

اولویت‌بندی عوامل کلیدی موثر بر ارزیابی بلوغ دیجیتال در صنعت ریلی مبتنی

بر روش بهترین-بدترین فازی

سمانه مرادی، دانشجوی دکتری، گروه مدیریت، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

مهرداد حسینی شکیب (مسئول مکاتبات)، دانشیار گروه مدیریت صنعتی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

E-mail: Mehrdad.shakib@kiau.ac.ir

علی بدیع زاده، استادیار، گروه مدیریت، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۵

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۶

چکیده

صنعت حمل و نقل ریلی به عنوان یکی از زیرساخت‌های حیاتی حمل و نقل، در حال تجربه تحولی عمیق به سوی دیجیتالی‌سازی و بهره‌گیری از فناوری‌های صنعت ۴,۰ است. این پژوهش با هدف اولویت‌بندی عوامل کلیدی موثر بر ارزیابی بلوغ دیجیتال در صنعت ریلی انجام شده است. در این مطالعه، ابتدا از طریق پل خبرگان شامل ۱۵ متخصص صنعت ریلی و فناوری‌های صنعت ۴,۰، هشت بُعد اصلی شامل فناوری‌های پیشرفته صنعت ۴,۰، امنیت سایبری و مدیریت ریسک دیجیتال، پایداری و سازگاری با محیط زیست، کاربردهای عملی و بهبود عملکرد، زیرساخت‌های بومی و آمادگی فنی، مدیریت دانش و توسعه سرمایه انسانی، اقتصاد دیجیتال و مدل‌های کسب‌وکار نوین، و چالش‌ها و موانع دیجیتالی‌سازی شناسایی شدند. سپس با استفاده از روش بهترین-بدترین فازی این ابعاد و شاخص‌های مرتبط با هر بُعد اولویت‌بندی شدند. نتایج نشان داد که بُعد فناوری‌های پیشرفته صنعت ۴,۰ با وزن ۰,۲۸۵، در اولویت اول قرار دارد. در این بُعد، میزان بهره‌گیری از هوش مصنوعی در فرآیندهای عملیاتی با وزن ۰,۳۱۲، مهم‌ترین شاخص شناخته شد. شاخص‌های سازگاری فازی محاسبه شده کمتر از ۰,۱۰ بودند که نشان‌دهنده اعتبار و قابلیت اطمینان نتایج است. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به عنوان راهنمایی برای مدیران و سیاست‌گذاران صنعت ریلی در تخصیص منابع و برنامه‌ریزی استراتژیک برای تحول دیجیتال مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: بلوغ دیجیتال، روش بهترین-بدترین فازی، صنعت ۴,۰، صنعت ریلی

۱. مقدمه

نیاز به سرمایه‌گذاری‌های قابل توجه، و ضرورت هماهنگی بین بخش‌های مختلف است (Galizia, Bortolini & Calabrese, 2023). در این زمینه، مفهوم بلوغ دیجیتال به عنوان شاخصی برای سنجش میزان پیشرفت سازمان‌ها در مسیر تحول دیجیتال مطرح شده است.

بلوغ دیجیتال در صنعت ریلی به میزان توانایی یک سازمان یا سیستم ریلی در بهره‌گیری مؤثر از فناوری‌های دیجیتال برای بهبود عملکرد، ایجاد ارزش، و تحقق اهداف استراتژیک اطلاق می‌شود (Awodele et al., 2024). این مفهوم شامل ابعاد مختلفی نظیر زیرساخت‌های فناوری، فرهنگ سازمانی، مهارت‌های نیروی انسانی، فرآیندهای عملیاتی، و قابلیت‌های نوآوری است. ارزیابی دقیق بلوغ دیجیتال می‌تواند به سازمان‌ها کمک کند تا وضعیت فعلی خود را شناسایی کرده، اولویت‌های بهبود را تعیین نمایند، و راهبردهای مناسب برای تحول دیجیتال طراحی کنند.

از سوی دیگر، صنعت ریلی به دلیل ویژگی‌های خاص خود نظیر نیاز به ایمنی بالا، استانداردهای سخت‌گیرانه، عمر طولانی تجهیزات، و وجود زیرساخت‌های گسترده، با چالش‌های منحصر به فردی در زمینه دیجیتالی‌سازی مواجه است (Harrod, 2025). این چالش‌ها شامل یکپارچه‌سازی فناوری‌های نوین با سیستم‌های موجود، تأمین مالی پروژه‌های نوآوری، توسعه مهارت‌های نیروی انسانی، و برخورد با مسائل امنیت سایبری است. بنابراین، شناسایی و اولویت‌بندی عوامل کلیدی مؤثر بر بلوغ دیجیتال در این صنعت حائز اهمیت ویژه‌ای است.

