

فناوری بلاک چین در مهندسی حمل و نقل (مروری بر کاربردها، چالش ها و چشم اندازهای آینده)

مقاله عملی - مروری

وحید خلیفه، استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

*نوید ندیمی (نویسنده مسئول)، دانشیار، بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

مریم قدیمی پور ماهانی، دانش آموخته کارشناسی، بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: navidnadimi@uk.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۱ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۰

صفحه ۱-۱۶

چکیده

تحول دیجیتال در دهه های اخیر موجب ظهور فناوری هایی شده است که نقش مهمی در افزایش کارایی، امنیت و شفافیت سامانه های مختلف ایفا می کنند. یکی از مهم ترین این فناوری ها، بلاک چین است که به عنوان یک دفتر کل توزیع شده، امکان ثبت، ذخیره و تبادل اطلاعات را بدون نیاز به نهاد واسطه و با سطح بالایی از امنیت و قابلیت اعتماد فراهم می سازد. ویژگی هایی نظیر تمرکززدایی، تغییرناپذیری داده ها، شفافیت اطلاعات و بهره گیری از قراردادهای هوشمند، زمینه استفاده از این فناوری را در حوزه های متعددی از جمله مهندسی حمل و نقل فراهم کرده است. در سال های اخیر، افزایش حجم جابه جایی کالا و مسافر، توسعه سامانه های حمل و نقل هوشمند، گسترش اینترنت اشیا و ظهور خودروهای متصل و خودران، نیاز به زیر ساخت های مطمئن برای مدیریت داده ها و انجام تبادلات اطلاعاتی را بیش از گذشته آشکار ساخته است. در چنین شرایطی، بلاک چین می تواند با ایجاد بستری امن و شفاف، بسیاری از مشکلات موجود در مدیریت زنجیره تأمین، رهگیری محموله ها، پرداخت های هوشمند، مدیریت ناوگان و تبادل اطلاعات میان ذی نفعان را برطرف کند. هدف این مقاله، مرور جامع مبانی فناوری بلاک چین و بررسی مهم ترین کاربردهای آن در مهندسی حمل و نقل، همراه با تحلیل چالش های فنی، اقتصادی و حقوقی و مرور تجربیات بین المللی است. همچنین، روندهای آینده و ظرفیت های این فناوری در توسعه سامانه های حمل و نقل هوشمند و پایدار مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعات نشان می دهد که بلاک چین، در صورت توسعه زیر ساخت های فنی، تدوین قوانین مناسب و افزایش همکاری میان دولت، صنعت و دانشگاه، می تواند به یکی از فناوری های کلیدی در تحول دیجیتال صنعت حمل و نقل تبدیل شود.

واژه های کلیدی: اینترنت اشیا، حمل و نقل هوشمند، زنجیره تأمین، فناوری بلاک چین

۱- مقدمه

تبادل قابل اعتماد آن ها به یکی از مهم ترین چالش های این صنعت تبدیل شده است. در ساختارهای سنتی، مدیریت اطلاعات حمل و نقل عمدتاً بر پایه سامانه های متمرکز انجام می شود. اگرچه این سامانه ها طی سال های گذشته نقش مهمی در توسعه خدمات حمل و نقل داشته اند، اما مشکلاتی نظیر وابستگی به نهادهای واسطه، آسیب پذیری در برابر حملات سایبری، هزینه های بالای پردازش، امکان تغییر یا جعل اطلاعات و نبود شفافیت کافی، ضرورت استفاده از فناوری های

گسترش فناوری اطلاعات و ارتباطات طی دو دهه اخیر، ساختار بسیاری از صنایع را دستخوش تغییر کرده است. در این میان، صنعت حمل و نقل نیز به دلیل نقش اساسی در جابه جایی کالا، خدمات و مسافر، بیش از سایر بخش ها تحت تأثیر تحول دیجیتال قرار گرفته است. رشد تجارت الکترونیک، افزایش تبادلات بین المللی، توسعه شهرهای هوشمند و استفاده گسترده از سامانه های حمل و نقل هوشمند، موجب تولید حجم عظیمی از داده ها شده است که مدیریت صحیح، ذخیره سازی ایمن و

نوبین را بیش از پیش نمایان ساخته است (Casino et al., 2019).

یکی از فناوری‌هایی که در سال‌های اخیر توجه پژوهشگران و صنایع مختلف را به خود جلب کرده، فناوری بلاک‌چین است. این فناوری نخستین بار با معرفی بیت‌کوین توسط ناکاموتو (۲۰۰۸) مطرح شد، اما امروزه کاربرد آن بسیار فراتر از ارزهای دیجیتال توسعه یافته و حوزه‌هایی مانند بانکداری، سلامت، انرژی، زنجیره تأمین و حمل‌ونقل را نیز دربر گرفته است. بلاک‌چین با استفاده از ساختار دفترکل توزیع شده، امکان ثبت اطلاعات به صورت غیرمتمرکز، شفاف و تغییرناپذیر را فراهم می‌کند؛ به گونه‌ای که تمامی اعضای شبکه به نسخه‌ای یکسان از اطلاعات دسترسی داشته و امکان تغییر داده‌های ثبت شده بدون اجماع شبکه وجود ندارد (Yaga et al., 2019).

در مهندسی حمل‌ونقل، این فناوری می‌تواند زمینه‌ساز ایجاد تحول در مدیریت زنجیره تأمین، رهگیری لحظه‌ای کالاها، مدیریت ناوگان، تبادل اطلاعات میان وسایل نقلیه، پرداخت الکترونیکی عوارض، مدیریت پارکینگ‌های هوشمند و افزایش امنیت ارتباطات در سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند باشد. همچنین، ترکیب بلاک‌چین با فناوری‌هایی نظیر اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، رایانش ابری و شبکه‌های نسل پنجم ارتباطات، فرصت‌های جدیدی برای ایجاد زیرساخت‌های حمل‌ونقل هوشمند و پایدار فراهم کرده است (Wu & Tran, 2023).

با وجود مزایای متعدد، توسعه این فناوری با چالش‌هایی نیز همراه است. محدودیت مقیاس‌پذیری، مصرف انرژی در برخی سازوکارهای اجماع، نبود استانداردهای مشترک، هزینه‌های پیاده‌سازی، ابهامات حقوقی و مقاومت سازمانی از جمله عواملی هستند که روند پذیرش بلاک‌چین را در صنعت حمل‌ونقل تحت تأثیر قرار می‌دهند. از این رو، شناخت دقیق قابلیت‌ها و محدودیت‌های این فناوری، پیش‌نیاز برنامه‌ریزی مناسب برای بهره‌برداری مؤثر از آن محسوب می‌شود. بر همین اساس، این مقاله با رویکردی مروری، ضمن تبیین مبانی نظری فناوری بلاک‌چین، مهم‌ترین کاربردهای آن در مهندسی حمل‌ونقل را بررسی کرده و با تحلیل چالش‌ها و مرور تجربیات بین‌المللی، تصویری جامع از وضعیت کنونی و چشم‌انداز آینده این فناوری ارائه می‌دهد. انتظار می‌رود نتایج این مطالعه بتواند به پژوهشگران، مدیران و سیاست‌گذاران حوزه حمل‌ونقل در تصمیم‌گیری برای توسعه زیرساخت‌های هوشمند و ارتقای بهره‌وری سامانه‌های حمل‌ونقل کمک کند.

۲- مبانی نظری فناوری بلاک‌چین

۲-۱- مفهوم بلاک‌چین

بلاک‌چین نوعی فناوری ثبت و مدیریت غیرمتمرکز داده‌ها است که اطلاعات را در قالب بلوک‌های به هم پیوسته و رمزنگاری شده ذخیره می‌کند؛ به گونه‌ای که پس از ثبت، امکان تغییر یا حذف آن‌ها بدون اجماع اعضای شبکه وجود ندارد. هر بلوک شامل مجموعه‌ای از تراکنش‌ها یا داده‌ها بوده و از طریق توابع رمزنگاری به بلوک قبلی متصل می‌شود؛ از این رو، هرگونه تغییر در اطلاعات ثبت‌شده مستلزم تغییر تمام بلوک‌های بعدی و کسب اجماع اعضای شبکه خواهد بود. این ویژگی، بلاک‌چین را به بستری امن، شفاف و مقاوم در برابر دستکاری تبدیل کرده است (Nakamoto, 2008). برخلاف پایگاه‌های داده متمرکز که مدیریت اطلاعات در اختیار یک سازمان یا نهاد مشخص قرار دارد، در بلاک‌چین نسخه‌ای یکسان از داده‌ها میان تمامی گره‌های شبکه توزیع می‌شود. هر تراکنش پس از تأیید توسط سازوکار اجماع، به دفترکل افزوده شده و برای همه اعضا قابل مشاهده است. این ساختار علاوه بر افزایش شفافیت، نیاز به واسطه‌های مورد اعتماد را نیز کاهش می‌دهد و موجب کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش قابلیت اعتماد سامانه می‌شود (Yaga et al., 2019).

۲-۲- انواع بلاک‌چین

از دیدگاه نحوه دسترسی و مدیریت، بلاک‌چین به چهار دسته اصلی شامل عمومی، خصوصی، کنسرسیومی و هیبریدی تقسیم می‌شود که هر یک متناسب با نیازهای مختلف سازمان‌ها و صنایع طراحی شده‌اند. در حوزه حمل‌ونقل، به دلیل وجود ذی‌نفعان متعدد و ضرورت کنترل دسترسی به اطلاعات، استفاده از شبکه‌های خصوصی و کنسرسیومی بیش از سایر انواع مورد توجه قرار گرفته است.

