

ارزیابی بلوغ صنعت حمل و نقل ریلی مبتنی بر نسل چهارم صنعت: یک مدل بومی

مقاله علمی - پژوهشی

سمانه مرادی، دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
*مهرداد حسینی شکیب (نویسنده مسئول)، دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران
علی بدیع زاده، استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Mehrdad.shakib@kiaiu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵ - پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۲

صفحه ۲۴۶-۲۳۱

چکیده

این پژوهش با هدف ارائه یک مدل بومی برای ارزیابی بلوغ صنعت حمل و نقل ریلی مبتنی بر نسل چهارم صنعت انجام شده است. با توجه به تحولات سریع فناوری‌های دیجیتال و نقش کلیدی آنها در بهبود کارایی، ایمنی و پایداری سیستم‌های ریلی، طراحی چارچوبی منسجم برای سنجش میزان پیشرفت این صنعت در مسیر تحول دیجیتال ضروری به نظر می‌رسد. در این راستا، با استفاده از روش تحلیل مضمون و مصاحبه عمیق با ۱۵ نفر از خبرگان صنعت ریلی و فناوری‌های صنعت ۴،۰، ابعاد و شاخص‌های بلوغ این صنعت شناسایی و تبیین گردید. این خبرگان از میان مدیران ارشد شرکت‌های ریلی، متخصصان فناوری اطلاعات، اعضای هیأت علمی دانشگاه‌ها و مشاوران صنعتی با حداقل ۱۵ سال سابقه فعالیت در حوزه‌های مرتبط انتخاب شدند. تحلیل مضمون مصاحبه‌ها طی فرآیندی شش مرحله‌ای منجر به استخراج ۱۳۸ کد اولیه، ۳۱ مضمون سازمان‌دهنده (شاخص) و ۶ مضمون فراگیر (بعد) شد. ابعاد شناسایی شده عبارتند از: فناوری‌های پیشرفته صنعت ۴،۰ در حمل و نقل ریلی، امنیت سایبری و مدیریت ریسک دیجیتال، پایداری و سازگاری با محیط زیست، زیرساخت‌های بومی و آمادگی فنی، مدیریت دانش و توسعه سرمایه انسانی، و اقتصاد دیجیتال و مدل‌های کسب‌وکار نوین. این مدل می‌تواند به عنوان چارچوبی جامع برای ارزیابی وضعیت موجود، شناسایی شکاف‌ها و برنامه‌ریزی استراتژیک برای توسعه صنعت حمل و نقل ریلی در عصر دیجیتال مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی بلوغ، تحلیل مضمون، حمل و نقل ریلی، صنعت ۴،۰، فناوری‌های دیجیتال

۱- مقدمه

جمله حوزه‌هایی است که به شدت تحت تأثیر این تحولات قرار گرفته و در مسیر دیجیتالی شدن گام برمی‌دارد. نظام حمل و نقل ریلی هوشمند با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، می‌تواند منجر به افزایش ایمنی، کارایی، پایداری و کیفیت خدمات شود (Laiton-Bonadiez et al., 2022). دیجیتالی سازی صنعت ریلی به عنوان یک روند جهانی مطرح شده و کشورهای

امروزه صنعت ۴،۰ به عنوان انقلاب چهارم صنعتی، تحولات گسترده‌ای در فرآیندهای تولیدی و خدماتی ایجاد کرده است. این تحولات بر پایه یکپارچه‌سازی فناوری‌های پیشرفته مانند اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، کلان‌داده، رایانش ابری، همزاد دیجیتال و بلاک‌چین استوار است (Galizia, Bortolini and Calabrese, 2023). صنعت حمل و نقل ریلی نیز از

نقل ریلی انجام شده است. برای مثال، Singh et al. (2022) کاربردهای اینترنت اشیا در حمل و نقل ریلی پایدار را با نگاهی به گذشته، حال و آینده بررسی کرده‌اند. Gao, Zhang and Peng (2022) به کاربرد آزمون‌های غیرمخرب ۴,۰ در صنعت ریلی پرداخته‌اند. Jabłoński (2022) روندها و فناوری‌های نوین برای افزایش ایمنی حمل و نقل ریلی را تبیین کرده است. Holubčík, Koman and Soviar (2021) کاربرد های صنعت ۴,۰ در عملیات لجستیک را بررسی نموده‌اند. با این وجود، پژوهش‌های اندکی به طور خاص بر طراحی مدل‌های ارزیابی بلوغ در این حوزه متمرکز شده‌اند. پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ طراحی شده و در پی پاسخ به این سؤال اصلی است که «ابعاد و شاخص‌های کلیدی برای ارزیابی بلوغ صنعت حمل و نقل ریلی مبتنی بر فناوری‌های صنعت ۴,۰ کدامند؟». در این راستا، با استفاده از رویکرد تحلیل مضمون و مصاحبه با خبرگان، مدلی جامع برای ارزیابی بلوغ صنعت حمل و نقل ریلی در پارادایم صنعت ۴,۰ ارائه شده است.

۲- پیشینه تحقیق

صنعت ۴,۰ و تحول دیجیتال

صنعت ۴,۰ یا انقلاب صنعتی چهارم به تحول دیجیتال در حوزه‌های صنعتی و خدماتی اشاره دارد که بر پایه مجموعه‌ای از فناوری‌های نوین شکل گرفته است (Zamany and Khamseh, 2022). این مفهوم ابتدا در سال ۲۰۱۱ در آلمان مطرح شد و به سرعت در سراسر جهان گسترش یافت (Dev, Shankar and Qaiser, 2020). صنعت ۴,۰ بر یکپارچه‌سازی سیستم‌های فیزیکی و دیجیتال، خودکارسازی هوشمند، تصمیم‌گیری مبتنی بر داده و ارتباطات بی‌درنگ استوار است. به گفته Sun, et al. (2022)، فناوری‌های کلیدی صنعت ۴,۰ شامل اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، کلان‌داده، رایانش ابری، همزاد دیجیتال، واقعیت افزوده، بلاک‌چین و تولید افزودنی (چاپ سه‌بعدی) است. تحول دیجیتال در حوزه حمل و نقل ریلی منجر به شکل‌گیری مفهوم «ریلی ۴,۰» شده که به کارگیری فناوری‌های پیشرفته برای بهبود ایمنی، کارایی، پایداری و تجربه مسافران را شامل می‌شود. Montero (2020) معتقد است دیجیتال سازی در صنعت ریلی صرفاً یک گزینه نیست، بلکه یک ضرورت راهبردی برای بقا و رقابت‌پذیری در عصر جدید است.

پیشرو تلاش گسترده‌ای برای بهره‌گیری از مزایای آن آغاز کرده‌اند. بر اساس مطالعات Zunder et al. (2023)، اتحادیه اروپا برنامه‌های جامعی برای گذار به «ریلی ۴,۰» تدوین کرده و اقدامات متعددی در سطح سیاست‌گذاری، استاندارد سازی و توسعه فناوری انجام داده است. همچنین، کشورهایی مانند آلمان، ژاپن، چین و کره جنوبی سرمایه‌گذاری‌های کلانی در زمینه توسعه زیرساخت‌های هوشمند ریلی انجام داده‌اند (Dalewska and Mrugalska, 2025).

مزایای دیجیتالی سازی صنعت ریلی متعدد و چشمگیر است. Carranza, Amorrortu and de la Rua (2023) داده‌اند که پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴,۰ در بخش ریلی می‌تواند منجر به کاهش ۳۰ تا ۴۰ درصدی هزینه‌های نگهداری و تعمیرات، افزایش ۱۵ تا ۲۰ درصدی بهره‌وری عملیاتی، کاهش ۱۰ تا ۱۵ درصدی مصرف انرژی، و ارتقای قابل توجه ایمنی و رضایت مسافران شود. Möller et al. (2022) نیز در مطالعه خود به کاربرد فناوری‌های نوظهور در عصر تحول دیجیتال در بخش ریلی پرداخته و نشان داده‌اند که این فناوری‌ها می‌توانند تحولی اساسی در مدل‌های کسب‌وکار، زنجیره‌های تأمین و خدمات مسافری ایجاد کنند.

با این حال، گذار به سمت «ریلی ۴,۰» با چالش‌ها و موانع متعددی نیز همراه است. Awodele et al. (2024) در مطالعه خود در زمینه آگاهی، آمادگی پذیرش و چالش‌های فناوری‌های ریلی ۴,۰ در اقتصادهای در حال توسعه، به مواردی همچون محدودیت‌های زیرساختی، کمبود نیروی انسانی ماهر، موانع مالی و نظارتی، چالش‌های مدیریت تغییر و مقاومت‌های سازمانی اشاره کرده‌اند. Wu and Zhang (2022) نیز به چالش‌های فنی و عملیاتی پیاده‌سازی فناوری‌های نوین در مدیریت مهندسی حمل و نقل ریلی پرداخته‌اند.

