



نسخه از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

سال هفتم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۴
Vol.7, No. 3, Autumn 2015

۴۸-۳۳

برداری سازی محور مرکزی راه در تصاویر بزرگ مقیاس با آنالیز چندمعیاره توسط اپراتورهای میانگین گیر وزن دار ترتیبی در مدل گراف شبکه راه

فاطمه عامری^{۱*}، محمدجواد ولدان زوج^۲، مهدی مختارزاده^۳

۱. دانشجوی دکتری سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲. دانشیار دانشکده مهندسی نقشه برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۳. دانشیار دانشکده مهندسی نقشه برداری، پژوهشکده سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۶/۲۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۳/۲۵

چکیده

امروزه روشی متداول در ایجاد پایگاه داده راهها، استخراج آنها از تصاویر رقومی هوایی و ماهواره‌ای است. با توجه به حجم بسیار داده‌های شبکه راه و نیاز به بهنگام کردن آنها با کمترین زمان و هزینه محاسباتی، اتوماسیون فرایند استخراج اطلاعات راه در حال تبدیل به یکی از ملزومات عصر جدید است. در تحقیق حاضر که بیشتر بر مرحله برداری سازی راه تأکید دارد، سیستمی هوشمند برای برداری سازی اتوماتیک نتایج کشف راه، با کمترین میزان دخالت عامل انسانی، طراحی شده است. سیستم طراحی شده دارای دو مرحله اساسی تعیین نقاط کلیدی راه و برقراری اتصال بین آنها است. نخست، با استفاده از تکنیک خوشه‌بندی بر مبنای الگوریتم انبوه ذرات نقاط اصلی نمایانگر محور مرکزی راه تعیین می‌شوند. سپس، با در نظر گرفتن مدل گراف وزن دار برای شبکه راه‌های تصویر، تعیین معیارهای هندسی مناسب و تلفیق این معیارها از سوی عملگرهای میانگین گیر وزن دار ترتیبی، هزینه هر اتصال محاسبه می‌شود. اتصالات دارای کمترین هزینه، به صورت قطعات نهایی راه در تشکیل شبکه برداری راه شرکت می‌کنند. نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی روی چندین تصویر بزرگ مقیاس ماهواره‌ای و مقایسه آنها با نتایج الگوریتم درخت پوشای کمینه تأییدکننده موفقیت روش پیشنهادی در استخراج شبکه راه با دقت و صحت بالا است. براساس نتایج ارزیابی، روش پیشنهادی قادر است شبکه راه‌های تصویر را با میانگین RMSE حدود ۰/۹ متر، میانگین completeness حدود ۹۴٪ و میانگین correctness بیش از ۹۵٪ برداری کند. در مجموع، الگوریتم پیشنهادی در برداری سازی راه‌های با اشکال مختلف شامل راه‌های مستقیم، راه‌های دارای انحناء، راه‌های با ضخامت‌های متفاوت، راه‌های موازی با فواصل متغیر، تقاطع و میدان موفقیت آمیز عمل کرده است.

کلیدواژه‌ها: خوشه‌بندی، الگوریتم انبوه ذرات، برداری سازی راه، عملگر میانگین گیر وزن دار ترتیبی.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تقاطع خیابان ولیعصر و میرداماد، تلفن: ۰۹۱۲۲۵۷۳۳۸۷

۱- مقدمه

شبکه راه‌ها یکی از مهم‌ترین زیربناهای اساسی هر کشور محسوب می‌شود که بخش عمده‌ای از حمل‌ونقل کالا و مسافر از طریق آن صورت می‌گیرد. بنا بر آمار ارائه‌شده از سوی پایگاه خبری تحلیلی صنعت حمل‌ونقل وابسته به سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای، حدود ۹۵٪ از جابه‌جایی‌های کالا و مسافر در کشور از طریق راه‌ها صورت می‌گیرد که این امر نشان از اهمیت تولید و ذخیره‌سازی دقیق اطلاعات راه‌ها در پایگاه‌های داده کشور دارد.

امروزه روشی معمول در ایجاد پایگاه داده راه‌ها، استخراج آن‌ها از تصاویر رقومی هوایی و ماهواره‌ای، به تنهایی، یا تلفیق آن با سایر منابع داده است. در حال حاضر، بخش عمده‌ای از عملیات استخراج عارضه به صورت دستی صورت می‌گیرد. بنابراین، اتوماسیون مراحل تولید نقشه از تصاویر که معمولاً مبتنی بر استخراج اتوماتیک عوارض از تصاویر بزرگ مقیاس است، با هدف کاهش زمان و هزینه اجرا، از عمده‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی در علوم سنجش از دور و فتوگرامتری به شمار می‌رود.

هدف از برداری‌سازی راه، استخراج محور مرکزی آن از تصاویر رقومی است. از جمله تحقیقاتی که در حیطه برداری‌سازی راه صورت گرفته، ارائه روشی برای استخراج مناطق دارای کشیدگی، با تحلیل تصویر باینری حاصل از روش خوشه‌بندی است که منجر به استخراج نقاط مهم راه و در نهایت، اسکلت عارضه راه از تصاویر بزرگ مقیاس فضایی می‌شود (Doucette et al., 2001). همچنین، فرچی و ونگ (۲۰۰۵) با خوشه‌بندی عارضه راه به برداری‌سازی محور مرکزی آن پرداخته‌اند. در این تحقیق، خوشه‌های نویز براساس ویژگی دانسیته خوشه نیز قابل شناسایی‌اند. منا (۲۰۰۲) روشی عملی برای استخراج اتوماتیک اسکلت راه براساس تکنیک خوشه‌بندی کامینز و روش مثلث‌بندی دلونی^۱ ارائه کرده است. همین نویسندگان در مقاله دیگر خود، (Mena, 2006) به منظور تکمیل روش پیشین، طی

چند مرحله شامل پاکسازی^۲، طبقه‌بندی، استخراج اسکلت راه، نازک‌سازی و پاکسازی اسکلت استخراج شده تا رسیدن به ضخامت یک پیکسل، تشکیل گراف شبکه راه، و در پایان، رفع ناپیوستگی‌های راه با استفاده از مورفولوژی ریاضی الگوریتم جدیدی برای برداری‌سازی راه‌های موجود در تصویر حاصل از کشف راه ارائه کرده است. شواهد مؤید پیچیدگی روش برداری‌سازی ارائه‌شده، از لحاظ تعداد مراحل و صرف زمان بسیار محاسباتی و همچنین، ارائه نشدن راهکار مناسب برای مقابله با آثار نویز است.

در تحقیق دیگری، نواحی شامل کلاس راه با استفاده از طبقه‌بندی براساس تئوری فازی استخراج شده است (Mohammadzadeh et al., 2006). به دنبال آن، قطعات راه با عملیات مورفولوژی متوالی، مانند opening و closing بهبود یافتند تا بیرون‌زدگی‌های موجود در راه حذف شود و حفره‌ها پر شوند و شبکه کاملی از راه به دست آید.

کلود و همکاران (۲۰۰۷) برای برداری‌سازی راه از روش PCD^۳ بهره برده‌اند. در این روش، تابع نمایی پیچیده‌ای با تصویر راه کانالو می‌شود و تصاویر دامنه و فاز در فضای فرکانس محاسبه می‌شوند. موقعیت مراکز راه و عرض آن از تصویر دامنه، و زاویه امتداد راه از تصویر فاز قابل استخراج است. پس از آن، مختارزاده و همکاران (۲۰۱۰) الگوریتم جدیدی با عنوان بیضی‌های افزایشی جهت نمایش کشیدگی قطعات راه در مرحله خوشه‌بندی و روشی جدید بر پایه خوشه‌بندی فازی تصویر برای ایجاد اتصال بین نقاط نماینده هر خوشه، معرفی کردند. روش جدید معرفی‌شده در این تحقیق، جدا از ضخامت قطعات گوناگون راه و بدون نیاز به تخمین تعداد اولیه خوشه‌های تصویری قادر به برداری‌سازی محور مرکزی راه است. اما پیچیدگی الگوریتم تعیین و اتصال نقاط مهم راه، از جمله نقاط ضعف این روش در مرحله برداری‌سازی راه محسوب می‌شود.