۲-۳- ویژگی‌های اصلی فناوری بلاک‌چین

مهم‌ترین ویژگی‌های این فناوری عبارت‌اند از:

- تمرکززدایی و حذف واسطه‌ها؛
- امنیت بالا با استفاده از الگوریتم‌های رمزنگاری؛
- تغییرناپذیری اطلاعات ثبت‌شده؛
- شفافیت و قابلیت رهگیری تراکنش‌ها؛
- افزایش اعتماد میان اعضای شبکه؛
- امکان اجرای خودکار قراردادهای هوشمند؛

جدید زیرساخت‌های دیجیتال حمل‌ونقل تبدیل شود. در بخش بعدی، مهم‌ترین کاربردهای این فناوری در حوزه مهندسی حمل‌ونقل بررسی خواهد شد.

-قابلیت یکپارچه‌سازی با اینترنت اشیاء، هوش مصنوعی و سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند. همین ویژگی‌ها موجب شده است که بلاک‌چین به یکی از فناوری‌های پایه در توسعه نسل

۳- کاربردهای فناوری بلاک‌چین در مهندسی حمل‌ونقل

رشد فناوری‌های دیجیتال و افزایش حجم تبادل اطلاعات در صنعت حمل‌ونقل، نیاز به زیرساخت‌هایی را آشکار کرده است که بتوانند امنیت، شفافیت، قابلیت اعتماد و سرعت تبادل داده‌ها را به‌طور هم‌زمان تأمین کنند. فناوری بلاک‌چین به دلیل برخورداری از ساختار غیرمتمرکز، قابلیت ثبت دائمی اطلاعات و استفاده از سازوکارهای رمزنگاری، یکی از فناوری‌های

رشد فناوری‌های دیجیتال و افزایش حجم تبادل اطلاعات در صنعت حمل‌ونقل، نیاز به زیرساخت‌هایی را آشکار کرده است که بتوانند امنیت، شفافیت، قابلیت اعتماد و سرعت تبادل داده‌ها را به‌طور هم‌زمان تأمین کنند. فناوری بلاک‌چین به دلیل برخورداری از ساختار غیرمتمرکز، قابلیت ثبت دائمی اطلاعات و استفاده از سازوکارهای رمزنگاری، یکی از فناوری‌های

۳-۱- کاربرد بلاک‌چین در مدیریت زنجیره تأمین و لجستیک

زنجیره تأمین یکی از مهم‌ترین اجزای سیستم حمل‌ونقل است که عملکرد صحیح آن نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش هزینه‌ها، افزایش بهره‌وری و رضایت مشتریان دارد. در روش‌های سنتی، اطلاعات مربوط به سفارش، حمل، انبارداری و تحویل کالا در سامانه‌های جداگانه ذخیره می‌شود و هماهنگی میان سازمان‌ها اغلب با مشکلاتی نظیر تأخیر، مغایرت اطلاعات و نبود شفافیت همراه است. فناوری بلاک‌چین با ایجاد یک دفترکل مشترک میان تمامی اعضای زنجیره، امکان ثبت و مشاهده هم‌زمان اطلاعات را فراهم می‌کند. در این ساختار، تمامی تراکنش‌ها پس از تأیید در شبکه ثبت شده و هیچ‌یک از طرفین قادر به تغییر اطلاعات ثبت‌شده نخواهد بود. این ویژگی موجب افزایش اعتماد میان تولیدکنندگان، شرکت‌های حمل‌ونقل، انبارها، گمرک و مشتریان می‌شود (Hackius & Petersen, 2017).

زنجیره تأمین یکی از مهم‌ترین اجزای سیستم حمل‌ونقل است که عملکرد صحیح آن نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش هزینه‌ها، افزایش بهره‌وری و رضایت مشتریان دارد. در روش‌های سنتی، اطلاعات مربوط به سفارش، حمل، انبارداری و تحویل کالا در سامانه‌های جداگانه ذخیره می‌شود و هماهنگی میان سازمان‌ها اغلب با مشکلاتی نظیر تأخیر، مغایرت اطلاعات و نبود شفافیت همراه است. فناوری بلاک‌چین با ایجاد یک دفترکل مشترک میان تمامی اعضای زنجیره، امکان ثبت و مشاهده هم‌زمان اطلاعات را فراهم می‌کند. در این ساختار، تمامی تراکنش‌ها پس از تأیید در شبکه ثبت شده و هیچ‌یک از طرفین قادر به تغییر اطلاعات ثبت‌شده نخواهد بود. این ویژگی موجب افزایش اعتماد میان تولیدکنندگان، شرکت‌های حمل‌ونقل، انبارها، گمرک و مشتریان می‌شود (Hackius & Petersen, 2017).

۳-۲- کاربرد بلاک‌چین در سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند (ITS)

بر این، حذف واسطه‌های متمرکز موجب افزایش سرعت تبادل اطلاعات و کاهش هزینه‌های عملیاتی خواهد شد (Jabbar et al., 2022).

یکی دیگر از کاربردهای مهم بلاک‌چین در سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند، مدیریت داده‌های حاصل از حسگرها و دوربین‌های شهری است. با ثبت اطلاعات بر روی دفترکل توزیع‌شده، امکان تحلیل دقیق‌تر وضعیت ترافیک و تصمیم‌گیری سریع‌تر برای مدیریت شبکه حمل‌ونقل فراهم می‌شود.

سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند مجموعه‌ای از فناوری‌های ارتباطی، اطلاعاتی و کنترلی هستند که با هدف افزایش ایمنی، کاهش ترافیک و بهبود مدیریت شبکه حمل‌ونقل توسعه یافته‌اند. عملکرد این سامانه‌ها وابستگی زیادی به تبادل مستمر اطلاعات میان خودروها، زیرساخت‌ها، مراکز کنترل و کاربران دارد. استفاده از بلاک‌چین در ITS باعث می‌شود اطلاعات ترافیکی در بستری امن و تغییرناپذیر ذخیره شوند.

در نتیجه، احتمال دستکاری داده‌ها، حملات سایبری و انتشار اطلاعات نادرست به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. علاوه

۳-۳- کاربرد بلاک چین در خودروهای متصل و خودران

خودروهای متصل و خودران برای عملکرد صحیح نیازمند تبادل پیوسته اطلاعات با سایر خودروها، زیرساخت‌های شهری و مراکز کنترل هستند. این ارتباطات که با عنوان ارتباطات خودرو با خودرو (V2V) و خودرو با زیرساخت (V2I) شناخته می‌شوند، باید از امنیت و قابلیت اعتماد بالایی برخوردار باشند. بلاک چین می‌تواند بستری مناسب برای مدیریت این ارتباطات فراهم کند. در این ساختار، هویت دیجیتال خودروها به صورت غیرقابل جعل ثبت شده و پیام‌های تبادل شده میان خودروها قبل از پذیرش اعتبارسنجی می‌شوند. این ویژگی

احتمال حملات سایبری و ارسال اطلاعات جعلی را کاهش داده و ایمنی شبکه حمل و نقل را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، قراردادهای هوشمند امکان انجام خود کار پرداخت هزینه پارکینگ، عوارض آزادراه‌ها، شارژ خودروهای برقی و خدمات تعمیر و نگهداری را فراهم می‌کنند. به همین دلیل، بسیاری از شرکت‌های خودرو سازی عضو کنسرسیوم^۱ MOBI در حال توسعه زیرساخت‌های مبتنی بر بلاک چین برای نسل آینده خودروهای هوشمند هستند (MOBI, 2023).

۳-۴- کاربرد بلاک چین در اینترنت اشیا (IoT)

گسترش اینترنت اشیا موجب شده است میلیون‌ها حسگر، دوربین، دستگاه موقعیت‌یاب و تجهیزات هوشمند در شبکه‌های حمل و نقل فعالیت کنند. مدیریت این حجم عظیم از داده‌ها با استفاده از سامانه‌های متمرکز، علاوه بر هزینه بالا، خطر حملات سایبری و از بین رفتن اطلاعات را نیز افزایش می‌دهد. ترکیب اینترنت اشیا با بلاک چین، امکان ثبت امن داده‌های تولید شده توسط تجهیزات هوشمند را فراهم می‌کند. هر حسگر می‌تواند اطلاعات خود را مستقیماً بر روی بلاک چین ثبت کند و سایر

اعضای شبکه نیز بدون نیاز به واسطه به داده‌های معتبر دسترسی داشته باشند. این موضوع نقش مهمی در افزایش قابلیت اعتماد سامانه‌های هوشمند و کاهش احتمال دستکاری داده‌ها دارد. در مهندسی حمل و نقل، این فناوری در پایش و وضعیت ناوگان، کنترل شرایط حمل کالاهای حساس، مدیریت ناوگان حمل مواد غذایی و دارویی و نظارت بر تجهیزات زیرساختی کاربرد گسترده‌ای دارد (Wu & Tran, 2023).

۳-۵- کاربرد بلاک چین در پرداخت‌های هوشمند، عوارض و پارکینگ

پرداخت الکترونیکی یکی از مهم‌ترین اجزای حمل و نقل هوشمند محسوب می‌شود. در روش‌های متداول، انجام تراکنش‌های مالی معمولاً به واسطه بانک‌ها یا شرکت‌های ارائه‌دهنده خدمات پرداخت وابسته است. این وابستگی علاوه بر افزایش هزینه‌ها، موجب کندی انجام تراکنش‌ها نیز می‌شود. استفاده از بلاک چین امکان انجام پرداخت‌های هم‌تا به هم‌تا را

فراهم می‌کند. در این روش، هزینه عوارض، پارکینگ، سوخت یا شارژ خودروهای برقی به صورت خود کار و از طریق قراردادهای هوشمند پرداخت می‌شود. این فرآیند علاوه بر کاهش زمان انتظار کاربران، احتمال بروز خطا و تقلب را نیز کاهش می‌دهد.