به رغم اهمیت روزافزون این موضوع، همچنان فقدان چارچوبی جامع برای ارزیابی میزان بلوغ صنعت حمل و نقل ریلی در پذیرش و پیاده‌سازی فناوری‌های نسل چهارم صنعت احساس می‌شود. مدل‌های بلوغ به عنوان ابزارهایی برای ارزیابی وضعیت موجود، شناسایی خلأها و برنامه‌ریزی مسیر توسعه آینده، در دهه‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران و صنعتگران قرار گرفته‌اند (Brezavšček and Baggia, 2025). این مدل‌ها اغلب با هدف توصیف مراحل تکاملی، تعیین وضعیت فعلی و ارائه چارچوبی برای پیشرفت سازمان‌ها یا صنایع تدوین می‌شوند. مرور ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که مطالعات متعددی در زمینه کاربرد فناوری‌های صنعت ۴,۰ در حمل و

فناوری‌های صنعت ۴,۰ پرداخته و چارچوبی برای ارزیابی سطح بلوغ سازمان‌ها در پذیرش این فناوری‌ها ارائه کرده‌اند. Galizia, Bortolini and Calabrese (2023) مروری بر بهترین شیوه‌ها و موردکاوی‌های صنعتی در زمینه فناوری‌های صنعت ۴,۰ انجام داده و مدلی برای سنجش بلوغ سازمانی در این حوزه پیشنهاد کرده‌اند. با این حال، به طور خاص در حوزه حمل و نقل ریلی، مدل‌های بلوغ محدودی توسعه یافته است. بهلولی و همکاران (۱۴۰۱) الگویی برای سنجش بلوغ مدیریت دانایی مشتری در صنعت حمل و نقل ریلی ارائه کرده‌اند. Carranza, Amorrortu and de la Rua (2023) چالش‌های صنعت ریلی آینده را با تمرکز بر فناوری و دیجیتالی سازی تحلیل کرده‌اند. Franz (2023) به بررسی صنعت ۴,۰ در بستر شرکت‌های ریلی مسافری پرداخته است. با این وجود، هنوز مدل جامعی که ابعاد مختلف بلوغ صنعت ریلی در پارادایم صنعت ۴,۰ را پوشش دهد، ارائه نشده است.

۳- روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش با رویکرد کیفی و با استفاده از روش تحلیل مضمون انجام شده است. تحلیل مضمون روشی برای شناسایی، تحلیل و گزارش الگوهای (مضامین) موجود در داده‌هاست که داده‌های پراکنده و متنوع را به داده‌هایی غنی و تفصیلی تبدیل می‌کند (Braun, Clarke and Terry, 2021). در این پژوهش، از تحلیل مضمون برای شناسایی و استخراج ابعاد و شاخص‌های مدل ارزیابی بلوغ صنعت حمل و نقل ریلی مبتنی بر صنعت ۴,۰ استفاده شده است. جامعه این پژوهش را خبرگان صنعت حمل و نقل ریلی و متخصصان فناوری‌های صنعت ۴,۰ تشکیل می‌دهند. برای انتخاب نمونه، از روش گلوله برفی استفاده شد. با توجه به ماهیت بین‌رشته‌ای موضوع، خبرگان اولیه از سه حوزه کلیدی انتخاب شدند: متخصصان صنعت ریلی، متخصصان فناوری‌های صنعت ۴,۰، و متخصصان مدیریت فناوری. معیارهای انتخاب خبرگان عبارت بودند از: داشتن حداقل ۱۵ سال سابقه کار در حوزه مرتبط، دارا بودن مدرک تحصیلی کارشناسی ارشد یا بالاتر، آشنایی با مفاهیم صنعت ۴,۰، و تجربه مشارکت در پروژه‌های مرتبط با دیجیتالی‌سازی در صنعت حمل و نقل. انتخاب معیار حداقل ۱۵ سال سابقه کار براساس چندین ملاحظه علمی و عملیاتی صورت گرفت، از جمله ماهیت بین‌رشته‌ای و نوظهور بودن ترکیب صنعت ۴,۰ با حمل و نقل ریلی، تحولات صنعت ریلی ایران طی دو دهه اخیر و گذار تدریجی از سیستم‌های سنتی

کاربردهای فناوری‌های صنعت ۴,۰ در حمل و نقل ریلی پژوهش‌های متعددی به بررسی کاربردهای فناوری‌های صنعت ۴,۰ در حوزه حمل و نقل ریلی پرداخته‌اند. Laiton- Bonadiez et al. (2022) در یک مرور نظام‌مند، فناوری‌های صنعت ۴,۰ در حوزه حمل و نقل ریلی را در پنج دسته کلی طبقه‌بندی کرده‌اند: سیستم‌های نظارت و پایش، سیستم‌های کنترل و اتوماسیون، سیستم‌های تصمیم‌گیری هوشمند، فناوری‌های ارتباطی و زیرساخت‌ها، و خدمات هوشمند مسافری. اینترنت اشیا یکی از پرکاربردترین فناوری‌ها در حوزه ریلی است. Singh et al. (2022) نشان داده‌اند که کاربردهای اینترنت اشیا در صنعت ریلی شامل پایش وضعیت زیرساخت‌ها و ناوگان، تشخیص خطا، نگهداری پیش‌بینانه، مدیریت ترافیک، مدیریت مصرف انرژی و خدمات مسافری هوشمند است. Chellaswamy et al. (2020) سیستمی مبتنی بر اینترنت اشیا برای پایش وضعیت ریل و پی‌شگیری از خروج قطار از ریل ارائه کرده‌اند. هوش مصنوعی و یادگیری ماشین نیز کاربردهای مهمی در صنعت ریلی دارند. Ale et al. (2024) چارچوبی یکپارچه مبتنی بر هوش مصنوعی برای تولید ناب و هوشمند در صنعت ریلی ارائه کرده‌اند. Zikria et al. (2020) کاربردهای یادگیری عمیق در اینترنت اشیا هوشمند را بررسی کرده و به مزایا و چالش‌های آن در حوزه حمل و نقل پرداخته‌اند. همزاد دیجیتال به عنوان یکی دیگر از فناوری‌های کلیدی صنعت ۴,۰، در حوزه ریلی مورد توجه قرار گرفته است. Errandonea et al. (2021) رویکردی مبتنی بر اینترنت اشیا برای اکتساب هوشمند داده به منظور فعال‌سازی همزادهای دیجیتال در بخش ریلی ارائه کرده‌اند. Dietlmeier et al. (2022) به بررسی موردی پلتفرم Railigent به عنوان یک راهکار اینترنت اشیا برای حمل و نقل ریلی پرداخته‌اند.

مدل‌های بلوغ در حوزه صنعت ۴,۰

مدل‌های بلوغ ابزارهایی هستند که به سازمان‌ها کمک می‌کنند تا توانمندی‌های خود را در زمینه‌های مختلف ارزیابی کرده و مسیر پیشرفت را مشخص نمایند. Brezavšček and Baggia (2025) در یک مرور نظام‌مند، روندهای اخیر در ارزیابی بلوغ امنیت اطلاعات و سایبری را بررسی کرده و نشان داده‌اند که این مدل‌ها طیف وسیعی از جنبه‌های فنی، سازمانی و راهبردی را پوشش می‌دهند. در حوزه صنعت ۴,۰، مدل‌های بلوغ متعددی توسعه یافته است که هر یک بر جنبه‌های خاصی تمرکز دارند. Bortolini et al. (2022) به تحلیل بین‌بخشی

به بعد، داده‌های جدید و قابل توجهی به یافته‌های پژوهش اضافه نشد، اما برای اطمینان از حصول اشباع کامل، مصاحبه‌ها تا نفر پانزدهم ادامه یافت. مشخصات خبرگان مشارکت‌کننده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است.

