

بهینه‌سازی پوشش در شبکه‌های حسگر بی‌سیم

رضا زارعی*^۱، علی اصغر آل‌شیخ^۲، ابوالقاسم صادقی نیارکی^۳

*۱- نویسنده مسئول: دانشجوی کارشناسی ارشد گروه GIS، دانشکده‌ی مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین

طوسی، تهران، ایران، rezapincipal@yahoo.com

۲- دانشیار گروه GIS، دانشکده‌ی مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، تهران، ایران، aleshekh@kntu.ac.ir

۳- استادیار گروه GIS، دانشکده‌ی مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، تهران، ایران، sadeghi@kntu.ac.ir

چکیده- سال‌ها است که شبکه‌های حسگر بی‌سیم برای مشاهده و نظارت بر رخدادها و محیط اطراف به کار گرفته شده‌اند. این شبکه‌ها برای کاربردهای مختلفی از قبیل نظارت بر میدان جنگ، نظارت بر ترافیک، پیگیری یک هدف، نظارت بر آتش‌سوزی جنگل و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. عملکرد موفقیت‌آمیز شبکه‌های حسگر بی‌سیم، وابسته به پوشش مناسب محیط می‌باشد. میزان پوشش نیز، وابستگی شدیدی به زیرساخت‌ها از جمله تعداد و مکان حسگرهای مورد استفاده برای نظارت بر محیط دارد. بنابراین یک قدم اساسی در مرحله‌ی طراحی شبکه، تعیین استراتژی جانمایی حسگرها می‌باشد. الگوریتم‌های جانمایی زیادی در سال‌های اخیر به منظور حداقل کردن محدودیت‌های شبکه و بهینه نمودن پوشش ارائه شده است؛ اما آنچه که در این مقاله مورد توجه قرار گرفته، استفاده از شکل واقعی محیط در مسأله‌ی جانمایی می‌باشد که در کارهای گذشته کمتر دیده شده است. حسگرهای استفاده شده در این تحقیق دوربین‌های ویدئویی می‌باشند که با توجه به نحوه‌ی عملکرد آن‌ها مشخص است که برای کشف یک هدف یا رخداد نیاز به دید مستقیم به آن می‌باشد. از طرف دیگر نقاط رؤیت‌پذیر از مکان حسگرها را با استفاده از تحلیل‌های خط دید و Viewshed می‌توان مشخص نمود. بنابراین با تلفیق این تحلیل‌ها و روش‌های جایجایی حسگرها، می‌توان نتایج قابل قبولی را به دست آورد. در واقع هدف ما استفاده از کاربردها، قابلیت‌ها و آنالیزهای GIS در مسأله‌ی جانمایی حسگرها به منظور واقعی‌تر شدن این مسأله و تطابق آن با محیط واقعی می‌باشد. به همین منظور از الگوریتم Minimax که بر اساس دیاگرام ورونوی می‌باشد برای بهینه‌سازی پوشش بر روی یک منطقه‌ی شهری و یک منطقه‌ی طبیعی بدون عوارض استفاده شده که نهایتاً منتج به افزایش ۱۲ درصدی پوشش در منطقه‌ی شهری و افزایش ۱۹ درصدی در منطقه‌ی طبیعی گردیده است. که خارج از این چارچوب تهیه شده باشند، معذور است.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های حسگر بی‌سیم، پوشش، دیاگرام ورونوی، GIS، الگوریتم Minimax

۱- مقدمه

محیط در طول مدت زمان مدیدی استفاده شده‌اند. با این هدف، این شبکه‌ها برای کاربردهای مختلفی از قبیل نظارت بر میدان جنگ [۱]، نظارت بر ترافیک، پیگیری یک هدف [۲]، نظارت بر آتش‌سوزی جنگل و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. حسگرها گاهی دستگاه‌های بسیار کوچک با یک منبع تغذیه‌ی محدود می‌باشند که معمولاً شارژ دوباره‌ی آن‌ها غیرممکن و یا بسیار سخت می‌باشد و به وسیله‌ی ارتباط با یکدیگر در پی انجام یک کار خاص می‌باشند. یک شبکه‌ی حسگر بی‌سیم متشکل از تعداد زیادی از حسگرهای کوچک می‌باشد که قابلیت سنجش محیط، پردازش اطلاعات و مخابره‌ی آن‌ها به صورت بی‌سیم را دارند [۳].

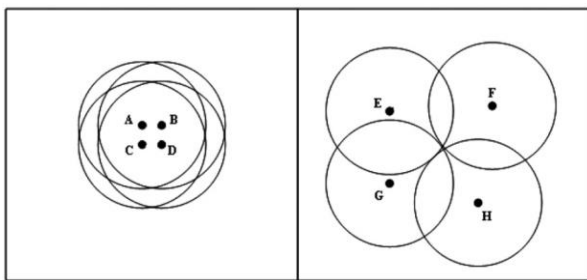
دستگاه‌هایی در شبکه حسگر بی‌سیم^۱ حسگر نام دارند که برای سنجش ویژگی مشخصی از محیط اطراف شامل ویژگی‌های فیزیکی یا شیمیایی استفاده می‌شوند و داده‌های دریافتی را به واحد مرکزی به نام ایستگاه پایه^۲ می‌فرستند. بسته به نوع کاربرد، یک شبکه حسگر می‌تواند شامل تعداد کمی و یا هزاران حسگر باشد که برای چند روز و یا چند سال و با هدف انجام یک کار مشخص با هم همکاری می‌کنند.

شبکه‌های حسگر بی‌سیم برای مشاهده و نظارت بر رخدادها و

¹ Wireless Sensor Network² Base station

گذشته کمتر دیده شده است. در واقع هدف ما استفاده از کاربردها، قابلیت‌ها و آنالیزهای GIS در مسأله‌ی جانمایی حسگرها به منظور واقعی‌تر شدن این مسأله مطابق بر محیط واقعی می‌باشد.

اگر حسگرها به طور مناسب جانمایی نشوند ممکن است مناطق یکسان توسط چندین حسگر که نزدیک به یکدیگر هستند، تحت پوشش قرار گیرند و این باعث افزونگی در سنجش و تلف شدن منابع حسگرها می‌شود [۷]. همان طور که در شکل ۱ دیده می‌شود اگر چهار حسگر A، B، C و D به هم نزدیک باشند پوشش به دست آمده توسط آن‌ها مجموعاً کمتر از حالتی است که به صورت پراکنده توزیع شده باشند.



شکل ۱: پوشش موثر چهار حسگر در دو جانمایی متفاوت

عموماً حسگرها به دو دسته‌ی ثابت و متحرک تقسیم می‌شوند. این مقاله بر روی حسگرها با قابلیت تحرک متمرکز است به این معنی که حسگرها بعد از جانمایی اولیه می‌توانند مکان خود را به هدف افزایش کارایی شبکه تغییر دهند.

به سبب حرکت حسگرها، آن‌ها می‌توانند متناسب با نیازمندی‌های مأموریت، مکان خود را تغییر دهند. تنظیم پویای مکان حسگرها می‌تواند توپولوژی شبکه را تغییر دهد و از این رو کارایی شبکه ارتقا یابد. زمانی که حسگرها در محیط حادثه دیده، جایی که حضور انسان امکان‌پذیر نیست، قرار گرفتند حسگرهای متحرک این امکان را به ما می‌دهند که پوشش و همبندی^۷ شبکه را تصحیح نماییم [۸].

