روش ۱ به ترتیب 0.070 و 0.7827 می‌باشد. همچنین در حالت داده‌های یکنواخت می‌توان مشاهده کرد که به ازای تمام مقادیر k خطای

فاصله ژئودزیکی کمتر از فاصله اقلیدسی است. کمترین میزان خطا در روش پیشنهادی ۲ برای داده‌های تصادفی با استفاده از فاصله ژئودزیکی و اقلیدسی به ترتیب ۰/۱۰۹۸ و ۰/۲۹۰۱ است و برای داده‌های یکنواخت برابر ۰/۳۲۷۵ و ۰/۴۲۵۹ است. لازم به ذکر است میزان خطا برای داده‌های تصادفی و یکنواخت به ترتیب ۷/۷۷۱۳ و ۴/۱۲۰۷ در مقاله [۱۴] می‌باشد که در آن فقط از روش نقشه‌برداری ایزومتریک برای مکان‌یابی حسگرها استفاده شده است. این میزان خطا نشان‌دهنده عملکرد بسیار بهتر روش‌های پیشنهادی ما در مقایسه با سایر مقالات از جمله [۱۴] می‌باشد. البته باید توجه کرد که ما با در نظر گرفتن نقاط روی یک خمینه خاص و محاسبه فاصله ژئودزیکی آنها به پیشنهاد الگوریتم بر اساس آنها پرداختیم و به خطای بسیار پایین قابل توجه رسیدیم.

ساختار مقاله در ادامه به صورت زیر می‌باشد:

در بخش دوم به بیان کارهای مرتبط با موضوع مکان‌یابی پرداخته شده است. در بخش سوم به تعریف مسئله مکان‌یابی می‌پردازیم. در بخش چهارم روش نقشه‌برداری ایزومتریک معرفی می‌گردد. در بخش پنج الگوریتم پیشنهادی اول معرفی و نتایج حاصل از پیاده‌سازی آن شرح داده می‌شود. بخش ششم به معرفی روش نقشه ویژه لاپلاسین و سپس ارایه الگوریتم پیشنهادی دوم و پیاده‌سازی آن اختصاص دارد. همچنین در این بخش به مقایسه نتایج پیاده‌سازی هر دو الگوریتم می‌پردازیم. بخش هفتم به نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

۲. کارهای مرتبط

روش‌های بسیاری برای محاسبه مکان حسگرها در شبکه‌های حسگر معرفی شده‌است. بولوسو و همکاران گره‌هایی را که دارای مختصات ناشناخته بودند را با میانگین‌گیری موقعیت‌های همه حسگرهای لنگری (حسگر لنگر حسگری است که موقعیت مکانی آن مشخص است

و به سایر حسگرها برای تعیین موقعیتشان کمک می‌کند) که گره موردنظر با آنها اتصال رادیویی دارد، مکان‌یابی کرد [۶]. فیتزپاتریک و همکاران یک مدل پیچیده‌تر را برای مکان‌یابی توصیف کرد که هر گره به عنوان مرکز همسایگان خود در نظر گرفته می‌شود [۱۱]. شانگ و همکاران از مقیاس‌بندی چند بعدی (MDS) برای تخمین مکان‌های نسبی همه گره‌های حسگر استفاده کرد و سپس مکان‌های نسبی را با کمک مکان‌های لنگرها به مکان‌های فیزیکی تبدیل کرد [۱۶]. پاتواری و همکاران از تکنیک‌های خمینه برای مکان‌یابی حسگرها استفاده کرد [۷]. اخیراً روش‌های بومی‌سازی مبتنی بر هسته، علایق قابل‌توجهی را به خود جلب کرده‌اند. این نوع روش‌ها یک تابع هسته مناسب را برای اندازه‌گیری شباهت بین گره‌های حسگر انتخاب می‌کنند، جایی که تابع هسته را می‌توان به طور طبیعی بر حسب ماتریس قدرت سیگنال تعریف کرد، سپس از روش‌های یادگیری ماشین برای تخمین مکان‌های گره‌های حسگر استفاده کرد. جنکینز تجزیه و تحلیل اجزای اصلی هسته (PCA) را برای تخمین مکان‌های نسبی مجموعه‌ای از گره‌های حسگر اتخاذ کرد [۴]. اسولو و همکاران معیار تراز هسته را برای یادگیری پارامتر بهینه تابع هسته گاوسی انتخاب کرد و سپس از تکنیک PCA هسته افزایشی برای ساخت مدل خمینه غیرخطی که مکان‌های لنگرها را به هم مرتبط می‌کند، استفاده کرد [۹]. روش‌های سنتی که برای حل مسئله مکان‌یابی به کار می‌روند به دلایل مختلفی نمی‌توانند به درستی موقعیت حسگرها را تخمین بزنند که از جمله این عوامل می‌توان به متحرک بودن لنگرها، شبکه‌های حسگر بی‌سیم متحرک، تاخیر، برداشت انرژی و وضعیت‌های محیطی نامطلوب اشاره کرد. به طور کلی اصلی‌ترین مشکلی که در مسئله مکان‌یابی حسگرها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با آن مواجه هستیم مسئله محدودیت قدرت سیگنال ارسالی بین حسگرهاست. در مقاله [۱۶] درباره روش‌های مکان‌یابی حسگرها مبتنی بر قدرت سیگنال بحث شده است. روش‌های سنتی مسیر را

اگر بهینه‌سازی را برای فرمول فوق انجام دهیم، یعنی اگر از فرمول مشتق بگیریم و مساوی صفر قرار دهیم، در این صورت می‌توان به این نتیجه رسید که ماتریس A با استفاده از فرمول زیر قابل محاسبه است:

$$A = \Delta X_a \Delta Y_a^T (\Delta Y_a \Delta Y_a^T)^{-1} \quad (4)$$

بنابراین بعد از مشخص شدن خروجی الگوریتم مقیاس‌گذاری چند بعدی آن را به عنوان مختصات نسبی حسگرها در نظر گرفته‌ایم. اما مسئله این است که موقعیت دقیق حسگرها را محاسبه کنیم. برای این منظور به سراغ محاسبه ماتریس A می‌رویم. برای محاسبه A از فرمول (۱) استفاده می‌شود. بنابراین ابتدا باید ΔX_a و ΔY_a در ابتدا تعریف شوند. اندیس a به این معناست که هر کدام از موارد زیر باید برای حسگرهای لنگر محاسبه شود.

$$\begin{aligned} \Delta X_a &= [\Delta x_1, \dots, \Delta x_{u-1}, \Delta x_{u+1}, \dots, \Delta x_n], \\ \Delta Y_a &= [\Delta y_1, \dots, \Delta y_{u-1}, \Delta y_{u+1}, \dots, \Delta y_n] \end{aligned}$$