به نیمه مکانیزه، یافته‌های مطالعات مشابه در حوزه ارزیابی بلوغ سازمانی و فناوری، و پیچیدگی‌های فنی، مدیریتی و راهبردی صنعت حمل و نقل ریلی. مصاحبه‌ها تا رسیدن به اشباع نظری ادامه یافت که در مجموع با ۱۵ نفر از متخصصان مصاحبه عمیق انجام شد. لازم به ذکر است که از مصاحبه سیزدهم

جدول ۱. مشخصات گروه خبرگان

کد خبره	سمت سازمانی	مدرک تحصیلی	رشته تحصیلی	سابقه کار (سال)	حوزه تخصصی	سابقه پروژه‌های مرتبط
E01	مدیرعامل شرکت راه‌آهن شهری	دکتری	مهندسی حمل و نقل ریلی	۲۲	مدیریت سیستم‌های حمل و نقل ریلی	مجری طرح هوشمندسازی قطارهای شهری
E02	معاون فناوری اطلاعات راه‌آهن ج.ا.ا.	کارشناسی ارشد	مهندسی کامپیوتر	۱۷	فناوری اطلاعات در حمل و نقل	مدیر پروژه سیستم یکپارچه فروش بلیت
E03	عضو هیئت علمی دانشگاه	دکتری	مهندسی صنایع	۱۵	صنعت ۴،۰ و هوش مصنوعی	مشاور پروژه‌های دیجیتال سازی صنایع
E04	رئیس مرکز تحقیقات راه‌آهن	دکتری	مهندسی برق - کنترل	۱۸	سیستم‌های کنترل هوشمند	طراح سیستم‌های سیگنالینگ پیشرفته
E05	مدیر ارشد شرکت دانش بنیان	دکتری	هوش مصنوعی	۱۶	یادگیری ماشین و IOT	توسعه‌دهنده سیستم‌های نگهداری پیشگویانه
E06	مدیر عملیات شرکت حمل و نقل ریلی	کارشناسی ارشد	مهندسی مکانیک	۱۹	نگهداری و تعمیرات ناوگان	مدیر پروژه سیستم‌های پایش وضعیت
E07	کارشناس ارشد امنیت سایبری	کارشناسی ارشد	امنیت اطلاعات	۱۵	امنیت سیستم‌های کنترل صنعتی	مشاور امنیت سایبری زیرساخت‌های حیاتی
E08	عضو هیئت علمی دانشگاه	دکتری	مهندسی راه‌آهن	۱۶	زیرساخت‌های ریلی هوشمند	مجری طرح خطوط ریلی هوشمند
E09	مدیر پروژه‌های دیجیتال	کارشناسی ارشد	مدیریت فناوری اطلاعات	۱۶	مدیریت پروژه‌های دیجیتال	مدیر پروژه‌های تحول دیجیتال
E10	مشاور انرژی و محیط زیست	دکتری	مهندسی انرژی	۱۷	انرژی‌های تجدیدپذیر	مشاور بهینه‌سازی مصرف انرژی در سیستم‌های ریلی
E11	مدیر بخش اتوماسیون صنعتی	کارشناسی ارشد	مهندسی برق - قدرت	۱۵	سیستم‌های اتوماسیون	طراح سیستم‌های کنترل خودکار
E12	کارشناس ارشد توسعه کسب‌وکار	دکتری	مدیریت کارآفرینی	۱۸	مدل‌های کسب‌وکار دیجیتال	مشاور مدل‌های کسب‌وکار نوآورانه
E13	عضو هیئت علمی دانشگاه	دکتری	علوم کامپیوتر	۱۷	کلان‌داده و تحلیل داده	مجری طرح‌های داده‌محور در حمل و نقل
E14	مدیر آموزش و توسعه منابع انسانی	کارشناسی ارشد	مدیریت منابع انسانی	۱۶	توسعه سرمایه انسانی	طراح برنامه‌های توسعه مهارت‌های دیجیتال
E15	مدیر فناوری‌های نوین	دکتری	مهندسی سیستم	۱۵	همزاد دیجیتال و واقعیت افزوده	توسعه‌دهنده سیستم‌های شبیه‌سازی دیجیتال

-تدوین گزارش: یافته‌های تحلیل مضمون در قالب یک گزارش جامع تدوین شد.

۴- یافته‌های پژوهش

یافته‌های پژوهش در قالب مراحل تحلیل مضمون در ادامه ارائه می‌شود.

مرحله اول: آشنایی با داده‌ها

در مرحله اول تحلیل مضمون، پژوهشگر با غوطه‌ور شدن در داده‌ها، به دنبال آشنایی عمیق با محتوای مصاحبه‌ها بود. برای این منظور، پس از پیاده‌سازی متن مصاحبه‌ها، هر مصاحبه چندین بار مطالعه شد تا الگوهای معنایی اولیه شناسایی شوند. در این مرحله، برخی یادداشت‌برداری‌های اولیه نیز انجام شد که شامل ثبت ایده‌های کلیدی، مفاهیم تکرار شونده و نکات برجسته بود. یکی از الگوهای معنایی که در بیشتر مصاحبه‌ها مشاهده شد، تأکید بر "ضرورت بومی‌سازی فناوری‌ها" و "تطبیق استانداردهای بین‌المللی با شرایط داخلی" بود.

برای نمونه، یکی از خبرگان (E02) در مصاحبه خود اظهار داشت: «پیاده‌سازی صرف فناوری‌های وارداتی بدون توجه به زیرساخت‌های موجود و شرایط بومی، نه تنها به بلوغ نمی‌انجامد، بلکه می‌تواند چالش‌های جدیدی ایجاد کند. ما نیازمند توسعه راه‌حل‌هایی هستیم که با وضعیت فعلی سازگار باشند و در عین حال، مسیر رشد فناورانه را هموار کنند.» همچنین، یکی دیگر از خبرگان (E04) بیان کرد: «امنیت سایبری در سیستم‌های ریلی صرفاً یک موضوع فناورانه نیست، بلکه یک مسئله ملی و راهبردی است که باید با رویکرد بومی و با در نظر گرفتن الزامات خاص کشور به آن پرداخت.»

در این مرحله، حدود ۴۲۰ نقل قول معنادار از مجموع مصاحبه‌ها استخراج شد که مبنای کدگذاری در مرحله بعد قرار گرفت.

مرحله دوم: ایجاد کدهای اولیه

در مرحله دوم، با بررسی دقیق داده‌های جمع‌آوری شده، کدهای اولیه شناسایی و استخراج شدند. کدها شامل کوچکترین عناصر معنادار در داده‌ها بودند که به موضوع پژوهش مرتبط می‌شدند. کدگذاری به صورت باز و با رویکرد استقرایی انجام شد تا تمام جنبه‌های مهم مصاحبه‌ها پوشش داده شود.

ابزار اصلی گردآوری داده‌ها در این پژوهش، مصاحبه عمیق نیمه ساختاریافته بود. پس از مرور ادبیات مرتبط با بلوغ صنعت حمل و نقل ریلی مبتنی بر صنعت ۴،۰، سؤالات مصاحبه در چندین بخش اصلی تنظیم شد: سؤالات مقدماتی و آشنایی، سؤالات مرتبط با شاخص‌های عمومی و اختصاصی مدل بلوغ، سؤالات مرتبط با فناوری‌های دیجیتال و هوش مصنوعی، سؤالات مرتبط با داده‌های بزرگ و رایانش ابری، سؤالات مرتبط با اینترنت اشیا و بلاک‌چین، سؤالات مرتبط با تولید افزوده و دوقلوی دیجیتال، سؤالات مرتبط با امنیت سایبری، سؤالات مرتبط با هوش تجاری و مدیریت زنجیره تأمین، سؤالات مرتبط با عوامل بازار، مشتری و سرمایه‌گذاری، سؤالات مرتبط با محصولات، خدمات و تأمین مالی، سؤالات مرتبط با منابع و عوامل محیط خارجی، سؤالات مرتبط با پایداری و محیط زیست، و سؤالات تکمیلی.

هر مصاحبه بین ۶۰ تا ۹۰ دقیقه به طول انجامید و با اجازه مصاحبه‌شوندگان ضبط گردید. سپس متن مصاحبه‌ها پیاده‌سازی و برای تحلیل مضمون آماده شد. مصاحبه‌ها در محل کار مصاحبه‌شوندگان یا به صورت آنلاین (در صورت عدم امکان مصاحبه حضوری) انجام گرفت. قبل از انجام مصاحبه، محورهای کلی سؤالات برای آمادگی قبلی به اطلاع مصاحبه‌شوندگان رسانده شد، اما سؤالات جزئی در جریان مصاحبه و متناسب با تخصص و تجربه هر خبره مطرح گردید. برای تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از مصاحبه‌ها، از روش تحلیل مضمون شش مرحله‌ای Braun, Clarke and Terry (2021) استفاده شد که شامل مراحل زیر است.

