@ORchannel

عنوان

بررسی چند مدل ریاضی مساله مسیریابی حمل‌ونقل مواد خطرناک

@ORchannel

@ORchannel

فهرست مطالب

پیش‌گفتار x

۱ مقدمه ۱

۱.۱ تعریف و مفهوم کالاهای خطرناک ۲

۱.۱.۱ طبقه بندی کالاهای خطرناک ۴

۲.۱ تعریف مسأله ۶

۳.۱ ضرورت انجام تحقیق ۷

۴.۱ اهداف تحقیق ۱۰

۲ ادبیات موضوع مربوط به حمل و نقل مواد خطرناک ۱۲

۱.۲ ریسک ۱۳

۱.۱.۲ ارزیابی کمّی ریسک ۱۴

۱.۱.۱.۲ تجزیه و تحلیل فراوانی ۱۵

۲.۱.۱.۲ فراوانی گذشته ۱۷

@ORchannel

۳.۱.۱.۲ تکنیک‌های نمودار منطقی ۱۸
۴.۱.۱.۲ تجزیه و تحلیل درخت خطا ۱۸
۵.۱.۱.۲ تجزیه و تحلیل درخت رخداد ۱۹
۶.۱.۱.۲ مدل‌سازی پیامد و محاسبه ریسک ۱۹
۷.۱.۱.۲ مدل گاوسی ۲۱
۲.۱.۲ ریسک مسیر ۲۶
۳.۱.۲ هزینه ریسک ۲۷
۲.۲ مسیریابی کالاهای خطرناک ۲۸
۳.۲ طراحی شبکه حمل و نقل مواد خطرناک ۳۲
۴.۲ مکانیابی تسهیلات خطرناک ۳۳
۵.۲ تحقیقات در زمینه حمل و نقل مواد خطرناک ۳۴
۱.۵.۲ تحقیقات در زمینه مسایل مربوط به حمل و نقل مواد خطرناک در ایران . . ۳۴
۲.۵.۲ تحقیقات در زمینه مسایل مربوط به حمل و نقل مواد خطرناک در سایر کشورها ۳۶

۳ ساختار و اجزای چند مدل ریاضی مسأله مسیریابی وسایل نقلیه حامل مواد خطرناک ۴۴

۱.۳ مسأله مسیریابی و زمان‌بندی وسایل نقلیه حامل مواد خطرناک با پنجره زمانی سخت . ۴۶
۱.۱.۳ فرضیه‌های مدل مسأله مسیریابی و زمان‌بندی وسایل نقلیه حامل مواد خطرناک با پنجره زمانی سخت ۴۶
۲.۱.۳ پارامترها و متغیرهای مدل مسأله مسیریابی و زمان‌بندی وسایل نقلیه حامل مواد خطرناک با پنجره زمانی سخت ۴۷

@ORchannel

۳.۱.۳ فرمول‌بندی ریاضی مدل مسأله مسیریابی و زمان‌بندی وسایل نقلیه حامل مواد خطرناک با پنجره زمانی سخت ۴۹
۲.۳ مدل ماکسی-مین ۵۱
۱.۲.۳ مدل پایه هدف اولیه [۲۱] ۵۲
۱.۱.۲.۳ فرمول‌بندی مدل اولیه ۵۳
۲.۱.۲.۳ کاهش متغیرها و محدودیت‌های مورد نیاز ۵۵
۳.۱.۲.۳ مدل هدف اولیه با متغیرها و محدودیت‌های کاهش یافته . . ۵۵
۲.۲.۳ فرمول‌بندی مدل ماکسمین ۵۷
۳.۳ مسأله مسیریابی و زمان‌بندی وسایل نقلیه حامل مواد خطرناک با پنجره زمانی نرم . . . ۶۰
۱.۳.۳ فرضیات مدل ۶۰
۲.۳.۳ پارامترها و متغیرهای مورد استفاده در مدل مسأله مسیریابی و زمان‌بندی وسایل نقلیه حامل مواد خطرناک با پنجره زمانی نرم [۵۶] ۶۱
۳.۳.۳ فرمول‌بندی ریاضی مدل مسأله مسیریابی و زمان‌بندی وسایل نقلیه حامل مواد خطرناک با پنجره زمانی نرم [۵۶] ۶۵

۴ مسأله مسیریابی و زمان‌بندی وسایل نقلیه حامل مواد خطرناک در شبکه‌های حمل و نقل وابسته به زمان ۷۱

۱.۴ فرضیات مسأله ۷۲
۲.۴ پارامترها و متغیرهای مورد استفاده در مدل اول ۷۳
۱.۲.۴ فرمول‌بندی ریاضی مدل اول ۷۴
۲.۲.۴ برنامه ریزی پویا مدل اول ۷۶

@ORchannel

۳.۴ مدل دوم با محدودیت در مدت زمان توقف و بدون محدودیت در زمان رانندگی [۳۰] . ۷۷
۱.۳.۴ فرمول‌بندی ریاضی مدل دوم [۳۰] ۷۸
۲.۳.۴ برنامه ریزی پویا مدل دوم ۸۰
۴.۴ مدل سوم با محدودیت در مدت زمان توقف و مدت زمان رانندگی ۸۱
۱.۴.۴ فرمول‌بندی ریاضی مدل سوم [۳۰] ۸۲
۲.۴.۴ برنامه‌ریزی پویا مدل سوم ۸۲
۵.۴ محدودیت‌های پیچیده‌تر در مدت زمان رانندگی بدون وقفه و مدت زمان توقف ۸۵
۶.۴ بررسی مدل اول و مدل دوم روی مثال کوچک و شبکه حمل و نقل واقعی ۸۶
۱.۶.۴ حل مدل اول و مدل دوم روی یک مثال کوچک ۸۶
۷.۴ بررسی دو مدل اولیه بر روی شبکه حمل و نقل واقعی ۹۳
۸.۴ نتیجه گیری ۱۰۰

مراجع ۱۰۲

واژه‌نامه فارسی به انگلیسی ۱۱۲

واژه‌نامه انگلیسی به فارسی ۱۱۵

نمایه ۱۲۰

@ORchannel

فهرست جدول‌ها

۱.۱ میزان ترانزیت کالاهای نفتی و غیر نفتی از مرزهای کشور طی ۸ ماهه اول سال ۱۳۹۰ (تن) [۶] ۸

۲.۱ خلاصه حوادث حمل و نقل مواد خطرناک در ایالات متحده آمریکا در سال ۲۰۱۳ [۵۰] ۹

۱.۲ طبقه‌بندی شرایط آب و هوایی ۲۵

۲.۲ عوامل موثر بر مسیریابی مواد خطرناک [۴۳]. ۲۹

۱.۳ پارامترهای مورد استفاده در مدل با پنجره زمانی سخت [۵۷] ۴۷

۲.۳ متغیرهای تصمیم به کار گرفته شده در مدل با پنجره زمانی سخت [۵۷] ۴۸

۳.۳ پارامترها مورد استفاده در مدل اولیه [۲۱] ۵۲

۴.۳ متغیرهای تصمیم به کار گرفته شده در مدل اولیه [۲۱] ۵۳

۵.۳ پارامترها مورد استفاده در مدل با پنجره زمانی نرم [۵۶] ۶۲

۶.۳ متغیرهای تصمیم به کار گرفته شده در مدل با پنجره زمانی نرم [۵۶] ۶۴

۱.۴ پارامترها مورد استفاده در مدل اول [۳۰] ۷۴

۲.۴ متغیر تصمیم به کار گرفته شده در مدل اول [۳۰] ۷۴

@ORchannel

۳.۴ پارامتر های مورد استفاده در مدل دوم [۳۰] ۷۷
۴.۴ متغیرهای تصمیم به کار گرفته شده در مدل دوم [۳۰] ۷۸
۵.۴ احتمال حادثه انتشار مواد خطرناک برای هر وسیله نقلیه در هر کیلومتر [۳۰]. . . . ۸۷
۶.۴ میزان عواقب در صورت اتفاق یک حادثه انتشار در طول حمل و نقل مواد خطرناک
برای هر یک کیلومتر مسافت [۳۰]. ۸۸
۷.۴ نتایج عددی اجرای مدل اول روی شبکه حمل و نقل مثال ۸۹
۸.۴ زمان اجرای مدل اول روی شبکه حمل و نقل مثال ۹۰
۹.۴ نتایج عددی اجرای مدل دوم روی شبکه حمل و نقل مثال ($L_i = ۱۰$ و $U_i = ۳۰$) . . ۹۱
۱۰.۴ زمان اجرای مدل دوم روی شبکه حمل و نقل مثال ($L_i = ۱۰$ و $U_i = ۳۰$) ۹۱
۱۱.۴ نتایج عددی اجرای مدل دوم روی شبکه حمل و نقل مثال ($L_i = ۳۰$ و $U_i = ۹۰$) . . ۹۲
۱۲.۴ زمان اجرای مدل دوم روی شبکه حمل و نقل مثال ($L_i = ۳۰$ و $U_i = ۹۰$) ۹۲
۱۳.۴ نتایج عددی اجرای مدل اول روی شبکه حمل و نقل واقعی ۹۵
۱۴.۴ نتایج عددی اجرای مدل دوم روی شبکه حمل و نقل واقعی ۹۸

@ORchannel

فهرست شکل‌ها

۱.۱ میزان حوادث در طی حمل و نقل مواد خطرناک بر اساس طبقه‌بندی این مواد.
مرجع [۵۰] ۱۰

۱.۲ نمونه‌ای از یک درخت خطا [۳۶]. ۱۹

۲.۲ نمونه‌ای از یک درخت رخداد [۳۶]. ۲۰

۳.۲ پارامتر پراکندگی در فاصله y بر حسب x [۶۰]. ۲۳

۴.۲ پارامتر پراکندگی در فاصله z بر حسب x [۶۰]. ۲۴

۵.۲ مدل‌های مختلف منطقه تاثیر [۳۶]. ۲۵

۶.۲ احتمال بروز حادثه در مسیر [۳۷]. ۲۷

۷.۲ مسیرهای غیر غالب ممکن بر روی سه گره ۳۲

۱.۴ شبکه حمل و نقل مربوط به مثال ۸۷

۲.۴ نقشه مسیرهای مشهد-بندرعباس ۹۴

۳.۴ جوابی از $DP-I$ برای حداکثر مدت زمان سفر ۱۵۰۰ دقیقه ۹۶

۴.۴ جوابی از $DP-I$ برای حداکثر مدت زمان سفر ۲۵۰۰ دقیقه ۹۷

@ORchannel

۵.۴ جوابی از $DP - II$ برای حداکثر مدت زمان سفر ۱۵۰۰ دقیقه ۹۹

@ORchannel

پیش‌گفتار

در بیشتر موارد، محل تولید و مصرف مواد خطرناک یکسان نیست و این مواد باید از محل تولید به محل مصرف منتقل گردند. به دلیل ماهیت خطرناک این مواد، باید در کلیه مراحل تولید، انبار و حمل و نقل آن‌ها، شاخص‌ها و موارد ایمنی را در نظر داشت. در این رابطه حمل و نقل این مواد اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، چرا که عبور این گونه مواد از محل‌های گوناگون نظیر مناطق مسکونی، حاشیه رودخانه‌ها، مسیر سدها، محوطه تالاب‌ها، جنگل‌ها، دریاچه‌ها و مناطق تفریحی در صورتی که استانداردهای ایمنی رعایت نشده باشد، ممکن است به فجایع انسانی و زیست‌محیطی منجر شود.

دسته‌ای از مسایل مسیریابی خودرو[۲]، مسایل مربوط به ارایه خدماتی است که در آن مجموعه‌ای از وسایل نقلیه واقع در یک یا چند انبار به ارایه خدمات به مجموعه‌ای از مشتریان، با استفاده از شبکه جاده‌ای مناسب می‌پردازند. این مسأله اولین بار توسط دانتزیک و رامسر[۳] [۲۸] در سال ۱۹۵۹ مطرح شد که مربوط به تحویل بنزین به ایستگاه‌های بنزین بود. آن‌ها اولین فرمول‌بندی ریاضی و الگوریتمی را برای حل این مسأله پیشنهاد کردند. پس از آن کلارک و رایت[۴] در سال ۱۹۶۴ با ارایه یک روش ابتکاری حریصانه روش دانتزیک و رامسر را بهبود دادند. تا به امروز صدها مدل و الگوریتم برای بهینه‌سازی و حل تقریبی مسایل

[2] Vehicle Routing Problem (VRP)

[3] Dantzig and Ramser

[4] Clark and Wright

@ORchannel

مسیریابی پیشنهاد شده‌اند. این مسایل با توجه به محدودیت‌ها و ماهیت کالاهایی که حمل می‌شوند، انواع مختلفی دارند. هدف مشترک مسایل مسیریابی خودرو به حداقل رساندن هزینه‌های حمل و نقل است. اما در مسایل حمل و نقل کالاهای خطرناک، با توجه به ماهیت این مواد و خطر مربوط به انتشار اتفاقی مواد خطرناک در طول فرآیند حمل و نقل (که این مسایل را از دیگر مسایل حمل و نقل متمایز می‌کند) هدف تنها یافتن کوتاهترین مسیر نیست، بلکه یافتن مسیری با حداقل هزینه و حداقل خطر است.

در فصل اول این پایان‌نامه، با مفهوم کالاهای خطرناک و ضرورت انجام تحقیق در این زمینه آشنا می‌شویم.

در فصل دوم به بررسی ادبیات موضوع مربوط به حمل و نقل مواد خطرناک می‌پردازیم.