در فرمول فوق u نشان‌دهنده یک حسگر لنگر است یعنی حسگری که مختصات آن معلوم است و باید به سایر حسگرها برای تعیین موقعیتشان کمک کند بنابراین ΔX_a و ΔY_a به صورت ماتریس‌های مربعی با ابعادی به اندازه تعداد لنگرها هستند. برای محاسبه ماتریس A که به عنوان ماتریس تبدیل معرفی شده است و مختصات نسبی نقاط را به مختصات مطلق تبدیل می‌کند از ΔX_a و ΔY_a استفاده می‌شود. برای محاسبه ماتریس A از حسگرهای لنگر استفاده شده است. سپس باید از ماتریس A برای تبدیل مختصات تمام حسگرها استفاده کرد. برای این منظور ماتریس را به ابعاد متناسب با ماتریس A تقسیم می‌کنیم و بعد از ضرب مجدداً ماتریس‌ها را با یکدیگر الحاق می‌کنیم. در نهایت باید مختصات دقیق لنگرها را به مختصات به دست آمده در اثر تبدیل اضافه کنیم [۵].

$$\tilde{X} = A(Y_i - Y_u) + X_u \quad (5)$$

به این ترتیب مختصات دقیق حسگرها محاسبه می‌شود. بعد از محاسبه مختصات دقیق حسگرها باید

برای ادغام تکنیک‌های یادگیری ماشین (ML) و بهینه‌سازی با تکنیک‌های مکان‌یابی باز می‌کند [۲][۵][۱۷].

۳. تعریف مسئله مکان‌یابی و محاسبه مختصات دقیق حسگرها

برای مسئله مکان‌یابی می‌توان از روش‌های تعیین حسگر لنگر و تقریب استفاده کرد. در روش انتخاب لنگر برای مکان‌یابی نقاط از حسگرهایی که موقعیت آن‌ها تعیین شده است استفاده می‌شود.

یکی از مهم‌ترین گام‌ها تعیین مختصات مطلق دقیق حسگرهاست. خروجی الگوریتم مقیاس‌گذاری چند بعدی که همان گام آخر نشان‌دهنده است، نشان‌دهنده مختصات‌های نسبی حسگرهاست. برای یافتن مختصات دقیق به شرح زیر عمل می‌شود: ماتریس تبدیل A نقاط نسبی که از این الگوریتم حاصل شده‌اند و آن‌ها را x نامیده‌ایم به نقاط y تبدیل می‌کند. بنابراین می‌توان گفت داریم:

$$y_i = Ax_i + b; \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

در فرمول فوق m نشان‌دهنده تعداد حسگرهای لنگر است. می‌خواهیم مختصات نقاط را در فضای دو بعدی تعیین کنیم به همین دلیل برای محاسبه ماتریس تبدیل مختصات فقط از مولفه‌های اول و دوم ماتریس حاصل از الگوریتم مقیاس‌گذاری چند بعدی استفاده می‌کنیم. برای محاسبه ماتریس A باید یک مسئله بهینه‌سازی حل شود. این مسئله بهینه‌سازی به این صورت است باید خطای روش را به حداقل برساند. در واقع باید مجموع میانگین مربعات کمینه شود بنابراین مسئله بهینه‌سازی که به صورت زیر تعریف شده است باید حل شود:

$$\text{Min}_{A,b} \sum_{i=1, i \neq u}^n \|A\Delta Y_i - \Delta X_i\|^2 \quad (3)$$

کمینه کردن خطا فقط برای نقاطی که لنگر هستند انجام می‌شود.

آزمایش‌ها نشان می‌دهد که اگر از ترکیب دو روش معرفی شده برای ساخت گراف همسایگی استفاده شود در این صورت نتیجه بهتری حاصل می‌شود. بعد از این که گراف همسایگی ساخته شد باید ماتریس D_g مشخص شود. برای تعیین ماتریس D_g به بررسی این نکته می‌پردازیم که آیا بین دو راس (حسگر) دلخواه مانند x_i و x_j یال وجود دارد یا نه. اگر یال وجود داشته باشد، مقدار درایه موردنظر در ماتریس D_g به اندازه فاصله دو راس x_i و x_j است و در غیر این صورت یعنی اگر بین دو راس یال نباشد مقدار آرایه ∞ تنظیم می‌شود. یعنی داریم:

$$D_{ij} = \begin{cases} d_{ij}, & e_{ij} = 0 \\ \infty, & e_{ij} = 1 \end{cases} \quad (7)$$

گام بعدی اجرای الگوریتم نقشه‌برداری ایزومتریک، محاسبه کوتاه‌ترین فاصله ژئودزیک است. ورودی این الگوریتم یک ماتریس وزن‌دار و جهت‌دار است که بعد از اجرای آن، کوتاه‌ترین فاصله ژئودزیک بین تمام جفت راس‌ها محاسبه می‌شود. خروجی حاصل به عنوان ورودی الگوریتم مقیاس‌گذاری چند بعدی در نظر می‌گیریم. نکته مهم این است که ورودی الگوریتم مقیاس‌گذاری چند بعدی یک ماتریس فاصله یا ماتریس عدم شباهت است [۹][۱۸].

۴-۱ انتخاب پارامتر مناسب برای الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی

روش ایزومپ بسیار به انتخاب پارامتر حساس است. بنابراین برای تعیین مقدار مناسب پارامترهای روش ایزومپ نیز راهکارهایی ارائه شده است. الگوریتم ایزومپ بسیار به پارامتر k وابسته است پس باید در انتخاب این پارامتر دقت شود. اگر پارامتر k خیلی بزرگ یا خیلی کوچک انتخاب شود در این صورت گراف همسایگی به درستی تشکیل نمی‌شود. چون در این صورت یا نقطه بسیار دور را نیز به عنوان همسایه در نظر می‌گیرد یا این که حتی نقاط اصطلاحاً مشابه یا نزدیک به هم را در همسایگی در نظر

میزان خطا را مشخص کرد. توجه داشته باشید که تعیین میزان خطا برای بررسی عملکرد الگوریتم ضروری است. برای محاسبه میزان خطا از حسگرهای غیرلنگر استفاده می‌شود. پس داریم:

$$error = \frac{\sum_{i=n+1}^m ||\tilde{x}_i - x_i||^2}{n} \quad (6)$$

اکنون به بررسی این نکته می‌پردازیم که چگونه می‌توان با استفاده از محاسبه خطا، پارامتر مناسب برای الگوریتم ایزومپ را محاسبه کرد [۱۰][۱۱].

