

## تعیین مسیر بهینه حمل محموله‌های خطرناک با استفاده از ArcGIS (مطالعه

### موردی: مشهد)

شیدا روشنخواه، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد برنامه ریزی حمل و نقل، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

امیر رسولی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد برنامه ریزی حمل و نقل، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران

مرتضی اسد امرجی (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

محسن سرابی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد برنامه ریزی حمل و نقل، دانشگاه غیرانتفاعی شمال، مازندران، ایران

نوید امیرپاشایی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زنجان، زنجان، ایران

**E-mail: m\_asadamraji@sbu.ac.ir**

### چکیده

در یک شبکه حمل و نقل موجود، مسأله طراحی شبکه مواد خطرناک شامل انتخاب بخش‌هایی از معابر است که می‌تواند برای حمل مواد خطرناک به کار گرفته شوند، به نحوی که ریسک مربوط به آن کمینه باشد. از طرفی، متولیان امر حمل و نقل مواد خطرناک مایلند مسیرهایی را انتخاب کنند که کمترین هزینه حمل را متقبل گردند. بدین ترتیب مسأله مسیریابی حمل و نقل مواد خطرناک می‌تواند یک مسئله تصمیم در دو سطح باشد که طی آن شبکه‌ای به حمل مواد خطرناک اختصاص می‌یابد که دارای کمترین ریسک و در عین حال، کمترین هزینه حمل باشد. با در نظر گرفتن انواع محدودیت‌ها شامل خطرات ناشی از حوادث احتمالی، قابلیت امداد رسانی در صورت بروز حادثه، طول مسیر و زمان سفر مسیر در شبکه و پیشینه تصادفات می‌توان با حل یک مسئله بهینه‌سازی بر مبنای امتیازدهی به گمان‌های شبکه، مسیر بهینه مربوط به کالاهای خطرناک را در یک شبکه حمل و نقل شهری به دست آورد. در این مطالعه، معابر شهر مشهد مورد بررسی قرار گرفتند و مسیرهای بهینه حمل دو نوع مواد خطرناک شامل سوخت و اسید با توجه به شعاع تاثیر این مواد و منظور نمودن محدودیت‌های بیان شده با استفاده از مجموعه نرم‌افزار ArcGIS تعیین گشتند.

واژه‌های کلیدی: مواد خطرناک، مسیر بهینه، ریسک حمل، کوتاهترین مسیر، ArcGIS

## ۱. مقدمه

مراتب شهری، میزان تراکم جمعیت باربری زمین، تاریخچه تصادفات معابر، قابلیت امداد رسانی و غیره اشاره کرد. مسأله مسیریابی وسایل نقلیه حامل مواد خطرناک وابسته به ملاحظات ایمنی و اقتصادی است. از یک سو هزینه حمل باید در حالت کمینه باشد و از سوی دیگر لازم است با کمینه نمودن ریسک فرایند حمل و نقل مواد خطرناک، معیارهای ایمنی برآورد گردند. هدف این مطالعه تعیین بهترین مسیر امکان‌پذیر برای حمل و نقل محموله‌های خطرناک در شبکه معابر شهر مشهد است.

## ۲. مرور ادبیات

در سال ۲۰۱۵ انصاری و همکارانش با استفاده از تکنیک‌های مسیریابی GIS، مسیر حمل پسماندهای شهرداری تبریز را بهینه‌سازی نمودند. تابع هدف، کمینه‌سازی زمان و طول مسیر طی شده برای حمل پسماندها در میان تمامی مبادی و مقاصد تعریف شده است. در این مطالعه، با استفاده از افزونه الگوریتم دایکسترا در نرم‌افزار ArcGIS، مسیر نهایی تعیین شده که طول آن بیش از ۲۵ درصد کوتاهتر از مسیر مورد استفاده پی از بهینه‌سازی است.

در مطالعاتی که در آلبرتای کانادا توسط دلگیر صورت گرفته است، پارامترای زیر به عنوان پارامترهای موثر بر مسیریابی حمل کالای خطرناک در شبکه معابر شهری معرفی شده است:

محموله خطرناک به کالاهای در حال حملی گفته می‌شود که ممکن است با ایجاد خطر، سلامتی انسانها، حیوانات و محیط زیست را تهدید کنند. در بسیاری از موارد محل تولید و مصرف کالاها و مواد خطرناک در یک جا قرار ندارد، بنابراین نیاز به حمل و نقل این محموله‌ها در شبکه‌های معابر برون‌شهری و درون شهری وجود دارد. با توجه به آن که ایمنی حمل مواد خطرناک از اهمیت دوچندان برخوردار است، تعیین ضوابط برای حمل و نقل این کالاها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است چرا که روند حمل و نقل این مواد در داخل و خارج از شهرهای می‌تواند تهدیدی برای بروز حوادث ناگوار احتمالی باشد. با توجه به تراکم بسیار بالای جمعیت در شهرها، به نظر می‌رسد باید توجه ویژه‌ای به حمل و نقل این کالاها درون شهرها شود.

یکی از مهمترین مشکلات ناشی از تردد خودروهای حامل مواد خطرناک، ریسک بالقوه بروز سانحه و خطرآفرینی است. در واقع، در مسئله حمل مواد خطرناک، آنچه مهم است نوع بار و کالایی است که حمل می‌شود چرا که این محموله‌ها قابلیت ایجاد خطر زیادی دارند. برای بررسی مشکلات تردد خودروهای حامل مواد خطرناک باید عوامل موثر در ایجاد خطر و میزان آن در معابر شهری مورد بررسی قرار گیرد. از معیارهای موثر در میزان خطرپذیری شبکه معابر می‌توان به نوع معابر بر اساس سلسله