در فصل سوم سه مدل ریاضی مسأله مسیریابی و زمان‌بندی وسایل نقلیه حامل مواد خطرناک برای شبکه حمل و نقل مستقل از زمان را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

در فصل چهارم مسأله مسیریابی و زمان‌بندی وسایل نقلیه حامل مواد خطرناک برای شبکه حمل و نقل وابسته به زمان را مورد بررسی قرار می‌دهیم. چهار مدل ارایه شده برای این مسأله را بررسی می‌کنیم. در سه مدل اول به بررسی فرمول‌بندی ریاضی مدل‌ها و برنامه‌ریزی پویا مدل‌ها می‌پردازیم. در این مدل‌ها، مدت زمان سفر و میزان ریسک وابسته به زمان است. ابتدا مدل اول و دوم را روی یک مثال کوچک حل می‌کنیم و به بررسی نتایج آن می‌پردازیم و سپس مدل برنامه‌ریزی پویای این دو مدل را در نرم افزار متلب روی شبکه حمل و نقل واقعی اجرا می‌کنیم و به بررسی نتایج آن می‌پردازیم و در پایان نتیجه‌گیری نموده و پیشنهاداتی را ارایه می‌دهیم.

@ORchannel

فصل ۱

مقدمه

همان‌طور که می‌دانیم تامین نیازهای انسان از منابع نزدیک، از روزگاران قدیم غیرممکن و در نتیجه جابجایی کالاها ضروری بوده است. در دوران کنونی، تعاملات تجاری از مرزها فراتر رفته و بین المللی شده است، در نتیجه داشتن سیستم حمل و نقل متناسب با نیازها و قانونمند بودن آن ضروری به نظر می‌رسد.

امروزه حمل و نقل در سه عرصه‌ی زمین، دریا و هوا انجام می‌گیرد و در همه کشورها، کم و بیش قوانین و مقرراتی برای ساماندهی حمل و نقل، تنظیم شده‌اند. در همین راستا، حمل و نقل کالاهای خطرناک اگر چه از قواعد تقریباً مشابهی پیروی می‌کنند، اما ماهیت کالاهای مذکور و خطرات احتمالی آن از لحاظ زیست محیطی و وقوع فجایع انسانی قوانین و اقدامات جداگانه‌ای را می‌طلبند.

با توجه به این‌که کشور ما از جمله کشورهای غنی از منابع نفت و گاز و محصولات پتروشیمی است و ما باید آن‌ها را برای مصارف داخلی و خارجی حمل کنیم و هم‌چنین با توجه به موقعیت استراتژیکی کشورمان، کشورهای همجوار نیز گاهی مجبور به ترانزیت نفت و گاز صادراتی خود از طریق ایران

@ORchannel

می‌شوند. لذا افزایش ایمنی در حمل و نقل کالاهای خطرناک با مجهز نمودن ناوگان ریلی و جاده‌ای کشور و آشنایی و به کار بردن کامل مقررات بین المللی حمل و نقل کالاهای خطرناک امری ضروری است. بنابراین، مطالعه در زمینه حمل و نقل مواد خطرناک و به‌کارگیری راهکارهای علمی مدیریتی برای کاهش خطرات امری ضروری است. تحلیل ریسک، مکانیابی تسهیلات، مسیریابی و زمان‌بندی از جمله مسایل مهم در حمل و نقل مواد خطرناک هستند. امروزه مواد خطرناک در بسیاری از فرآیندهای صنعتی در تمام کشورهای دنیا به خصوص کشورهای توسعه یافته کاربرد وسیعی دارد به همین دلیل، مطالعه در زمینه حمل و نقل مواد خطرناک در سطح وسیعی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این پایان‌نامه به ارزیابی مسیرهای حمل و نقل مواد خطرناک بر پایه ریسک و هزینه می پردازیم.

۱.۱ تعریف و مفهوم کالاهای خطرناک

بیشتر کنوانسیون‌های بین المللی و مقررات داخلی کشورها از ارایه تعریف جامع برای کالاهای خطرناک خودداری کرده‌اند. علت این امر شاید بداهت تعریف این نوع کالاها یا سختی تشخیص تمام مصادیق آن باشد. به نظر می‌رسد همین دلیل اخیر است که موجب خودداری قانون‌گذاران از ورود به بحث تعریف این کالاها شده است و آن‌ها سعی کرده‌اند با طبقه‌بندی کالاهای خطرناک -به جای تعریف آن‌ها- زمینه تشخیص دقیق این نوع کالاها را فراهم سازند. برای مثال، در توافقنامه اروپایی درباره‌ی حمل و نقل بین المللی کالاهای خطرناک (ای.دی.ار[1]) کالاهای خطرناک از حیث نوع خطر (انفجاری، سمی، قابل اشتعال و خورنده) طبقه‌بندی شده‌اند [۴۶].

در تعریف کالاهای خطرناک باید به ماهیت ذاتی کالاها توجه کرد. با این حال، نمی‌توان خطری را که در شرایط کاملاً استثنایی ممکن است ایجاد شود، به عنوان مبنای خطرناک بودن آن کالا محسوب نمود.

[1] A.D.R

@ORchannel

برای نمونه، سنگ‌های معدنی بزرگ همچون سنگ آهن، در صورتی که با زنجیر و سیم بکسل باربندی نشود، در سر بالایی و سراشیبی می‌توانند خطرات عمده‌ای را برای خودروها و تاسیسات اطراف ایجاد کنند، اما هیچ کس چنین کالاهایی را در زمره کالاهای خطرناک به حساب نمی‌آورد. از سوی دیگر، در صنعت حمل و نقل باید «گازها» را نیز کالای خطرناک به حساب آورد چرا که در واقع، گازهای سمی چون کلراین[۲] و آمونیاک[۳] و گازهای قابل اشتعال مانند استیلن[۴] و ال‌پی‌جی[۵] در زمره مواد خطرناک به شمار می‌آیند. درجه و نوع خطر کالاهای مذکور آن چنان متفاوت است که جز با آشنایی علمی و فنی به خاصیت شیمیایی آن‌ها نمی‌توان از بروز خطر جلوگیری کرد. برای مثال فسفر سفید[۶] در معرض هوای آزاد، خود به خود می‌سوزد.

برخی از مواد دارای مخاطرات فرعی نیز هستند که به اندازه خطر اصلی آن‌ها دارای اهمیت نیست. برای مثال، آمونیاک بدون آب در زمره گازهای سمی به شمار می‌آید و از این جهت می‌تواند منجر به مرگ شود. اما این گاز خطر فرعی نیز دارد، این ماده خورنده[۷] پوست و آهن است. بعضی از مواد، اگر چه ماهیتاً خطرناک نیستند، اما در صورت تحقق شرایط خاص می‌توان آن‌ها را خطرناک شمرد. برای مثال اگر گازوئیل همراه با مایعات قابل اشتعال همچون بنزین حمل شود، خود در زمره مواد قابل اشتعال و در نتیجه خطرناک به حساب می‌آید.

در نهایت، در تعریف کالاهای خطرناک باید گفت « کالاهای خطرناک به گازها، مایعات و جامداتی اطلاق می‌شود که ذاتاً یا در صورت همراه بودن با کالاهای دیگر، برای کالاهای دیگر، جان انسان‌ها یا

[2] Chlorine
[3] Ammonia
[4] Acetylene
[5] LPG
[6] White Phosphorus
[7] Corrosive

@ORchannel

محیط زیست زیان‌آور باشند» [۳]. در این تعریف باید جایگاه مواد رادیواکتیو و پرتوهای اتمی را برجسته کرد، زیرا برخلاف کالاهای خطرناک دیگر که زیان‌بار بودن آن‌ها محدود به قلمرو کاملاً محدود و خاصی است، مواد اتمی در صورت کوچک‌ترین اشتباه می‌توانند برای جامعه بشری و محیط زیست در سطح منطقه‌ای یا حتی ملی مضر باشند. بنابراین وضعیت خاص این دسته از مواد، توجه و دقت کافی در حمل و نقل آن‌ها را می‌طلبد [۸] . در تعریفی دیگر، مواد خطرناک عبارتند از مواد یا محصولاتی که موقع عملیات بارگیری، جابجایی، تخلیه یا نگهداری ممکن است باعث انفجار، آتش‌سوزی، خرابی تجهیزات فنی و یا خرابی سایر بارها و نیز مرگ و میر، جراحت، مسمومیت، سوختگی ناشی از تشعشع و یا بیماری انسان یا حیوان می‌گردند.

۱.۱.۱ طبقه بندی کالاهای خطرناک

کالاهای خطرناک بر اساس کنوانسیون حمل و نقل جاده‌ای مواد خطرناک در اروپا [۸] به ۹ طبقه اصلی به صورت زیر تقسیم می‌شوند [۴۶]:

طبقه ۱ : مواد منفجره و فرآورده‌های حاوی مواد منفجره (مانند : نیتروگلیسیرین، مواد خمپاره بدون چاشنی، باروت، نیترات اوره، نیترات آمونیوم و تری‌نیتروتولوئن[۹]).

طبقه ۲ : گازهای متراکم، مایع و یا حل شده تحت فشار (مانند : اکسیژن متراکم، آرگون متراکم، نئون متراکم، گاز طبیعی متراکم، اتان و پروپان).

طبقه ۳ : مایعات قابل اشتعال (مانند : بنزین، نفت خام، الکل‌های قابل اشتعال، پنتان مایع، اکتان‌ها، هپتان‌ها، اتانول، بوتانول‌ها، کتون‌ها و استرها).

[8] International Carriage of Dangerous Goods by Road [A.D.R]

[9] TNT

@ORchannel

طبقه ۴ : مواد جامد قابل اشتعال (مانند : نفتالین خام، گوگرد، کبریت، زغال فعال، رنگ‌های آلی حرارت‌زا، فسفر سفید یا زرد و پنبه).

طبقه ۵ : مواد سوختنی از جمله اکسیدها و پراکسیدهای آلی (مانند : دی‌بنزوئیل پر اکسید، تری متیل سیکلو هگزان، استیل استون و پراکسید).

طبقه ۶ : مواد سمی (مانند : آنیلین، بنزونیتریل، فنول جامد، نیتریل‌های سمی و سیانید هیدروژن).

طبقه ۷ : مواد رادیو اکتیو (مانند : اورانیوم طبیعی یا تهی شده یا غنی شده، هگزافلوئورید اورانیوم و توریوم فلزی).

طبقه ۸ : مواد سوزآور و خورنده (مانند : اسید سولفوریک، اسید کلریدریک، اسید استیک، اسید فسفریک، اسید نیتریک، آمونیاک، هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم).

طبقه ۹ : مواد متفرقه (مانند : باطری‌های لیتیمی، آزبست قهوه‌ای، سفید و آبی).

با توجه به تفاوت خصوصیات هر دسته، در آیین‌نامه‌های مختلف مواد خطرناک، برای هر یک از دسته‌های مواد خطرناک قوانین و دستور العمل‌های مخصوص به خود در هر یک از بخش‌های مختلف فرآیند تولید تا مصرف بیان شده‌اند. امروزه به منظور هشدار در خصوص موارد ایمنی از کارت‌ها یا برگه‌هایی موسوم به « برگه‌های اطلاعات ایمنی مواد[۱۰] » استفاده می‌گردد. این امر در گذشته بسیار نزدیک، تنها در کشورهای توسعه یافته انجام می‌شد. این کارت‌ها را می‌توان از آن‌ها به عنوان شناسنامه هر ماده یاد کرد که حاوی اطلاعات و نکاتی است که دانستن آن‌ها به هنگام بروز سانحه، برای راننده و سایر افراد حاضر در محل ضروری است. این اطلاعات شامل مشخصات فیزیکی، شیمیایی، خطرات بالقوه با حریق و نشت، مشخصات بسته‌بندی و غیره هستند که به طور خاص برای هر محصول نوشته می‌شود. این برگه‌های اطلاعات ایمنی مواد توسط عرضه‌کنندگان کالا یا کارخانه سازنده مواد آماده می‌شود.

[10] Material Safety Data Sheet (MSDT)

@ORchannel

۲.۱ تعریف مسأله

در حمل و نقل کالاهای خطرناک ارکان متعددی از قبیل تولیدکننده، حامل، شرکت های بسته‌بندی، واسطه حمل و نقل، گیرنده کالا، بیمه، دولت و اورژانس دخیل هستند که هر کدام نقش متفاوتی در حمل ایمن این مواد دارند. وجود نقش‌های مختلف از اشخاص یا شرکت‌های کوچک تا سازمان‌های بزرگ بین‌المللی ممکن است به هم‌پوشانی وظایف و گاهی عدم شفافیت وظیفه هر بخش منجر شود. سازمان‌های مختلف، اولویت و دیدگاه‌های خود را در این زمینه دارند. اگرچه دپارتمان‌های حمل و نقل و یا دولت‌های محلی مسئول تخصیص مسیرهای قابل قبولی هستند که ریسک را کاهش می‌دهد، شرکت‌های حمل کننده، عموماً به دنبال مسیرهایی با زمان سفر و سوخت پایین‌تر هستند. برخی مسیرها کوتاه‌ترند ولی از میان جمعیت بیشتری عبور می‌کنند. برخی دیگر طولانی‌ترند ولی از میان جمعیت قابل توجهی عبور نمی‌کنند و برخی مسیرها از آزادراه‌ها می‌گذرند و علی‌رغم کاهش زمان سفر می‌توانند با خطر ریسک بالای حادثه توام باشند. بنابراین حمل مواد خطرناک، یک مسأله چندهدفه و با ذینفعان متعدد است. مسأله حمل و نقل مواد خطرناک پیچیده‌تر نیز هست، زیرا حساسیت عمومی نسبت به آن بسیار بالاست [۳۶]. پیشینه جهانی وقوع پیامدهای ناگوار در حین حمل و نقل محموله‌های خطرناک نیز نشان‌دهنده لزوم تحقیق در این زمینه است.

