مدیریت ریسک و ایمنی در زنجیره تأمین کالاهای خطرناک (مرور تحلیلی-کیفی رویکردها و فناوری‌های نوین)

(علمی – مروری)

سعید لشگری، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران- برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشکده فنی‌مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران

*حمید میرزاحسین (نویسنده مسئول)، دانشیار، گروه مهندسی عمران- برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشکده فنی‌مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران

امین فریدی اقدم، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران- برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشکده فنی‌مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: **mirzahossein@eng.ikiu.ac.ir**

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۸- پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۱

صفحه ۳۰۴-۲۸۵

چکیده

زنجیره تأمین کالاهای خطرناک به‌دلیل ماهیت پرریسک این مواد، نیازمند مدیریتی دقیق، فناورانه و چندلایه است تا از بروز خسارات جانی، محیط‌زیستی و اقتصادی جلوگیری شود. این مطالعه با هدف شناسایی مؤلفه‌های کلیدی کاهش ریسک و افزایش ایمنی در این زنجیره، به مرور تحلیلی ادبیات علمی، گزارش‌های نهادی و چارچوب‌های قانونی بین‌المللی پرداخته است. رویکرد پژوهش کیفی و مبتنی بر تحلیل مضمون (تحلیل محتوا) منابع ثانویه بوده که با بهره‌گیری از نرم‌افزار MAXQDA انجام شده است. یافته‌ها نشان می‌دهند که فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا (IoT)، سیستم‌های ردیابی بلادرنگ، هوش مصنوعی و بلاکچین می‌توانند به‌طور مؤثر در پیش‌بینی، پایش و واکنش سریع به مخاطرات مؤثر باشند. همچنین، آموزش مستمر نیروی انسانی، پیروی از استانداردهای بین‌المللی نظیر UN ADR و IMDG و ارتقای فرهنگ ایمنی در سازمان‌ها از الزامات اساسی در کاهش ریسک تلقی می‌شوند. با این حال، چالش‌هایی همچون هزینه‌های پیاده‌سازی فناوری، ناهماهنگی مقررات، ضعف زیرساخت‌ها و خلأهای تحقیقاتی در حوزه‌های زیست‌محیطی و اجتماعی همچنان پابرجاست. این مقاله با ارائه مجموعه‌ای از راهکارهای اجرایی و سیاستی، بر ضرورت یکپارچه‌سازی فناوری، مقررات و همکاری بین‌المللی برای دستیابی به زنجیره تأمین ایمن‌تر و پایدارتر تأکید دارد.

واژه‌های کلیدی: ایمنی، اینترنت اشیا، تحلیل محتوا، ردیابی بلادرنگ، زنجیره تأمین، کالاهای خطرناک، کاهش ریسک

۱-مقدمه

زنجیره تأمین کالاهای خطرناک به‌دلیل ماهیت ذاتاً پرریسک این مواد، همواره به‌عنوان یکی از پیچیده‌ترین و حساس‌ترین بخش‌های لجستیک و حمل‌ونقل جهانی مطرح بوده است. این دسته شامل موادی چون ترکیبات شیمیایی فعال، مواد رادیواکتیو، گازهای قابل اشتعال، مواد منفجره و ترکیبات سمی است که در صورت مدیریت نامناسب، می‌توانند تهدیدی جدی برای سلامت انسان، محیط زیست و دارایی‌های اقتصادی ایجاد کنند (Rishabh Lohade & Sinha, 2024). به همین دلیل، مدیریت ایمن، دقیق و مطابق با استانداردهای بین‌المللی، پیش‌شرط اجتناب‌ناپذیر برای کاهش ریسک‌های بالقوه در فرآیندهای حمل، انبارداری، بارگیری و تخلیه این دسته از کالاها محسوب می‌شود. اهمیت موضوع را می‌توان از چند منظر تحلیل

کرد. از یک‌سو، سلامت عمومی و ایمنی زیستی مستلزم پیاده‌سازی سخت‌گیرانه‌ترین الزامات ایمنی در تمام مراحل زنجیره تأمین است. برای نمونه، نشت یا انتشار مواد خطرناک در محیط می‌تواند پیامدهایی فاجعه‌بار برای ساکنان، منابع طبیعی و اکوسیستم‌ها به‌دنبال داشته باشد (Nijole, 2018). از سوی دیگر، محیط زیست جهانی نیز در برابر مخاطرات ناشی از حمل‌ونقل این کالاها آسیب‌پذیر است و اقدامات پیشگیرانه مانند مدیریت بهینه پسماند، جلوگیری از آلودگی ثانویه و بازیافت ایمن، از ضرورت‌های اجتناب‌ناپذیر در سیاست‌گذاری این حوزه به شمار می‌رود (Yang et al., 2023).

در سطح بین‌المللی، پایبندی به چارچوب‌های قانونی و هنجارهای نهادهای تخصصی همچون دستورالعمل‌های سازمان ملل متحد برای حمل‌ونقل کالاهای خطرناک، آیین‌نامه‌های سازمان بین‌المللی دریانوردی[1]، و مقررات سازمان بین‌المللی حمل‌ونقل هوایی[2]، بخش جدایی‌ناپذیر از فرآیندهای مدیریت ریسک محسوب می‌شود (Schumann-Bölsche, 2015).

علاوه‌بر ملاحظات ایمنی و زیست‌محیطی، کاهش ریسک‌های اقتصادی و مالی نیز انگیزه مهمی برای سازمان‌هاست تا سطح ایمنی را ارتقا دهند. وقوع یک حادثه می‌تواند منجر به تحمیل هزینه‌هایی گسترده شامل پرداخت غرامت، دعاوی حقوقی، افزایش حق بیمه، آسیب به برند و از بین رفتن دارایی‌های فیزیکی شود (Reiter & Stehrer, 2023). از این‌رو، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیا[3]، سیستم‌های مکان‌یابی ماهواره‌ای، و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، می‌تواند نظارت پیوسته بر وضعیت کالاها را ممکن ساخته و در نتیجه، احتمال بروز حوادث را کاهش دهد (Liu et al., 2012).

همچنین، استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه، ابزارهای ارزیابی ریسک و سیستم‌های تصمیم‌یار، نقش مهمی در تخصیص منابع، انتخاب مسیرهای ایمن، و پیش‌بینی سناریوهای بحرانی ایفا می‌کند (Han & Zhu, 2024). این ابزارها به تصمیم‌گیران امکان می‌دهند تا با رویکردی مبتنی بر داده، بین الزامات ایمنی، هزینه عملیاتی و کارایی، توازن برقرار کنند.

در نهایت، با توجه به گسترش شبکه‌های لجستیکی و افزایش حجم تجارت بین‌المللی، هماهنگی فراسازمانی و همکاری فرامرزی برای یکپارچه‌سازی مقررات و استانداردسازی فرآیندهای حمل‌ونقل کالاهای خطرناک بیش از پیش اهمیت یافته است (Renčelj et al., 2025).

بر این اساس، مقاله حاضر با تمرکز بر مروری نظام‌مند و تحلیلی بر ادبیات موجود، به بررسی چارچوب‌های ایمنی، سیاست‌های اجرایی، فناوری‌های نوین و چالش‌های ساختاری در زنجیره تأمین کالاهای خطرناک می‌پردازد. هدف، شناسایی فرصت‌ها، تنگناها و روندهای نوظهور در جهت ارتقای ایمنی و کاهش ریسک در این بخش حیاتی از حمل‌ونقل بین‌المللی است.

۲- پیشینه تحقیق

حمل‌ونقل مواد خطرناک یکی از چالش‌های اساسی در زنجیره تأمین مدرن است. افزایش حجم حمل‌ونقل این مواد، به همراه پیچیدگی‌های مرتبط با ایمنی، محیط زیست و مقررات، موجب شده است که پژوهش‌های بسیاری در راستای مدیریت ریسک و بهبود ایمنی انجام شود. مطالعات متعددی به بررسی مدل‌های ارزیابی ریسک، فناوری‌های نوین در شناسایی مواد خطرناک، تأثیر رفتارهای انسانی و راهبردهای کاهش خسارت پرداخته‌اند. در ادامه، مهم‌ترین مطالعات در این زمینه بررسی می‌شوند.

۲-۱- مدل‌های ارزیابی ریسک در حمل‌ونقل مواد خطرناک

هولشک (۲۰۲۱) مدل‌های مختلف ارزیابی ریسک برای مسیریابی وسایل نقلیه حامل مواد خطرناک در مناطق شهری را بررسی کرده است. این پژوهش به مقایسه دو مدل وابسته به بار[4] و مستقل از بار[5] پرداخته و تأثیر عواملی مانند اندازه ناوگان و تعادل بین کاهش ریسک و کاهش مسافت طی شده را تحلیل کرده است. نتایج نشان می‌دهد که این فاکتورها می‌توانند بهینه‌سازی مسیر را تحت تأثیر قرار داده و نتایج متفاوتی ارائه دهند (Holeczek, 2021).

جیانگ و چنگ (۲۰۲۲) در یک مرور سیسمضمون، روندهای تحقیقاتی در ارزیابی ریسک حمل‌ونقل مواد خطرناک طی سه دهه اخیر (۱۹۹۱–۲۰۲۰) را بررسی کرده‌اند. این مطالعه نشان می‌دهد که مدل‌های ارزیابی ریسک از روش‌های کیفی به سمت روش‌های کمی مانند تحلیل احتمالاتی و مدل‌سازی ریاضی تکامل یافته‌اند. همچنین مشخص شده است که ارزیابی ریسک در حمل‌ونقل جاده‌ای نسبت به سایر روش‌های حمل‌ونقل، جامع‌تر بوده اما همچنان در حمل‌ونقل چندوجهی ضعف‌هایی وجود دارد (Guo & Luo, 2022).

ژانگ و همکاران (۲۰۲٤) مدلی برای انتخاب و برنامه‌ریزی مسیرهای حمل‌ونقل مواد خطرناک بر اساس خطرات ناشی از انفجار ارائه کرده‌اند. این روش با استفاده از مدولار کردن شبکه جاده‌ای و توسعه یک سیستم مقایسه ریسک و هزینه، دقت بالایی در رتبه‌بندی مسیرها و توزیع ریسک نشان داده است. نتایج نشان داد که این روش می‌تواند به بهبود مدیریت ریسک و استراتژی‌های حمل‌ونقل کمک کند (Chenglin et al., 2024). ژای و همکاران (۲۰۲۵) نیز در مطالعه‌ای مشابه، از الگوریتم‌های جستجو برای برنامه‌ریزی مسیر و رتبه‌بندی ریسک حوادث انفجاری استفاده کرده‌اند. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که این مدل قابلیت انعطاف‌پذیری و سفارشی‌سازی دارد و می‌تواند تصمیم‌گیری را در شرایط مختلف بهبود بخشد (Chen et al., 2025).