✓ مشخصات هندسی مسیر

✓ تداخلات ترافیکی

✓ محدودیت وزن و اندازه خودروهای حامل

✓ موقعیت‌های زیست‌محیطی حساس و مهم

✓ میزان کنترل دسترسی

✓ تعداد خطوط

✓ شرایط توپوگرافی

✓ میزان هزینه برای حمل‌کننده

✓ سازه‌های میانه و شانه مسیر

✓ میزان تراکم جمعیت

✓ موقعیت قرارگیری مراکز جمعیتی خاص مانند مدارس

✓ تاریخچه تصادفات

✓ نوع معبر

✓ دسترسی به مسیرهای گوناگون

✓ نوع و میزان مواد خطرناک

✓ فاصله پل و زیرگذرها

✓ ظرفیت امداد رسانی

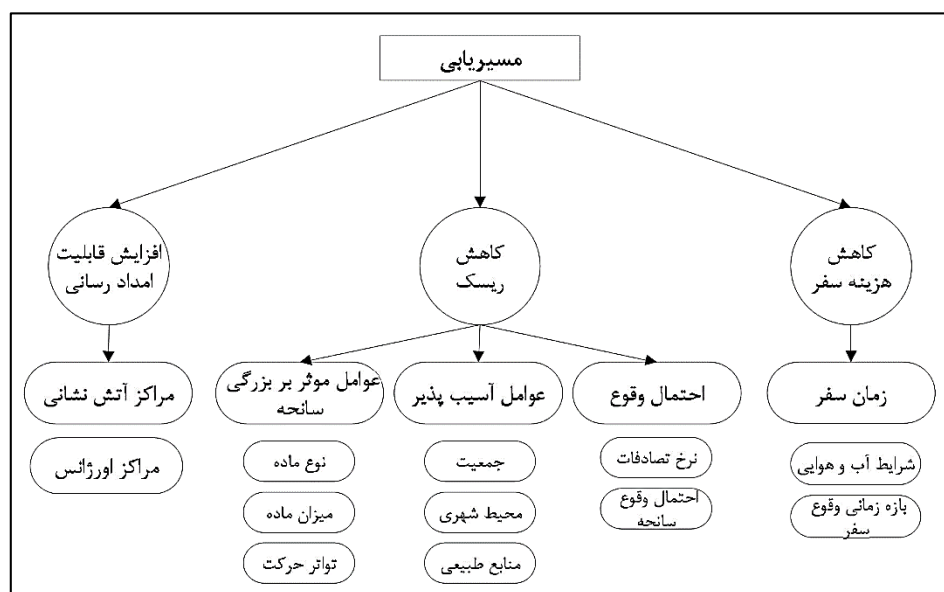
✓ فاصله تجهیزات امداد رسانی

## تعیین مسیر بهینه حمل محموله‌های خطرناک با استفاده از ArcGIS (مطالعه موردی: مشهد)

- ✓ تداوم مسیر
- ✓ شرایط آب و هوایی
- ✓ اثرات متقابل ناحیه‌ها و نوع و میزان ریسک هرکدام
- ✓ سیستم زهکشی مسیر
- اداره فدرال حمل و نقل ایالت متحده آمریکا (FHWA) در قوانین مربوط به حمل و نقل مواد خطرناک که آخرین بازنگری آن در سال ۲۰۱۸ انجام شده است، عوامل موثر بر انتخاب مسیر
- ✓ تراکم جمعیتی
- ✓ مسیره‌های جایگزین
- ✓ نوع راه
- ✓ ملاحظات اقتصادی
- ✓ نوع و مقدار مواد خطرناک
- ✓ قابلیت امداد رسانی
- ✓ تاخیر در حمل و نقل
- ✓ شرایط اقلیمی
- ✓ آسیب‌پذیری مراکز حساس
- ✓ پیشینه تصادفات
- ✓ شرایط توپوگرافی
- ✓ حجم ترافیک معابر
- ✓ تداوم مسیر

حامل مواد خطرناک د معابر شهر تهران» را به صورت نشان داده شده در شکل زیر معرفی کردند.

در سال ۱۳۹۱، دانشگاه فردوسی مشهد چهارچوب کلی مطالعات خود با عنوان «تدوین ضوابط و انجام مسیریابی تردد خودروهای



شکل ۱. ساختار کل مطالعات مسیریابی خودروهای حامل مواد خطرناک در تهران

مسئله کوتاهترین مسیر بین یک زوج مبدا مقصد مدل شد. تابع هدف این مدل تک‌جمله‌ایست است که کمینه نمودن ریسک جمعیتی حمل محمولات خطرناک است. برای محاسبه جمعیت آسیب پذیر از تابع خسارت فاصله استفاده شده است.

در سال ۲۰۱۷، کاروتوتو و همکارانش در مطالعه‌ای با عنوان «یافتن مسیر با خطر کمینه و برابر برای حمل محموله‌های خطرناک» مدلی جهت تعیین مسیره‌های حمل و نقل مواد خطرناک ارائه دادند دارای حداقل ریسک و توزیع مساوی ریسک در شبکه باشند. در این مطالعه، مسئله مسیریابی مواد خطرناک به صورت فصلنامه مهندسی ترافیک/ سال بیست و دوم/ شماره ۸۸ / تابستان ۱۴۰۱

### ۳. روش شناسی

فرآیند مسیریابی عبارتست از شناسایی و ارزیابی معیارهایی که باعث ارجحیت یک مسیر نسبت به مسیرهای دیگر شده و منجر به انتخاب مسیری می‌شود که در آن حمل مواد خطرناک کمترین خطر را متوجه افراد و تاسیسات شهری خواهد کرد.

این مطالعه به بررسی و مسیریابی کالاهای خطرناک در سطح کلان می‌پردازد، بدان معنا که این مسأله به شکل چند در چند حل شده و معابر را با توجه به پارامترهای مختلف از نظر میزان ریسک موجود طبقه‌بندی می‌کند. هدف از این مطالعه کمینه‌سازی ریسک عبور مواد خطرناک از مسیرهاست، به نحوی که مسیر انتخابی باید میزان ریسکی کمتر از تمامی مسیرهای جایگزین خود داشته باشد. علاوه بر آن، لام است از میان تمامی مسیرهایی که دارای ریسک کمینه هستند، مسیری انتخاب گردد که وسایل نقلیه بتوانند در کوتاهترین زمان ممکن از آن عبور نمایند. در ادامه معیارها و فرایندها مورد استفاده در مسیریابی حمل محموله‌های خطرناک در شبکه معابر شهر مشهد شرح داده شده است.

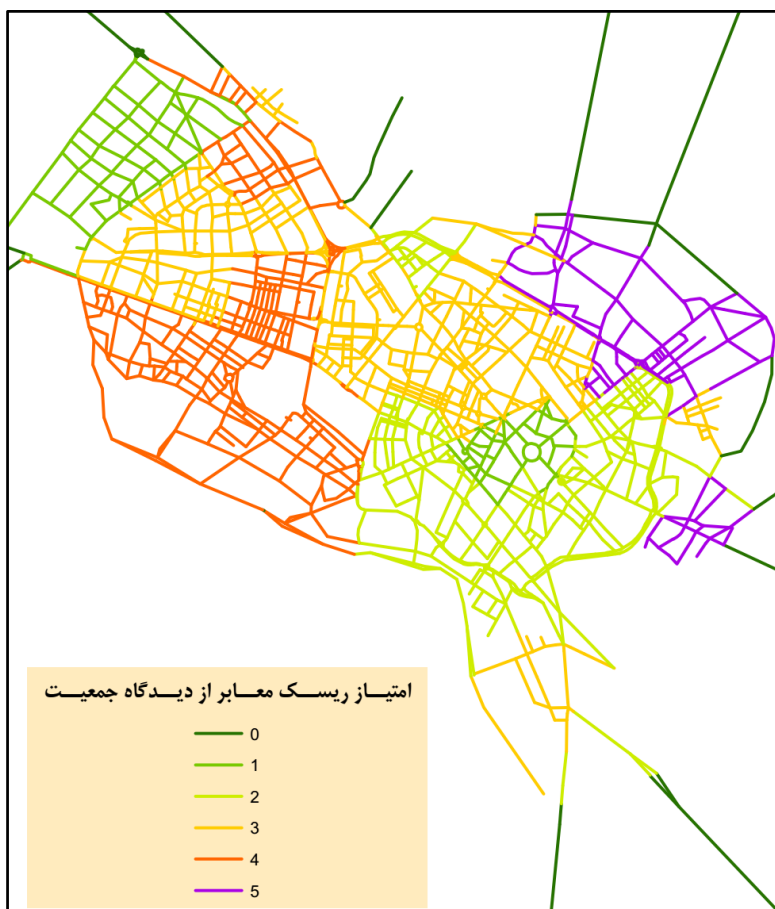
#### ۱-۳ جمعیت

برای در نظر گرفتن اثر جمعیت بر ریسک معابر، با توجه به اطلاعات موجود از جمعیت ساکن در نواحی شهرداری مربوط به شهر مشهد، شش بازه جمعیتی در نظر گرفته شد و به هر یک امتیازات صفر تا پنج اختصاص داده شد. امتیاز کمتر به معابر موجود در نواحی با جمعیت کمتر و امتیاز بیشتر به معابر موجود در نواحی با جمعیت بیشتر اختصاص داده شد. بدین ترتیب، ریسک حمل مواد خطرناک در معابر قرار گرفته در نواحی با جمعیت بیشتر، بالاتر خواهد بود. در شکل زیر امتیاز ریسک معابر تنها با توجه به جمعیت ساکن در نواحی نشان داده شده است.