1. Delaunay Triangulation
3. Phase Coded Disk

2. cleaning

از یکسو، و لزوم افزایش صحت و تمامیت راه‌های استخراج‌شده از سوی دیگر، در تحقیق حاضر روشی هوشمند برای برداری‌سازی اتوماتیک نتایج کشف راه، با کمترین میزان دخالت عامل انسانی، پیشنهاد شده است. در این تحقیق فرض بر این است که راه‌های موجود در تصویر با استفاده از یکی از انواع روش‌های کشف راه شناسایی شده‌اند. سپس با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی خوشه‌بندی در فضای تصویر و تعریف معیارهای هندسی مناسب برای قطعات راه و تلفیق این معیارها با عملگرهای میانگین‌گیر وزن‌دار ترتیبی^۱ محور مرکزی راه تشکیل می‌شود. پس از آن، برای بررسی مزایای روش پیشنهادی، نتایج آن با روش مطرح دیگری در حوزه برداری‌سازی راه مقایسه می‌شود. پس از بیان مقدمه در بخش نخست، عملگرهای میانگین‌گیر وزن‌دار ترتیبی در بخش دوم معرفی می‌شوند. در بخش سوم این مقاله، الگوریتم پیشنهادی برداری‌سازی راه و مراحل آن تشریح می‌شود، و نتایج حاصل از پیاده‌سازی آن و ارزیابی آن‌ها در بخش چهارم ارائه می‌شوند. بخش پنجم نیز، جمع‌بندی و آخرین بخش این مقاله است.

۲- معرفی عملگرهای میانگین‌گیر وزن‌دار ترتیبی

عملگرهای میانگین‌گیر وزن‌دار ترتیبی را نخستین بار یاگر در سال ۱۹۸۸ معرفی کرد که مجموعه گسترده‌ای از اپراتورهای تلفیق مانند بیشینه، کمینه، میانگین ریاضی و غیره را در بر می‌گیرند. مطابق رابطه (۱)، این عملگرها تعریف‌کننده نگاشتی n بعدی $OWA: R^n \rightarrow R$ هستند که در آن بردار وزن شامل $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ است، هر یک از مؤلفه‌های بردار وزن در بازه $[0, 1]$ تعریف شده و مجموع مؤلفه‌های بردار وزن برابر با یک است. با استفاده از این عملگر، مجموعه A با تعداد n مقدار عددی در مجموعه داده‌ها به ترتیب نزولی

عامری و همکاران (۱۳۹۰) برای برداری‌سازی راه‌های با اشکال متفاوت، روشی نیمه‌اتوماتیک از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی مختلف پیشنهاد کرده‌اند. در این تحقیق از تلفیق خوشه‌بندی در فضای تصویر به منظور دستیابی به نقاط اصلی راه و الگوریتم درخت پوشای کمینه در تئوری گراف برای برقراری اتصال بین این نقاط استفاده شده است.

خصالی و همکاران (۱۳۹۲) استخراج عارضه راه از تصاویر راداری و اپتیک با حد تفکیک بالا را با یکدیگر مقایسه کرده‌اند. نتایج خروجی حاصل از این الگوریتم‌ها نشان‌دهنده موفقیت تصاویر راداری در استخراج راه، در مناطقی با بافت شهری، به‌ویژه همراه با راه‌های کم‌عرض و کوچه‌ها و ضعف آن در استخراج راه در مناطق با پوشش گیاهی انبوه است. درحالی‌که تصاویر اپتیک می‌توانند بافت شهری را از مناطق دارای پوشش گیاهی به راحتی تفکیک کنند. بنابراین، با توجه به قابلیت‌های هر یک از این تصاویر در استخراج راه، تلفیق ویژگی‌های این دو منبع به منظور رفع نواقص و افزایش دقت الگوریتم‌های حاضر، روشی کارآمد به شمار می‌آید.

به تازگی روشی جدید در استخراج راه و محور مرکزی آن پیشنهاد شده که براساس نحوه جریان آب در کانالی با مرز مشخص، شبکه راه را مدل‌سازی می‌کند (Shanmugam and Kaliaperumal, 2015). در این روش، جهت حرکت و عرض راه با استفاده از تک‌نقطه‌ای که به صورت دستی انتخاب می‌شود، مشخص می‌گردد و سپس، به کمک اطلاعات درجه خاکستری راه و عرض آن راه‌های موجود در تصویر شناسایی می‌شود و محور مرکزی آن به دست می‌آید. الگوریتم پیشنهادی قادر است راه‌های منحنی به شکل U و S ، و تقاطع‌هایی به شکل‌های L ، T و X را استخراج کند. کاهش صحت شناسایی راه در مناطق شهری پیچیده از نقاط ضعف روش پیشنهادی است.

با توجه به اهمیت نمایش برداری راه‌ها و کاربرد آن در سیستم‌های ناوبری و یا سیستم‌های اطلاعات مکانی

1. Ordered Weighted Averaging (OWA)

یاگر (۱۹۸۸) به منظور توصیف رفتار عملگر OWA، پارامتری به نام «ORness» تعریف کرد. این پارامتر که نمایانگر میزان شباهت عملگر OWA به اپراتور OR است، مطابق رابطه (۳) تعریف می‌شود

$$\text{Orness}(W) = (1/n-1) \sum_{j=1}^n ((n-j) \cdot w_j)$$

براساس این رابطه، چنانچه رفتار عملگر تلفیق از کمینه به بیشینه تغییر یابد، میزان ORness از ۰ به ۱ تغییر می‌کند. براساس رابطه (۳) می‌شود فهمید

رابطه (۴) عملگر کمینه $\text{ORness}(0, \dots, 0, 1) = 0$ (الف)
 عملگر بیشینه $\text{ORness}(1, 0, \dots, 0) = 1$ (ب)
 $\text{ORness}(1/n, 1/n, \dots, 1/n) = 1/2$ (ج) \longrightarrow
 عملگر تلفیق خطی وزن دار

مقدار ORness استراتژی تصمیم‌گیری مناسب را برای رسیدن به جواب مطلوب تعیین می‌کند. بر همین اساس، وزن‌های ترتیبی OWA با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌شوند

رابطه (۵) $w_j = \left(\frac{j}{n}\right)^\alpha - \left(\frac{j-1}{n}\right)^\alpha$
 در رابطه بالا، α که درجه خوشبینی است، مطابق رابطه (۶) با ORness در ارتباط است

رابطه (۶) $\text{ORness} = \frac{1}{1+\alpha}$ $\alpha \geq 0$
 با تغییر α طیفی از استراتژی‌های تصمیم‌گیری مختلف بین دو حالت AND و OR منطقی شکل می‌گیرد. طبق جدول ۱، استراتژی مرتبط با $\text{ORness} = 0$ معادل با استراتژی بی‌نهایت بدبینانه است زیرا فقط معیارهای با مقادیر کم در فرایند تلفیق مشارکت می‌کنند. از سوی دیگر، استراتژی بی‌نهایت خوشبینانه معادل با $\text{ORness} = 1$ است زیرا مقادیر بالای معیارها در فرایند تلفیق به کار می‌رود (Jelokhani and Malczewski, 2014).