مدیریت بهینه‌ی منابع و اطمینان از کیفیت سرویس قابل‌اعتماد دو مورد از اساسی‌ترین نیازمندی‌های شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌باشند. استراتژی جانمایی حسگرها نقش بسیار مهمی در فراهم کردن کیفیت بهتر سرویس بازی می‌کند و بیان‌کننده‌ی این است که منطقه‌ی مورد نظر، چقدر خوب تحت پوشش قرار گرفته است. آگاهی رو به افزونی درباره‌ی این مسأله در جوامع تحقیقاتی وجود

به دلیل محدودیت‌های جانمایی^۳، از کار افتادن آن‌ها می‌تواند منجر به از کارافتادگی شبکه و یا کاهش کارایی شبکه‌ی حسگر متناسب با اهداف آن شود. نیاز اساسی در چنین شبکه‌هایی این است که شبکه بایستی k اتصالی^۴ باشد. بدین معنی که بین هر جفت از نقاط شبکه k مسیر وجود داشته باشد که با عنوان اتصال چند مسیری نیز نامیده می‌شود. از این رو مسأله‌ی جانمایی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم توجه بسیاری از محققان را جلب نموده است [۴].

ویژگی‌هایی از قبیل هزینه‌ی کم و اندازه‌ی کوچک، سبب استفاده‌های زیادی از این شبکه‌ها در کاربردهای مختلفی شده است. با به خدمت گرفتن آن‌ها در یک محیط نامناسب و خشن، شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌توانند هزینه و خطرات انسانی را کاهش دهند. در این کاربردها حسگرها معمولاً قابلیت‌های پردازشی و مخابراتی محدودی دارند و بعد از جانمایی انتظار می‌رود که شبکه‌ای، برای تقسیم اطلاعات و هماهنگ کردن اقداماتشان تشکیل دهند. در بسیاری موارد مانند مدیریت بحران نقاط برای جستجوی موثر به دنبال بازمانده‌ها، ارزیابی خسارت و تعیین مسیرهای امن فرار نیازمند مشارکت با یکدیگر می‌باشند [۵].

در ادامه، در بخش ۲ در مورد مسأله‌ی جانمایی و الگوریتم‌های جانمایی و مسائل مرتبط به آن می‌پردازیم. در بخش ۳ توضیحی مختصری از آنالیزهای GIS^۵ استفاده شده ارائه می‌شود. در بخش ۴ به مراحل پیاده‌سازی و نتایج بدست آمده از بهینه‌سازی می‌پردازیم و در نهایت در بخش ۵ به بحث ونتیجه‌گیری می‌پردازیم.

۲- جانمایی شبکه حسگر

پیشرفت فناوری در سیستم‌های میکرو الکترومکانیک^۶ و ارتباط بی‌سیم، جانمایی شبکه‌های حسگر بی‌سیم را تسهیل ساخته و منجر به بهتر شدن امکان سنجش در زمان و مکان در مقایسه با روش‌های پیشین شده است [۶].

الگوریتم‌های جانمایی زیادی در سال‌های اخیر به منظور حداقل کردن محدودیت‌های شبکه و بهینه کردن پوشش و غیره ارائه شده است. اما آنچه که در این مقاله مورد توجه قرار گرفته، استفاده از شکل واقعی محیط در مسأله‌ی جانمایی می‌باشد که در کارهای

³ Deployment

⁴ K-connected

⁵ Geographic Information Systems

⁶ MEMS

⁷ Connectivity

۱- Blanket Coverage: دستیابی به یک چیدمان از حسگرها که میزان کشف اهداف ظاهر شده در منطقه‌ی مورد نظر را بیشینه کند.

۲- Barrier Coverage: دستیابی به یک چیدمان از حسگرها که احتمال کشف نشدن نفوذ به دلیل موانع را کمینه کند.

۳- Sweep Coverage: جابجایی تعدادی از حسگرها در منطقه به طوری که تعادل معینی بین میزان پوشش بیشینه و کمترین فقدان پوشش در واحد سطح را نشان دهد [۱۲].

در این مقاله منظور از پوشش، مورد اول می‌باشد که هدف آن جانمایی حسگرها به طوری است که پوششی بهینه مطابق با نیاز کاربرد شبکه باشد.

۲-۲- مدل سنجش

ارزیابی پوشش، بر اساس مدل پوششی حسگرها و معیاری که برای پوشش جمعی حسگرهای جانمایی شده، استفاده می‌شود، متفاوت می‌باشد. از این رو مدل سنجشی حسگر نقش مهمی در نحوه‌ی ارزیابی و محاسبه‌ی پوشش دارد. تا کنون مدل‌های مختلفی برای پوشش ارائه شده است. پوشش، هر حسگر متناسب با افزایش فاصله از هدف به تدریج کاهش پیدا می‌کند. در این تحقیق معادله ۱ مقدار حساسیت حسگر S_i در نقطه‌ی p با فاصله‌ی $d(S_i, P)$ از آن را نشان می‌دهد که در آن λ یک پارامتر مثبت می‌باشد و γ نیز بسته به ویژگی‌های محیط بین ۲ و ۵ می‌باشد [۱۳].

$$S(S_i, P) = \frac{\lambda}{[d(S_i, P)]^\gamma} \quad (1)$$

مدل دیگر مدل باینری می‌باشد که از آن در این تحقیق استفاده شده است. در این مدل برای حسگر یک شعاع پوشش در نظر گرفته و محیط به یک طبقه‌بندی باینری تبدیل می‌گردد. نقاطی که در این محدوده می‌باشند نقاط تحت پوشش و نقاط خارج از محدوده، نقاط غیرقابل سنجش می‌باشند. این مدل را مدل دیسک نیز می‌نامند [۱۴]. معادله ۲ مدل باینری را نشان می‌دهد که $c(S_i)$ پوشش حسگر S_i با فاصله‌ی d از نقطه‌ی p می‌باشد.

$$c(S_i) = \begin{cases} 1, & \text{if } d(S_i, p) < r_s \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

در تحقیق دیگری، مدل باینری توسعه یافته و در آن شعاع R_u کوچک‌تر از شعاع سنجش (R_s) به عنوان عدم قطعیت کشف حسگر تعریف می‌شود [۱۵]. همان‌طور که در معادله‌ی ۳ و شکل ۲ نشان داده شده، حسگر اهداف درون شعاع $R_s - R_u$ را با احتمال ۱ تحت

دارد و تعداد روش‌های زیادی پیشنهاد گردیده است. هر چند روش‌های موجود مجموعه‌ی وسیع و مختلفی را فراهم می‌کند اما کاربردهای شبکه حسگر بی‌سیم، مشخصات و نیازمندی‌های متفاوتی دارد. انتخاب یک روش جانمایی مناسب نیازمند فهمی دقیق و روشن از کاربرد شبکه و انطباق آن با واقعیت می‌باشد.

درجه‌ی پوشش، وابستگی شدیدی به زیرساخت‌ها از جمله تعداد و مکان حسگرهای مورد استفاده برای نظارت بر محیط دارد؛ بنابراین یک قدم اساسی در مرحله‌ی طراحی شبکه، تعیین استراتژی جانمایی نقاط می‌باشد. این استراتژی وابسته به نوع کاربرد شبکه می‌باشد. زمانی که محیط کاملاً شناخته شده، کم خطر و نسبتاً کوچک باشد، حسگرها می‌توانند به صورت دستی در مکان‌هایی که از قبل تعیین شده‌اند نصب شوند. این روش امکان کنترل کاملی بر جانمایی نقاط و انتخاب دقیقی بر توپولوژی بهینه‌ی شبکه را فراهم می‌کند. هر چند امکان جانمایی دستی در برخی موارد ناممکن می‌باشد. در واقع هزینه‌ی ارسال انسان و یا ربات‌های عامل به منطقه‌ی تحت نظارت می‌تواند زیاد باشد به خصوص زمانی که منطقه وسیع است. در برخی موارد این عمل به دلیل محیط متخاصم ناممکن است. در این موارد که امکان جانمایی دستی وجود ندارد یک راه معمولاً انداختن حسگرها از هواپیما و یا بالگرد می‌باشد که نتیجه‌ی آن یک توزیع اتفاقی می‌باشد و کاربر فقط بر نقطه‌ی پرتاب حسگر کنترل دارد. در این حالت کاربر فقط کنترل جزئی بر مکان حسگرها دارد و تخمین میزان پوشش ایجاد شده یک چالش اساسی می‌باشد [۹].