در سال ۲۰۱۶ پنوار و همکارانش در مطالعه‌ای با عنوان «سیستم مدیریت حل و نقل مواد خطرناک بر پایه GIS» برای تعیین مسیر بهینه بین یک زوج مبدأ- مقصد از روش کوتاهترین مسیر به کمک نرم افزارهای GIS استفاده کردند. در این پژوهش مسیر با هزینه کمینه و مسیر با ریسک کمینه با هم مقایسه شده‌اند. معیار سنجش هزینه سفر، زمان سفر طی شده توسط وسیله نقلیه و معیار تعیین ریسک مسیر، جمعیتی است که در صورت بروز حادثه در معرض خطر قرار خواهند گرفت.

در سال ۲۰۱۶ کارا و همکارانش در مطالعه‌ای با عنوان «طراحی یک شبکه معابر برای حمل محموله‌های خطرناک»، مدلی برای طراحی شبکه راهی حمل و نقل مواد خطرناک ارائه دادند. این مطالعه هدف بخش دولتی را کمینه نمودن ریسک کل (با معیار جمعیت آسیب پذیر) و هدف بخش خصوصی را کمینه نمودن هزینه کل سفر (با معیار طول سفر) در نظر گرفته است و با استفاده از تقابل این دو هدف، یک مدل دو سطحی ارائه داده است. در این پژوهش شاخص هزینه سفر، طول مسیر و شاخص ریسک مسیر، جمعیتی است که در صورت بروز حادثه در معرض خطر قرار می‌گیرند. در مرحله اول حل مدل، بر اساس شاخص ریسک برخی از مسیرها برای عبور وسایل نقلیه حامل مواد خطرناک ممنوع می‌شود و شبکه مجاز برای تردد این وسایل نقلیه از میان کل شبکه معابر انتخاب می‌شود. در مرحله دوم، مسیری که کمترین هزینه را داشته باشد، از میان شبکه معابر مجاز انتخاب می‌شود.

در سال ۲۰۱۵، لی در مطالعات خود با عنوان «ارزیابی ریسک مسیر برای حمل محموله‌های خطرناک با استفاده از GIS» از اطلاعات مربوط به پیشینه تصادفات، اطلاعات شبکه معابر، اطلاعات باد، امکانات و تجهیزات مربوط به مواد خطرناک، ایستگاه‌های آتش‌نشانی، پایگاه‌های اورژانس، محل مدارس و اطلاعات جمعیت برای ارزیابی ریسک کمان‌های شبکه معابر برای حمل محموله‌های خطرناک استفاده کرد.



شکل ۲. امتیاز ریسک حمل مواد خطرناک در معابر از دیدگاه جمعیت ساکن در نواحی

### ۲-۳ شعاع تاثیر مواد خطرناک

در این مطالعه اندازه‌گیری ریسک معابر در جابجایی مواد خطرناک برای دو ماده اسید هیدروژن سولفید و مواد سوختی صورت گرفته است و ریسک معابر شهر مشهد برای این دو ماده به صورت مجزا اندازه‌گیری شده و مسیر بهینه ارائه گردیده است. شعاع تاثیر هر یک از این مواد با توجه به دفترچه راهنمای واکنش در شرایط اضطراری منتشر شده توسط وزارت حمل و نقل ایالات متحده آمریکا به ترتیب برابر با ۱۷۰۰ متر و ۱۱۰۰ متر

در نظر گرفته شده است. این بدین معناست که برای مثال معابر قرار گرفته در شعاع ۱۷۰۰ متری مراکز حساس، دارای ریسک از نظر حمل مواد اسیدی هستند.

### ۳-۳ مراکز حساس

مهم‌ترین عامل تاثیرگذار در ریسک حمل مواد خطرناک در معابر، فاصله کمان‌های معابر از مراکز حساس است. در این مرحله، موارد زیر به عنوان مراکز حساس شهر مشهد از نظر ریسک حمل مواد خطرناک در نظر گرفته شدند.

جدول ۱. مراکز حساس مورنظر در شهر مشهد

ردیف	عنوان	ردیف	عنوان	ردیف	عنوان
۱	حرم مطهر امام رضا (ع)	۹	پمپ‌های گاز	۱۷	پایانه‌های اتوبوس‌رانی درون‌شهری
۲	دانشگاه فردوسی مشهد	۱۰	بیمارستان‌ها	۱۸	پادگان ناهن‌الائمه
۳	دانشگاه آزاد اسلامی مشهد	۱۱	پایانه اتوبوس‌های بین شهری	۱۹	مرکز موج کوتاه و مرکز صدا و سیما

ردیف	عنوان	ردیف	عنوان	ردیف	عنوان
۴	دانشگاه علوم پزشکی مشهد	۱۲	مراکز، شرکت‌ها و ادارات دولتی	۲۰	ایستگاه‌های خطوط یک و دو قطار شهری مشهد
۵	مراکز تجاری برجسته مشهد	۱۳	شهرداری‌ها	۲۱	پارک نهالستان
۶	بازارهای مشهد	۱۴	فرودگاه	۲۲	پارک طرق
۷	بازارهای ارزاق	۱۵	ایستگاه راه‌آهن	۲۳	بوستان کوه سنگی مشهد
۸	پمپ‌های بنزین	۱۶	سینماها و تئاترها	۲۴	پارک ملت

برای در نظر گرفتن ریسک هریک از موارد بیان شده در بالا، ابتدا شعاع موردنظر در اطراف هریک از این مراکز مشخص گردید. کمان‌هایی که مرکز آنها در این ناحیه مشخص شده قرار گرفته‌اند، دارای ریسک حمل ماده مورد نظر هستند. برای مثال، برای مشخص نمودن معابری که دارای ریسک حمل مواد سوختی با توجه به موقعیت دانشگاه فردوسی هستند، محدوده‌ای به مرکزیت دانشگاه فردوسی و به شعاع ۱۱۰۰ متر روی شبکه معابر رسم می‌شود. کمان‌هایی که مرکز آنها درون این محدوده قرار می‌گیرند، یک امتیاز به عدد ریسک حمل مواد سوختی آنها اضافه می‌گردد. این امر در مورد یکایک مراکز حساس معرفی شده در بالا تکرار می‌گردد و در نهایت امتیاز ریسک تمامی معابر برای

حمل مواد سوختی محاسبه می‌گردد. لازم به ذکر است که کمان‌هایی که فاصله مرکز آن تا دو، سه یا چهار مرکز حساس کمتر از ۱۱۰۰ متر باشد، به ترتیب دو، سه یا چهار امتیاز به عدد ریسک آن اضافه می‌گردد چرا که در صورت بروز حادثه برای وسیله حامل سوخت در این معبر، چند مرکز تحت تاثیرات منفی این حادثه قرار می‌گیرند. در شکل زیر توضیحات بیان شده به صورت شماتیک نشان داده شده است. دواير با استفاده از دستورهای **Buffer** و **Relate** و **Join**، **Dissolve**، **Union**، **Overlay** محاسبه شده و به کمان‌ها اختصاص داده شد.