با توجه به توضیحات فوق در واقع مسأله مورد نظر این تحقیق، بررسی مدل‌های مختلف برای مسیریابی حمل و نقل مواد خطرناک در شبکه حمل و نقل جاده‌ای با اهداف کمینه کردن ریسک و هزینه‌های حمل و نقل است و در پایان سعی در پیاده‌سازی یکی از مدل‌ها بر روی شبکه راه‌های کشور داریم. بر این مبنا پس از بررسی مدل‌ها، سوالات تحقیق به شکل زیر مطرح می‌شود:

۱- مدل ریاضی مسأله مسیریابی حمل و نقل کالاهای خطرناک در شبکه حمل و نقل جاده‌ای از چه

@ORchannel

نوعی است ؟

۲- کدام یک از اهداف مسأله (کمینه سازی ریسک و یا هزینه) می‌تواند در اولویت باشد ؟

۳- اندازه‌گیری ریسک و هزینه بر اساس چه معیارهایی انجام می‌شود ؟

۴- مدل‌های ریاضی مسأله مسیریابی حمل و نقل کالاهای خطرناک در شبکه حمل و نقل جاده‌ای چه متغیرها و چه محدودیت‌هایی دارند ؟

۵- این مسأله را به چه شیوه‌هایی می‌توان حل کرد ؟

۳.۱ ضرورت انجام تحقیق

کاربرد مواد خطرناک به عنوان مواد اولیه در صنعت‌های مختلف کشور امری غیرقابل انکار است. در اکثر موارد منابع مواد خطرناک، محل تولید آن‌ها دور از محل مصرف آن‌ها است. مثلاً نفت از مناطق حاصل‌خیز استخراج شده و به پالایشگاه حمل می‌شود. سپس بسیاری از محصولات نفتی مانند گازوئیل پس از تولید در پالایشگاه به وسیله تانکرها به محل مصرف که حتی ممکن است در کشور دیگری باشد انتقال داده می‌شود.

حمل و نقل کالاهای خطرناک را با توجه به شیوه‌های حمل و نقل می‌توان به ۵ دسته طبقه‌بندی کرد: جاده‌ای، ریلی، هوایی، آبی و لوله‌ای. البته در بعضی موارد از چند شیوه حمل و نقل استفاده می‌شود. آمار نشان می‌دهد که سهم حمل و نقل جاده‌ای از شیوه‌های دیگر بیشتر است. بر اساس گزارشات سازمان حمل و نقل ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۹۸، روزانه حدود ۸۰۰,۰۰۰ محموله از طریق حمل و نقل جاده‌ای در ایالات متحده آمریکا جابه‌جا می‌شود و از هر ۵ کامیون در حال حرکت در بزرگ‌راه‌های این کشور یک

@ORchannel

کامیون حاوی مواد خطرناک است [۵۸]. بر اساس گزارش کالاهای عبوری از کشورمان ایران که توسط سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای ارایه شده است، طی ۸ ماهه اول سال ۱۳۹۰ بیش از ۶۲۰۳ هزار تن کالا از کشور ترانزیت شده که ۹۱ درصد آن از طریق جاده و ۹ درصد آن از طریق خطوط ریلی انجام شده است که ۳۰/۶ درصد این کالاها را مواد سوختی تشکیل داده‌اند [۶].

جدول ۱.۱: میزان ترانزیت کالاهای نفتی و غیر نفتی از مرزهای کشور طی ۸ ماهه اول سال ۱۳۹۰ (تن) [۶]

نوع عبور مواد	نفتی	غیر نفتی	جمع
جاده به جاده	۲۰۷۱۰۵	۱۱۲۰۳۰۸	۱۳۲۷۴۱۳
جاده به دریا	۱۴۱۶۵۱۶	۱۲۴۲۸۹	۱۵۴۰۸۰۵
دریا به جاده	۱۹۱۹۴۳	۲۲۳۸۳۷۰	۲۴۳۰۳۱۳
دریا-جاده-دریا	۲۶۳۰۲	۳۸۴۹۳۱	۴۱۱۲۳۳
راه‌آهن	۸۳۹۳۲	۵۰۹۵۸۵	۵۹۳۵۱۷
جمع	۱۹۲۵۷۹۸	۴۳۷۷۴۸۳	۶۳۰۳۲۸۱

با بررسی و نگاهی به آمارهای تاریخی می‌توان دریافت با این‌که تعداد تصادفات مربوط به حمل و نقل مواد خطرناک از دیگر بخش‌ها کمتر است، اما میزان خسارت‌های این حوادث بسیار قابل‌توجه و گاه فاجعه آمیز است و به همین دلیل تصادفات حمل و نقل مواد خطرناک، به عنوان حوادث (احتمال کم ولی عواقب زیاد[11]) خوانده می‌شود. بر اساس گزارش وزارت حمل و نقل ایالات متحده آمریکا[12] در سال ۲۰۱۳، ۱۵۷۷۴ حادثه مربوط به حمل و نقل مواد خطرناک وجود دارد که حدود ۲۶/۵ درصد آن‌ها در

[11] Low Probability High Consequence

[12] USDOT

@ORchannel

مرحله حمل و نقل بوده است. جدول ۲.۱ حوادثی که در سال ۲۰۱۳ در مراحل مختلف حمل و نقل در ایالات متحده آمریکا اتفاق افتاده است را نشان می‌دهد [۵۰].

جدول ۲.۱: خلاصه حوادث حمل و نقل مواد خطرناک در ایالات متحده آمریکا در سال ۲۰۱۳ [۵۰]

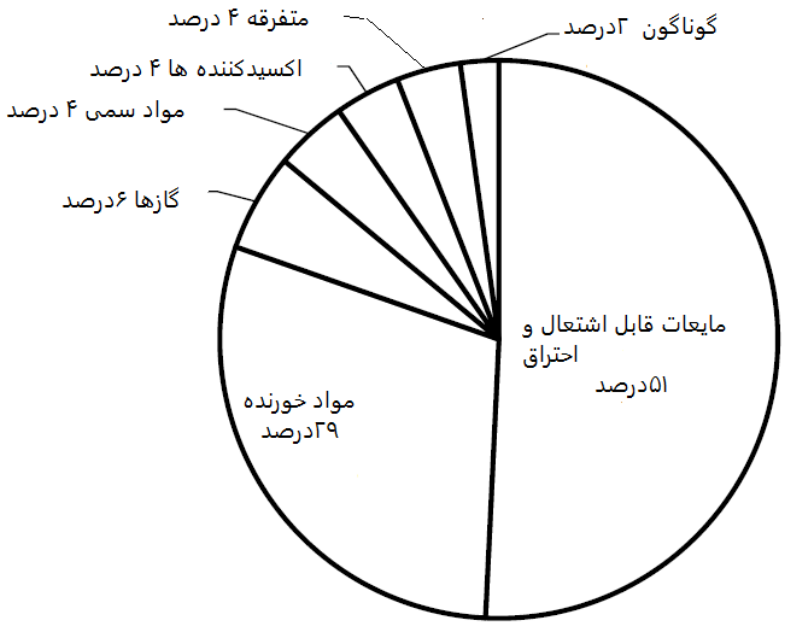
مرحله حمل‌ونقل	تعداد کل حوادث	تعداد کل افراد بستری	تعداد کل تلفات	کل خسارت (دلار)
حمل و نقل	۴۱۸۴	۱۱	۹	۶۷۰۵۶۵۱۷
ذخیره برای حمل	۴۸۳	۸	۰	۵۶۲۳۰۶
بارگیری	۳۳۵۰	۳	۱	۲۸۳۶۱۱۸
تخلیه	۷۷۵۷	۵	۰	۴۵۴۸۷۳
کل	۱۵۷۷۴	۲۷	۱۰	۷۰۹۰۹۸۱۴

شکل ۱.۱، حوادث مربوط به حمل و نقل مواد خطرناک در ایالات متحده آمریکا بر اساس دسته‌بندی مواد خطرناک را از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ نشان می‌دهد [۵۰]. قابل توجه است که مایعات قابل اشتعال–قابل احتراق و مواد خورنده بخش عمده حوادث را در طول این دوره به خود اختصاص داده‌اند.

مثال‌های زیادی از حوادث فاجعه آمیز مربوط به حمل و نقل مواد خطرناک در دنیا وجود دارد از جمله انفجار تانکر پروپان در ۱۱ ژولای ۱۹۷۸ در اسپانیا که سبب کشته شدن ۲۱۷ نفر و زخمی شدن ۲۰۰ نفر گردید [۴۴]. سقوط تانکر حامل سوخت از روی پل ویلتال [۱۳] در آلمان در تاریخ ۲۶ آگوست ۲۰۰۴ که حامل ۳۲۰۰۰ لیتر سوخت بود و پس از سقوط منفجر شد و خسارت ۳۵۸ میلیون دلاری بابت تعمیر و ساخت پل جدید را داشت که جزو پرخرج‌ترین حوادث دنیا به شمار می‌آید [۴۵]. در کشورمان ایران نیز به نمونه‌هایی از این حوادث می‌توان اشاره کرد از جمله فاجعه قطار نیشابور در بهمن ماه سال ۱۳۸۲ که سبب

[13] Wiehltal

@ORchannel



شکل ۱.۱: میزان حوادث در طی حمل و نقل مواد خطرناک بر اساس طبقه‌بندی این مواد. مرجع [۵۰]

کشته شدن ۲۹۵ نفر و زخمی شدن ۴۶۰ نفر از هموطنان عزیزمان شد. بزرگی این حادثه به حدی بود که در محل حادثه گودالی به عمق ۲۵ متر ایجاد گردید و شعاع این حادثه تا فاصله ۷۰ کیلومتری آن را تحت تاثیر قرار داد [۴۲].

۴.۱ اهداف تحقیق

هدف اصلی این تحقیق، این است که مسیرهایی با حداکثر ایمنی به منظور جلوگیری از حوادث جاده‌ای ناشی از حمل و نقل مواد خطرناک و با توجه به اقتصادی بودن این مسیرها، شناسایی و به کار گرفته شود و این منجر به ارایه مسأله مسیریابی حمل و نقل مواد خطرناک با اهداف کمینه سازی ریسک و هزینه‌های حمل و نقل می‌گردد. چند نکته برای فرمول بندی این مسأله وجود دارد که بررسی آن‌ها از

@ORchannel

اهداف این تحقیق است. اولاً پارامترهای تاثیرگذار در تعیین ریسک و هزینه مسیرهای حمل و نقل مواد خطرناک متفاوت هستند و در نتیجه باید به بررسی و تعیین این پارامترها بپردازیم. ثانیاً بین اهداف کمینه سازی ریسک و هزینه مسیرهای موردنظر برای حمل و نقل مواد خطرناک عموماً تناقض وجود دارد، در نتیجه باید الگوی مناسبی برای اولویت‌بندی ریسک و هزینه در هر مدل اتخاذ شود که منجر به تعیین مسیر مناسب برای حمل و نقل مواد خطرناک شود. ثالثاً با اجرای یکی از مدل‌های ارایه شده در این تحقیق روی شبکه جاده‌های کشور به کارایی عملی مدل روی شبکه جاده‌های بزرگ برای این مسأله می‌پردازیم. با توجه به موارد فوق جمع‌بندی اهداف را می‌توان به این صورت بیان نمود که پارامترهای اصلی در این زمینه شناسایی شده و پس از اولویت بندی آن‌ها، مدل‌های ریاضی و روش حل آن‌ها با ساختاری ارایه گردد که ضمن رعایت مسایل مرتبط با ریسک حوادث مرتبط با حمل و نقل مواد خطرناک، هزینه‌های مرتبط با مسیر حمل و نقل نیز در نظر گرفته شود تا یک مدل کاربردی در این زمینه ارایه شود.

@ORchannel

فصل ۲

ادبیات موضوع مربوط به حمل و نقل مواد خطرناک

تقریباً از اواخر دهه ۱۹۷۰، حمل و نقل مواد خطرناک مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت و تا کنون مطالعات زیادی در این زمینه صورت گرفته است. انواع مسایل حمل و نقل مواد خطرناک که پژوهشگران به بررسی آن پرداخته‌اند شامل موارد زیر است [۱۷]:

- ارزیابی ریسک،
- مسیریابی و زمان‌بندی حمل و نقل مواد خطرناک،
- طراحی شبکه حمل و نقل،
- مکانیابی تسهیلات خطرناک.

@ORchannel

۱.۲ ریسک

ریسک مهم‌ترین عاملی است که مسایل حمل و نقل مواد خطرناک را از دیگر مسایل حمل و نقل تفکیک می‌کند. در حمل و نقل مواد خطرناک، به محاسبه احتمال و شدت آسیب به گیرنده در معرض خطر، از طریق حوادث ناخواسته ناشی از حمل و نقل مواد خطرناک، ریسک گفته می‌شود. گیرنده در معرض خطر، می‌تواند یک شخص، محیط یا ویژگی‌های محیطی همسایگی حادثه باشد و حادثه ناخواسته در واقع انتشار مواد خطرناک بر اثر تصادف است. انتشار مواد خطرناک پیامدهایی دارد از جمله می‌تواند تاثیراتی بر روی سلامتی اشخاص (مرگ، جراحت یا اثرات طولانی مدت به علت در معرض مواد خطرناک قرار گرفتن) یا از دست دادن اموال، اثرات زیست محیطی مانند آلودگی خاک یا اثراتی بر روی سلامتی گیاهان و جانوران یا تخلیه جمعیت نزدیک حادثه در پیش بینی از خطر قریب‌الوقوع و توقف ترافیک در طول مسیر داشته باشد [۱۳].

در حالت کلی، دو نوع ریسک شامل ریسک فردی و اجتماعی داریم. ریسک فردی عبارت است از این‌که در همه مدتی که شخص در معرض خطر در موقعیتی ویژه قرار دارد، ریسک در یک نقطه معین و فقط برای او اندازه‌گیری شود. این ریسک به طور کلی به منبع ریسک وابسته است، در حالی که ریسک اجتماعی رابطه بین فراوانی یک حادثه و تعداد افراد صدمه‌دیده را نشان می‌دهد و به عبارتی دیگر، ریسک برای جمعی از افراد اندازه‌گیری می‌شود [۷].