-آشنایی با داده‌ها: در این مرحله، متن پیاده شده مصاحبه‌ها چندین بار مطالعه شد تا الگوهای معنایی اولیه شناسایی شوند. -ایجاد کدهای اولیه: با بررسی دقیق داده‌ها، کدهای اولیه شناسایی و استخراج شدند.

-جستجوی مضامین: کدهای شناسایی شده بر اساس شباهت‌ها و ارتباطات معنایی طبقه‌بندی شدند تا مضامین اولیه شکل گیرند.

-بازبینی مضامین: مضامین شناسایی شده مورد بازبینی قرار گرفتند تا از انسجام درونی و تمایز بیرونی آنها اطمینان حاصل شود.

-تعریف و نام‌گذاری مضامین: هر یک از مضامین به دقت تعریف شد و نام‌های مناسب برای آنها انتخاب گردید.

خود کار"، "سیستم های پیش بینی خرابی"، "برنامه ریزی هوشمند سفر" و "بهینه سازی مصرف انرژی با الگوریتم های هوشمند" تشکیل شد.

برخی دیگر از مضامین سازمان دهنده شناسایی شده عبارتند از: استفاده از تحلیل کلان داده در برنامه ریزی و تصمیم گیری، سطح پیاده سازی سیستم های همزاد دیجیتال، میزان خودکار سازی فرآیندهای کنترلی و عملیاتی، سطح پیاده سازی پروتکل های امنیتی بومی، میزان آمادگی در برابر حملات سایبری، سیستم های مدیریت محرمانگی و حفاظت از داده ها، طرح های تداوم کسب و کار و مدیریت بحران دیجیتال، و سطح پیاده سازی استانداردهای امنیتی در IOT.

مرحله چهارم: بازیابی مضامین

در مرحله چهارم، مضامین شناسایی شده مورد بازیابی قرار گرفتند تا از انسجام درونی و تمایز بیرونی آنها اطمینان حاصل شود. برای این منظور، هر مضمون در ارتباط با کدهای زیرمجموعه خود و نیز کل مجموعه داده ها بررسی شد. در این مرحله، برخی مضامین که همپوشانی داشتند، ادغام شدند و برخی دیگر که انسجام کافی نداشتند، بازتعریف یا حذف شدند. به عنوان مثال، مضامین "سیستم های حفاظت از داده ها" و "مدیریت حریم خصوصی" به دلیل همپوشانی معنایی، در مضمون "سیستم های مدیریت محرمانگی و حفاظت از داده ها" ادغام شدند. همچنین، روابط بین مضامین نیز مورد بررسی قرار گرفت تا ارتباطات آنها روشن تر شود. این کار به شناسایی مضامین فراگیر (ابعاد اصلی) کمک کرد. در این مرحله، ۶ مضمون فراگیر (بعد) شناسایی شد که عبارتند از:

- فناوری های پیشرفته صنعت ۴،۰ در حمل و نقل ریلی

- امنیت سایبری و مدیریت ریسک دیجیتال

- پایداری و سازگاری با محیط زیست

- زیرساخت های بومی و آمادگی فنی

- مدیریت دانش و توسعه سرمایه انسانی

- اقتصاد دیجیتال و مدل های کسب و کار نوین

برای اطمینان از اعتبار مضامین شناسایی شده، نتایج با سه نفر از خبرگان در میان گذاشته شد و بازخوردهای آنها در بازنگری نهایی مضامین لحاظ گردید.

در ابتدا بیش از ۱۸۰ کد اولیه شناسایی شد که پس از پالایش و ادغام موارد مشابه، به ۱۳۸ کد نهایی تقلیل یافت.

برای مثال، کد "سیستم های پیش بینی خرابی" از نقل قول هایی مانند این استخراج شد.

خبره E05: «مروزه با استفاده از الگوریتم های یادگیری ماشین و تحلیل داده های سنسورها، می توان قبل از وقوع خرابی، آن را پیش بینی کرد و اقدامات پیشگیرانه انجام داد. این سیستم ها اگر به درستی پیاده سازی شوند، می توانند تا ۸۰ درصد از خرابی های حاد و توقف های ناخواسته جلوگیری کنند.»

خبره E06: «یکی از شاخص های کلیدی بلوغ، توانایی سیستم در پیش بینی خرابی ها قبل از وقوع آنهاست. این نه تنها هزینه ها را کاهش می دهد، بلکه ایمنی را نیز افزایش می دهد که در سیستم ریلی بسیار حیاتی است.»

برخی از کدهای استخراج شده از مصاحبه ها عبارتند از: سنسورهای هوشمند در خطوط ریلی، شبکه های بی سیم اختصاصی، سیستم های کنترل از راه دور، پلتفرم های مدیریت اتصال و ارتباط اشیاء، پایش لحظه ای وضعیت تجهیزات، تشخیص نقص خودکار، برنامه ریزی هوشمند سفر، بهینه سازی مصرف انرژی با الگوریتم های هوشمند، تحلیل الگوهای ترافیکی، پیش بینی تقاضای سفر، مدیریت بهینه منابع و ناوگان، سیستم های تصمیم یار هوشمند، شبیه سازی عملکرد قطارها، و پیش بینی رفتار سیستم در شرایط مختلف.

مرحله سوم: جستجوی مضامین

در مرحله سوم، کدهای شناسایی شده بر اساس شباهت ها و ارتباطات معنایی طبقه بندی شدند تا مضامین اولیه شکل گیرند. این کار با استفاده از روش های دسته بندی مفهومی و ترسیم نقشه های ذهنی انجام شد. پس از بررسی ارتباطات بین کدها، ۳۱ مضمون سازمان دهنده (شاخص) شناسایی شد که کدهای مرتبط را در قالب گروه های معنادار ترکیب می کردند.

به عنوان مثال، مضمون "سطح یکپارچه سازی اینترنت اشیا در زیرساخت های ریلی" از ترکیب کدهایی مانند "سنسورهای هوشمند در خطوط ریلی"، "شبکه های بی سیم اختصاصی"، "سیستم های کنترل از راه دور"، "پلتفرم های مدیریت اتصال و ارتباط اشیاء" و "پایش لحظه ای وضعیت تجهیزات" شکل گرفت. مضمون دیگر، "میزان بهره گیری از هوش مصنوعی در فرآیندهای عملیاتی" از ترکیب کدهای "تشخیص نقص

مرحله پنجم: تعریف و نام‌گذاری مضامین

در این مرحله، هر یک از مضامین به دقت تعریف شد و نام‌های مناسب برای آنها انتخاب گردید. همچنین، ارتباط هر مضمون با سؤالات پژوهش و چارچوب نظری مشخص شد. تعاریف مضامین فراگیر (ابعاد) در جدول ۲ ارائه شده است.

مرحله ششم: تدوین گزارش

در مرحله نهایی، یافته‌های تحلیل مضمون در قالب یک مدل مفهومی برای ارزیابی بلوغ صنعت حمل و نقل ریلی مبتنی بر صنعت ۴،۰ ارائه شد که شامل ۶ بُعد اصلی، ۳۱ شاخص و ۱۳۸ کد یا مؤلفه است. این مدل در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲. تعریف مضامین فراگیر (ابعاد)

مضامین فراگیر (ابعاد)	تعریف
فناوری‌های پیشرفته صنعت ۴،۰ در حمل و نقل ریلی	این بُعد به میزان به‌کارگیری فناوری‌های نوین صنعت ۴،۰ مانند اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، کلان‌داده، دوقلوی دیجیتال و سیستم‌های خودکار در زیرساخت‌ها و فرآیندهای عملیاتی حمل و نقل ریلی اشاره دارد
امنیت سایبری و مدیریت ریسک دیجیتال	این بُعد شامل ارزیابی سطح آمادگی سیستم‌های ریلی در برابر تهدیدات سایبری، میزان پیاده‌سازی پروتکل‌های امنیتی، سیستم‌های مدیریت محرمانگی داده‌ها و راهکارهای تداوم کسب‌وکار در شرایط بحرانی است.
پایداری و سازگاری با محیط زیست	این بُعد به ارزیابی میزان استفاده از فناوری‌های دیجیتال برای کاهش مصرف انرژی، کاهش آلاینده‌ها، مدیریت پسماند و انطباق با استانداردهای زیست‌محیطی در سیستم‌های حمل و نقل ریلی می‌پردازد.
زیرساخت‌های بومی و آمادگی فنی	این بُعد به سنجش میزان توسعه و بومی‌سازی زیرساخت‌های فنی مورد نیاز برای پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴،۰، قابلیت اتصال با سیستم‌های موجود و توانمندی در تعمیر و نگهداری تجهیزات پیشرفته اشاره دارد.
مدیریت دانش و توسعه سرمایه انسانی	این بُعد شامل ارزیابی سطح آموزش و مهارت‌افزایی نیروی انسانی، میزان انطباق کارکنان با فناوری‌های جدید، برنامه‌های مدیریت تغییر سازمانی و سیستم‌های مستندسازی و انتقال دانش فنی است.
اقتصاد دیجیتال و مدل‌های کسب‌وکار نوین	این بُعد به ارزیابی میزان سرمایه‌گذاری در فناوری‌های دیجیتال، توسعه خدمات نوین مبتنی بر دیجیتال، بهره‌وری اقتصادی و توسعه مدل‌های درآمدی جدید در صنعت حمل و نقل ریلی می‌پردازد.