۳-۶- کاربرد بلاک چین در حمل و نقل دریایی و مدیریت بنادر

حمل و نقل دریایی سهم قابل توجهی در تجارت بین‌المللی دارد و حجم زیادی از اسناد، مجوزها و اطلاعات تجاری در این بخش مبادله می‌شود. استفاده از اسناد کاغذی و فرآیندهای سنتی، علاوه بر افزایش زمان ترخیص کالا، هزینه‌های عملیاتی را نیز بالا می‌برد. بلاک چین با دیجیتالی کردن اسناد حمل، بارنامه‌ها و مجوزهای گمرکی، امکان تبادل سریع و ایمن

اطلاعات را میان شرکت‌های کشتیرانی، گمرک، بیمه و صاحبان کالا فراهم می‌کند. در این زمینه، گزارش‌های دلویی نشان می‌دهد که به کارگیری بلاک چین می‌تواند زمان پردازش اسناد، هزینه‌های اداری و اختلافات حقوقی را به میزان قابل توجهی کاهش دهد (Deloitte, 2022).

۳-۷-مدیریت سوابق تعمیر و نگهداری خودروها

ثبت غیرقابل تغییر سوابق تعمیرات، تعویض قطعات و سرویس های دوره ای خودرو بر روی بلاک چین می تواند از تقلب در بازار خودروهای دست دوم جلوگیری کرده و ارزش واقعی خودرو را مشخص کند. چنین سامانه ای امکان دسترسی شرکت های بیمه، مراکز معاینه فنی و خریداران خودرو به سوابق معتبر را فراهم می کند. این کاربرد به ویژه در بازار خودروهای دست دوم اهمیت دارد؛ زیرا اطلاعات خودرو معمولاً در پایگاه های متمرکز و پراکنده نگهداری می شود و امکان ناقص یا نادرست بودن آن وجود دارد (Jiang et al., 2021; Singh et al., 2020).

۳-۸-بیمه هوشمند حمل و نقل

یکی دیگر از کاربردهای بلاک چین در حمل و نقل، خودکارسازی فرآیندهای بیمه خودرو و محموله است. در این ساختار، اطلاعات حسگرهای اینترنت اشیا در باره موقعیت، دما، رطوبت، ضربه، تصادف یا تأخیر در حمل ثبت شده و در صورت تحقق شرایط از پیش تعیین شده، قرارداد هوشمند می تواند فرآیند اعلام و پرداخت خسارت را به صورت خودکار آغاز کند. این روش زمان رسیدگی به خسارت، احتمال تقلب و هزینه های کارشناسی و اداری را کاهش می دهد (Sharma et al., 2026; Valchanov & Aleksieva, 2022).

۳-۹-مدیریت انتشار کربن و حمل و نقل پایدار

یکی از کاربردهای نوظهور بلاک چین، ثبت میزان انتشار CO₂ ناوگان حمل و نقل و ایجاد بازارهای تجارت اعتبار کربن است. شرکت ها می توانند میزان واقعی انتشار آلاینده ها را به صورت شفاف ثبت کرده و در چارچوب سیاست های زیست محیطی، اعتبار کربن خرید و فروش کنند (Patro et al., 2025). بلاک چین می تواند شفافیت و قابلیت حسابرسی انتشار را افزایش دهد، اما خود شبکه نیز انرژی مصرف می کند. یک ارزیابی چرخه عمر در لجستیک آخرین مایل نشان داده است که با وجود ظرفیت های قابل توجه بلاک چین در تحول سامانه های حمل و نقل، پیاده سازی گسترده این فناوری همچنان با موانع متعددی روبه رو است. این چالش ها را می توان در چهار دسته اصلی شامل چالش های فنی، اقتصادی، حقوقی و مدیریتی طبقه بندی کرد.

سامانه بلاک چین نسبت به فرایند کاغذی انتشار کمتری داشت، ولی به دلیل انرژی مصرفی سازه کار اجماع، از برخی راه حل های دیجیتال ساده تر انتشار بیشتری ایجاد کرد. بنابراین، انتخاب بلاک چین مجوزدار و الگوریتم اجماع کم مصرف اهمیت دارد (Lin et al., 2026).

۳-۱۰-حمل و نقل چندوجهی

در حمل و نقل ترکیبی (جاده ای، ریلی، دریایی و هوایی)، بلاک چین می تواند تمامی اسناد، قراردادها و اطلاعات مربوط به انتقال بار بین شیوه های مختلف حمل را در یک دفترکل مشترک ذخیره کند و از دوباره کاری و مغایرت اطلاعات جلوگیری نماید. مدیریت زنجیره تأمین دارو و مواد غذایی در حمل کالاهای حساس، داده های حسگرهای دما، رطوبت و شوک می توانند به طور مستقیم روی بلاک چین ثبت شوند. در نتیجه، امکان اثبات کیفیت کالا در طول مسیر حمل فراهم شده و مسئولیت هر ذی نفع به صورت دقیق مشخص می شود (Irannezhad, 2020).

۳-۱۱-زنجیره سرد مواد غذایی، دارو و کالاهای حساس

ترکیب بلاک چین و اینترنت اشیا در زنجیره سرد، امکان ثبت تغییر نا پذیر داده های دما، رطوبت، موقعیت و زمان توقف محموله را فراهم می کند. با استفاده از این اطلاعات می توان مشخص کرد که آیا مواد غذایی، داروها یا سایر کالاهای حساس در طول حمل در شرایط استاندارد نگهداری شده اند یا خیر. قراردادهای هوشمند نیز می توانند هنگام عبور دما یا رطوبت از حدود مجاز، هشدار صادر کرده یا فرآیند پذیرش کالا، پرداخت و خسارت بیمه را متوقف کنند (Duman & Aydoğan, 2025; Kaur et al., 2022).

۴-چالش ها و محدودیت های به کارگیری فناوری

بلاک چین در مهندسی حمل و نقل

از مهم ترین چالش های فنی، مقیاس پذیری شبکه است. سامانه های حمل و نقل هوشمند روزانه میلیون ها تراکنش و پیام میان وسایل نقلیه، حسگرها، زیرساخت ها و مراکز کنترل تولید می کنند. بسیاری از شبکه های بلاک چین عمومی هنوز توان پردازش چنین حجم بالایی از داده را ندارند و افزایش تعداد

تراکنش‌ها می‌تواند موجب کاهش سرعت شبکه و افزایش زمان تأیید شود (Jabbar et al., 2022).

چالش مهم دیگر، مصرف انرژی در برخی الگوریتم‌های اجماع، به‌ویژه اثبات کار است. اگرچه نسل‌های جدید بلاک‌چین با استفاده از سازوکارهایی مانند اثبات سهام تلاش کرده‌اند این مشکل را کاهش دهند، اما همچنان انتخاب سازوکار اجماع مناسب برای کاربردهای حمل‌ونقل اهمیت زیادی دارد. از منظر اقتصادی، هزینه طراحی، توسعه و نگهداری زیرساخت‌های مبتنی بر بلاک‌چین، به‌ویژه برای کشورهای در حال توسعه، یکی از موانع اصلی محسوب می‌شود. علاوه بر سرمایه‌گذاری اولیه، آموزش نیروی انسانی، به‌روزرسانی تجهیزات و یکپارچه‌سازی سامانه‌های موجود نیز هزینه‌های قابل توجهی را به سازمان‌ها تحمیل می‌کند (Kumar et al., 2022).

چالش‌های حقوقی نیز نقش مهمی در روند پذیرش این فناوری دارند. در بسیاری از کشورها، قوانین مشخصی درباره اعتبار حقوقی قراردادهای هوشمند، مالکیت داده‌ها، مسئولیت ناشی از خطاهای الگوریتمی و حفاظت از حریم خصوصی وجود ندارد. این ابهامات موجب احتیاط سازمان‌ها در استفاده گسترده از بلاک‌چین شده است. از منظر مدیریتی، مقاومت در برابر تغییر، نبود دانش تخصصی، ضعف همکاری میان سازمان‌ها و فقدان استانداردهای مشترک، از دیگر موانع توسعه این فناوری هستند. پیاده‌سازی موفق بلاک‌چین مستلزم همکاری نزدیک میان دولت، دانشگاه، صنعت و بخش خصوصی و تدوین استانداردهای ملی و بین‌المللی است.

جدول ۱. مهم‌ترین کاربردهای فناوری بلاک‌چین در مهندسی حمل‌ونقل

مهم‌ترین مزایا	حوزه کاربرد
رهگیری کالا، شفافیت اطلاعات، کاهش تقلب	زنجیره تأمین و لجستیک
افزایش امنیت داده‌ها، مدیریت ترافیک، تبادل ایمن اطلاعات	سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند
احراز هویت دیجیتال، ارتباطات V2V و V2I، پرداخت خودکار	خودروهای متصل و خودران
ثبت امن داده‌های حسگرها، پایش لحظه‌ای ناوگان	اینترنت اشیاء
حذف واسطه‌ها، کاهش هزینه تراکنش، افزایش سرعت پرداخت	پرداخت‌های هوشمند
دیجیتالی‌سازی اسناد، تسریع ترخیص کالا، کاهش اختلافات	حمل‌ونقل دریایی و بنادر

۵- تجربیات بین‌المللی در بکارگیری بلاک‌چین

در سال‌های اخیر، شرکت‌ها، کنسرسیوم‌های صنعتی، بنادر، گمرک‌ها و سازمان‌های بین‌المللی پروژه‌های متعددی را برای برر سی یا پیاده سازی فناوری بلاک‌چین در حوزه حمل‌ونقل و لجستیک اجرا کرده‌اند. این تجربیات نشان می‌دهد که ارزش بلاک‌چین تنها در ذخیره ایمن یا تغییرناپذیر اطلاعات خلاصه نمی‌شود، بلکه مهم‌ترین کارکرد آن، ایجاد بستری مشترک برای تبادل داده و هماهنگی میان سازمان‌هایی است که منافع، سامانه‌های اطلاعاتی و سطوح اعتماد متفاوتی دارند. بااین‌حال، نتایج پروژه‌های بین‌المللی نشان می‌دهد که موفقیت چنین سامانه‌هایی بیش از آنکه صرفاً به قابلیت‌های فنی بلاک‌چین وابسته باشد، به نحوه حکمرانی پلتفرم، مشارکت ذی‌نفعان، استانداردسازی داده‌ها، تعامل‌پذیری و وجود یک مدل اقتصادی پایدار بستگی دارد. یکی از نمونه‌های مهم در صنعت خودرو، کنسرسیوم MOBI¹ است که با مشارکت خودروسازان،

تأمین‌کنندگان قطعات، شرکت‌های فناوری و سایر فعالان صنعت حمل‌ونقل شکل گرفته است. هدف اصلی این کنسرسیوم، توسعه استانداردهای مشترک برای کاربرد بلاک‌چین و فناوری‌های دفترکل توزیع‌شده در حوزه‌هایی مانند هویت دیجیتال وسایل نقلیه، سوابق خودرو، مدیریت داده‌های خودروهای متصل، پرداخت‌های ماشینی، شارژ وسایل نقلیه برقی و تعامل خودرو با زیرساخت است. اهمیت تجربه MOBI در آن است که توسعه کاربردهای بلاک‌چین در صنعت خودرو را نه به صورت پروژه‌های مجزای شرکتی، بلکه در قالب استانداردها و پروتکل‌های مشترک دنبال می‌کند.