ارزیابی ریسک می‌تواند به دو صورت کیفی و کمّی انجام شود. ارزیابی کیفی ریسک[1] با شناسایی حالات تصادف ممکن و تلاش برای برآورد نتایج نامطلوب، سر و کار دارد و اغلب زمانی استفاده می‌شود که اطلاعات قابل اعتماد کمّی برای برآورد دقیق احتمال و شدت حوادث وجود ندارد و در واقع هدف از آن تنها شناسایی حوادث محتمل و یا حوادث بسیار آسیب‌زا و تمرکز بر آن‌ها است [۳۴]. در این روش، از

[1] Qualitative risk assessment

@ORchannel

کلمات کلیدی یا عبارات توصیفی برای نشان دادن بزرگی پیامدهای ممکن و احتمال رخداد آن‌ها استفاده می‌شود. ارزیابی کیفی ریسک بر اساس تجربه و مهارت‌های شخصی کارشناسان و مهندسان در این زمینه صورت می‌گیرد.

۱.۱.۲ ارزیابی کمّی ریسک

ارزیابی کمّی ریسک[۲] ، ارزیابی عددی از ریسک است. زبان ارزیابی کمّی ریسک زبان تجزیه و تحلیل فراوانی‌ها و نتایج است و بر خلاف تجزیه و تحلیل کیفی ریسک، منجر به ارزیابی عددی از ریسک می‌شود و شامل مراحل زیر است [۳۶]:

۱. خطر و شناسایی گیرنده در معرض خطر،

۲. تجزیه و تحلیل فرکانس و فراوانی حوادث و پیامدها،

۳. مدل‌سازی پیامد و محاسبه ریسک.

شناسایی خطر، شناسایی منابع بالقوه‌ای از انتشار آلاینده در محیط، نوع (به عنوان مثال تابش حرارتی، انفجار، پرتاب قطعات از فلزات یا اشیاء دیگر به علت موج انفجار و ابر سمی) و مقدار ترکیباتی که ساطع می‌شود و اثرات بالقوه هر ماده بر سلامتی و ایمنی است. در برخی موارد، مانند انتشار مواد سرطان‌زا در اثر یک تصادف در حین حمل و نقل مواد خطرناک نیاز به بررسی تاثیرات طولانی مدت بر سلامت افراد و محیط زیست داریم. بررسی ریسک های مرتبط با انواع مختلف دریافت کننده در معرض، نیز ضروری است.

[2] Quantitative risk assessment

@ORchannel

۱.۱.۱.۲ تجزیه و تحلیل فراوانی

تجزیه و تحلیل فراوانی شامل موارد زیر است [۳۶]:

۱. تعیین احتمالی از یک حادثه نامطلوب،

۲. تعیین سطحی از پتانسیل گیرنده در معرض خطر با توجه به نوع حادثه،

۳. تخمین درجه‌ای از شدت حادثه (مرگ و میر، صدمات، آسیب به اموال).

هرمرحله از این تخمین احتیاج به محاسبه یک توزیع احتمال دارد. موارد ۲ و ۳ نیاز به محاسبه توزیع شرطی دارد. با در نظر گرفتن یک بخش جاده و با فرض A حادثه تصادف روی این بخش جاده، M حادثه انتشار و I نوع انتشار و با این فرض که انتشار مواد خطرناک موجب آسیب دیدن تعدادی از افراد شود و D صدمه دیدن یک فرد در اثر انتشار مواد خطرناک به دلیل یک تصادف در طی حمل و نقل مواد خطرناک در این بخش جاده باشد، آنگاه احتمال آسیب یک فرد در اثر یک تصادف مربوط به حمل و نقل مواد خطرناک برابر است با [۳۶]:

$$P(A,M,I,D) = P(D|A,M,I) \times P(A,M,I) = P(D|A,M,I) \times P(I|A,M) \times P(A,M)$$

$$= P(D|A,M,I) \times P(I|A,M) \times P(M|A) \times P(A)$$

که در آن:

$P(A)$: احتمال این‌که حادثه A در طول حمل مواد خطرناک در یک بخش جاده اتفاق بیفتد،

$P(M|A)$: احتمال شرطی وقوع حادثه انتشار M به شرط این‌که حادثه A روی یک بخش جاده اتفاق بیفتد،

$P(I|A,M)$: احتمال شرطی وقوع انتشار نوع I به شرط وقوع حادثه انتشار M در اثر حادثه A روی یک بخش جاده،

@ORchannel

$P(D|A,M,I)$: احتمال شرطی صدمه دیدن یک فرد به شرط وقوع یک حادثه انتشار نوع I در اثر حادثه انتشار M در طی یک حادثه A روی یک بخش جاده.

با توجه به این‌که هر مسیر از مبدا تا مقصد شامل تعداد متناهی بخش جاده است، اگر S_{lm} تعداد محموله‌های موادخطرناک نوع m روی بخش جاده l باشد، آنگاه $S_{lm} \times P_l(A,M_m,D)$ فراوانی از وقوع حادثه انتشار مواد خطرناک است که خطر فردی را برای یک شخص در همسایگی بخش جاده l به‌دست می‌آورد. حوادث مربوط به حمل و نقل مواد خطرناک، معمولاً تعدادی از افراد را که در همسایگی حادثه قرار دارند تحت تاثیر قرار می‌دهد و در نتیجه احتیاج به محاسبه خطر اجتماعی داریم. ساده‌ترین روش برای محاسبه خطر اجتماعی، محاسبه تعداد افراد تحت تاثیر در اطراف کمان حادثه ضرب در احتمال تاثیر در هر فرد است. از این رو خطر اجتماعی در بخش جاده l را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد :

$$R_{lm} := S_{lm} \int\int_L P_l(D_{xy}|A,M_m,I) \times P_l(I|A,M_m) \times P_l(M_m|A) \times P_l(A) \times pop_l(x,y)dxdy$$

که $P_l(D_{xy}|A,M_m,I)$ احتمال این است که افراد در مکان (x,y) منطقه تاثیر L در اثر حادثه‌ای از حمل موادخطرناک روی بخش جاده l بمیرند، و $pop_l(x,y)$ تراکم جمعیت در مکان (x,y) در همسایگی بخش جاده l است. با این فرض که هر فرد در همسایگی حادثه تحت تاثیر خطر یکسان (مردن) قرار دارد، R_{lm} را می‌توان به صورت ساده شده زیر نوشت:

$$R_{lm} := S_{lm} \times P_l(D|A,M_m,I) \times P_l(I|A,M_m) \times P_l(M_m|A) \times P_l(A) \times pop_l$$

بنابراین، اگر تراکم جمعیت در همسایگی حادثه کم باشد، آنگاه ریسک اجتماعی بسیار پایین و نزدیک به صفر است در حالی که ریسک فردی هم‌چنان بالا است. ممکن است بیش از یک نوع حادثه در طی حمل مواد خطرناک رخ بدهد، به عنوان مثال، انتشار مایع قابل انتشار می‌تواند منجر به انواع حوادث مانند نشت، آتش‌سوزی یا انفجار شود. فرض کنید $\mathcal{A}$، $\mathcal{M}$، $\mathcal{I}$ و $\mathcal{C}$ نشان‌دهنده مجموعه‌ای از تصادفات احتمالی، انتشار، حوادث و نتایجی که ممکن است در بخش جاده l اتفاق بیفتد باشد، آنگاه ریسک حمل و نقل مواد

@ORchannel

خطرناک مرتبط با بخش جاده l را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۳۶]:

$$R_l := \sum_{a\in\mathcal{A}}\sum_{m\in\mathcal{M}}\sum_{i\in\mathcal{I}}\sum_{c\in\mathcal{C}} S_{lm} \times P_l(A_a, M_m, I_i, C_c) \times CONS_c$$

که $CONS_c$ عواقب ممکن حادثه نوع c است. معمولاً با در نظر گرفتن نتیجه مورد انتظار یا بدترین حالت مورد انتظار، احتمال‌های شرطی نادیده گرفته می‌شوند. نتیجه مورد انتظار از حاصلضرب احتمالی از یک حادثه انتشار مواد خطرناک در حین حمل و نقل این مواد در عواقب این حادثه به‌دست می‌آید [۵۱]، در نتیجه ریسک حمل و نقل مواد خطرناک مرتبط با بخش جاده l را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد :

$$R_l := \sum_{m\in\mathcal{M}} S_{lm} \times P(M_m) \times C_{lm}$$

که در آن C_{lm} نتیجه نامطلوب به دلیل انتشار مواد خطرناک m بر روی بخش جاده l است. گاهی اوقات به این ریسک، ریسک فنی[۳] نیز می‌گویند.

از بحث فوق واضح است که محاسبه کمّی ریسک به شدت به تخمین از احتمال‌ها وابسته است. برای تخمین احتمال‌ها دو ابزار اصلی فراوانی گذشته[۴] و روش‌های مبتنی بر نمودار منطقی[۵] (درخت خطا[۶] و تجزیه و تحلیل درخت رخداد[۷]) وجود دارد.

۲.۱.۱.۲ فراوانی گذشته

با استفاده از اطلاعات و ارقام تاریخی در این زمینه می‌توان احتمال‌ها بحث شده در بخش قبل را محاسبه نمود. به عنوان مثال با استفاده از تعداد تصادفات در حین حمل مواد خطرناک در یک مدت زمان مشخص در یک بخش جاده و کل مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه حامل موادخطرناک در همان دوره زمانی،

[3] Technical risk

[4] Historical frequencies

[5] Logical diagram-based techniques

[6] Fault tree

[7] Event tree analysis

@ORchannel

می‌توان نرخ تصادفات در یک بخش جاده (حوادث در هر کیلومتر) را محاسبه نمود. با استفاده از درصد تصادفاتی که منجر به انتشار مواد خطرناک m می‌شود، می‌توان $P_l(M_m|A)$ را محاسبه نمود. به طور مشابه با استفاده از اطلاعات تاریخی می‌توان $P_l(I|A,M_m)$ و $P_l(D|A,M_m,I)$ را محاسبه نمود. با این حال، وقوع یک تصادف ممکن است تحت تاثیر عوامل درونی ازجمله تونل‌ها، پل‌های راه‌آهن، هندسه جاده، شرایط آب و هوایی و عوامل انسانی و هم‌چنین عوامل دیگر مرتبط با شرایط ترافیکی مانند حجم ترافیک و دفعات حمل مواد خطرناک باشد، در نتیجه برای استفاده از داده‌ها و اطلاعات تاریخی باید ابتدا تجزیه و تحلیل دقیقی انجام شود، اما از طرفی با توجه به کمبود اطلاعات در این زمینه، استفاده از این روش همیشه امکان‌پذیر نیست.

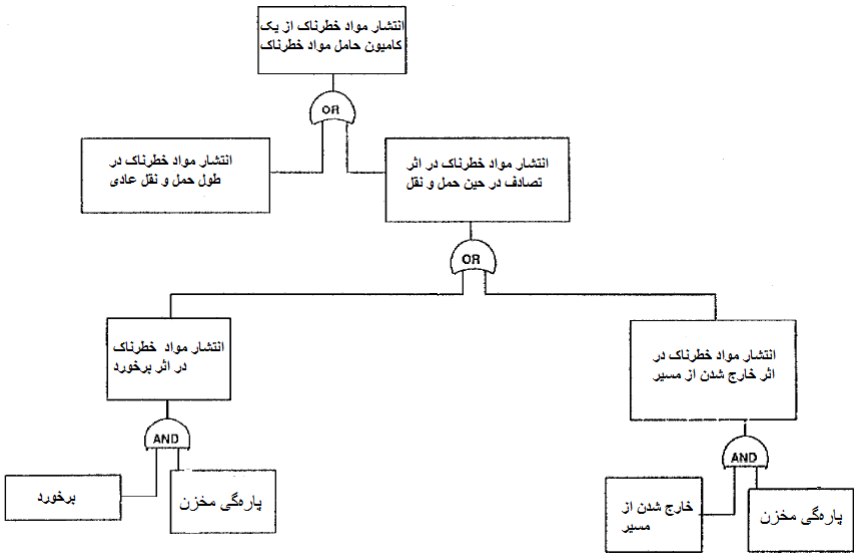
۳.۱.۱.۲ تکنیک‌های نمودار منطقی

یک راه جایگزین برای برآورد فراوانی و عواقب ممکن حوادث انتشار مواد خطرناک در حین حمل مواد خطرناک استفاده از تکنیک‌های نمودار منطقی یعنی درخت خطا و درخت رخداد است.

۴.۱.۱.۲ تجزیه و تحلیل درخت خطا

تجزیه و تحلیل درخت خطا یک ابزار تجزیه و تحلیل با رویکرد قیاسی، یعنی رسیدن از کل به جز برای شناسایی علل حوادث و تعیین سناریوهای مختلف حادثه‌ای که باعث شکست سیستم است. این روش با شروع از شناسایی خطر (به عنوان مثال انتشار گاز کلر به علت تصادف در حین حمل و نقل مواد خطرناک) به عنوان ریشه یک درخت برای تعیین علل احتمالی آن (به عنوان مثال برخورد شدید در اثر تصادف یا خارج شدن از مسیر) با استفاده از دو تابع منطقی OR و AND به عقب بر می‌گردد.

@ORchannel



شکل ۱.۲: نمونه‌ای از یک درخت خطا [۳۶].