جدول ۳. مدل مفهومی ارزیابی بلوغ صنعت حمل و نقل ریلی مبتنی بر صنعت ۴،۰

مضامین فراگیر (ابعاد)	مضامین سازمان دهنده (شاخص‌ها)	مضامین پایه (کدها)
فناوری‌های پیشرفته صنعت ۴،۰ در حمل و نقل ریلی	سطح یکپارچه‌سازی اینترنت اشیا در زیرساخت‌های ریلی	سنسورهای هوشمند در خطوط ریلی
		شبکه‌های بی‌سیم اختصاصی
		سیستم‌های کنترل از راه دور
		پلتفرم‌های مدیریت اتصال و ارتباط اشیا
فناوری‌های پیشرفته صنعت ۴،۰ در حمل و نقل ریلی	میزان بهره‌گیری از هوش مصنوعی در فرآیندهای عملیاتی	تشخیص نقص خودکار
		سیستم‌های پیش‌بینی خرابی
		برنامه‌ریزی هوشمند سفر
		بهینه‌سازی مصرف انرژی با الگوریتم‌های هوشمند
فناوری‌های پیشرفته صنعت ۴،۰ در حمل و نقل ریلی	استفاده از تحلیل کلان‌داده در برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری	تحلیل الگوهای ترافیکی
		بهینه‌سازی زمان‌بندی حرکت قطارها
		پیش‌بینی تقاضای سفر
		مدیریت بهینه منابع و ناوگان
فناوری‌های پیشرفته صنعت ۴،۰ در حمل و نقل ریلی	سطح پیاده‌سازی سیستم‌های همزاد دیجیتال	سیستم‌های تصمیم‌یار هوشمند
		شبیه‌سازی عملکرد قطارها
		پیش‌بینی رفتار سیستم در شرایط مختلف
		بهینه‌سازی طراحی خطوط و ایستگاه‌ها

مضامین فراگیر (ابعاد)	مضامین سازمان دهنده (شاخص‌ها)	مضامین پایه (کدها)
	میزان خودکارسازی فرآیندهای کنترلی و عملیاتی	مدل‌سازی دیجیتال زیرساخت‌ها
		سیستم‌های کنترل اتوماتیک قطار
		مدیریت هوشمند سوزن‌بندی
		کنترل خودکار سیگنال‌ها
		اتوماسیون فرآیندهای تعمیر و نگهداری
		سیستم‌های پایش خودکار وضعیت
امنیت سایبری و مدیریت ریسک دیجیتال	سطح پیاده‌سازی پروتکل‌های امنیتی بومی	سیستم‌های رمزنگاری داخلی
		پروتکل‌های دسترسی چندسطحی
		مکانیزم‌های تأیید هویت بومی
		استانداردهای امنیتی سازگار با زیرساخت کشور
		تیم‌های واکنش سریع
		تمرین‌های شبیه‌سازی حملات
میزان آمادگی در برابر حملات سایبری	سیستم‌های مدیریت محرمانگی و حفاظت از داده‌ها	سیستم‌های تشخیص نفوذ
		زیرساخت‌های ایزوله اضطراری
		مانیتورینگ ۷/۲۴ تهدیدات
		طبقه‌بندی اطلاعات حساس
		کنترل سطوح دسترسی
		رمزنگاری داده‌های در حال انتقال
میزان آمادگی در برابر بحران	سیستم‌های پشتیبان آفلاین	مدیریت حریم خصوصی مسافران
		فرآیندهای بازیابی اطلاعات
		مانورهای آمادگی در برابر بحران
		سیستم‌های عملیاتی مستقل در شرایط اضطراری
		برنامه‌های اقدام سریع
		امنیت لایه فیزیکی سنسورها
سطح پیاده‌سازی استانداردهای امنیتی IOT در	میزان کاهش مصرف انرژی و بهینه‌سازی مصرف سوخت	رمزنگاری ارتباطات دستگاه‌ها
		مکانیزم‌های احراز هویت دستگاه‌ها
		سیاست‌های به‌روزرسانی امنیتی
		سیستم‌های ترمز بازیابی انرژی
		بهینه‌سازی پروفایل سرعت
		سیستم‌های مدیریت انرژی هوشمند
پایداری و سازگاری با محیط زیست	سطح پیاده‌سازی راهکارهای انرژی‌های تجدیدپذیر	فناوری‌های کاهش اتلاف انرژی
		پنل‌های خورشیدی در ایستگاه‌ها
		سیستم‌های ذخیره انرژی
		توربین‌های بادی در مسیرهای باز
		سیستم‌های ترکیبی تولید برق
		فناوری‌های جدید بهره‌برداری از انرژی‌های طبیعی
راهکارهای کاهش آلودگی صوتی و محیطی	موانع صوتی پیشرفته	سیستم‌های کاهش ارتعاش

مضامین فراگیر (ابعاد)	مضامین سازمان دهنده (شاخص‌ها)	مضامین پایه (کدها)
	سیستم‌های مدیریت پسماند و بازیافت	فناوری‌های جاذب صدا
		مسیریابی سازگار با محیط زیست
		جداسازی و تفکیک خودکار پسماند
		بازیافت مواد مصرفی تعمیرات
		سیستم‌های بازیابی آب
		مدیریت ضایعات الکترونیکی
	پیاده‌سازی استانداردهای زیست‌محیطی ملی و بین‌المللی	انطباق با استانداردهای ISO 14000
		گواهینامه‌های سبز
		تطبیق با قوانین داخلی محیط زیست
		رعایت پروتکل‌های بین‌المللی انتشار کربن
		سیستم‌های پایش آلودگی
		همسویی با اهداف توسعه پایدار سازمان ملل
میزان تطابق با اهداف توسعه پایدار	شاخص‌های عملکرد زیست‌محیطی	
	گزارش‌دهی پایداری	
	برنامه‌های مسئولیت اجتماعی	
	پوشش شبکه در مسیرهای ریلی	
سطح توسعه زیرساخت‌های ارتباطی و مخابراتی	فیبر نوری اختصاصی	
	سیستم‌های ارتباطی اضطراری	
	شبکه‌های داخلی پرسرعت	
	طراحی و ساخت قطعات داخلی	
میزان بومی‌سازی تجهیزات و فناوری‌های نوین	نرم‌افزارهای بومی کنترل و مدیریت	
	سیستم‌های ساخت داخل	
	تعامل با شرکت‌های دانش‌بنیان	
	انتقال فناوری و بومی‌سازی	
سطح همگرایی با استانداردهای بین‌المللی	پذیرش استانداردهای فنی جهانی	
	سازگاری با سیستم‌های بین‌المللی	
	گواهینامه‌های بین‌المللی	
	همکاری‌های فنی با شرکت‌های پیشرو	
قابلیت اتصال و یکپارچگی با سیستم‌های موجود	واسط‌های اتصال به سیستم‌های قدیمی	
	یکپارچه‌سازی داده‌های سازمانی	
	معماری سیستمی انعطاف‌پذیر	
	پروتکل‌های ارتباطی استاندارد	
توانمندی در تعمیر و نگهداری تجهیزات پیشرفته	آموزش تخصصی تعمیرکاران	
	تجهیزات عیب‌یابی پیشرفته	
	مستندسازی فرآیندهای تعمیر و نگهداری	
	قطعات یدکی و پشتیبانی فنی	
آمادگی زیرساختی برای نوآوری‌های آینده	سیستم‌های آموزش واقعیت افزوده	
	قابلیت ارتقای سیستم‌ها	
		زیرساخت‌های بومی و آمادگی فنی
		زیرساخت‌های آزمایشی و آزمونی

