نشریه علمی علوم و فنون نقشه برداری، دوره ۱۵، شماره ۳، صفحه ۷۱ تا ۹۰، اسفند ماه ۱۴۰۴ – مقاله پژوهشی

ارائه یک مدل برای تعمیم و ساده‌سازی شبکه راه‌ها (۱:۲۵,۰۰۰ به ۱:۵۰,۰۰۰) با استفاده از روش‌های یادگیری عمیق مبتنی بر گراف

مرضیه زارعی[۱]، محمد کریمی*[۲]، پرستو پیله فروش‌ها[۳]

[۱] کارشناس ارشد سیستم اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
marzieh.zarei@email.kntu.ac.ir

[۲] دانشیار دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
mkarimi@kntu.ac.ir

[۳] استادیار دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
pilehforoosh@kntu.ac.ir

(دریافت: مهر ۱۴۰۴، تصویب: بهمن ۱۴۰۴)

چکیده

یکی از وظایف سازمان‌های ملی نقشه‌برداری تولید نقشه‌ها در مقیاس‌های مختلف است که این فرایند زمان‌بر و هزینه‌بر است. یکی از راهکارهای کاهش زمان و هزینه، تولید نقشه‌های کوچک مقیاس از طریق تعمیم و ساده سازی نقشه‌های بزرگ مقیاس می‌باشد. در این تحقیق، با توجه به اهمیت شبکه راه‌ها در پایگاه داده‌های توپوگرافی، مدل‌سازی تعمیم و ساده‌سازی شبکه راه‌ها در سه گام انجام شد. در گام نخست، با هدف غلبه بر محدودیت‌های روش‌های موجود، یک ساختار ترکیبی ارائه شد که تلفیقی از رویکردهای Mesh، Stroke و بلوک‌های ساختمانی است. در این گام، شبکه راه‌ها به ساختارهای خطی و سطحی-خطی تقسیم شدند و با استفاده از گراف دوگان، روابط توپولوژیکی میان آن‌ها استخراج شد. در گام دوم، ویژگی‌های موضوعی، هندسی و توپولوژیکی ساختارها استخراج و استانداردسازی شد و طبقه‌بندی به کمک الگوریتم Random Forest (برای ساختارهای خطی) و TAGCN (برای ساختارهای سطحی-خطی) انجام گرفت. بر اساس نتایج طبقه‌بندی، راه‌های کم‌اهمیت یا ایزوله حذف و خطوط باقی‌مانده متناسب با مقیاس هدف ساده‌سازی و نرم‌سازی شدند. در گام سوم برای تکمیل فرآیند تعمیم و ساده‌سازی، بلوک‌های ساختمانی به مقیاس هدف تعمیم یافتند و تضادهای مکانی میان آن‌ها و شبکه راه‌های خروجی شناسایی و رفع گردید. نتایج نشان داد که دقت کلی طبقه‌بندی برای ساختارهای خطی ۸۸٪ و برای ساختارهای سطحی-خطی ۹۳٪ است. همچنین، براساس نتایج ارزیابی تغییرات عمده نسبت به شبکه اولیه تنها در حدود ۸ درصد از طول و تراکم شبکه است.

واژگان کلیدی: تعمیم و ساده‌سازی، شبکه راه‌ها، پایگاه داده توپوگرافی، یادگیری عمیق مبتنی بر گراف، عملگر حذف-انتخاب

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، تولید و به‌روزرسانی نقشه‌ها در مقیاس‌های مختلف به یکی از وظایف اساسی سازمان‌های ملی نقشه‌برداری تبدیل شده است. با توجه به اینکه تولید نقشه‌ها در مقیاس‌های مختلف فرآیندی ضروری اما زمان‌بر و پرهزینه است، رویکرد پیشنهادی، ساخت نقشه‌های کوچک‌مقیاس با استفاده از نقشه‌های بزرگ‌مقیاس از طریق فرآیند تعمیم و ساده‌سازی می‌باشد [۱].

به طور کلی، تعمیم و ساده‌سازی به فرآیند تولید نقشه‌هایی با مقیاس کوچک‌تر از نقشه‌های بزرگ‌مقیاس اشاره دارد، که هدف آن ساده‌سازی و کاهش جزئیات برای تطابق با سطح نمایش جدید است [۲]. این فرآیند بر پایه تجزیه و تحلیل دقیق و تصمیم‌گیری کارتوگراف شکل می‌گیرد. بنابراین، به دلیل تفاوت در تجربه و درک افراد، اجرای دستی این فرآیند ممکن است منجر به نتایجی متفاوت و ناسازگار شود [۲]. بر این اساس، طراحی روش‌های تعمیم و ساده‌سازی خودکار یا نیمه‌خودکار که وابستگی به مداخله انسانی و کارتوگراف را کاهش داده و در عین حال از اصول و دستورالعمل‌های کارتوگرافی تبعیت کند، از اهمیت بالایی برخوردار است.

تعمیم و ساده‌سازی عوارض خطی مانند شبکه راه‌ها یکی از چالش‌های مهم در حوزه کارتوگرافی است که هدف اصلی آن حذف اطلاعات زائد و حفظ ساختارهای کلیدی نقشه است. این کار باعث افزایش قابلیت خوانایی و درک بهتر عوارض خطی می‌شود [۳]. این فرآیند می‌تواند به صورت تکی یا گروهی (شبکه‌ای) انجام شود؛ لازم به ذکر است که تعمیم و ساده‌سازی گروهی به دلیل نیاز به در نظر گرفتن روابط پیچیده و الگوهای بین عناصر نقشه، چالش‌های بیشتری به همراه دارد [۴].

در اغلب مطالعات، فرآیند تعمیم و ساده‌سازی شبکه راه‌ها بر اساس یک چارچوب پنج‌مرحله‌ای انجام می‌شود که شامل ساختاربندی خطوط شبکه با روش‌های مبتنی بر سلسله‌مراتب یا بلوک‌های ساختمانی، تعیین اولویت یا طبقه‌بندی ساختارها بر اساس ویژگی‌های موضوعی، هندسی و توپولوژیکی و حذف انتخابی ساختارهای کم‌اهمیت، ساده‌سازی و اعمال تبدیلات هندسی روی عوارض ساختارهای باقی‌مانده، رفع تضادهای مکانی ناشی از تعمیم هندسی، و در نهایت ارزیابی نتایج برای اطمینان از حفظ دقت، انسجام و خوانایی شبکه راه‌ها است [۲, ۴-۱۰]. با توجه به اهمیت حفظ ساختار و روابط پیچیده شبکه راه‌ها در نقشه‌های چندمقیاسی، این تحقیق بر مدل‌سازی فرآیند تعمیم و ساده‌سازی شبکه راه‌ها متمرکز است تا با حفظ ویژگی‌های توپولوژیکی و هندسی، مراحل ساختاربندی، اعمال تبدیلات هندسی و رفع تضادهای مکانی بهبود یابند.

در ادبیات موجود در حوزه تعمیم و ساده سازی راه‌ها، دو رویکرد اصلی شامل روش‌های مبتنی بر ساختار سلسله مراتبی راه‌ها و روش مبتنی بر بلوک‌های ساختمانی برای کاهش بخش‌های غیرضروری شبکه راه مطرح شده است. بیشتر روش‌هایی که بر پایه سلسله‌مراتب شبکه راه‌ها کار می‌کنند، ساختار شبکه را با استفاده از تئوری گراف مدل‌سازی می‌کنند [۱۱-۱۵]، به طوری که توپولوژی مسیرها به‌صورت یال‌ها و گره‌ها در یک ساختار گرافی نمایش داده می‌شود. اما در کنار این روش‌ها، رویکردهای دیگری هم در این زمینه توسعه داده شده‌اند. یکی از این رویکردها، روش مبتنی بر Stroke است که با در نظر گرفتن تداوم بصری مسیرها، خطوط مرتبط را در قالب یک مسیر واحد تلفیق می‌کند [۴, ۹, ۱۶, ۱۷].

روش دیگر، استفاده از ساختار Mesh است که ساختاربندی شبکه را بر اساس سلول‌های مشبک انجام می‌دهد [۱۸, ۱۹]. همچنین برخی از تحقیقات اخیر تلاش کرده‌اند این دو رویکرد را با هم ترکیب کرده و از مزایای هر دو بهره‌مند شوند؛ یعنی ساختاری ترکیبی از Mesh و Stroke را برای بهبود ساختاربندی شبکه راه‌ها ارائه داده‌اند [۸, ۱۰, ۲۰]. در برخی پژوهش‌ها [۱۴, ۱۵] نیز به جای تحلیل بخش‌های منفرد راه، تمرکز بر خیابان‌های نام‌دار به عنوان واحدهای بزرگ‌تر در شبکه قرار گرفته و از مفاهیم مرکزیت در تئوری گراف برای شناسایی خیابان‌های کلیدی استفاده شده‌است.

در مطالعه شبکه‌های خطی مانند راه‌ها یا رودخانه‌ها، واحد تحلیلی stroke مطرح شده و در یک روش نوین تعمیم‌سازی شبکه راه‌ها [۴]، علاوه بر ویژگی‌های هندسی و توپولوژیکی، اطلاعات جریان ترافیک برای انتخاب بخش‌های مهم مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش، ابتدا strokeها با تکیه بر اصل «تداوم خوب» استخراج شده و سپس ارتباط عملکردی میان آن‌ها مدل‌سازی می‌شود تا بخش‌های مسیر پرکاربرد انتخاب شوند.

در راستای تعمیم خودکار شبکه‌های راه، استفاده از ساختار Mesh برای انتخاب و حذف ویژگی‌های شبکه مطرح شده است. Chen و همکاران [۱۹] مفهوم Mesh را به‌عنوان واحد تحلیل برای انتخاب بخش‌های شبکه بر اساس تراکم به‌کار برده‌اند. Li و Zhou [۲۰] رویکرد ترکیبی Stroke-Mesh ارائه داده‌اند که سلسله‌مراتب سطحی بر اساس چگالی Mesh و سلسله‌مراتب خطی بر اساس تداوم Stroke ساخته شده و ترکیب می‌شوند. همچنین Wu و همکاران [۲۱] محدودیت‌های روش سنتی Mesh را با توجه به ویژگی‌های ساختاری فضایی رفع کرده و فرآیند حذف Meshها را پیوسته و با حفظ ساختار فضایی انجام داده‌اند.

در روش مبتنی بر بلوک‌های ساختمانی، بلوک‌های مجاور بر اساس اندازه، مجاورت و ساختار فضایی ترکیب شده و بخش‌هایی از شبکه راه حذف می‌شوند، به طوری که اتصال شبکه حفظ شود [۲۲]. رویکرد جدیدی نیز با تعریف آستانه‌هایی برای تعیین راه‌های مهم و حداقل اندازه بلوک‌ها ارائه شده است [۷].

در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق در تعمیم شبکه‌های راه به طور چشمگیری افزایش یافته است. Zhou و Li [۲۳] از روش‌های نظارت‌شده برای حذف انتخابی در شبکه‌های راه استفاده کردند و دقت ۷۰ تا ۹۰ درصدی گزارش شد. Karsznia و همکاران [۲۴, ۲۵] با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین و افزودن ویژگی‌های زمینه‌ای، فرآیند انتخاب راه‌ها را خودکار کرده و دقت ۸۱ تا ۹۰ درصد را نشان دادند. همچنین، مقایسه سه مدل یادگیری عمیق مبتنی بر گراف شامل GCN، GraphSAGE و GAT نشان داد که GAT دقت بالاتری در انتخاب راه‌ها دارد [۲۶]. همچنین، در این زمینه روش جدیدی مبتنی بر واحد ساختار Mesh-Line (MLSU) نیز توسعه یافته است که ویژگی‌های خطوط و چندضلعی‌ها را در قالب شبکه‌های عصبی گرافی مدل‌سازی می‌کند و امکان حذف انتخابی و تعمیم خودکار شبکه راه را فراهم می‌سازد [۲۷].

با بررسی تحقیقات صورت گرفته مشخص گردید که رویکردهای مبتنی بر گراف اگرچه ساختار توپولوژیکی شبکه راه‌ها را حفظ می‌کنند، اما وابسته به آستانه‌های تجربی بوده و پیوستگی هندسی و بصری مسیرها را نادیده می‌گیرند. روش‌های مبتنی بر Stroke نیز با وجود تطابق با پیوستگی هندسی مسیرها، قادر به تحلیل توپولوژیکی و تراکم شبکه نیستند. علاوه بر این، روش‌های Mesh و ترکیبی Mesh–Stroke ضمن حفظ ویژگی‌های توپولوژیکی و بصری، به داده‌ها و تنظیمات خاص وابسته بوده و از تعمیم‌پذیری محدودی برخوردارند. همچنین با وجود آن که در سال‌های اخیر رویکردهای یادگیری ماشین و یادگیری عمیق برای تعمیم و ساده‌سازی شبکه راه‌ها به‌کار گرفته شده‌اند، این روش‌ها به دلیل تکیه بر الگوریتم‌های متداول، نتوانسته‌اند ویژگی‌های توپولوژیکی و هندسی شبکه راه‌ها را به‌صورت همزمان در نظر گیرند.