۲-۱- پوشش

پوشش یکی از مسائل پایه‌ای در شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌باشد که در سال‌های اخیر مورد مطالعه قرار گرفته است. عملکرد موفقیت‌آمیز شبکه‌های حسگر بی‌سیم وابسته به پوشش مناسب محیط می‌باشد. مسأله‌ی پوشش تنها مربوط به شبکه‌های حسگر بی‌سیم نمی‌باشد. مسائل کلاسیک از قبیل مسأله‌ی گالری هنر^۸ [۱۰] که در آن هدف جانمایی دوربین‌ها به صورتی است که هر نقطه از گالری توسط حداقل یک دوربین تحت نظارت باشد نیز با پوشش سروکار داشته‌اند و یا مسأله‌ی جانمایی ماهواره‌ها در مدار به طوری که بیش‌ترین پوشش را بر اقیانوس‌ها داشته باشند نیز از دسته مسائلی است که با پوشش در آمیخته‌اند [۱۱].

پیش از این سه نوع پوشش تعریف شده است:

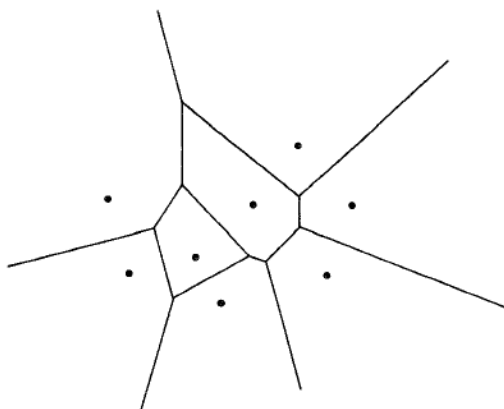
⁸ Art Gallery

گونی که آن را احاطه کرده پوشیده می‌شود به طوری که هر نقطه درون این پلی گون به حسگر آن پلی گون نزدیک‌تر باشد. اگر حسگر نتواند رخدادی را درون پلی گون خود کشف کند و پوشش دهد دیگر حسگرها نیز نمی‌توانند آن رخداد را تحت پوشش قرار دهند [۱۷].

۲-۴- الگوریتم‌های جانمایی

الگوریتم‌های جانمایی به دو دسته‌ی متمرکز^{۱۰} و توزیع یافته^{۱۱} تقسیم می‌شوند. در الگوریتم‌های متمرکز بعد از جانمایی حسگر بررسی می‌شود که آیا پوشش کافی وجود دارد و آیا تمام حسگرها مشاهدات خود را به یک مرکز ارسال می‌کنند. ارسال اطلاعات منجر به مصرف انرژی زیادی می‌شود. از طرف دیگر در روش‌های توزیع یافته بعد از جانمایی حسگرها، آن‌ها توسط اطلاعاتی که از همسایگان خود دریافت می‌کنند تصمیم به انجام کار مشخص می‌کنند. پس نتیجتاً مقدار مصرف انرژی در مقایسه با روش‌های متمرکز کمتر می‌باشد.

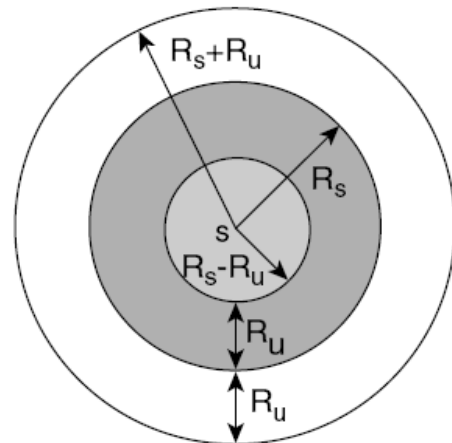
الگوریتم VF^{۱۲} که از روش‌های توزیع یافته می‌باشد از ایده‌ی میدان پتانسیل الهام گرفته شده است و بر اساس نیروی دافعه بین حسگرها و موانع می‌باشد. در واقع نیروی دافعه بین حسگرها باعث پخش شدن آن‌ها از چیدمان متراکم اولیه می‌شود و نیروی دافعه‌ی بین حسگرها و موانع این اطمینان را می‌دهد که شبکه‌ی حسگر اطراف موانع و در میان آن‌ها توزیع پیدا کند. علاوه بر نیروهای بالا، نیروی دیگری به نام نیروی اصطکاک، رسیدن به یک تعادل ایستا را متضمن می‌شود. البته محققان این فرض را داشتند که حسگر طوری مجهز می‌باشد که قابلیت پیدا کردن فاصله و جهت موانع از خود را دارند [۱۸].



شکل ۳: دیاگرام ورونوی برای هشت نقطه در یک صفحه [۱۷]

پوشش قرار می‌دهد و در شعاع‌های بزرگ‌تر از $R_s + R_u$ احتمال کشف صفر و در شعاع بین این دو، احتمال مشخصی در نظر گرفته می‌شود [۱۲].

$$C(s_i) = \begin{cases} 0, & \text{if } R_s + R_u \leq d(s_i, p) \\ e^{-\lambda a^\beta}, & \text{if } R_s - R_u < d(s_i, p) < R_s + R_u \\ 1, & \text{if } R_s - R_u \geq d(s_i, p) \end{cases} \quad (3)$$



شکل ۲: مدل سنجشی احتمالی [۱۲]

۲-۳- دیاگرام ورونوی^۹

در تعریف دیاگرام ورونوی آمده است که S مجموعه‌ای از n نقطه ژنراتور در فضا می‌باشد. برای 2 نقطه متمایز $q, p \in S$ ، تسلط بر q به صورت مجموعه‌ای از نقاط در صفحه می‌باشد که به p نزدیک‌تر باشند. به عبارتی

$$\text{dom}(p, q) = \{x \in R^2 \mid \delta(x, p) \leq \delta(x, q)\} \quad (4)$$

عموماً برای δ تابع فاصله اقلیدسی تعریف می‌شود. روشن است که $\text{dom}(p, q)$ یک نیم‌صفحه‌ی محدود شده توسط عمود منصف p و q می‌باشد. این عمود منصف همه‌ی نقاط نزدیک‌تر به p را از نقاط نزدیک‌تر به q جدا می‌کند و پلی گون نقطه‌ی $p \in S$ بخشی از صفحه است که برای آن‌ها تسلط بر همه‌ی نقاط دیگر صفحه بیشتر باشد [۱۶].

$$\text{reg}(p) = \bigcap_{q \in S - \{p\}} \text{dom}(p, q) \quad (5)$$

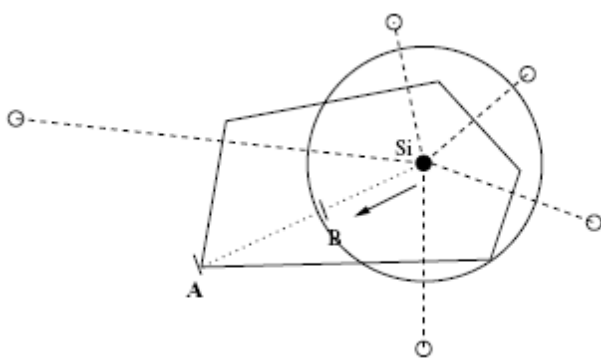
در شکل ۳ دیاگرام ورونوی هشت نقطه‌ی متفاوت در یک صفحه را می‌بینید. الگوریتم Minimax که برای بهبود جانمایی در این تحقیق استفاده شده نیز بر اساس دیاگرام ورونوی می‌باشد که در آن حسگرها به عنوان نقاط ژنراتور می‌باشند. هر حسگر توسط پلی

¹⁰ Centralized
¹¹ Distributed
¹² Virtual Force

⁹ Voronoi Diagram

پلی گون که فاصله‌ی آن از دورترین رأس کمینه شود منتقل می‌شود و سعی در نگه‌داشتن اکثر رأس‌های پلی گون درون دیسک سنجشی خود دارد. این نقطه که Minimax نام دارد مرکز کوچکترین دایره‌ی محیطی رأس‌های پلی گون ورونوی می‌باشد که توسط الگوریتم توضیح داده شده در [۱۷] قابل محاسبه می‌باشد. این الگوریتم محافظه کارتر است زیرا که از ایجاد خلاءهای پوششی ناشی از دور شدن از نزدیک‌ترین رأس پلی گون اجتناب می‌کند و منجر به ایجاد پلی گون‌های منظم‌تری می‌شود. در نهایت آزمایش‌هایی برای بررسی سه الگوریتم انجام شده که نشان می‌دهد Minimax بر خلاف VEC بهترین پوشش با کمترین تعداد حسگر ایجاد می‌کند. بیش‌ترین مسافت جابجایی مربوط به Minimax بوده در صورتی که کمترین مقدار برای الگوریتم VEC بوده است [۱۷].