مضامین فراگیر (ابعاد)	مضامین سازمان دهنده (شاخص‌ها)	مضامین پایه (کدها)
مدیریت دانش و توسعه سرمایه انسانی	میزان آموزش و مهارت‌افزایی نیروی انسانی	بسترهای توسعه و نوآوری
		مرکز تحقیق و توسعه فعال
		دوره‌های آموزشی تخصصی
		شبیه‌سازهای آموزشی
		گواهینامه‌های مهارتی
		برنامه‌های آموزش ضمن خدمت
	سطح انطباق نیروی کار با فناوری‌های جدید	سیستم‌های یادگیری الکترونیکی
		میزان پذیرش فناوری‌های نوین
		مهارت‌های دیجیتال کارکنان
		آشنایی با سیستم‌های هوشمند
		انعطاف‌پذیری در برابر تغییرات فناورانه
		آموزش‌های مدیریت تغییر
برنامه‌های مدیریت تغییر و چابک‌سازی سازمانی	فرهنگ‌سازی نوآوری	
	متدولوژی‌های چابک در پروژه‌ها	
	مدیریت مقاومت در برابر تغییر	
	سیستم‌های پاداش برای نوآوری	
	پایگاه دانش فنی	
نظام‌های مستندسازی و انتقال دانش فنی	مستندسازی تجربیات	
	سیستم مدیریت دانش	
	اشتراک‌گذاری بهترین تجربیات	
	پروژه‌های مشترک تحقیقاتی	
سطح همکاری با دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی	کارآموزی دانشجویان	
	تعریف پایان‌نامه‌های کاربردی	
	جذب نخبگان دانشگاهی	
	مراکز نوآوری مشترک	
	بودجه اختصاصی برای دیجیتال‌سازی	
میزان سرمایه‌گذاری در فناوری‌های دیجیتال	بازگشت سرمایه پروژه‌های دیجیتال	
	سبد سرمایه‌گذاری فناوری	
	استراتژی‌های تأمین مالی نوآوری	
	خدمات پیشرفته به مسافران	
اقتصاد دیجیتال و مدل‌های کسب‌وکار نوین	سیستم‌های رزرو و بلیت هوشمند	
	خدمات اطلاع‌رسانی لحظه‌ای	
	اپلیکیشن‌های موبایلی کاربردی	
	پلتفرم‌های یکپارچه خدمات	
	بهبودسازی هزینه‌های نگهداری	
بهره‌وری اقتصادی و کاهش هزینه‌های عملیاتی	کاهش مصرف انرژی	
	افزایش طول عمر تجهیزات	
	کاهش توقف‌های عملیاتی	
	خدمات ارزش افزوده	
میزان توسعه مدل‌های درآمدی جدید		

مضامین فراگیر (ابعاد)	مضامین سازمان دهنده (شاخص‌ها)	مضامین پایه (کدها)
		منابع درآمدی متنوع
		مدل‌های تجاری نوآورانه
		همکاری‌های تجاری با شرکت‌های دیگر
		بازارهای جدید

این تصویرسازی مدل که در شکل ۱ ارائه شده است، به مدیران و متخصصان صنعت ریلی کمک می‌کند تا با نگاهی جامع، برنامه‌های توسعه و ارتقای سطح بلوغ صنعت را تدوین کنند.

در نهایت، روابط بین ابعاد و شاخص‌های مدل ارزیابی بلوغ صنعت حمل و نقل ریلی مبتنی بر صنعت ۴,۰ به شکل گرافیکی ترسیم شد تا درک بهتری از ساختار مدل ارائه شود.

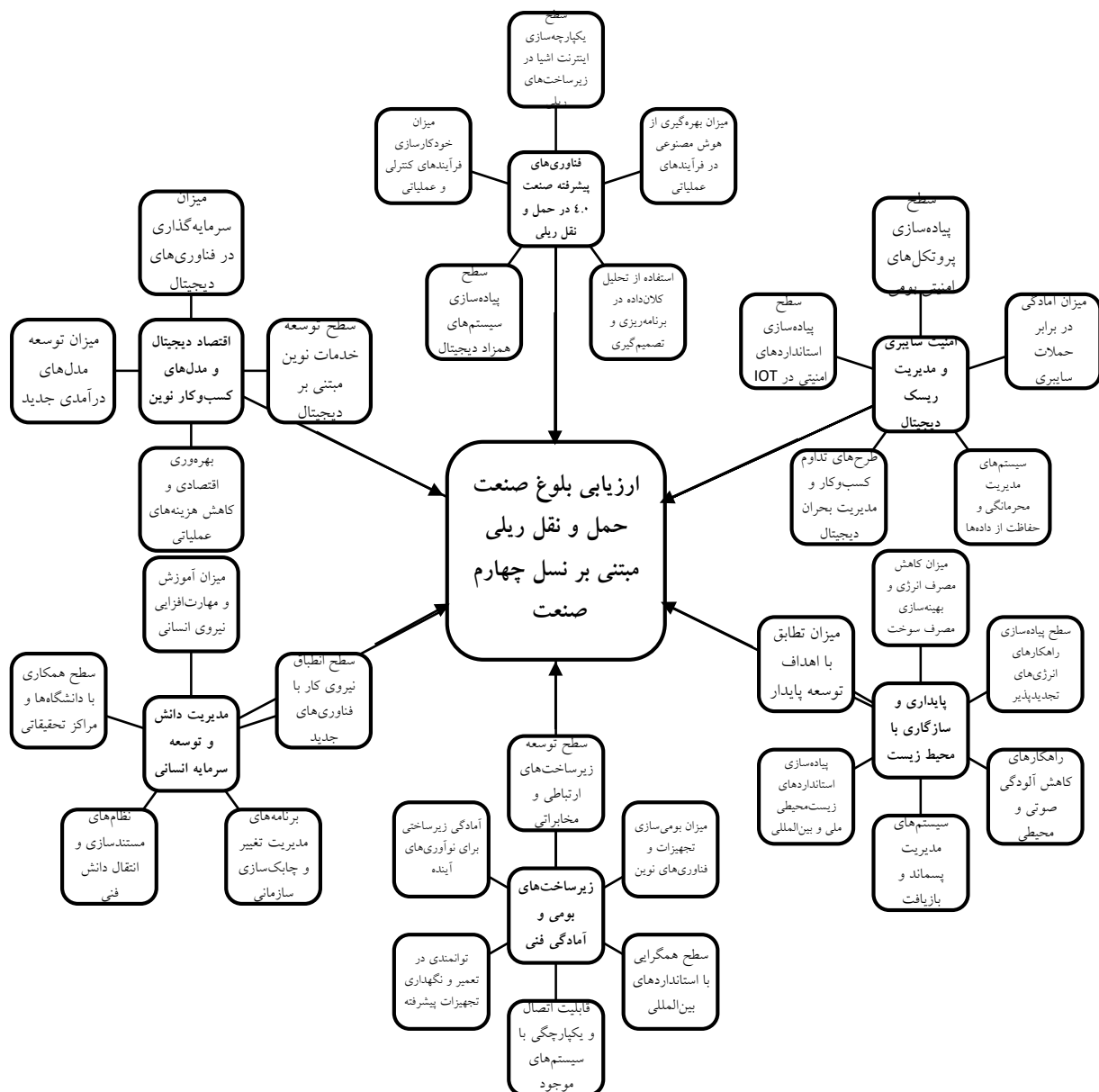
۵- نتیجه گیری

مدیریت دانش و توسعه سرمایه انسانی، و اقتصاد دیجیتال و مدل‌های کسب‌وکار نوین نیز به عنوان ابعاد مهم دیگر مدل شنا سایی شدند. این یافته‌ها با مطالعات Sedaju, Qamari and Tjahjono (2024) در زمینه یکپارچگی انسان-ماشین در صنعت ۴,۰ در تولید حمل و نقل ریلی و Zhuravleva and Kliestik (2023) در خصوص دیجیتالی‌سازی حمل و نقل ریلی همخوانی دارد.

به طور کلی، مدل ارائه شده در این پژوهش می‌تواند به مدیران و سیاست‌گذاران صنعت حمل و نقل ریلی کمک کند تا: -وضعیت موجود صنعت را از منظر بلوغ دیجیتال ارزیابی کنند، -شکاف‌ها و نقاط ضعف را شناسایی نمایند، -اولویت‌های سرمایه‌گذاری و توسعه را تعیین کنند، -برنامه‌های جامع برای ارتقای سطح بلوغ صنعت تدوین نمایند.