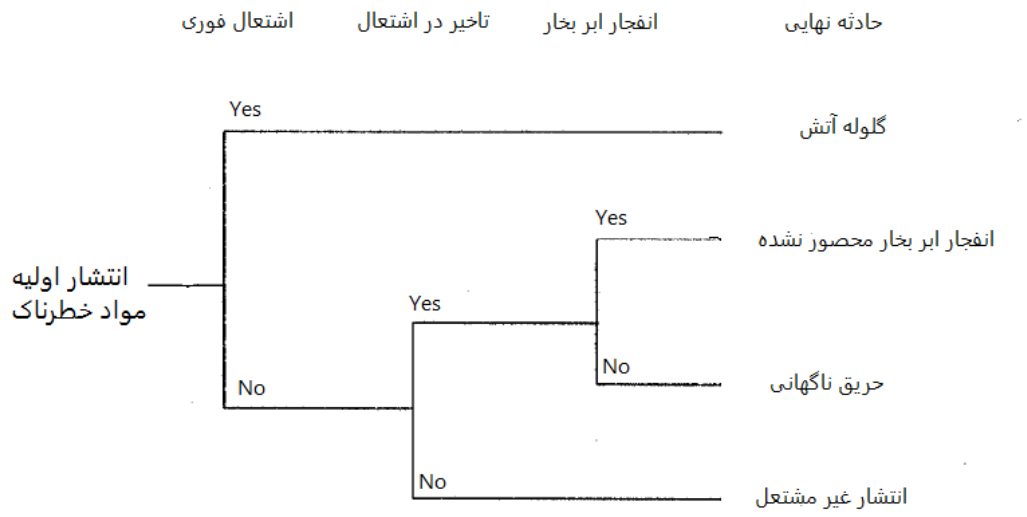
۵.۱.۱.۲ تجزیه و تحلیل درخت رخداد

درخت رخداد ساختار درختی با شاخه‌های در حال توسعه از چپ به راست دارد. درخت رخداد یک ابزار تجزیه و تحلیل رسیدن از جز به کل است و با شروع از حادثه‌ای که می‌تواند سیستم را تحت تاثیر قرار بدهد (به عنوان مثال، انتشار اولیه مواد خطرناک) سعی در پیش‌بینی حالات مختلفی که ممکن است در اثر این حادثه اتفاق بیفتد را دارد. هر شاخه از این درخت دودویی است به عنوان مثال، یا حادثه‌ای رخ می‌دهد یا رخ نمی‌دهد. با اختصاص یک احتمال به هر شاخه احتمال‌هایی از هر نتیجه ممکن بعد از واقعه آغازگر می‌تواند تعیین شود.

۶.۱.۱.۲ مدل‌سازی پیامد و محاسبه ریسک

مدل‌سازی پیامد با استفاده از مدل‌سازی منطقه تاثیر انجام می‌شود. در اثر تصادف در حین حمل و نقل مواد خطرناک عواقب نامطلوب بسیاری مانند زیان‌های اقتصادی، صدمات، آلودگی محیط زیست، آسیب

@ORchannel



شکل ۲.۲: نمونه‌ای از یک درخت رخداد [۳۶].

به حیات وحش و مرگ و میر وجود دارد. منطقه تاثیر، به منطقه‌ای در همسایگی مسیر حمل و نقل مواد خطرناک گفته می‌شود که افراد، محیط زیست، اموال و دارایی‌های افراد در این منطقه در اثر حمل و نقل مواد خطرناک در معرض خطر است. شکل و اندازه منطقه تاثیر به عوامل متعددی از جمله نوع ماده خطرناک، توپولوژی، آب و هوا، سرعت و جهت باد در آن منطقه بستگی دارد. برآورد و تخمین منطقه تاثیر کار دشواری است. رایج‌ترین تقریب از منطقه تاثیر، مدل دایره خطر است که معمولاً با توجه به نوع ماده خطرناک شعاع دایره تعیین می‌شود و با حرکت دایره خطر در طول یک قطعه از مسیر بین دو گره، تقریبی از پهنای باند ثابت به‌دست می‌آید و با برش بخش‌هایی از دو طرف دایره، تقریب مستطیلی منطقه تاثیر به‌دست می‌آید. فرض اصلی در مدل منطقه تاثیر بر این است که هر فرد در منطقه تاثیر به یک اندازه تحت تاثیر حادثه حمل مواد خطرناک است و در خارج از منطقه تاثیر هیچ فردی تحت تاثیر حادثه حمل و نقل مواد خطرناک قرار ندارد.

@ORchannel

مدل سازی منطقه تاثیر را با استفاده از مراکز جمعیت نیز می‌توان انجام داد، منظور از مراکز جمعیت ساختمان های مسکونی، مدارس، بیمارستان‌ها، مراکز خرید و ادارات است. به عنوان مثال، اگر یک مرکز جمعیت به عنوان یک نقطه در صفحه در نظر گرفته شود که همه‌ی ساکنان در مرکز جمعیت به یک اندازه از حوادث حمل مواد خطرناک روی یک بخش جاده نزدیک این مرکز جمعیت، تحت تاثیر هستند، تاثیر روی این نقاط تجمع، بستگی به فاصله بین نقطه و محل حادثه دارد. با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی[۸] (GIS) می‌توان از توزیع فضایی چگالی جمعیت که دقیق‌تر از استفاده از نقاط تجمع است، استفاده کرد [۳۶].

۷.۱.۱.۲ مدل گاوسی

در مدل‌های منطقه تاثیر ذکر شده پهنای باند ثابت فرض می‌شود اما چون عواقبی از یک حادثه به غلظت آلاینده‌های موجود در هوا بستگی دارد و سرعت و جهت باد روی پراکندگی آلاینده‌های موجود در هوا تاثیر می‌گذارد، بنابراین ممکن است برآورد منطقه تاثیر با استفاده از رسم یک باند با عرض ثابت اطراف کمان جاده نادرست باشد. غلظت آلاینده‌های موجود در هوا علاوه بر سرعت و جهت باد به فاصله از منبع آلودگی نیز بستگی دارد. غلظت مواد آلاینده در نزدیکی منبع آلاینده بیشتر است. برای برآورد پراکندگی آلاینده‌های موجود در هوا در اثر یک حادثه حمل و نقل موادخطرناک می‌توان از مدل گاوسی[۹] استفاده کرد [۳۶]. در مدل گاوسی فرض‌های زیر در نظر گرفته می‌شود:

۱. خواص شیمیایی گاز در طول پراکندگی تغییر نمی‌کند،

۲. زمین بدون مانع و مسطح است،

[8] Geographical Information System (GIS)

[9] Gaussian plume model

@ORchannel

۳. سطح زمین گاز را جذب نمی‌کند،

۴. سرعت وجهت باد در طول پراکندگی ثابت است،

۵. نرخ انتشار گاز ثابت است.

طبیعتاً این فرض‌ها استفاده از مدل گاوسی را محدود می‌کند. فرمول‌بندی مدل گاوسی به صورت زیر است:

$$C(x,y,z,he) := \frac{Q}{۲\pi\mu\sigma_y\sigma_z} exp\left(-\frac{۱}{۲}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^۲\right) \times \left[exp\left(-\frac{۱}{۲}\left(\frac{z-he}{\sigma_z}\right)^۲\right) + exp\left(-\frac{۱}{۲}\left(\frac{z+he}{\sigma_z}\right)^۲\right)\right]$$

در این مدل C، میزان غلظت مواد منتشر شده (بر حسب گرم بر متر مکعب)، x، y و z مختصات نقطه‌ای که می‌خواهیم غلظت آلاینده را در آن محاسبه کنیم (بر حسب متر)، he ارتفاع منبع انتشار آلاینده (بر حسب متر)، Q نرخ انتشار آلاینده (بر حسب گرم بر ثانیه)، μ میانگین سرعت باد (بر حسب متر بر ثانیه)، σ_y و σ_z پارامترهای پراکندگی در فاصله y و z (بر حسب متر) است. σ_y و σ_z تابعی از x است و روش‌های مختلفی برای محاسبه آن بر حسب x وجود دارد. یکی از این روش‌ها استفاده از نمودارهای تجربی ۳.۲ و ۴.۲ است که بر اساس طبقه‌بندی شرایط آب و هوایی است [۶۰]. طبقه‌بندی شرایط آب و هوایی با در نظر گرفتن سرعت باد سطحی، میزان تابش نور خورشید در طول روز و شرایط آب و هوایی در شب به صورت جدول ۱.۲ انجام می‌شود. در این جدول نمادها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

A: شرایط بسیار ناپایدار

B : شرایط نسبتاً ناپایدار

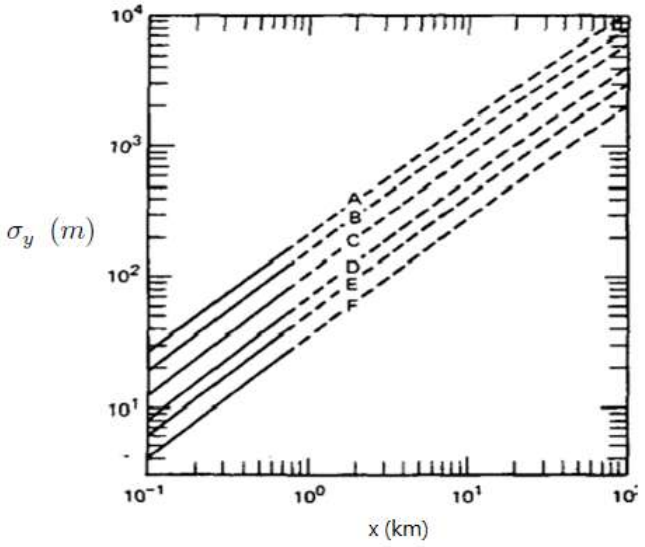
C : شرایط کمی ناپایدار

D : شرایط خنثی

@ORchannel

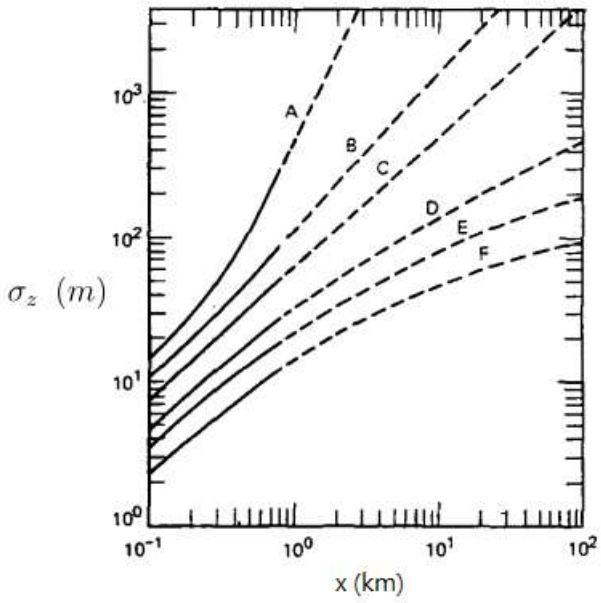
E : شرایط کمی پایدار

F : شرایط نسبتاً پایدار



شکل ۳.۲: پارامتر پراکندگی در فاصله y بر حسب x [۶۰].

@ORchannel



شکل ۴.۲: پارامتر پراکندگی در فاصله z بر حسب x [۶۰].

در انتشار مواد خطرناک در یک حادثه حمل و نقل معمولاً فرض می‌شود که منبع آلایندگی روی زمین قرار دارد یعنی $he = ۰$ و معمولاً می‌خواهیم سطح غلظت روی زمین را محاسبه کنیم، یعنی $z = ۰$ بنابراین فرمول مدل گاوسی در این حالت به صورت زیر ساده می‌شود:

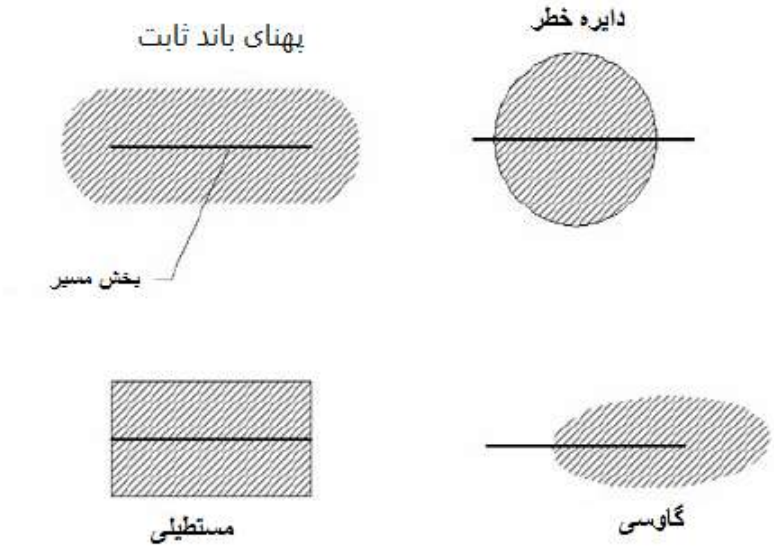
$$C(x, y, z, he) = C(x, y) := \frac{Q}{\pi \mu \sigma_y \sigma_z} exp\left(-\frac{۱}{۲}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^۲\right)$$

نرخ انتشار Q، به حجم ظرف، نوع ماده خطرناک و قطر قسمتی که گازهای خطرناک از آن قسمت پخش می‌شوند بستگی دارد [۳۶]. شکل ۵.۲ مدل‌های مختلف منطقه تاثیر را نشان می‌دهد.

@ORchannel

جدول ۱.۲: طبقه‌بندی شرایط آب و هوایی

سرعت باد سطحی (m/s)	تابش در طول روز			شرایط در شب	
	شدید	متوسط	اندک	صاف یا اندکی ابری	ابری
< ۲	A	$A-B$	B		
۲	$A-B$	B	C	E	F
۴	B	$B-C$	C	D	E
۶	C	$C-D$	D	D	D
> ۶	C	D	D	D	D



شکل ۵.۲: مدل‌های مختلف منطقه تاثیر [۳۶].