این رویکرد می‌تواند از شکل‌گیری پلتفرم‌های ناسازگار جلوگیری کرده و امکان تبادل اطلاعات میان خودروسازان، شرکت‌های بیمه، مراکز تعمیراتی، اپراتورهای شارژ و نهادهای دولتی را فراهم سازد (MOBI, 2023). در حوزه حمل‌ونقل

دریایی، پلتفرم TradeLens از شناخته‌شده‌ترین تجربه‌های بین‌المللی به شمار می‌رود. این پلتفرم در سال ۲۰۱۸ با همکاری Maersk و IBM و با هدف دیجیتالی‌سازی فرایندهای حمل‌ونقل دریایی، اشتراک‌گذاری ایمن اطلاعات محموله و کاهش وابستگی به اسناد کاغذی ایجاد شد. TradeLens امکان دسترسی ذی‌نفعانی مانند شرکت‌های کشتیرانی، بنادر، پایانه‌ها، صاحبان کالا، فورواردرها و گمرک‌ها به یک سابقه مشترک از رویدادها و اسناد حمل را فراهم می‌کرد. با وجود توسعه موفق زیرساخت فنی، فعالیت این پلتفرم در سال ۲۰۲۳ متوقف شد؛ زیرا به گفته Maersk، مشارکت گسترده صنعت و سطح لازم از توجیه‌پذیری تجاری حاصل نشد.

این تجربه نشان داد که ایجاد یک سامانه فنی کارآمد، بدون اعتماد رقبا به بی‌طرفی پلتفرم، مشارکت کافی اعضای شبکه و توزیع مناسب منافع اقتصادی، برای دستیابی به پذیرش فراگیر کافی نیست (Jovanovic et al., 2022).

در مقابل، GSBN² نمونه‌ای از یک کنسرسیوم غیرانتفاعی و نسبتاً بی‌طرف در صنعت کشتیرانی است که بر دیجیتالی‌سازی اسناد حمل، آزادسازی محموله، بارنامه الکترونیکی، تأمین مالی تجاری و تبادل امن داده تمرکز دارد. بر اساس اطلاعات منتشرشده از سوی این شبکه، GSBN در حال حاضر با ده‌ها بندر و هزاران سازمان تجاری همکاری دارد و راهکار «آزادسازی محموله» آن می‌تواند فرایندی را که در روش‌های سنتی چند روز طول می‌کشد، به چند ساعت کاهش دهد. همچنین صدها هزار بارنامه الکترونیکی از طریق زیرساخت این شبکه صادر شده است. تجربه GSBN نشان می‌دهد که ساختار حکمرانی بی‌طرف، تمرکز بر یک مسئله مشخص و قابل‌اندازه‌گیری و مشارکت شرکت‌های اصلی حمل‌ونقل و پایانه‌ها می‌تواند احتمال پذیرش یک پلتفرم بلاک‌چینی را افزایش دهد (GSBN, 2025).

نمونه مهم دیگر، پلتفرم CargoX است که از بلاک‌چین برای ایجاد، انتقال و مدیریت اسناد تجارت و حمل‌ونقل الکترونیکی استفاده می‌کند. این پلتفرم امکان انتقال امن اسنادی مانند بارنامه، فاکتور تجاری، گواهی مبدأ، اعتبار اسنادی و سایر مدارک مرتبط با تجارت بین‌المللی را فراهم کرده است. یکی از مهم‌ترین کاربردهای عملی CargoX، همکاری با سامانه پنجره واحد تجارت خارجی مصر، موسوم به NAFEZA، در اجرای نظام اطلاعات پیش از ورود محموله است. در این سامانه،

صادرکنندگان خارجی موظف‌اند اسناد مورد نیاز گمرک مصر را پیش از حمل کالا از طریق پلتفرم CargoX ارسال کنند. این تجربه نشان می‌دهد که پشتیبانی قانونی و الزام یا پذیرش رسمی دولت می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در گسترش یک پلتفرم دیجیتال داشته باشد. برخلاف پروژه‌هایی که صرفاً در مرحله آزمایشی باقی مانده‌اند، CargoX در یک فرایند واقعی گمرکی و با مشارکت شرکت‌های بین‌المللی مورد استفاده قرار گرفته است. کاربرد CargoX همچنین اهمیت تعامل‌پذیری را برجسته می‌کند. این پلتفرم از اسناد ساختاریافته و غیرساختاریافته پشتیبانی می‌کند و قابلیت اتصال به سامانه‌های سازمانی از طریق رابط برنامه‌نویسی را دارد. افزون بر این، در آزمایش‌های تعامل‌پذیری مرتبط با بارنامه الکترونیکی شرکت کرده است. این ویژگی نشان می‌دهد که پلتفرم‌های موفق لزوماً جایگزین کامل سامانه‌های موجود نمی‌شوند، بلکه باید بتوانند با سامانه‌های گمرکی، بانکی، بندری و مدیریت منابع سازمانی ارتباط برقرار کنند (CargoX, 2022).

در سطح سیاست‌گذاری و حکمرانی، پروژه Redesigning Trust: Blockchain for Supply Chains مجمع جهانی اقتصاد نیز تجربه قابل توجهی محسوب می‌شود. این پروژه با مشارکت بیش از صد سازمان و متخصص و بیش از بیست دولت شکل گرفت تا چارچوبی برای استقرار مسئولانه بلاک‌چین در زنجیره‌های تأمین تدوین کند. این ابتکار بر موضوعاتی مانند انتخاب نوع شبکه، حریم خصوصی داده‌ها، امنیت، هویت دیجیتال، تعامل‌پذیری، نحوه حکمرانی و مشارکت ذی‌نفعان تمرکز داشت. نتیجه اصلی این تجربه آن است که بلاک‌چین نباید به‌عنوان یک راه‌حل عمومی برای همه مسائل زنجیره تأمین تلقی شود؛ بلکه پیش از انتخاب آن باید مسئله، ذی‌نفعان، ساختار اعتماد، الزامات قانونی و راه‌حل‌های جایگزین بررسی شوند (WEF, 2021).

برخی کشورها و اپراتورهای بندری نیز از بلاک‌چین در طرح‌های تحول دیجیتال خود استفاده کرده‌اند. برای مثال، شرکت DP World پلتفرمی را با هدف یکپارچه‌سازی ثبت تاجران و دیجیتالی‌کردن اسناد و فرایندهای واردات و صادرات توسعه داد. تجربه این پروژه نشان می‌دهد که در طراحی سامانه‌های ملی یا بندری، توجه به نیازهای کاربران، مشارکت متخصصان حوزه و ایجاد انگیزه اقتصادی برای تمامی اعضای شبکه اهمیت زیادی دارد.

همچنین ساختار حکمرانی و نحوه توزیع منافع باید به گونه‌ای باشد که بازیگران کوچک و بزرگ، مشارکت در شبکه را به نفع خود بدانند (Wang et al., 2021).

گزارش‌های شرکت‌هایی مانند McKinsey & Deloitte و Company نیز در تبیین ملاحظات مدیریتی و اقتصادی این فناوری نقش داشته‌اند. مطالعات Deloitte بر ظرفیت بلاک‌چین برای دیجیتالی‌سازی بارنامه‌ها، قراردادهای حمل، اسناد گمرکی و اطلاعات کانتینرها و نیز ترکیب آن با اینترنت اشیاء برای رهگیری محموله‌ها تأکید کرده‌اند. از سوی دیگر،

McKinsey بر این نکته تأکید دارد که بلاک‌چین باید بخشی از راهبرد جامع تحول دیجیتال سازمان باشد و استفاده از آن بدون تعریف مسئله اقتصادی روشن، استانداردهای مشترک و مشارکت ذی‌نفعان ممکن است به پروژه‌هایی پرهزینه و کم‌اثر منجر شود. بااین‌حال، این موارد بهتر است به‌عنوان چارچوب‌های تحلیلی و مشاوره‌ای معرفی شوند، نه پروژه‌های اجرایی مستقل (Deloitte, 2022; McKinsey & Company, 2022).