مرتب شده و سپس، با توجه به موقعیت مرتب‌شده آن با بردار وزن، وزن‌دهی می‌شوند. چنانچه c_j نشانگر j امین مقدار بزرگ در A باشد، خواهیم داشت:

$$\text{OWA}(A) = \sum_{j=1}^n w_j c_j \quad (1)$$

مهم‌ترین ویژگی عملگرهای OWA انعطاف‌پذیری آن‌ها در مدل‌سازی گسترده وسیعی از استراتژی‌های تصمیم‌گیری است (Cornelis et al., 2010). هدف اصلی از عملیات مرتب‌سازی با این عملگر، مشخص کردن درجه اهمیت معیارها، بسته به کاربرد مورد نظر است. برای نمونه عملگرهای کمینه، میانگین و بیشینه با استفاده از عملگرهای OWA مطابق رابطه (۲) مدل می‌شوند:

رابطه (۲) Minimum: $W_{\min} = \{w_j\}$, where $w_n = 1, w_j = 0, j \neq n$ (الف)
 Average: $W_{\text{avg}} = \{w_j\}$, where $w_j = 1/n, j = 1, \dots, n$ (ب)
 Maximum: $W_{\max} = \{w_j\}$, where $w_1 = 1, w_j = 0, j \neq 1$ (ج)

عملگر کمینه، مطابق با اپراتور منطقی «AND» شرایط تحقق «همه» ملزومات را فراهم کرده و عملگر بیشینه، معادل با اپراتور منطقی «OR» است و «دست‌کم یکی» از شرایط را تأمین می‌کند (Yager, 1988). در عملگرهای میانگین‌گیر وزن دار ترتیبی دو نوع وزن، شامل وزن‌های ترتیبی و وزن معیارها، تعریف می‌شوند که در ادامه آن‌ها را معرفی می‌کنیم.

۲-۱- تعیین وزن‌های ترتیبی

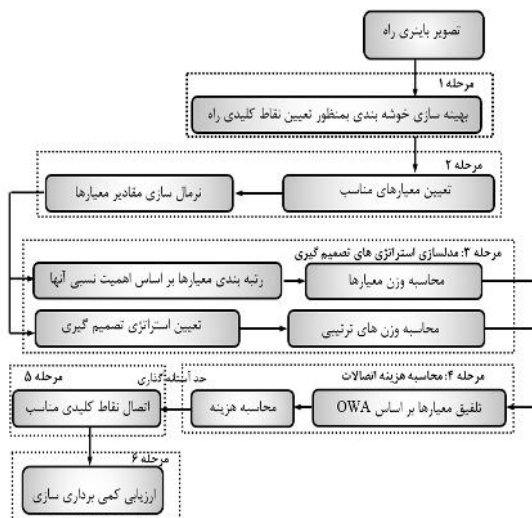
وزن‌های ترتیبی، در واقع، درجه اهمیت نسبی هر یک از آرگومان‌های مورد استفاده در فرایند تلفیق را نشان می‌دهند. با انتخاب وزن‌های مناسب درون بردار وزن، آرگومان‌های گوناگون، بسته به موقعیتشان در داخل ماتریس مرتب‌شده مقادیر معیارها، مورد تأکید قرار می‌گیرند. برای نمونه، چنانچه بیشتر وزن‌ها بالای بردار w تمرکز یابد، معیارهای با مقدار بالا مورد تأکید بیشتری قرار می‌گیرند و در صورتی که وزن‌ها بیشتر در پایین w تجمع یافته باشد، معیارهای با مقادیر کمتر مورد توجه بیشتر قرار می‌گیرند.

جدول ۱. استراتژی‌های تصمیم‌گیری مختلف معادل با انتخاب مقادیر ORness و α متفاوت
منبع: Jelokhani and Malczewski, 2014

α	ORness	استراتژی تلفیق	استراتژی تصمیم‌گیری
۰	۱	Logic OR (Max)	بی‌نهایت خوشبینانه
۰.۱	۰.۹	—	بسیار خوشبینانه
۰.۴	۰.۷	—	خوشبینانه
۱	۰.۵	WLC	خنثی
۲	۰.۳	—	بدبینانه
۱۰	۰.۱	—	بسیار بدبینانه
∞	۰	Logic AND (Min)	بی‌نهایت بدبینانه

۳-۲- الگوریتم پیشنهادی برداری‌سازی محور مرکزی راه

روش پیشنهادی برداری‌سازی محور مرکزی راه روشی اتوماتیک براساس مدل گراف شبکه راه است. طبق این مدل، مجموعه‌ای از نقاط به نام نقاط کلیدی که روی محور مرکزی راه مستقرند، مجموعه نودهای مدل گراف شبکه راه را تشکیل می‌دهند. به منظور بررسی امکان اتصال این نقاط به یکدیگر، هزینه اتصال بین هر دو نود محاسبه می‌شود و نودهای با کمترین هزینه اتصال، برای تشکیل توپولوژی شبکه، راه، به یکدیگر متصل می‌شوند. به این صورت مجموعه یال‌های گراف شبکه راه تشکیل می‌شود. در شکل ۱ الگوریتم پیشنهادی برداری‌سازی محور مرکزی راه ارائه شده که در ادامه، مراحل گوناگون آن شرح داده می‌شود.



شکل ۱. فلوچارت روش پیشنهادی برداری‌سازی محور مرکزی راه

۲-۲- تعیین وزن معیارها

در بسیاری از کاربردهای تلفیق معیارها، افزون بر وزن‌های ترتیبی، وزن‌های دیگری به منظور تأکید بر اهمیت و اولویت نسبی معیارها مورد نیاز است. برای تلفیق وزن‌های ترتیبی و وزن‌های معیارها، یاگر (۱۹۹۷) روشی را مطابق با رابطه (۷) معرفی کرده است

$$w_j = \left(\frac{\sum_{k=1}^j v_k}{\sum_{k=1}^n v_k} \right)^\alpha - \left(\frac{\sum_{k=1}^{j-1} v_k}{\sum_{k=1}^n v_k} \right)^\alpha \quad (7)$$

از آنجا که مجموع وزن‌های معیارها برابر با عدد ۱ است، برای هر مقدار داده i درون مجموعه داده‌ها می‌شود روابط (۸) و (۹) را نتیجه‌گیری کرد

$$w_j = \left(\sum_{k=1}^j v_k \right)^\alpha - \left(\sum_{k=1}^{j-1} v_k \right)^\alpha \quad (8)$$

رابطه (۹)

$$OWA_i = \sum_{j=1}^n \left(\left(\sum_{k=1}^j v_k \right)^\alpha - \left(\sum_{k=1}^{j-1} v_k \right)^\alpha \right) \cdot c_j$$

که α براساس رابطه (۶) نشانگر استراتژی تصمیم‌گیری است. روشی ساده و مطمئن برای تخمین وزن معیارها، رتبه‌بندی معیارها براساس اولویت آن‌هاست (Stillwell et al., 1981). طبق این روش، وزن معیار زام از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود

$$v_j = \frac{n-r_j+1}{\sum_{k=1}^n (n-r_k+1)} \quad (10)$$

در این رابطه ز اولویت هر معیار را نشان می‌دهد. برای نمونه، مهم‌ترین معیار دارای اولویت اول، دومین معیار دارای اولویت دوم و به همین ترتیب، کم‌اهمیت‌ترین معیار دارای اولویت آخر است. در این رابطه، n نشانگر تعداد معیارهاست. براساس رابطه (۱۰) هرچه معیاری اولویت بالاتری داشته باشد، وزن بیشتری به آن اختصاص می‌یابد.

۳-۱- مرحله نخست الگوريتم: خوشه‌بندي به منظور تعيين نقاط كليدي راه

خوشه‌بندي براي تعيين نقاط كليدي راه در فضاي تصوير و روي موقعيت مكاني پيكسل‌هاي راه صورت مي‌گيرد. در اين تحقيق، روش خوشه‌بندي براساس الگوريتم بهينه‌سازي انبوه ذرات^۱، (Omran et al., 2006) به منظور خوشه‌بندي پيكسل‌هاي راه، در فضاي تصوير تغيير يافته و مورد استفاده قرار گرفته است. الگوريتم تغيير يافته، در واقع، تلفيقي از نسخه باینري الگوريتم بهينه‌سازي انبوه ذرات^۲ (Kennedy and Eberhart, 1997) با هدف تعيين اتوماتيك تعداد و توزيع مناسب نقاط كليدي راه، و الگوريتم كامدينز^۳ به منظور تنظيم دقيق موقعيت نقاط كليدي است. شايدان ذکر است كه نقاط كليدي راه، در واقع، مراكز خوشه‌هاي به دست آمده از الگوريتم خوشه‌بندي مذکورند. عمليات خوشه‌بندي پيكسل‌هاي راه تا رسيدن به بهترين مجموعه از نقاط كليدي كه تعداد و موقعيت آنها روي تصوير باینري راه بهينه شده، تکرار می‌شود.