۴. معرفی روش نقشه‌برداری ایزومتریک^۱

ایزومپ یکی از روش‌های غیرخطی کاهش بعد داده‌ها در یادگیری خمینه‌هاست که علاوه بر کاهش بعد فاصله ژئودزیک بین نقاط را حفظ می‌کند [۳]. هدف این روش یافتن هندسه حقیقی گره‌های مستقر شده با استفاده از فواصل ژئودزیک بین آن‌هاست. برای تعیین کوتاه‌ترین فاصله ژئودزیک باید ابتدا نقاط همسایگی حسگرها تعیین شود. دو روش رایج برای تعیین نزدیک‌ترین همسایگی‌ها روش‌های اپسیلون-گوی و کا-نزدیک‌ترین همسایگی هستند. سوال دیگری که در رابطه با این و روش مطرح می‌شود، این است که چگونه می‌توان مناسب‌ترین مقدار را برای اپسیلون و k تعیین کرد [۱۲]؟ بنابراین ماتریس ورودی یک ماتریس فاصله است. فرض کنیم $D_{n \times n}$ ماتریس فاصله بین حسگرها باشد. عدد n در اینجا نشان‌دهنده تعداد حسگرهاست. نخستین گام ساخت گراف همسایگی است. برای ساخت گراف همسایگی می‌توان از روش اپسیلون-گوی یا روش کا-نزدیک‌ترین همسایگی استفاده کرد. اگر مقدار ϵ خیلی بزرگ یا خیلی کوچک انتخاب شود، گراف موردنظر به تعداد زیادی گراف ناهمبند تبدیل می‌شود که باعث می‌شود محاسبات مربوط به نشاننده با خطا مواجه می‌شود و یا این که راس‌هایی را با یکدیگر همسایه می‌گیرد که در واقع شباهتی به یکدیگر ندارند. نتایج حاصل از

آنها را به صورت یکنواخت و با فواصل یکسان در نظر می‌گیریم. مسئله بعدی این است که برای محاسبه فواصل این حسگرهای لنگر از فرمول طول قوس استفاده می‌شود. همان‌طور که پیشتر اشاره شده است، مزیت روش ایزومپ نسبت به سایر روش‌های مشابه این است که این روش به جای استفاده از فاصله اقلیدسی، از فاصله ژئودزیکی استفاده می‌شود و همچنین در این روش فاصله ژئودزیکی بین نقاط حفظ می‌شود. برای محاسبه فاصله ژئودزیکی دو نقطه مانند A و B که بر روی یک کره به شعاع r قرار دارند، داریم:

$$L = R \cos^{-1} \{ (\cos(\theta_A - \theta_B)) - (\cos \theta_B \cdot \cos \theta_A) (1 - (\cos \phi_B - \cos \phi_A)) \} \quad (8)$$

در کره S^2 ژئودزیکی‌ها دوائر عظیمه هستند. این دوائر از سطح مقطع کره S^2 با صفحاتی که از مبدا مختصات می‌گذرند، تشکیل می‌شوند.

فرض کنیم معادله پارامتری کره S^2 در فضای $\mathbb{R}^3$ به صورت زیر نمایش داده شود:

$$S: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^3 \\ S(\rho, \phi, \theta) = (x(\rho, \phi, \theta), y(\rho, \phi, \theta), z(\rho, \phi, \theta))$$

بنابراین اگر بخواهیم معادله پارامتری یک دایره با شعاع r را در نظر بگیریم در این صورت داریم:

$$S(\rho, \phi, \theta) = (\rho \sin(\phi) \cos(\theta), \rho \sin(\phi) \sin(\theta), \rho \cos(\phi)); \theta \in [0, 2\pi], \phi \in [0, \pi]$$

از آنجایی که مختصات حسگرهای لنگر تعیین شده است، بنابراین با استفاده از فرمول محاسبه فاصله ژئودزیکی به راحتی می‌توان فاصله ژئودزیکی بین هر جفت لنگر را محاسبه کرد.

الگوریتم ۱ پیشنهادی: مکان‌یابی شبکه‌های حسگر بی‌سیم بر مبنای فاصله ژئودزیکی و نقشه‌برداری ایزومپ

ورودی: ماتریس داده $D_{n \times p}$ که n تعداد داده‌ها (شامل مختصات حسگرهای لنگر و غیر لنگر) و p نشان‌دهنده بعد

نمی‌گیرد و به این ترتیب با استفاده از پیاده‌سازی روش اپسیلون-گوی می‌توان یک محدوده مناسب برای پرامتر k تعیین کرد. برای k هایی که در این محدوده قرار دارند مقدار خطا محاسبه می‌شود. هر چه مقدار خطای به دست آمده کمتر باشد، بیانگر این نکته است که k انتخاب شده مناسب‌تر است. در واقع هدف این است که بررسی کنیم به ازای تعداد همسایگی انتخاب شده، اختلاف میان مختصات دقیق نقاط و مختصات واقعی چقدر است. هر چه این مقدار کم باشد به معنای انتخاب درست تعداد حسگرهای همسایه است. لذا با استفاده از معادله زیر می‌توان مقدار مناسب برای k تعیین کرد [۱۲]:

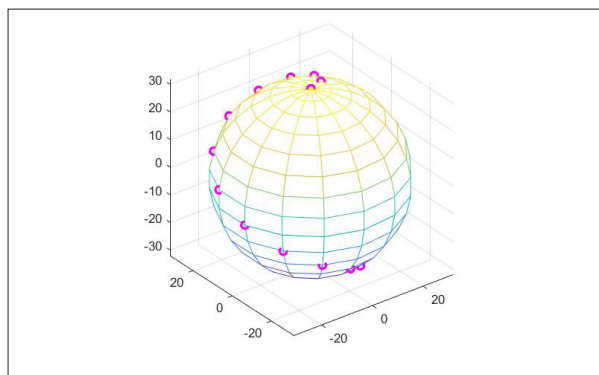
$$error = \frac{\sum_{i=n+1}^m ||\tilde{x}_i - x_i||^2}{n} \quad (7)$$

۵. معرفی روش پیشنهادی ۱

هدف اصلی در روش پیشنهادی این است که نشان دهیم اگر نقاط لنگر بر روی یک خمینه خاص قرار داشته باشند، الگوریتم مکان‌یابی شبکه‌های حسگر بی‌سیم عملکرد بهتری دارد. برای این منظور نقاط لنگر را بر روی یک رویه خاص مانند کره در نظر می‌گیریم.