این پژوهش با هدف ارزیابی بلوغ صنعت حمل و نقل ریلی مبتنی بر نسل چهارم صنعت: یک مدل بومی انجام شد. یافته‌های پژوهش منجر به شناسایی ۶ بُعد اصلی، ۳۱ شاخص و ۱۳۸ مؤلفه گردید که می‌تواند به عنوان چارچوبی جامع برای ارزیابی و برنامه‌ریزی توسعه صنعت حمل و نقل ریلی در عصر دیجیتال مورد استفاده قرار گیرد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که فناوری‌های پیشرفته صنعت ۴,۰ مانند اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، کلان‌داده و همزاد دیجیتال نقش مهمی در ارتقای سطح بلوغ صنعت حمل و نقل ریلی دارند. این یافته با پژوهش‌های پیشین (Singh et al., 2022; Laiton et al., 2022) همسوس است. همچنین، امنیت سایبری و مدیریت ریسک دیجیتال به عنوان یکی از ابعاد کلیدی مدل شنا سایی شد که این موضوع با توجه به افزایش حملات سایبری به زیرساخت‌های حیاتی، اهمیت ویژه‌ای دارد. Righetti et al. (2020) نیز در پژوهش خود به استراتژی‌های مدیریت شکست برای سیستم‌های ریلی مبتنی بر اینترنت اشیا پرداخته‌اند.

بُعد پایداری و سازگاری با محیط زیست، بر نقش فناوری‌های دیجیتال در کاهش اثرات زیست‌محیطی سیستم‌های حمل و نقل ریلی تأکید دارد. یافته‌های این بخش با مطالعات Gandhi, Kant and Thakkar (2022) در زمینه حمل و نقل ریلی پایدار و Koul (2025) در خصوص تولید سبز در عصر فناوری هوشمند مطابقت دارد. بُعد زیرساخت‌های بومی و آمادگی فنی نیز به عنوان یکی از چالش‌های اصلی در پیاده‌سازی فناوری‌های نوین در صنعت ریلی شناخته شد که این یافته با پژوهش‌های Ogunmodede and Zincume (2024) در زمینه توسعه مهارت‌های ریلی برای انقلاب صنعتی چهارم همسو است.



شکل ۱. مدل مفهومی ارزیابی بلوغ صنعت حمل و نقل ریلی در پارادایم صنعت ۴,۰

انسانی و اقتصادی برای دیجیتالی سازی صنعت ریلی تدوین گردد. این برنامه باید شامل اهداف کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت، منابع مورد نیاز، زمان‌بندی اجرا و شاخص‌های ارزیابی باشد. همچنین، با توجه به اهمیت این فناوری‌ها در ارتقای بلوغ صنعت ریلی، پیشنهاد می‌شود سرمایه‌گذاری ویژه‌ای در توسعه زیرساخت‌های مورد نیاز مانند سنسورها، شبکه‌های ارتباطی، پلتفرم‌های جمع‌آوری و تحلیل داده و سیستم‌های هوشمند تصمیم‌گیری انجام شود. علاوه بر این،

این مدل با در نظر گرفتن ابعاد مختلف فنی، امنیتی، زیست‌محیطی، زیرساختی، انسانی و اقتصادی، رویکردی جامع برای حرکت به سمت "ریلی ۴,۰" ارائه می‌دهد. بر اساس یافته‌های پژوهش، پیشنهاداتی برای توسعه و ارتقای سطح بلوغ صنعت حمل و نقل ریلی مبتنی بر پارادایم صنعت ۴,۰ ارائه می‌شود. با توجه به شناسایی ابعاد و شاخص‌های مختلف در این پژوهش، پیشنهاد می‌شود برنامه‌ای جامع با در نظر گرفتن تمامی جوانب فنی، امنیتی، زیست‌محیطی،

نیازمند احتیاط در تعمیم نتایج به سایر زمینه‌ها و صنایع است. همچنین، تمرکز بر خبرگان داخلی ممکن است چشم‌اندازی محدودتر نسبت به روندهای جهانی ارائه دهد. عدم آزمون عملی مدل در محیط واقعی صنعت ریلی نیز از دیگر محدودیت‌های این پژوهش به شمار می‌رود. علاوه بر این، پویایی و تغییرات سریع فناوری‌های صنعت ۴,۰ می‌تواند در آینده نزدیک، نیاز به بازنگری در مدل ارائه شده را ضروری سازد. برای غلبه بر این محدودیت‌ها و توسعه بیشتر دانش در این حوزه، انجام پژوهش‌های آتی در جهات مختلف پیشنهاد می‌شود. طراحی ابزار سنجش کمی بر اساس مدل ارائه شده می‌تواند به اعتبار سنجی مدل و بررسی قابلیت تعمیم آن کمک کند. انجام مطالعات تطبیقی بین کشورهای مختلف نیز می‌تواند به شناسایی بهترین شیوه‌ها و درس‌آموخته‌های جهانی منجر شود. بررسی عمیق موانع و چالش‌های پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴,۰ در بخش ریلی و تدوین نقشه راه برای گذار به سمت "ریلی ۴,۰" با در نظر گرفتن شرایط و محدودیت‌های بومی، از دیگر زمینه‌های پژوهشی ارزشمند محسوب می‌شوند. مطالعه اثرات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی پیاده‌سازی این فناوری‌ها در صنعت ریلی و همچنین بررسی نقش فناوری‌های نوظهور مانند هوش مصنوعی تولیدی، بلاک‌چین و محاسبات کوانتومی در آینده این صنعت، می‌تواند درک جامع‌تری از چشم‌انداز آینده صنعت حمل و نقل ریلی در عصر دیجیتال ارائه دهند.

با توجه به اهمیت بُعد امنیت سایبری و مدیریت ریسک دیجیتال، پیشنهاد می‌شود مرکز تخصصی برای پایش، پیشگیری و مقابله با تهدیدات سایبری در حوزه حمل و نقل ریلی ایجاد شود. این مرکز می‌تواند با همکاری نهادهای امنیتی و دانشگاهی، راهکارهای بومی امنیت سایبری را توسعه دهد. با توجه به اهمیت سرمایه انسانی در گذار به سمت ریلی ۴,۰، پیشنهاد می‌شود برنامه‌های آموزشی جامع برای توسعه مهارت‌های دیجیتال کارکنان صنعت ریلی طراحی و اجرا شود. این برنامه‌ها می‌تواند شامل دوره‌های آموزشی، کارگاه‌های عملی، همکاری با دانشگاه‌ها و مؤسسات آموزشی، و استفاده از فناوری‌های نوین آموزشی مانند واقعیت افزوده باشد. همچنین، با توجه به اهمیت بومی‌سازی فناوری‌ها و انطباق استانداردهای بین‌المللی با شرایط داخلی، پیشنهاد می‌شود استانداردها و دستورالعمل‌های بومی برای پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴,۰ در بخش ریلی تدوین گردد. در نهایت، برای تقویت همکاری‌های بین صنعت ریلی و مراکز پژوهشی، پیشنهاد می‌شود مراکز نوآوری مشترک با تمرکز بر فناوری‌های صنعت ۴,۰ ایجاد شود. این مراکز می‌توانند به توسعه راه‌حل‌های نوآورانه، انتقال دانش و تجاری‌سازی فناوری‌ها کمک کنند. پژوهش حاضر علی‌رغم دستاوردهای قابل توجه، با محدودیت‌هایی همراه بوده است که باید در تفهیر نتایج مورد توجه قرار گیرند. رویکرد کیفی و نمونه‌گیری هدفمند این پژوهش، تعمیم‌پذیری یافته‌ها را با محدودیت مواجه می‌سازد و

۶- مراجع

-Bortolini, M., Calabrese, F., Galizia, F. G., Mora, C., & Ventura, V. (2022). Industry 4.0 technologies: A cross-sector industry-based analysis. In *Sustainable Design and Manufacturing: Proceedings of the 8th International Conference on Sustainable Design and Manufacturing (KES-SDM 2021)* 140–148. Springer Singapore. doi.org/10.1007/978-981-16-6128-0_14

-Braun, V., Clarke, V., & Terry, G. (2021). Thematic analysis: A practical guide. *SAGE Publications Ltd*. doi.org/10.1177/1035719X211058251

-Brezavšek, A., & Baggia, A. (2025). Recent trends in information and cyber security maturity assessment: A systematic literature review. *Systems*, 13(1), 52. doi.org/10.3390/systems13010052

-Ale, F., Daniyan, I., Aderoba, O., & Adediran, A. A. (2024, April). An artificial intelligence-based integrated framework for lean and smart manufacturing: A case study of the rail industry. In *2024 International Conference on Science, Engineering and Business for Driving Sustainable Development Goals (SEB4SDG)*, IEEE. 1–10. doi.org/10.1109/SEB4SDG60871.2024.10629752

-Awodele, I. A., Mewomo, M. C., Municio, A. M. G., Chan, A. P., Darko, A., Taiwo, R., & Awodele, O. A. (2024). Awareness, adoption readiness and challenges of railway 4.0 technologies in a developing economy. *Heliyon*, 10(4), e25934. doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25934