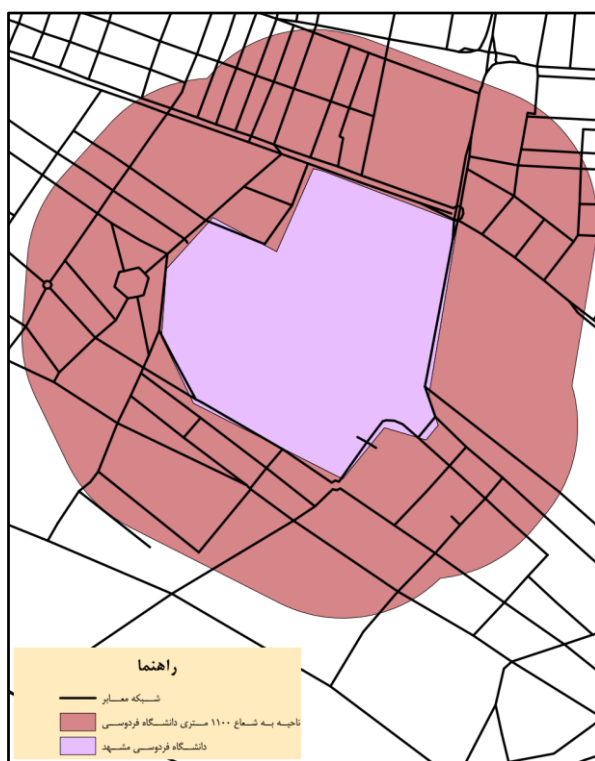


شکل ۳. امتیاز ریسک حمل مواد سوختی در کمان‌های قرار گرفته در فاصله کمتر از ۱۱۰۰ متر از چند مرکز حساس

## تعیین مسیر بهینه حمل محموله‌های خطرناک با استفاده از ArcGIS (مطالعه موردی: مشهد)

پوشش‌دهنده کل مساحت آنها در نظر گرفته شده اند و ناحیه به شعاع مورد نظر به دور این چند ضلعی رسم شده است. شکل زیر این موضوع را برای دانشگاه فردوسی مشهد نشان می‌دهد. این محدوده‌ها با استفاده از دستور Polygon Buffer در نرم‌افزار ArcMap ایجاد شده است.

برای در نظر گرفتن ریسک معابر، بسیاری از مراکز حساس به صورت نقطه‌ای در نظر گرفته شده‌اند اما برخی از این مراکز که مساحت زیادی دارند مانند دانشگاه فردوسی، پارک‌ها و بوستان‌ها، پادگان ثامن الائمه، ایستگاه‌های صدا و سیما، فرودگاه، ایستگاه راه‌آهن و پایانه اتوبوس به صورت چندضلعی

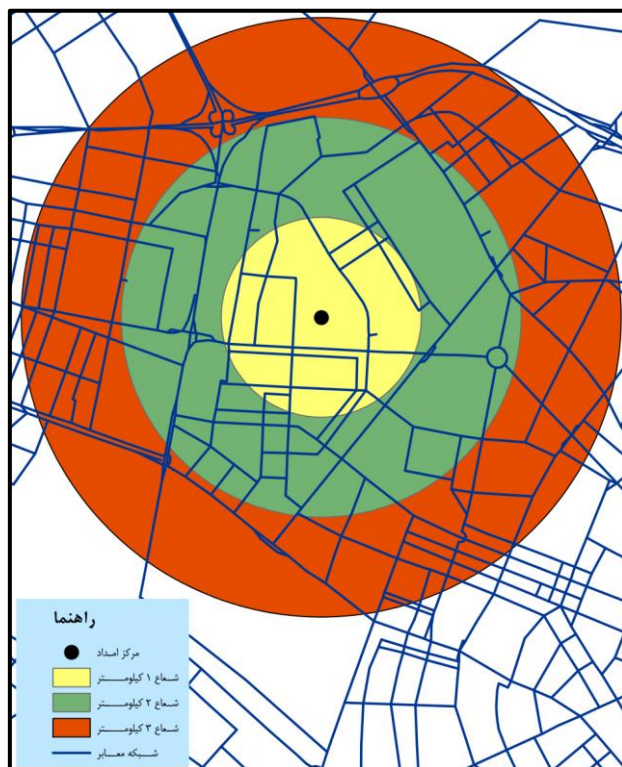


شکل ۴. ناحیه رسم شده به مرکزیت چندضلعی پوشش دهنده مساحت دانشگاه فردوسی مشهد

ریسک حمل مواد خطرناک در معابری که در شعاع یک کیلومتری مراکز امدادی قرار دارند، سه امتیاز، معابر قرار گرفته در فاصله شعاع یک تا دو کیلومتری دو امتیاز و معابر قرار گرفته در فاصله شعاع دو تا سه کیلومتری یک امتیاز کاهش می‌یابد. این روش برای در نظر گرفتن تاثیر مثبت مراکز امدادی واقع در نزدیکی معابر ارائه شده است. این مطلب در شکل زیر نشان داده شده است. همانند مراکز حساس، در صورتی که همپوشانی دوایر رسم شده پیرامون چند مرکز امداد رسانی، امتیاز مربوط به دوایر جمع می‌شود.

### ۳-۴ مراکز امداد

در شعاع عملکردی مراکز امدادی از قبیل ایستگاه‌های آتش‌نشانی، پایگاه‌های اورژانس و امداد و نجات بیشترین سریعترین قابلیت امداد رسانی وجود دارد، به همین دلیل اولویت تردد وسایل نقلیه حامل کالاهای خطرناک از معابری است که در شعاع عملکردی این ایستگاه‌ها واقع شده تا قابلیت امداد رسانی در کوتاه‌ترین زمان ممکن مهیا باشد. جهت منظور نمودن این موضوع، سه شعاع یک، دو و سه کیلومتری در اطراف بیمارستان‌ها و مراکز اورژانس و آتش‌نشانی در نظر گرفته شد.



شکل ۵. تاثیر مراکز امدادی بر کاهش ریسک حل مواد خطرناک در معابر

آنها در نرم افزار ArcMap وارد شده است و دوائر مربوط به تمامی آنها با استفاده از دستور Buffer ایجاد شده است.

جدول ۲ محل ایستگاه‌های آتش‌نشانی شهر مشهد و جدول ۳ محل پایگاه‌های اورژانس این شهر را نشان می‌دهد که موقعیت

جدول ۲. مراکز آتش‌نشانی شهر مشهد

موقعیت	شماره ایستگاه	موقعیت	شماره ایستگاه
بازار رضا	۲۴	سه راه کاشانی	۱
خیابان پیروزی ۲۵ و ۲۷	۲۵	بلوار وحدت	۲
خیابان فکوری	۲۶	خیابان فلسطین	۳
اول صیاد شیرازی	۲۷	میدان امام خمینی	۴
اول هدایت	۲۸	سه راه آب و برق	۵
اول جاده کلات	۲۹	انتهای سی متری طلاب	۶
الهیة	۳۰	قاسم آباد میدان مادر	۷
انتهای بلوار دندانپزشکان	۳۱	بلوار دوم طبرسی	۸
خیابان دانش غربی	۳۲	شهرک عسگریه	۹
بلوار سید رضی	۳۳	میدان ابوطالب	۱۰
بلوار امام علی	۳۴	پایانه مسافربری	۱۱
قاسم آباد	۳۵	کوی امیرالمؤمنین	۱۲

## تعیین مسیر بهینه حمل محموله‌های خطرناک با استفاده از ArcGIS (مطالعه موردی: مشهد)

شماره ایستگاه	موقعیت	شماره ایستگاه	موقعیت
۱۳	خیابان قائم	۳۶	جاده قدیم قوچان
۱۴	میدان معراج	۳۷	دره وی
۱۵	خیابان شهید رجایی	۳۸	بین میدان امام حسین و سپاد
۱۶	انتهای شهید رستمی	۳۹	شهرک طرق
۱۷	جاهد شهر	۴۰	انتهای جهان آرا
۱۸	گلشهر	۴۱	مهدی آباد
۱۹	شهرک صنعتی	۴۲	التیمور
۲۰	پایانه قطار شهری	۴۳	بلوار فرامرز عباسی
۲۱	الماس شرق	۴۴	بلوار شهید کامیاب
۲۲	شهرک صنعتی طوس	۴۵	میدان شهدا
۲۳	خیابان پایداری		