در راستای حل مشکلات یاد شده، هدف این پژوهش مدل‌سازی فرآیند تعمیم و ساده‌سازی شبکه راه‌ها در نقشه‌های پوششی کشور می‌باشد. بدین منظور، ابتدا با یکپارچه‌سازی شبکه راه‌ها و ایجاد ساختارهای سطحی محصور بین خطوط شبکه، ساختارهای سطحی-خطی و خطی تولید شدند. سپس با استفاده از گراف دوگان و روابط میان راه‌های تشکیل‌دهنده این ساختارها، گراف توپولوژی شبکه استخراج و ویژگی‌های موضوعی، هندسی و توپولوژیکی آن‌ها محاسبه و استانداردسازی گردید. به‌منظور طبقه‌بندی، از الگوریتم Random Forest برای ساختارهای خطی و از الگوریتم TAGCN برای ساختارهای سطحی-خطی استفاده شد. با توجه به مشارکت راه‌ها در یک یا دو ساختار سطحی-خطی، شرایط تصمیم‌گیری برای حذف یا نگهداری آن‌ها در مقیاس هدف تعریف گردید. در ادامه، شبکه راه‌ها یکپارچه شده و راه‌های قابل حذف و ایزوله کنار گذاشته شدند. در نهایت، خطوط باقی‌مانده و بلوک‌های ساختمانی متناسب با مقیاس هدف ساده‌سازی و نرم‌سازی شده و تضادهای مکانی میان آن‌ها اصلاح گردید.

با توجه به مطالب مطرح‌شده، نوآوری پژوهش حاضر ارائه یک چارچوب ترکیبی برای تعمیم و ساده‌سازی شبکه راه‌ها است که با ترکیب مفاهیم Mesh، Stroke و بلوک‌های ساختمانی، امکان مدل‌سازی هم‌زمان ساختارهای خطی و سطحی-خطی شبکه را فراهم می‌کند. در این چارچوب، ساختارهای سطحی–خطی مبتنی بر گراف دوگان تعریف شده و فرآیند حذف–انتخاب راه‌ها با استفاده از یک مدل یادگیری ترکیبی شامل Random Forest برای ساختارهای خطی و شبکه یادگیری عمیق مبتنی بر گراف TAGCN برای ساختارهای سطحی–خطی انجام می‌گیرد. این رویکرد با یادگیری خودکار قواعد تصمیم‌گیری، وابستگی به تنظیمات دستی را کاهش داده و ضمن حفظ پیوستگی

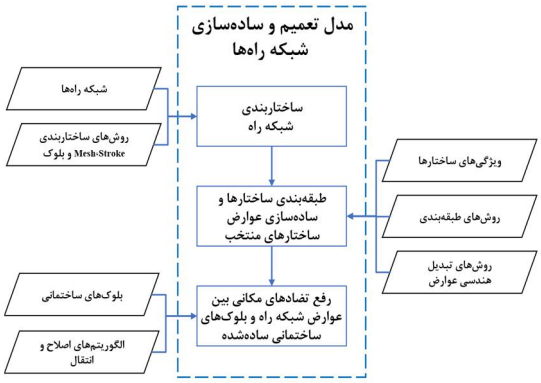
هندسی و روابط توپولوژیکی شبکه، امکان تعمیم منسجم‌تری را نسبت به روش‌های متداول فراهم می‌سازد.

در ادامه، در بخش دوم ضمن بیان مواد و روش تحقیق، مدل پیشنهادی این تحقیق ارائه گردیده است و نتایج حاصل از اجرای مدل پیشنهادی در یک منطقه مطالعه موردی در بخش سوم مقاله مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. در نهایت در بخش چهارم نتیجه‌گیری و پیشنهاد کارهای آینده ارائه می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق فرآیند تعمیم و ساده‌سازی شبکه راه‌ها مطابق با فلوچارت ارائه شده در شکل (۱) مدلسازی شده است. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، نشان داده شده است، این فرآیند شامل سه گام اصلی است. در گام نخست، ساختاربندی شبکه راه‌ها با در نظر گرفتن روابط هندسی و توپولوژیکی میان عوارض شبکه انجام می‌گیرد. این گام در چهار مرحله شامل پیش‌پردازش شبکه راه‌های ورودی و حذف خطاهای توپولوژیکی، غنی‌سازی هندسی و ایجاد شبکه یکپارچه، تولید ساختارهای سطحی شبکه و در نهایت ایجاد ساختارهای سطحی-خطی و گراف ارتباطات توپولوژیکی آن‌ها صورت می‌پذیرد. در گام دوم، فرآیند طبقه‌بندی ساختارها و اعمال تبدیلات هندسی بر عوارض منتخب اجرا می‌شود. این گام شامل محاسبه و استانداردسازی ویژگی‌های ساختارها، ایجاد برچسب‌های طبقه، طبقه‌بندی ساختارهای خطی و سطحی-خطی، تعیین وضعیت راه‌های تشکیل‌دهنده ساختارهای سطحی-خطی، ادغام نتایج و حذف عوارض قابل حذف، و در نهایت اعمال تبدیلات هندسی بر عوارض منتخب است. در گام سوم، حذف تضادهای مکانی ناشی از فرآیند تعمیم و ساده‌سازی در دو مرحله انجام می‌شود که شامل تعمیم و ساده‌سازی بلوک‌های ساختمانی متناسب با مقیاس هدف و سپس رفع تضادهای مکانی میان عوارض شبکه راه و بلوک‌های ساختمانی ساده‌شده در محدوده مورد مطالعه می‌باشد.

با توجه به ماهیت وابسته به مقیاس فرآیند تعمیم، در این مطالعه تمرکز بر تبدیل شبکه راه‌ها از مقیاس ۱:۲۵,۰۰۰ به ۱:۵۰,۰۰۰ بوده و کلیه مراحل ساختاربندی شبکه، استخراج ویژگی‌ها، آموزش مدل‌ها و ارزیابی نتایج بر اساس الزامات این مقیاس هدف انجام شده است.



شکل ۱- مراحل انجام تحقیق

۲-۱- مدل‌سازی فرآیند ساختاربندی شبکه راه‌ها

در این بخش فرآیند ساختاربندی شبکه راه‌ها مدل‌سازی شده است. دو رویکرد اصلی برای تشکیل ساختارهای پایه و کاهش بخش‌های شبکه راه در فرآیند تعمیم وجود دارد: رویکرد کاهش مبتنی بر سلسله‌مراتب و رویکرد کاهش مبتنی بر بلوک. در رویکرد مبتنی بر سلسله مراتب، شبکه راه به بخش‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شود تا بتوان اهمیت نسبی هر بخش را ارزیابی و سپس بر اساس ویژگی‌های مشخص، آن را انتخاب یا حذف کرد. با توجه به شیوه نمایش و سازمان‌دهی راه‌ها، روش‌های متنوعی برای ساختاربندی شبکه در این رویکرد وجود دارند. در مقابل، رویکرد کاهش مبتنی بر بلوک بر تحلیل بلوک‌های شهری یا بلوک‌های ساختمانی مجاور شبکه راه تمرکز دارد. در این روش، بلوک‌ها بر اساس اندازه یا سایر ویژگی‌ها، متناسب با مقیاس هدف ادغام شده و بخش‌های راه واقع بین بلوک‌های ادغام‌شده از شبکه حذف می‌شوند.

۲-۱-۱- پیش‌پردازش

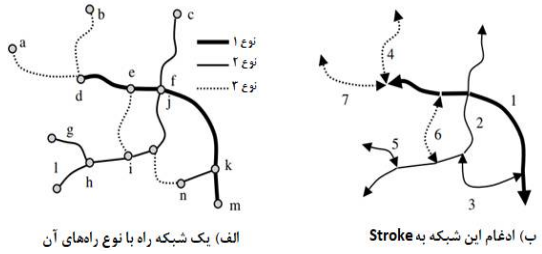
مرحله پیش‌پردازش داده‌ها در مدل پیشنهادی شامل اصلاح خطاهای توپولوژیکی و تضمین یکپارچگی شبکه راه‌ها است. در این مرحله، خطاهایی نظیر نرسیدگی یا ردشدگی خطوط، نقاط آویزان و همپوشانی نامناسب میان راه‌ها و سایر عوارض شناسایی شده و با تعریف مجموعه‌ای از قوانین توپولوژیکی اصلاح می‌شوند تا شبکه‌ای بدون نقص و منطبق

با شرایط واقعی ایجاد شود. با توجه به اولویت بالاتر عوارض راه نسبت به ساختمان‌ها و بلوک‌ها [۲۸]، در صورت همپوشانی جزئی، این خطاها با تغییرات جزئی در عوارض جانبی رفع می‌شوند.

ذکر این نکته قابل توجه است که صحت عملکرد مدل پیشنهادی تا حد زیادی به کیفیت توپولوژیکی داده‌های ورودی وابسته است و مرحله پیش‌پردازش نقش کلیدی در تضمین استاندارد بودن شبکه اولیه، اصلاح تقاطع‌های ناقص، گره‌های نامنظم و دسته‌بندی نادرست راه‌ها ایفا می‌کند. در صورت وجود خطاهای شدید و اصلاح‌نشده در داده‌های ورودی، دقت فرآیند ساخت ساختارهای سطحی–خطی و به‌تبع آن نتایج تعمیم تحت تأثیر قرار خواهد گرفت.

۲-۱-۲- غنی‌سازی هندسی

strokeها مسیرهایی با «تداوم خوب» هستند؛ به این معنی که در شبکه بدون تغییر ناگهانی جهت یا ویژگی در محل اتصالات حرکت می‌کنند. هر شبکه جغرافیایی می‌تواند به صورت کامل به مجموعه‌ای از strokeها ساختاربندی شود [۵، ۱۷]. در شکل (۲) نمونه‌ای ساختاربندی شبکه با انواع مختلف راه به strokeها را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمونه‌ای از تشکیل strokeها با در نظر گرفتن انواع راه [۵]

در روش‌های مبتنی بر Stroke، برای تشکیل مسیرهای پیوسته سه رویکرد اصلی وجود دارد: «تناسب خود»، «بهترین تناسب خود» و «هر بهترین تناسب». در روش «هر بهترین تناسب»، انتخاب بخش‌ها به نقطه شروع وابسته نیست و در هر گره اتصال، تمامی بخش‌های مرتبط با یکدیگر مقایسه می‌شوند و جفت‌بندی با کمترین زاویه انحراف انتخاب می‌شود. سپس این جفت‌ها برای تشکیل Strokeها به یکدیگر متصل می‌شوند، به‌طوری که با در نظر گرفتن کل ساختار شبکه، تداوم هندسی مسیر حفظ شده و نتایج پایدارتری نسبت به دو روش دیگر ارائه می‌شود [۵، ۲۹-۳۲].

مرحله غنی‌سازی هندسی داده‌ها شامل یکپارچه‌سازی خطوط منفصل شبکه راه و حفظ انسجام توپولوژیکی و ویژگی‌های توصیفی است. برای این منظور، خطوط با نوع راه ثابت با استفاده از روش «بهترین تناسب» Strokeها به یکدیگر متصل شدند و شبکه‌ای پیوسته شکل گرفت، در حالی که تغییر نوع راه موجب تقسیم مسیر به بخش‌های مجزا شد. تشکیل Strokeها بر اساس تحلیل زاویه بین یال‌های متصل و با در نظر گرفتن کل ساختار شبکه انجام می‌شود و حد آستانه زاویه‌ای ۶۰ درجه برای تعیین هم‌راستایی یال‌ها استفاده می‌شود، به‌طوری که یال‌های با زاویه کمتر از این حد در یک Stroke قرار گرفته و یال‌های با زاویه بیشتر در Strokeهای جداگانه حفظ می‌شوند.

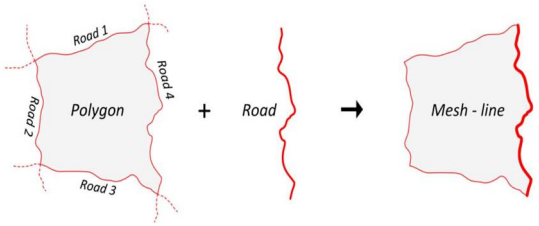
۲-۱-۳- ایجاد ساختارهای سطحی

در روش‌های مبتنی بر Mesh، Meshهای کوچک با تراکم بالاتر از یک مقدار آستانه به ترتیب حذف می‌شوند و در هر Mesh کوچک، کم‌اهمیت‌ترین بخش راه حذف می‌گردد. این رویکرد قادر است هم ویژگی‌های کلی شبکه و هم تغییرات تراکم محلی در مناطق مختلف را به‌طور مؤثر بازتاب دهد. روش سنتی مبتنی بر mesh که توسط Chen و همکاران ارائه شد، mesh را به‌عنوان یک منطقه بسته که توسط چندین بخش راه احاطه شده است تعریف می‌کند [۱۱، ۱۶، ۱۹، ۲۱].