همان‌طور که پیشتر نیز اشاره شد، در اینجا برای مکان‌یابی حسگرها از ترکیب دو روش حسگر لنگر و تقریب استفاده شده است. به این ترتیب که ابتدا باید حسگرهایی که لنگر هستند را مشخص کنیم و همچنین از روش‌هایی که به عنوان الگوریتم‌های موضعی‌سازی از آنها یاد می‌شود، سعی می‌کنیم با استفاده از مشخص کردن نزدیک‌ترین همسایگی‌ها که در واقع شبیه‌ترین نقاط به یکدیگر هستند، گراف مناسب را برای نشان دادن رویه با استفاده از روش‌های یادگیری خمینه‌ها پیاده‌سازی کنیم. در واقع همان گام نخست الگوریتم ایزومپ که ساخت گراف همسایگی است.

فرض می‌کنیم لنگرها بر روی کره قرار داشته باشند.



شکل ۲: ۱۶ حسگر لنگر که بر روی کره به شعاع ۳۲ قرار دارند

جدول (۱): محاسبه میزان خطا با استفاده از فاصله ژئودزیکی و اقلیدسی برای مقادیر مختلف k برای داده‌های تصادفی روش ۱

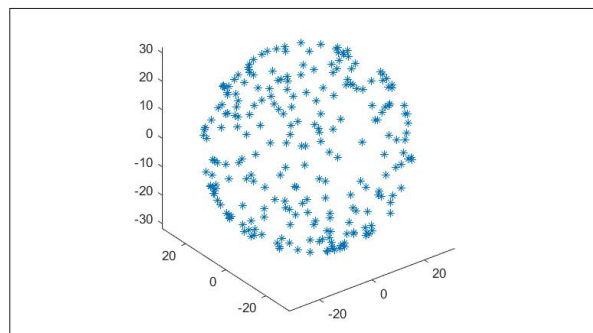
مقدار k	مقدار خطا فاصله ژئودزیکی	مقدار خطا فاصله اقلیدسی
۱۳	۰,۹۱۵۴	۲,۵۰۵۸
۱۵	۱,۱۴۲۴	۱,۴۵۵۲
۱۷	۰,۹۵۰۴	۱,۸۶۵۴
۱۹	۰,۹۳۳۹	۰,۲۲۴۶
۲۱	۰,۴۶۵۱	۰,۲۷۵۳

۵-۱- نتایج آزمایشگاهی روش پیشنهادی ۱

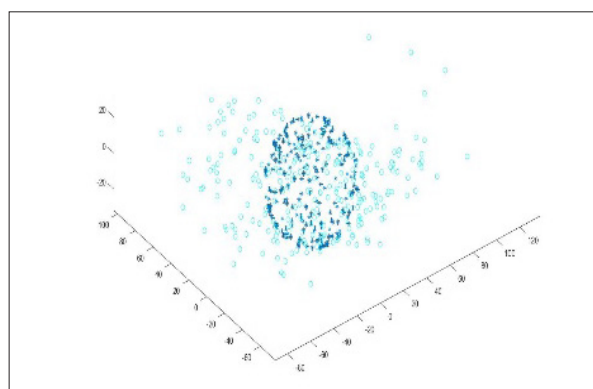
الگوریتم پیشنهادی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم بر روی دو دسته از داده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا الگوریتم را بر روی داده‌های تصادفی پیاده‌سازی می‌کنیم. داده‌ها در این قسمت شامل ۲۵۶ حسگر است که ۱۶ مورد لنگر هستند و بروی مرز یک کره به شعاع ۳۲ قرار گرفته‌اند. موقعیت این ۱۶ لنگر تعیین شده است. اما سایر حسگرها که ۲۴۰ مورد هستند در داخل کره قرار گرفته‌اند.

همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌کنید، دایره‌های صورتی رنگ حسگرهای لنگر هستند و به صورت منظم بر روی کره انتخاب شده‌اند و در شکل (۱) ستاره‌های آبی رنگ که درون کره‌ای به شعاع ۳۲ قرار گرفته‌اند، حسگرهای غیرلنگر هستند.

در جدول (۱) میزان خطا برای روش پیشنهادی ۱ برای مقادیر مختلف k در حالت داده‌های تصادفی نشان داده



شکل ۱: ۲۴۰ نقطه تصادفی درون کره به شعاع ۳۲



شکل ۳: موقعیت دقیق حسگرها اگر الگوریتم ایزومپ را بر روی مختصات حسگرها پیاده کنیم، نتیجه بالا حاصل می‌شود که در آن دایره‌هایی که به رنگ سبز رسم شده‌اند، نشان‌دهنده موقعیت صحیح حسگرها هستند.

داده‌هاست. k : تعداد همسایگی‌ها در الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی. ϵ : آستانه در روش گوی اِپسیلون.

نتیجه: نتیجه حاصل شده یک ماتریس $X_{m \times p}$ است که $m \ll n$

مراحل: ۱. محاسبه ماتریس فاصله که برای محاسبه فاصله نقاط لنگر از فاصله ژئودزیکی رابطه ۸ استفاده می‌شود.