جدول ۳. پایگاه‌های اورژانس مناطق شهر مشهد

منطقه	موقعیت	منطقه	موقعیت
۱	احمد آباد	۷	رضا شهر
۲	بلوار وحدت	۸	کوی سیدی
۴	بلوار خیام	۹	فرامرز عباسی
۵	ابوریحان	۱۰	طبرسی
۶	قاسم آباد	۱۱	پیروزی

مسیریابی مدنظر قرار گرفت. بدین معنا که به هر کدام از بازه‌های ۰ تا ۰/۳۴، ۰/۳۵ تا ۰/۵، ۰/۵۱ تا ۰/۷۴، ۰/۷۵ تا ۰/۸۹، ۰/۹۰ تا ۰/۹۹ و بالاتر از ۱ به ترتیب امتیازات ۰ تا ۶ اختصاص یافت و این امتیاز در محاسبه امتیاز ریسک نهایی معبر منظور گردید. بدین ترتیب معابر با نسبت حجم به ظرفیت بالاتر، ریسک بالاتری در حمل مواد خطرناک خواهند داشت.

### ۳-۷ امتیاز ریسک

پس از آن که امتیاز مربوط به تمامی پارامترهای بیان شده در بالا، به کمان‌های موجود در شبکه معابر اختصاص یافت، امتیاز ریسک هر یک از کمان‌ها با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$RT_i = R_{Pi} + R_{Si} - R_{Ei} + R_{Ci} + R_{Vi}/C_i \quad (1)$$

که در آن:

$RT_i$ : امتیاز کل ریسک کمان  $i$

### ۳-۵ پیشینه تصادفات

در تعیین ریسک حمل مواد خطرناک در معابر لازم است پیشینه تصادفات معابر نیز مورد توجه قرار گیرد. در همین راستا، با توجه به آمار و اطلاعات موجود درباره تاریخچه تعداد تصادفات رخ داده در معابر شهر مشهد در در یک دوره سه‌ساله. امتیاز ۰ تا ۵ به ریسک معابر تخصیص یافت به طوری که هر چه تعداد تصادفات رخ داده در یک کمان بیشتر باشد، امتیاز ریسک آن نیز بیشتر خواهد بود.

### ۳-۶ نسبت حجم به ظرفیت

شاخص شلوغی معبر یا به عبارت دیگر نسبت حجم به ظرفیت معابر نیز باید در مسیریابی حمل مواد خطرناک مورد توجه قرار گیرد. این امر با توجه به بازه‌های عددی سطوح سرویس  $A$  تا  $F$  در معابر درون‌شهری تبدیل به امتیازات ریسک شد و در فصلنامه مهندسی ترافیک/ سال بیست و دوم/ شماره ۸۸ / تابستان ۱۴۰۱

ریسک محاسبه شه برای کمان‌ها به عنوان وزن یال‌های گراف، بین مبادی و مقاصد تعیین شده صورت می‌گیرد. از آنجایی که مبادی و مقاصد مربوط به مواد خطرناک می‌توانند در تمامی نقاط شهر قرار داشته باشند، برای مثال جایگاه‌های سوخت یا کارگاه‌های پلاسازی که نیاز به مواد اسیدی دارند در تمامی سطح شهر وجود دارند، مراکز ۴۵ ناحیه شهرداری مشهد به عنوان مبادی و مقاصد به نرم‌افزار معرفی گشتند و مسیرهای بهینه و مناسب از نظر خطر حمل مواد خطرناک اتصال دهنده مراکز نواحی شهرداری شهر مشخص شدند. در این صورت، هر خودرو حامل مواد خطرناک که قصد حمل این مواد را از هر نقطه شهر به نقاط دیگر داشته باشد، می‌تواند با توجه به نواحی مربوط به مبداء و مقصد خود مسیر بهینه را برای تردد انتخاب نماید.

برای استفاده از این الگوریتم در مجموعه نرم‌افزار ArcGIS، لازم است پس از تعیین امتیاز ریسک کمان‌ها در نرم‌افزار ArcMap، با استفاده از نرم‌افزار ArcCatalog کمان‌ها و گره‌های گراف شبکه معابر تحت عنوان‌های Network Dataset و Junctions ایجاد گردند. شکل ۶ امتیازهای تعیین شده برای کمان‌های شبکه معابر با شعاع تاثیر ۱۱۰۰ متر (سوخت) و ۱۷۰۰ متر (اسید) را در محیط ArcMap نشان می‌دهد. همچنین شکل ۷ یال‌ها و گره‌های گراف ساخته شده برپایه شبکه معابر امتیاز گرفته با استفاده از ArcCatalog را نشان می‌دهد.

$R_{Pi}$ : امتیاز جمعیت کمان  $i$

$R_{Si}$ : امتیاز مراکز حساس کمان  $i$

$R_{Ei}$ : امتیاز مراکز امداد کمان  $i$

$R_{Ci}$ : امتیاز پیشینه تصادفات کمان  $i$

$R_{Vi}/C_i$ : امتیاز نسبت حجم به ظرفیت کمان  $i$

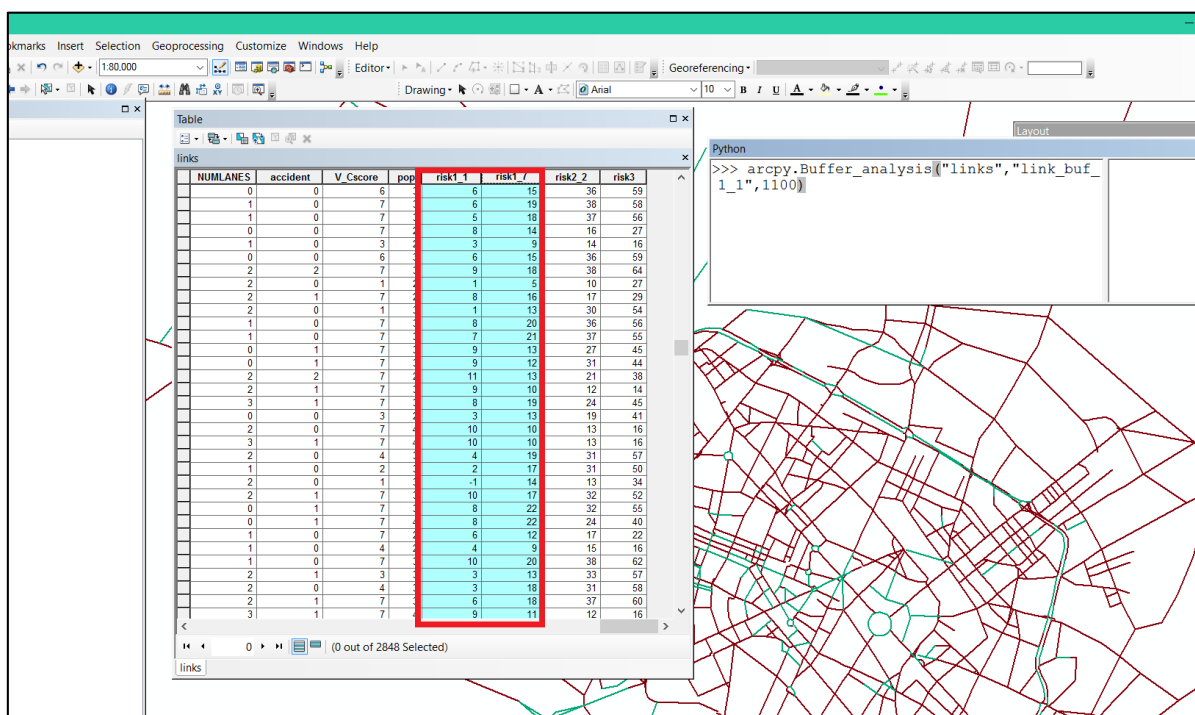
ملاحظه می‌گردد که تمامی پارامترها اثر افزایشی بر امتیاز ریسک کمان دارند، به غیر از پارامتر فاصله از مراکز امداد. در واقع هرچه فاصله از مراکز امداد کمتر باشد، کمان برای حمل محموله‌های خطرناک مناسب‌تر خواهد بود. بنابراین، نزدیک بودن به مراکز امداد، امتیاز کل ریسک را کاهش می‌دهد.