یکی از مراحل کلیدی مدل پیشنهادی، تعریف ساختارهای سطحی است که در این تحقیق با ترکیب روش Mesh و بلوک‌های شهری انجام شده است. هر ساختار سطحی به‌صورت یک چندضلعی تعریف می‌شود که ممکن است شامل یک یا چند بلوک ساختمانی باشد و مرزهای آن با خطوط شبکه راه منطبق است. اولویت با راه‌هاست؛ هرجا که راه‌ها ساختار ایجاد کنند، حتی بدون بلوک، ساختار شکل می‌گیرد، و در مناطقی که راه‌ها امکان تشکیل ساختار ندارند، حتی با وجود بلوک، ساختار ایجاد نمی‌شود. در مناطقی که هر دو موجودند، از راه و بلوک‌ها برای تعریف ساختار استفاده می‌شود؛ بدین صورت که برای بلوک‌ها، ابتدا کوچک‌ترین چندضلعی محاطی تولید شده و سپس مرزها با شبکه راه تطبیق داده می‌شوند.

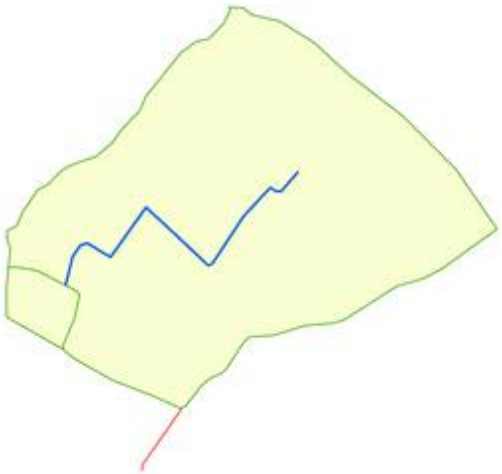
۲-۱-۴- ایجاد ساختارهای سطحی-خطی و گراف روابط آن‌ها

پس از تعریف ساختارهای سطحی، مرحله بعدی در مدل پیشنهادی، ایجاد ساختارهای سطحی-خطی با الهام از رویکرد Mesh-line Structure Unit (MLSU) است، به‌طوری که هر واحد آموزشی ترکیبی از یک چندضلعی ساختار سطحی و یک قطعه راه است تا هم بعد سطحی و هم بعد خطی شبکه حفظ شود [۲۷]. شکل (۳) نحوه ایجاد واحدهای آموزشی با استفاده از این رویکرد را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نحوه ایجاد MLSU [۲۷]

ساختارهای سطحی-خطی در تحقیق حاضر به دو دسته تقسیم می‌شوند: نوع نخست شامل راه‌هایی است که بخشی از مرز ساختار سطحی هستند (راه‌های مرزی) و ممکن است در یک یا دو ساختار سطحی-خطی مشارکت داشته باشند، و نوع دوم شامل راه‌هایی است که درون ساختار سطحی قرار دارند و مستقل از مرزها عمل می‌کنند (راه‌های درونی). علاوه بر این، بخش دیگری از راه‌ها در هیچ ساختار سطحی-خطی شرکت نمی‌کنند و به‌صورت ساختارهای خطی جداگانه در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۴- تفاوت ساختارهای سطحی-خطی نوع اول و دوم و ساختارهای خطی را نشان می‌دهد

شکل (۴) تفاوت انواع ساختارها را نشان می‌دهد. ساختارهای سطحی-خطی نوع اول (راه‌های مرزی) شامل خطوط سبز به همراه ساختارهای سطحی‌ای هستند که این خطوط در مرز آن‌ها قرار دارند. ساختارهای سطحی-خطی نوع دوم (راه‌های درونی) که با رنگ آبی نمایش داده شده‌اند، شامل خطوط آبی به همراه ساختار سطحی است که این خطوط درون آن محاط شده‌اند. علاوه بر این، ساختارهای خطی با رنگ قرمز نمایش داده شده‌اند که بخشی از شبکه هستند ولی به هیچ ساختار سطحی مرتبط نمی‌شوند.

با این روش کل شبکه به ساختارهای سطحی-خطی و ساختارهای خطی تقسیم می‌شود و این سازمان‌دهی امکان طراحی یک مدل ترکیبی تعمیم و ساده‌سازی شبکه را فراهم می‌کند، که در آن زیرمدل‌های مستقل برای هر نوع ساختار ایجاد شده و سپس نتایج ادغام می‌شوند تا هم ویژگی‌های خطی و هم سطحی شبکه حفظ شوند.

در گام بعدی، برای مدل‌سازی روابط توپولوژیکی میان واحدهای ساختاری شبکه راه، یک گراف دوگان ایجاد می‌شود که رئوس آن بخش‌های راه و یال‌ها تقاطع‌های میان این بخش‌ها را نمایش می‌دهند.

برای ساخت گراف دوگان شبکه راه‌ها، از یک رویکرد مبتنی بر توپولوژی اتصال استفاده شده است. در این رویکرد، ابتدا شبکه راه‌ها به مجموعه‌ای از بخش‌های خطی یکتاشده (یال‌ها) تقسیم می‌شود که تقاطع‌ها و نقاط اتصال به‌عنوان گره‌های اولیه شبکه در نظر گرفته می‌شوند. سپس، در گراف دوگان، هر بخش راه به‌عنوان یک رأس مدل‌سازی شده و در صورتی که دو بخش راه در شبکه اولیه دارای یک نقطه اتصال مشترک باشند، یک یال بین رئوس متناظر آن‌ها در گراف دوگان ایجاد می‌شود.

این فرآیند بر اساس استخراج ماتریس مجاورت از روابط اتصال شبکه انجام شده و منجر به تولید یک گراف بدون‌جهت می‌شود که ساختار توپولوژیکی اتصال راه‌ها را نمایش می‌دهد. روند کلی ایجاد گراف دوگان شبکه راه در قالب شبه‌کد زیر خلاصه شده است. در این الگوریتم، ابتدا شبکه راه به بخش‌های خطی یکتاشده با تقسیم در محل تقاطع‌ها و نقاط اتصال تجزیه می‌شود. هر بخش راه یک رأس در گراف دوگان را تشکیل می‌دهد. سپس، در صورتی که دو بخش راه در شبکه اولیه دارای اتصال توپولوژیکی

باشند، یک یال بدون‌جهت میان رئوس متناظر آن‌ها ایجاد می‌شود. در نهایت، با استخراج روابط همسایگی میان رئوس، ماتریس مجاورت گراف دوگان تولید می‌گردد که مبنای مدل‌سازی روابط ساختاری شبکه در مراحل بعدی پژوهش قرار می‌گیرد.

```
Algorithm DualGraphConstruction
Input: Road network R
Output: Dual graph G (V, E), adjacency matrix A
1 :Split R into atomic road segments at intersections
2 :Assign a unique ID to each road segment
3 :Create one vertex for each road segment
4 :for each pair of road segments do
5 :if the two segments are topologically connected then
6 :add an undirected edge between corresponding vertices
7 :end if
8 :end for
9: Construct adjacency matrix A from graph G
```

برای ساختارهای سطحی–خطی، علاوه بر روابط اتصال مستقیم، روابط مشارکت راه‌ها در ساختارهای سطحی نیز به‌عنوان یال‌های اضافی در گراف لحاظ شده‌اند که در نهایت یک گراف دولایه شامل روابط اتصال و روابط مشارکت ساختاری را تشکیل می‌دهد.

در مورد ساختارهای خطی، گراف دوگان امکان مدل‌سازی روابط اتصال و مجاورت توپولوژیکی میان بخش‌های راه را فراهم کرده و در فرآیند طبقه‌بندی این ساختارها استفاده می‌شود. سایر ویژگی‌های هندسی و زمینه‌ای از طریق بردار ویژگی‌ها در مدل لحاظ شده‌اند.

در مورد ساختارهای سطحی–خطی، هر راه بسته به نوع خود می‌تواند در یک یا دو ساختار سطحی–خطی مشارکت داشته باشد، بنابراین برای هر راه یک یا دو راس در نظر گرفته می‌شود. یال‌ها بر اساس دو نوع ارتباط تعریف می‌شوند: ۱) اشتراک راه میان ساختارها، و ۲) اتصال راه‌های تشکیل‌دهنده در گراف دوگان اولیه. این رویکرد منجر به ایجاد یک گراف دولایه می‌شود؛ لایه داخلی از ارتباطات اشتراک راه و لایه خارجی از ارتباطات اتصال راه‌ها تشکیل شده است. با استخراج زیربخش‌ها و ترکیب آن‌ها، ماتریس روابط کلی و گراف نهایی ساختارهای سطحی–خطی شبکه به دست می‌آید.

۲-۲- مدل‌سازی فرآیند طبقه‌بندی ساختارها و تبدیلات هندسی عوارض ساختارهای منتخب

در فرآیند تعمیم شبکه راه‌ها، بخش‌هایی از شبکه که اهمیت بیشتری دارند، در مقیاس‌های کوچک‌تر حفظ شده و بخش‌های کم‌اهمیت حذف می‌شوند. بنابراین، پیش از اجرای عملگر «حذف-انتخاب»، لازم است میزان اهمیت اجزای شبکه تعیین شود. پس از تعیین میزان اهمیت هر بخش از شبکه با استفاده از ویژگی‌های هندسی، توپولوژیکی و توصیفی، می‌توان با بهره‌گیری از روش‌های مختلف رتبه‌بندی، اولویت بخش‌ها را مشخص کرد. در این مرحله، بخش‌های کم‌اهمیت به‌ترتیب حذف شده و بخش‌های با اهمیت بیشتر برای نمایش در مقیاس کوچک‌تر حفظ می‌شوند تا ضمن کاهش جزئیات، ساختار اصلی و ارتباطات شبکه همچنان برقرار بماند [۹, ۱۲, ۲۳, ۳۳].

روش‌های تعیین بخش‌های قابل حذف در تعمیم شبکه‌های راه شامل دو دسته اصلی هستند. دسته اول، روش‌های قاعده‌مبنا مانند رویکردهای مبتنی بر Stroke، مبتنی بر Mesh و ترکیبی Mesh–Stroke، وظیفه شناسایی بخش‌های مهم و تعیین ترتیب حذف بخش‌های کم‌اهمیت را بر عهده دارند. دسته دوم، روش‌های داده‌مبنا مبتنی بر یادگیری ماشین و یادگیری عمیق هستند که با استخراج الگوهای نهفته در شبکه، بخش‌های راه را در طبقه‌های قابل حذف و قابل حفظ قرار می‌دهند و امکان تصمیم‌گیری خودکار و افزایش دقت و قابلیت تعمیم نتایج را فراهم می‌کنند.

۲-۲-۱- محاسبه ویژگی‌ها و استانداردسازی آن‌ها

ویژگی‌های ساختارهای شبکه از مهم‌ترین ورودی‌های مدل‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق هستند و با استفاده از آن‌ها و برچسب‌ها، مدل قادر به طبقه‌بندی بخش‌های مختلف شبکه و تصمیم‌گیری درباره حفظ یا حذف آن‌ها در فرآیند تعمیم و ساده‌سازی می‌شود.

در مدل پیشنهادی چهار گروه ویژگی تعریف شده‌اند: ویژگی‌های خطی که برای ساختارهای خطی و سطحی-

خطی محاسبه می‌شوند و خصوصیات بنیادی اجزای خطی شبکه را نشان می‌دهند؛ ویژگی‌های سطحی که شاخص‌های هندسی و ساختاری ساختارهای سطحی-خطی را توصیف می‌کنند؛ ویژگی‌های ترکیبی که مشخصات خطی و روابط فضایی و مشارکتی راه‌ها را در ساختارهای سطحی-خطی پوشش می‌دهند؛ و ویژگی‌های ساختمانی که خصوصیات ساختمان‌های درون ساختارهای سطحی را ارزیابی می‌کنند. در جدول (۱) ویژگی‌های مورد استفاده در طبقه‌بندی ساختارهای شبکه راه ارائه شده است. پس از استخراج این ویژگی‌ها، استانداردسازی انجام می‌شود: ویژگی‌های عددی و پیوسته با روش Z-Score مقیاس‌بندی شده و ویژگی‌های رده‌ای مانند نوع راه و نوع راه در ساختار سطحی-خطی با بردارسازی (embedding) به بردارهای عددی تبدیل می‌شوند تا در مدل یادگیری عمیق قابل استفاده باشند و مقایسه و وزن‌دهی ناعادلانه ویژگی‌ها جلوگیری شود.