مطالعات پیشین در زمینه کاربرد فناوری‌های صنعت ۴,۰ در حمل و نقل ریلی عمدتاً بر جنبه‌های فنی و فناوری متمرکز بوده‌اند و کمتر به بررسی جامع عوامل مؤثر بر بلوغ دیجیتال پرداخته‌اند (Kljaić et al., 2023). همچنین، اکثر مطالعات انجام شده در کشورهای توسعه‌یافته صورت گرفته و کمتر شرایط و محدودیت‌های خاص کشورهای در حال توسعه را در نظر گرفته‌اند. علاوه بر این، روش‌های سنتی ارزیابی و اولویت‌بندی

صنعت حمل و نقل ریلی در دهه‌های اخیر شاهد تحولات عمیق و گسترده‌ای بوده است که عمدتاً تحت تأثیر پیشرفت‌های فناوری‌های نوین و ظهور مفهوم صنعت ۴,۰ شکل گرفته است (Laiton-Bonadiez et al., 2022). این صنعت که به عنوان یکی از زیرساخت‌های حیاتی و استراتژیک حمل و نقل در بسیاری از کشورها محسوب می‌شود، در حال حاضر در مواجهه با چالش‌های متعددی نظیر افزایش تقاضا، نیاز به بهبود ایمنی، کاهش هزینه‌های عملیاتی، و در عین حال حفظ استانداردهای زیست‌محیطی قرار دارد (Bianchi et al., 2025). در این راستا، بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته صنعت ۴,۰ نظیر اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، کلان‌داده و دوقلوی دیجیتال به عنوان راه‌حل‌های کلیدی برای غلبه بر این چالش‌ها مطرح شده است.

مفهوم صنعت ۴,۰ که نخستین بار در آلمان و در زمینه تولید صنعتی معرفی شد، اکنون کاربرد گسترده‌ای در حوزه‌های مختلف از جمله حمل و نقل یافته است (Gerháťová, Zitrický & Klapita, 2021). این مفهوم بر اساس یکپارچه‌سازی فناوری‌های فیزیکی، دیجیتال، و بیولوژیکی تعریف می‌شود که منجر به ایجاد سیستم‌های هوشمند، خودکار، و کارآمد می‌گردد (Zamany, Khamseh & Iranbanfard, 2023). در حوزه حمل و نقل ریلی، پیاده‌سازی مؤثر این فناوری‌ها می‌تواند به بهبود قابل توجه عملکرد سیستم‌های ریلی، افزایش ایمنی، کاهش هزینه‌های نگهداری، و ارتقای کیفیت خدمات ارائه شده به مسافران منجر شود (Brezavšček & Baggia, 2025).

با این حال، تحول دیجیتال در صنعت ریلی فرآیندی پیچیده و چندبُعدی است که نیازمند درک عمیق از عوامل مختلف تأثیرگذار و اولویت‌بندی صحیح آن‌ها است. این پیچیدگی ناشی از ماهیت بین‌رشته‌ای این موضوع، وجود زیرساخت‌های موجود،

اغلب قادر به مدیریت عدم قطعیت‌های موجود در قضاوت‌های خبرگان نیستند، در حالی که استفاده از روش‌های فازی می‌تواند این محدودیت را برطرف کند.

با توجه به اهمیت روزافزون دیجیتالی‌سازی در صنعت ریلی و پیچیدگی‌های موجود در این فرآیند، سؤال اصلی پژوهش حاضر عبارت است از: "اولویت عوامل کلیدی مؤثر بر ارزیابی بلوغ دیجیتال در صنعت ریلی چگونه است و کدام یک از این عوامل بیشترین اهمیت را دارند؟"

برای پاسخ به این سؤال، ضروری است تا ابتدا عوامل مؤثر بر بلوغ دیجیتال در صنعت ریلی شناسایی شوند و سپس با استفاده از روش‌های علمی و قابل اعتماد اولویت‌بندی گردند. این اولویت‌بندی باید در نظر گیرنده عدم قطعیت‌های موجود در قضاوت‌های خبرگان باشد و نتایج قابل اعتماد و کاربردی ارائه دهد.