۲. ساخت گراف اطلاعات موضعی

۳. اجرای الگوریتم فلوید وارشال برای محاسبه کوتاه‌ترین فاصله ژئودزیکی

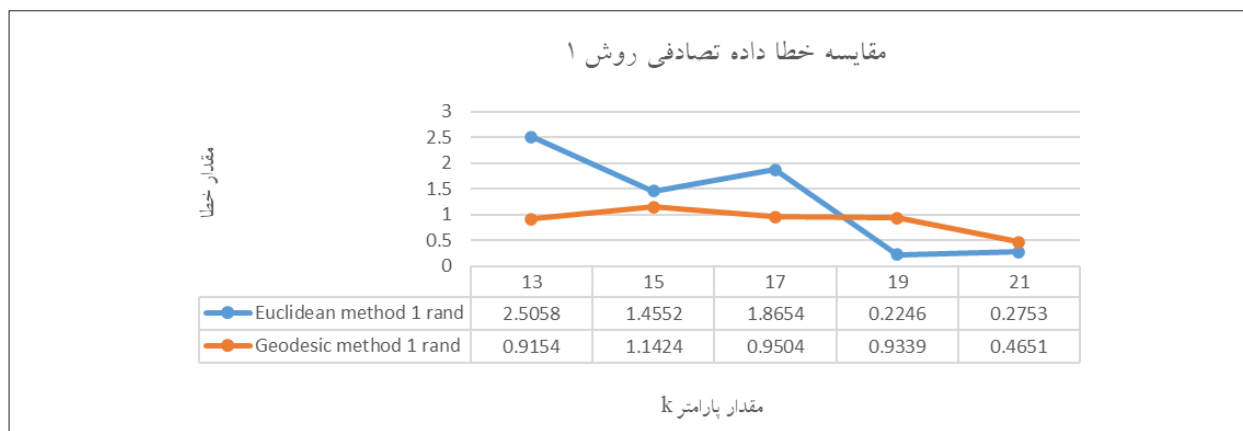
۴. اجرای الگوریتم MDS

۵. محاسبه ماتریس تبدیل مختصات با استفاده از مختصات حسگرهای لنگر

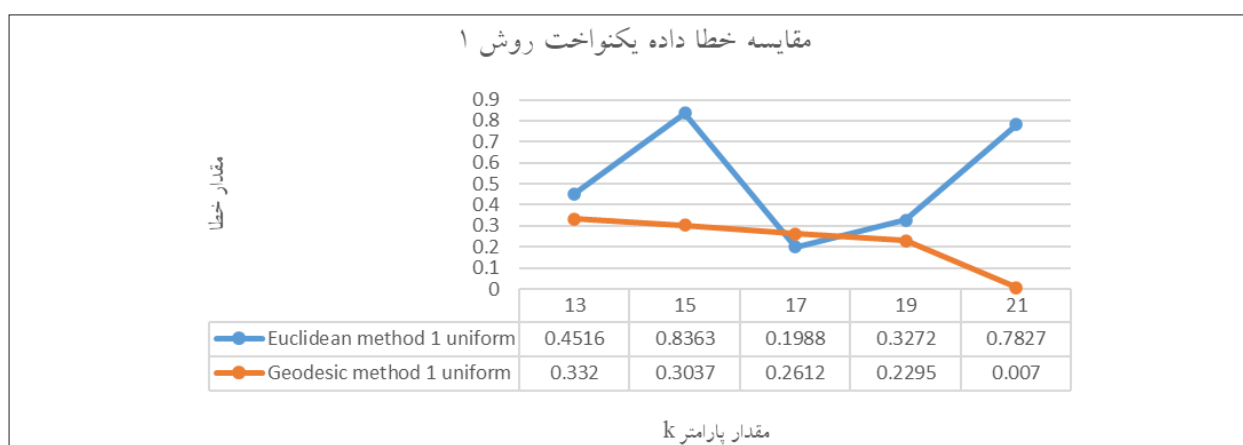
۶. محاسبه مختصات دقیق حسگرها

۷. محاسبه خطای الگوریتم با استفاده از مختصات‌های

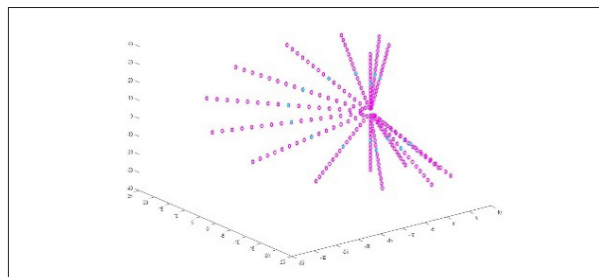
نسبی و دقیق



نمودار شماره (۱): به مقایسه خطای بین فواصل ژئودزیک و اقلیدسی در داده‌های تصادفی روش پیشنهادی ۱ پرداختیم.



نمودار شماره (۲): به مقایسه خطای بین فواصل ژئودزیک و اقلیدسی در داده‌های یکنواخت روش پیشنهادی ۱ پرداختیم.



شکل ۴: حسگرهایی که به صورت یکنواخت انتخاب شده‌اند

جدول (۲): محاسبه میزان خطا با استفاده از فاصله ژئودزیک و

اقلیدسی برای مقادیر مختلف k برای داده‌های یکنواخت روش ۱

مقدار k	مقدار خطا فاصله ژئودزیک	مقدار خطا فاصله اقلیدسی
۱۳	۰.۳۳۲۰	۰.۴۵۱۶
۱۵	۰.۳۰۳۷	۰.۸۳۶۳
۱۷	۰.۲۶۱۲	۰.۱۹۸۸
۱۹	۰.۲۲۹۵	۰.۳۲۷۲
۲۱	۰.۰۰۷۰	۰.۷۸۲۷

شده است. همان‌طور که در جدول نیز نشان داده شده است، کمترین میزان خطا برای $k = ۱۷$ مشاهده می‌شود. در دسته دوم فرض می‌کنیم داده‌ها به صورت یکنواخت درون کره قرار داشته باشند. همچنین حسگرهای لنگر را بر روی مرز کره به شعاع ۳۲ فرض می‌کنیم. برای انتخاب یکنواخت داده‌ها نقاط دلخواهی را بر روی کره‌هایی با اختلاف شعاع یکسان و فاصله یکسان درون کره اصلی در نظر می‌گیریم.

به این ترتیب نقاطی که به صورت یکنواخت انتخاب شده باشند مانند شکل (۴) نمایش داده می‌شوند. مانند حالت تصادفی لنگرها بر روی یک کره به شعاع ۱۶ قرار گرفته‌اند و آنها را با رنگ آبی مشخص کرده‌ایم. همچنین سایر حسگرها نیز با رنگ صورتی مشخص شده‌اند که بر روی کره‌هایی با شعاع متفاوت اما در فاصله‌های منظم قرار گرفته‌اند. مانند حالت قبل باید الگوریتم بر روی داده‌های یکنواخت نیز اجرا شود.

ویژگی‌های دارد که می‌تواند به یادگیری ساختار داده‌های نهفته در خمینه‌های ریمانی کمک کند.

فرض کنید $G = G(V, E)$ یک گراف وزن‌دار باشد به‌طوری که $V = V(G) = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ مجموعه رئوس گراف نام دارد و همچنین $E = E(G) = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ یال‌های گراف هستند. تابع وزن گراف نیز به صورت $W(v_i, v_j) = W(v_j, v_i) = w_{ij}$ که $W: V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ تعریف می‌شود که $W(v_i, v_j) = w_{ij}$ تعریف ۱: تعریف اول توسط فیدلر ارائه شده است. طبق این تعریف لاپلاسین یک گراف بدون حلقه و با چند یال که با $L(G)$ نمایش داده می‌شود، به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\begin{cases} d_{vi} & \text{اگر } v_i = v_j \\ -1 & \text{اگر } v_i, v_j \text{ مجاور باشند} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

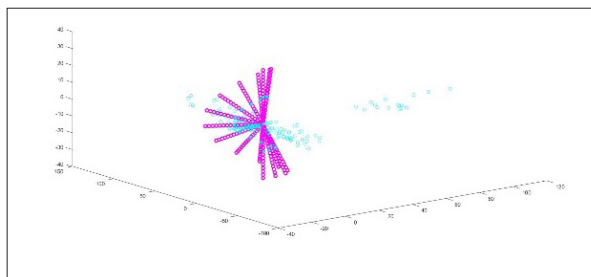
فیدلر لاپلاسین یک گراف را به عنوان ماتریس متقارن برای گراف منتظم تعریف کرد. که A یک گراف همسایگی است و AT ترانزاده ماتریس مجاورت است. همچنین I_n ماتریس همانی و n درجه گراف منتظم است $L(G) = I_n - A$ تعریف دیگری که توسط چانگ ارائه شده است به عنوان تعمیم لاپلاسین برای گراف وزن‌دار در نظر گرفته شده است. به این ترتیب که برای یال‌های گراف وزن در نظر گرفته شده است، در این صورت لاپلاسین گراف وزن‌دار، اختلاف ماتریس قطری D و ماتریس وزن‌دار W تعریف می‌شود:

$$L_w(G) = D - W$$

که عناصر روی قطر اصلی ماتریس D به صورت زیر محاسبه می‌شود و با d_{vi} نمایش داده می‌شود.

$$\sum_{j=1}^n W(v_i, v_j)$$

تعریف ۲: لاپلاسین گراف وزن دار G که با $L_w(G)$ نمایش داده می‌شود، به صورت زیر محاسبه می‌شود: [۱۹][۱۰].