جدول ۱- ویژگی‌های مورد استفاده در طبقه‌بندی ساختارهای شبکه راه

گروه ویژگی	نام ویژگی‌ها
خطی	نوع راه، سلسله‌مراتب شبکه راه، درجه راه، مساحت چندضلعی Voronoi پیرامون راه، طول راه، طول Stroke، زاویه جهت‌گیری کوچک‌ترین مستطیل محاطی (SBRO)، نسبت طول به عرض کوچک‌ترین مستطیل محاطی (SBR Ratio)، شاخص پیچ‌خوردگی مسیر، انحنا، شاخص توزیع عمودی (ODI)، بعد فرکتال، توصیف‌گرهای فوریه خطوط
سطحی	محیط ساختار سطحی، مساحت ساختار سطحی، جهت‌گیری کوچک‌ترین مستطیل محاطی نسبت به محور X، نسبت طول به عرض کوچک‌ترین مستطیل محاطی، تعداد راه‌های تشکیل‌دهنده مرز ساختار سطحی
ترکیبی	نوع راه در ساختار سطحی-خطی (مرز یا بخش داخلی)، نسبت طول راه در ساختار سطحی، نسبت تعداد راه‌ها در ساختار سطحی، زاویه بین کوچک‌ترین مستطیل محاطی ساختار سطحی-خطی و مستطیل‌های محاطی ساختارهای خطی
ساختمانی	مجموع مساحت ساختمان‌ها در ساختار سطحی-خطی، تراکم ساختمان‌ها (نسبت مساحت ساختمان‌ها به مساحت کل ساختار سطحی-خطی)

۲-۲-۲- ایجاد برچسب‌های ساختارها

پس از استخراج و استانداردسازی ویژگی‌ها، برای آموزش مدل‌های نظارت‌شده، برچسب‌های دودویی برای ساختارها ایجاد می‌شوند: مقدار ۱ برای ساختارهایی که باید حفظ شوند و مقدار ۰ برای ساختارهایی که قابل حذف هستند. این برچسب‌ها با مقایسه نقشه شبکه راه ورودی در مقیاس ۱:۲۵,۰۰۰ و نقشه تعمیم‌یافته در مقیاس ۱:۵۰,۰۰۰ توسط کارتوگراف تعیین شده و سپس به ساختارهای خطی و سطحی-خطی بر اساس راه‌های تشکیل‌دهنده آن‌ها منتقل می‌شوند. بدین ترتیب، مجموعه داده شامل ویژگی‌های استانداردشده و برچسب‌ها آماده آموزش مدل‌های نظارت‌شده می‌شود.

لازم به توضیح است که نقشه مرجع تعمیم‌یافته مورد استفاده برای ایجاد برچسب‌ها، توسط کارتوگراف سازمان نقشه‌برداری کشور و مطابق دستورالعمل‌ها و استانداردهای رسمی این سازمان در زمینه تعمیم و ساده‌سازی شبکه راه‌ها تهیه شده است. از این‌رو، برچسب‌های آموزشی بیانگر قواعد و رویه‌های مورد استفاده در تولید نقشه‌های رسمی کشور هستند. هدف مدل پیشنهادی، یادگیری و بازتولید این قواعد تصمیم‌گیری نهادی در قالب یک چارچوب داده‌محور می‌باشد.

۲-۲-۳- طبقه‌بندی ساختارهای خطی

پس از استخراج و استانداردسازی ویژگی‌ها و ایجاد برچسب‌های دودویی، ساختارهای خطی با هدف شناسایی و حذف راه‌های کم‌اهمیت طبقه‌بندی می‌شوند. برای این منظور، الگوریتم جنگل تصادفی به کار گرفته شد که قادر است الگوهای نهفته در ویژگی‌های هندسی، توپولوژیکی و موضوعی راه‌ها را یاد بگیرد.

لازم به ذکر است که در میان الگوریتم‌های یادگیری ماشین که در سال‌های اخیر برای تعمیم و ساده‌سازی شبکه‌های راه مورد استفاده قرار گرفته‌اند، روش‌های متنوعی همچون درخت تصمیم، ماشین بردار پشتیبان، شبکه‌های عصبی و سایر مدل‌های گروهی مطرح شده است.

در این تحقیق، الگوریتم جنگل تصادفی به‌کار گرفته شد. دلیل انتخاب این الگوریتم آن است که جنگل تصادفی ضمن برخورداری از دقت بالا و توانایی کار با داده‌های حجیم، در برابر مشکل بیش‌برازش مقاوم بوده و امکان ارزیابی اهمیت ویژگی‌ها را نیز فراهم می‌سازد [۲۵].

در این تحقیق، به منظور طبقه‌بندی ساختارهای خطی، الگوریتم جنگل تصادفی با ۵۰۰ درخت تصمیم مورد استفاده قرار گرفت. برای مقابله با عدم‌توازن کلاس‌ها، وزن‌دهی متوازن به کلاس‌ها اعمال شد و به‌منظور افزایش تنوع داده‌های آموزشی، از روش بازنمونه‌گیری ADASYN استفاده گردید.

داده‌های ورودی شامل ۲۲ ویژگی خطی استانداردشده هستند و ساختارهای خطی به صورت تصادفی به دو بخش آموزش و آزمون تقسیم می‌شوند. خروجی مدل شامل برچسب پیش‌بینی‌شده هر ساختار خطی است که در مراحل بعدی برای حذف انتخابی و اعمال تبدیلات هندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش امکان بهره‌گیری از تعداد زیادی ویژگی متنوع و شناسایی الگوهای پیچیده موجود در شبکه راه‌ها را فراهم می‌کند و شرایط لازم برای تصمیم‌گیری دقیق در فرآیند تعمیم را ایجاد می‌کند.

۲-۲-۴- طبقه‌بندی ساختارهای سطحی-خطی

با افزایش حجم و پیچیدگی داده‌های مکانی، روش‌های سنتی یادگیری ماشین برای تعمیم شبکه‌های راه محدودیت‌هایی به‌ویژه در شناسایی روابط توپولوژیکی میان بخش‌ها دارند. روش‌های یادگیری عمیق قادرند ویژگی‌های پیچیده و الگوهای نهفته در شبکه را به‌صورت خودکار استخراج کرده و وابستگی به مهندسی ویژگی دستی را کاهش دهند. غالب روش‌های یادگیری عمیق در تعمیم و ساده‌سازی شبکه راه‌ها، با توجه به ماهیت شبکه‌ای آن‌ها؛ شبکه‌های عصبی کانولوشنی گراف[۱] (GCN) هستند؛ در این رویکردها ماتریس مجاورت گره‌ها به‌عنوان مبنای اصلی پردازش استفاده می‌شود تا اطلاعات بین گره‌ها بر اساس ارتباطات توپولوژیکی منتقل شود و تصمیم‌گیری دقیق درباره حفظ یا حذف هر بخش ممکن شود. الگوریتم‌هایی مانند GCN و شبکه‌های گراف کانولوشنی تطبیقی[۲] (TAGCN) در مسائل طبقه‌بندی گره‌ها و تعیین اولویت بخش‌ها عملکردی برتر از روش‌های سنتی ارائه می‌دهند [۲۷, ۳۴].

با توجه به محدودیت‌های GCN در استخراج اطلاعات از همسایگان با فاصله بیشتر و نیاز به تقریب، شبکه کانولوشنی گراف تطبیقی توپولوژی (TAGCN) معرفی شد تا بتواند ویژگی‌های محلی و اطلاعات ساختاری گراف را دقیق‌تر استخراج کند. این مدل بر پایه اصول پردازش سیگنال روی گراف طراحی شده و عملیات کانولوشن را با استفاده از چندجمله‌ای‌های ماتریس مجاورت گراف انجام می‌دهد، بدون اینکه نیاز به تقریب طیفی باشد [۳۴]. در TAGCN، برای هر گره i و فیلتر f خروجی به صورت مجموع وزن‌دار ویژگی‌های گره‌های همسایه تا K -پایه (فاصله K) رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$y_f^{(l)}(i) = \sum_{k=1}^{K_l} \sum_{c=1}^{C_l} \sum_{j \in path_k(i)} g_{c,f,k}^{(l)}\, \omega(p_{i,j}^k) x_c^{(l)}(j) + b_f^l \qquad (۱)$$

که در آن K اندازه فیلتر (تعداد گره‌های همسایه مورد توجه) است، $g_{c,f,k}^{(l)}$ ضرایب چندجمله‌ای برای فیلتر f و ویژگی c، $path_k(i)$ مجموعه گره‌هایی که در فاصله k از گره i قرار دارند و b_f^l بایاس آموزش‌پذیر است [۲۷, ۳۴].

از آنجا که بخش عمده‌ای از شبکه راه به صورت ساختارهای سطحی-خطی سازمان‌یافته است، مرحله‌ی طبقه‌بندی این ساختارها به‌عنوان مهم‌ترین گام مدل مطرح می‌شود. در این مرحله از الگوریتم یادگیری عمیق مبتنی بر گراف TAGCN برای تشخیص ساختارهای اصلی و فرعی و اجرای دقیق‌تر فرآیند حذف-انتخاب استفاده شد. برای این منظور، گرافی بدون جهت شامل گره‌های متناظر با ساختارهای سطحی-خطی و یال‌های نشان‌دهنده‌ی ارتباط بین آن‌ها ایجاد گردید و بر اساس آن، ماتریس‌های مجاورت و درجه استخراج شدند. داده‌های ویژگی هر گره به همراه برچسب‌ها آماده و به مجموعه‌های آموزش و آزمون تقسیم شدند.

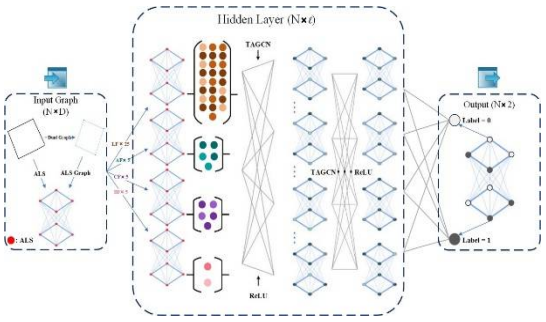
در این پژوهش، معماری شبکه شامل سه لایه متوالی TAGCNمی‌باشد. در دو لایه نخست، ویژگی‌های ورودی گره‌ها با استفاده از عملگر کانولوشن گرافی به فضای ویژگی پنهان نگاشت داده شده و پس از اعمال تابع فعال‌ساز ReLU و Dropout با نرخ ۰/۵ به کار گرفته شد. لایه سوم به‌عنوان لایه خروجی، نگاشت نهایی ویژگی‌ها به فضای برچسب‌ها را

۱ Graph Convolutional Networks

۲ Topology Adaptive Graph Convolutional Networks

انجام داده و خروجی آن مستقیماً وارد تابع هزینه می‌شود. بهینه‌سازی پارامترها با استفاده از الگوریتم AdamW انجام شد و تابع هزینه CrossEntropyLoss برای یادگیری برچسب‌های دودویی مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور کاهش اثر عدم‌تعادل کلاس‌ها، وزن کلاس‌ها متناسب با فراوانی نمونه‌ها تنظیم گردید. آموزش مدل تا همگرایی تابع هزینه و بدون نشانه‌های بیش‌برازش ادامه یافت.

در این فرایند، ورودی شبکه شامل بردار ویژگی‌های استانداردشده ساختارهای سطحی–خطی و ماتریس مجاورت گراف متناظر است و خروجی شبکه، برچسب دودویی مربوط به حفظ یا حذف هر ساختار می‌باشد. در ادامه، با استفاده از اعتبارسنجی متقابل پنج‌تایی بهترین مدل انتخاب و ذخیره شد و در مرحله‌ی نهایی، مدل آموزش‌دیده بر داده‌های آزمون اجرا گردید. نتایج شامل برچسب‌های پیش‌بینی‌شده و شاخص‌های ارزیابی نظیر دقت، بازیابی و F1-score محاسبه و تحلیل شدند. معماری کلی شبکه عصبی مورد استفاده در شکل (۵) ارائه شده است.



شکل ۵- معماری شبکه شامل سه لایه‌ی اصلی TAGCN

۲-۲-۵- طبقه‌بندی راه‌های تشکیل‌دهنده ساختارهای سطحی–خطی

در این مرحله، هدف انتقال برچسب‌های حاصل از طبقه‌بندی ساختارهای سطحی–خطی به راه‌های تشکیل‌دهنده آن‌ها است. هر ساختار سطحی–خطی تنها به یک راه وابسته است، اما هر راه می‌تواند بیش از یک ساختار ایجاد کند. فرآیند طبقه‌بندی راه‌ها بسته به نوع آن‌ها متفاوت است.

راه‌های مرزی که بخش عمده‌ای از شبکه را تشکیل می‌دهند، با استفاده از نتایج مدل یادگیری عمیق برچسب‌گذاری می‌شوند تا مشخص شود آیا باید با ساختارهای مجاور ادغام یا حذف شوند. برای جلوگیری از ادغام نادرست، عملگر AND به‌کار می‌رود تا تنها در صورتی ادغام انجام شود که هر دو ساختار مجاور موافق باشند. راه‌های درونی که بخشی از مرز ساختارها نیستند، تنها با یک ساختار متناظرند و برچسب آن‌ها مستقیماً معیار تصمیم‌گیری برای حفظ یا حذف در فرآیند تعمیم خواهد بود.

۲-۲-۶- ادغام عوارض ساختارهای خطی و ساختارهای سطحی–خطی و حذف عوارض طبقه قابل حذف

در مدل حاضر، راه‌ها در شبکه مورد مطالعه به سه گروه اصلی تقسیم می‌شوند: راه‌های مرزی ساختارهای سطحی–خطی که بخشی از مرز این ساختارها را تشکیل داده و معمولا در دو ساختار مشارکت دارند، راه‌های درونی ساختارهای سطحی–خطی که تنها با یک ساختار متناظر بوده و به صورت مستقل درون چندضلعی محاط می‌شوند، و راه‌های ساختارهای خطی که در هیچ ساختار سطحی–خطی مشارکت نداشته و به‌عنوان اجزای خطی شبکه در نظر گرفته می‌شوند. این سازمان‌دهی داده‌ها زمینه‌ساز توسعه یک مدل ترکیبی برای تعمیم و ساده‌سازی شبکه راه بوده است که در آن روش‌های طبقه‌بندی تعمیم برای ساختارهای سطحی–خطی و ساختارهای خطی در قالب دو زیرمدل مستقل طراحی و در نهایت خروجی آن‌ها ادغام می‌شود.