۳-۲- مرحله دوم الگوريتم: تعريف معيارهاي هندسي راه

به منظور برقراري اتصالات صحيح بين نقاط كليدي، توجه به ويژگي‌هاي عارضه راه و نحوه آشكار شدن آن در تصوير بسيار سودمند است. با توجه به اينكه ورودی ما در الگوريتم پيشنهاده تصوير باینري کلاس راه است، معيارهاي راديومتریک اين عارضه مانند درجات خاکستري آن، اطلاعات مفیدی در اختيار ما نمی‌گذارد. بنابراین در الگوريتم پيشنهاده، معيارهاي هندسي عارضه راه كه معرف شكل راه و رابطه قطعات گوناگون راه با يكديگرند، اطلاعات تکمیلی برای برقراري اتصال بين نقاط كليدي به شمار می‌آیند. در اين تحقيق، سه معيار هندسي به کار رفته كه احتمال اتصال نقاط كليدي به يكديگر را تعيين می‌کنند:

- فاصله (d): اين معيار فاصله اقليدسي بين نقاط كليدي را تعيين می‌کند كه معادل با طول اتصالات است.

- اختلاف راستا (DD): اين معيار زاويه بين امتدادهاي ميان دو اتصال است. امتداد هر اتصال نيز، در واقع، امتداد بردار حاصل از اتصال دو نقطه كليدي انتهایی آن است.
- همپوشانی دایره‌ای (CI): برای تعريف اين معيار، دایره‌ای به شعاع R و به مرکز هر نقطه كليدي در نظر گرفته می‌شود. همپوشانی فصل مشترک دواير منتسب به نقاط كليدي با تصوير باینري راه در حالت $d < 2R$ احتمال اتصال اين نقاط را تعيين می‌کند. به بيان ديگر، هرچه تعداد پيكسل‌هاي راه در محل اشتراك دواير متناظر دو نقطه كليدي بيشتري باشد، اين دو نقطه با احتمال بيشتري، برای تشكيل توپولوژی راه، بايد به يكديگر اتصال يابند.

از بين سه معيار هندسي معرفي شده، هرچه مقدار معيارهاي d و DD کمتر و مقدار CI بيشتري باشد، جهت دستيابي به اتصالات صحيح در گراف شبکه راه مطلوب تر است. از آنجا كه معيارهاي معرفي شده مقدار عددي دارند، برای فراهم کردن امکان مقايسه آنها، روش نرمال‌سازي مقادير با فرايند «بیشینه امتیاز»^۴ (Malczewski, 1999) پيشنهاده می‌شود. در جدول ۲ محدوده مقدار معيارها و توابع نرمال‌سازي آنها معرفي شده است. از بين اين معيارها، d و DD معيارهاي هزينه و CI معيار سود محسوب شده كه برای فراهم کردن امکان مقايسه با معيارهاي هزينه، بايد از عدد يك كسر شود. در جدول ۱ كميت d_{max} بیشینه فاصله بين نقاط كليدي، DD_{max} بیشینه اختلاف راستا و CI_{max} نيز بیشینه مجموع تعداد پيكسل‌هاي راه در فصل مشترک دواير متناظر است.

جدول ۲. محدوده مقدار معيارها و توابع نرمال‌سازي آنها

معياريها	محدوده مقادير	تابع نرمال‌سازي
فاصله (d)	$[0 \infty)$	$N(D)= d/d_{max}$
اختلاف راستا (DD)	$[0 \pi/2]$	$N(DD)=DD/DD_{max}$
همپوشانی دایره‌ای (CI)	$[0 \infty)$	$N(CI)= 1- CI/CI_{max}$

1. Particle Swarm Optimization (PSO)
2. binary PSO
3. K-medians
4. maximum score

۳-۳- مرحله سوم الگوریتم: مدل سازی

استراتژی تصمیم گیری

در این مرحله از الگوریتم، با تعیین درجه خوشبینی از رابطه (۶)، استراتژی تلفیق مشخص می شود و وزن های ترتیبی از رابطه (۵) به دست می آیند. به همین ترتیب، با رتبه بندی معیارها براساس اولویت آن ها و استفاده از رابطه (۱۰)، وزن معیارها نیز محاسبه می شود. در یک سر این طیف وضعیتی است که در آن تمایل به تحقق بسیاری از معیارها وجود دارد و بنابراین، باید مقادیر کوچک تری برای ORness انتخاب شود. در سر دیگر این طیف وضعیتی است که تحقق دست کم یکی از معیارها نیز مطلوب است که انتخاب مقادیر بالاتر ORness این امر را تضمین می کند. به طور کلی، انتخاب استراتژی تصمیم گیری مناسب بر عهده کاربر است و بسته به نوع مسئله و شرایط آن فرق می کند.

۳-۴- مرحله چهارم الگوریتم: محاسبه هزینه

اتصالات

برای محاسبه هزینه هر اتصال بین دو نقطه کلیدی، پس از انتخاب استراتژی تصمیم گیری و وزن معیارها با عملگر میانگین گیر وزن دار ترتیبی معرفی شده در رابطه (۹)، معیارها باید با یکدیگر تلفیق شوند. با استفاده از این عملگر، معیارهای معرف اتصالات راه به مقادیر نرمال شده در بازه [۰, ۱] تبدیل می شوند. پس از عملیات تلفیق معیارها، هزینه هر اتصال با رابطه (۱۱) محاسبه می شود

$$\text{Cost}(i) = OWA_i \cdot d_i / CI_i \quad (11)$$

با توجه به این رابطه، مقدار هزینه هر اتصال با طول آن اتصال رابطه مستقیم، و با پارامتر CI رابطه معکوس دارد. یعنی با افزایش فاصله بین نقاط کلیدی و کاهش تعداد پیکسل های راه در محدوده مشترک دواپس منتسب به آن ها، هزینه افزایش می یابد. افزایش هزینه به انتخاب نشدن اتصال متناظر با قطعه راه منتهی می شود. همچنین، هزینه هر اتصال با مقدار عملگر میانگین گیر وزن دار ترتیبی نیز رابطه ای مستقیم دارد.

به عبارت دیگر، استراتژی تصمیم گیری مستقیماً بر مقدار هزینه هر اتصال تأثیر می گذارد.

۳-۵- مرحله پنجم الگوریتم: اتصال نقاط کلیدی

مناسب

برای برقراری اتصالات درست بین نقاط کلیدی و تشکیل توپولوژی شبکه راه، مدل گراف شبکه راه مورد استفاده قرار گرفته است. نوده های این گراف نقاط کلیدی معرف مراکز خوشه، و یال های آن اتصالات معرف قطعات راه هستند. در این مرحله، هدف انتخاب اتصالات دارای کمینه هزینه به منزله قطعات راه است. محاسبه هزینه همه اتصالات بین نقاط کلیدی از لحاظ محاسباتی فرایندی زمانبر است که لزومی نیز به انجام دادن آن نیست. زیرا هرچه نقاط کلیدی به یکدیگر نزدیک تر باشند، به احتمال بیشتری به یک قطعه از راه تعلق دارند و همچنین، هزینه اتصال آن ها کمتر است. به همین منظور در این تحقیق، نخست به کمک الگوریتم k نزدیک ترین همسایه^۱، نزدیک ترین نقاط به نقاط کلیدی مورد نظر پیدا می شود تا زمان محاسبه هزینه کاهش یابد. به این شکل، فقط هزینه اتصال نقاط کلیدی همسایه محاسبه می شود. مقدار k نیز با توجه به تعداد انشعابات راه در محل تقاطعها تعیین می شود. برای نمونه، چنانچه در تصویری نهایتاً چهار راه وجود داشته باشد، مقدار k برابر با ۴ در نظر گرفته می شود.