شکل ۵: موقعیت دقیق حسگرهایی که به صورت یکنواخت قرار دارند با استفاده از روش پیشنهادی ۱

در ادامه برای بررسی و مقایسه بهتر و اثبات این نکته که با استفاده از فاصله ژئودزیکی نتایج بهتری حاصل می‌شود، الگوریتم‌های پیشنهادی ۱ و ۲ با استفاده از فاصله اقلیدسی نیز اجرا می‌شوند و همچنین جدول محاسبه خطا را برای حالت اقلیدسی نیز محاسبه می‌کنیم.

۵-۲- بررسی خطای الگوریتم پیشنهادی ۱

به این ترتیب می‌توان ادعا کرد اگر حسگرهای لنگر بر روی یک خمینه خاص قرار داشته باشند، برای k یکسان، میزان خطا در حالت تصادفی کمتر از حالت یکنواخت خواهد بود. بعد از اجرای الگوریتم ایزومپ بر روی نقاط و به دست آوردن مختصات جدید حسگرها به بررسی تاثیر انتخاب پارامتر k در میزان خطای برنامه پرداختیم. برای این منظور به محاسبه میزان خطا در هر دو روش تصادفی و یکنواخت پرداختیم. به این ترتیب که برای مقادیر مناسب k که می‌توان آن را از طریق تعداد همسایگی‌هایی که در اپسیلون-گوی قرار می‌گیرند تعیین کرد، میزان خطا محاسبه می‌شود.

۶. معرفی الگوریتم نقشه ویژه لاپلاسین

روش نقشه‌های ویژه لاپلاسین یک روش محبوب برای کاهش ابعاد غیر خطی و نمایش داده‌هاست. این روش مبتنی بر ماتریس لاپلاسین گراف است که عملکردی مشابه عملگر لاپلاس بلترامی دارد. در واقع گراف لاپلاسین

۶-۱- معرفی روش پیشنهادی ۲

در این بخش با اصلاح روش نقشه برداری به تعیین موقعیت حسگرها می پردازیم. از آنجایی که فرض کردیم حسگرهای لنگر بر روی یک خمینه خاص (کره) قرار گرفته اند. در محاسبه ماتریس وزن در روش نقشه برداری ویژه فاصله ژئودزیکی بین لنگرها در نظر گرفته می شود و یک ماتریس وزن اصلاح شده مطابق با فاصله های ژئودزیکی روی لنگرها ساخته می شود. مراحل الگوریتم پیشنهادی به صورت زیر است:

۶. تشکیل ماتریس تبدیل و محاسبه داده های جدید با استفاده از این ماتریس.
۷. محاسبه ماتریس تبدیل مختصات با استفاده از مختصات حسگرهای لنگر
۸. محاسبه مختصات دقیق حسگرها
۹. محاسبه خطای الگوریتم با استفاده از مختصات های نسبی و دقیق

۶-۲- بررسی خطای الگوریتم روش پیشنهادی ۲

یکی از نکات مهمی که باید بعد از اجرای الگوریتم ها مورد بررسی قرار گیرد، محاسبه میزان خطای الگوریتم است. برای این منظور ابتدا باید مختصات جدید داده ها را با استفاده از ماتریس تبدیل محاسبه کنیم. برای این که بتوانیم ماتریس تبدیل را محاسبه کنیم باید از نقاط لنگر استفاده کنیم. برای این منظور باید اختلاف نقاط لنگر که در ابتدا در نظر گرفتیم و نقاط به دست آمده از روش نقشه ویژه لاپلاسن را با یکدیگر مقایسه کنیم.

در روش پیشنهادی ۲ نیز مانند روش پیشنهادی ۱ ابتدا خطا را برای داده های تصادفی و سپس برای داده های یکنواخت محاسبه می کنیم.

برای بررسی میزان خطا باید خطای الگوریتم را برای مقادیر مختلف K بررسی کنیم.

جدول (۳): محاسبه میزان خطا با استفاده از فاصله ژئودزیکی و اقلیدسی برای مقادیر مختلف K برای داده های تصادفی روش ۲

مقدار k	مقدار خطا فاصله ژئودزیکی	مقدار خطا فاصله اقلیدسی
۱۳	۰,۴۳۴۳	۴,۱۰۹۳
۱۵	۰,۱۰۹۸	۰,۲۹۰۱
۱۷	۰,۷۱۵۱	۰,۵۵۷۰
۱۹	۰,۳۳۳۲	۴,۲۴۷۶
۲۱	۲۴,۴۳۰۶	۰,۲۹۰۲

همان طور که در جدول شماره (۳) نیز مشاهده می شود،

الگوریتم پیشنهادی ۲: مکان یابی شبکه های حسگر بی سیم بر مبنای فاصله ژئودزیکی و نقشه برداری ویژه لاپلاسن

ورودی: ماتریس داده $D_{n \times p}$ که n تعداد داده ها و p نشان دهنده بعد داده ها است. K: تعداد همسایگی ها در الگوریتم نزدیک ترین همسایگی. ϵ : آستانه در روش گوی اپسیلون.

نتیجه: نتیجه حاصل یک ماتریس $X_{m \times p}$ است که $m \ll n$.

که m همان بعد کاهش یافته است و در واقع تعداد مقادیر ویژه انتخاب شده است.

مراحل: ۱. محاسبه ماتریس فاصله که برای محاسبه فاصله نقاط لنگر از فاصله ژئودزیکی رابطه ۸ استفاده می شود.

۲. ساخت گراف اطلاعات موضعی Gnn. سپس باید از روی گراف Gnn گراف ماتریس مجاورت $A(Gnn)$ را ساخت.