@ORchannel

۲.۱.۲ ریسک مسیر

مسیر P، بین مبدا و مقصد برای ارسال محموله‌های خطرناک، مجموعه‌ای از کمان‌ها وجود دارد که سفر بر روی این مسیر انجام می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶.۲ نشان داده شده است، یک حامل مواد خطرناک در طول iامین کمان مسیر P سفر خواهد کرد، اگر حادثه‌ای برای آن در کمان $(i-۱)$ام مسیر اتفاق نیفتد. با فرض این‌که مسیر موردنظر، n کمان دارد و هر کمان طولی برابر یک واحد دارد، n نشان‌دهنده طول واحد مسیر نیز خواهد بود. ریسک مورد انتظار در مسیر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R(P) = P_۱.C_۱ + \sum_{i=۲}^{n} \prod_{j=۱}^{i-۱} (۱ - P_j).P_i.C_i$$

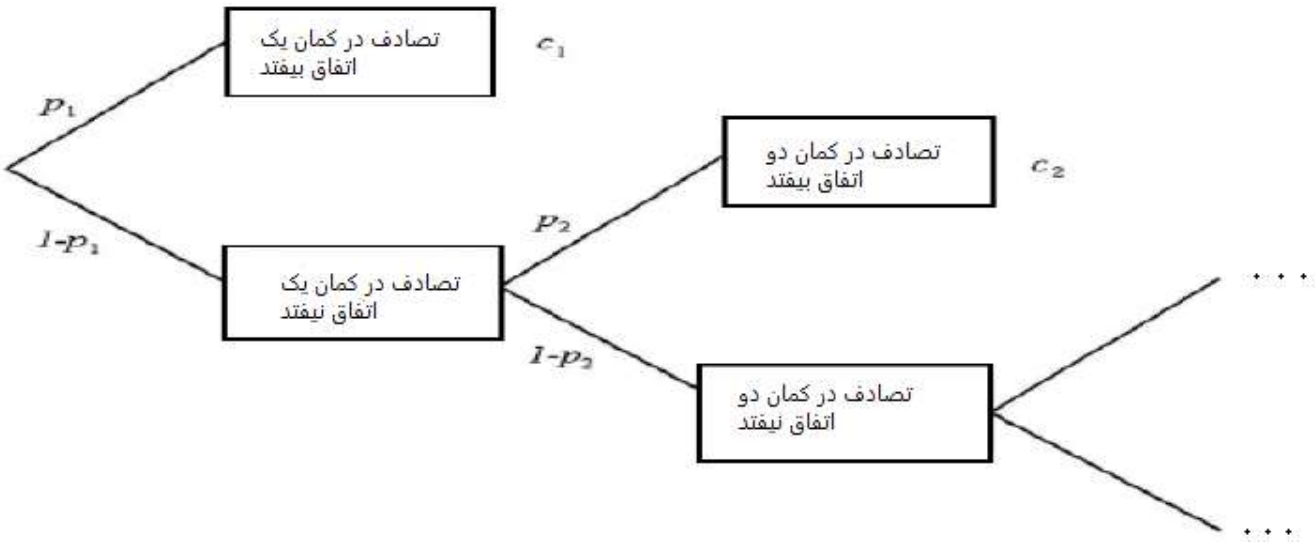
که در آن P_i، احتمال وقوع یک حادثه انتشار مواد خطرناک در اثر تصادف در حین حمل مواد خطرناک روی کمان iام و C_i، پیامدی از یک حادثه انتشار مواد خطرناک روی کمان iام است. $\prod_{j=۱}^{i-۱}(۱ - P_j).P_i.C_i$ احتمال رسیدن به iامین کمان مسیر است. به دلیل این‌که احتمال تصادف در حین حمل مواد خطرناک بسیار کم است و در نتیجه با فرض این‌که برای همه‌ی کمان‌های i و j داشته باشیم $P_i.P_j \approx ۰$، آن‌گاه می‌توانیم یک رابطه خیلی ساده برای ریسک مسیر به صورت زیر به دست آوریم:

$$R(P) = \sum_{i=۱}^{n} P_i.C_i$$

این مدل اغلب مدل سنتی ریسک[۱۰] نامیده می‌شود که ساده بوده و توجیه آن آسان است و به راحتی در مدل‌های بهینه‌سازی به کار می‌رود. به همین دلیل در بسیاری از مقالات مربوط به حمل مواد خطرناک از این مدل برای محاسبه ریسک استفاده شده است [۳۷].

[10] Traditional risk model

@ORchannel



شکل ۶.۲: احتمال بروز حادثه در مسیر [۳۷].

۳.۱.۲ هزینه ریسک

در برآورد هزینه ریسک ناشی از نشت مواد خطرناک در اثر تصادف در حین حمل مواد خطرناک، مسایل مختلفی باید مورد توجه قرار بگیرد [۳۶]. پیامدهادر بحث هزینه می‌توانند به صورت زیر طبقه‌بندی شوند:

- جراحت‌ها و مرگ و میر
- خسارت به اموال
- تخلیه ساکنین
- تاخیرات ترافیکی
- هزینه‌های پاکسازی
- از دست دادن مواد خطرناک

@ORchannel

- آسیب‌های محیط زیست

تمام تاثیرات باید هم واحد شوند تا امکان مقایسه و هم‌چنین محاسبه هزینه کلی آسیب‌ها فراهم شود [۵۶].

۲.۲ مسیریابی کالاهای خطرناک

در حمل و نقل یک محموله خطرناک از یک مبدا به یک مقصد ممکن است مسیرهای مختلفی وجود داشته باشد، هر یک از مسیرها دارای خصوصیات جغرافیایی و شرایط خاص خود هستند. برای انتخاب مسیر حمل و نقل، فاکتورهای گوناگونی از جمله هزینه، طول و زمان سفر می‌تواند نقش داشته باشد. فرآیند مسیریابی عبارت است از شناسایی و ارزیابی معیارهایی که باعث ارجحیت یک مسیر نسبت به مسیرهای دیگر شده و انتخاب بهترین مسیر بر اساس این معیارها [۵]. وزارت حمل و نقل ایالات متحده آمریکا[۱۱] معیارهای موثر برای انتخاب مسیر بهینه تردد وسایل نقلیه حامل مواد خطرناک را ۱۳ مورد ذکر کرده است [۴۳]. این معیارها در جدول ۲.۲ آورده شده‌اند.

روش‌های مختلفی برای مسیریابی حمل محمولات خطرناک بر اساس هزینه‌ها و ریسک‌های حمل این مواد ارایه شده‌اند که در اکثر آن‌ها مسیریابی بین یک جفت مبدا-مقصد صورت گرفته است. انتخاب یک مسیر به اهداف افراد مختلفی که در فرآیند حمل و نقل نقش دارند، بستگی دارد و علاوه بر حاملان و شرکت‌های حمل و نقل، مقامات دولتی محلی و منطقه‌ای هم در مسیریابی این محمولات نقش دارند.

از دیدگاه شرکت‌های حمل و نقل و حاملان مواد خطرناک، قراردادهای حمل مستقل بسته می‌شود و تصمیمات مسیریابی برای هر مسیر باید به طور جداگانه گرفته شود که به آن برنامه‌ریزی مسیر محلی[۱۲]

[11] United States Department of Transportation (USDOT)

[12] Local

@ORchannel

جدول ۲.۲: عوامل موثر بر مسیریابی مواد خطرناک [۴۳].

ردیف	معیار	ملاحظات
۱	جمعیت آسیب‌پذیر	جمعیتی که به صورت بالقوه در معرض خطرات ناشی از حمل و نقل مواد خطرناک قرار دارند.
۲	نوع راه	فاکتورهای راه نظیر آزادی حرکت کافی، عرض مناسب جاده و شیب طولی مناسب می‌تواند در بهبود حمل و نقل مواد خطرناک مناسب باشند.
۳	نوع و مقدار مواد خطرناک	میزان خطرآفرینی مواد خطرناک رابطه مستقیم به نوع و مقدار آن‌ها دارد.
۴	قابلیت امدادرسانی	قابلیت امدادرسانی نقش مهمی در کنترل خطرات احتمالی دارد.
۵	آسیب‌پذیری مراکز حساس	وسایل نقلیه حامل مواد خطرناک بهتر است تا شعاع خاصی از مراکز حساس شهری تردد نداشته باشند.
۶	شرایط توپوگرافی	گسترش ابعاد حادثه و هم‌چنین زمان مورد نیاز برای عملیات امدادرسانی و پاکسازی، به شرایط توپوگرافی مسیر وابسته است.
۷	تداوم مسیر	تداوم مسیر بیانگر این است که انحراف از مسیر باید حداقل گردد.
۸	مسیرهای جایگزین	مسیرهای جایگزین در صورت مسدود شدن مسیرهای فعلی، اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کنند.
۹	ملاحظات اقتصادی	حمل و نقل مواد خطرناک باید به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد.
۱۰	تاخیر در حمل و نقل	تاخیر در شبکه حمل و نقل نظیر تاخیر در تقاطع‌ها، پتانسیل وقوع خطر را افزایش می‌دهد.
۱۱	پیشینه تصادفات	بهتر است معابری که احتمال وقوع تصادف در آن بالا است برای عبور مواد خطرناک مورد استفاده قرار نگیرند.
۱۲	شرایط اقلیمی	شرایط آب و هوایی نظیر برف، باران و یخبندان در وقوع حادثه موثر است.
۱۳	حجم ترافیک معابر	با افزایش حجم ترافیک معابر، جمعیت آسیب‌پذیر و احتمال وقوع خطر افزایش می‌یابد.

@ORchannel

می‌گویند. در نتیجه هر حامل یک مسیر بین یک جفت مبدا-مقصد را با هدف به حداقل رساندن هزینه‌های حمل و نقل انتخاب می‌کند، پس ممکن است مشکلات اساسی به دلیل مستقل بودن تصمیمات مسیریابی هر حمل و نقل از دیگر حمل و نقل‌ها پیش بیاید، مثلاً ممکن است بخش خاصی از شبکه حمل و نقل، مورد استفاده بسیاری از وسایل نقلیه حامل مواد خطرناک قرار بگیرد و منجر به افزایش قابل توجه احتمال تصادف روی این بخش جاده شود و در نتیجه بی‌عدالتی در توزیع فضایی ریسک اتفاق بیفتد. در این حالت دولت می تواند با تعیین عوارض یا محدودیت‌های عبور و مرور برای وسایل نقلیه حامل مواد خطرناک در برخی از بخش‌های خاص به کنترل ترافیکی این بخش‌ها بپردازد. در سطح کلان، مسیریابی مواد خطرناک مبداها و مقصدهای گوناگونی دارد و بیش از یک نوع کالای خطرناک حمل می‌شود به این گونه مسایل، مسایل برنامه‌ریزی سراسری[۱۳] می‌گویند [۱۷]. در مسأله برنامه‌ریزی سراسری، مسأله اصلی پیدا کردن مسیرهایی با حداقل ریسک است به طوری که در هر منطقه از شبکه حمل و نقل، ریسک به صورت عادلانه تقسیم شود.

مطالعات در زمینه مسیریابی حمل و نقل مواد خطرناک را می‌توان بر اساس وابستگی شبکه‌های حمل و نقل به زمان (وابسته به زمان) و یا غیر وابسته بودن شبکه‌ها به زمان (غیر وابسته به زمان) یا تابع هدف مدل‌ها (یک هدفه یا چند هدفه بودن تابع هدف) طبقه‌بندی کرد [۶۱]. در شبکه‌های غیر وابسته به زمان فرض بر آن است که ویژگی‌های لینک‌های شبکه مانند زمان سفر و ریسک، ثابت هستند، اما در شبکه‌های وابسته به زمان این ویژگی‌ها متغیر هستند، مثلاً زمان سفر در طول لینک‌های این شبکه‌ها، به طول لینک‌ها و زمانی از روز (توجه به تنوع شرایط ترافیک لینک‌های شبکه) بستگی دارد. در مدل‌های یک هدفه معمولاً از الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر استفاده شده است. در این حالت متناسب با تابع هدف، شاخص مورد نظر به عنوان برچسب کمان‌ها در نظر گرفته می‌شود. در مقابل، برخی مدل‌ها دو یا چند

[13] Global

@ORchannel

هدفه‌اند؛ تفاوت بین مدل‌های چند هدفه که در تحقیقات پیشین ارایه شده است، در استفاده و یا عدم استفاده از تابع مطلوبیت اهداف است. در مدل‌هایی که از تابع مطلوبیت استفاده کرده‌اند، با ترکیب وزنی اهداف در تابع هدف، مدل چند هدفه تبدیل به یک مدل یک هدفه می‌شود که مشابه مدل‌های یک هدفه با روش الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر قابل حل است. در چنین حالتی مسیر انتخابی به تغییرات پارامترهای تابع مطلوبیت بسیار حساس است. اما در مدل‌هایی که از تابع مطلوبیت استفاده نشده است، با ارایه مجموعه‌ای از مسیرهای بهینه پارتو یا غیر غالب[۱۴] به حل مسأله می‌پردازند. مسیرهای غیر غالب، مسیرهای هم‌ارز و معادلی هستند که هیچ یک از آن‌ها به ازای تمامی اهداف بر سایر مسیرها برتری ندارند. در این حالت انتخاب گزینه برتر برعهده تصمیم گیرنده است.

تعریف ۱.۲.۲. غالب[۱۵] : دو بردار y و y' در $\mathbb{R}^q$ $(q \geq ۲)$ را در نظر بگیرید. اگر به ازای هر مولفه $i \leq q$، $y_i \leq y'_i$ آنگاه y بر y' غالب است [۲۹].

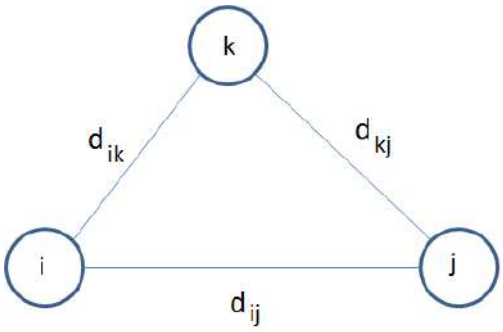
مطابق با این تعریف ۳ حالت برای دو بردار y و y' وجود دارد: y غالب بر y'، y' غالب بر y و یا هر دو آن‌ها غیر-غالب هستند.