جدول ۲. مقایسه تجربیات بین‌المللی در به‌کارگیری بلاک‌چین در حمل‌ونقل و لجستیک

کشور یا دامنه فعالیت	حوزه کاربرد	وضعیت و مهم‌ترین دستاورد	مهم‌ترین تجربه
MOBI	کنسرسیوم بین‌المللی صنعت خودرو	خودروهای متصل، هویت دیجیتال خودرو و پرداخت ماشین	استانداردسازی پیش‌شرط تعامل میان شرکت‌ها و سامانه‌هاست.
TradeLens	شبکه جهانی حمل‌ونقل دریایی	تبادل اسناد و اطلاعات محموله	بلوغ فنی بدون مدل اقتصادی و اعتماد اکوسیستم کافی نیست.
GSBN	شبکه بین‌المللی کشتیرانی و بنادر	بارنامه الکترونیکی و آزادسازی محموله	بی‌طرفی حکمرانی و تمرکز بر مسئله مشخص، پذیرش را افزایش می‌دهد.
CargoX-NAFEZA	مصر و تجارت بین‌المللی	ارسال اسناد گمرکی و اطلاعات پیش از ورود محموله	حمایت قانونی دولت و ادغام با فرایند رسمی، عامل مهم گسترش است.
DP World	امارات متحده عربی و شبکه بنادر	ثبت تاجران و دیجیتالی‌سازی اسناد واردات و صادرات	طراحی کاربرمحور و ایجاد انگیزه برای همه ذی‌نفعان ضروری است.
مجمع جهانی اقتصاد	بیش از ۲۰ دولت و ۱۰۰ سازمان	حکمرانی و استقرار مسئولانه بلاک‌چین	پیش از انتخاب فناوری باید مسئله، حکمرانی و راه‌حل‌های جایگزین ارزیابی شوند.
Deloitte	بین‌المللی	تحلیل زنجیره تأمین و لجستیک	بلاک‌چین باید با اینترنت اشیاء و سامانه‌های موجود یکپارچه شود.
McKinsey & Company	بین‌المللی	راهبرد تحول دیجیتال	اجرای پروژه باید بر مبنای ارزش اقتصادی و نیاز واقعی باشد.

در مجموع، تجربیات بین‌المللی را می‌توان در سه گروه دسته‌بندی کرد: نخست، کنسرسیوم‌های استانداردگذار مانند MOBI؛ دوم، پلتفرم‌های عملیاتی مانند CargoX و GSBN و سوم، پروژه‌هایی مانند TradeLens که با وجود دستیابی به بلوغ فنی، نتوانسته‌اند به پایداری تجاری برسند. مقایسه این سه گروه نشان می‌دهد که موفقیت بلاک‌چین در حمل‌ونقل به چهار عامل اساسی وابسته است: وجود مسئله‌ای واقعی و مشترک میان چند سازمان، مشارکت بازیگران اصلی اکوسیستم، استانداردهای فنی و حقوقی قابل قبول و مدلی روشن برای توزیع هزینه‌ها و منافع.

این تجربیات همچنین نشان می‌دهد که بلاک‌چین زمانی بیشترین ارزش را ایجاد می‌کند که چند سازمان مستقل نیازمند دسترسی به یک سابقه مشترک باشند، اما هیچ‌یک به تنهایی نتواند یا نباید کنترل کامل سامانه را در اختیار داشته باشد. در مقابل، در فرایندهایی که یک سازمان واحد مسئول جمع‌آوری و مدیریت داده‌هاست، استفاده از پایگاه داده متمرکز ممکن است ساده‌تر و اقتصادی‌تر باشد. بنابراین، ارزیابی ضرورت استفاده از بلاک‌چین باید پیش از آغاز پروژه و با مقایسه آن با راهکارهای غیربلاک‌چینی انجام شود.

بر اساس این تجربیات، پیشنهاد می‌شود کشورها پیش از توسعه سراسری سامانه‌های بلاک‌چینی، پروژه‌های پایلوت را در حوزه‌هایی با تعداد محدود ذی‌نفعان و منافع قابل اندازه‌گیری اجرا کنند. دیجیتالی‌سازی بارنامه، تبادل اسناد گمرکی، رهگیری محموله‌های حساس، ثبت سوابق تعمیر ناوگان و مدیریت اسناد بندری می‌توانند گزینه‌های مناسبی برای این مرحله باشند. ارزیابی پروژه‌های آزمایشی نیز باید علاوه بر شاخص‌های فنی، متغیرهایی مانند کاهش زمان، کاهش هزینه، میزان مشارکت کاربران، قابلیت تعامل با سامانه‌های موجود و پایداری مدل کسب‌وکار را در بر گیرد.

چشم‌انداز آینده

روند توسعه فناوری‌های نوظهور نشان می‌دهد که آینده صنعت حمل‌ونقل به سمت شکل‌گیری سامانه‌هایی هوشمند، خودکار، متصل و داده‌محور حرکت می‌کند. در چنین سامانه‌هایی، حجم زیادی از داده میان وسایل نقلیه، زیرساخت‌های حمل‌ونقل، اپراتورها، کاربران، شرکت‌های بیمه، نهادهای نظارتی و ارائه‌دهندگان خدمات مبادله خواهد شد. از این رو، تضمین

صحت، امنیت، مالکیت و قابلیت اعتماد داده‌ها به یکی از الزامات اساسی سامانه‌های حمل‌ونقل آینده تبدیل می‌شود. بلاک‌چین می‌تواند با فراهم کردن بستری غیرمتمرکز، شفاف و تغییرناپذیر، نقش لایه اعتماد را در این اکوسیستم ایفا کند.

انتظار می‌رود در سال‌های آینده، همگرایی بلاک‌چین با فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیاء، هوش مصنوعی، کلان‌داده، رایانش ابری، رایانش لبه‌ای و شبکه‌های ارتباطی نسل پنجم و ششم، زمینه توسعه نسل جدید سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند را فراهم سازد. در این چارچوب، حسگرها و تجهیزات اینترنت اشیاء داده‌های مربوط به وضعیت وسایل نقلیه، ترافیک، زیرساخت‌ها و محموله‌ها را جمع‌آوری می‌کنند؛ هوش مصنوعی و کلان‌داده این اطلاعات را برای پیش‌بینی تقاضا، بهینه‌سازی مسیر، تشخیص خرابی و مدیریت ترافیک تحلیل می‌کنند؛ و بلاک‌چین، صحت، اصالت و قابلیت رهگیری داده‌ها و تراکنش‌ها را تضمین خواهد کرد. رایانش لبه‌ای نیز می‌تواند با پردازش داده‌ها در نزدیکی محل تولید، تأخیر ارتباطی و بار محاسباتی شبکه‌های بلاک‌چینی را کاهش دهد.

یکی از مهم‌ترین زمینه‌های توسعه آینده، کاربرد بلاک‌چین در خودروهای متصل و خودران است. ایجاد هویت دیجیتال منحصربه‌فرد برای هر وسیله نقلیه می‌تواند امکان ثبت قابل اعتماد سوابق مالکیت، تعمیر، نگهداری، تصادفات، معاینه فنی، مصرف انرژی و به‌روزرسانی نرم‌افزار را فراهم کند. چنین هویتی می‌تواند در خرید و فروش خودرو، ارزیابی ارزش و سیله نقلیه، رسیدگی به خسارت‌های بیمه‌ای و تشخیص دست‌کاری سوابق مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، قراردادهای هوشمند می‌توانند پرداخت خودکار عوارض، هزینه پارکینگ، شارژ وسایل نقلیه برقی، خدمات تعمیرگاهی و بیمه مبتنی بر میزان استفاده را بدون نیاز به فرایندهای دستی انجام دهند.

در ارتباطات میان خودروها و زیرساخت‌ها نیز بلاک‌چین می‌تواند در احراز هویت وسایل نقلیه و جلوگیری از ارسال داده‌های جعلی یا دست‌کاری‌شده نقش داشته باشد. با این حال، پردازش بلادرنگ داده‌ها در خودروهای خودران مستلزم سرعت و تأخیر بسیار پایین است؛ بنابراین، بعید است همه داده‌های تولید شده مستقیماً در زنجیره ذخیره شوند. معماری‌های آینده احتمالاً از مدل‌های ترکیبی استفاده خواهند کرد که در آن، داده‌های حجیم خارج از زنجیره ذخیره شده و تنها شناسه‌ها یا سابقه تأیید آن‌ها در بلاک‌چین ثبت می‌شود. این رویکرد

می‌تواند میان امنیت، مقیاس‌پذیری و سرعت پردازش تعادل ایجاد کند. در حوزه لجستیک و زنجیره تأمین، انتظار می‌رود بلاک‌چین از مرحله رهگیری ساده کالا فراتر رفته و به زیرساختی برای یکپارچه‌سازی فرایندهای حمل، انبارداری، بیمه، گمرک و پرداخت تبدیل شود. ثبت مشترک اسناد حمل، بارنامه‌ها، مجوزها، گواهی‌های مبدأ و اطلاعات گمرکی می‌تواند از دوباره‌کاری، مغایرت اطلاعات و جعل اسناد جلوگیری کند. همچنین، ترکیب بلاک‌چین با حسگرهای اینترنت اشیاء امکان کنترل شرایط دما، رطوبت، موقعیت مکانی و وضعیت فیزیکی محموله‌ها را در زنجیره سرد فراهم می‌سازد. این قابلیت به‌ویژه در حمل مواد غذایی، دارو، واکسن و کالاهای حساس از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی دیگر از جهت‌گیری‌های مهم آینده، استفاده از بلاک‌چین در توسعه حمل‌ونقل پایدار است. این فناوری می‌تواند برای ثبت و رهگیری میزان انتشار آلاینده‌ها، مصرف سوخت و انرژی، مبادله اعتبارهای کربن و تأیید استفاده از سوخت‌ها یا انرژی‌های پاک به کار رود. در سامانه‌های حمل‌ونقل اشتراکی و چندوجهی نیز قراردادهای هوشمند می‌توانند تقسیم درآمد میان اپراتورهای مختلف، مدیریت بلیت یکپارچه و تسویه خودکار هزینه سفر را تسهیل کنند. با این حال، دستیابی به این مزایا مستلزم آن است که داده‌های ورودی معتبر باشند؛ زیرا تغییرناپذیری بلاک‌چین نمی‌تواند نادرستی داده‌هایی را که از ابتدا به‌صورت اشتباه یا جعلی وارد سامانه شده‌اند، برطرف کند.