پژوهش حاضر از چندین جهت نوآوری محسوب می‌شود و خلأهای موجود در ادبیات را پر می‌کند. بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اکثر تحقیقات انجام شده در زمینه کاربرد فناوری‌های صنعت ۴,۰ در حمل و نقل ریلی عمدتاً بر جنبه‌های فنی و فناوری متمرکز بوده و کمتر به ارزیابی جامع بلوغ دیجیتال پرداخته‌اند. همچنین، استفاده از روش‌های کمی برای اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر بلوغ دیجیتال در این صنعت محدود بوده است. از سوی دیگر، عمده مطالعات در کشورهای توسعه‌یافته انجام شده و شرایط خاص کشورهای در حال توسعه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در همین راستا، استفاده از روش‌های کلاسیک تصمیم‌گیری چندمعیاره که قادر به مدیریت عدم قطعیت‌های موجود در قضاوت‌های خبرگان نیستند، یکی دیگر از محدودیت‌های موجود محسوب می‌شود. بنابراین، این پژوهش با ارائه مدلی جامع برای ارزیابی بلوغ دیجیتال در صنعت ریلی که ابعاد فناورانه، سازمانی، اقتصادی، زیست‌محیطی و انسانی را در نظر می‌گیرد و با بهره‌گیری از روش بهترین-بدترین فازی که امکان مدیریت عدم قطعیت‌ها را فراهم می‌کند، سعی

در رفع این خلأها دارد.

۲. ادبیات پژوهش

۱-۲ مفهوم صنعت ۴,۰ و کاربرد آن در حمل و نقل

ریلی

صنعت ۴,۰ به عنوان چهارمین انقلاب صنعتی، مفهومی است که بر اساس یکپارچه‌سازی فناوری‌های فیزیکی، دیجیتال، و بیولوژیکی تعریف می‌شود (Bortolini et al., 2022). این مفهوم شامل طیف گسترده‌ای از فناوری‌ها نظیر اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، رایانش ابری، کلان‌داده، رباتیک، و دوقلوی دیجیتال است. کاربرد این فناوری‌ها در صنعت ریلی می‌تواند منجر به ایجاد سیستم‌های هوشمند، خودکار، و بهینه شود که قادر به تصمیم‌گیری در زمان واقعی و بهبود مستمر عملکرد هستند.

گرهاتووا، زیتریکی و کلاپیتا (Gerhátová, Zitrický & Klapita, 2021) در مطالعه خود به بررسی گزینه‌های پیاده‌سازی صنعت ۴,۰ در حمل و نقل ریلی پرداختند و نشان دادند که استفاده از فناوری‌های دیجیتال می‌تواند به بهبود قابل توجه کارایی، ایمنی، و کیفیت خدمات در این صنعت منجر شود. آن‌ها عوامل کلیدی نظیر اتوماسیون، یکپارچه‌سازی سیستم‌ها، و تحلیل داده‌ها را به عنوان محورهای اصلی تحول دیجیتال شناسایی کردند.

لایتون‌بونادیز و همکاران (Laiton-Bonadiez et al., 2022) مطالعه نظام‌مندی در زمینه کاربرد فناوری‌های صنعت ۴,۰ در حمل و نقل ریلی انجام دادند و ۷۵ مقاله علمی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که اینترنت اشیا، یادگیری ماشین، و کلان‌داده بیشترین کاربرد را در این صنعت دارند. همچنین، آن‌ها تأکید کردند که عوامل انسانی، سازمانی، و فرهنگی نقش مهمی در موفقیت پیاده‌سازی این فناوری‌ها دارند. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که موضوع بلوغ دیجیتال در صنایع مختلف از جمله حمل و نقل ریلی به طور فزاینده‌ای مورد توجه

مستمر پارامترهای قطار با استفاده از حسگرهای IoT و رایانش لبه پرداختند. آن‌ها نشان دادند که این سیستم می‌تواند اطلاعات مفیدی در خصوص وضعیت قطار، مصرف انرژی، و عملکرد تجهیزات ارائه دهد که برای تصمیم‌گیری‌های عملیاتی حائز اهمیت است.