شکل ۷.۲ را در نظر بگیرید. اگر هدف تعیین مسیرهای غیر غالب از i به j باشد ابتدا باید دو بردار d_{ij} و $d_{ik} + d_{kj}$ را مقایسه می‌کنیم، اگر d_{ij} غالب بر $d_{ik} + d_{kj}$ آنگاه مسیر مستقیم $i \to j$ یک مسیر غالب است و اگر $d_{ik} + d_{kj}$ غالب بر d_{ij} آنگاه مسیر غیر مستقیم $i \to k \to j$ یک مسیر غالب است. اما اگر هر دو بردار غیر غالب هستند دو مسیر $i \to j$ و $i \to k \to j$ غیر غالب هستند.

[14] Non-dominate

[15] Dominate

@ORchannel



شکل ۷.۲: مسیرهای غیر غالب ممکن بر روی سه گره

۳.۲ طراحی شبکه حمل و نقل مواد خطرناک

یکی از راه‌هایی که می‌تواند خطر حمل و نقل مواد خطرناک را کاهش دهد محدود کردن مسیرهای حمل مواد خطرناک است. کارا و ورتر[۱۶] در سال ۲۰۰۴ تعریف زیر را ارایه دادند: "در یک شبکه حمل و نقل موجود، مسأله طراحی شبکه مواد خطرناک، شامل انتخاب بخش‌هایی از جاده است که نباید برای حمل و نقل مواد خطرناک به کار گرفته شوند به طوری که ریسک محلی حداقل شود". در مسأله طراحی شبکه حمل و نقل، دو بازیگر نقش دارند: تصمیم گیرنده‌های دولتی و شرکت‌های حمل و نقل (حمل‌کننده‌ها). تصمیم‌گیرنده‌های دولتی شبکه حمل و نقل را تعیین می‌کنند و شرکت‌های حمل و نقل مسیرهایی با حداقل هزینه را در شبکه اختصاص یافته به حمل مواد خطرناک انتخاب می‌کنند و معمولاً به دلیل حذف برخی مسیرها، هزینه‌های بالاتری را متحمل می‌شوند. تصمیم گیران دولتی معمولاً نمی‌توانند مسیرهای حمل و نقل را به حاملان تحمیل کنند، از این رو مسأله طراحی شبکه حمل و نقل می‌تواند یک مسأله تصمیم در دو سطح بیرونی و داخلی باشد که تصمیم گیرنده‌های سطح بیرونی برای کنترل و بهبود ترافیک شبکه و کاهش خطرات حمل و نقل مواد خطرناک به طراحی مسیرهای حمل و نقل می‌پردازند و تصمیم گیرنده‌های داخلی برنامه‌ریزی مسیر خود را بر اساس تصمیم‌های سطح بیرونی و در جهت کاهش

[16] Kara and Verter

@ORchannel

هزینه‌های حمل و نقل انجام می‌دهند. طراحی شبکه حمل و نقل مواد خطرناک کمتر در گذشته مورد بحث بوده است، اما اخیراً بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

۴.۲ مکانیابی تسهیلات خطرناک

مسأله مکانیابی به انتخاب یک مجموعه از نقاط کاندید برای استقرار تسهیلات معین با در نظر گرفتن معیارهای مختلف و بررسی یک مجموعه محدودیت‌های داده شده به گونه‌ای که به نیازهای کاربران به نحو مناسب پاسخگو باشند، می‌پردازد [۵۵]. مدل‌های مکانیابی تسهیلات شامل مکانیابی محل انبار در یک زنجیره تامین با هدف به حداقل رساندن میانگین زمان رسیدن به بازار، مکانیابی سایت‌های مواد خطرناک با هدف به حداقل رساندن در معرض خطر قرار گرفتن و مکانیابی ایستگاه‌های خودپرداز برای خدمت بهتر به مشتریان است. تسهیلات را می‌توان به صورت مطلوب و نامطلوب طبقه‌بندی کرد. تسهیلات مطلوب باید در حداقل فاصله تا کاربران باشند و تسهیلات نامطلوب باید تا حد امکان دور باشد [۵۹] تسهیلاتی مانند سایت‌های تخلیه زباله، محل دفن زباله، کارخانه‌های شیمیایی و رآکتورهای هسته‌ای برای جمعیت اطراف آن نامطلوب هستند و جمعیت اطراف آن‌ها تلاش می‌کنند تا حد امکان از این تسهیلات دور باشند [۲۵]. با توجه به ماهیت این تسهیلات، استقرار آن‌ها در یک مکان تقریباً همیشه با مخالفت مواجه شده است. میزان مخالفت‌ها ممکن است وابسته به محل خاص انتخاب شده، اندازه‌ای از تسهیلات و هم‌چنین عوامل سیاسی مانند رفاه مناطق همسایه، آیین نامه‌ها و منطقه‌بندی موجود باشد. دولت‌ها هم‌چنین با استفاده از وضع قوانین و مقررات، تعیین مالیات و مشوق‌های اقتصادی برای تسهیلات خطرناک سعی در ایجاد امنیت عمومی و ایمنی زیست محیطی می‌کنند. انتخاب مکان مناسب تسهیلات نامطلوب یک مسأله پیچیده است و نیاز به توجه به الزامات شهری، دولتی و

@ORchannel

مقررات زیست محیطی دارد. انتخاب نامناسب و ناکارآمد مکان تسهیلات نامطلوب باعث مشکلات متعددی مانند مخالفت اجتماعی، مشکلات زیست محیطی و افزایش هزینه می‌شود. تعیین و ارزیابی خصوصیات مثبت و منفی یک مکان برای ایجاد تسهیلات نامطلوب کار دشواری است. در انتخاب یک مکان تسهیلات نامطلوب بسیاری از معیارهای بالقوه مانند نزدیکی به منطقه مسکونی، فاصله از جاده‌های اصلی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری، آب و هوا و شیب زمین باید در نظر گرفته شود. تصمیمات در زمینه تسهیلات مواد خطرناک شامل محل استقرار آن‌ها، اندازه و محتوای فن‌آوری و تصمیم گیری مسیریابی در رابطه با حمل و نقل مواد خطرناک است [۳۸]. اهداف برجسته مسایل مکانیابی تسهیلات شامل به حداقل رساندن هزینه، به حداقل رساندن کل ریسک و توزیع عادلانه خطر است. وجود اهداف متعدد و معمولاً متناقض این مسایل را پیچیده می‌کند. بنابراین انتخاب مکانی برای استقرار تسهیلات نامطلوب می‌تواند به عنوان یک مسأله تصمیم‌گیری چند معیاره در نظر گرفته شود.

۵.۲ تحقیقات در زمینه حمل و نقل مواد خطرناک

در این بخش به مرور مختصری از تحقیقات انجام شده در زمینه مسایل مربوط به مواد خطرناک در ایران و سایر کشورها می‌پردازیم.

۱.۵.۲ تحقیقات در زمینه مسایل مربوط به حمل و نقل مواد خطرناک در ایران

شریعت مهیمنی و خدادادیان [۶۱] در سال ۱۳۸۷ یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح با فرض ترکیب وزنی اهداف در تابع هدف ارایه دادند که برای مشخص کردن بهترین جریان ترافیک تخصیص یافته به شبکه مورد استفاده قرار گرفت و نتایج مدل را در یک محدوده شامل سه استان در ایران با اطلاعات واقعی برای

@ORchannel

فرآورده‌های نفتی (گروه سوم مواد خطرناک) مورد بررسی قرار دادند.

باوقار [۲] در سال ۱۳۸۸ پایان‌نامه‌ای با عنوان "تعیین مسیر بهینه در حمل و نقل مواد خطرناک با استفاده از GIS" ارایه داد که در آن به شناسایی معیارهای ایمنی مانند شرایط ترافیکی، موقعیت مکانی، امکانات، آب و هوا برای حمل و نقل مواد خطرناک پرداخت و این معیارها را درمحیط GIS پیاده‌سازی کرد.

احسانی [۱] در سال ۱۳۸۹ پایان‌نامه‌ای با عنوان "طراحی مدل ریاضی مسیریابی حمل و نقل مواد خطرناک در جاده‌های کشور؛ مورد مطالعه: شبکه راه‌های استان فارس" ارایه داد. او چهار مدل ریاضی با رویکردهای، توجه صرفاً به ایمنی، ایمنی-اقتصادی، حداقل‌سازی ریسک کل، حداقل‌سازی مسافت کل، ارایه داد و نتایج آن‌ها را با یکدیگر مقایسه کرد. وی هم‌چنین جهت دستیابی به حداکثر ایمنی، شاخص ریسکی با مولفه‌های جمعیت، محیط زیست و ابنیه مسیر در نظر می‌گیرد.

حسن‌پور [۴] در سال ۱۳۹۱ پایان‌نامه‌ای با عنوان "ارزیابی مسیرهای حمل و نقل مواد خطرناک بر پایه ریسک –مطالعه موردی مسیرهای تهران-مازندران" ارایه داد. او ابتدا مسیرهای مورد مطالعه را با توجه به شاخص‌های موثر بر ریسک قطعه‌بندی کرد و سپس ریسک قطعات مختلف را محاسبه نمود و با استفاده از ریسک قطعات مختلف، ریسک کل را محاسبه نمود و با استفاده از این ریسک کلی یک مسیر حمل و نقل مواد خطرناک را با مسیرهای موازی یا جایگزین مقایسه و ارزیابی نمود.

محمودآبادی [۹] در سال ۱۳۹۲ پایان‌نامه‌ای با عنوان "توسعه مدل پایدار مسیریابی حمل و نقل مواد خطرناک در شرایط اضطراری" ارایه داد. او با توجه به این‌که وضعیت مناطق آسیب‌دیده از حوادث و رخدادهای طبیعی یا انسان‌ساز در مسیریابی کالاهای ضروری به مناطق یاد شده تاثیر گذار بوده و با توجه به ماهیت رخداد حوادث مربوط به حمل مواد خطرناک در مسیرهای عبوری مدلی را ارایه داد که با تکیه بر رفتار مبتنی بر تئوری آشوب و هم‌چنین داده‌های جمع‌آوری شده بر اساس نظرات کارشناسان مناسب‌ترین

@ORchannel

مسیر برای حمل و نقل مواد خطرناک تعیین گردد.

۲.۵.۲ تحقیقات در زمینه مسایل مربوط به حمل و نقل مواد خطرناک در سایر کشورها

آبکویتز و چنگ [17] [۱۰] در سال ۱۹۸۸ با ادغام ریسک و هزینه‌های حمل، بهینه سازی مسیرهای حمل مواد خطرناک را انجام دادند. آن‌ها در سال ۱۹۸۹ [۱۱] به تخمین ریسک حمل و نقل مواد خطرناک در شرایطی که با محدودیت داده‌های در دسترس مواجه هستند، پرداختند و با استفاده از استنباط آماری، مدل‌سازی درخت خطا و رخداد، روش‌های تحلیلی و شبیه‌سازی، برآورد ذهنی و تجزیه و تحلیل بیزی به تخمین ریسک پرداختند و مسایل حمل و نقل مواد خطرناک را از لحاظ امکان استفاده از این تکنیک‌ها مورد بررسی قرار دادند. به دلیل این‌که ممکن است نتایج روش‌های مختلف محاسبه ریسک با هم در تناقض باشند، روشی را برای حل این تعارض‌ها مورد بررسی قرار دادند.

زوگرافوس و دیویس [18] [۶۹] در سال ۱۹۸۹ مسأله مسیریابی حمل و نقل مواد خطرناک را به صورت یک مدل تصمیم گیری چند هدفه در نظر گرفتند که اهداف مدل آن‌ها کمینه سازی ریسک، زمان سفر و زیان‌های حاصله بود. برای نشان دادن کاربردی از مدل پیشنهادی خود یک شبکه فرضی را در نظر گرفتند و نشان دادند که با استفاده از تعیین مالیات برای ظرفیت محدود کمان‌ها برای حمل و نقل، می‌توان ریسک را به طور منصفانه در بخش‌های مسیر تقسیم کرد.

لیست[19] و همکارانش [۵۱] در سال ۱۹۹۱ مسأله حمل و نقل مواد خطرناک در زمینه تجزیه و تحلیل خطر، مسیریابی، برنامه‌ریزی و مکان تسهیلات بررسی کردند. تمرکز اصلی پژوهش آن‌ها بیشتر روی

[17] Abkowitz and Cheng

[18] Zografos and Davis

[19] List

@ORchannel

مطالعات تجربی و هم‌چنین حمل و نقل زمینی (جاده‌ای و ریلی) بود. آن‌ها تجزیه و تحلیل خطر را با مسیریابی و مسیریابی را با مکانیابی تسهیلات ادغام کردند.

ارکوت و نیومن[۲۰] [۳۵] در سال ۱۹۹۲ یک مدل چند هدفه برای تعیین مکان یک یا چند تسهیلات نامطلوب برای ارایه خدمات به یک منطقه ارایه دادند. آن‌ها فرض کردند هر منطقه نیاز به ظرفیت خاصی از خدمات که توسط تعدادی از تسهیلات در اندازه‌های مختلف برآورده می‌شود، دارد. این مسأله را به صورت یک مدل چند هدفه عدد صحیح مختلط فرمول‌بندی کردند و برای حل آن از یک الگوریتم شمارشی استفاده کردند.

بافِی و کارکازیس[۲۱] [۱۹] در سال ۱۹۹۳ مقاله‌ای با عنوان مدل‌ها و روش‌هایی برای تصمیم‌گیری مسیریابی و مکانیابی مواد خطرناک ارایه دادند. ابتدا به طور جداگانه به بررسی مسأله مسیریابی و مسأله مکانیابی تسهیلات خطرناک پرداختند و سپس با ترکیب این دو مسأله، مسأله مسیریابی و مکانیابی مواد خطرناک را مورد بررسی قرار دادند.