در کنار فرصت‌های یادشده، آینده بلاک‌چین در حمل‌ونقل با چالش‌هایی نظیر مقیاس‌پذیری، تعامل‌پذیری میان سامانه‌ها، حفظ حریم خصوصی، امنیت قراردادهای هوشمند، هزینه پیاده‌سازی و ابهامات حقوقی روبه‌رو است. همچنین، مشخص نبودن مسئولیت حقوقی در صورت بروز خطا در قراردادهای هوشمند، ثبت اطلاعات نادرست یا حملات سایبری، می‌تواند پذیرش این فناوری را محدود کند. از این‌رو، پژوهش‌های آینده باید علاوه بر توسعه راه‌حل‌های فنی، به طراحی چارچوب‌های حکمرانی، مدل‌های اقتصادی، استانداردهای تبادل داده و سازوکارهای تعیین مسئولیت نیز توجه کنند.

یکی دیگر از اولویت‌های پژوهشی، ارزیابی تجربی عملکرد بلاک‌چین در پروژه‌های واقعی و مقیاس گسترده است. بخش قابل توجهی از مطالعات موجود در سطح مدل مفهومی، شبیه‌سازی یا نمونه آزمایشگاهی باقی مانده‌اند. بنابراین، انجام

مطالعات هزینه-فایده، مقایسه بلاک‌چین با پایگاه‌های داده متمرکز و ارزیابی شاخص‌هایی مانند سرعت پردازش، مصرف انرژی، هزینه نگهداری، امنیت و رضایت ذی‌نفعان ضروری است. استفاده از بلاک‌چین تنها در شرایطی توجیه‌پذیر خواهد بود که چندین سازمان مستقل نیازمند دسترسی مشترک به داده‌ها باشند و اعتماد کامل میان آن‌ها وجود نداشته باشد؛ در غیر این صورت، سامانه‌های متمرکز ممکن است ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر باشند. برای کشورهایی مانند ایران، بلاک‌چین می‌تواند در توسعه کریدورهای ترانزیتی، حمل‌ونقل ریلی، بنادر، گمرک، مدیریت ناوگان، رهگیری محموله‌ها و یکپارچه‌سازی اسناد حمل نقش مؤثری ایفا کند. یکی از کاربردهای قابل بررسی، ایجاد بستری مشترک برای تبادل اطلاعات میان سازمان‌ها را هداری، راه‌آهن، بنادر، گمرک، شرکت‌های حمل‌ونقل و صاحبان کالا است. چنین سامانه‌ای می‌تواند زمان انجام تشریفات، مغایرت اسناد و وابستگی به فرایندهای کاغذی را کاهش دهد و شفافیت عملکرد زنجیره حمل‌ونقل را افزایش دهد.

با این حال، پیاده‌سازی گسترده این فناوری در ایران باید به‌صورت تدریجی و مبتنی بر نیازهای واقعی انجام شود. تدوین راهبرد ملی، تعیین متولی مشخص، توسعه استانداردهای داده، اصلاح مقررات حقوقی، تأمین زیرساخت‌های ارتباطی، آموزش نیروی انسانی و حمایت از پژوهش‌های کاربردی، از الزامات اساسی این مسیر هستند. پیشنهاد می‌شود در مرحله نخست، پروژه‌های پایلوت محدود در حوزه‌هایی مانند رهگیری محموله‌های بندری، ثبت سوابق تعمیر ناوگان، بارنامه الکترونیکی، مدیریت زنجیره سرد و تبادل اسناد گمرکی اجرا شوند. پس از ارزیابی فنی، اقتصادی و حقوقی این پروژه‌ها، می‌توان درباره توسعه آن‌ها در مقیاس ملی تصمیم‌گیری کرد.

در مجموع، آینده بلاک‌چین در صنعت حمل‌ونقل به توسعه فناوری دفترکل توزیع‌شده محدود نخواهد بود، بلکه به میزان همگرایی آن با سایر فناوری‌های دیجیتال، مشارکت ذی‌نفعان، وجود استانداردهای مشترک و شکل‌گیری مدل‌های اقتصادی پایدار وابسته است. انتظار می‌رود کاربردهای آینده این فناوری از پروژه‌های آزمایشی و منفرد به سمت اکوسیستم‌های یکپارچه حرکت کنند؛ اکوسیستم‌هایی که در آن‌ها بلاک‌چین به‌عنوان زیرساخت اعتماد، امنیت و هماهنگی میان اجزای مختلف سامانه حمل‌ونقل عمل خواهد کرد.

مرور مطالعات نشان داد که فناوری بلاکچین طی سال‌های اخیر از یک ابزار صرف برای ثبت و انتقال امن اطلاعات به بستری برای ایجاد اعتماد دیجیتال در اکوسیستم حمل‌ونقل تبدیل شده است. بررسی پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که مهم‌ترین مزیت این فناوری در حوزه حمل‌ونقل، ایجاد یک دفترکل توزیع شده و تغییرناپذیر برای اشتراک‌گذاری اطلاعات میان ذی‌نفعان مختلف است؛ قابلیت‌هایی که می‌تواند شفافیت، قابلیت رهگیری، امنیت داده‌ها و اعتماد میان سازمان‌ها را افزایش داده و در عین حال وابستگی به واسطه‌های متمرکز را کاهش دهد. این ویژگی‌ها به‌ویژه در مدیریت زنجیره تأمین، حمل‌ونقل هوشمند، خودروهای متصل، مدیریت بنادر و تبادل اسناد حمل، بیشترین کاربرد را داشته‌اند.

با وجود این مزایا، نتایج مطالعات نشان می‌دهد که بلاکچین به‌تنهایی پاسخگوی تمامی چالش‌های صنعت حمل‌ونقل نیست. در اغلب پژوهش‌ها، بیشترین اثربخشی این فناوری زمانی حاصل شده است که در کنار فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیاء، هوش مصنوعی، کلان‌داده، رایانش ابری و شبکه‌های ارتباطی نسل پنجم به کار گرفته شده است. در این معماری‌ها، بلاکچین وظیفه تضمین اصالت، یکپارچگی و قابلیت اعتماد داده‌ها را بر عهده دارد، در حالی که تحلیل داده‌ها، پیش‌بینی و وضعیت شبکه، بهینه‌سازی مسیرها و تصمیم‌گیری هوشمند توسط سایر فناوری‌های دیجیتال انجام می‌شود. بنابراین، می‌توان بلاکچین را به‌عنوان یکی از اجزای زیرساخت تحول دیجیتال حمل‌ونقل، نه جایگزین سایر فناوری‌ها، در نظر گرفت. از سوی دیگر، مرور تجربیات بین‌المللی نشان می‌دهد که موفقیت پروژه‌های مبتنی بر بلاکچین بیش از آنکه به ویژگی‌های فنی این فناوری وابسته باشد، به عوامل سازمانی، اقتصادی و حقوقی بستگی دارد. تجربه پروژه‌هایی مانند TradeLens نشان داد که حتی در صورت بلوغ فنی سامانه، نبود مشارکت گسترده ذی‌نفعان، فقدان استانداردهای مشترک و نبود مدل اقتصادی پایدار می‌تواند مانع توسعه و تداوم پروژه شود. در مقابل، ابتکاراتی مانند MOBI نشان می‌دهند که ایجاد کنسرسیوم‌های تخصصی و تدوین استانداردهای مشترک می‌تواند زمینه توسعه کاربردهای بلاکچین در حوزه‌هایی مانند هویت دیجیتال خودروها، خودروهای متصل و قراردادهای هوشمند را فراهم سازد. این نتایج بیانگر آن است که توسعه

اکوسیستم‌های همکاری میان دولت، صنعت، دانشگاه و شرکت‌های فناوری، پیش‌شرط موفقیت پروژه‌های بلاکچینی در حمل‌ونقل است.

همچنین بررسی روند مطالعات سال‌های اخیر نشان می‌دهد که دامنه کاربرد بلاکچین در حمل‌ونقل به‌تدریج در حال گسترش است. در حالی که پژوهش‌های اولیه عمدتاً بر پرداخت‌های الکترونیکی و رهگیری کالا متمرکز بودند، مطالعات جدید به موضوعاتی مانند مدیریت هویت دیجیتال وسایل نقلیه، نگهداری سوابق تعمیر و سرویس خودروها، قراردادهای هوشمند بیمه، مدیریت زنجیره سرد کالاهای حساس، پایش انتشار کربن، حمل‌ونقل چندوجهی و یکپارچه‌سازی خدمات حمل‌ونقل اشتراکی پرداخته‌اند. این روند نشان می‌دهد که بلاکچین به‌تدریج از یک فناوری مالی به زیرساختی برای مدیریت اعتماد و تبادل داده در سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند تبدیل شده است. با وجود این، هنوز شکاف‌های پژوهشی قابل توجهی وجود دارد. بخش زیادی از مطالعات منتشرشده مبتنی بر چارچوب‌های مفهومی، شبیه‌سازی یا پروژه‌های پایلوت هستند و شواهد تجربی درباره عملکرد سامانه‌های بلاکچینی در مقیاس ملی یا بین‌المللی محدود است. همچنین موضوعاتی مانند مقیاس‌پذیری شبکه، تعامل‌پذیری میان پلتفرم‌های مختلف، حفظ حریم خصوصی، مصرف انرژی، ارزیابی اقتصادی پروژه‌ها و تدوین چارچوب‌های حقوقی، همچنان از مهم‌ترین چالش‌های پژوهشی و اجرایی این فناوری محسوب می‌شوند. از این‌رو، انجام مطالعات تجربی، تحلیل هزینه-فایده، ارزیابی عملکرد پروژه‌های واقعی و توسعه استانداردهای بین‌المللی می‌تواند از مهم‌ترین محورهای تحقیقات آینده باشد.