شکل ۲ فلوچارت الگوریتم اتصال نقاط کلیدی را نشان می دهد که مراحل آن در ادامه تشریح می شود:

- به ازای هر نقطه کلیدی (RKP_i) در مجموعه نقاط کلیدی (ORKP)، k نقطه کلیدی همسایه مشخص می شود.

- اتصالات (LS) بین نقطه کلیدی مورد نظر و k نقطه کلیدی همسایه تعیین می شود.

- در صورتی که اتصال مورد نظر در مجموعه قطعات راه نباشد، هزینه اتصال با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه می شود.

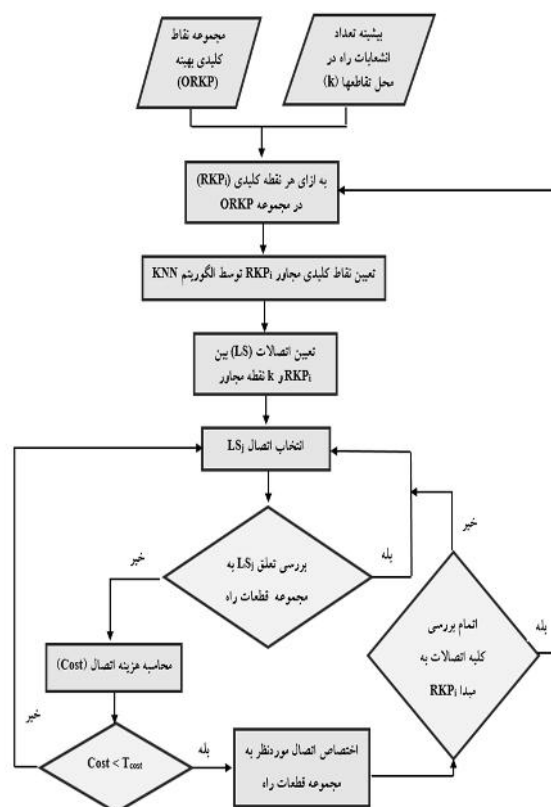
1. k-nearest neighbor

بافر و محاسبه سه پارامتر جذر ميانگين مربع خطا^۲،
تماميت^۳ و صحت^۴، نتايج ارزيابي مي‌شوند.

۴- پياده‌سازي و ارزيابي نتايج

به منظور تعيين استراتژي مناسب تصميم‌گيري براي پذيرش يك اتصال در جايگاه قطعه‌اي از راه و يا رد آن، در تحقيق حاضر مقاديرمختلف ORness بين صفر و يك آزمايش شدند. نتايج بيانگر آن بود كه انتخاب مقدار بالا براي اين پارامتر منجر به افزايش مقدار عملگر ميانگين گير وزن دار ترتيب‌ي مي‌شود بنا بر اين، هزينه افزايش مي‌يابد و در نتيجه، تعداد قطعات راه جالفايده در گراف شبكه راه بيشتري مي‌شود. برعكس، با انتخاب مقادير پايين براي ORness، هزينه اتصالات کاهش مي‌يابد و تعداد قطعات راه به اشتباه استخراج شده افزايش مي‌يابد. با توجه به اين مسئله كه در هر دو اين حالت‌ها شبكه كامل و درستي از راه‌هاي برداري شده حاصل نشد، انتخاب استراتژي مناسب تصميم‌گيري ضروري به نظر مي‌رسد. در نهايت، با جايگزين كردن ميانگين مقادير OWA به دست آمده از انتخاب مقادير مختلف ORness در تابع هزينه معرفي شده در رابطه (۱۱)، كامل‌ترين شبكه راه در تمامي تصاوير مورد آزمايش حاصل شد.

الگوريتم پيشنهادهي استخراج محور مركزي راه روي تصاوير باينري حاصل از اكتشاف پيكسل‌هاي راه پياده‌سازي شد. براي سنجش قابليت الگوريتم پيشنهادهي، اين الگوريتم روي چندين تصوير بزرگ مقياس مورد آزمايش قرار گرفت. براي همه تصاوير مورد آزمايش، مقدار $R=0.7$ ، $d=1$ ، $T_{cost}=1$ و $k=4$ در نظر گرفته شد. همچنين، ميانگين OWA به منزله استراتژي مناسب تصميم‌گيري در پذيرش يك قطعه راه يا رد آن در محاسبه هزينه در همه تصاوير انتخاب شد.



شکل ۲. فلوجارت الگوريتم پيشنهادهي اتصال نقاط کلیدی راه

- چنانچه هزينه اتصال در محدوده مورد پذيرش، يعني كوچك‌تر از حد آستانه T_{cost} باشد، اتصال مورد نظر در مجموعه قطعات راه واقع مي‌شود. در غير اين صورت، اتصال بعدي مورد آزمايش قرار مي‌گيرد.
- اين فرايند تا انتخاب همه نقاط کلیدی موجود ادامه مي‌يابد.

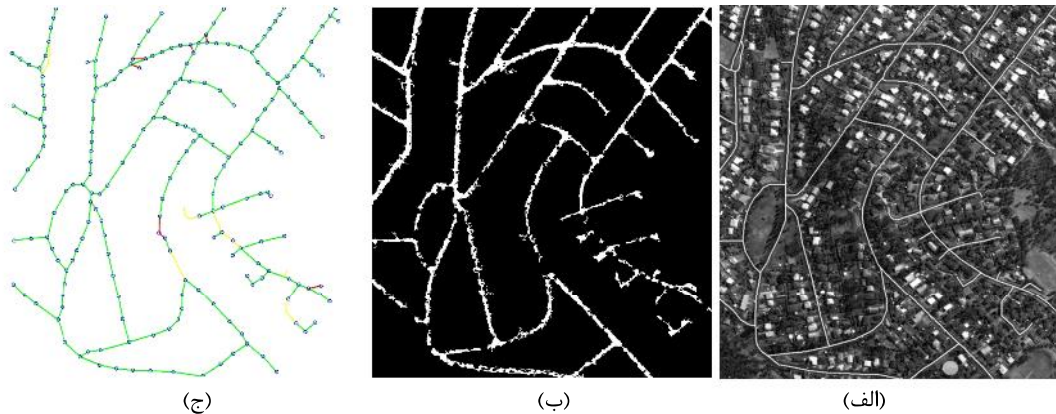
۳-۶- مرحله ششم الگوريتم: ارزيابي کمی برداري‌سازي

براي ارزيابي نتايج حاصل از استخراج محور مركزي راه در اين تحقيق، از روش بافر با در نظر گرفتن اختلاف راستا^۱ (Wiedemann, 2003) استفاده شده است. در اين روش، بافري به عرض تقريبي نصف عرض راه‌هاي موجود در تصوير، اطراف راه در نظر گرفته مي‌شود. سپس با مقايسه محور راه استخراج شده با محور راه مرجع - استخراج شده به صورت دستی - در محدوده اين

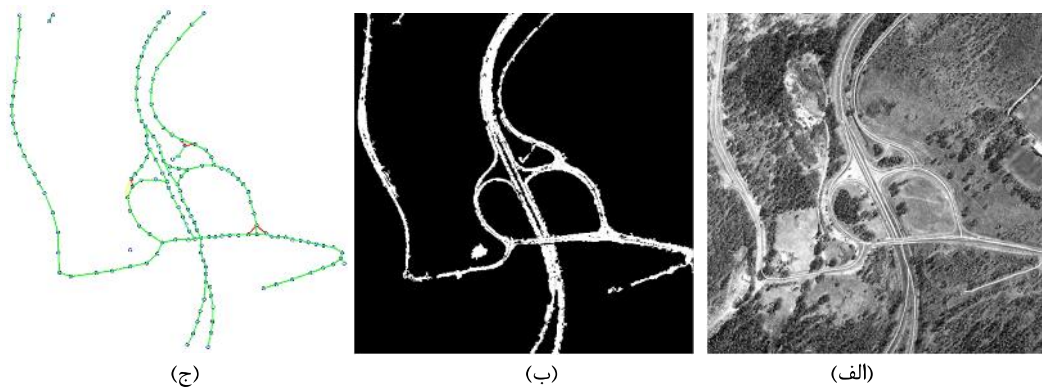
1. buffer method in consideration of direction difference
2. root mean square error (RMSE)
3. completeness
4. correctness

شکل ۵ نیز نتایج حاصل از برداری سازی شبکه راه روی بخشی از تصویر شیراز به ابعاد 600×450 در ناحیه غیرشهری نمایش داده شده است. روش به کار رفته برای کشف تصویر باینری راه در همه تصاویر تلفیق روش خوشه‌بندی سی مینز فازی و استفاده از عملگرهای مورفولوژیکی تصویر (محمدزاده، ۱۳۸۸؛ عامری و همکاران، ۱۳۹۰) است.