کوئن وهمکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی سیستم‌های تحلیل ریسک برای حمل مواد خطرناک[6] می‌پردازد و یک چارچوب جدید برای تجسم و محاسبه ریسک حمل این مواد در فلاندرز (بلژیک) ارائه می‌دهد. نویسندگان با استفاده از داده‌های تاریخی حوادث و پارامترهای محلی زیرساخت‌ها، روشی برای محاسبه احتمال وقوع حوادث مرتبط با حمل مواد خطرناک توسعه داده‌اند. این چارچوب امکان ترسیم نقشه‌های ریسک جهانی و محلی را فراهم می‌کند و می‌تواند برای حمل‌ونقل جاده‌ای، ریلی، آبی و حتی خطوط لوله استفاده شود. روش پیشنهادی تقسیم مسیر حمل به بخش‌های کوچک و محاسبه ریسک هر بخش بر اساس احتمال وقوع حادثه و پیامدهای آن. این چارچوب می‌تواند برای ارزیابی ریسک حمل مواد خطرناک در مسیرهای مختلف استفاده شود و به تصمیم‌گیری بهتر در مدیریت ریسک کمک کند (Van Raemdonck et al., 2013).

ایلماز و همکاران در سال ۲۰۱٦ به بررسی ادبیات مربوط به حمل‌ونقل مواد خطرناک از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱٤ می‌پردازد. حمل‌ونقل مواد خطرناک به دلیل پیامدهای ناگوار ناشی از حوادث احتمالی، موضوعی حیاتی در حوزه لجستیک و مدیریت ریسک است.

در این مقاله، ۸۸ مقاله مرتبط با حمل‌ونقل مواد خطرناک بررسی و در شش دسته اصلی طبقه‌بندی شده‌اند: ارزیابی ریسک، مسیریابی، مسیریابی و زمان‌بندی، پاسخ به شرایط اضطراری، طراحی شبکه و تحلیل حوادث (Yilmaz et al., 2016).

۲-۲- فناوری‌های نوین در مدیریت ریسک و شناسایی مواد خطرناک

چن و همکاران (۲۰۲٤) از تصویربرداری هیپرسپکترال مادون قرمز نزدیک (NIR) و شبکه عصبی کانولوشنال (CNN) برای شناسایی از راه دور مواد خطرناک استفاده کرده‌اند. این فناوری قادر است مواد خطرناک را حتی در محیط‌های پیچیده و با وجود موانع شناسایی کند. نتایج نشان می‌دهد که این روش نسبت به مدل‌های سه‌بعدی دقت بالاتر و پردازش سریع‌تری دارد (Chen & Bai, 2024).

چای و همکاران در سال ۲۰۲۵ به تحلیل جامع آمار تصادفات حمل‌ونقل مواد خطرناک در بخش حمل‌ونقل جاده‌ای ایالات متحده پرداخته و یک مدل پیشرفته برای ارائه داده‌های قوی در زمینه هشدار خطر ارائه می‌دهد. با بررسی بیش از ٦۰۰،۰۰۰ تصادف از سال ۱۹۷۱ تا ۲۰۲۳، مشخص شد که تعداد تصادفات سالانه از سال ۲۰۲۱ به بیش از ۲۰،۰۰۰ مورد رسیده است.

بیشتر این تصادفات بین ساعت ٦:۰۰ تا ۱۱:۰۰ شب رخ داده و ۹۱/۷٪ از آنها منجر به نشت مواد خطرناک شده‌اند. برای بهبود دقت هشدار خطر، مدل "SF-T0.25" با استفاده از الگوریتم Stacking توسعه داده شد که دقت پیش‌بینی آن به ۰/۹٦۲۸ رسید. این مدل در پیش‌بینی شرایط آب و هوایی و سرعت لحظه‌ای وسایل نقلیه در زمان تصادف عملکرد خوبی نشان داد و می‌تواند داده‌های قابل اعتمادی برای هشدار خطر حمل‌ونقل مواد خطرناک فراهم کند (Chai et al., 2025).

گوبی و همکاران در سال ۲۰۱۳ مروری جامع بر مفهوم اینترنت اشیا ارائه می‌دهند و به بررسی اجزای معماری، کاربردها، چالش‌ها و جهت‌گیری‌های آینده آن می‌پردازد. نویسندگان IoT را به عنوان شبکه‌ای از اشیای فیزیکی متصل به اینترنت تعریف می‌کنند که از طریق حسگرها، نرم‌افزارها و فناوری‌های ارتباطی، داده‌ها را جمع‌آوری و تبادل می‌کنند (Gubbi et al., 2013).

۲-۳- طراحی مسیرهای ایمن و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل مواد خطرناک

هولشک در سال ۲۰۱۹ به بررسی جامع ادبیات مربوط به حمل‌ونقل مواد خطرناک در طول ٤۵ سال گذشته می‌پردازد. این مقاله بر روی حمل‌ونقل جاده‌ای مواد خطرناک تمرکز دارد و یک طبقه‌بندی دقیق برای مسائل مربوط به مسیریابی کامیون‌های حامل مواد خطرناک ارائه می‌دهد. مسائل مربوط به حمل‌ونقل مواد خطرناک به دسته‌های مختلفی مانند مسائل کوتاه‌ترین مسیر (SP-WOS) تقسیم‌بندی شده‌اند (Holeczek, 2019).

موهری و همکاران در سال ۲۰۲۲ بر روی مسائل مسیریابی[۷]، مسیریابی–زمان‌بندی[۸] و طراحی شبکه مواد خطرناک تمرکز دارد. هدف اصلی این مقاله، بررسی مفروضات، اهداف، محدودیت‌ها، تصمیمات، پارامترهای ورودی، تکنیک‌های مدل‌سازی و مطالعات موردی در این حوزه است. همچنین، چالش‌های اصلی و شکاف‌های تحقیقاتی در ادبیات موجود شناسایی شده و جهت‌های تحقیقاتی آینده پیشنهاد شده‌اند (Mohri et al., 2021).

گویگنت و همکاران به بررسی تأثیر اقتصادی حوادث شیمیایی صنعتی بر ارزش املاک در ایالات متحده می‌پردازد. مطالعه با استفاده از روش تفاوت–در–تفاوت[۹] به تحلیل داده‌های ۳۰ ساله (۱۹۹۰–۲۰۲۰) پرداخته است (Guignet et al., 2023).

مقاله به بررسی چالش‌های حمل‌ونقل چندوجهی کالاهای خطرناک می‌پردازد که یکی از پیچیده‌ترین مسائل در زنجیره تأمین محسوب می‌شود (Fjortoft, 2006).

نکات کلیدی:

–چالش‌های اصلی در انتقال کالاهای خطرناک بین روش‌های مختلف حمل‌ونقل (جاده، ریل، دریا)

–مشکلات هماهنگی بین مقررات متفاوت برای هر شیوه حمل‌ونقل

–ریسک‌های ویژه در نقاط انتقال (مانند بنادر یا پایانه‌های بارگیری)

–نیاز به استانداردسازی فرآیندها و مستندات در حمل‌ونقل چندوجهی

–بررسی موردی از چالش‌های عملیاتی در اجرای مقررات بین‌المللی

بررسی ادبیات نشان می‌دهد که حمل‌ونقل مواد خطرناک چالش‌های متعددی را از نظر ایمنی، مقررات، فناوری، مسیریابی و رفتار انسانی به همراه دارد. تحقیقات اخیر بر استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی، یادگیری ماشین، تصویربرداری هیپرسپکترال، اینترنت اشیا و بلاکچین برای کاهش ریسک و بهبود ایمنی تأکید دارند. همچنین، مطالعات جدید نشان داده‌اند که طراحی مسیرهای ایمن و برنامه‌ریزی بهینه شبکه حمل‌ونقل نقش کلیدی در مدیریت ریسک دارد. از سوی دیگر، پیش‌بینی خطرات و توسعه مدل‌های هشدار سریع مبتنی بر هوش مصنوعی، امکان کاهش تصادفات و نشت مواد خطرناک را فراهم می‌کند. پیشنهادات برای پژوهش‌های آینده می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

–توسعه مدل‌های جامع‌تر برای ارزیابی ریسک که بتواند عوامل مختلفی همچون هزینه، زمان و میزان ریسک را به‌طور همزمان در نظر بگیرد.

–بهبود روش‌های پیش‌بینی و شناسایی خطرات از طریق ترکیب فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و حسگرهای IoT.

–بررسی و بهینه‌سازی مسیریابی و طراحی شبکه حمل‌ونقل با توجه به محدودیت‌های محیط‌زیستی، زیرساختی و ایمنی.

–مطالعات عمیق‌تر بر روی حمل‌ونقل چندوجهی و چالش‌های آن در مدیریت ریسک، به‌ویژه در حمل‌ونقل ترکیبی ریلی–جاده‌ای و دریایی–زمینی.

–بررسی تأثیر آموزش‌های تخصصی‌تر بر کاهش خطاهای انسانی در حوادث حمل‌ونقل مواد خطرناک و توسعه برنامه‌های آموزشی مبتنی بر شبیه‌سازی و سناریوهای واقعی.

–شکاف موجود در تاثیرات محیط‌زیستی و اجتماعی، نبود مدل‌های جامع برای ارزیابی تأثیرات تجمعی مواد خطرناک بر محیط‌زیست و نیزکمبود مطالعات درباره راهکارهای بازیافت و دفع ایمن این مواد.

که میتوان با توسعه روش‌های ارزیابی چرخه عمر برای کالاهای خطرناک و بررسی راهکارهای کاهش تأثیرات اجتماعی–اقتصادی برای مطالعات آینده پیشنهاد کرد.

همچنین شکاف در فناوری‌های نوظهور و چالش‌های اجرایی مانند هزینه‌های بالای پیاده‌سازی فناوری‌های نوین برای شرکت‌های کوچک و متوسط و نیز گرانی‌های امنیت سایبری در سیستم‌های مبتنی بر اینترنت اشیا و بلاکچین اشاره کرد.

این مطالعات می‌توانند به بهبود سیستم‌های ایمنی و مدیریت ریسک در حمل‌ونقل مواد خطرناک کمک کرده و نقش مهمی در کاهش تلفات و خسارات ایفا کنند.

۲–٤– دسته‌بندی و مرور روش‌ها

در زمینه حمل‌ونقل کالاهای خطرناک، سازمان‌ها و شرکت‌ها باید از روش‌های جامع برای شناسایی، ارزیابی و کنترل ریسک‌ها استفاده کنند. این فرآیند تمامی مراحل زنجیره تأمین را، از تولید و نگهداری تا حمل‌ونقل و توزیع، شامل می‌شود و مستلزم تعامل با ذینفعان مختلفی همچون دولت‌ها، سازمان‌های نظارتی و

جامعه محلی است. اجرای استانداردهای بین‌المللی مانند ISO 45001 (مدیریت ایمنی و بهداشت شغلی) و ADR (موافقتنامه حمل بین‌المللی مواد خطرناک از طریق جاده)، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند ردیابی هوشمند و اینترنت اشیا و همچنین آموزش مستمر نیروی انسانی از مهم‌ترین اقدامات در این حوزه به شمار می‌روند.