در این مرحله این دو گروه راه که تا این مرحله به‌صورت جداگانه مدیریت شده‌اند، ادغام می‌شوند تا مراحل بعدی برای ساده‌سازی شبکه انجام شود. همچنین راه‌هایی که برچسب حذف (صفر) دریافت کرده‌اند، از شبکه حذف می‌شوند. پس از حذف، یک بررسی نهایی روی اتصال شبکه انجام می‌شود؛ به این معنا که اگر راهی باقی مانده باشد اما هیچ اتصال فعالی با سایر راه‌ها نداشته باشد (ایزوله شده باشد)، آن راه نیز حذف خواهد شد.

۲-۲-۷- اعمال تبدیلات هندسی بر عوارض منتخب

فرآیند تعمیم و ساده‌سازی شبکه راه‌ها در این مدل شامل دو بخش است: در بخش تعمیم، راه‌های کم‌اهمیت حذف می‌شوند و در بخش ساده‌سازی، تبدیلات هندسی برای کاهش جزئیات و افزایش انسجام شبکه انجام می‌گیرد. عملگر حذف-انتخاب به‌عنوان یکی از کلیدی‌ترین مراحل، با حذف عناصر کم‌اهمیت و حفظ اجزای اصلی شبکه،

موجب کاهش پیچیدگی و بهبود خوانایی الگوی مکانی می‌شود. در این تحقیق تمرکز اصلی بر تعمیم شبکه بوده و ساده‌سازی با استفاده از روش‌های متداول انجام شده است. در مرحله ساده‌سازی، ابتدا خطوط با الگوریتم کاهش نقاط و آستانه ۲۵ متر ساده‌سازی شده تا نقاط غیرضروری حذف و شکل کلی حفظ شود، سپس برای روان‌سازی و کاهش شکستگی‌ها از الگوریتم PAEK با آستانه ۹۰ متر استفاده گردیده تا مسیرها منسجم‌تر و هموارتر شوند.

۳-۲- مدل‌سازی حذف تضادهای مکانی در فرآیند تعمیم و ساده‌سازی شبکه راه‌ها

در گام آخر فرآیند تعمیم و ساده‌سازی شبکه راه‌ها، حذف تضادهای مکانی ناشی از تعمیم هندسی بین خطوط باقی‌مانده و سایر عوارض نقشه انجام می‌شود. این مرحله بر اساس مدل پیشنهادی شامل دو بخش اصلی است: تعمیم و ساده‌سازی بلوک‌های ساختمانی و رفع تضادهای مکانی عوارض موجود در محدوده مورد مطالعه.

در بخش نخست، به‌منظور آماده‌سازی داده‌ها برای رفع تضادها، مرز بلوک‌های ساختمانی با روش‌های ساده هندسی تعدیل می‌شوند تا شکستگی‌ها و زوایای غیرضروری حذف گردد، عوارض با مساحت ناچیز که حاصل خطاهای رقومی هستند حذف و قطعات کوچک مجاور که در واقع بخشی از یک بلوک‌اند با هم ادغام می‌شوند. نتیجه این مرحله، لایه‌ای از بلوک‌های ساختمانی ساده‌شده است.

در بخش دوم، تضادهای مکانی میان شبکه راه‌ها و این بلوک‌ها برطرف می‌شود؛ بدین ترتیب که ابتدا نواحی دارای همپوشانی یا تقاطع بین راه‌ها و بلوک‌ها شناسایی شده و سپس با استفاده از ابزار Displacement هندسه بلوک‌ها به‌گونه‌ای جابه‌جا می‌شود که مسیر راه‌ها بدون تغییر باقی بماند و انطباق مکانی میان عوارض برقرار گردد.

۳- پیاده‌سازی

در این تحقیق، مجموعه‌ای با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ از پایگاه داده‌های توپوگرافی استان اصفهان به‌عنوان محدوده مطالعاتی در نظر گرفته شده است (شکل ۶). در این محدوده، گراف دوگان شبکه راه شامل ۲۵۹۰ راس و ۵۰۰۳ یال بوده است که مبنای استخراج ویژگی‌ها و مدل‌سازی روابط توپولوژیکی قرار گرفت. همچنین، پیاده‌سازی مدل پیشنهادی در محیط‌های نرم‌افزاری مختلف و متناسب با ماهیت داده‌ها و الگوریتم‌ها انجام شده است. پیش‌پردازش داده‌های مکانی، استخراج ویژگی‌ها، ساخت گراف‌ها و اعمال تبدیلات هندسی شبکه راه‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS Proانجام گرفت. مدل‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق با استفاده از زبان برنامه‌نویسی Python پیاده‌سازی شدند. الگوریتم Random Forest با بهره‌گیری از کتابخانه scikit-learn اجرا شد و پیاده‌سازی شبکه یادگیری عمیق مبتنی بر گراف TAGCN با استفاده از کتابخانه PyTorch انجام گرفت.

در ادامه، در بخش ۳-۱ نتایج مدل‌سازی فرآیند ساختاربندی شبکه راه‌ها ارائه می‌گردد. بخش ۳-۲ به نتایج مدل‌سازی فرآیند طبقه‌بندی ساختارها و تبدیلات هندسی عوارض منتخب اختصاص دارد. در ادامه، بخش ۳-۳ نتایج مربوط به حذف تضادهای مکانی در فرآیند تعمیم و ساده‌سازی شبکه راه‌ها را شامل می‌شود و در نهایت، ارزیابی کلی عملکرد مدل در بخش ۳-۴ ارائه شده است.

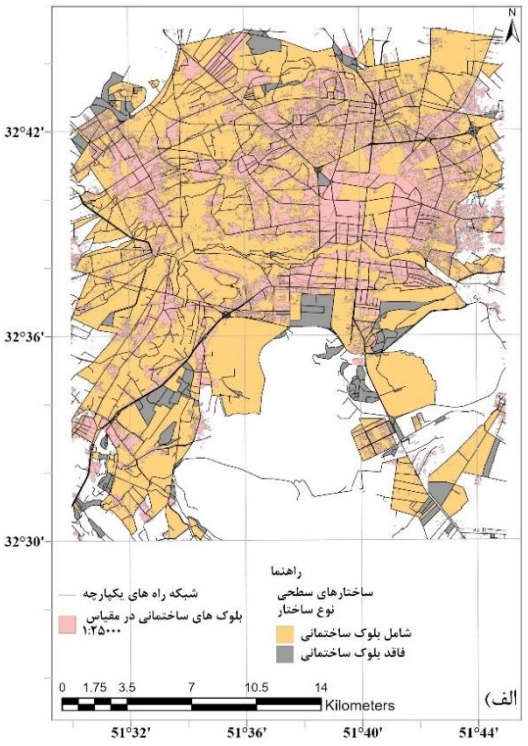
۳-۱- نتایج مدل‌سازی فرآیند ساختاربندی شبکه راه‌ها

در مرحله‌ی پیاده‌سازی مدل بر داده‌های محدوده‌ی مورد مطالعه، ابتدا پیش‌پردازش داده‌ها با هدف رفع خطاهای توپولوژیکی، اصلاح تقاطع‌های نادرست و حذف همپوشانی‌های ناخواسته انجام شد تا شبکه‌ی راه‌ها به صورت یکپارچه و بدون نقص برای مراحل بعدی آماده شود. سپس در مرحله‌ی غنی‌سازی هندسی، شبکه‌ی راه با تخصیص شناسه‌های یکتا و ادغام یال‌های متوالی بر اساس زاویه‌ی تغییر جهت کمتر از ۶۰ درجه و نوع راه، به ساختاری منسجم و پیوسته تبدیل گردید. نتیجه‌ی این فرآیند، کاهش ۲۹۴۰ عارضه‌ی اولیه به ۱۴۲۹ مسیر یکپارچه بود که تنوع انواع راه‌ها را نیز حفظ می‌کرد.

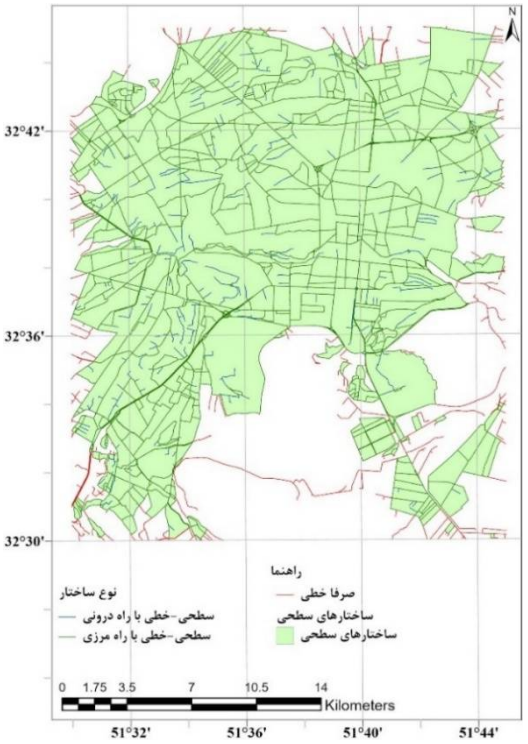
در ادامه، ساختارهای سطحی بر اساس موقعیت راه‌ها و بلوک‌های ساختمانی ایجاد شدند؛ به‌گونه‌ای که در مجموع ۶۶۱ ساختار سطحی استخراج گردید که ۲۵۹ مورد از آن‌ها بدون بلوک ساختمانی بودند (شکل ۶).

در گام بعد، ساختارهای سطحی-خطی با ترکیب بخش‌های سطحی و خطوط شبکه‌ی راه تولید شدند و برای بخش‌هایی از شبکه که فاقد ساختار سطحی بودند، ساختارهای خطی مستقل در نظر گرفته شد. در نهایت،

۳۹۶۰ ساختار سطحی-خطی (شامل ۳۷۲۲ ساختار نوع مرزی و ۲۳۸ ساختار نوع درونی) و ۲۸۷ ساختار خطی تولید گردید. شکل (۷) شبکه راه‌های محدوده مورد مطالعه به تفکیک انواع ساختارهایی که تشکیل می‌دهد.



شکل ۶- محدوده مطالعاتی تحقیق به همراه ساختارهای سطحی



شکل ۷- شبکه راه‌ها به تفکیک انواع ساختارها

همچنین، برای مدل‌سازی روابط توپولوژیکی میان راه‌ها و ساختارهای سطحی-خطی، گراف‌های دوگان ایجاد شدند؛ در گراف شبکه‌ی راه ۲۵۹۰ رأس و ۵۰۰۳ یال، و در گراف ساختارهای سطحی-خطی ۳۹۶۰ رأس و ۱۶۵۰۰ یال تعریف گردید. این گراف‌ها مبنای مدل‌سازی روابط میان اجزای شبکه و تحلیل‌های بعدی در فرآیند تعمیم و ساده‌سازی محسوب می‌شوند.

۳-۲- نتایج مدل‌سازی فرآیند طبقه‌بندی ساختارها و تبدیلات هندسی عوارض ساختارهای منتخب

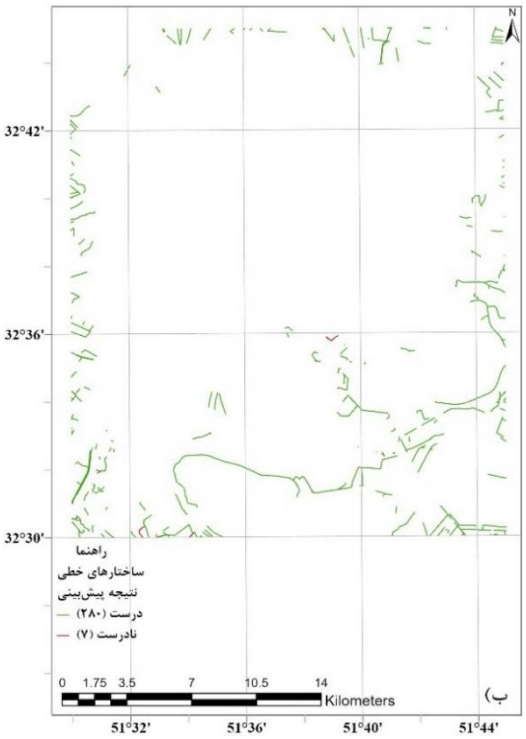
فرآیند مدل‌سازی در هفت مرحله اصلی انجام شد که ابتدا شامل محاسبه ویژگی‌های هندسی، توپولوژیکی و ساختمانی ساختارها و استانداردسازی آن‌ها بود تا مقیاس‌های مختلف ویژگی‌ها همسان شده و قابلیت استفاده در مدل‌های یادگیری عمیق فراهم گردد. برچسب‌های دودویی حفظ یا حذف ساختارها بر اساس تصمیمات کارتوگراف‌ها ایجاد شد و برای ساختارهای خطی و سطحی—خطی به کار گرفته شد، به طوری که برای ۲۸۷ ساختار خطی و ۳۹۶۰ ساختار سطحی—خطی مجموعه‌ای از ویژگی‌ها استخراج شد و پس از استانداردسازی آماده طبقه‌بندی شدند.