شکل‌های ۳، ۴ و ۵ مراحل پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی را روی تصاویر پن‌شارپ‌شده ایکنوس، شامل انواع گوناگون راه‌های مستقیم و راه‌های انحنا و راه‌های موازی و میدان، نمایش می‌دهد. شکل‌های ۳ و ۴ تصاویر شهر هوبارت (کشور استرالیا) را، به ترتیب، در ناحیه متراکم شهری به ابعاد 750×650 و ناحیه غیرشهری به ابعاد 700×700 نمایش می‌دهند.



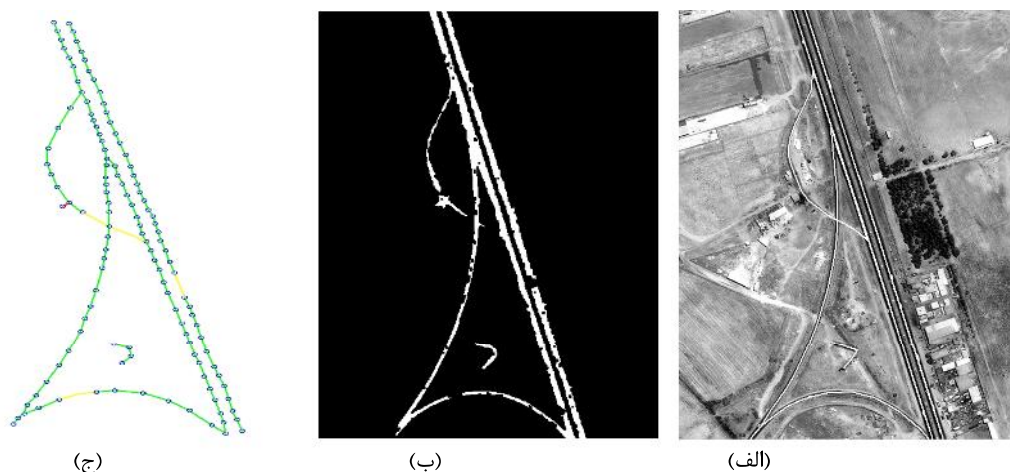
شکل ۳. نتایج تصویر هوبارت در ناحیه شهری؛ (الف) تصویر اصلی و نقشه راه‌های مرجع روی آن، (ب) تصویر باینری راه‌های کشف‌شده، (ج) نتایج الگوریتم پیشنهادی: راه‌های به درستی استخراج‌شده به رنگ سبز، راه‌های به اشتباه استخراج‌شده به رنگ قرمز و راه‌های جالفتاده به رنگ زرد نمایش داده شده است.



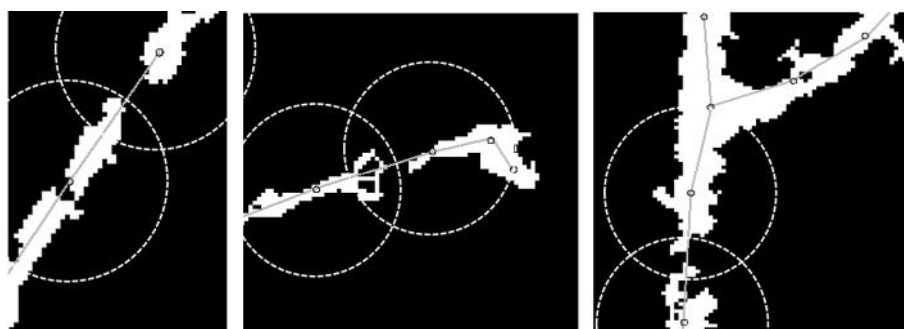
شکل ۴. نتایج تصویر هوبارت در ناحیه غیرشهری؛ (الف) تصویر اصلی و نقشه راه‌های مرجع روی آن، (ب) تصویر باینری راه‌های کشف‌شده، (ج) نتایج الگوریتم پیشنهادی: راه‌های به درستی استخراج‌شده به رنگ سبز، راه‌های به اشتباه استخراج‌شده به رنگ قرمز و راه‌های جالفتاده به رنگ زرد نمایش داده شده است.

گپ در عارضه راه، اگر موجب افزایش فاصله بین نقاط کلیدی و نیز کاهش تعداد پیکسل‌های فصل مشترک دوایر متناظر با نقاط کلیدی (CI) شود، الگوریتم پیشنهادی به علت افزایش هزینه اتصال موفق به تشکیل اتصال مورد نظر نمی‌شود و اتصال جاافتاده در محل گپ شکل می‌گیرد. این حالت در بخش‌هایی از تصویر باینری شهر هوبارت، در شکل ۷ نمایش داده شده است. در مجموع و با توجه به شکل‌های ۳ و ۴ و ۵، الگوریتم پیشنهادی اتصال قادر است محور مرکزی شبکه راه را در تصویر باینری راه دارای گپ‌های کوچک متعدد، با موفقیت بیشتر برداری‌سازی کند که این امر نقطه قوتی برای الگوریتم اتصال پیشنهادی به شمار می‌آید.

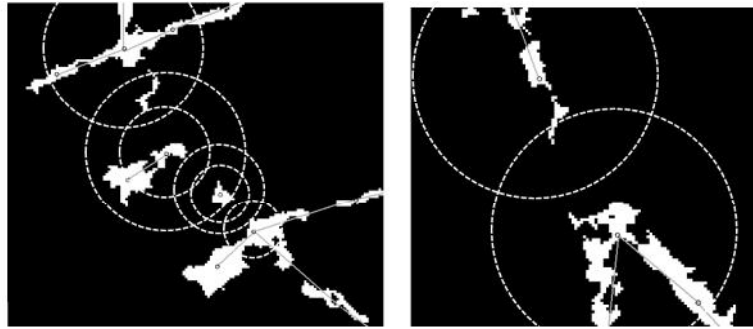
با مشاهده تصاویر متوجه می‌شویم در صورت وجود گپ در مسیر راه کشف‌شده در تصویر باینری راه که به علت عوارض زمینه تصویر مانند درختان، اتومبیل‌ها، ساختمان‌ها و سایه‌هایشان رخ می‌دهد، الگوریتم اتصال پیشنهادی به دو شکل عمل می‌کند. اگر اندازه گپ کوچک باشد و چندان موجب افزایش فاصله بین نقاط کلیدی نشود و همچنین، فصل مشترک دایره‌های متناظر با نقاط کلیدی دارای پیکسل‌های راه باشد، الگوریتم پیشنهادی با اتصال نقاط کلیدی مورد نظر گپ را به خوبی پوشش می‌دهد و از بروز اتصالات جاافتاده در شبکه راه جلوگیری می‌کند. چنین حالتی در شکل ۶، شامل بخش‌هایی از تصویر باینری شهر هوبارت، مشاهده می‌شود. در صورت بزرگ بودن اندازه



شکل ۵. نتایج تصویر شیراز در ناحیه غیرشهری؛ (الف) تصویر اصلی و نقشه راه‌های مرجع روی آن، (ب) تصویر باینری راه‌های کشف‌شده، (ج) نتایج الگوریتم پیشنهادی: راه‌های به درستی استخراج‌شده به رنگ سبز، راه‌های به اشتباه استخراج‌شده به رنگ قرمز و راه‌های جاافتاده به رنگ زرد نمایش داده شده است.