### ۳-۸ تعیین مسیر بهینه

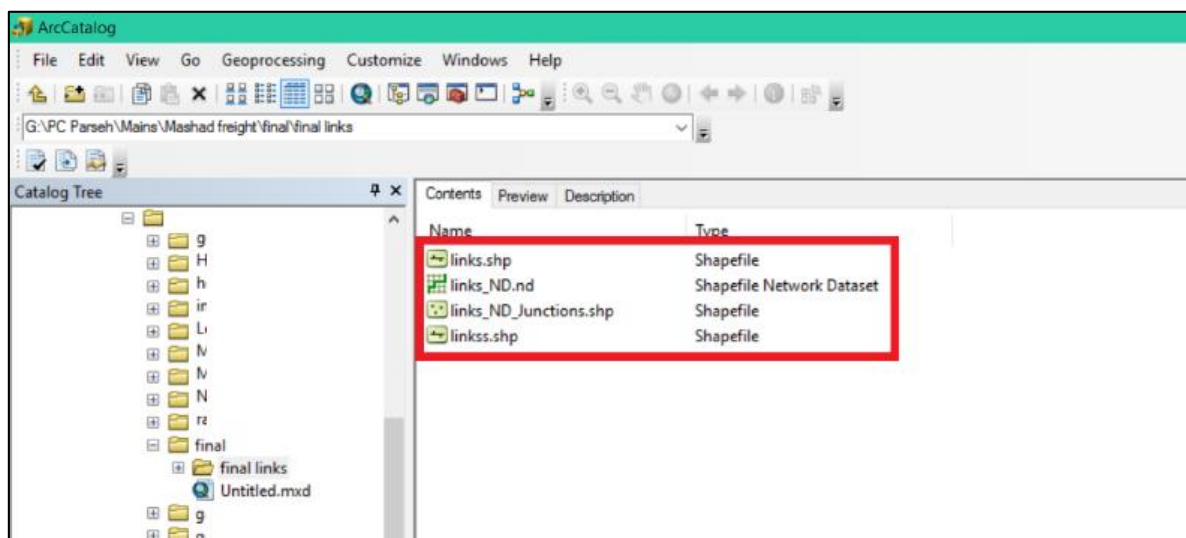
پس از بدست آمدن ریسک حمل مواد خطرناک با شعاع‌های تاثیر متفاوت، لازم است مسیری که کمترین ریسک را دارد نیز مشخص گردد. برای بدست آوردن مسیر مناسب بین مباد و مقاصد تعیین شده، درخت کوتاهترین مسیر با استفاده از الگوریتم دایکسترا تعیین شد. مسئله درخت کوتاهترین مسیر در واقع پیدا کردن مسیری بین دو گره در یک گراف است، به صورتی که حاصل جمع وزن یال‌های موجود در مسیر کمینه باشد.

در اینجا، گره‌های گراف همان مبادی و مقاصد، یال‌های گراف همان کمان‌های شبکه معابر و وزن یال‌های گراف همان امتیاز ریسک اختصاص یافته به کمان‌ها است. این فرایند توسط نرم‌افزار ArcMap و با معرفی شبکه معابر شهر مشهد و امتیاز

تعیین مسیر بهینه حمل محموله‌های خطرناک با استفاده از ArcGIS (مطالعه موردی: مشهد)



شکل ۶. امتیاز اختصاص گرفته به کمان‌های شبکه معابر مشهد در نرم‌افزار ArcMap



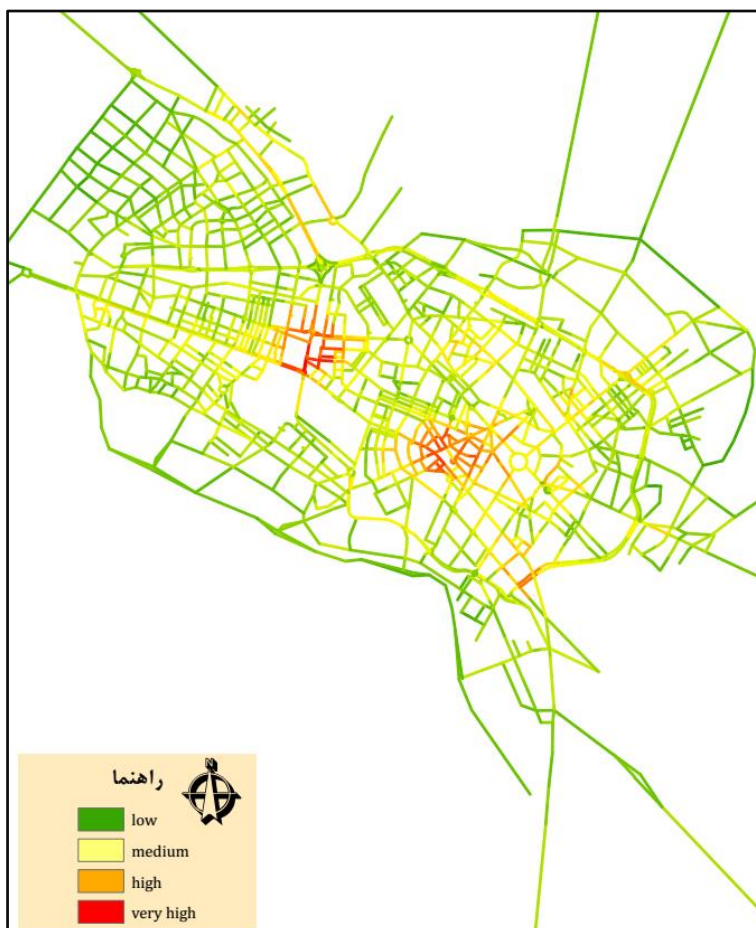
شکل ۷. ساخت گره و یال گراف شبکه معابر برای انجام مسیریابی در نرم‌افزار ArcCatalog

#### ۴. یافته‌ها

استفاده از شعاع تاثیر ۱۷۰۰ متر برای مواد اسیدی، دایره و محدوده‌های مربوط به شاخص‌های مراکز حساس و مراکز امداد نیز رسم شدند و امتیاز این پارامترها نیز به کمان‌ها اختصاص یافت، دو امتیاز ریسک هر کمان در شبکه معابر با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد. شکل ۸ این امتیاز را برای حمل مواد سوختی و شکل ۹ آن را برای حمل مواد اسیدی نشان می‌دهد.