۲-٤-۱- روش‌های پیشگیرانه

روش‌های پیشگیرانه نقش کلیدی در کاهش ریسک‌های مرتبط با حمل کالاهای خطرناک دارند. یکی از اصلی‌ترین این روش‌ها، ارزیابی خطر پیش از حمل‌ونقل است که شامل شناسایی دقیق ماهیت کالای خطرناک، بررسی مسیرهای حمل‌ونقل و تعیین راهکارهای کاهش ریسک می‌شود (Goods & Secretariat, 2019). بسته‌بندی ایمن یکی دیگر از جنبه‌های مهم در این زمینه است، به‌طوری‌که کالاهای خطرناک باید مطابق با استانداردهای بین‌المللی بسته‌بندی شوند تا در برابر ضربه، فشار و خوردگی مقاوم باشند (Imo). علاوه بر این، برچسب‌گذاری و علامت‌گذاری صحیح نیز ضرورت دارد تا محتوای بسته‌ها و خطرات احتمالی آن‌ها به‌روشنی مشخص باشد (Iata). مستندات دقیق، از جمله برگه اطلاعات ایمنی مواد[۱۰] و گواهی حمل کالای خطرناک، نیز از جمله اقدامات ضروری برای اطمینان از حمل ایمن این مواد محسوب می‌شود (Unece, 2023). یکی از مؤثرترین اقدامات پیشگیرانه، آموزش تخصصی پرسنل درگیر در حمل کالاهای خطرناک است. این آموزش‌ها نه‌تنها شامل آشنایی با قوانین و مقررات بین‌المللی است، بلکه شیوه‌های ایمنی و واکنش در شرایط اضطراری را نیز در بر می‌گیرد (Transportation, 2016). انتخاب وسیله نقلیه مناسب برای حمل مواد خطرناک نیز از اهمیت بالایی برخوردار است؛ این وسایل باید دارای سیستم‌های ایمنی مناسب و علائم هشداردهنده باشند تا خطرات بالقوه را به حداقل برسانند (Imo). علاوه بر این، بازرسی‌های منظم کالاهای خطرناک و وسایل نقلیه مورد استفاده در حمل آن‌ها، که شامل بررسی بسته‌بندی، برچسب‌ها و شرایط نگهداری است، نقش مهمی در کنترل ریسک دارد (Iata). یکی دیگر از جنبه‌های کلیدی روش‌های پیشگیرانه، برنامه‌ریزی مسیرهای حمل ایمن است. انتخاب مسیرهای مناسب، اجتناب از مسیرهای پرترافیک و بهره‌گیری از مسیرهایی که دارای امکانات اضطراری مناسب هستند، از جمله ملاحظاتی است که باید در نظر گرفته شود (Unece, 2023). در این راستا، فناوری‌های نوینی مانند سیستم‌های ردیابی GPS و سنسورهای نظارتی برای پایش دما و فشار، امکان نظارت لحظه‌ای و بهبود ایمنی را فراهم می‌آورند. علاوه بر این، پیش‌بینی اقدامات اضطراری و اجرای آن‌ها در مواقع بحران می‌تواند از گسترش خسارات جلوگیری کند (Transportation, 2016). رعایت دقیق استانداردهای بین‌المللی، از جمله ADR، IMDG، IATA و DOT، نقش کلیدی در تضمین ایمنی حمل‌ونقل کالاهای خطرناک ایفا می‌کند.

۲-٤-۲- روش‌های کنترلی

در کنار روش‌های پیشگیرانه، روش‌های کنترلی نیز اهمیت بسزایی دارند. طبقه‌بندی و برچسب‌گذاری صحیح کالاهای خطرناک اولین گام در این مسیر است که بر اساس استانداردهای بین‌المللی، مانند سیستم UN، انجام می‌شود. بسته‌بندی ایمن، استفاده از تجهیزات ایمنی همچون سیستم‌های اطفای حریق و سنسورهای تشخیص نشت گاز، و همچنین آموزش مداوم پرسنل، از جمله دیگر راهکارهای کنترلی به شمار می‌روند (Iata; Un-ilibrary; Unece, 2023). مدیریت مسیرهای حمل‌ونقل نیز به‌عنوان یک اقدام کنترلی مهم، از طریق اجتناب از مناطق پرجمعیت و مسیرهای پرخطر انجام می‌شود (Organization, 2004). علاوه بر این، سیستم‌های مستندسازی و ردیابی، امکان پایش مستمر کالاهای خطرناک را فراهم کرده و در مواقع بحرانی اطلاعات ارزشمندی در اختیار مدیران قرار می‌دهد (Iata).

۲-٤-۳- روش‌های واکنشی

در مقابل، روش‌های واکنشی زمانی اجرا می‌شوند که حادثه‌ای رخ داده باشد. پاسخ به حوادث یکی از مهم‌ترین این روش‌هاست که شامل عملیات امدادی توسط تیم‌های واکنش سریع همچون نیروهای آتش‌نشانی، پلیس و متخصصان محیط‌زیست است (Association). در مراحل بعدی، عملیات پاک‌سازی و بازیابی محیطی آغاز می‌شود که شامل جمع‌آوری مواد نشت‌شده، پاک‌سازی محیط و بازگرداندن شرایط به حالت اولیه است (Agency). بررسی و تحلیل حوادث برای شناسایی علت‌های ریشه‌ای و پیشگیری از وقوع مجدد آن‌ها نیز از دیگر گام‌های اساسی در این فرآیند محسوب می‌شود (Transportation). پس از وقوع حوادث بزرگ، معمولاً قوانین و مقررات به‌روز شده

و اقدامات اصلاحی در فرآیندهای حمل‌ونقل اعمال می‌شود تا سطح ایمنی بهبود یابد (Manifest). همچنین، پس از وقوع حوادث، برنامه‌های آموزشی برای رانندگان، کارکنان حمل‌ونقل و تیم‌های واکنش اضطراری مورد بازنگری و بهینه‌سازی قرار می‌گیرد تا احتمال بروز خطای انسانی کاهش یابد (Association).

با وجود اهمیت روش‌های واکنشی، محدودیت‌هایی نیز برای آن‌ها وجود دارد. این روش‌ها تنها پس از وقوع حادثه اجرا می‌شوند و در جلوگیری از بروز حادثه اثربخشی ندارند (Flyriver, 2025). علاوه بر این، هزینه‌های بالای عملیات امداد، پاک‌سازی و بازیابی، از جمله چالش‌های روش‌های واکنشی به شمار می‌آیند (Dennis Guignet et al., 2023). مدیریت ریسک و ایمنی در حمل‌ونقل کالاهای خطرناک، یکی از چالش‌های مهم در صنعت لجستیک و زنجیره تأمین است. افزایش حجم تجارت جهانی و تنوع مواد خطرناک، نیازمند اتخاذ راهکارهای نوآورانه و به‌روز برای کاهش ریسک است. در این راستا، به‌کارگیری فناوری‌های نوظهور، از جمله هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، بلاکچین و اینترنت اشیا، نقش مهمی در پیش‌بینی و کاهش خطرات حمل‌ونقل کالاهای خطرناک ایفا می‌کند. با این حال، چالش‌های تحقیقاتی همچنان در این حوزه وجود دارد و نیازمند مطالعات گسترده‌تر برای بهینه‌سازی روش‌های مدیریت ریسک، بهبود مقررات و افزایش سطح ایمنی در زنجیره تأمین است.

۲-۵- فناوری‌های نوظهور در مدیریت ریسک و ایمنی و چالش‌ها و خلاهای پژوهشی

در سال‌های اخیر، حمل‌ونقل کالاهای خطرناک[11] به‌طور فزاینده‌ای تحت تأثیر فناوری‌های نوظهور قرار گرفته است. با این حال، این حوزه همچنان با چالش‌های قابل‌توجهی روبه‌روست و برخی خلأهای تحقیقاتی نیازمند بررسی‌های عمیق‌تر هستند. توسعه فناوری‌های دیجیتال، به‌ویژه پس از دوران همه‌گیری کووید-۱۹، باعث افزایش تقاضا برای روش‌های ایمن‌تر و کارآمدتر شده است. در این راستا، یکپارچه‌سازی ابزارهای پیشرفته مدیریت ریسک اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است.

۲-۵-۱- پیشرفت های فناوری در حمل‌ونقل کالا های خطرناک

اینترنت اشیا با استفاده از حسگرهای هوشمند و سیستم‌های نظارتی بلادرنگ، امکان ردیابی و پایش شرایط حمل‌ونقل را فراهم می‌کند. این فناوری، پارامترهای مهمی مانند دما، فشار و رطوبت را کنترل کرده و در صورت بروز شرایط خطرناک، هشدارهای لازم را ارسال می‌کند (Witkowski, 2017). هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در تحلیل داده‌های تاریخی و آنی نقش مهمی ایفا می‌کنند. این فناوری‌ها می‌توانند الگوهای خطر را شناسایی کرده و احتمال وقوع ریسک‌های مختلف را با دقت بالایی پیش‌بینی کنند. همچنین، هوش مصنوعی در بهینه‌سازی مسیرهای حمل‌ونقل و کاهش احتمال بروز حوادث نیز مؤثر است (Agi & Jha, 2022).

بلاکچین از طریق ایجاد یک سیستم شفاف و غیرقابل‌دستکاری، امکان ردیابی کامل کالاهای خطرناک از مبدأ تا مقصد را فراهم می‌کند. این فناوری به کاهش تقلب، بهبود امنیت داده‌ها و افزایش پاسخگویی در زنجیره تأمین کمک می‌کند (Saberi et al., 2019).

در حوزه آموزش و آمادگی برای شرایط اضطراری، واقعیت افزوده و واقعیت مجازی ابزارهای مؤثری هستند که به کارکنان امکان می‌دهند تا در محیطی ایمن و شبیه‌سازی‌شده، مهارت‌های لازم برای مواجهه با شرایط خطرناک را کسب کنند (Gubbi et al., 2013).

۲-۵-۲- چالش های زیرساختی و عملیاتی در مدیریت ریسک

در برخی مناطق مانند بالکان غربی، وجود زیرساخت‌های حمل‌ونقل قدیمی و عدم تطابق با استانداردهای ایمنی بین‌المللی، مشکلاتی را در مدیریت ریسک به وجود می‌آورد (Renčelj et al., 2025). آموزش ناکافی، فشار کاری بالا و خستگی رانندگان و اپراتورها از جمله عواملی هستند که می‌توانند منجر به بروز حوادث شوند (Horobets et al., 2022). عدم وجود استانداردهای جهانی یکپارچه موجب شده است که قوانین و مقررات مرتبط با حمل‌ونقل کالاهای خطرناک در کشورهای مختلف متفاوت باشد و این موضوع می‌تواند باعث افزایش ریسک و کاهش کارایی سیستم‌های ایمنی شود (Guo & Luo, 2022; Renčelj et al., 2025).