۳-۲ هوش مصنوعی و یادگیری ماشین

کاربرد هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در صنعت ریلی به سرعت در حال گسترش است. آله و همکاران (Ale et al., 2024) چارچوب یکپارچه مبتنی بر هوش مصنوعی برای تولید ناب و هوشمند در صنعت ریلی ارائه دادند که شامل الگوریتم‌های پیش‌بینی، بهینه‌سازی، و تصمیم‌گیری خودکار است. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از این چارچوب می‌تواند به بهبود قابل توجه کارایی تولید، کاهش هزینه‌ها، و افزایش کیفیت منجر شود.

بوستوس و همکاران (Bustos et al., 2021) روش‌شناسی برای یکپارچه‌سازی قطار پرسرعت در نگهداری ۴,۰ ارائه دادند که بر اساس تحلیل داده‌ها، یادگیری ماشین، و پیش‌بینی خرابی‌ها طراحی شده است. آن‌ها نشان دادند که استفاده از این روش می‌تواند به کاهش قابل توجه هزینه‌های نگهداری، افزایش دسترسی تجهیزات، و بهبود ایمنی منجر شود.

هارود (Harrod, 2025) به بررسی دیجیتالی‌سازی سیگنال ریلی با سیستم مدیریت ترافیک ریلی اروپا پرداخت و نشان داد که انتظارات صنعت ۴,۰ با واقعیات پیاده‌سازی گاه مطابقت ندارد. این یافته اهمیت ارزیابی واقع‌بینانه بلوغ دیجیتال را نشان می‌دهد.

۴-۲ کلان‌داده و تحلیل داده‌ها

کلان‌داده و تحلیل داده‌ها نقش کلیدی در تحول دیجیتال صنعت ریلی ایفا می‌کنند. چادوریو الزاراد (Chowdhury & Alzarrad, 2023) رور جامعی از کاربردهای متن‌کاوی در بخش زیرساخت‌های حمل و نقل ارائه دادند و نشان دادند که تحلیل داده‌های متنی می‌تواند اطلاعات مفیدی برای بهبود عملکرد، شناسایی مسائل، و پیش‌بینی نیازهای آینده فراهم کند.

فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال هفدهم / شماره سوم (۶۸) / بهار ۱۴۰۵

قرار گرفته است. فرانز، آیالا و لارانگا (Franz, Ayala & Larranaga, 2024) مدل بلوغ صنعت ۴,۰ را برای شرکت‌های مسافری ریلی ارائه دادند که بر مدیریت فناوری تأکید دارد. این مطالعه نشان داد که ارزیابی بلوغ دیجیتال نیازمند در نظرگیری ابعاد مختلف فناوریانه، سازمانی و انسانی است.

کومار، هاجوری و گارزاریز (Kumar, Hajori & Garza-Reyes, 2023) مدل اندازه‌گیری و ساختاری برای ارزیابی بلوغ و آمادگی صنعت ۴,۰ بر اساس چارچوب فناوری-سازمان-محیط ارائه دادند. این مطالعه نشان داد که بلوغ دیجیتال نیازمند در نظرگیری همزمان ابعاد فناوری، سازمانی و محیطی است. همچنین، سنا و همکاران (Sena et al., 2023) مدل بلوغ دیجیتال برای صنعت ۴,۰ را بر پایه همین چارچوب توسعه دادند و تأکید کردند که موفقیت در تحول دیجیتال مستلزم تعامل مؤثر بین عوامل فناوریانه، سازمانی و محیطی است.

۲-۲ اینترنت اشیا در صنعت ریلی

اینترنت اشیا به عنوان یکی از فناوری‌های کلیدی صنعت ۴,۰ کاربرد گسترده‌ای در صنعت ریلی یافته است (Dalewska & Mrugalska, 2025). سینگ و همکاران (Singh et al., 2022) در مطالعه جامع خود به بررسی کاربردهای IoT در حمل و نقل ریلی پایدار پرداختند و نشان دادند که این فناوری می‌تواند در زمینه‌های مختلف نظیر پایش وضعیت تجهیزات، مدیریت انرژی، ایمنی، و بهبود تجربه مسافران مورد استفاده قرار گیرد.

چلاسوامی و همکاران (Chellaswamy et al., 2020) سیستم پایش وضعیت خط آهن و پیشگیری از خروج از خط مبتنی بر IoT را طراحی کردند که قادر به تشخیص نقص‌های احتمالی در خط آهن و ارسال هشدارهای به موقع است. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از حسگرهای هوشمند و شبکه‌های ارتباطی می‌تواند به طور قابل توجهی ایمنی و قابلیت اطمینان سیستم‌های ریلی را افزایش دهد.