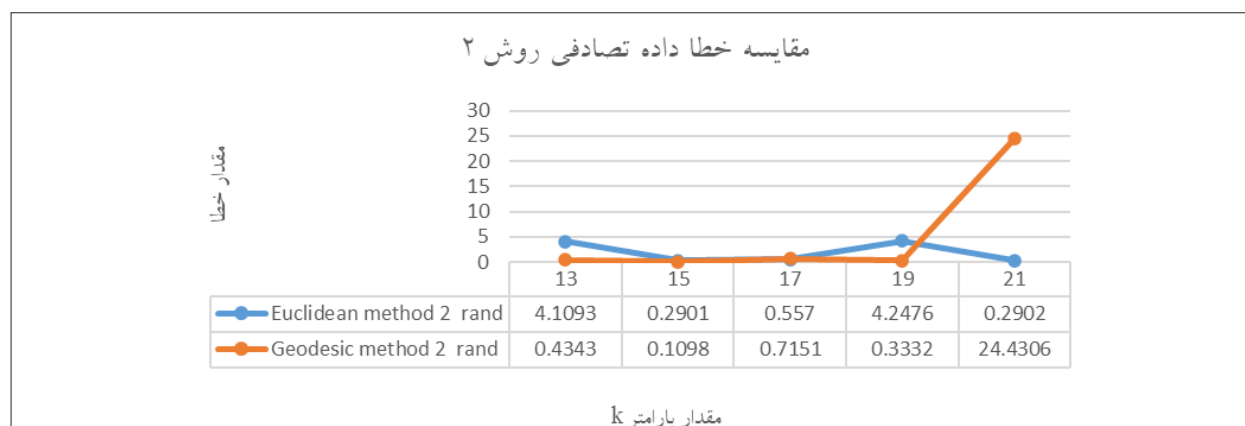
۳. محاسبه ماتریس وزن W_{nn} برای یال های گراف Gnn. برای ساخت ماتریس وزن از تابع Heat Kernel استفاده می شود.

۴. محاسبه ماتریس لاپلاسن: $D_{NN} - L(G_{NN}) = W_{NN}$.

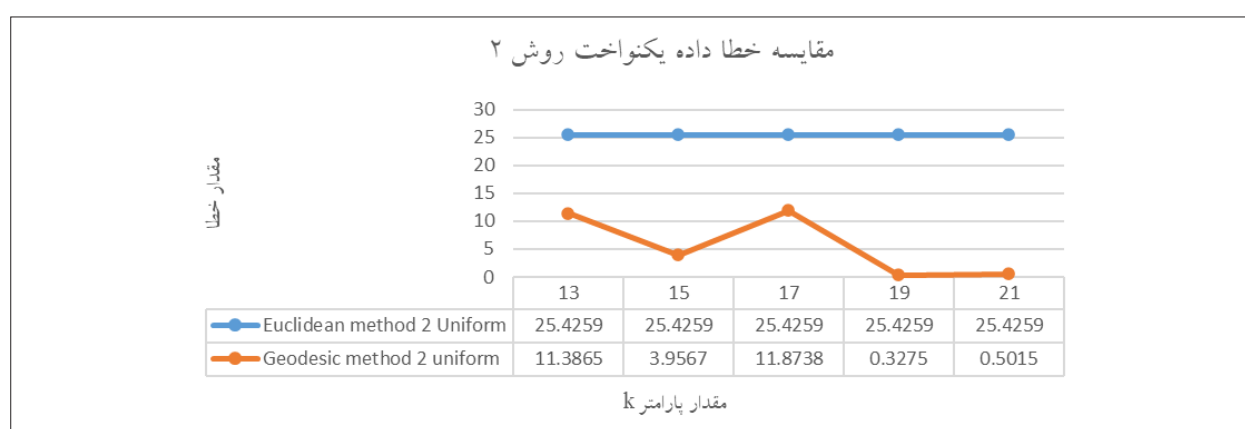
در اینجا D_{NN} ماتریس قطری حاصل از گراف G_{NN} است که عناصر روی قطر اصلی به صورت زیر محاسبه می شوند.

$$d_{vi} = \sum W(v_i, v_j)$$

۵. محاسبه مقادیر ویژه و بردارهای ویژه متناظر با این مقادیر ویژه.



نمودار شماره (۳): به مقایسه خطای بین فواصل ژئودزیک و اقلیدسی در داده‌های تصادفی روش پیشنهادی ۲ پرداختیم.



نمودار شماره (۴): به مقایسه خطای بین فواصل ژئودزیک و اقلیدسی در داده‌های یکنواخت روش پیشنهادی ۲ پرداختیم.

مقادیر تعداد حسگرهای همسایگی مقدار خطای یکسان مشاهده می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به مشاهدات انجام شده روش پیشنهادی ۲ وابستگی به فاصله ژئودزیک ندارد و این در حالی است که میزان تغییرات خطا با استفاده از هر دو فاصله اقلیدسی و ژئودزیک در روش پیشنهادی ۱ مشهود است.

در نمودار شماره (۴) به بررسی مقایسه میزان خطا با استفاده از هر دو فاصله پرداختیم.

همچنین برای داده‌هایی که به صورت یکنواخت قرار دارند نیز الگوریتم پیاده‌سازی می‌شود. شکل زیر نتیجه این پیاده‌سازی را نشان می‌دهد.

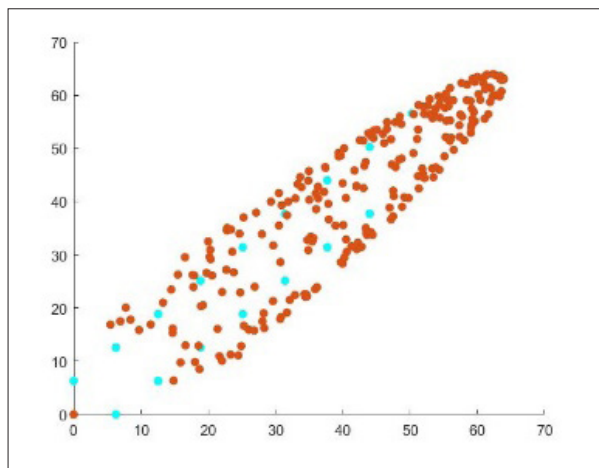
همان‌طور که مشاهده می‌کنید، کمترین مقدار خطا برای مقدار $k=21$ رخ می‌دهد.

به ازای مقدار k برابر با ۱۵ کمترین مقدار خطا محاسبه می‌شود.