از آنجایی که حمل‌ونقل کالاهای خطرناک اغلب از مرزهای ملی عبور می‌کند، هر کشور قوانین خاص خود را در این زمینه دارد (Fjortoft, 2006). در زنجیره‌های حمل‌ونقل چندوجهی، یعنی زمانی که کالاهای خطرناک از یک حالت حمل (مثلاً جاده‌ای) به حالت دیگر (مثلاً ریلی یا دریایی) منتقل می‌شوند، هماهنگی میان فناوری‌های مورد استفاده دشوار می‌شود. فناوری‌هایی که برای کمک به رعایت مقررات طراحی شده‌اند، باید قابلیت انطباق با الزامات متنوع هر کشور را داشته باشند، در غیر این صورت، نظارت پیوسته بر کالاهای خطرناک در مسیرهای بین‌المللی دشوار خواهد بود (Fjortoft, 2006). همان‌طور که اشاره شد، حمل‌ونقل کالاهای خطرناک اغلب شامل ترکیبی از جاده، راه‌آهن، دریا و هوا است. هر یک از این روش‌ها سیستم‌های نظارتی مخصوص به خود را دارند و استانداردهای ایمنی متفاوتی اعمال می‌شود (Myronenko et al., 2024). در این میان، چالش اصلی هماهنگی میان سیستم‌های فناورانه مختلف برای ایجاد یک شبکه یکپارچه مدیریت ایمنی است. بدون استانداردسازی فرمت‌های داده و پروتکل‌های ارتباطی، امکان انتقال اطلاعات ایمنی میان بخش‌های مختلف زنجیره حمل‌ونقل کاهش یافته و خطرات افزایش می‌یابد (Myronenko et al., 2024).

۲-۵-۳- نوآوری‌های جدید در کاهش ریســـک حمل‌ونقل کالاهای خطرناک

توسعه مدل‌های ریاضی و تکنیک‌های یادگیری ماشین به تحلیل داده‌های تاریخی و بلادرنگ کمک کرده و می‌تواند الگوهای خطر را شناسایی کند (Horobets et al., 2022). تکنیک muon scanning قابلیت شناسایی دقیق محموله‌های خطرناکی که ممکن است به‌درستی اعلام نشده باشند را فراهم می‌کند. این فناوری برای کنترل محموله‌های ورودی و خروجی در بنادر و پایانه‌های حمل‌ونقل بسیار حیاتی است (Djuka Tsague et al., 2023). بلاکچین می‌تواند به‌عنوان یک ابزار قدرتمند برای شفاف‌سازی زنجیره تأمین و افزایش امنیت داده‌های مرتبط با حمل‌ونقل کالاهای خطرناک استفاده شود (Guo & Luo, 2022).

بسیاری از فناوری‌های نوظهور هزینه‌های اولیه بالایی دارند. پیاده‌سازی این فناوری‌ها مستلزم سرمایه‌گذاری سنگین در تجهیزات، آموزش، نگهداری و توسعه نرم‌افزارهای مرتبط است که برای بسیاری از شرکت‌های کوچک یا فعالان در کشورهای در حال توسعه، چالش‌برانگیز است (Rishabh Lohade & Sinha, 2024). این مسئله می‌تواند منجر به ایجاد شکاف ایمنی میان شرکت‌های بزرگ و مجهز با سازمان‌های کوچک‌تر شود، که در نتیجه، سطح کلی ایمنی در حمل‌ونقل کالاهای خطرناک کاهش خواهد یافت.

۲-۵-٤- ملاحظات محیط‌زیستی و بهره‌وری عملیاتی

عملکرد مداوم سیستم‌های نظارت و حسگرها ممکن است موجب افزایش مصرف انرژی و تولید زباله‌های الکترونیکی شود، که این موضوع خود یک چالش محیط‌زیستی به شمار می‌آید (Zelenko et al., 2019).

بااین‌حال، تحقیقات نشان داده‌اند که مزایای محیط‌زیستی استفاده از فناوری‌های ایمنی، مانند کاهش نشت مواد خطرناک، بسیار بیشتر از تأثیرات منفی آن‌هاست (Zelenko et al., 2019). علاوه بر این، اجرای این فناوری‌ها نباید باعث کاهش چشمگیر بهره‌وری عملیاتی شود، زیرا شرکت‌های حمل‌ونقل همواره به دنبال بهینه‌سازی هزینه‌ها و زمان تحویل کالا هستند (Myronenko et al., 2024). راه‌حل‌های فناورانه باید هم ایمنی را افزایش دهند و هم به بهبود کارایی عملیات حمل‌ونقل کمک کنند.

کالاهای خطرناک در زنجیره تأمین جهانی از کشورهای مختلف عبور می‌کنند، که زیرساخت‌های فنی، الزامات قانونی، و فرهنگ‌های ایمنی متفاوتی دارند (Fjortoft, 2006). فناوری‌های مورد استفاده در این حوزه باید در برابر این تغییرات منعطف باشند و بتوانند اطلاعات ایمنی را به شکل یکپارچه در سراسر مسیر حمل‌ونقل ارائه دهند. تحقیقات نشان داده‌اند که مهم‌ترین چالش‌های مدیریت حمل‌ونقل کالاهای خطرناک در زنجیره‌های بین‌المللی، شامل ناسازگاری سیستم‌های فناورانه، دشواری دسترسی به داده‌ها در مناطق مختلف، و نیاز به تطبیق با قوانین چندگانه است (Fjortoft, 2006).

۲-۵-۵- شکاف‌های پژوهشی و مسیرهای آینده در مدیریت ریسک و ایمنی حمل‌ونقل کالاهای خطرناک

بیشتر تحقیقات بر حمل‌ونقل جاده‌ای متمرکز شده‌اند، درحالی‌که ارزیابی ریسک در حمل‌ونقل ریلی و بین‌مدلی نیاز به بررسی‌های عمیق‌تری دارد (Guo & Luo, 2022). ایجاد پایگاه‌های داده‌ای بین‌المللی و به‌اشتراک‌گذاری اطلاعات میان کشورهای مختلف می‌تواند به استانداردسازی روش‌های ارزیابی ریسک کمک کند (Renčelj et al., 2025). روش‌های سنتی ارزیابی ریسک اغلب بر مدل‌های ساده‌شده‌ای متکی هستند که ممکن است پیچیدگی و پویایی حمل‌ونقل کالاهای خطرناک را به‌درستی منعکس نکنند (Figueiredo & Figueiredo, 2016). در حوزه ایمنی هوانوردی، محدودیت‌های ماتریس‌های ریسک متداول مشخص شده و چارچوب‌های پیشرفته‌تری برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری در مدیریت ریسک پیشنهاد شده‌اند (Figueiredo & Figueiredo, 2016). تحقیقات مشابهی برای سایر شیوه‌های حمل‌ونقل مورد نیاز است تا روش‌هایی توسعه یابند که بتوانند داده‌های بلادرنگ حاصل از فناوری‌های نوظهور را در ارزیابی‌های ریسک پویا وارد کنند. این روش‌ها باید از رویکردهای واکنشی مبتنی بر داده‌های تاریخی فراتر رفته و قابلیت‌های پیش‌بینی‌کننده‌ای را برای پیشگیری از حوادث بالقوه ارائه دهند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که نقاط تلاقی بین شیوه‌های مختلف حمل‌ونقل از آسیب‌پذیرترین بخش‌های زنجیره مدیریت ایمنی محسوب می‌شوند (Fjortoft, 2006; Myronenko et al., 2024). بنابراین، تحقیقات بیشتری برای توسعه چارچوب‌ها و فناوری‌هایی لازم است که بتوانند نظارت و مدیریت ایمنی را در هنگام تغییر شیوه حمل‌ونقل (مثلاً از جاده به راه‌آهن یا از کشتی به هواپیما) تضمین کنند. این ادغام نه تنها نیازمند قابلیت‌های فنی برای تبادل داده‌های ایمنی است، بلکه به هماهنگی سازمانی بین اپراتورهای حمل‌ونقل، نهادهای نظارتی و نیروهای امدادی نیز نیاز دارد تا یک سیستم مدیریت ایمنی یکپارچه ایجاد شود.

ظهور روش‌های جدید حمل‌ونقل مانند وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین و خودروهای خودران، سؤالات پژوهشی جدیدی را در زمینه ایمنی کالاهای خطرناک مطرح کرده است. مطالعه‌ای در مورد مقررات کالاهای خطرناک در حمل‌ونقل هوایی با پهپادهای حمل‌کننده بارهای پزشکی نشان داده که چارچوب‌های قانونی فعلی، که برای هواپیماهای سرنشین‌دار طراحی شده‌اند، ممکن است برای این فناوری‌های جدید مناسب نباشند (Grote et al., 2021). پژوهش‌های مشابهی در زمینه وسایل نقلیه جاده‌ای و دریایی خودران مورد نیاز است تا استراتژی‌های ایمنی متناسب با ویژگی‌های عملیاتی و مشخصات ریسک آن‌ها تدوین شود.

تحقیقات نشان داده‌اند که عوامل انسانی و ملاحظات ارگونومیکی نقشی کلیدی در ایمنی حمل‌ونقل کالاهای خطرناک ایفا می‌کنند اما اغلب نادیده گرفته می‌شوند. یک تحلیل علم‌سنجی در حوزه مدیریت ایمنی در صنعت ساخت‌وساز، اهمیت درنظرگرفتن اختلالات اسکلتی-عضلانی ناشی از فعالیت‌های جابجایی دستی و شرایط نامناسب کاری را برجسته کرده است (Vijayakumar & Choi, 2022). مشکلات مشابهی در عملیات بارگیری و تخلیه کالاهای خطرناک وجود دارد که می‌تواند باعث افزایش خطاهای انسانی و کاهش ایمنی شود. پژوهش‌های آینده باید به بررسی عوامل ارگونومیکی مؤثر بر عملیات حمل کالاهای خطرناک بپردازند تا مداخلات مناسبی برای کاهش ریسک‌های فوری و پیامدهای بلندمدت سلامت شغلی پیشنهاد شود.

روش‌های آموزشی موجود برای کارکنان حمل کالاهای خطرناک عمدتاً بر رعایت مقررات و رویه‌های فنی تمرکز دارند، اما تأثیر عوامل انسانی بر عملکرد ایمنی را به اندازه کافی مورد توجه قرار نمی‌دهند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که فناوری‌های جدید مانند واقعیت مجازی و واقعیت افزوده می‌توانند کیفیت آموزش را افزایش دهند و به کارکنان امکان تجربه سناریوهای واقعی و تمرین واکنش به شرایط اضطراری را بدون مواجهه با خطرات واقعی بدهند (Park et al., 2020). تحقیقات آینده باید بر طراحی بهینه این برنامه‌های آموزشی، از جمله سطح مناسب جزئیات، پیچیدگی سناریوها و روش‌های ارزیابی عملکرد، متمرکز شوند تا به بهبود مدیریت عوامل انسانی در حمل کالاهای خطرناک کمک کنند.

ارزیابی سیستم‌های حمل‌ونقل کالاهای خطرناک در کشورهای بالکان غربی نشان داده که ناهماهنگی قابل‌توجهی در اجرای استانداردهای بین‌المللی در کشورهای مختلف وجود دارد (Renčelj et al., 2025). پژوهش‌های بیشتری برای یافتن راهکارهایی جهت هماهنگ‌سازی مقررات در عین توجه به تفاوت‌های منطقه‌ای در زیرساخت‌های حمل‌ونقل، توانایی‌های اقتصادی و سیستم‌های اداری لازم است. این پژوهش‌ها باید علاوه بر محتوای مقررات، سازوکارهای اجرای آن، نظام‌های

جریمه و تشویقی را نیز بررسی کنند تا پایبندی یکسان به استانداردهای ایمنی در حوزه‌های مختلف حمل‌ونقل تضمین شود. اجرای قوانین کالاهای خطرناک در حمل‌ونقل با پهپادها نشان داده که اعمال مقررات موجود بر فناوری‌های جدید چالش‌برانگیز است (Grote et al., 2021). پژوهش‌های آینده باید به طراحی چارچوب‌های قانونی جدید بپردازند که در عین حفظ استانداردهای ایمنی، ویژگی‌های منحصربه‌فرد این روش‌های جدید حمل‌ونقل را نیز در نظر بگیرند. این تحقیقات باید نه‌تنها بر جنبه‌های فنی، بلکه بر الگوهای عملیاتی، محرک‌های اقتصادی و سازگاری با سیستم‌های حمل‌ونقل موجود نیز تمرکز داشته باشند.