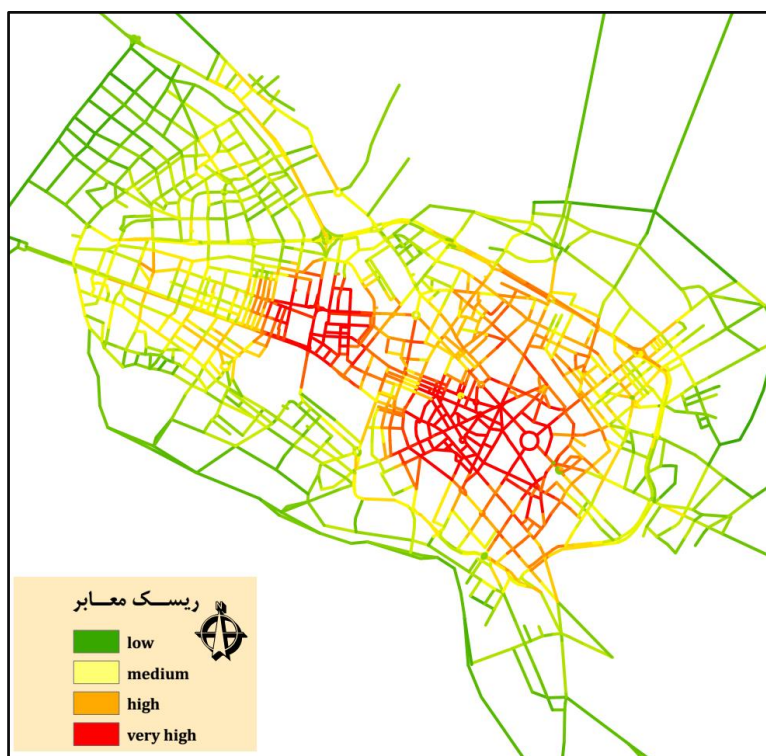
در این بخش، یافته‌های مربوط به پیاده‌سازی روش‌شناسی تشریح شده در بند پیشین بر روی شبکه معابر شهر مشهد ارائه می‌گردد. پس از آن که امتیاز مربوط به جمعیت، نسبت حجم به ظرفیت و پیشینه تصادفات به کمان‌های شبکه معابر اختصاص یافت و سپس با استفاده از شعاع تاثیر ۱۱۰۰ متر برای مواد سوختی و با فصلنامه مهندسی ترافیک/ سال بیست و دوم/ شماره ۸۸ / تابستان ۱۴۰۱

ملاحظه می‌گردد که به دلیل شعاع تأثیر گسترده‌تر مواد اسیدی، به طور کلی، امتیاز ریسک کمان‌های بیشتری از شبکه در دسته‌های بالا و خیلی بالا قرار گرفته است.



شکل ۸. ریسک معابر شهر مشهد برای مواد سوختی با شعاع تأثیر ۱۱۰۰ متر

تعیین مسیر بهینه حمل محموله‌های خطرناک با استفاده از ArcGIS (مطالعه موردی: مشهد)