جدول ۲- معیارهای عملکرد مدل جنگل تصادفی برای ساختارهای خطی (آزمون)

کلاس	دقت	بازخوانی	F1-score	تعداد نمونه
۰	۰/۴۳	۰/۵۰	۰/۴۶	۶
۱	۰/۹۴	۰/۹۲	۰/۹۳	۵۲
دقت کلی			۰/۸۸	۵۸
میانگین	۰/۶۸	۰/۷۱	۰/۷۰	۵۸
میانگین وزن دار	۰/۸۹	۰/۸۸	۰/۸۸	۵۸

در مرحله طبقه‌بندی، برای ساختارهای خطی الگوریتم جنگل تصادفی به کار گرفته شد که پس از آموزش با بازنمونه‌گیری داده‌ها دقت کلی ۸۸٪ و زیان لگاریتمی ۰/۴ به دست آمد. نتایج نشان داد مدل توانست با دقت بالا ساختارهای حفظ‌شدنی را شناسایی کند و تنها تعداد کمی از راه‌های ضروری به اشتباه حذف شدند. در جدول (۲) معیارهای عملکرد مدل جنگل تصادفی برای ساختارهای

خطی (آزمون) ارائه شده است. همچنین شکل (۸) نتیجه طبقه‌بندی ساختارهای خطی را نشان می‌دهد.

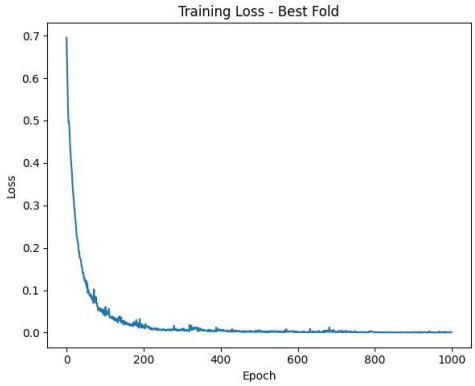


شکل ۸- نتیجه طبقه بندی ساختارهای خطی

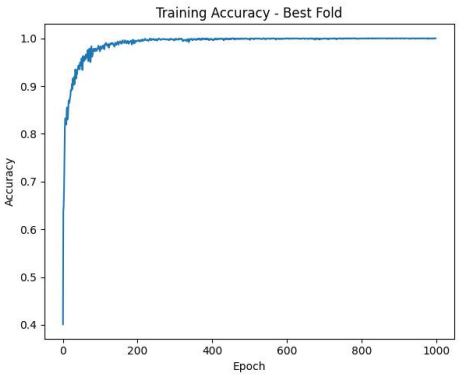
برای ساختارهای سطحی–خطی، الگوریتم TAGCN به کار گرفته شد که توانایی انتشار اطلاعات در همسایگی‌های مختلف گراف و ترکیب ویژگی‌های مختلف هر گره را داشت. دقت کلی مدل در آزمون ۹۳٪ بود و عملکرد بسیار خوبی در شناسایی ساختارهای حفظ‌شدنی نشان داد، هرچند کلاس ساختارهای قابل حذف به دلیل کمبود نمونه، دقت و بازخوانی پایین‌تری داشت. در شکل (۹) روند تغییرات تابع خطا و در شکل (۱۰) روند تغییرات دقت آموزش برای بهترین بخش قابل مشاهده است. همچنین در جدول (۳) معیارهای عملکرد مدل TAGCN برای ساختارهای سطحی-خطی (آزمون) ارائه شده است.

جدول ۳- معیارهای عملکرد مدل TAGCN برای ساختارهای سطحی-خطی (آزمون)

کلاس	دقت	بازخوانی	F1-score	تعداد نمونه
۰	۰/۵۲	۰/۳۲	۰/۴۰	۵۳
۱	۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۹۷	۷۴۰
دقت کلی			۰/۹۳	۷۹۳
میانگین	۰/۷۳	۰/۶۵	۰/۶۸	۷۹۳
میانگین وزن دار	۰/۹۲	۰/۹۳	۰/۹۳	۷۹۳



شکل ۹- روند تغییرات تابع خطا برای بهترین بخش

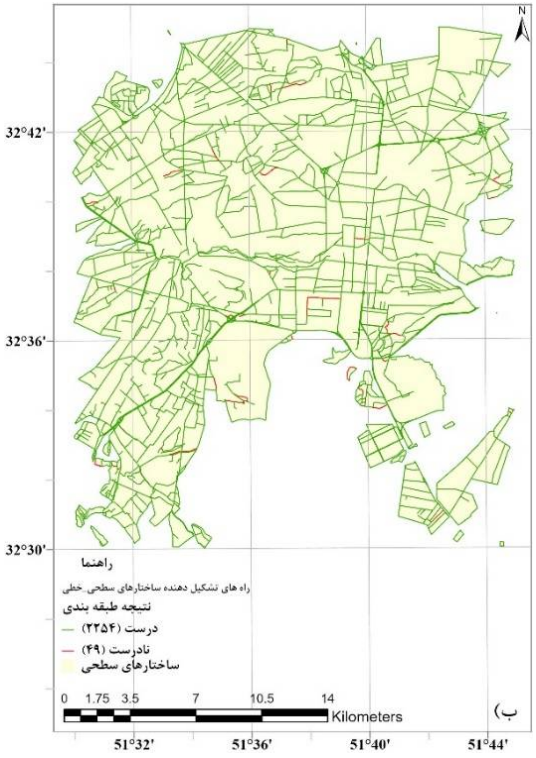


شکل ۱۰- روند تغییرات دقت آموزش برای بهترین بخش

در مرحله انتقال برچسب‌ها به راه‌های تشکیل‌دهنده ساختارهای سطحی–خطی، مدل توانست ۲۱۳۱ راه را به درستی به کلاس حفظ‌شدنی و تنها ۴۹ راه را به اشتباه طبقه‌بندی کند. سپس، راه‌های طبقه‌بندی شده از هر دو نوع ساختار در یک شبکه واحد ادغام شد و راه‌های قابل حذف حذف گردیدند، به‌طوری که تنها ۱۲ راه ایزوله باقی مانده که همه آن‌ها مطابق تصمیم کارتوگراف‌ها قابل حذف بودند، نشان‌دهنده حفظ اتصالات شبکه توسط مدل بود. در شکل (۱۱) نتیجه طبقه‌بندی راه‌های تشکیل‌دهنده ساختارهای سطحی-خطی قابل مشاهده است.

در نهایت، برای بهبود انسجام و وضوح بصری شبکه، خطوط شبکه تحت ساده‌سازی با آستانه ۲۵ متر و نرم‌سازی PAEK با آستانه ۹۰ متر قرار گرفتند تا نقاط جزئی و شکستگی‌ها کاهش یافته و مسیرهای اصلی حفظ شوند. مقایسه نقشه خروجی مدل پیشنهادی با نقشه تعمیم‌یافته دستی نشان داد که شبکه نهایی بسیار مشابه ساختار کلی نقشه تولید شده توسط کارتوگراف‌هاست و تنها تفاوت در جزئیات خرد است. این نتایج نشان می‌دهد که مدل

پیشنهادی قادر است فرآیند طبقه‌بندی و اعمال تبدیلات هندسی را به صورت دقیق و منسجم انجام دهد و نقشه‌ای ساده‌شده اما کاربردی تولید کند.



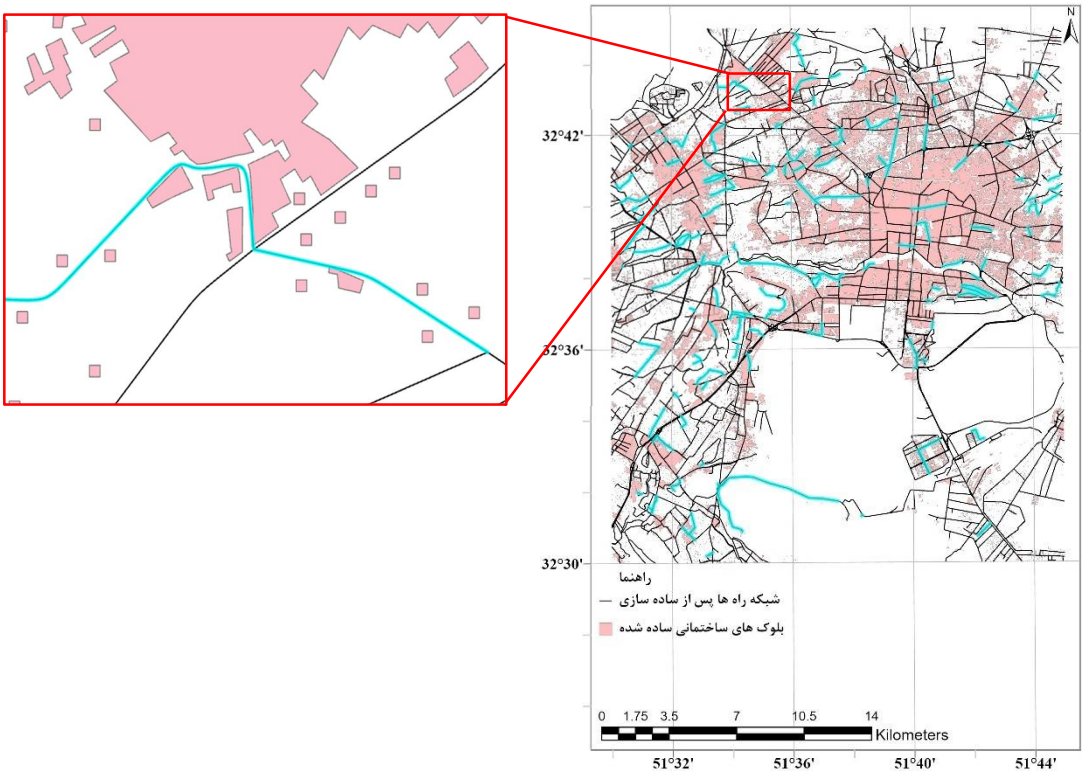
شکل ۱۱- نتیجه طبقه‌بندی راه‌های تشکیل‌دهنده ساختارهای سطحی-خطی

۳-۳- نتایج مدل‌سازی حذف تضادهای مکانی در فرآیند تعمیم و ساده‌سازی شبکه راه‌ها

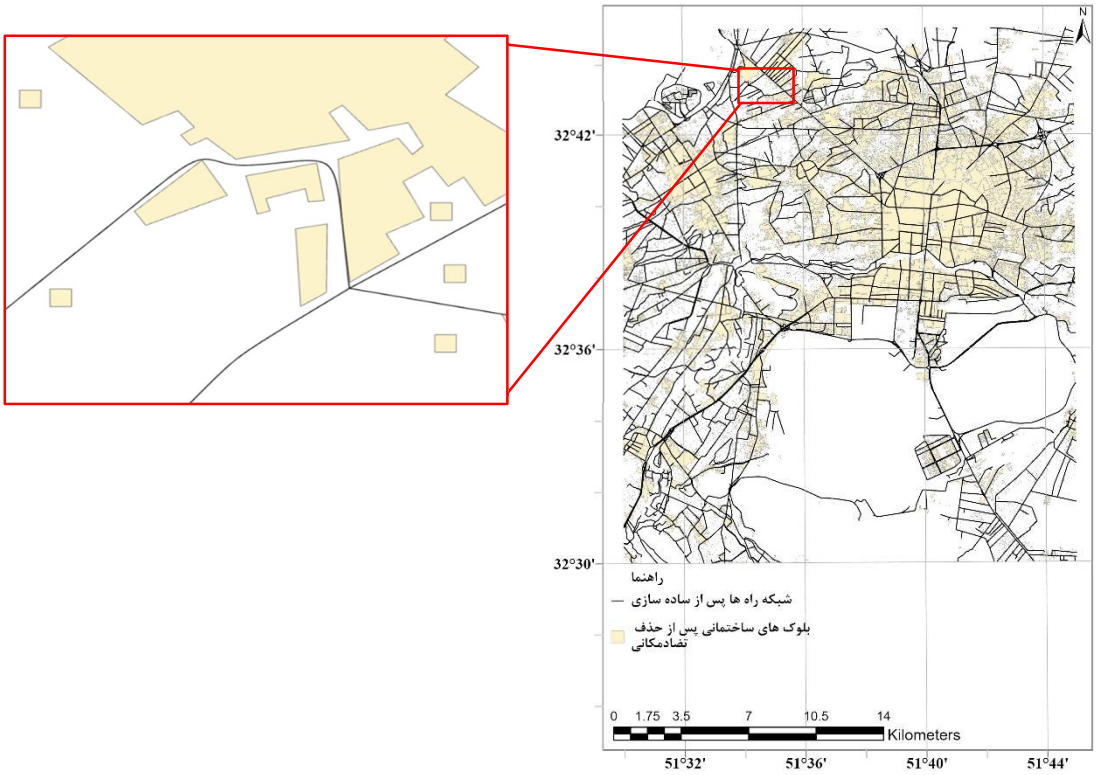
در گام آخر فرآیند تعمیم و ساده‌سازی شبکه راه‌ها مطابق مدل پیشنهادی، تضادهای مکانی ایجادشده بین خطوط راه و سایر عوارض نقشه شناسایی و رفع شدند. این مرحله شامل دو گام اصلی بود: ۱) ساده‌سازی بلوک‌های ساختمانی با حذف شکستگی‌ها، زوایای غیرضروری و قطعات کوچک، و ۲) رفع تضادهای مکانی بین راه‌ها و بلوک‌ها. در شکل (۱۳) نمونه‌ای از تضادهای مکانی ایجاد شده بر اثر تقاطع راه‌های خروجی فرآیند تعمیم و ساده‌سازی با بلوک‌های ساختمانی ساده شده قابل مشاهده است. همچنین در شکل (۱۳) نتیجه رفع تضادهای مکانی ارائه شده است.