فناوری‌های نوظهور فرصت‌های قابل‌توجهی برای بهبود ایمنی و مدیریت ریسک در حمل‌ونقل کالاهای خطرناک فراهم کرده‌اند. ابزارهایی مانند هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، اسکن کانتینرها و بلاکچین می‌توانند به کاهش چالش‌های موجود از جمله عدم تطابق مقررات بین‌المللی، زیرساخت‌های قدیمی، عوامل انسانی و تهدیدات سایبری کمک کنند. با این حال، اجرای موفق این فناوری‌ها همچنان با موانعی مانند پیچیدگی‌های نظارتی، هزینه‌های پیاده‌سازی، یکپارچگی بین شیوه‌های حمل‌ونقل و ملاحظات محیط‌زیستی مواجه است.

با توجه به شکاف‌های پژوهشی شناسایی‌شده، تحقیقات آینده باید بر توسعه سیستم‌های داده‌محور، روش‌های ارزیابی ریسک پیشرفته، هماهنگی بین‌المللی مقررات، مدیریت عوامل انسانی و بررسی تأثیرات حمل‌ونقل‌های نوظهور متمرکز شوند. همچنین، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین و تدوین سیاست‌های جامع برای کاهش این چالش‌ها نقشی کلیدی در ارتقای ایمنی این حوزه خواهد داشت. تنها از طریق تحقیقات هدفمند و همکاری مؤثر بین نهادهای نظارتی، صنعت و پژوهشگران می‌توان به یک سیستم ایمنی جامع و مؤثر دست یافت که ضمن کاهش ریسک‌های موجود، حمل‌ونقل کالاهای خطرناک را ایمن‌تر و کارآمدتر سازد.

۳- روش‌شناسی

مقاله حاضر از رویکردی کیفی و اکتشافی بهره می‌برد که بر مبنای تحلیل مضمون ساختاریافته و با اتکا بر منابع ثانویه صورت گرفته است. هدف از این روش، استخراج دانش و الگوهای مفهومی از مجموعه‌ای از مطالعات دانشگاهی، اسناد سیاست‌گذاری و گزارش‌های صنعتی در زمینه مدیریت ریسک و ایمنی در زنجیره تأمین کالاهای خطرناک است. برخلاف پژوهش‌های مبتنی بر داده‌های میدانی (نظیر مصاحبه یا پیمایش)، در این مطالعه، تحلیل صرفاً بر پایه داده‌های اسنادی انجام گرفته و بر درک جامع از وضعیت موجود، چالش‌ها و فرصت‌های موجود در این حوزه تمرکز دارد. در طراحی پژوهش از روش‌شناسی مبتنی بر مرور اسنادی استفاده شده که برای تحلیل روندهای مرتبط با ایمنی، دیجیتال‌سازی، قوانین حمل‌ونقل و فناوری‌های نوظهور در زنجیره تأمین مواد خطرناک بسیار مناسب است. انتخاب این رویکرد امکان بررسی جامع و تطبیقی مطالعات بین‌المللی و سیاست‌های جاری را فراهم می‌سازد، به‌ویژه در بسترهای پیچیده‌ای مانند حمل‌ونقل چندوجهی و مدیریت کالاهای با ماهیت پرریسک.

۳-۱- روش‌شناسی مروری

در گام نخست، با تبیین چارچوب نظری پژوهش، سؤالات اصلی تحقیق تعریف شدند؛ از جمله اینکه «مهم‌ترین روش‌ها و فناوری‌های کاهش ریسک در زنجیره تأمین کالاهای خطرناک چیست؟»، «چه چالش‌هایی در پیاده‌سازی این روش‌ها وجود دارد؟» و «چه شکاف‌هایی در ادبیات پژوهشی قابل شناسایی است؟». بر این اساس، فرآیند جستجوی منابع علمی با تمرکز بر کلیدواژه‌هایی از قبیل "Hazardous Materials Transportation"، "Dangerous Goods Supply Chain"، "Risk Assessment"، "Safety Management"، "IoT in Logistics"، "AI for Hazmat Safety"، "Blockchain and Supply Chain Safety" و معادل‌های فارسی آن‌ها آغاز شد. منابع اطلاعاتی مورد بررسی از پایگاه‌های داده علمی معتبر نظیر ScienceDirect، Springer، Elsevier، Taylor & Francis، Scopus، Web of Science و نیز Google Scholar استخراج گردیدند. همچنین برای پوشش اسناد رسمی و استانداردهای بین‌المللی، مستندات منتشرشده از سوی سازمان‌هایی مانند UN، IATA، IMO، UNECE، NFPA و US DOT نیز مدنظر قرار گرفت.

انتخاب منابع بر مبنای معیارهای زیر صورت گرفت:

-اعتبار علمی مقاله (انتشار در نشریات علمی معتبر و دارای داوری همتا)،

-ارتباط مستقیم با موضوع حمل و نقل کالاهای خطرناک، ایمنی زنجیره تأمین، یا فناوری‌های نوین در مدیریت ریسک،
-تازگی اطلاعات (تمرکز بر مقالات منتشرشده از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵)،
-و در برخی موارد، اهمیت نظری یا کاربردی مستندات رسمی صرف‌نظر از سال انتشار.

در مجموع، بیش از ۷۰ منبع اولیه شناسایی شد که پس از بررسی عمیق‌تر، ٤٤ منبع کلیدی برای تحلیل نهایی انتخاب و در بخش‌های مختلف مقاله مورد استفاده قرار گرفتند. محتوای این منابع با رویکردی ترکیبی از تحلیل مضمون[۱۲] و تحلیل مقایسه‌ای[۱۳] مورد بررسی قرار گرفت تا ضمن شناسایی روش‌ها و فناوری‌های مورد استفاده، امکان مقایسه اثربخشی، چالش‌ها و بسترهای کاربردی آن‌ها فراهم شود.

۳-۲- تحلیل مضمون (محتوایی) در مدیریت ریسک و ایمنی

به منظور سازماندهی داده‌ها و تفسیر مفاهیم پنهان در ادبیات، از تحلیل مضمون بهره گرفته شد. این روش، با تمرکز بر کشف الگوهای مفهومی در داده‌های کیفی، امکان شناسایی روندهای تکرارشونده، چالش‌های ساختاری و فرصت‌های نوآورانه در زنجیره تأمین کالاهای خطرناک را فراهم می‌سازد. تحلیل مضمون به‌ویژه برای بررسی محتوای نظری در زمینه‌هایی همچون ارزیابی ریسک، سیاست‌گذاری ایمنی، استفاده از فناوری‌های دیجیتال، و چالش‌های انسانی در حمل‌ونقل مواد خطرناک مؤثر است. در این مطالعه، تحلیل مضمون بر اساس چارچوب شش‌مرحله‌ای پیشنهادی براون و کلارک (Braun & Clarke, 2013) انجام گرفت. این مراحل شامل: (۱) آشنایی اولیه با داده‌ها از طریق مرور دقیق متون، (۲) کدگذاری سیسمضمون مفاهیم کلیدی، (۳) گروه‌بندی کدها در قالب مضامین اولیه، (٤) پالایش مضامین با توجه به انسجام درونی، (۵) تعریف و نام‌گذاری نهایی مضامین، و (٦) تلفیق نتایج در چارچوب بحث پژوهش است. این فرایند با تکیه بر تکرارپذیری، انسجام مفهومی و پیوستگی میان داده و تحلیل پیش رفته است.

۳-۲-۱- منابع داده و فرایند گردآوری

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، شامل مقالات علمی، گزارش‌های صنعتی، مستندات بین‌المللی و اسناد سیاست‌گذاری رسمی بوده‌اند. این منابع از پایگاه‌های اطلاعاتی معتبری چون Scopus، Web of Science، ScienceDirect، SpringerLink، Taylor & Francis و Google Scholar استخراج شده‌اند. همچنین، برای تحلیل ابعاد سیاستی و مقرراتی، از منابعی چون اسناد UN، UNECE، IMO، IATA، US DOT و NFPA استفاده شده است. بازه زمانی انتخاب منابع از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۵ در نظر گرفته شده تا هم مطالعات کلاسیک و هم تحقیقات نوین را پوشش دهد. فرایند انتخاب منابع با تمرکز بر مرتبط‌بودن با موضوع تحقیق، اعتبار علمی، و قابلیت استناد در حوزه حمل‌ونقل کالاهای خطرناک صورت گرفته است. معیارهای اعتبارسنجی شامل نمایه بودن در مجلات داوری‌شده، استفاده از روش‌های تحلیلی صریح، و ارجاع به داده‌های تجربی یا چارچوب‌های رسمی بوده است. در مجموع، ٤٤ منبع به‌عنوان پایه تحلیل کیفی مقاله انتخاب و کدگذاری شدند.

۳-۲-۲- تحلیل داده‌ها با استفاده از MAXQDA

فرایند تحلیل کیفی داده‌ها به کمک نرم‌افزار MAXQDA 2020 انجام شد. این ابزار با قابلیت‌های متنوعی که در کدگذاری، ترسیم نقشه‌های مفهومی، تحلیل مضمون‌ها، و ارزیابی هم‌رخدادی دارد، امکان تحلیل ساختاریافته حجم گسترده‌ای از داده‌های متنی را فراهم ساخت. در ابتدا، تمامی متون وارد محیط نرم‌افزار شده و کدگذاری باز برای استخراج مفاهیم کلیدی صورت گرفت. سپس، مفاهیم تکرارشونده در قالب دسته‌های معنایی سازمان‌دهی و در نهایت در چهار مضمون اصلی تجمیع شدند. مضامین استخراج‌شده شامل «ایمنی هوشمند و پیش‌بینانه»، «چالش‌های قانونی و نهادی»، «آسیب‌پذیری انسانی در زنجیره ایمنی»، و «فقدان چارچوب‌های تحلیلی برای فناوری‌های نوظهور» بودند. استفاده از MAXQDA این امکان را فراهم کرد که تحلیل به‌صورت تکرارشونده (Iterative) بازنگری و پالایش شود تا تاکید بر شفافیت، استنادپذیری و انسجام تحلیلی حفظ گردد.