شکل ۶. تشکیل اتصالات صحیح در محل گپ، با در نظر گرفتن CI و d



شکل ۷. تشکیل نشدن اتصالات در محل گپ، با در نظر گرفتن d و CI

تشکیل نواحی بسته در مدل گراف شبکه راه را به وجود می‌آورند. این حالت (شکل ۸)، موجب کاهش صحت برداری‌سازی شبکه راه می‌شود. به طور کلی، با مشاهده نتایج برداری‌سازی محور مرکزی راه در تصاویر مورد آزمایش، متوجه می‌شویم که صرف‌نظر از موارد یادشده، روش پیشنهادی در تشکیل توپولوژی شبکه راه با موفقیت عمل همراه بوده است.

در جدول ۳، نتایج ارزیابی کمی دقت الگوریتم پیشنهادی در برداری‌سازی شبکه راه تصاویر مورد آزمایش خلاصه شده است. در این جدول، افزون بر نتایج روش پیشنهادی در این تحقیق، نتایج ارزیابی دقت الگوریتم درخت پوشای کمینه^۱ در اتصال نقاط

قطعات راه به اشتباه استخراج‌شده که روی تصویر با خطوط قرمز رنگ نمایش داده شده‌اند، بیشتر به دلیل عوارضی با ویژگی‌های طیفی مشابه راه، مانند معابر و پارکینگ‌ها، و بیشتر در نواحی متراکم شهری، مانند تصویر شهری هوبارت مشاهده می‌شوند. چنانچه این عوارض در تصویر باینری حاصل از کشف راه به اشتباه جزء کلاس راه طبقه‌بندی نشوند، دقت الگوریتم پیشنهادی برداری‌سازی افزایش چشمگیری می‌یابد. یکی دیگر از علل برداری‌سازی اشتباه در تصویر، وجود تعدادی نقطه کلیدی مجاور یکدیگر در محل تقاطع راه‌هاست که به علت افزایش عرض راه در محل این تقاطع‌ها پدید آمده‌اند و امکان اتصال اشتباه نقاط و



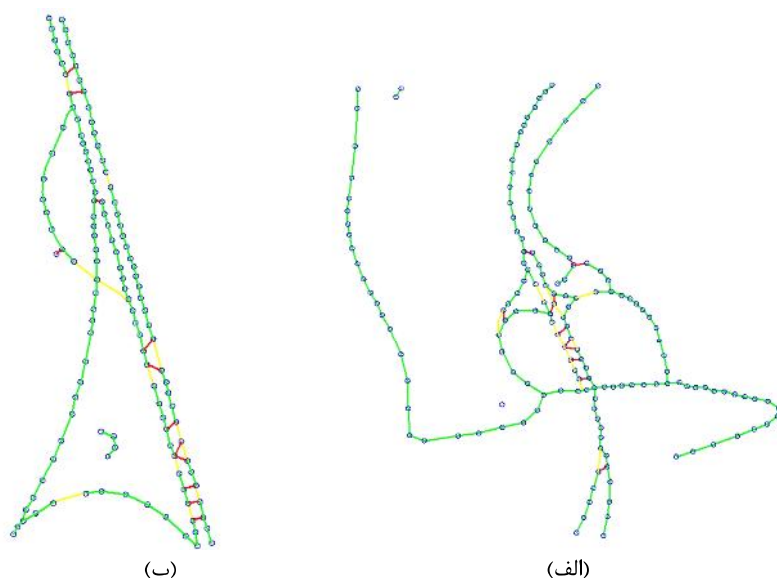
شکل ۸. نمونه‌هایی از اتصال اشتباه در محل تقاطع ناشی از تشکیل نواحی بسته در تصویر هوبارت، غیرشهری

1. minimum spanning tree (MST)

از ديگر مزايای روش پيشنهادی نیاز به تنظيم تعداد پارامترهای کم شامل k , R و T_{cost} است. امکان آن هست که پارامتر k را که با توجه به تعداد انشعابات راه در محل تقاطع‌ها تعيين می‌شود، برای همه تصاویر به صورت یکسان در نظر گرفت. توجه به این نکته نیز ضروری است که در نظر گرفتن مقدار بالا برای این پارامتر فقط هزینه محاسباتی را افزایش می‌دهد.

از سوی دیگر، فاصله بین نقاط کلیدی باید از دوبرابر شعاع دایره‌های منتسب به آن‌ها کوچک‌تر باشد تا بین دو دایره همپوشانی پدید آید. بنابراین، شعاع این دایره‌ها باید بیشتر از نصف فاصله بین دو نقطه باشد. در این تحقیق مقدار R ، برای همه تصاویر مورد آزمایش، در محدوده $[0.16d, 0.17d]$ انتخاب شد. زیرا در صورتی که $R > 0.17d$ باشد، احتمال شکل‌گیری اتصالات اشتباه به‌ویژه در راه‌های موازی نزدیک وجود دارد. از سوی دیگر، با انتخاب R در محدوده $[0.15d, 0.16d]$ به دلیل کاهش همپوشانی دایره، مقدار CI کاهش می‌یابد و در نتیجه، هزینه اتصال مورد نظر بیشتر می‌شود. افزایش هزینه نیز به حذف اتصال منظور در مجموعه قطعات راه و افزایش قطعات راه جافتاده در شبکه راه می‌انجامد.

کلیدی راه (عامری و همکاران، ۱۳۹۰) نیز ارائه شده است. با توجه به نقص الگوریتم درخت‌پوشای کمینه در ایجاد اتصال کامل در محل میدان‌ها و یا لوپ‌های بسته در شبکه راه، میزان پارامترهای ارزیابی دقت این روش در مقایسه با روش پيشنهادی کاهش یافته است. از دیگر نقاط قوت روش پيشنهادی قابلیت برداری‌سازي صحیح راه‌های موازی نزدیک به یکدیگر - در شکل‌های ۴ و ۵- است. در الگوریتم درخت‌پوشای کمینه، کم بودن فاصله نقاط کلیدی از یکدیگر در محل راه‌های موازی نزدیک، موجب سردرگمی الگوریتم در تشخیص نقاط کلیدی مناسب برای اتصال و موفق نشدن این الگوریتم در برقراری اتصالات درست می‌شود. نتیجه این سردرگمی کاهش مقادیر پارامترهای ارزیابی دقت روش درخت‌پوشای کمینه به نسبت روش پيشنهادی است. شکل ۹ نتایج اتصال نقاط کلیدی با الگوریتم درخت‌پوشای کمینه را، برای تصویر شیراز و تصویر هوبارت در ناحیه غیرشهری، نشان می‌دهد. با مقایسه این نتایج با نتایج اتصال حاصل از الگوریتم پيشنهادی (شکل‌های ۴(ج) و ۵(ج)) برتری روش پيشنهادی در برداری‌سازي راه‌های موازی نزدیک مشهود است.