در تحقیق دیگری نیز از الگوریتم VOR به منظور بهبود پوشش بر روی دو منطقه‌ی متفاوت استفاده شده است [۱۹]. نویسندگان شرط افزایش ارتفاع مکان نهایی حسگر را به عنوان شرط اصلی جابجایی حسگر به منظور در نظر گرفتن اثر توپوگرافی و وجود موانع مختلف به این الگوریتم افزوده‌اند. در این تحقیق از آنالیزهای مختلف GIS از قبیل Viewshed و خط دید^{۱۵} فقط به منظور بررسی دقیق‌تر میزان پوشش و میدان دید حسگرها استفاده شده است و در روند جابجایی حسگر نقشی نداشته‌اند. به عبارت دیگر در صورت افزایش میزان پوشش (اشتراک دیسک و پلی گون ورونوی) حسگر جابجا می‌گردد در حالی که این روند می‌تواند منجر به کاهش میدان دید حسگر شود.



شکل ۴: نحوه‌ی حرکت حسگر در الگوریتم VOR [۱۷]

علاوه بر کشف خلأهای پوششی از دیاگرام ورونوی و مثلث بندی دلونی برای تعیین Maximal Breach Path (MBP) و Maximal

در تحقیق دیگری، سه روش جانمایی توزیع یافته برای شبکه‌های حسگر ارائه شده است که ابتدا خلاءهای پوششی^{۱۳} را کشف و سپس مکان جدید حسگرها محاسبه می‌شود [۱۷]. این روش‌ها بر اساس جابجایی حسگرها از مناطق پر تراکم به مناطق کم تراکم عمل می‌نمایند. ایده‌ی اصلی این است که هر حسگر، بعد از محاسبه‌ی مکان جدید ارزیابی می‌کند و تصمیم می‌گیرد که جابجا شود یا خیر. برای محاسبه‌ی پوشش ابتدا حسگر پلی گون ورونوی خود را نسبت به حسگرهای همسایه ایجاد می‌کند. اشتراک دیسک و پلی گون ورونوی نشان‌دهنده‌ی مقدار پوششی است که حسگر دارد. سپس اگر درون پلی گون، ناحیه‌ای بدون پوشش بود حسگر امکان جابجایی برای تحت پوشش قرار دادن آن منطقه را ارزیابی می‌کند. برای محاسبه‌ی تغییر مکان سه روش به نام VEC^{۱۴}، VOR و Minimax ارائه شده که ایده‌ی اصلی VEC بر اساس نیروی جاذبه و دافعه‌ی بین دو ذره الکترومغناطیس می‌باشد که اگر به یکدیگر نزدیک باشند باعث دافعه و اگر دور باشند منجر به جاذبه‌ی بین آن‌ها می‌شود. علاوه بر نیروی وارد شده از حسگرها، مرزهای منطقه‌ی مورد مطالعه نیز نیرویی را اعمال می‌کنند. در VOR بر خلاف الگوریتم VEC حسگرها به مناطق کم تراکم، کشیده می‌شوند. در واقع این الگوریتم حسگرها را به سمت بیشینه پوشش محلی می‌کشاند و حسگر به سمت دورترین رأس پلی گون حرکت می‌کند. VOR سعی در پر کردن بزرگ‌ترین خلاءهای پوششی دارد. این الگوریتم برای جلوگیری از نوسان حرکت یک عامل کنترل نوسان دارد که مانع از بازگشت بلافاصله‌ی حسگر در جهت حرکت قبل خود می‌شود و زمانی که مکان جدید حسگر مشخص شد ابتدا بررسی می‌شود که آیا پوشش حسگر در مکان جدید افزایش می‌یابد یا خیر. در صورت افزایش پوشش، حسگر به مکان جدید منتقل می‌شود و در صورت عدم افزایش پوشش نقطه‌ی میانی به عنوان مکان جدید در نظر گرفته می‌شود و شرط افزایش پوشش دوباره بررسی می‌شود. در صورت عدم ارضای شرط، حسگر در مکان خود باقی می‌ماند. شکل ۴ نشان دهنده نحوه‌ی حرکت حسگر در الگوریتم VOR می‌باشد. در این شکل حسگر S_i به صورت دایره‌ی توپر نشان داده شده است و دایره‌های کوچک تو خالی حسگرهای همسایه‌ی حسگر S_i می‌باشند و پلی گون شکل گرفته، پلی گون ورونوی آن و دایره‌ی بزرگ دیسک سنجشی حسگر S_i می‌باشد. رأس A دورترین رأس ورونوی از حسگر می‌باشد و حسگر بایستی به سمت آن حرکت کند تا به نقطه‌ی B برسد. جایی که $d(S_i, B)$ برابر با برد سنجشی حسگر می‌باشد. در نهایت در الگوریتم Minimax حسگر به نقطه‌ای درون

¹³ Coverage hole

¹⁴ VECTOR-based Algorithm (VEC)