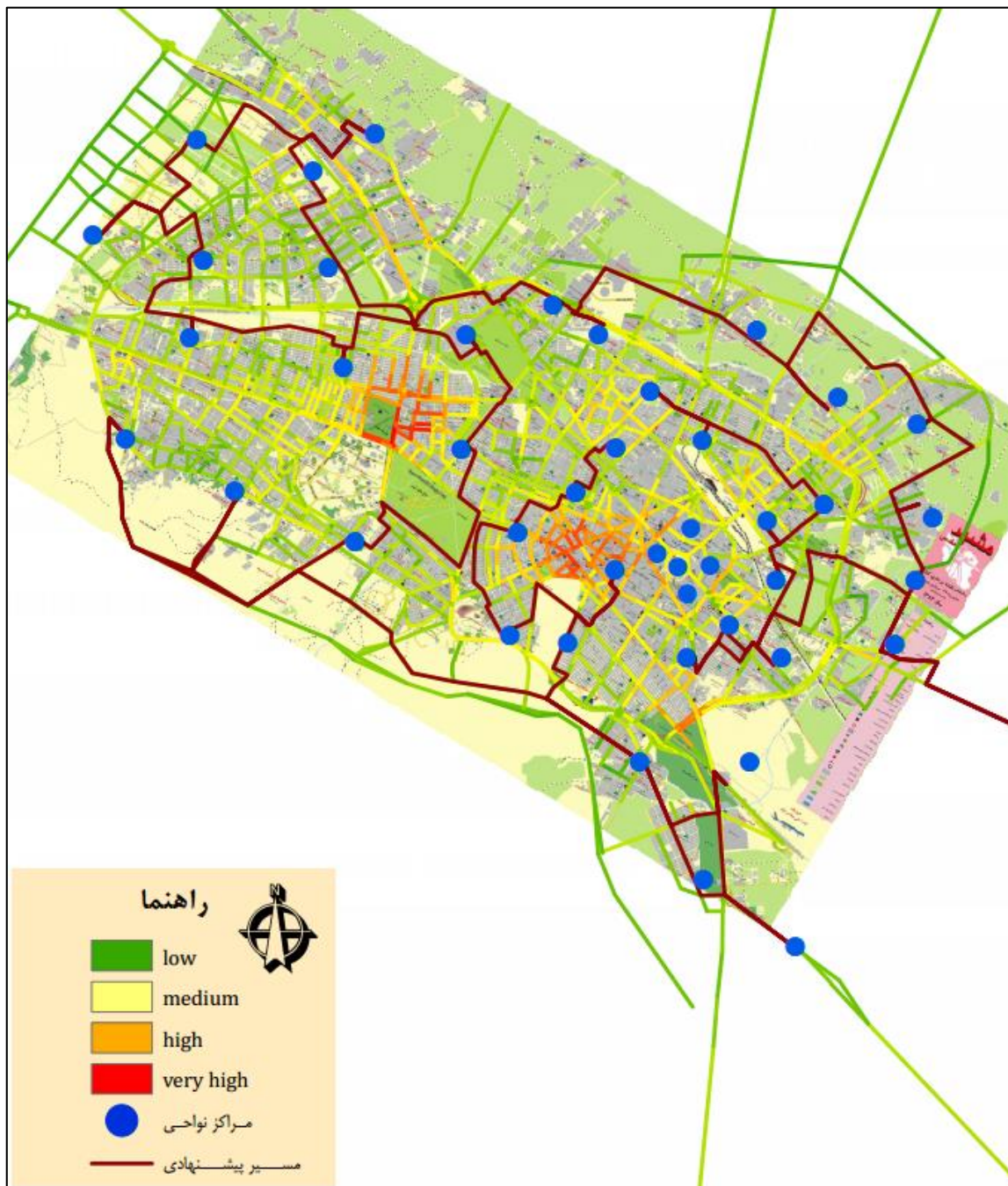


شکل ۹. ریسک معابر شهر مشهد برای مواد اسیدی با شعاع تاثیر ۱۷۰۰ متر

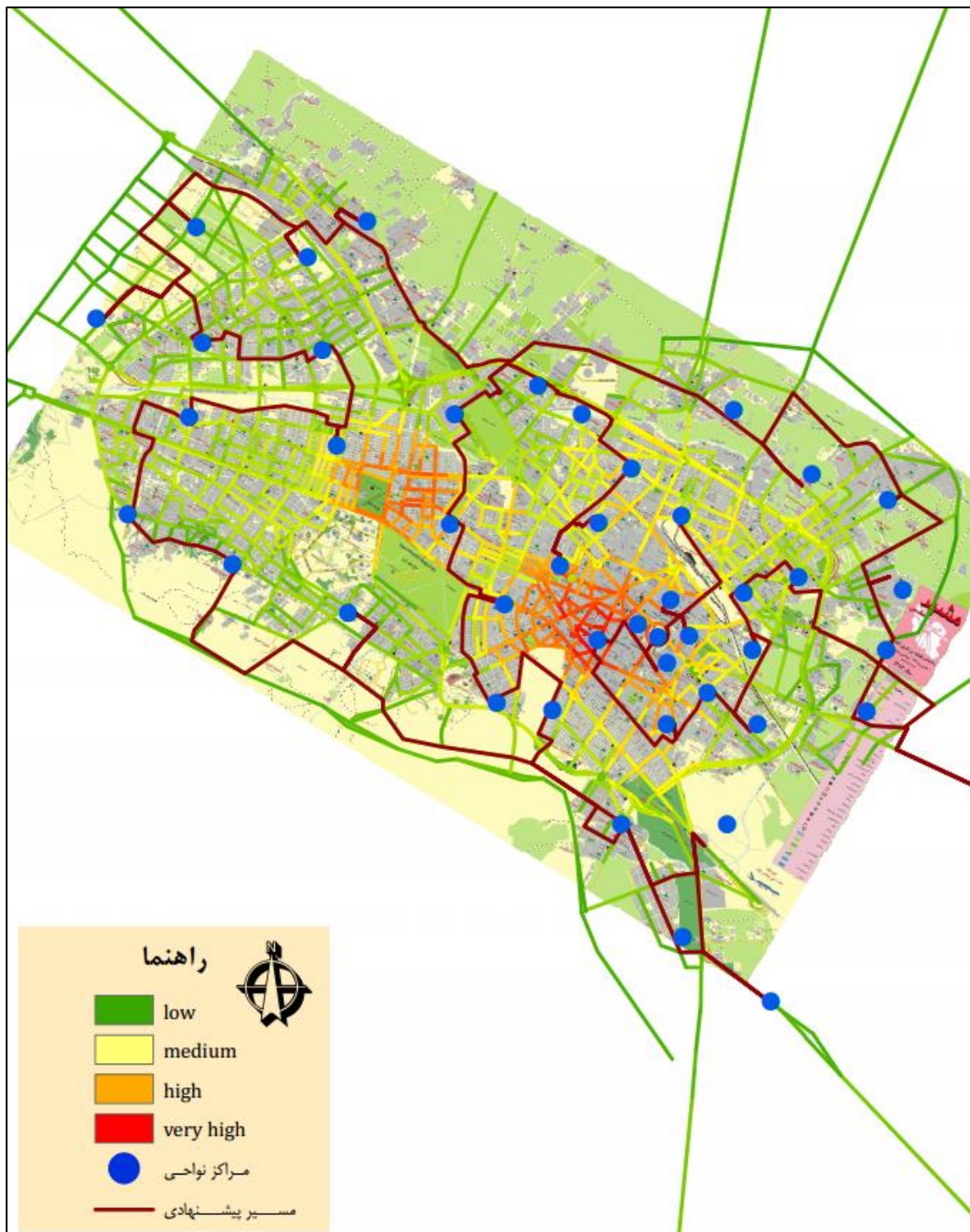
امتیازات ریسک معابر برای همان ماده (شعاع تاثیر) تعیین شده است. به عبارت دیگر ممکن است معبری که امتیاز ریسک آن برای شعاع ۱۱۰۰ متر برابر ۳۰ است در نقشه مربوط به شعاع ۱۱۰۰ متر به رنگ قرمز (ریسک بسیار زیاد) نشان داده شده باشد اما همان معبر با امتیاز ۵۰ برای شعاع ۳۰۰۰ متر، در نقشه مربوط به این شعاع به رنگ زرد (ریسک متوسط) نشان داده شده باشد چرا که امتیاز ۵۰ نسبت به امتیاز ریسک سایر معابر برای شعاع تاثیر ۳۰۰۰ متر، در رده متوسط قرار می‌گیرد. این نوع نمایش کمک می‌کند درک بهتری از بهینه بودن مسیر پیشنهادشده به دست بیاید.

در گام بعدی، مسیر بهینه متصل‌کننده مراکز نواحی ۴۵ گانه شهر مشهد با استفاده از امتیاز اختصاص یافته به کمان‌ها و الگوریتم درخت کوتاهترین مسیر در نرم‌افزارهای ArcMap و ArcCatalog به دست آمد. این درخت کوتاهترین مسیر برای مواد سوختی در شکل ۱۰ و برای مواد اسیدی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نواحی منطقه ثامن به دلیل ممنوعیت تردد خودروهای باری و محموله‌های خطرناک در این محدوده، از مبادی و مقاصد مربوط به مسیریابی کنار گذاشته شدند.

برای درک بهتر مسیرهای پیشنهاد شده، برای نمایش ریسک معابر در نقشه، از نمایش نسبی استفاده شده است. بدین معنا که برای هر ماده، ریسک‌های کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد نسبت به



شکل ۱۰. مسیر بهینه متصل کننده مراکز نواحی شهرداری مشهد از نظر ریسک حمل مواد سوختی با شعاع تاثیر ۱۱۰۰ متر



شکل ۱۱. مسیر بهینه متصل‌کننده مراکز نواحی شهرداری مشهد از نظر ریسک حمل مواد اسیدی با شعاع تاثیر ۱۷۰۰ متر

## ۵. نتیجه‌گیری

پارامترهای متفاوتی اندازه‌گیری شود و تمامی این پارامترها در فرایند مسیریابی مدنظر قرار گیرند. در این مطالعه، بر اساس پارامترهای جمعیت، پیشینه تصادفات، فاصله از مراکز حساس و فاصله از مراکز امداد و همچنین با در نظر گرفتن شعاع تاثیر

یافتن بهترین مسیر برای حمل محموله‌های خطرناک در معابر شهری، نیازمند آن است که ریسک کمان‌های شبکه معابر برپایه

Transportation, Transportation Science, Vol. 48, No. 2

- Lee, M. 2015, GIS-based route risk assessment of hazardous material transport, University of Nebraska Lincoln

- Emergency response guidebook, Transportation administration of the USA, 2012  
Finding a route tutorial, 2010, Esri.

۱۱۰۰ متر برای مواد سوختی و ۱۷۰۰ متر برای مواد اسیدی، امتیاز ریسک مربوط به کمان‌های شبکه معابر شهر مشهد محاسبه شد. همچنین با منظور نمودن پارامتر نسبت حجم به ظرفیت تلاش شد تا نقش حجم تردد در معابر و کاهش تاخیر در مسیر حمل محموله‌ها نیز در نظر گرفته شود. در نتیجه، امتیاز ریسک نهایی کمان‌های شبکه معابر شهر مشهد برای حمل مواد سوختی و اسیدی به صورت مجزا محاسبه شد. سپس با استفاده از الگوریتم درخت کوتاهترین مسیر دایکسترا در نرم‌افزارهای ArcMap و ArcCatalog، مسیر بهینه متصل‌کننده مراکز نواحی ۴۵ گانه شهرداری مشهد به دست آمد.

## ۶. مراجع

- تدوین ضوابط و انجام مسیریابی تردد خودروهای حامل مواد خطرناک در معابر شهر تهران، ۱۳۹۱، دانشگاه فردوسی مشهد.

- Ansari, M. Pakrou, S. Abdoli, M. Karbasi, A. 2015, Optimization of MSW Collection Routes Using GIS (Case Study: Tabriz City), Current World Environment, Vol. 20, No. 1

- Dilgir, R. 2015, Dangerous Goods Route Selection Criteria, Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Calgary, Alberta

- Hazardous Materials Transportation Act, 2018, Federal highway administration  
Carotenuto, P. Giordani, S. Ricciardelli, S. 2017, Finding minimum and equitable risk routes for hazmat shipments, Computers & Operations Research, Vol. 84, No. 2

- Panwhar, S.T. Pitt R. Anderson, M.D. 2016, Development of a GIS-Based Hazardous Materials Transportation Management System, University Transportation Center for Alabama

- Kara, B.Y. Verter, V. 2016, Designing a Road Network for Hazardous Materials