- 29(47), 70746–70771.
doi.org/10.1007/s11356-022-22811-5
- Gao, X., Zhang, Y., & Peng, J. (2022). NDE 4.0 in railway industry. In *Handbook of Nondestructive Evaluation 4.0*, 951–977. Springer International Publishing.
doi.org/10.1007/978-3-030-73206-6_13
- Holubčík, M., Koman, G., & Soviar, J. (2021). Industry 4.0 in logistics operations. *Transportation Research Procedia*, 53, 282–288.
doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.040
- Jabłoński, M. (2022). Emerging modern trends and technologies increasing the level of rail transport safety. In *Digital Safety in Railway Transport—Aspects of Management and Technology*, 77–97.
doi.org/10.1007/978-3-030-96133-6_8
- Koul, P. (2025). Green manufacturing in the age of smart technology: A comprehensive review of sustainable practices and digital innovations. *Journal of Materials and Manufacturing*, 4(1), 1–20.
doi.org/10.5281/zenodo.14586656
- Laiton-Bonadiez, C., Branch-Bedoya, J. W., Zapata-Cortes, J., Paipa-Sanabria, E., & Arango-Serna, M. (2022). Industry 4.0 technologies applied to the rail transportation industry: A systematic review. *Sensors*, 22(7), 2491–2492.
doi.org/10.3390/s22072491
- Möller, D., Iffländer, L., Nord, M., Krause, P., Leppla, B., Mühl, K., & Czerkewski, P. (2022). Emerging technologies in the era of digital transformation: State of the art in the railway sector. In *ICINCO*, 721–728.
doi.org/10.5220/0011141900003271
- Montero, J. (2020). The digitalization dilemma in the railway industry. In *Handbook on Railway Regulation*, 379–396. Edward Elgar Publishing.
doi.org/10.4337/9781789901788.00028
- Ogunmodede, O., & Zincume, P. N. (2024). Railway skill development for the Fourth Industrial Revolution: A systematic review of developing countries. In *2024 IEEE International Conference on Engineering, Technology, and Innovation (ICE/ITMC)*, IEEE. 1–7.
doi.org/10.1109/ICE/ITMC61926.2024.10794310
- Carranza, G., Amorrortu, O., & de la Rúa, O. (2023). Analysis of the challenges faced by the rail sector: Understanding the rail industry of the future through the incorporation of technology and digitisation. *Open Journal of Business and Management*, 11(4), 1558–1576.
doi.org/10.4236/ojbm.2023.114086
- Chellaswamy, C., Geetha, T. S., Vanathi, A., & Venkatachalam, K. (2020). An IoT based rail track condition monitoring and derailment prevention system. *International Journal of RF Technologies*, 11(2), 81–107.
doi.org/10.3233/RFT-190210
- Dalewska, M., & Mrugalska, B. (2025). Innovative transport: Environmental, social, and economic aspects. In *Human Perspectives of Industry 4.0 Organizations*, CRC Press. 224–235.
- Dev, N. K., Shankar, R., & Qaiser, F. H. (2020). Industry 4.0 and circular economy: Operational excellence for sustainable reverse supply chain performance. *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104583.
doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104583
- Dietlmeier, S. F., Floetgen, R. J., Bock, J., & Urmetzer, F. (2022). IoT for rail transportation: The case of Railigent. In *2022 IEEE International Conference on Big Data (Big Data) IEEE*, 3806–3813.
doi.org/10.1109/BigData55660.2022.10020620
- Errandonea, I., Goya, J., Alvarado, U., Beltrán, S., & Arrizabalaga, S. (2021). IoT approach for intelligent data acquisition for enabling digital twins in the railway sector. In *2021 International Symposium on Computer Science and Intelligent Controls (ISCSIC)*, IEEE. 164–168.
doi.org/10.1109/ISCSIC54682.2021.00039
- Franz, M. L. C. (2023). Industry 4.0 in the context of passenger railway companies.
- Galizia, F. G., Bortolini, M., & Calabrese, F. (2023). A cross-sectorial review of industrial best practices and case histories on Industry 4.0 technologies. *Systems Engineering*, 26(6), 908–924.
doi.org/10.1002/sys.21697
- Gandhi, N., Kant, R., & Thakkar, J. (2022). A systematic scientometric review of sustainable rail freight transportation. *Environmental Science and Pollution Research*,

- Wu, S., & Zhang, X. (2022). Visualization of railway transportation engineering management using BIM technology under the application of Internet of Things edge computing. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022(1), 4326437. doi.org/10.1155/2022/4326437
- Zamany, A., Khamseh, A., (2022). Identification of influential dimensions and components of technology transfer with a focus on digital transformation. *Journal of Technology Development Management*, 10(3), 57-90. doi.org/10.22104/JTDM.2023.5698.3032
- Zhuravleva, N. A., & Kliestik, T. (2023). Railway transport digitalization: Development methodology and effects of digital implementation processes. In *Digital Transformation: What is the Company of Today?* (pp. 123–146). Springer Nature Switzerland. doi.org/10.1007/978-3-031-46594-9_8
- Zikria, Y. B., Afzal, M. K., Kim, S. W., Marin, A., & Guizani, M. (2020). Deep learning for intelligent IoT: Opportunities, challenges and solutions. *Computer Communications*, 164, 50–53. doi.org/10.1016/j.comcom.2020.08.017
- Zunder, T. H., Katschnig, C., Chen, M., & Martino, A. (2023). Recommendations for a transition to 'Railway 4.0 for Europe'. *Transportation Research Procedia*, 72, 852–859. doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.477
- Righetti, F., Vallati, C., Anastasi, G., Masetti, G., & Di Giandomenico, F. (2020, September). Failure management strategies for IoT-based railways systems. In *2020 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP)*, IEEE. 386–391. doi.org/10.1109/SMARTCOMP50058.2020.00082
- Sedaju, A., Qamari, I. N., & Tjahjono, H. K. (2024). Industry 4.0 human machine integration in rail transportation manufacture: Narrative approach for employee and leader value. In *Strengthening Sustainable Digitalization of Asian Economy and Society*, IGI Global, 302–330. doi.org/10.4018/979-8-3693-1942-0.ch017
- Singh, P., Elmi, Z., Meriga, V. K., Pasha, J., & Dulebenets, M. A. (2022). Internet of Things for sustainable railway transportation: Past, present, and future. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 4, 100065. doi.org/10.1016/j.clscn.2022.100065
- Sun, X., Yu, H., Solvang, W. D., & others. (2022). The application of Industry 4.0 technologies in sustainable logistics: A systematic literature review (2012–2020) to explore future research opportunities. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 9560–9591. doi.org/10.1007/s11356-021-17693-y

Assessing the Maturity of the Rail Transportation Industry Based on the Fourth Generation of Industry An Indigenous Model

Samaneh Moradi, Ph.D., Student, Department of Industrial Management, Qa.C., Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

Mehrdad Hosseini Shakib, Associate Professor, Department of Industrial Management, Ka.C., Islamic Azad University, Karaj, Iran.

Ali Badizadeh, Assistant Professor, Department of Industrial Management, Qa.C., Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

E-mail: mehrdad.shakib@kiaau.ac.ir

Received: September 2025- Accepted: February 2026

ABSTRACT

This research aims to provide an indigenous model to assess the maturity of the rail transportation industry based on the fourth generation of the industry. Given the rapid evolution of digital technologies and their key role in improving efficiency, safety, and sustainability of rail systems, designing a coherent framework to measure the progress of this industry on the path of digital transformation appears essential. In this regard, using thematic analysis and in-depth interviews with 15 experts in the rail industry and Industry 4.0 technologies, the dimensions and indicators of maturity in this industry were identified and explained. These experts were selected from among senior managers of railway companies, information technology specialists, university faculty members, and industrial consultants with a minimum of 15 years of experience in related fields. The thematic analysis of the interviews through a six-stage process led to the extraction of 138 initial codes, 31 organizing themes (indicators), and 6 global themes (dimensions). The identified dimensions are: Advanced Industry 4.0 technologies in rail transport, Cybersecurity and digital risk management, Sustainability and environmental compatibility, Indigenous infrastructure and technical readiness, Knowledge management and human capital development, and Digital economy and innovative business models. This model can serve as a comprehensive framework for assessing the current situation, identifying gaps, and strategic planning for the development of the rail transport industry in the digital age.

Keywords: Maturity Assessment, Thematic Analysis, Rail Transport, Industry 4.0, Digital Technologies