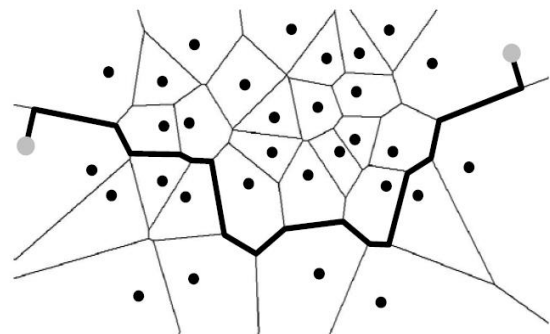
¹⁵ Line of Sight

۳- متدولوژی

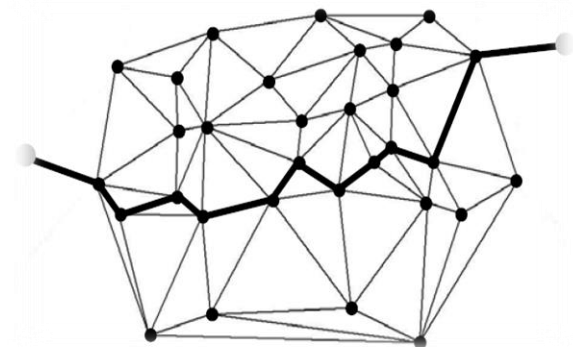
مسئله‌ی جانمایی در یک شبکه حسگر توجه شایانی در تحقیقات کسب کرده است. در تعداد بسیار زیادی از این تحقیقات محققان به دنبال روش‌هایی برای افزایش پوشش حسگرها در منطقه‌ی مورد مطالعه بوده‌اند. از این رو در این تحقیق نیز به منظور بهبود جانمایی حسگرها از الگوریتم Minimax استفاده شده است. همان طور که در بخش ۲-۴ توضیح داده شد در این الگوریتم در صورتی که دیسک سنجشی حسگر پلی‌گون ورونوی آن را کاملاً پوشش ندهد، حسگر برای رسیدن به پوشش بیشتر جابجا می‌گردد. نحوه‌ی حرکت در این الگوریتم، انتقال به نقطه‌ای درون پلی‌گون که فاصله‌ی آن از دورترین راس پلی‌گون کمینه گردد می‌باشد. علاوه بر این، شرط جابجایی، افزایش میزان پوشش دیسک و پلی‌گون ورونوی می‌باشد که با توجه به اینکه در این تحقیق جانمایی در فضای سه بعدی انجام می‌شود، به دلیل وجود پستی و بلندی‌ها و عوارض و موانع موجود این افزایش همیشه نمی‌تواند منتج به افزایش میدان دید حسگر و نتیجتاً احتمال کشف بیشتر اهداف گردد. از این رو به منظور بهبود بهتر پوشش در تطابق با واقعیت زمین، شرط افزایش میدان دید جایگزین شرط افزایش پوشش (اشتراک دیسک و پلی‌گون ورونوی) گردید. به عبارت دیگر در صورتی که حسگر بعد از جابجایی میدان دید بیشتری داشته باشد جابجا می‌گردد. حسگرهای در نظر گرفته شده در این تحقیق دوربین‌های ویدئویی هستند. از این رو در این تحقیق از آنالیزهای خط دید و Viewshed برای تعیین میزان پوشش واقعی استفاده شده است که در ادامه به صورت جزئی به آن می‌پردازیم. خط دید را می‌توان بر اساس دید مستقیم بین مشاهده‌کننده و نقطه‌ی هدف تعریف کرد. در واقع اگر مانعی بین حسگر و نقطه‌ی هدف وجود نداشته باشد و همچنین اگر نقطه‌ی هدف در محدوده‌ی برد سنجشی حسگر باشد، آن نقطه تحت پوشش قرار می‌گیرد. Viewshed نیز به عنوان مناطقی از نقشه که از یک نقطه‌ی مشخص (مکان حسگر) قابل دید باشد تعریف می‌شود. در واقع Viewshed از ارتفاع هر پیکسل در DEM^{16} برای تعیین قابل دید بودن استفاده می‌کند. همان طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود قابلیت دید به عوامل زیادی از جمله مختصات مسطحاتی (x_i, y_i) و ارتفاعی نقطه‌ی مشاهده‌گر (z_i) ، ارتفاع پایه، جهت افقی و عمودی حسگر (θ_i, ϕ_i) و فاصله‌ی سنجش بستگی دارد. عدم دید مستقیم بین حسگر و نقطه‌ای از منطقه‌ی مورد مطالعه منجر به بوجود آمدن خلاءهای پوششی می‌شود. آنالیز خط دید و Viewshed و قابلیت دید و مکان موانع اطلاعات ضروری هستند

support path (MSP) نیز در جانمایی حسگرها می‌توان استفاده کرد. MBP (MSP) مرتبط با مسیری با بدترین (بهترین) پوشش می‌باشند. بدترین (بهترین) مسیر پوششی مناطقی هستند که کمترین (بیشترین) مشاهده‌پذیری را از حسگرها دارند. در نتیجه اهدافی که در طول این مسیر جابجا شوند کمترین (بیشترین) احتمال دیده شدن را دارند. این مسیر شامل تعدادی از ضلع‌های دیاگرام ورونوی می‌باشد (شکل ۵) و در بهترین حالت پوشش از مسیر می‌باشند (شکل ۶). در صورت اضافه کردن حسگر به منطقه، این پارامترها کمک شایانی برای افزایش پوشش خواهند بود [۱۹، ۲۰]. در این مورد تحقیقات دیگری نیز ارائه شده است [۲۱-۲۳].

در تحقیق دیگری نیز یک روش حفظ پوشش توزیع شده بر اساس مدل کشف احتمالی پیشنهاد شده است [۲۴]. نویسنده از دیاگرام ورونوی به منظور ساده‌تر کردن الگوریتم برای پوشش استفاده کرده است و یک الگوریتم تقریبی را برای ارزیابی درصد پوشش ارائه داده است.



شکل ۵: Maximum breach path در یک شبکه‌ی حسگر و ارتباط آن با دیاگرام ورونوی [۱۹]



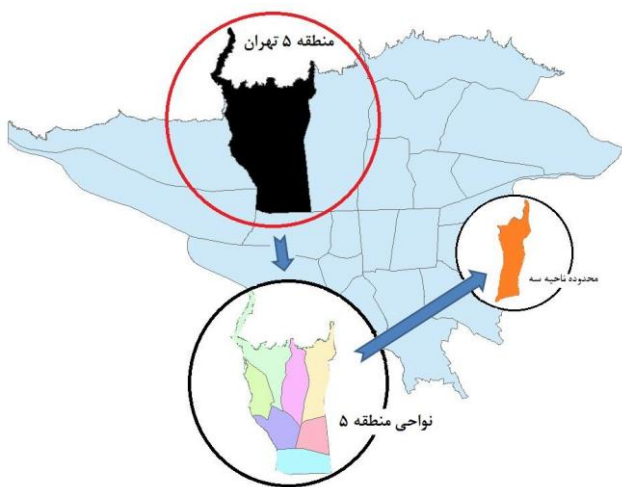
شکل ۶: Maximum support path در یک شبکه حسگر و ارتباط آن با مثلث‌بندی دلونی [۱۹]

¹⁶Digital Elevation Model

پوشش به دست آمده در منطقه‌ی شهری در توزیع اولیه ۴۶/۰۱ درصد از کل منطقه مطالعاتی می‌باشد. به این معنی که ۴۶/۰۱ درصد از پیکسل‌های تصویر تحت پوشش حداقل یک حسگر قرار دارند. و ۶۷/۸۷ درصد از پیکسل‌های تصویر تحت پوشش حداقل یک حسگر قرار دارند.

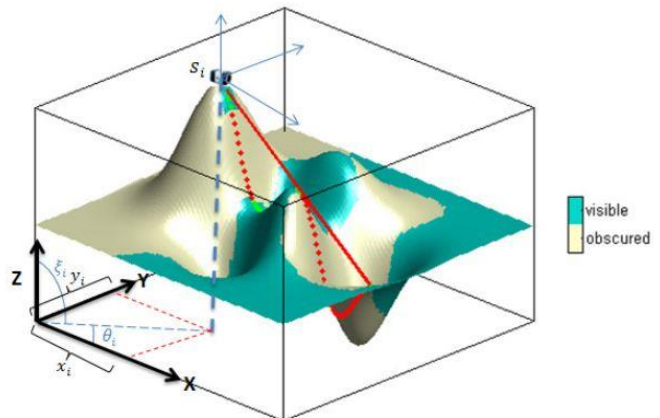
برای افزایش پوشش از الگوریتم Minimax استفاده شده است. هر حسگر به مرکز کوچکترین دایره‌ی محیطی پلی گون منتقل می‌شود و در صورت افزایش میدان دید در مکان جدید، حسگر مکان جدید را برمی‌گزیند. بعد از جابجایی حسگرها، پلی گون ورونوی حسگرها دوباره ترسیم می‌شود. شایان توجه است که به علت جابجایی حسگر و همسایه‌های آن، پلی گون ورونوی بعد از جابجایی تغییر خواهد کرد.

در شکل ۱۵ مراحل اجرای الگوریتم نشان داده شده است. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود این فرایند در هر دو منطقه تعداد ۵ تکرار به طول انجامید و پوشش نهایی به دست آمده در منطقه‌ی شهری برابر با ۵۸/۱۸ درصد و در منطقه‌ی طبیعی ۸۶/۲۳ می‌باشد که افزایش پوشش ۱۲ و ۱۹ درصدی را به ترتیب به همراه داشته است. چیدمان نهایی حسگرها در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ مشاهده می‌شود. همچنین در شکل‌های ۱۸، ۱۹ نحوه‌ی تغییرات میزان پوشش حسگرها را مشاهده می‌کنید. همان طور که در جدول ۱ دیده می‌شود، میزان جابجایی حسگرها به ترتیب ۳۲۶/۷۶ و ۴۶۶/۸۸ متر می‌باشد که این روند نهایتاً منتج به افزایش قابل توجه پوشش می‌گردد.