۳-۴- ارزیابی کلی نتایج فرآیند تعمیم و ساده‌سازی شبکه راه‌ها مطابق مدل پیشنهادی

هدف ارزیابی در این پژوهش، سنجش توانایی مدل پیشنهادی در بازتولید تصمیم‌های تعمیم کارتوگرافیک در یک مقیاس هدف مشخص (۱:۵۰,۰۰۰) و بررسی میزان حفظ ویژگی‌های ساختاری شبکه راه‌ها بوده است.



شکل ۱۲- نمونه‌ای از تضادهای مکانی ایجاد شده بر اثر تقاطع راه‌های خروجی فرآیند تعمیم و ساده‌سازی با بلوک‌های ساختمانی ساده شده



شکل ۱۳- نتیجه رفع تضادهای مکانی نمونه

بر این اساس، چارچوب ارزیابی به‌صورت هدفمند در سه محور مکمل تعریف شد: ارزیابی کمی تغییرات شاخص‌های کلان شبکه راه‌ها پس از تعمیم و ساده‌سازی، مقایسه عملکرد مدل پیشنهادی با نتایج گزارش‌شده در مطالعات مشابه مبتنی بر یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، و مقایسه شباهت ساختاری شبکه خروجی مدل با شبکه تعمیم‌یافته مرجع تولیدشده توسط کارتوگراف که به ترتیب در بخش‌های ۳-۴-۱ الی ۳-۴-۳ ارائه شده‌اند.

از آنجا که محور سوم ارزیابی مبتنی بر مقایسه با خروجی مرجع است، تبیین ماهیت این داده‌ها برای تفسیر صحیح نتایج ضروری است. نقشه مرجع تعمیم‌یافته مورد استفاده در این تحقیق، محصول فرآیندهای استاندارد تولید نقشه در سازمان نقشه‌برداری کشور بوده و توسط کارشناسان این سازمان و با رعایت دقیق دستورالعمل‌ها و استانداردهای رسمی تهیه شده است. این ویژگی سبب می‌شود تا برچسب‌های آموزشی و الگوی مرجع ارزیابی، از ماهیت تصمیمات فردی فاصله گرفته و بازتاب‌دهنده قواعد و رویه‌های نهادی و الزام‌آور در تولید نقشه‌های رسمی کشور باشند. در نتیجه، هدف مدل پیشنهادی صرفاً تقلید از سبک شخصی یک کارتوگراف نیست، بلکه یادگیری و بازتولید اصول تعمیم‌یابی استاندارد در قالب یک چارچوب داده‌محور می‌باشد.

۳-۴-۱- ارزیابی کمی شاخص‌های کلان شبکه

در این بخش چهار شاخص کلیدی شامل طول کل عوارض، میانگین طول عوارض، تعداد عوارض و تراکم شبکه برای شبکه اولیه و شبکه تعمیم‌یافته محاسبه شد و میزان تغییرات آن‌ها به‌صورت درصدی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که شبکه تعمیم‌یافته توانسته است ساختار اصلی شبکه راه‌ها را تا حد زیادی حفظ کند. تغییرات مشاهده‌شده در شاخص‌های کلان شبکه محدود و کنترل‌شده بوده و عمدتاً ناشی از حذف مسیرهای کوتاه و کم‌اهمیت و اعمال ساده‌سازی هندسی بر خطوط باقی‌مانده است. به‌ویژه، تغییر در میانگین طول عوارض بسیار اندک و کمتر از ۱ درصد بوده که بیانگر حفظ انسجام کلی شبکه است. مقایسه کمی این شاخص‌ها برای شبکه قبل و بعد از تعمیم در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴- مقایسه پارامترهای شبکه راه‌ها قبل و بعد از تعمیم

پارامتر	شبکه اولیه	شبکه تعمیم‌یافته	اختلاف	درصد اختلاف
طول کل عوارض (متر)	۱/۴۸۹×۱۰^۶	۱/۳۶۸×۱۰^۶	۱/۲۰۷×۱۰^۵	۸/۱۱
میانگین طول عوارض (متر)	۵۷۴/۹۳	۵۷۱/۱۲	۳/۸۱	۰/۶۶
تعداد عوارض	۲۵۹۰	۲۳۹۶	۱۹۴	۷/۵۰
تراکم شبکه (متر بر متر مربع)	۲/۲۶۷×۱۰^-۳	۲/۰۸۴×۱۰^-۳	۱/۸۳۶×۱۰^-۴	۸/۱۰

۳-۴-۲- مقایسه عملکرد مدل پیشنهادی با مطالعات مشابه

با توجه به تفاوت داده‌های ورودی، مقیاس‌های هدف، معیارهای ارزیابی و تصمیم‌های کارتوگرافی در مطالعات تعمیم شبکه راه‌ها، مقایسه عددی مستقیم نتایج گزارش‌شده در مقالات مختلف لزوماً منجر به نتیجه‌ای منصفانه و معنادار نمی‌شود. با این حال، ارائه یک مقایسه مبتنی بر ادبیات موجود می‌تواند جایگاه عملکرد مدل پیشنهادی را در میان پژوهش‌های اخیر این حوزه روشن‌تر سازد.

در این راستا، دقت طبقه‌بندی ساختارهای خطی (۸۸٪) و ساختارهای سطحی–خطی (۹۳٪) به‌دست‌آمده در این پژوهش با نتایج گزارش‌شده در اغلب مطالعات اخیر مبتنی بر یادگیری ماشین و یادگیری عمیق در تعمیم شبکه راه‌ها هم‌خوانی دارد. این مقایسه نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی از منظر دقت طبقه‌بندی، عملکردی رقابت‌پذیر و هم‌سطح با محدوده دقت گزارش شده در روش‌های مطرح در ادبیات ارائه می‌دهد.

۳-۴-۳- مقایسه با تعمیم دستی کارتوگراف

به‌منظور انجام یک ارزیابی کمی دقیق و قابل اتکا، محدوده مطالعاتی با مساحت ۶۵۰/۰۲ کیلومتر مربع در استان اصفهان انتخاب گردید. در این پژوهش، داده‌های ورودی در مقیاس ۱:۲۵,۰۰۰ و داده مرجع در مقیاس هدف ۱:۵۰,۰۰۰ مورد استفاده قرار گرفتند. شبکه ورودی اولیه شامل ۲۵۹۰ عارضه راه بود که پس از اجرای مدل پیشنهادی، تعداد عوارض به ۲۳۹۶ مورد کاهش یافت (جدول ۴).

در این فرآیند، پس از ادغام خروجی زیرمدل‌ها و حذف عوارض قابل حذف، یک بررسی نهایی روی توپولوژی شبکه انجام شد که در نتیجه آن ۱۲ راه ایزوله شناسایی و حذف گردید. با توجه به اینکه تمامی این ۱۲ راه، مطابق ارزیابی کارشناسان، در تعمیم مرجع نیز حذف شده بودند، این نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل در حفظ ساختار اتصالات شبکه است.

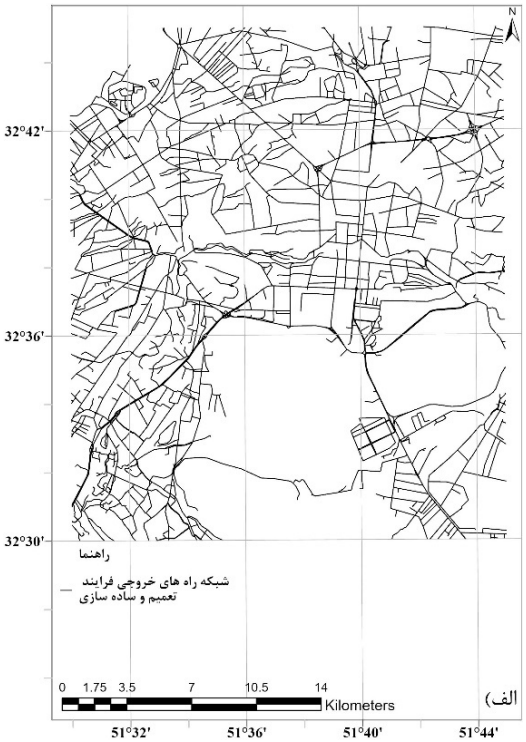
جهت سنجش میزان موفقیت مدل در بازتولید تصمیمات تعمیم، خروجی آن با شبکه تعمیم‌یافته مرجع (تولیدشده توسط کارتوگراف مطابق استانداردهای رسمی سازمان) در دقیقاً همان محدوده مکانی و مقیاس هدف، به‌صورت کمی مقایسه شد. این مقایسه بر مبنای شاخص‌های کلان شبکه شامل «طول کل عوارض» و «تراکم شبکه» انجام گرفت. بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول (۵)، اختلاف در طول کل عوارض برابر ۲۷۷ متر (معادل ۰.۰۲ درصد) و اختلاف در تراکم شبکه برابر ۳/۵۶×۱۰^-۶ (معادل ۰.۱۷ درصد) می‌باشد. این ارقام نشان‌دهنده آن است که در سطح شاخص‌های کلان، خروجی مدل از نظر میزان حفظ/حذف و کنترل تراکم، انطباق بالایی با شبکه مرجع دارد.

لازم به ذکر است که مقایسه عددی مستقیم با روش‌های کلاسیک یا تجاری (مانند Stroke یا Mesh) بدون دسترسی به تنظیمات دقیق پارامترها و آستانه‌ها، فاقد قابلیت بازتولید علمی است. از این‌رو، در این پژوهش، به جای روش‌های دارای پارامترهای نامشخص، شبکه تعمیم‌یافته توسط کارتوگراف که مبین قواعد کارتوگرافیک مصوب و استاندارد است، به‌عنوان مبنا انتخاب شده و میزان نزدیکی خروجی مدل به آن با شاخص‌های کمی مورد سنجش قرار گرفته است.

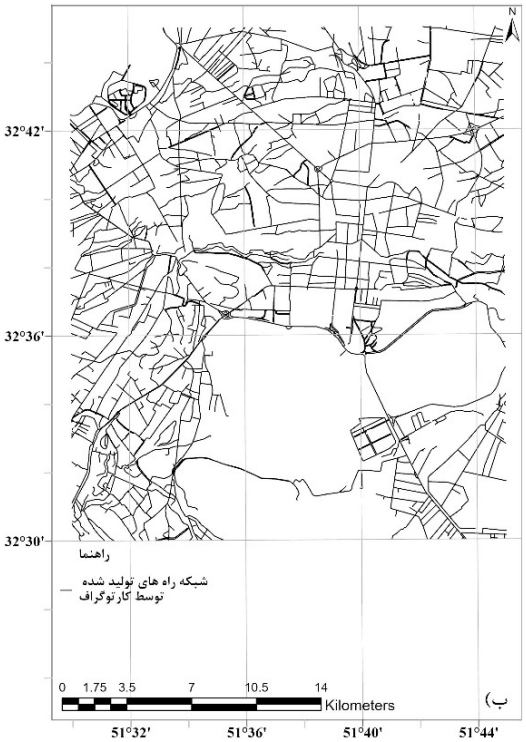
نتایج بصری فرآیند تعمیم و ساده‌سازی مطابق مدل پیشنهادی و تعمیم دستی کارتوگراف به‌ترتیب در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) ارائه شده‌اند.

جدول ۵- مقایسه پارامترهای شبکه راه‌های خروجی فرآیند تعمیم و ساده‌سازی پیشنهادی با شبکه راه‌های تولید شده توسط کارتوگراف در مقیاس هدف

پارامتر	شبکه تعمیم‌یافته مطابق مدل پیشنهادی	شبکه تعمیم‌یافته توسط کارتوگراف	اختلاف	درصد اختلاف
طول کل عوارض (متر)	۱/۳۶۸×۱۰^۶	۱/۳۶۹×۱۰^۶	۲۷۷	۰/۰۲
تراکم شبکه (متر بر متر مربع)	۲/۰۸۴×۱۰^-۳	۲/۰۸۰×۱۰^-۳	۳/۵۶×۱۰^-۶	۰/۱۷



شکل ۱۴- نتیجه فرآیند تعمیم و ساده‌سازی مدل ارائه شده



شکل ۱۵- نتیجه فرآیند تعمیم و ساده‌سازی توسط کارتوگراف

همچنین، به‌منظور درک دقیق‌تر رفتار مدل و شناسایی محدودیت‌های آن، خروجی‌های طبقه‌بندی و نتایج تعمیم به‌صورت کیفی مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل موارد خطا نشان داد که بخش عمده‌ای از اشتباهات مدل مربوط به راه‌های محلی کوتاه واقع در نواحی با تراکم بالای شبکه و یا در مجاورت بلوک‌های ساختمانی بزرگ است؛ در چنین شرایطی، تمایز بین راه‌های قابل حذف و قابل حفظ حتی در تعمیم دستی نیز با عدم قطعیت همراه است.