۳-۲-۳- اعتبار و قابلیت اعتماد

به‌منظور اطمینان از اعتبار و دقت تحلیل، فرایند تحلیل مضمون با رعایت اصول پژوهش کیفی، از جمله قابلیت انتقال، تکرارپذیری و تأییدپذیری انجام شده است. برای افزایش قابلیت اعتماد، منابع انتخاب‌شده از میان پایگاه‌های معتبر و گزارش‌های رسمی بوده و از تحلیل چندمرحله‌ای و بازبینی یافته‌ها در چند نوبت استفاده شده است. همچنین، تحلیل مضمون‌ها توسط دو پژوهشگر به‌صورت موازی مرور و ارزیابی شده تا به سطح مناسبی از پایایی بین‌کدی[۱۴] دست یابیم. فرآیند تحلیل تا رسیدن به اشباع مضمون[۱۵] ادامه یافت، به‌طوری که پس از چندین منبع، مفاهیم جدیدی ظاهر نشد و الگوهای کلیدی تکرار شدند. این ساختار روش‌شناسی به پژوهش حاضر امکان داد تا یافته‌ها از دل منابع مستند و معتبر، به شیوه‌ای منسجم و تحلیلی استخراج شود و از برداشت‌های فردی یا استنتاج‌های سطحی فاصله بگیرد.

۴-۲- تحلیل مضمون یافته‌ها

در ادامه بررسی منابع، از روش تحلیل مضمون کیفی برای استخراج ساختار مفهومی حاکم بر ادبیات استفاده شد. این فرایند با بهره‌گیری از چارچوب نظری Braun & Clarke (۲۰۱۳) و با کمک نرم‌افزار MAXQDA 2020، به‌صورت نظام‌مند در شش مرحله انجام شد (Clarke & Braun, 2013). نخست، داده‌های متنی منابع انتخاب‌شده به‌صورت کامل مرور و با آن‌ها آشنایی اولیه حاصل شد. سپس کدهای مفهومی اولیه از عبارات کلیدی، واژگان پرتکرار و الگوهای مفهومی موجود در متن استخراج گردید. این کدها شامل مفاهیمی نظیر «مسیریابی ایمن»، «هشدار بلادرنگ»، «فناوری اینترنت اشیا»، «نقص مقررات»، «خطای انسانی»، «مدل‌های ریسک کمی»، «پایش لحظه‌ای»، «زیرساخت فناورانه» و ... بودند.

در گام سوم، کدهای استخراج‌شده به صورت استقرایی در قالب دسته‌های مفهومی اولیه سازمان‌دهی شدند. با تحلیل درونی این دسته‌ها و بررسی روابط بین‌کدی، چهار مضمون محوری به‌عنوان خروجی نهایی تحلیل مضمون استخراج گردید که در ادامه شرح داده می‌شوند.

به‌این‌ترتیب، مقاله حاضر نه‌تنها از پشتوانه نظری مستحکمی برخوردار است، بلکه از نظر روش‌شناختی نیز بر پایه رویکردی قابل اتکا و دقیق سامان یافته است.

٤- یافته‌ها

این بخش در دو قسمت جمع‌بندی منابع مرور ادبیات و تحلیل مضمون آن‌ها بررسی و بیان می‌شود.

٤-١- مرور ساختاریافته مطالعات

در جدول ۱، بخش نخست از تحلیل یافته‌ها یعنی **مرور ساختاریافته ادبیات** نمایش داده شده است. این جدول، مهم‌ترین مطالعات حوزه حمل‌ونقل کالاهای خطرناک را بر اساس سال، تمرکز موضوعی، نوع حمل‌ونقل، روش پژوهش و یافته کلیدی خلاصه کرده است.

٤-٢-١- مضمون اول: حرکت به‌سوی ایمنی هوشمند و پیش‌بینانه

فناوری‌هایی همچون اینترنت اشیا، یادگیری ماشین، حسگرهای پیشرفته و بلاکچین، در حال تغییر ماهیت مدیریت ریسک از حالت واکنشی به پیش‌بینانه و داده‌محور هستند. این مضمون نشان‌دهنده گذار از مدل‌های سنتی به سمت الگوریتم‌های هشدار زودهنگام، پیش‌بینی حادثه، و پایش بلادرنگ مسیرهاست.

٤-٢-٢- مضمون دوم: موانع نهادی و قانونی در اجرای نوآوری‌ها

با وجود پیشرفت‌های فناورانه، ناهماهنگی مقررات بین‌المللی، فقدان زیرساخت قانونی، و تضاد بین استانداردهای حمل‌ونقل مانع از پیاده‌سازی موثر فناوری‌ها در سطح جهانی شده‌اند. این چالش‌ها به‌ویژه در حمل‌ونقل چندوجهی (multimodal) نمود بیشتری دارند.

٤-۲-۳- مضمون سوم: انسان به‌عنوان حلقه شکننده زنجیره ایمنی

اکثریت منابع به تداوم نقش کلیدی و شکننده عوامل انسانی در بروز حوادث اشاره کرده‌اند. مواردی مانند خستگی، عدم آموزش، خطای تصمیم‌گیری و نبود فرهنگ ایمنی، همچنان به‌عنوان عامل خطر در برابر فناوری‌های نو مطرح‌اند.

٤-۲-٤- مضـــمون چهارم: فقدان چارچوب تحلیلی برای فناوری‌های نوظهور

در حالی که استفاده از وسایل خودران، پهپادها، و حمل‌ونقل خودمختار در حال افزایش است، هنوز مدل‌های ریسک‌پذیری، ساختارهای حقوقی، و تحلیل‌های ایمنی معتبری برای این فناوری‌ها در منابع یافت نمی‌شود.

در مجموع، این مضامین بازتاب‌دهنده لایه‌های مختلف مدیریت ایمنی در حمل‌ونقل کالاهای خطرناک‌اند و بر لزوم رویکردی بین‌رشته‌ای، فناورانه، نهادی و انسانی برای ارتقای ایمنی تأکید دارند. در ادامه، نقشه مفهومی این مضامین ترسیم شده است. شکل ۱، مضامین اصلی و زیر مضامین را نشان می‌دهد.

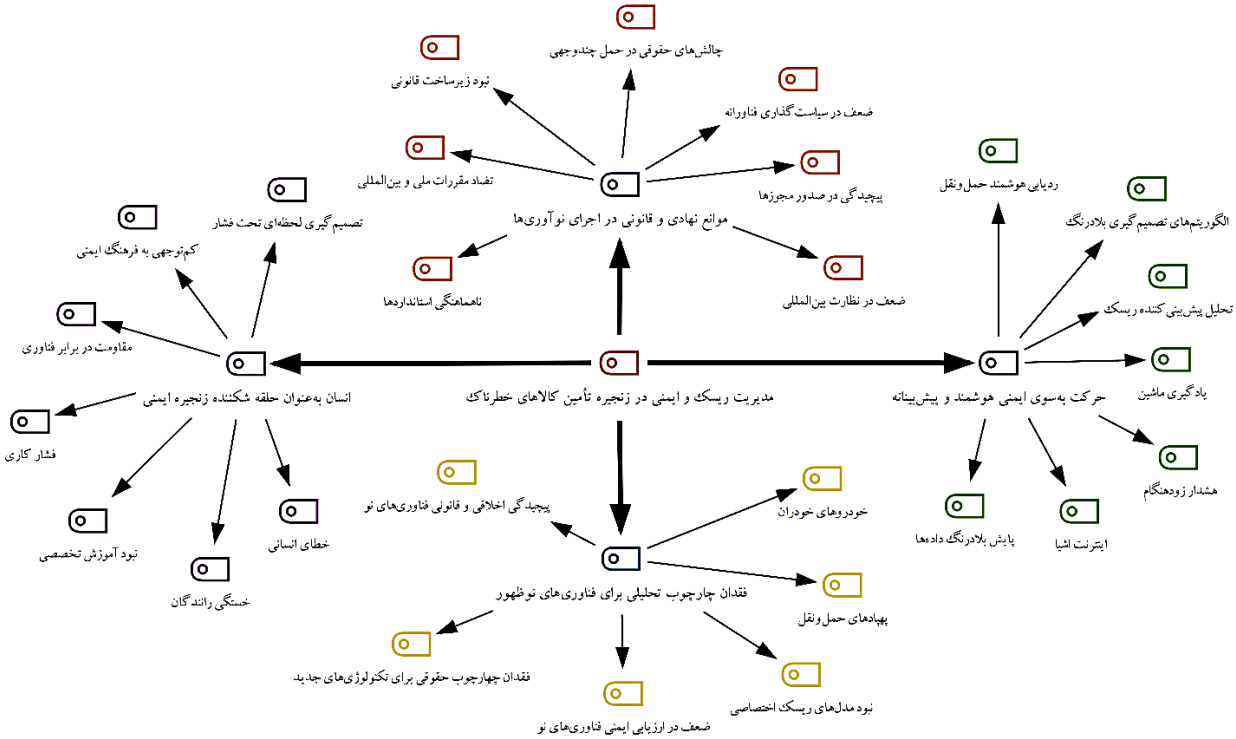
٤-۳- تلاقی و تنش میان مضامین تحلیل‌شده

تحلیل مضامین کیفی به‌دست‌آمده از منابع، نشان داد که روابط میان ابعاد ایمنی، فناوری، نهادها و عوامل انسانی، صرفاً خطی یا مستقل از هم نیست؛ بلکه در بسیاری موارد، همپوشانی، تعامل و در مواردی، تنش و تقابل مفهومی میان آن‌ها قابل شناسایی است. این روابط پیچیده درک عمیق‌تری از چالش‌ها و مسیرهای ممکن برای توسعه سیاست‌های کارآمد در حوزه حمل‌ونقل مواد خطرناک ارائه می‌دهد.

یکی از نمونه‌های بارز این تقابل، در رابطه بین فناوری‌های نوین و الزامات نهادی و قانونی مشاهده می‌شود. در حالی که ورود فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا، یادگیری ماشین و بلاکچین می‌تواند ایمنی را از طریق پایش بلادرنگ، هشدار زودهنگام و شفافیت زنجیره تأمین افزایش دهد، اما چارچوب‌های نهادی و قانونی موجود، اغلب ظرفیت یا انعطاف لازم برای پذیرش این تحولات را ندارند. این تنش به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، که با تعدد نهادهای تصمیم‌گیر، ناهماهنگی مقررات و ضعف در تدوین استانداردهای فناورانه روبه‌رو هستند، شدیدتر است. در سطح دیگر، همپوشانی میان فناوری‌های پیش‌بینانه و روش‌های پیشگیرانه سنتی قابل مشاهده است. برخلاف تصور رایج که فناوری می‌تواند جایگزین کامل روش‌های سنتی شود، یافته‌های تحلیل نشان می‌دهد که فناوری در عمل بیشتر نقش تکمیل‌کننده سیستم‌های پیشگیرانه موجود را ایفا می‌کند. به‌عبارت‌دیگر، وجود بسته‌بندی ایمن، آموزش پرسنل و رعایت استانداردهای حمل‌ونقل همچنان الزامات اولیه‌ای هستند که فناوری بدون آن‌ها نمی‌تواند کارآمد باشد. از سوی دیگر، عامل انسانی در هر دو جهت تعامل می‌کند؛ هم به‌عنوان یک عامل خطرزا در صورت آموزش ناکافی یا خستگی، و هم به‌عنوان یک مانع در برابر پذیرش فناوری‌های نو. مقاومت در برابر تغییر، ترس از پیچیدگی فناوری و نبود فرهنگ ایمنی در سازمان‌ها، از موانع مهمی هستند که حتی پیشرفته‌ترین ابزارهای فناورانه را در عمل با ناکارآمدی مواجه می‌سازد. نهایتاً، این تلاقی و تنش میان مضامین، بر ضرورت طراحی چارچوب‌های یکپارچه و بین‌رشته‌ای برای ایمنی در زنجیره تأمین کالاهای خطرناک تأکید دارد؛ چارچوبی که نه‌تنها فناوری و قانون، بلکه انسان و سازمان را نیز به‌عنوان بخش‌هایی از یک کل منسجم در نظر بگیرد. این نگاه سیستمی، می‌تواند زمینه‌ساز عبور از راهکارهای جزئی و ناکارآمد به سمت راه‌حل‌های جامع، پایدار و آینده‌محور باشد.