شکل ۸: محدوده‌ی منطقه‌ی مورد مطالعه

که می‌توانند از طریق GIS بدست آیند. توضیحات بیشتر را می‌توان در [۲۵] دید.



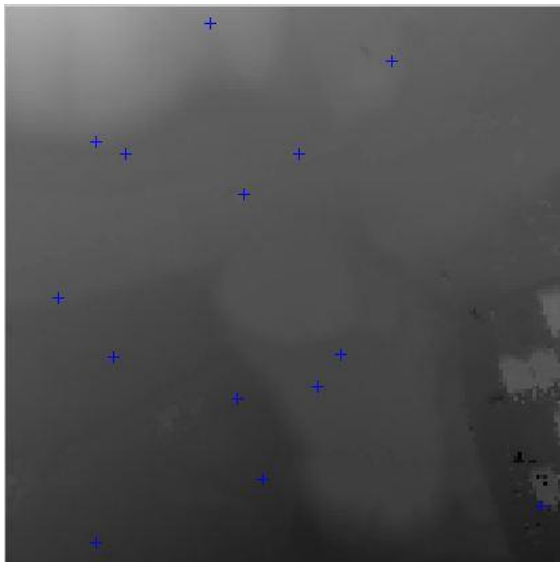
شکل ۷: آنالیز Viewshed (مناطق آبی رنگ مناطق قابل رویت و مناطق سفید رنگ غیر قابل رویت می‌باشند)

۴- پیاده‌سازی

در این تحقیق فرض شده است که حسگرها قابلیت چرخش ۳۶۰ درجه افقی و ۱۸۰ درجه عمودی را دارند. برای هر حسگر ارتفاع پایه ۱۰ متر از سطح زمین در نظر گرفته شده است و برد سنجشی هر حسگر ۵۰ متر است.

منطقه مورد مطالعه بخشی از یکی از محلات تهران با نام شهرک کوهسار می‌باشد که در ناحیه سه منطقه پنج تهران واقع شده است. این منطقه از شمال به کوه‌های شمالی تهران، از شرق به خیابان معین، از جنوب به خیابان سیمون بولیوار و از غرب به خیابان‌های الوند و مراد آباد محدود می‌شود. در شکل ۸ محدوده منطقه مورد مطالعه را در ناحیه سه منطقه پنج تهران مشاهده می‌نمایید. مناطق در نظر گرفته شده در این تحقیق یک منطقه‌ی شهری با تمام عوارض و یک منطقه‌ی طبیعی بدون عوارض با ابعاد ۳۰۰ × ۳۰۰ متر می‌باشد.

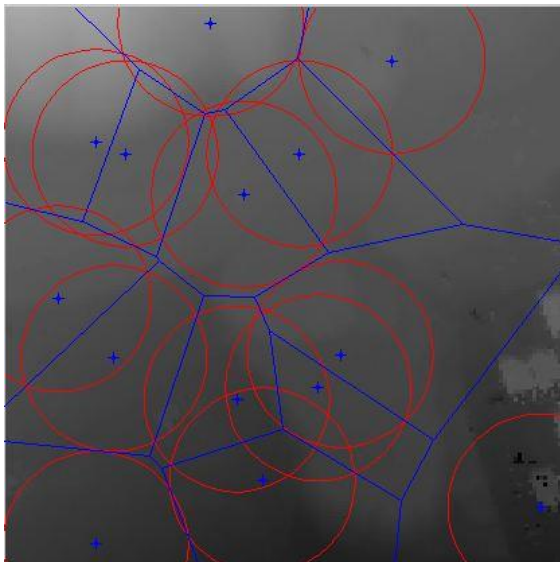
در ابتدا منطقه توسط ۱۵ حسگر به صورت تصادفی پوشش داده شد (شکل ۹ و ۱۰). همان طور که در بخش ۲،۴ گفته شد بر اساس ویژگی دیاگرام ورونوی، افزایش پوشش محلی یک حسگر تاثیری بر پوشش محلی دیگر حسگرها ندارد. همان طور که در شکل ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده مناطقی از پلی گون ورونوی وجود دارد که در محدوده‌ی برد سنجشی حسگر قرار ندارند. از این رو حسگر برای به دست آوردن پوشش محلی بیشتر جابجا می‌گردد. بعد از اعمال آنالیز Viewshed، همان طور که در شکل ۱۳ و ۱۴ مشاهده می‌شود نواحی زرد رنگ، مناطقی از پلی گون ورونوی هر حسگر می‌باشد که آن نقاط را تحت پوشش قرار می‌دهد. مقدار



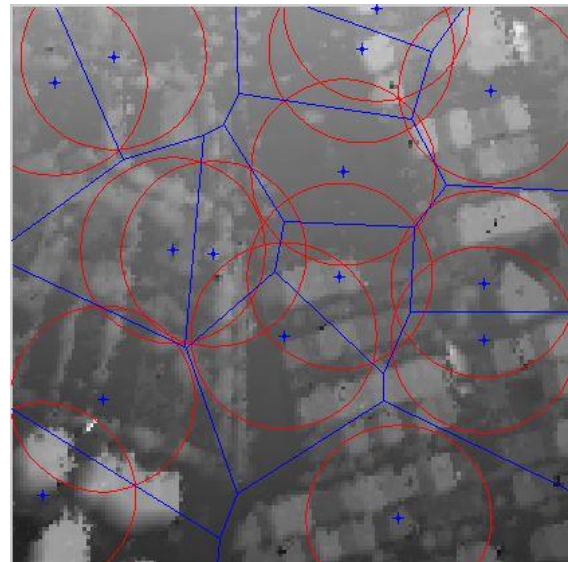
شکل ۱۰: منطقه‌ی طبیعی مورد مطالعه و توزیع اولیه‌ی حسگرها



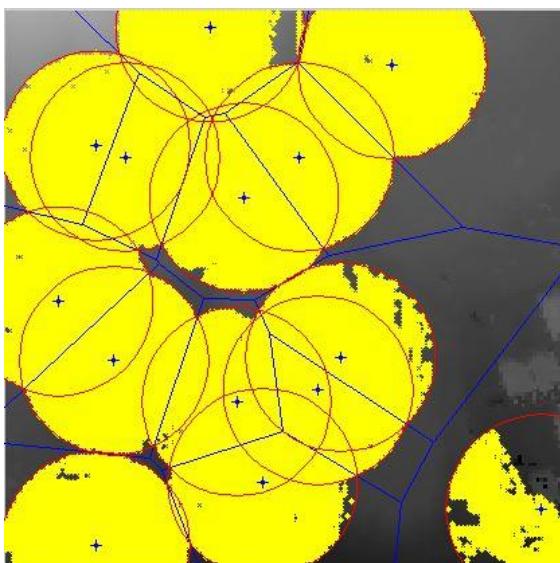
شکل ۹: منطقه‌ی شهری مورد مطالعه و توزیع اولیه‌ی حسگرها



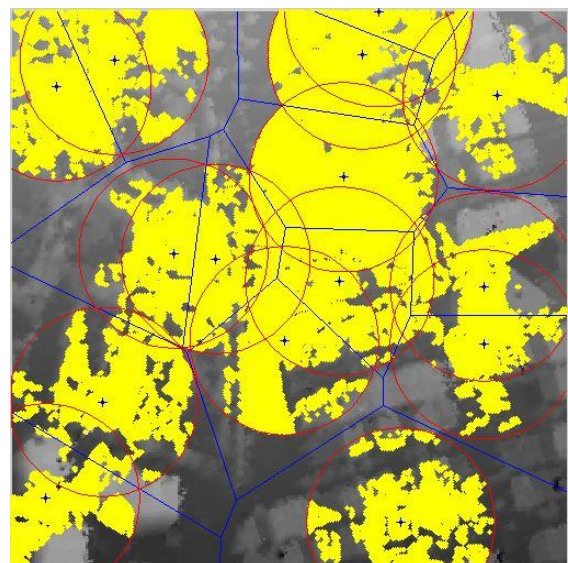
شکل ۱۲: پلی‌گون‌های ورونوی در منطقه‌ی طبیعی