در نهایت، برای کشورهایی مانند ایران، با توجه به توسعه کریدورهای ترانزیتی، شبکه ریلی، بنادر و سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند، استفاده از بلاکچین می‌تواند به افزایش شفافیت زنجیره تأمین، کاهش زمان تبادل اسناد، بهبود مدیریت ناوگان، ارتقای رهگیری محموله‌ها و افزایش اعتماد میان سازمان‌های مختلف کمک کند. با این حال، تحقق این ظرفیت‌ها مستلزم تدوین راهبرد ملی، توسعه زیرساخت‌های دیجیتال، اصلاح مقررات حقوقی، تربیت نیروی انسانی متخصص و اجرای پروژه‌های آزمایشی پیش از پیاده‌سازی گسترده خواهد بود.

۵- نتیجه گیری

فناوری بلاک چین طی سال‌های اخیر به عنوان یکی از فناوری‌های اثرگذار در فرایند تحول دیجیتال صنعت حمل و نقل مطرح شده است. ویژگی‌هایی مانند تمرکززدایی، شفافیت، تغییرناپذیری داده‌ها، قابلیت رهگیری، امنیت اطلاعات و امکان اجرای قراردادهای هوشمند، این فناوری را به بستری مناسب برای ایجاد اعتماد میان بازیگران متعدد و مستقل در اکوسیستم حمل و نقل تبدیل کرده است. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که ارزش اصلی بلاک چین نه صرفاً در ذخیره سازی اطلاعات، بلکه در ایجاد یک سابقه مشترک، قابل اعتماد و قابل تأیید از تراکنش‌ها، رویدادها و اسناد حمل و نقل نهفته است. مرور مطالعات و تجربیات بین‌المللی نشان داد که دامنه کاربرد بلاک چین در حمل و نقل بسیار گسترده است و حوزه‌هایی مانند مدیریت زنجیره تأمین، لجستیک و حمل و نقل دریایی، مدیریت بنادر و گمرک، حمل و نقل هوشمند، خودروهای متصل و خودران، هویت دیجیتال وسایل نقلیه، ثبت سوابق تعمیر و نگهداری، پرداخت‌های الکترونیکی، بیمه هوشمند، زنجیره سرد، مدیریت انتشار کربن و حمل و نقل چندوجهی را در بر می‌گیرد. در بسیاری از این کاربردها، بلاک چین می‌تواند از طریق کاهش وابستگی به واسطه‌ها، جلوگیری از دست‌کاری اطلاعات، تسریع تبادل اسناد و بهبود هماهنگی میان سازمان‌ها، کارایی و شفافیت فرایندهای حمل و نقل را افزایش دهد. با این حال، نتایج پژوهش نشان داد که استفاده موفق از بلاک چین صرفاً به ویژگی‌های فنی آن وابسته نیست. تجربیاتی مانند CargoX، GSBN، TradeLens، MOBI و سایر ابتکارات بین‌المللی بیانگر آن است که عواملی مانند ساختار حکمرانی شبکه، مشارکت ذی‌نفعان، استانداردسازی داده‌ها، تعامل پذیری میان سامانه‌ها، حمایت قانونی، اعتماد به متولی پلتفرم و وجود مدل اقتصادی پایدار، نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت یا شکست پروژه‌ها دارند. به‌ویژه تجربه توقف TradeLens نشان داد که حتی یک پلتفرم برخوردار از زیرساخت فنی مناسب نیز بدون مشارکت کافی اعضای صنعت، توزیع متوازن منافع و پذیرش یک ساختار حکمرانی مورد اعتماد، نمی‌تواند به پایداری بلندمدت دست یابد. بررسی مطالعات همچنین نشان داد که بلاک چین به تنهایی راه‌حل تمامی مسائل صنعت حمل و نقل نیست. این فناوری زمانی بیشترین ارزش را ایجاد می‌کند که در کنار اینترنت اشیاء، هوش

مصنوعی، کلان‌داده، رایانش ابری، رایانش لبه‌ای و شبکه‌های ارتباطی پیشرفته به کار گرفته شود. در چنین معماری‌هایی، حسگرها داده‌ها را تولید می‌کنند، فناوری‌های تحلیلی و هوش مصنوعی وظیفه پیش‌بینی و تصمیم‌گیری را بر عهده دارند و بلاک چین به عنوان لایه اعتماد، اصالت و یکپارچگی داده‌ها را تضمین می‌کند. بنابراین، جایگاه بلاک چین در آینده حمل و نقل باید به عنوان بخشی از یک اکوسیستم فناوری یکپارچه و نه یک راه‌حل مستقل در نظر گرفته شود. در کنار ظرفیت‌های مذکور، چالش‌هایی مانند مقیاس پذیری، سرعت پردازش، هزینه پیاده‌سازی و نگهداری، مصرف انرژی، حریم خصوصی، امنیت قراردادهای هوشمند، کیفیت داده‌های ورودی، نبود استانداردهای مشترک و ابهامات حقوقی همچنان از موانع اصلی توسعه این فناوری محسوب می‌شوند. تغییرناپذیری اطلاعات تنها زمانی ارزشمند است که داده‌های اولیه صحیح و معتبر باشند؛ از این رو، استفاده از بلاک چین نمی‌تواند به تنهایی مسئله ورود داده‌های نادرست، جعلی یا ناقص را برطرف کند. افزون بر این، در بسیاری از کاربردها، پایگاه‌های داده متمرکز ممکن است از نظر هزینه، سرعت و سهولت مدیریت گزینه مناسب‌تری باشند. بنابراین، انتخاب بلاک چین باید بر مبنای تحلیل دقیق مسئله، تعداد ذی‌نفعان، سطح اعتماد میان آن‌ها، نیاز به سابقه مشترک و مقایسه با راهکارهای جایگزین انجام شود. پژوهش حاضر نیز با محدودیت‌هایی روبه‌رو بوده است. نخست آنکه مطالعه حاضر ماهیت مروری دارد و نتایج آن عمدتاً بر پایه مقالات علمی، گزارش‌های سازمانی و مستندات منتشر شده از سوی شرکت‌ها و کنسرسیوم‌های فعال در این حوزه استوار است. از این رو، امکان ارزیابی مستقیم عملکرد فنی و اقتصادی همه پروژه‌های بررسی شده وجود نداشته است. دوم، بخشی از اطلاعات مربوط به پروژه‌های اجرایی، از جمله آمار کاهش زمان، تعداد کاربران، حجم اسناد و میزان صرفه‌جویی، توسط سازمان‌ها یا شرکت‌های مجری منتشر شده و ممکن است ارزیابی مستقلی از سوی پژوهشگران یا نهادهای بی‌طرف درباره آن‌ها وجود نداشته باشد. سوم، تنوع زیاد کاربردها، معماری‌ها، الگوریتم‌های اجماع و محیط‌های اجرایی، مقایسه مستقیم نتایج مطالعات را دشوار کرده است. شاخص‌های ارزیابی در پژوهش‌های مختلف یکسان نبوده و برخی مطالعات بر امنیت، برخی بر سرعت،

برخی بر کاهش هزینه و برخی دیگر بر پذیرش سازمانی تمرکز داشته‌اند. چهارم، بخش قابل توجهی از پژوهش‌های موجود در سطح مدل مفهومی، شبیه سازی، نمونه آزمایشگاهی یا پروژه پایلوت باقی مانده‌اند و شواهد مربوط به پیاده سازی در مقیاس ملی یا بین‌المللی هنوز محدود است. پنجم، با توجه به سرعت زیاد تحول فناوری، برخی پلتفرم‌ها، استانداردها و پروژه‌های بلاکچینی ممکن است در مدت کوتاهی تغییر کرده، توسعه یابند یا متوقف شوند؛ بنابراین، نتایج این مرور باید متناسب با تحولات آینده به‌روزرسانی شود.

بر این اساس، تحقیقات آینده باید از تمرکز صرف بر معرفی کاربردها فاصله گرفته و به سمت ارزیابی تجربی، اقتصادی و سازمانی پروژه‌های واقعی حرکت کنند. انجام مطالعات هزینه-فایده، مقایسه بلاکچین با پایگاه‌های داده متمرکز، ارزیابی عملکرد شبکه در شرایط واقعی و سنجش تأثیر آن بر زمان، هزینه، امنیت، کیفیت خدمات و رضایت ذی‌نفعان از مهم‌ترین موضوعات پژوهشی آینده است. همچنین، توسعه شاخص‌ها و چارچوب‌های ارزیابی استاندارد می‌تواند امکان مقایسه نتایج پروژه‌ها و فناوری‌های مختلف را فراهم سازد.

یکی دیگر از محورهای مهم تحقیقات آینده، بررسی تعامل‌پذیری میان بلاکچین‌های مختلف و سامانه‌های موجود در حمل‌ونقل است. بسیاری از سازمان‌ها از سامانه‌های قدیمی، پایگاه‌های داده متمرکز و استانداردهای متفاوت استفاده می‌کنند؛ بنابراین، موفقیت بلاکچین به توانایی آن در ارتباط با سامانه‌های گمرکی، بندری، بانکی، بیمه‌ای، مدیریت ناوگان و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل بستگی دارد. طراحی معماری‌های ترکیبی درون‌زنجیره‌ای و برون‌زنجیره‌ای، استفاده از رایانش لبه‌ای و توسعه استانداردهای مشترک تبادل داده از موضوعات دارای اولویت در این زمینه هستند.

حفظ حریم خصوصی و امنیت نیز باید به‌صورت جدی‌تر مورد مطالعه قرار گیرد. پژوهش‌های آینده می‌توانند به بررسی روش‌هایی مانند اثبات با دانش صفر، هویت غیرمتمرکز، رمزنگاری پیشرفته، کنترل دسترسی پویا و قراردادهای هوشمند قابل ممیزی بپردازند. علاوه بر این، لازم است مسئولیت حقوقی بازیگران شبکه در صورت ورود داده نادرست، نقص قرارداد

هوشمند، حمله سایبری یا بروز خسارت مشخص شود. تدوین چارچوب‌های حقوقی برای اعتبار اسناد الکترونیکی، مالکیت داده، اشتراک‌گذاری اطلاعات و حل اختلافات، یکی از پیش‌شرط‌های اصلی توسعه عملیاتی این فناوری خواهد بود.