جدول ۱. جدول مرور ساختاریافته مطالعات

ردیف	نویسنده/ سال	حوزه تمرکز	نوع حمل‌ونقل	نوع روش	یافته کلیدی
۱	هولشک (۲۰۲۱)	مسیریابی ریسک‌پایه	جاده‌ای (شهری)	مقایسه مدل‌ها	تأثیر مدل بارمحور در کاهش ریسک شهری
۲	جیانگ و چنگ (۲۰۲۲)	تحلیل تکامل روش‌های ارزیابی ریسک	چندوجهی (عمومی)	مرور	حرکت از ارزیابی کیفی به کمی و نقص در حمل چندوجهی
۳	ژانگ و همکاران (۲۰۲٤)	مدل ریسک انفجاری	جاده‌ای	مدل‌سازی ریاضی	مدلی دقیق برای مسیریابی انفجاری خطرناک
٤	چای و همکاران (۲۰۲۵)	تحلیل آماری تصادفات و هشدار خطر	جاده‌ای (آمریکا)	تحلیل داده و یادگیری ماشین	مدل پیش‌بینی SF-T0.25 با دقت بالا در هشدار تصادف
۵	چن و همکاران (۲۰۲٤)	شناسایی مواد خطرناک با NIR + CNN	عمومی / شناسایی غیرمستقیم	بینایی ماشین و یادگیری عمیق	تشخیص دقیق مواد خطرناک در محیط پیچیده
٦	کوئن و همکاران (۲۰۱۳)	چارچوب تجسم ریسک	ریلی/آبی/جاده‌ای	تحلیل داده تاریخی	امکان نقشه‌برداری ریسک ترکیبی برای مسیرهای مختلف
۷	ایلماز و همکاران (۲۰۱٦)	طبقه‌بندی ادبیات Hazmat	عمومی	طبقه‌بندی موضوعی	شش دسته‌بندی اصلی در حمل مواد خطرناک
۸	موهری و همکاران (۲۰۲۲)	مرور ساختار مدل‌های تصمیم‌گیری	چندوجهی	تحلیل ساختار مدل	شناسایی شکاف‌های تحقیقاتی در طراحی شبکه ایمن
۹	فجورتوفت (۲۰۰٦)	چالش‌های حمل‌ونقل چندوجهی	چندوجهی	تحلیل مفهومی	ضرورت هماهنگی مقررات و زیرساخت‌ها در حمل‌ونقل چندوجهی



شکل ۱. مضامین اصلی و زیر مضامین تحلیل کیفی

بحث

حمل‌ونقل کالاهای خطرناک، به دلیل ماهیت پرریسک و پتانسیل بالای خسارت‌های انسانی، زیست‌محیطی و اقتصادی، نیازمند سطح بالایی از کنترل، پیش‌بینی‌پذیری و پاسخ‌گویی بلادرنگ است. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر، مسیر حرکت پژوهش‌ها و راهکارهای اجرایی در این حوزه، از روش‌های سنتی کنترل حادثه به سمت ایمنی هوشمند و پیش‌گیرانه تغییر یافته است؛ تغییری که به‌شدت وابسته به پیشرفت فناوری و توانایی تحلیل داده‌های بزرگ و بلادرنگ است. فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا (IoT)، هوش مصنوعی (AI)، بلاکچین و وسایل نقلیه خودران، ظرفیت‌هایی نوظهور برای بهبود نظارت، افزایش شفافیت و مدیریت واکنش اضطراری فراهم کرده‌اند. این فناوری‌ها با امکان ردیابی آنی، تشخیص الگوهای خطر، و هشدار پیشگیرانه، سطح جدیدی از ایمنی را برای زنجیره تأمین کالاهای خطرناک تعریف می‌کنند. به‌ویژه در بستر حمل‌ونقل چندوجهی و مناطق پر تراکم، این توانایی‌ها می‌توانند مانع بروز فاجعه شوند یا پیامدهای آن را به حداقل برسانند. با این حال، چالش‌های ساختاری و نهادی همچنان مانع اجرای کامل این فناوری‌ها در بسیاری از کشورها، به‌ویژه کشورهای در حال توسعه، هستند. نبود استانداردهای یکپارچه بین‌المللی، تضاد مقرراتی میان کشورها، هزینه‌های پیاده‌سازی بالا، و مشکلات مرتبط با امنیت سایبری، از مهم‌ترین موانع‌اند. افزون بر این، عوامل انسانی از جمله فقدان آموزش تخصصی، خستگی، و مقاومت در برابر پذیرش فناوری‌های جدید، شکاف بزرگی بین ظرفیت‌های فناورانه و واقعیت میدانی ایجاد کرده‌اند. تحلیل مضمون این مقاله نشان داد که چهار مضمون اصلی، شامل «ایمنی هوشمند»، «موانع نهادی»، «آسیب‌پذیری انسانی»، و «خلأهای تحلیلی در فناوری‌های نوظهور»—نه تنها مستقل از یکدیگر نیستند، بلکه در موارد زیادی در تقابل یا همپوشانی با یکدیگر قرار دارند. به عنوان مثال، فناوری می‌تواند خطای انسانی را کاهش دهد، اما در صورت نبود آموزش یا مقاومت کارکنان، خود به منبع خطا تبدیل شود. همچنین، استانداردسازی قانونی می‌تواند از نوآوری پشتیبانی کند یا، در صورت ضعف تطبیق، مانع آن شود. این پیچیدگی مفهومی بر ضرورت طراحی رویکردهایی سیستمی، بین‌رشته‌ای و پویای سیاستی تأکید می‌کند.

۵- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر، با مرور و تحلیل کیفی ساختاریافته منابع، تلاش کرد تصویری جامع از وضعیت، فرصت‌ها و چالش‌های ایمنی در حمل‌ونقل کالاهای خطرناک ارائه دهد. نتایج نشان می‌دهد که نوآوری فناورانه شرط لازم، اما ناکافی برای ایمنی پایدار است. آنچه این نوآوری‌ها را مؤثر می‌سازد، همگرایی آن‌ها با آموزش انسانی، زیرساخت حقوقی مناسب و فرهنگ ایمنی در سطح سازمانی و ملی است.

برای عبور از وضعیت فعلی و رسیدن به ساختار ایمنی پیشرفته، پیشنهادات کلیدی زیر ارائه می‌شود:

-سرمایه‌گذاری هدفمند در فناوری‌های نوین: توسعه سامانه‌های پیش‌بین، نظارت هوشمند، و مدل‌های تحلیل ریسک بلادرنگ باید در اولویت سیاست‌گذاران و صنایع قرار گیرد.

-بهبود آموزش تخصصی و آگاهی سازمانی: استفاده از شبیه‌سازی‌های تعاملی و فناوری‌هایی مانند واقعیت افزوده و مجازی (AR/VR) می‌تواند آموزش را مؤثرتر و ملموس‌تر کند.

-هماهنگی نهادی و استانداردسازی مقررات: ایجاد چارچوب‌های مشترک در سطح منطقه‌ای و بین‌المللی برای مدیریت حمل کالاهای خطرناک ضروری است، به‌ویژه برای حمل‌ونقل چندوجهی.

-تقویت پژوهش‌های بین‌رشته‌ای: تمرکز بر پیامدهای زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی حمل مواد خطرناک، و همچنین تحلیل هزینه‌فایده اجرای فناوری‌ها باید تقویت شود.

در نهایت، آینده مدیریت ریسک در زنجیره تأمین کالاهای خطرناک، به توانایی در ترکیب خلاقانه فناوری، انسان، قانون و همکاری بین‌المللی بستگی دارد. تنها در چنین رویکردی است که می‌توان به حمل‌ونقل ایمن‌تر، سریع‌تر و پایدارتر در مقیاس جهانی دست یافت. اگرچه این مطالعه تلاش کرده است با بهره‌گیری از رویکرد کیفی و تحلیل مضمون، تصویری جامع از وضعیت مدیریت ریسک و ایمنی در حمل‌ونقل کالاهای خطرناک ارائه دهد، با این حال، محدودیت‌هایی نیز در فرآیند تحقیق وجود داشته است که باید در تفسیر نتایج مد نظر قرار گیرند. نخست آنکه، پژوهش حاضر مبتنی بر منابع ثانویه و مرور ادبیات بوده و داده‌های میدانی از طریق مصاحبه، پیمایش یا مشاهده مستقیم گردآوری نشده است. این امر ممکن است تحلیل را از برخی تجربیات عملی یا چالش‌های روزمره که در میدان حمل‌ونقل رخ می‌دهد، دور سازد. همچنین، گرچه تلاش شده منابع از پایگاه‌های معتبر علمی و نهادی انتخاب شوند، اما برخی اطلاعات محرمانه، داده‌های صنعتی اختصاصی یا گزارش‌های داخلی سازمان‌ها ممکن است در دسترس نبوده و از دایره تحلیل خارج مانده باشند.

از سوی دیگر، تحلیل مضمون انجام‌شده با وجود بهره‌گیری از ابزار نرم‌افزاری پیشرفته (MAXQDA)، توسط یک پژوهشگر انجام شده و امکان وجود سوگیری فردی در فرایند کدگذاری، اولویت‌بندی مفاهیم و تفسیر مضمون‌ها وجود دارد. مطالعات آینده می‌توانند با بهره‌گیری از تیم‌های تحلیل چندنفره یا ارزیابی بین‌کدی (Inter-coder Reliability)، این محدودیت را کاهش دهند.

همچنین، این مطالعه تمرکز خود را بر سطح جهانی و اسناد عمومی بین‌المللی گذاشته و تحلیل خاص‌گرایانه‌ای از یک کشور یا منطقه جغرافیایی مشخص انجام نداده است. اگرچه این امر باعث شده تا تحلیل از منظر کلان‌تر صورت گیرد، اما ممکن است در تطبیق یافته‌ها با بسترهای بومی و زمینه‌ای محدودیت‌هایی ایجاد کند. در نتیجه، نتایج این تحقیق بیشتر برای سیاست‌گذاری کلان، مطالعات تطبیقی و طراحی چارچوب‌های مفهومی کاربرد دارد تا تدوین برنامه‌های اجرایی خاص. با توجه به این محدودیت‌ها، توصیه می‌شود پژوهش‌های آتی از ترکیب داده‌های میدانی و تحلیل‌های اسنادی بهره بگیرند، همچنین در زمینه‌های خاص کشوری یا منطقه‌ای (به‌ویژه کشورهای در حال توسعه)، مطالعات موردی عمیق‌تری صورت گیرد تا شکاف‌های موجود در سطح کاربرد و اجرا بهتر روشن شود.