علاوه بر این، در برخی موارد، راه‌های مرزی که در دو ساختار سطحی–خطی مشارکت دارند، به دلیل تفاوت ویژگی‌های ساختارهای مجاور، به اشتباه در کلاس حذف یا حفظ قرار گرفته‌اند که این موضوع نشان‌دهنده حساسیت مدل به ناهمگنی ویژگی‌های ساختاری در مرز واحدهای فضایی است.

شایان ذکر است که مدل پیشنهادی با فرض برخورداری داده‌های ورودی از حداقل کیفیت توپولوژیکی طراحی و ارزیابی شده است. اگرچه مرحله پیش‌پردازش برای اصلاح خطاهای متداول پایگاه‌های داده مکانی در نظر گرفته شده است، اما در صورت وجود خطاهای ساختاری گسترده مانند تقاطع‌های ناقص گسترده، گره‌های نامنظم متعدد یا برچسب‌گذاری نادرست راه‌ها، عملکرد مدل می‌تواند با افت دقت مواجه شود.

لازم به تأکید است که در این پژوهش، ارزیابی مدل به یک مقیاس هدف و یک منطقه مطالعاتی محدود شده است. با توجه به ماهیت وابسته به مقیاس فرآیند تعمیم شبکه راه‌ها، تعمیم نتایج به سایر مقیاس‌ها یا الگوهای شهری مستلزم طراحی آزمایش‌های مستقل، بازتعریف ویژگی‌ها و دسترسی به داده مرجع متناظر می‌باشد. بنابراین مشروط بر آموزش مدل با داده مرجع متناظر، مدل پیشنهادی قابلیت به‌کارگیری در مناطق با ساختارهای متفاوت شبکه راه را دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر، ضرورت تولید نقشه‌ها در مقیاس‌های مختلف به‌عنوان یکی از الزامات اساسی در حوزه کارتوگرافی و سامانه‌های اطلاعات مکانی مطرح شده است. از آنجا که تهیه نقشه در مقیاس‌های گوناگون فرآیندی پرهزینه و زمان‌بر است، تعمیم و ساده‌سازی به‌عنوان رویکردی کارآمد برای تولید نقشه‌های کوچک‌مقیاس بر پایه داده‌های دقیق بزرگ‌مقیاس مورد توجه قرار گرفته است. هدف از این فرآیند، کاهش جزئیات نقشه در عین حفظ ساختارهای کلیدی و اطلاعات ضروری است تا نقشه‌ای ساده‌تر اما کاربردی‌تر تولید شود. با توجه به نقش محوری شبکه راه‌ها

در پایگاه‌های داده توپوگرافی و کاربردهای گسترده آن در تحلیل‌های مکانی، تمرکز این پژوهش بر مدل‌سازی فرآیند تعمیم و ساده‌سازی شبکه راه‌ها قرار گرفت.

مدل پیشنهادی این تحقیق شامل سه گام اصلی است: (۱) ساختاربندی شبکه راه‌ها با در نظر گرفتن روابط بین عوارض، (۲) طبقه‌بندی ساختارهای حاصل و اجرای تبدیلات هندسی بر ساختارهای منتخب، و (۳) رفع تضادهای مکانی میان عوارض ساده‌شده و بلوک‌های شهری. در گام نخست، با تلفیق روش‌های Mesh، Stroke و بلوک‌های ساختمانی، ساختارهای سطحی و سطحی–خطی استخراج و گراف دوگان روابط توپولوژیکی ایجاد شد. در گام دوم، ویژگی‌های هندسی، موضوعی و توپولوژیکی ساختارها استخراج و استانداردسازی شدند و فرآیند حذف–انتخاب با استفاده از الگوریتم Random Forest برای ساختارهای خطی و TAGCN برای ساختارهای سطحی–خطی انجام گرفت. نتایج نشان داد مدل با دقت بالا توانسته است مسیرهای اصلی شبکه را حفظ کرده و انسجام هندسی و توپولوژیکی شبکه را نگه دارد. در گام سوم نیز با بهره‌گیری از الگوریتم جابه‌جایی (Displacement)، تضادهای مکانی میان شبکه ساده‌شده و بلوک‌های شهری تا حد زیادی برطرف شد. در مجموع، مدل توانست فرآیند تعمیم و ساده‌سازی شبکه راه‌ها را به‌صورت منسجم مدل‌سازی کند و خروجی نهایی شباهت زیادی با نقشه‌های تولیدشده توسط کارتوگراف‌ها در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ داشت.

اگرچه ارزیابی مدل در این پژوهش به یک منطقه‌ی مطالعاتی محدود شده است، مدل پیشنهادی به‌گونه‌ای طراحی شده است که با بازتعریف ویژگی‌ها و بازآموزی مدل، قابلیت به‌کارگیری در سایر مناطق را دارد؛ با این حال، ارزیابی این قابلیت‌ها نیازمند داده مرجع متناظر بوده و اجرای مدل در چند منطقه با ویژگی‌های متفاوت شبکه راه، به‌عنوان یکی از مسیرهای مهم تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود.

همچنین، فرآیند تعمیم شبکه راه‌ها به‌شدت وابسته به مقیاس هدف است و تغییر مقیاس مستلزم بازتعریف قواعد تعمیم، ویژگی‌های ورودی و بازآموزی مدل می‌باشد. از این‌رو، ارزیابی مدل در مقیاس‌های کوچک‌تر مانند ۱:۱۰۰,۰۰۰ و ۱:۲۵۰,۰۰۰ در این پژوهش انجام نشده و به‌عنوان یک مسیر مستقل برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود.

مراجع

[۱] Stoter, J., Post, M. andVan Altena, V. *Fully automated generalization of a 1: 50k map from 1: 10k data.* Cartography and Geographic Information Science, 2014. **41**(1): p. 1-13.

[۲] Guo, X., Liu, J., Wu, F. and Qian, H. *A Method for Intelligent Road Network Selection Based on Graph Neural Network* .ISPRS International Journal of Geo-Information, 2023. **12**(8): p. 336.

[۳] Yan, X. and M. Yang, *A deep learning approach for polyline and building simplification based on graph autoencoder with flexible constraints.* Cartography and Geographic Information Science, 2023: p. 1-18.

[۴] Yu, W., Zhang, Y., Ai, T., Guan, Q., Chen, Z. and Li, H. *Road network generalization considering traffic flow patterns.* International Journal of Geographical Information Science, 2020. **34**(1): p. 119-149.

[۵] Li, Z., *Algorithmic foundation of multi-scale spatial representation.* 2006: CRC Press.

[۶] Regnauld, N. and R.B. McMaster, *A synoptic view of generalisation operators*, in *Generalisation of geographic information.* 2007, Elsevier. p. 37-66.

[۷] Gülgen, F., and Gökgöz, T. *A block-based selection method for road network generalization.* International Journal of Digital Earth, 2011. **4**(2): p. 133-153.

[۸] Benz, S.A. and Weibel, R., *Road network selection for medium scales using an extended stroke-mesh combination algorithm.* Cartography and Geographic Information Science, 2014. **4** :(۴)۱p. 323-339.

[۹] Han, Y., Wang, Z., Lu, X. and Hu, B. *Application of AHP to road selection.* ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020. **9**(2): p. 86.

[۱۰] Li, C., Wu, W., Wu, P., Yin, J. and Guo, P. *An elimination method for isolated meshes in a road network considering stroke edge feature* .Plos one, 2020. **15**(11): p. e0239828.

[۱۱] Mackaness, W.A. and Beard, K.M. *Use of graph theory to support map generalization.* Cartography and Geographic Information Systems, 1993. **20**(4): p. 210-221.

[۱۲] Richardson, D. and Thomson, R. *Integrating thematic ,geometric, and topological information in the generalization of road networks.* Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization, 1996. **33**(1): p. 75-83.

[۱۳] Morisset, B. and Ruas, A. *Simulation and agent modelling for road selection in generalisation*. in *Proceedings of the ICA 18th international cartographic conference*. 1997.

[۱۴] Jiang, B. and Claramunt, C. *A structural approach to the model generalization of an urban street network.* GeoInformatica, 2004. **8**: p. 157-1.۷۱

[۱۵] Jiang, B. and Harrie, L. *Selection of streets from a network using self-organizing maps.* Transactions in GIS, 2004. **8**(3): p. 335-350.

[۱۶] Thomson, R.C. and Richardson, D.E. *The 'good continuation'principle of perceptual organization applied to the generalization of road networks*. in *Proceedings of the ICA 19th International Cartographic Conference*. 1999. Ottawa, Canada.

[۱۷] Thomson, R.C. *The'stroke'concept in geographic network generalization and analysis*. in *Progress in Spatial Data Handling: 12th International Symposium on Spatial Data Handling*. 2006. Springer.

[۱۸] Hu, Y.G., Chen, J., Li, Z. and Zhao, R.L. *Selective omission of road features based on mesh density for digital map generalization.* Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2007. **36**(3): p. 351-357.

[۱۹] Chen ,J., Hu, Y., Li, Z., Zhao, R. and Meng, L. *Selective omission of road features based on mesh density for automatic map generalization.* International Journal of Geographical Information Science, 2009. **23**(8): p. 1013-1032.

[۲۰] Li, Z. and Zhou, Q., *Integration of linear and areal hierarchies for continuous multi-scale representation of road networks.* International Journal of Geographical Information Science, 2012. **26**(5): p. 855-880.

[۲۱] Wu, P., Yin, Y., Wu, C., Bai, X., Zhang, C. and Dai, Z. *An Automatic Generalization Method for a Dense Road Network Area Considering Spatial Structural Features as Constraints.* ISPRS International Journal of Geo-Information, 2022. **11**(12): p. 599.

[۲۲] Peng, W. and Muller, J.C. *A dynantic decision tree structure supporting urban road network automated generalization.* The Cartographic Journal, 1996 :(۱)۳۳ .p. 5-10.

[۲۳] Zhou, Q. and Li, Z. *A comparative study of various supervised learning approaches to selective omission in a road network.* The Cartographic Journal, 2017. **54**(3): p. 254-264.

[۲۴] Karsznia, I., K. Wereszczyńska, and Weibel, R. *Make it simple: effective road selection for small-scale map design using decision-tree-based models.* ISPRS International Journal of Geo-Information, 2022. **11**(8): p. 457.

[۲۵] Karsznia, I., Adolf, A., Leyk, S. and Weibel, R. *Using machine learning and data enrichment in the selection of roads for small-scale maps*. Cartography and Geographic Information Science, 2024. **51**(1): p. 60-78.

[۲۶] Zheng, J., Gao, Z., Ma, J., Shen, J. and Zhang, K. *Deep graph convolutional networks for accurate automatic road network selection.* ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021. **1** :(۱۱)۰ p. 768.

[۲۷] Xiao, T., Ai, T., Burghardt, D., Liu, P., Yang, M., Gao, A., Kong, B. and Yu, H. *A road generalization method using graph convolutional network based on mesh-line structure unit.* Geocarto International, 2024. **39**(1): p. 2413549.

[۲۸] PilehForousha, P. and Karimi, M. *"A local adaptive density based algorithm for clustering polygonal buildings in urban block polygons".* Geocarto International, 2020, 35(2). pp. 141-167.

[۲۹] Chaudhry, O. and Mackaness, W. *Rural and urban road network generalisation: Deriving 1: 250,000 from OS MasterMap.* 2006.

[۳۰] Jiang, B., S. Zhao, and Yin, J. *Self-organized natural roads for predicting traffic flow: a sensitivity study.* Journal of statistical mechanics: Theory and experiment, 2008. **2008** :(۰۷)p. P07008.

[۳۱] Tian, J., Xiong, F., Lei, Y. and Zhan, Y. *Revising self-best-fit strategy for stroke generating*. in *Advances in Spatial Data Handling and Analysis: Select Papers from the 16th IGU Spatial Data Handling Symposium*. 2015. Springer.

[۳۲] Liu, Y. and Li, W. *A new algorithms of stroke generation considering geometric and structural properties of road network.* ISPRS International Journal of Geo-Information, 2019. **8**(7): p. 304.

[۳۳] Xu, Z., Liu, C., Zhang, H., Huang, Z. and Li, Z. *Road selection based on evaluation of stroke network functionality.* Cehui Xuebao/Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012. **41**(5): p. 769-776.

[۳۴] Du, J., Zhang, S., Wu, G., Moura, J.M. and Kar, S. arXiv preprint arXiv:1710.10370, 2017.