شکل ۹. نتایج اتصال نقاط کلیدی با الگوریتم MST (الف) تصویر شیراز، (ب) تصویر هوبارت در ناحیه غیرشهری

جدول ۳. مقایسه نتایج ارزیابی دقت الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم MST

تصاویر	پارامترهای ارزیابی دقت		
	Correctness (%)	Completeness (%)	RMSE (m)
هوبارت، شهری	روش پیشنهادی	۹۶	۰/۹۷
	روش MST	۹۴	۱/۰۴
هوبارت، غیرشهری	روش پیشنهادی	۹۷	۱/۱
	روش MST	۹۳	۱/۳
شیراز	روش پیشنهادی	۹۳	۰/۶۷
	روش MST	۸۶	۰/۷۳

۵- نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاد

تحقیق حاضر با هدف برداری‌سازی نتایج کشف راه از تصاویر بزرگ مقیاس، با استفاده از تکنیک خوشه‌بندی پیکسل‌های راه در فضای تصویر، به کمک الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات و آنالیز چندمعیاره به وسیله اپراتورهای میانگین‌گیر وزن‌دار ترتیبی در مدل گراف شبکه راه انجام گرفته است. در این راستا، با تعریف چندین معیار هندسی از راه و تعیین استراتژی مناسب تلفیق معیارها، قطعات صحیح راه انتخاب شدند. نتایج برداری‌سازی گویای موفقیت الگوریتم پیشنهادی در برداری‌سازی محور مرکزی اشکال مختلف راه با دقت‌های بالا است. همچنین، این الگوریتم را می‌شود روی تصویر کلاس راه به دست آمده از روش‌های گوناگون اکتشاف راه نیز پیاده‌سازی کرد. نقشه راه حاصل از این روش با کمترین مداخله کاربر، دارای قابلیت ورود به سیستم‌های اطلاعات مکانی جهت تولید و بهنگام‌رسانی نقشه راه‌هاست. مدل‌سازی دقیق عوارض متن تصویر و تقاطع‌ها در تحقیقات آینده ممکن است به بهبود کیفیت هندسی و توپولوژیکی راه‌های استخراج‌شده از تصویر کمک شایانی بکند.

۶- منابع

خصالی الف، ولدان زوج، م.ج، دهقانی، م.، مختارزاده، م.، ۱۳۹۲، مقایسه استخراج عارضه راه در مناطق شهری از تصاویر با حد تفکیک بالای

از آنجا که مقدار OWA در محدوده [۰, ۱] قرار دارد، اگر $d_i < CI_i$ باشد، هزینه هر اتصال نیز در محدوده [۰, ۱] قرار خواهد گرفت. از سوی دیگر، چنانچه $d_i > CI_i$ هزینه بیشتر از «۰» خواهد شد. چون با افزایش فاصله بین نقاط کلیدی تعداد پیکسل‌های راه در محدوده همپوشانی دو دایره (CI) کاهش می‌یابد، احتمال تعلق اتصال مورد نظر به مجموعه قطعات راه نیز کمتر می‌شود. بنابراین، تأمین شرط $d_i < CI_i$ برای دستیابی به شبکه کامل راه مطلوب‌تر است. سرانجام، با توجه به مطالب گفته‌شده و پس از آزمایش روی تصاویر گوناگون، به منظور دستیابی به کامل‌ترین شبکه راه، برای همه تصاویر $T_{cost} = 1$ تعریف شد.

به طور کلی دستیابی به RMSE حدود ۰/۹ متر، میانگین completeness حدود ۹۴٪ و میانگین correctness حدود ۹۵٪ موفقیت چشمگیر الگوریتم پیشنهادی در استخراج محور مرکزی گونه‌های مختلف راه را، شامل راه مستقیم، راه‌های دارای انحنای موازی نزدیک، تقاطع‌ها، میدان‌ها و لوپ‌های بسته در شبکه راه نشان می‌دهد. ورودی الگوریتم پیشنهادی برداری‌سازی، تصویر باینری کلاس راه است بنابراین، قابلیت پیاده‌سازی آن روی تصویر باینری راه به دست آمده از روش‌های مختلف کشف راه وجود دارد. افزون بر این، می‌شود روش یادشده را جهت برداری‌سازی انواع عوارض خطی دیگر نیز به کار برد.

- Group Multicriteria Spatial Decision Support System for Parking Site Selection Problem: A Case Study, Land Use Policy, (42) 492–508.**
- Kennedy, J., & Eberhart, R.C., 1997, **A Discrete Binary Version of The Particle Swarm Algorithm**, In Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pages 4104-4108, IEEE Press, Piscataway, NJ, 1997.
- Omran, M.G., Engelbrecht, A.P. & Salman, A., 2006, **A Dynamic Clustering Using Particle Swarm Optimization with Application in Image Classification**, Pattern Analysis and Application. 332-344.
- Malczewski, J., 1999, **GIS and Multicriteria Decision Analysis**, Wiley, New York.
- Mena, J.B., 2002, **Vectorización Automática de una Imagen Binaria Mediante K-Means Degeneración de la Triangulación de Delaunay**, Revista de la Asociación Española de Teledetección 17, 21-29.
- Mena, J.B., 2006, **Automatic Vectorization of Segmented Road Networks by Geometrical and Topological Analysis of High Resolution Binary Images**, Knowledge-Based Systems 19, 704–718.
- Mohammadzadeh, A., Tavakoli, A. & ValadanZoej, M.J., 2006, **Road Extraction Based on Fuzzy Logic and Mathematical Morphology from Pan-Sharpned Ikonos Images**, Photogrammetric Record, 21(113): 44-60.
- Mokhtarzade, M., ValadanZoej, M.J., Ebadi, H. & Sahebi, M.R., 2010, **An Innovative Image Pace Clustering Technique for Automatic Road Network Vectorization**, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 76, No. 7, pp. 841–852.
- Shanmugam, L. & Kaliaperumal, V., 2015, **Water Flow Based Geometric Active Deformable Model for Road Network, TerraSAR-X و آیکونوس با استفاده از اطلاعات بافت در الگوریتم های شبکه عصبی، سنسجش از دور و GIS ایران، سال پنجم، شماره چهارم.**
- عامری، ف.، ولدان زوج، م.ج.، مختارزاده، م.، مبارکی، ع.م.، ۱۳۹۰، **استخراج اشکال متفاوت راه از تصاویر ماهواره ای با قدرت تفکیک های مختلف مکانی، سنسجش از دور و GIS ایران، سال سوم، شماره چهارم، صص. ۱۸-۱.**
- محمدزاده، ع.، ۱۳۸۸، **استخراج اتوماتیک راه های اصلی از تصاویر ماهواره ای رنگی بزرگ مقیاس با استفاده از منطق فازی و توابع مورفولوژی، پایان نامه دکتری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.**
- Clode, S., Rottensteiner, F., Kootsookos, P. & Zelniker, E., 2007, **Detection and Vectorization of Roads from Lidar Data**, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 73(5), 517-536.
- Cornelis, C., Verbiest, N. & Jensen, J., 2010, **Ordered Weighted Average Based Fuzzy Rough Sets**, Proceedings of the 5th International Conference on Rough Sets and Knowledge Technology (RSKT 2010), p. 78 – 85.
- Doucette, P., Agouris, P., Stefanidis, A. & Musavi, M., 2001, **Self-Organised Clustering for Road Extraction in Classified Imagery**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (55), 347-358.
- Ferchichi, S. & Wang, S., 2005, **Optimization of Cluster Coverage for Road Center-Line Extraction in High Resolution Satellite Images**, Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing, pp. 201–204
- Jelokhani-Niaraki, M. & Malczewski, J., 2014, **A**

- Yager, R.R., 1988, **On Ordered Weighted Averaging Aggregation Operators in Multicriteria Decision making**, IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst. Hum. 18 (1), 183–190.
- Yager, R.R., 1997, **On the Inclusion of Importances in OWA Aggregations**, In: Yager, R.R., J. Kacprzyk, (Eds.), *The Ordered Weighted Averaging Operators*, Kluwer Academic Publishers, Boston, pp. 41–59.
- ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, (102) 140–147.
- Stillwell, W.G., Seaver, D.A. & Edwards, W., 1981, **A Comparison of Weight Approximation Techniques in Multi-Attribute Utility Decision Making**, Organ. Behav. Hum.Perform. 28 (1): 62–77.
- Wiedemann, C., 2003, **External Evaluation of Road Networks**, ISPRS Archives, Vol. XXXIV, Part 3/W8, Munich, 17.-19.