در حوزه حمل‌ونقل پایدار، تحقیقات آینده می‌توانند ظرفیت بلاکچین را برای ثبت و تأیید انتشار آلاینده‌ها، مدیریت اعتبارهای کربن، رهگیری مصرف انرژی و حمایت از وسایل نقلیه برقی بررسی کنند. باین‌حال، ضروری است اثرات زیست‌محیطی خود شبکه‌های بلاکچینی نیز در این ارزیابی‌ها لحاظ شود. استفاده از الگوریتم‌های اجماع کم‌مصرف و شبکه‌های مجوزدار می‌تواند یکی از مسیرهای کاهش مصرف انرژی و افزایش کارایی باشد.

برای ایران، مسیرهای پژوهشی آینده می‌تواند بر طراحی و ارزیابی پروژه‌های پایلوت در حوزه‌هایی مانند بارنامه الکترونیکی، رهگیری محموله‌های بندری، تبادل اسناد گمرکی، ثبت سوابق تعمیر ناوگان، مدیریت حمل‌ونقل ریلی و کنترل زنجیره سرد متمرکز شود. این پروژه‌ها باید با مشارکت سازمان‌های دولتی، شرکت‌های حمل‌ونقل، اپراتورهای لجستیک، دانشگاه‌ها و شرکت‌های فناوری اجرا شوند و نتایج آن‌ها از نظر فنی، اقتصادی، حقوقی و سازمانی مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین، بررسی میزان آمادگی سازمان‌ها، پذیرش کاربران، زیرساخت‌های ارتباطی و الزامات قانونی می‌تواند به تدوین نقشه راه ملی برای توسعه بلاکچین در صنعت حمل‌ونقل کمک کند.

در مجموع، بلاکچین را می‌توان یکی از اجزای مهم، اما نه یگانه، در تحول دیجیتال حمل‌ونقل دانست. آینده این فناوری به میزان بلوغ فنی، شکل‌گیری استانداردهای مشترک، اعتماد ذی‌نفعان، حمایت قانونی، توجیه اقتصادی و همگرایی آن با سایر فناوری‌های هوشمند وابسته است. در صورت فراهم شدن این شرایط، بلاکچین می‌تواند در افزایش بهره‌وری، ایمنی، شفافیت، قابلیت رهگیری و پایداری شبکه‌های حمل‌ونقل نقش مؤثری ایفا کند؛ در غیر این صورت، خطر باقی ماندن پروژه‌ها در سطح نمونه‌های آزمایشی یا توقف آن‌ها پس از دوره‌ای کوتاه وجود خواهد داشت.

۶- پی‌نوشت‌ها

1. Mobility Open Blockchain Initiative
2. Global Shipping Business Network

۷- مراجع

- Kumar, N., Kumar, K., & Aeron, A. (2022). Blockchain technology in supply chain management: Innovations, applications, and challenges. In *Blockchain Technologies for Sustainable Supply Chains*. Springer.
- Lin, H.-J., Lin, H.-P., & Hsieh, I.-Y. L. (2026). Digitalization and decarbonization in last-mile logistics: a life cycle assessment of proof of delivery systems. *Transportation Letters*, 1–15.
- McKinsey & Company. (2022). Blockchain beyond the hype: What is the strategic business value?
- Min, H. (2019). Blockchain technology for enhancing supply chain resilience. *Business Horizons*, 62(1), 35–45.
- MOBI. (2023). *Vehicle/Parts Maintenance and Repair Sub-Wallet: Use Case and Business Requirements* (MOBI VID0005/UC/2023, Verion 1.2). *Mobility Open Blockchain Initiative*.
- Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System.
- Sabeti, 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.
- Sharma, P., Malik, M., Prabha, C., Aljubayri, I., Singh, R., & Khan, M. Z. (2026). Optimized Vehicle Insurance Claim and Settlement Procedures Using IOT Sensors on a Blockchain-Based Platform. *Journal of Computer Science*, 22(3), 1014–1033.
- Shin, H. Y., Essaid, M., Park, S., & Ju, H. (2022). A survey on public blockchain-based networks: Structural differences and address clustering methods. *IEEE Access*.
- Swan, M. (2015). Blockchain: Blueprint for a New Economy. *O'Reilly Media*.
- Tapscott, D., & Tapscott, A. (2016). Blockchain Revolution: How the Technology Behind Bitcoin and Other Cryptocurrencies Is Changing the World. *Penguin Random House*.
- Valchanov, H., & Aleksieva, V. (2022). Blockchain and IoT integration for smart transportation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2339(1), 12012.
- Wang, J., Liu, J., Wang, F., & Yue, X. (2021). Blockchain technology for port logistics capability: Exclusive or sharing. *Transportation Research Part B: Methodological*, 149, 347–392.
- World Economic Forum. (2020). Redesigning Trust: Blockchain Deployment Toolkit.
- World Economic Forum. (2021). Redesigning Trust: Blockchain for Supply Chains. Geneva: *World Economic Forum*.
- Wu, J., & Tran, N. K. (2023). Application of blockchain technology in sustainable energy systems: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Yaga, D., Mell, P., Roby, N., & Scarfone, K. (2019). Blockchain Technology Overview (NISTIR 8202). *National Institute of Standards and Technology*.
- Adam, D., Matellini, D. B., & Kaparakis, A. (2023). Benefits for the bunker industry in adopting blockchain technology for dispute resolution. *Blockchain: Research and Applications*, 4(2), Article 100128.
- Aslam, J., Saleem, A., Khan, N. T., & Kim, Y. B. (2021). Factors influencing blockchain adoption in supply chain management practices: A study based on the oil industry. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 7(4), 1–20.
- Burgess, P., Sunmola, F., & Wertheim-Heck, S. (2022). Blockchain-enabled quality management in short food supply chains. *Sustainability*, 14(9), 1–20.
- CargoX. (2022). Egyptian government extends customs project with CargoX. *CargoX Ltd*.
- Casino, F., Dasaklis, T. K., & Patsakis, C. (2019). A systematic literature review of blockchain-based applications: Current status, classification and open issues. *Telematics and Informatics*, 36, 55–81.
- Deloitte. (2022). Global Blockchain Survey 2022.
- Duman, E., & Aydoğan, E. (2025). Enhancing Traceability and Reliability in Cold Chain Logistics through Hyperledger Fabric and IoT. *Applied Sciences*, 15(22), 12149.
- Global Shipping Business Network. (2025). Cargo Release: Reducing cargo discharge time from days to hours. *GSBN*.
- Hackius, N., & Petersen, M. (2017). Blockchain in logistics and supply chain: Trick or treat? In *Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL)*, Vol. 23, 3–18.
- Irannezhad, E. (2020). Is blockchain a solution for logistics and freight transportation problems? *Transportation Research Procedia*, 48, 290–306.
- Jabbar, R., Dhib, E., Ben Said, A., Krichen, M., Fetais, N., Zaidan, E., & Barkaoui, K. (2022). Blockchain technology for intelligent transportation systems: A systematic literature review. *IEEE Access*, 10, 20995–21031.
- Jiang, You-Ting, Sun, Hung-Min, A Blockchain-Based Vehicle Condition Recording System for Second-Hand Vehicle Market, *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021, 6623251, 10 pages, 2021.
- Jovanovic, M., Kostić, N., Sebastian, I. M., & Sedej, T. (2022). Managing a blockchain-based platform ecosystem for industry-wide adoption: The case of TradeLens. *Technological Forecasting and Social Change*, 184, 121981.
- Kaur, A., Singh, G., Kukreja, V., Sharma, S., Singh, S., & Yoon, B. (2022). Adaptation of IoT with Blockchain in Food Supply Chain Management: An Analysis-Based Review in Development, Benefits and Potential Applications. *Sensors*, 22(21), 8174.
- Kshetri, N. (2018). Blockchain's roles in meeting key supply chain management objectives. *International Journal of Information Management*, 39, 80–89.

Blockchain Technology in Transportation Engineering (A Review of Applications, Challenges, and Future Perspectives)

Vahid Khalifeh, Assistant Professor, C Civil Engineering Department Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.

*Navid Nadimi, Associate Professor, Civil Engineering Department,
Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.*

*Maryam Ghadimipour Mahani, M.Sc., Grad., Civil Engineering Department,
Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.*

E-mail: navidnadimi@uk.ac.ir

Received: March 2026- Accepted: August 2026

ABSTRACT

Over the course of several decades, digital evolution has led to the creation of tools that significantly improved the functionality, security, and availability of various systems. Blockchain has amassed considerable attention as a decentralized ledger technology that enables secure documentation, preservation, and transmission of information without the need for a reliable intermediary. By means of decentralization, immutability, transparency, and smart contracts, blockchain has opened up new possibilities for diverse applications, covering various fields including transportation engineering. In recent years, the rapid growth in passenger and freight transportation, the expansion of Intelligent Transportation Systems (ITS), the widespread adoption of the Internet of Things (IoT), and the emergence of connected and autonomous vehicles have highlighted the need for reliable infrastructures capable of managing data and facilitating secure information exchange. This paper is aimed at providing a comprehensive analysis of the fundamental principles of blockchain technology and exploring its principal applications in transportation engineering. Furthermore, the research explores the technical, economic, and legal hurdles surrounding blockchain deployment and assesses global examples in this area. Lastly, it examines future trajectories, delving into blockchain technology's potential to support the development of intelligent and environmentally friendly transportation systems. The findings of the reviewed studies indicate that, with the development of appropriate technical infrastructure, the establishment of supportive regulatory frameworks, and enhanced collaboration among governments, industry, and academia, blockchain has the potential to become one of the key enabling technologies driving the digital transformation of the transportation sector.

Keywords: Blockchain Technology, Intelligent Transportation Systems (ITS), Internet of Things (IoT), Supply Chain, Transportation Engineering