شکل ۱۱: پلی‌گون‌های ورونوی در منطقه‌ی شهری



شکل ۱۴: نتیجه‌ی تحلیل Viewshed در منطقه طبیعی



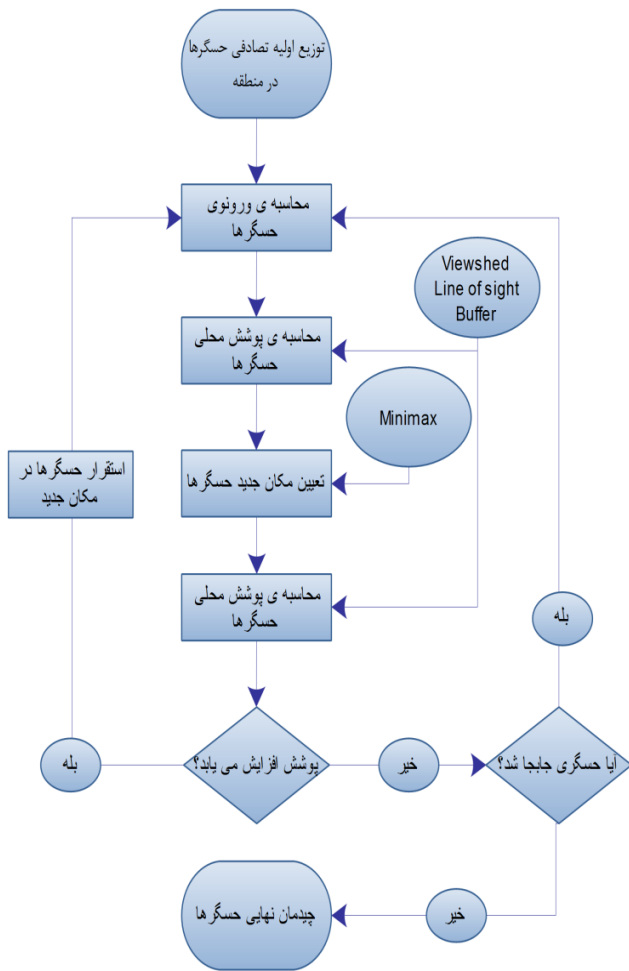
شکل ۱۳: نتیجه‌ی تحلیل Viewshed در منطقه شهری

جدول ۱: نتایج به دست آمده از روش Minimax

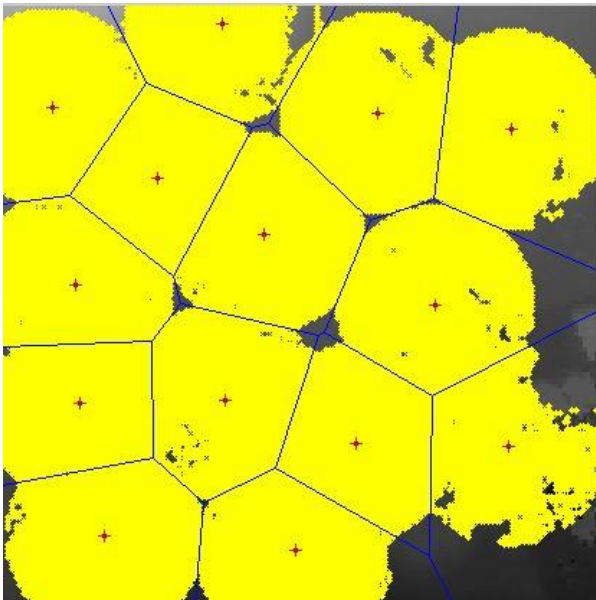
منطقه	پوشش		تعداد تکرار	جابجایی (متر)
	اولیه	نهایی		
شهری	۴۶/۰۱	۵۸/۱۸	۵	۳۲۶/۷۶
طبیعی	۶۷/۸۷	۸۶/۲۳	۵	۴۶۶/۸۸

۵- نتیجه گیری

چیدمان تصادفی حسگرها در منطقه معمولاً منجر به پوشش کافی نمی‌شود مگر اینکه از تعداد خیلی زیادی حسگر استفاده شود. پس اگر حسگرها قابلیت تحرک داشته باشند با جابجایی آن‌ها کیفیت پوشش می‌تواند بهبود یابد. در این حالت حسگرها می‌تواند به مناطقی که پوشش کافی ندارند منتقل شوند. این مقاله بر روی مسأله‌ی جانمایی حسگرها در یک منطقه، با هدف بیشینه سازی پوشش حسگرها متمرکز می‌باشد. در ابتدا مروری بر روش‌های موجود برای بهینه‌سازی جانمایی شبکه‌های حسگر که از دیگرام ورونوی و مثلث بندی دلونی استفاده کرده‌اند، ارائه شد. در این تحقیق بر اساس دیگرام ورونوی و در یک فرایند تکراری، جانمایی صورت گرفت. همان طور که در بخش قبل نشان داده شد، این روش منجر به افزایش قابل توجهی در میزان پوشش منطقه شد. علاوه بر این، ویژگی خوب این روش ارزیابی پوشش قبل از جابجایی حسگر می‌باشد که مانع از جابجایی بی‌هوده و مصرف بی‌رویه منابع انرژی حسگر می‌شود.

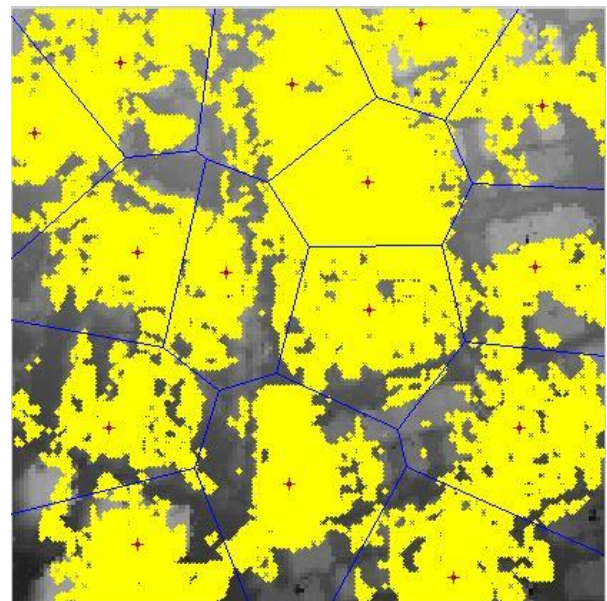


شکل ۱۵: مراحل مختلف الگوریتم



شکل ۱۷: پوشش نهایی به دست آمده برای منطقه‌ی طبیعی

همان طور که در بخش‌های قبل گفته شد، کارهای انجام شده در این زمینه، توپوگرافی و واقعیت زمین را هنگام جانمایی در نظر



شکل ۱۶: پوشش نهایی به دست آمده برای منطقه‌ی شهری

[6] Vuran, M.C., Ö.B. Akan, and I.F. Akyildiz, Spatio-temporal correlation: theory and applications for wireless sensor networks. *Computer Networks*, 2004. 45(3): pp. 245-259.

[7] Misra, S., M. Pavan Kumar, and M.S. Obaidat, Connectivity preserving localized coverage algorithm for area monitoring using wireless sensor networks. *Computer communications*, 2011. 34(12): pp. 1484-1496.

[8] Sahoo, P.K. and J.-P. Sheu, Limited mobility coverage and connectivity maintenance protocols for wireless sensor networks. *Computer Networks*, 2011. 55(13): pp. 2856-2872.

[9] Leoncini, M., G. Resta, and P. Santi, Partially controlled deployment strategies for wireless sensors. *Ad hoc networks*, 2009. 7(1): pp. 1-23.

[10] Lee, D. and A. Lin, Computational complexity of art gallery problems. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 1986. 32(2): pp. 276-282.