کلِیندورفر و کانرِئودِر[۲۲] [۴۹] در سال ۱۹۹۴ به مطالعه مکانیابی تسهیلات خطرناک پرداختند. آن‌ها ابتدا این موضوع را که مسایل مکانیابی تسهیلات خطرناک بسیار سخت‌تر و حساس‌تر از دیگر مسایل مکانیابی تسهیلات هستند، بررسی کردند و تاکید داشتند که در طراحی مکان بهینه برای تسهیلات باید به مکان‌های کاندید استقرار تسهیلات خطرناک که از قبل تعیین شده توجه داشت.

بافِی و کارکازیس [۲۰] در سال ۱۹۹۵ مدل‌ها و روش‌های طراحی مکان و مسیر مربوط به مواد خطرناک را بررسی کردند. آن‌ها یک مدل خطی و یک مدل غیر خطی برای مسیریابی مواد خطرناک ارایه دادند و برای تولید جواب‌های یکسان مدل خطی و مدل غیر خطی یک شرط کافی ارایه دادند.

[20] Erkut and Neuman

[21] Boffey and Karkazis

[22] Kleindorfer and Kunreuther

@ORchannel

آلپ[۲۳] [۱۳] در سال ۱۹۹۵ روش‌های ارزیابی کمی ریسک را مورد مطالعه قرار داد و به بررسی مقدار قابل قبول ریسک پرداخت. وی با در نظر گرفتن دو فاکتور اصلی احتمال وقوع حادثه و جمعیت در معرض خطر، میزان ریسک را برآورد کرد و مطالعه موردی برای ارزیابی خطرات ناشی از حمل و نقل کالاهای خطرناک از طریق راه آهن را در منطقه تورنتو[۲۴] انجام داد.

آشتاکالا و اِنو[۲۵] [۱۶] در سال ۱۹۹۶ مدلی برای مسیریابی حمل و نقل مواد خطرناک ارایه دادند که علاوه بر بهینه کردن کاهش هزینه سفر میان نقاط مبدا و مقصد به بهینه سازی ریسک حمل و نقل بر اساس ریسک جمعیت و ریسک محیط زیست برای سه ماده خطرناک گاز کلر، گاز مایع و اسید سولفوریک می‌پردازد. ریسک در هر مسیر با در نظر گرفتن احتمال وقوع تصادف محاسبه می‌شود.

لیست و همکارانش [۵۲] در سال ۱۹۹۷ مسأله یکپارچه سازی مسیریابی و زمان‌بندی را در نظر گرفتند. آن‌ها با توجه به این‌که ریسک مسیر به زمانی از روز وابسته است، مثلاً این‌که احتمال تصادف در شب بیشتر از روز است، این مسأله را بر روی یک شبکه حمل و نقل وابسته به زمان در نظر گرفتند و الگوریتمی برای آن ارایه دادند.

ارکوت[۲۶] و همکارانش [۶۸] در سال ۲۰۰۰ از مدل انتشار گاوسی برای تعیین شعاع تاثیر مواد خطرناک استفاده کردند و با استفاده از این شعاع تاثیر در محیط نرم‌افزار GIS، جمعیت تحت تاثیر و پیامدهای ناشی ازحادثه را برای هر کمان از شبکه محاسبه کردند.

ارکوت و اینگولفسون[۲۷] [۳۲] در سال ۲۰۰۰، سه مدل اجتناب از فاجعه برای برنامه‌ریزی مسیر حمل و نقل مواد خطرناک پیشنهاد کردند. منظور از فاجعه یک حادثه با عواقب بسیار بزرگ است و با ارایه مثالی

[23] Alp
[24] Toronto
[25] Ashtakala and Eno
[26] Erkut
[27] Erkut and Ingolfsson

@ORchannel

عددی به شباهت‌ها و تفاوت‌های این سه مدل پرداختند.

تارانتیلیس و کیرانوئودیس[۲۸] [۶۴] در سال ۲۰۰۱ نوع خاصی از مسایل مسیریابی وسایل نقلیه حامل مواد خطرناک را در نظر گرفتند. تمرکز آن‌ها بر روی به حداقل رساندن جمعیت در معرض خطر بود.

آندروتسوپولوس و زوگرافوس[۲۹] [۱۴] در سال ۲۰۰۲ مسأله دو هدفه مسیریابی وسایل نقلیه حامل مواد خطرناک با پنجره زمانی را بررسی کردند. اهداف مسأله حداقل‌سازی ریسک و هزینه حمل و نقل مواد خطرناک بود. آن‌ها یک الگوریتم ابتکاری برای حل مدل ارایه دادند.

حقانی و چن[۳۰] [۴۰] در سال ۲۰۰۳ مسأله مسیریابی و زمان‌بندی حمل مواد خطرناک بر روی شبکه‌های وابسته به زمان را بررسی کردند. آن‌ها با این فرض که بیشتر محموله‌های مواد خطرناک در مسافت‌های طولانی حمل می‌شود و در نتیجه با توجه به محدودیت حجم کار رانندگان، احتیاج به بیش از یک روز زمان برای حمل مواد خطرناک می‌باشد، گره‌هایی را برای استراحت و سوخت گیری در نظر گرفتند و این مسأله را با سه هدف به حداقل رساندن هزینه‌ها، ریسک در طول مسیر و ریسک در گره‌های استراحت بررسی کردند و با ترکیب وزنی این اهداف مسأله سه هدفه را به یک مسأله تک هدفه تبدیل کردند و برای حل آن یک الگوریتم ارایه دادند.

ارکوت و اینگولفسون[۳۱] [۳۳] در سال ۲۰۰۴ روش‌های مختلف مدل‌سازی ریسک که در مسایل حمل و نقل مواد خطرناک ارایه شده بود را بررسی کردند و مدل جدیدی برای محاسبه ریسک پیشنهاد دادند و به مقایسه این مدل‌ها پرداختند.

کارا و ورتر[۳۲] [۴۸] در سال ۲۰۰۴ مسأله طراحی شبکه حمل و نقل مواد خطرناک را به عنوان یک

[28] Tarantilis and Kiranoudis

[29] Androutsopoulos and Zografos

[30] Haghani and Chen

[31] Erkut and Ingolfsson

[32] Kara and Verter

@ORchannel

مسأله دو سطحی در نظر گرفتند. ارکوت وگزارا[۳۳] [۳۱] در سال ۲۰۰۷ همانند کارا و ورتر مسأله طراحی شبکه حمل و نقل را به صورت یک مسأله دو سطحی در نظر گرفتند با این تفاوت که در مدل آن‌ها مسیرها بدون جهت فرض شده بود و امکان استفاده از بخشی از جاده در هر دو جهت وجود داشت. در مدل دو سطحی مذکور در سطح اول تصمیم گیران دولتی سعی در حداقل کردن ریسک حمل مواد خطرناک را داشتند و در سطح دوم شرکت‌های حمل و نقل سعی در استفاده از کوتاه‌ترین مسیر را دارند. آن‌ها یک الگوریتم برای حل مدل برنامه‌ریزی دو سطحی ارایه دادند.

چانگ[۳۴]و همکارانش [۲۴] در سال ۲۰۰۵ روشی برای پیدا کردن مسیرهای غیر غالب برای حالتی که ویژگی‌های لینک مسیر نامشخص است، ارایه دادند. مِنگ[۳۵]و همکارانش [۵۳] نیز در همین سال یک روش برنامه‌ریزی پویا برای شناسایی مسیرهای غیرغالب متغیر با زمان که زمان حرکت در مبدا و زمان انتظار در گره‌های میانی از مسیر بین مبدا و مقصد ثابت است، ارایه دادند.

نلسون[۳۶]و همکارانش [۵۴] در سال ۲۰۰۶ مقاله‌ای در زمینه‌ی سیاست‌های درست حمل و نقل و ارزیابی عملکرد ارایه دادند و به ارایه مبانی انتخاب مسیر درست و ابزار مناسب در حمل و نقل مواد خطرناک برای کاهش ریسک پرداختند.

کاروتنوتو[۳۷]و همکارانش [۲۳] در سال ۲۰۰۷ از مسأله k-امین کوتاه‌ترین مسیر به منظور حداقل سازی مجموع ریسک حمل و نقل مواد خطرناک با رویکرد توزیع عادلانه ریسک استفاده کردند.

دادکار[۳۸]و همکارانش [۲۷] در سال ۲۰۰۸ به شناسایی مسیرهای گوناگون حمل و نقل مواد خطرناک

[33] Erkut and Gzara
[34] Chang
[35] Meng
[36] Nelson
[37] Carotenuto
[38] Dadkar

@ORchannel

پرداختند. آن‌ها بر این باور بودند که زمان سفر و تبعات ناشی از حوادث مربوط به مواد خطرناک دارای الگوی احتمالی و غیر قطعی هستند و به پارامترهایی مانند وضعیت دید، حجم ترافیک و نحوه فعالیت حاملان مواد خطرناک بستگی دارد.

بیانسو[۳۹] و همکارانش [۱۸] در سال ۲۰۰۹ یک مدل دو سطحی جریان در شبکه برای مسأله طراحی شبکه حمل و نقل مواد خطرناک با هدف حداقل کردن ریسک در شبکه حمل و نقل و توزیع عادلانه ریسک در شبکه ارایه دادند.

یانگا[۴۰] و همکارانش [۶۶] در سال ۲۰۱۰ به بررسی حوادث مربوط به حمل و نقل جاده‌ای مواد خطرناک در کشور چین پرداختند و با بررسی ۳۲۲ حادثه و با تحلیل درخت خطا دریافتند که ۶۴/۳ درصد از حوادث در حین حمل مواد خطرناک به دلیل آزادشدن مواد خطرناک است و خطای انسانی با ۴۶/۶ درصد بیشترین سهم را در علل اولیه ایجاد حوادث به خود اختصاص می‌دهد.

آندروتسوپولوس[۴۱] و همکارانش [۱۵] در سال ۲۰۱۰ مسأله مسیریابی و زمان‌بندی توزیع مواد خطرناک را بررسی کردند. آن‌ها هزینه و ریسک را وابسته به زمان در نظر گرفتند.

شن[۴۲] [۶۲] در سال ۲۰۱۱ یک مدل ریاضی چند هدفه برای مسیریابی کالاهای خطرناک با محدودیت بازه زمانی و ویژگی زمان- متغیر ارایه داد.

ایکسی[۴۳] و همکارانش [۶۵] در سال ۲۰۱۲ مسأله مسیریابی حمل مواد خطرناک را در حالتی که از چند شیوه برای حمل این مواد استفاده می‌شود، بررسی کردند. با توجه به این‌که در حالتی که از چند شیوه برای حمل مواد استفاده می‌شود، احتیاج به مکان‌هایی (کارگاه‌هایی) برای انتقال ظروف مواد خطرناک و

[39] Bianco
[40] Yanga
[41] Androutsopoulos
[42] Shen
[43] Xie

@ORchannel

یا مخازن است، آن‌ها مدلی برای مسأله مکان‌یابی محل کارگاه‌های انتقال و مسیریابی حمل مواد خطرناک ارایه دادند.

لی[۴۴] [۵۰] در سال ۲۰۱۴ پایان‌نامه‌ای در زمینه ارزیابی ریسک مسیر حمل و نقل مواد خطرناک با استفاده از GIS ارایه داد. هدف پژوهش وی ارایه یک ابزار چند معیاره GIS برای شناسایی بخش‌های مستعد خطر در شبکه حمل و نقل برای حوادث ناشی از حمل مواد خطرناک بود. وی در مدل‌بندی ریسک از مدل گاوسی استفاده نمود.

فان[۴۵] و همکارانش [۳۹] در سال ۲۰۱۵ مسأله مسیریابی حمل مواد خطرناک در حالتی که بخش‌هایی از مسیر در مدت زمان مشخص به دلایل مختلف بسته است را در نظر گرفتند. آن‌ها یک مدل ریاضی با اهداف کمینه سازی ریسک و مسافت طی شده برای این مسأله ارایه دادند و الگوریتمی برای حل این مسأله نیز ارایه دادند. برای نشان دادن کارایی الگوریتم مطالعه موردی این مسأله روی شبکه بزرگراه‌های شانگهای چین[۴۶] انجام دادند.

ییلماس[۴۷] و همکارانش [۶۷] در سال ۲۰۱۶ مقالات انجام شده در زمینه‌های مختلف ریسک، مسیریابی، مکانیابی و طراحی شبکه حمل مواد خطرناک را از سال ۲۰۰۵ مورد بررسی قرار دادند و در مجموع به بررسی ۸۸ مقاله در این زمینه پرداختند.

در مطالعه حاضر مسأله مسیریابی حمل کالاهای خطرناک با اهداف کمینه‌سازی ریسک و هزینه‌های حمل مورد بررسی قرار می‌گیرد و برای این منظور چهار مدل ریاضی در این زمینه را بررسی می‌کنیم. در سه مدل اول شبکه حمل و نقل غیر وابسته از زمان در نظر گرفته شده است و ویژگی‌های هر کمان که شامل مدت زمان طی کردن هر کمان و مقدار ریسک هرکمان است، به زمان و حجم ترافیک در آن کمان وابسته

[44] Lee
[45] Fan
[46] Shanghai China
[47] Yilmaz

@ORchannel

نیست اما در مدل چهارم شبکه حمل و نقل وابسته به زمان در نظر گرفته شده است و ویژگی‌های هر کمان به زمان و حجم ترافیک در آن کمان بستگی دارد. به دلیل این‌که مدل چهارم به واقعیت نزدیک‌تر است به پیاده‌سازی آن ابتدا بر روی یک شبکه حمل و نقل کوچک و سپس بر روی شبکه حمل و نقل واقعی پرداخته‌ایم. در تمام پایان‌نامه های ذکر شده در ایران مسأله بر روی شبکه حمل و نقل غیر وابسته از زمان در نظر گرفته شده است، در این‌جا قصد داریم تا حدودی این فرض را برداریم و به واقعیت نزدیک‌تر شویم.