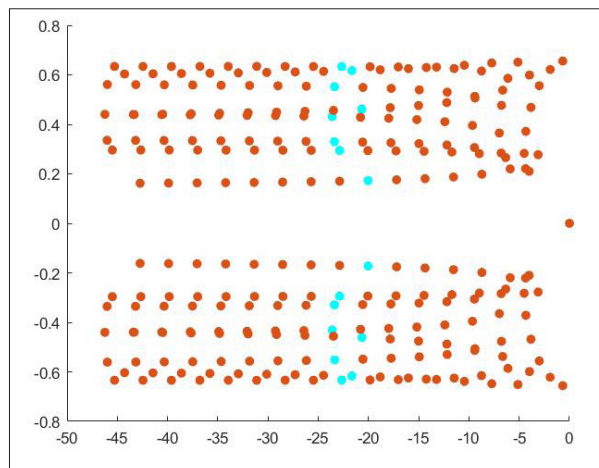
جدول (۳): محاسبه میزان خطا با استفاده از فاصله ژئودزیک و اقلیدسی برای مقادیر مختلف k برای داده‌های یکنواخت روش ۲

مقدار k	مقدار خطا فاصله ژئودزیک	مقدار خطا فاصله اقلیدسی
۱۳	۱۱,۳۸۶۵	۲۵,۴۲۵۹
۱۵	۳,۹۵۶۷	۲۵,۴۲۵۹
۱۷	۱۱,۸۷۳۸	۲۵,۴۲۵۹
۱۹	۰,۳۲۷۵	۲۵,۴۲۵۹
۲۱	۰,۵۰۱۵	۲۵,۴۲۵۹

همان‌طور که مشاهده می‌کنید برای داده‌های یکنواخت میزان خطا از وابستگی به k خارج می‌شود و برای تمام



شکل (۷): موقعیت دقیق حسگرهایی که به صورت تصادفی قرار دارند با استفاده از روش پیشنهادی ۲



شکل (۶): موقعیت دقیق حسگرهایی که به صورت یکنواخت قرار دارند با استفاده از روش پیشنهادی ۲

منابع

1. C. Wang, J. Chen, Y. Sun and X. Shen, "A Graph Embedding Method for Wireless Sensor Networks Localization," GLOBECOM 2009 - 2009 IEEE Global Telecommunications Conference, Honolulu, HI, USA, 2009, pp. 1-6, doi: 10.1109/GLOCOM.2009.5425241
2. Habib, Shaišta, et al. "Floyd-Warshall Algorithm Based on Picture Fuzzy Information." CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences 136.3
3. J. Tenenbaum, V. Silva, and J. Langford, "A Global Geometric Framework for Nonlinear Dimensionality Reduction," pp. 2319-2323, 2000.
4. Jiang, Hua, and Zhifei Zheng. "An Exact Algorithm for the Minimum Dominating Set Problem." Proceedings of the thirty-second international joint conference on artificial intelligence. IJCAI, 2023.
5. Kashniyal, Jyoti, Shekhar Verma, and Krishna Pratap Singh. "Wireless sensor networks localization using progressive isomap." Wireless Personal Communications 92.3 (2017): 1281-1302.
6. N. Bulusu, V. Bystrovskiy, D. Estrin, and J. Heidemann, "Scalable, ad hoc Deployable, RF-based Localization," Proceedings of the Grace Hopper Conference on Celebration of Women in Computing, 2002.
7. N. Patwari and A. Hero III, "Manifold learning algorithms for localization in wireless sensor networks," IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 3, pp. 857-860, 2004.
8. Niculescu, D., 2004. Positioning in ad hoc sensor networks. IEEE network, 18(4), pp.24-29.
9. Ouassila, Bahloul, et al. "Neural networks based linear (PCA) and nonlinear (ISOMAP) feature extraction for soil swelling pressure prediction (North East Algeria)." Heliyon 9.8 (2023).
10. Roychowdhury, Shounak. "Robust Laplacian Eigenmaps using global information." 2009 AAAI Fall Symposium

۷. نتیجه‌گیری

از آنجایی که در دنیای واقعی با کوتاه‌ترین مسیر بین نقاط مواجه هستیم، در نظر گرفتن فاصله ژئودزیکی بین نقاط و موقعیت هندسی آنها مورد اهمیت است. در این مقاله با در نظر گرفتن نقاط حسگر بر روی یک خمینه خاص، در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، دو الگوریتم پیشنهادی ارائه دادیم. همچنین میزان خطا را برای دو حالت از داده‌های یکنواخت و تصادفی ارزیابی کردیم و طبق مشاهدات از مرحله‌ای به بعد مقدار خطا به میزان قابل قبولی کاهش پیدا می‌کند. الگوریتم‌ها را بر روی دو دسته از داده‌های تصادفی و یکنواخت که بر روی کره قرار دارند، بررسی کردیم. تعداد ۲۵۶ حسگر در نظر گرفتیم که دارای ۱۶ حسگر لنگر و ۲۴۰ حسگر دارای مکان نامشخص هستند. بررسی خطای مکان‌یابی حاصل از پیاده‌سازی نشان‌دهنده عملکرد مناسب روش‌هاست. همچنین نشان دادیم استفاده از فاصله ژئودزیکی منجر به کاهش خطای محاسبه مکان دقیق حسگرها می‌شود. در نهایت نشان دادیم روش‌های پیشنهادی نسبت به سایر روش‌هایی که از فاصله ژئودزیکی استفاده نمی‌کنند عملکرد بهتری دارد و خطای مکان‌یابی کمتر است.

- Series. 2009.
11. S. Fitzpatrick and L. Meertens, "Diffusion based localization," private communication, 2004.
 12. Shao, Chao, and Houkuan Huang. "Selection of the optimal parameter value for the isomap algorithm." Mexican International Conference on Artificial Intelligence. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005.
 13. Tubaishat, M. and Madria, S., 2003. Sensor networks: an overview. *IEEE potentials*, 22(2), pp.20-23.
 14. Wang, Chengqun, et al. "Wireless sensor networks localization with isomap." 2009 IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2009.
 15. Widhalm, Dominik, Karl M. Goeschka, and Wolfgang Kastner. "A Review on Immune-Inspired Node Fault Detection in Wireless Sensor Networks with a Focus on the Danger Theory." *Sensors* 23.3 (2023): 1166.
 16. Niu, Ruixin, Aditya Vempaty, and Pramod K. Varshney. "Received-signal-strength-based localization in wireless sensor networks." *Proceedings of the IEEE* 106.7 (2018): 1166-1182.
 17. Yadav, Preeti, and Subhash Chandra Sharma. "A systematic review of localization in WSN: Machine learning and optimization-based approaches." *International Journal of Communication Systems* 36.4 (2023): e5397.
 18. Yousefi, Bardia, et al. "Density-based Isometric Mapping." *arXiv preprint arXiv: 2403.02531* (2024).
 19. Zaki, Mohammed J., and Wagner Meira. *Data mining and analysis: fundamental concepts and algorithms*. Cambridge University Press, 2021.