[11] Gregg, W.W., W.E. Esaias, G.C. Feldman, R. Frouin, S.B. Hooker, C.R. McClain, and R.H. Woodward, Coverage opportunities for global ocean color in a multimission era. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 1998. 36(5): pp. 1620-1627.

[12] Ghosh, A. and S.K. Das, Coverage and connectivity issues in wireless sensor networks. *Mobile, Wireless, and Sensor Networks: Technology, Applications, and Future Directions*, 2006: pp. 221-256.

[13] Megerian, S., F. Koushanfar, G. Qu, G. Veltri, and M. Potkonjak, Exposure in wireless sensor networks: theory and practical solutions. *Wireless Networks*, 2002. 8(5): pp. 443-454.

[14] Chakrabarty, K., S.S. Iyengar, H. Qi, and E. Cho, Grid coverage for surveillance and target location in distributed sensor networks. *Computers, IEEE Transactions on*, 2002. 51(12): pp. 1448-1453.

[15] Zou, Y. and K. Chakrabarty, Sensor deployment and target localization based on virtual forces. in *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications*. IEEE Societies. 2003: IEEE.

[16] Aurenhammer, F., Voronoi diagrams—a survey of a fundamental geometric data structure. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 1991. 23(3): pp. 345-405.

[17] Wang, G., G. Cao, and T. La Porta, Movement-assisted sensor deployment. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 2006. 5(6): pp. 640-652.

[18] Howard, A., M.J. Matarić, and G.S. Sukhatme, Mobile sensor network deployment using potential fields: A distributed, scalable solution to the area coverage problem, in *Distributed Autonomous Robotic Systems 5*. 2002, Springer. pp. 299-308.

[19] Megerian, S., F. Koushanfar, M. Potkonjak, and M.B. Srivastava, Worst and best-case coverage in sensor networks. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 2005. 4(1): pp. 84-92.

[20] Argany, M., M.A. Mostafavi, F. Karimipour, and C. Gagné, A GIS based wireless sensor network coverage estimation and optimization: a Voronoi approach, in *Transactions on Computational Science XIV*. 2011, Springer. pp. 151-172.

[21] Huang, Q., Solving an open sensor exposure problem using variational calculus. Washington Univ., Dept. Comput. Sci., St. Louis, MO, Tech. Rep. WUCS-03-1, 2003.

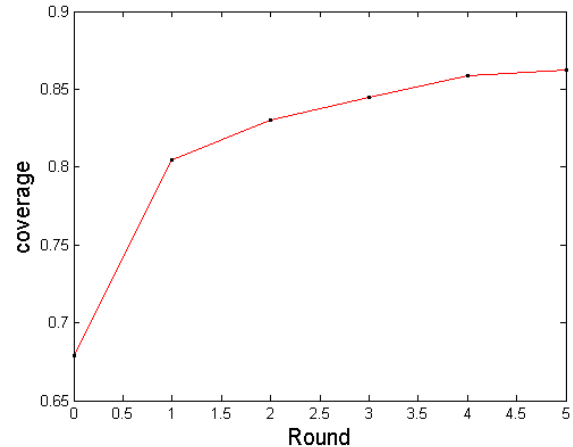
[22] Meguerdichian, S., S. Slijepcevic, V. Karayan, and M. Potkonjak, Localized algorithms in wireless ad-hoc networks: location discovery and sensor exposure. in *Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*. 2001: ACM.

[23] Gau, R.-H. and Y.-Y. Peng, A dual approach for the worst-case-coverage deployment problem in ad-hoc wireless sensor networks. in *Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), 2006 IEEE International Conference on*. 2006: IEEE.

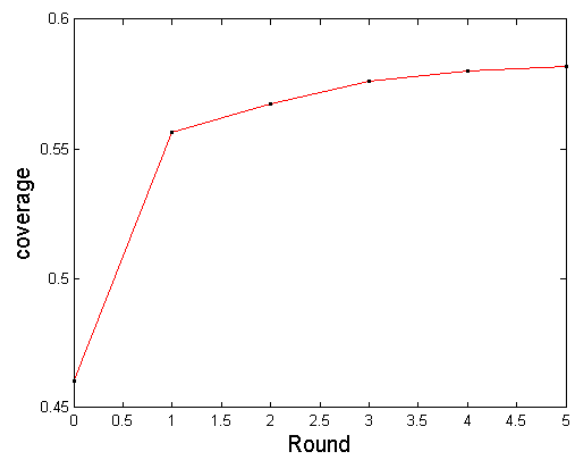
[24] Ying, T., Z. Shu-Fang, and W. Ying, A distributed protocol for ensuring both probabilistic coverage and connectivity of high density wireless sensor networks. in *Wireless Communications and Networking Conference, 2008. WCNC 2008. IEEE. 2008: IEEE*.

[25] Argany, M., M.A. Mostafavi, V. Akbarzadeh, C. Gagné, and R. Yaagoubi, Impact of the Quality of Spatial 3D City Models on Sensor Networks Placement Optimization. *GEOMATICA*, 2012. 66(4): p. 291-305 .

نگرفته‌اند. وجود این موانع و تغییرات توپوگرافی، مانع از پوشش کامل مناطق درون دیسک سنجشی حسگر می‌شود و در نظر نگرفتن این پارامتر، نتیجه‌ی غیر واقعی و بسیار خوش‌بینانه‌ای را ایجاد می‌کند. در این راستا با به اشتراک‌گذاری اطلاعات GIS و استفاده از آنالیزهای Viewshed و خط دید فرایند مناسب‌تری در بهینه‌سازی پوشش به وجود آمده است.



شکل ۱۸: تغییرات پوشش در منطقه‌ی طبیعی



شکل ۱۹: تغییرات پوشش در منطقه‌ی شهری

مراجع

[1] Kuorilehto, M., M. Hä, and T.D. Hä, A survey of application distribution in wireless sensor networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 1900. 2005(5): pp. 774-788.

[2] Tsai, H.-W., C.-P. Chu, and T.-S. Chen, Mobile object tracking in wireless sensor networks. *Computer communications*, 2007. 30(8): pp. 1811-1825.

[3] Akkaya, K. and M. Younis, A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad hoc networks*, 2005. 3(3): pp. 325-349.

[4] Dandekar, D.R. and P. Deshmukh, Relay Node Placement for Multi-Path Connectivity in Heterogeneous Wireless Sensor Networks. *Procedia Technology*, 2012. 4: pp. 732-736.

[5] Tamboli, N. and M. Younis, Coverage-aware connectivity restoration in mobile sensor networks. *Journal of network and computer applications*, 2010. 33(4): pp. 363-374.

Coverage Optimization in Wireless Sensor Networks

Reza Zarei^{1*}, Ali Asghar Alesheikh² and Abolghasem Sadeghi Niaraki³

1*-Corresponding Author: Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

2- Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

3- Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

^{1*}Rezaprincipal@yahoo.com, ²Aleshekh@kntu.ac.ir, ³Sadeghi@kntu.ac.ir

Abstract- Wireless sensor networks have been used for monitoring of events and environment for a long time. The networks are used in numerous applications such as monitoring of battle fields, traffic, forest firing, tracking of an object and so on. Successful performance of WSNs depends on appropriate coverage of the environment. Coverage has a severe dependence on the infrastructure including the numbers and the places of sensors. So, a substantial step in designing networks is to specify the deployment strategy of nodes. Most of the deployment algorithms have been focused in minimizing network constraints and optimizing sensor coverage in recent years. The purpose of this study is to accommodate the physical form of environments in deployment problem which have not been investigated in previous works. Indeed our goal is to advantage from the ability of GIS in sensors deployment problems in order to make the problem closer to reality. As a result, the Minimax algorithm based on Voronoi diagram is used for optimizing sensor coverage in an urban and a natural area. This method resulted in 12 and 19 percent increase in sensor coverage respectively.

Keywords- Wireless sensor network, Coverage, Voronoi diagram, GIS, Minimax Algorithm.