۶- پی‌نوشت‌ها

1. IMO
2. IATA
3. IoT
4. Load-Dependent
5. Load-Independent

6. Hazmat
7. Routing
8. Routing-Scheduling
9. Difference-in-Differences
10. MSDS
11. TDG
12. Thematic Analysis
13. Comparative Analysis
14. Inter-coder Reliability
15. Thematic Saturation

۷- مراجع

-Agency, U. S. E. P. (2020). Learn about Hazardous Waste Cleanups. Learn about Hazardous Waste Cleanups.

-Agi, M. A. N., & Jha, A. K. (2022). Blockchain technology in the supply chain: An integrated theoretical perspective of organizational adoption. *International Journal of Production Economics*, *247*, 108458. **doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108458**

-Association, N. F. P. NFPA 472 (2021). Standard for Competence of Responders to Hazardous Materials/Weapons of Mass Destruction Incidents.

-Chai, H., Dong, K., Liang, Y., Han, Z., & He, R. (2025). Machine Learning-based Accidents Analysis and Risk Early Warning of Hazardous Materials Transportation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *95*, 105594. **doi.org/10.1016/j.jlp.2025.105594**

-Chen, C., Xin, J., Peng, Z., Wang, C., Lan, H., Yao, C., & Wang, J. (2025). Stand-off hazardous materials identification based on near-infrared hyperspectral imaging combined with convolutional neural network. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, *327*, 125311. **doi.org/10.1016/j.saa.2024.125311**

-Chen, D., & Bai, X. (2024). Quantitative Risk Analysis of Road Transportation of Hazardous Materials in Coastal Areas. *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*, *3*, 100124. **doi.org/10.1016/j.iintel.2024.100124**

-Chenglin, Z., Peilin, L., Ronghua, Z., & Nana, J. (2024). Selection and planning of hazardous materials transportation routes based on explosion accident risks. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *92*, 105440. **doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105440**

-Clarke, V., & Braun, V. (2013). Teaching thematic analysis: Overcoming challenges and developing strategies for effective learning. *The Psychologist*, *26*, 120-123.

-Dennis Guignet, Robin R. Jenkins, Christoph Nolte, & Belke, J. (2023). The External Costs of Industrial Chemical Accidents: A Nationwide Property Value Study. *Epa*.

-Djuka Tsague, M., Niemi, A. T. O., Wendt-Lucas, N., Arens, U., & Sill Torres, F. (2023). Dangerous Goods in Maritime Transport: Assessment of Container Scanning as Means of Risk Mitigation. *The 33rd European Safety and Reliability Conference (ESREL 2023) Proceedings.*

-Figueiredo, F., & Figueiredo, A. (2016). ISBIS 2016 Meeting on Statistics in Business and Industry.

-Fjortoft, K. (2006). Dilemma in Transport of Dangerous Goods in an Intermodal Chain. A discussion of challenges in the interface between regulations and execution of intermodal dangerous goods transport. *Proceedings of the 13th Its World Congress, London, 8-12 October.*

-Flyriver. (2025). The Future of Worker Safety: *A Focus on Prevention*.

-Goods, U. C. o. E. o. t. T. o. D., & Secretariat, U. E. (2019). Recommendations on the transport of dangerous goods. Model Regulations. Volume 1. *United Nations Digital Library System*.

-Grote, M., Cherrett, T., Oakey, A., Royall, P., Whalley, S., & Dickinson, J. (2021). How Do Dangerous Goods Regulations Apply to Uncrewed Aerial Vehicles Transporting

Goods. *Advanced Materials Research*, *424*, 201-204.

-Manifest. Essential Accident Investigation Checklist for Transport Safety. https://www.manifest.ly/use-cases/transportation/accident-investigation-checklist

-Mohri, S. S., Mohammadi, M., Gendreau, M., Pirayesh, A., Ghasemaghaei, A., & Salehi, V. (2021). Hazardous material transportation problems: A comprehensive overview of models and solution approaches. *European Journal of Operational Research*, *302*. **doi.org/10.1016/j.ejor.2021.11.045**

-Myronenko, V., Yurchenko, O., & Vasilova, H. (2024). Multimodal logistics chains for international transportation of dangerous and perishable goods. *MATEC Web of Conferences.*

-Nijole, B. (2018). Risk and Damage Assessment for Transportation of Dangerous Freight. *Transport and Telecommunication Journal*, *19*, 356-363.

doi.org/10.2478/ttj-2018-0030

-Organization, I. L. (2004). *Transport and Storage*. https://webapps.ilo.org/static/english/protection/safework/cis/products/safetytm/transpo

-Park, C., Lee, D., & Khan, N. (2020). *An Analysis on Safety Risk Judgment Patterns Towards Computer Vision Based Construction Safety Management*.

doi.org/10.3311/CCC2020-052

-Reiter, O., & Stehrer, R. (2023). Assessing the importance of risky products in international trade and global value chains. *Empirica*, *50*(1), 7-33.

doi.org/10.1007/s10663-022-09560-x

-Renčelj, M., Lindov, O., Pljakić, M., & Sever, D. (2025). Assessment of Dangerous Goods Transport: Case Western Balkan Countries. *Sustainability*, *17*, 891.

doi.org/10.3390/su17030891

-Rishabh Lohade, & Sinha, R. K. (2024). Transportation Challenges: Ensuring Safe Movement of Dangerous Goods in the Supply Chain. *International Journal For* Medical Cargos? *Drones*, *5*, 38. **doi.org/10.3390/drones5020038**

-Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, *29*(7), 1645-1660.

-Guignet, D., Jenkins, R. R., Nolte, C., & Belke, J. (2023). The External Costs of Industrial Chemical Accidents: A Nationwide Property Value Study. *Journal of Housing Economics*, *62*, 101954.

doi.org/10.1016/j.jhe.2023.101954

-Guo, J., & Luo, C. (2022). Risk assessment of hazardous materials transportation: A review of research progress in the last thirty years. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, *9*. **doi.org/10.1016/j.jtte.2022.01.004**

-Han, J., & Zhu, S. (2024). Dangerous Goods Vehicle Routing Optimization Model Considering Time-Varying Conditions. **doi.org/10.1109/CBASE64041.2024.10824349**

-Holeczek, N. (2019). Hazardous materials truck transportation problems: A classification and state of the art literature review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *69*, 305-328. **doi.org/10.1016/j.trd.2019.02.010**

-Holeczek, N. (2021). Analysis of different risk models for the hazardous materials vehicle routing problem in urban areas. *Cleaner Environmental Systems*, *2*, 100022. **doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100022**

-Horobets, Volodymyr Leonidovych, & Dmytro Mykolayovych Kozachenko, R. V. V. (2022). Engineering of crises and risks of transportation of dangerous goods.

-Iata. Dangerous Goods Regulations (DGR). https://www.iata.org/en/publications.

-Imo. The International Maritime Dangerous Goods (IMDG) Code. https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/DangerousGoods-default.aspx

-Liu, H. Q., Lv, Y. J., & Wang, H. N. (2012). Based on the Supply Chain Integrator for the High-End Logistics System of Dangerous

doi.org/10.1016/j.jsr.2013.01.002

-Vijayakumar, R., & Choi, J.-H. (2022). Emerging Trends of Ergonomic Risk Assessment in Construction Safety Management: A Scientometric Visualization Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*, 16120.

doi.org/10.3390/ijerph192316120

-Witkowski, K. (2017). Internet of Things, Big Data, Industry 4.0 – Innovative Solutions in Logistics and Supply Chains Management. *Procedia Engineering*, *182*, 763-769. **doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.197**

-Yang, Z., Yan, X., Tian, Y., Pu, Z., Wang, Y., Li, C., Yi, Y., Wang, X., & Liu, Q. (2023). Risk Assessment of Sudden Water Pollution Accidents Associated with Dangerous Goods Transportation on the Cross-Tributary Bridges of Baiyangdian Lake. *Water*, *15*(16).

-Yilmaz, Z., Erol, S., & Aplak, H. (2016). Transportation of hazardous materials (hazmat) a literature survey. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, *22*, 39-53. **doi.org/10.5505/pajes.2016.62134**

-Zelenko, Y., Dzhus, O., Dzhus, V., & Yanchenko, D. (2019). Methodology of risk assessment and forms of environmental safety management for the transport of dangerous goods by railway transport. *MATEC Web of Conferences*, *294*, 03011. **doi.org/10.1051/matecconf/201929403011**

Multidisciplinary Research, *6*(2). **doi.org/10.36948/ijfmr.2024.v06i02.16739**

-Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*, *57*(7), 2117-2135.

-Schumann-Bölsche, D. (2015). Managing Hazardous Goods in Humanitarian Supply Chains. 151-168.

doi.org/10.1007/978-3-319-15455-8_9

-Transportation, D. o. Hazardous Materials Regulations. www.phmsa.dot.gov/standards-rulemaking/hazmat/hazardous-materials-regulations

-Transportation, U. S. D. o. (2016). hazardous materials.

-Un-ilibrary. Recommendations on the Transport of Dangerous Goods: *Model Regulations*. https://www.un-ilibrary.org/content/periodicals/24120820

-Unece. (2023). ADR 2023 - Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road. unece.org/transport/standards/transport/dangerous-goods/adr-2023-agreement-concerning-international-carriage

-Van Raemdonck, K., Macharis, C., & Mairesse, O. (2013). Risk analysis system for the transport of hazardous materials. *Journal of Safety Research*, *45C*, 55-63.

Risk and Safety Management in the Hazardous Materials Supply Chain: A Qualitative Review of Emerging Approaches and Technologies

Saeed Lashgari, M.Sc., Student, Department of Civil -Transportation Planning, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

Hamid Mirzahossein, *Associate Professor, Department of Civil -Transportation Planning, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.*

Amin Faridiaghdam, Ph.D., Candidate, Department of Civil -Transportation Planning, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

E-mail: mirzahossein@eng.ikiu.ac.ir

Received: September 2025- Accepted: February 2026

ABSTRACT

The hazardous materials supply chain, due to the inherently high risks of these substances, requires a precise, technology-enabled, and multilayered management approach to prevent human, environmental, and financial losses. This study aims to identify key factors for risk reduction and safety enhancement by conducting a comprehensive thematic review of academic literature, institutional reports, and international regulatory frameworks. Employing a qualitative methodology and thematic analysis using MAXQDA software, the study reveals that technologies such as the Internet of Things (IoT), real-time tracking systems, artificial intelligence, and blockchain play a significant role in anticipating hazards, monitoring transport conditions, and enabling rapid emergency responses. In addition, continuous staff training, compliance with global safety standards such as UN ADR and IMDG, and the promotion of organizational safety culture are critical components in mitigating risk. Nevertheless, challenges such as high implementation costs, fragmented regulatory frameworks, underdeveloped infrastructure, and gaps in environmental and social research remain pressing. This article proposes a set of operational and policy recommendations and emphasizes the need for integrating advanced technologies, legal alignment, and international collaboration to achieve a safer and more sustainable hazardous goods supply chain.

Keywords: Supply Chain, Hazardous Materials, Safety, Risk Reduction, Internet of Things, Real-Time Tracking