ژائو و همکاران (Zhao et al., 2020) به توسعه سیستم پایش

دانگ و همکاران (Dong et al., 2022) به بررسی کاربردهای متن‌محور در صنعت ریلی پرداختند و نشان دادند که تحلیل داده‌های متنی می‌تواند در زمینه‌های مختلف نظیر تحلیل احساسات مسافران، شناسایی نقص‌های تجهیزات، و بهینه‌سازی خدمات مورد استفاده قرار گیرد.

وی و همکاران (Wee et al., 2022) به شبیه‌سازی و ارزیابی انتقادی شبکه‌های حمل و نقل ریلی شهری از منظر شبکه پیچیده پرداختند. آن‌ها نشان دادند که تحلیل داده‌های پیچیده شبکه‌های ریلی می‌تواند اطلاعات مهمی درباره نقاط بحرانی، الگوهای ترافیک، و بهینه‌سازی عملکرد ارائه دهد. این مطالعه اهمیت استفاده از روش‌های تحلیل داده‌های پیشرفته برای مدیریت سیستم‌های ریلی پیچیده را نشان می‌دهد.

۲-۵ دوقلوی دیجیتال

دوقلوی دیجیتال به عنوان یکی از فناوری‌های نوظهور صنعت ۴،۰، پتانسیل بالایی برای کاربرد در صنعت ریلی دارد. ایران‌دونیا و همکاران (Errandonea et al., 2021) به توسعه رویکرد IoT برای جمع‌آوری داده‌های هوشمند به منظور فعال‌سازی دوقلوی دیجیتال در بخش ریلی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که دوقلوی دیجیتال می‌تواند به شبیه‌سازی رفتار سیستم‌های ریلی، پیش‌بینی عملکرد، و بهینه‌سازی عملیات کمک کند.

گائو، ژانگ و پنگ (Gao, Zhang & Peng, 2022) کاربردهای NDE 4.0 در صنعت ریلی را بررسی کردند و نشان دادند که ترکیب فناوری‌های تشخیص عیب غیرمخرب با دوقلوی دیجیتال می‌تواند منجر به بهبود قابل توجه قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم‌های ریلی شود.

آزمبوجا و همکاران (Azambuja et al., 2024) به بررسی فرصت‌ها و چالش‌های مرتبط با امنیت سایبری در دوقلوهای دیجیتال صنعت ۴،۰ پرداختند. آن‌ها نشان دادند که در حالی که دوقلوهای دیجیتال قابلیت‌های قدرتمندی برای شبیه‌سازی، پیش‌بینی و بهینه‌سازی فراهم می‌کنند، اما همزمان چالش‌های جدی امنیت سایبری را نیز به همراه دارند که باید در فرآیند

طراحی و پیاده‌سازی مدنظر قرار گیرد.

۲-۶ امنیت سایبری در صنعت ریلی

با افزایش استفاده از فناوری‌های دیجیتال در صنعت ریلی، امنیت سایبری به یکی از چالش‌های اصلی تبدیل شده است. لوپزآگیلار و همکاران (López-Aguilar et al., 2022) مطالعه نظام‌مندی در زمینه امنیت اطلاعات و حریم خصوصی در حمل و نقل ریلی انجام دادند و نشان دادند که تهدیدات سایبری می‌تواند تأثیر جدی بر عملکرد و ایمنی سیستم‌های ریلی داشته باشد.

ورونکو (Voronko, 2024) به بررسی امنیت سیستم‌های IoT در حمل و نقل ریلی پرداخت و راهکارهایی برای بهبود امنیت سایبری ارائه داد. او تأکید کرد که توسعه پروتکل‌های امنیتی بومی و آموزش نیروی انسانی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۲-۷ پایداری و محیط زیست

یکی از اهداف مهم دیجیتالی‌سازی در صنعت ریلی، بهبود پایداری و کاهش اثرات زیست‌محیطی است (Koul, 2025). عباس‌نژاد، سلطانی و کاراموزیان (Abbasnejad, Soltani & Karamoozian, 2024) مرور نظام‌مندی از یکپارچه‌سازی فناوری‌های صنعت ۴،۰ در بهبود پایداری پروژه‌های ساخت حمل و نقل ارائه دادند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از این فناوری‌ها می‌تواند منجر به کاهش مصرف انرژی، کاهش آلودگی، و بهبود کارایی منابع شود.

کلجایک و همکاران (Kljaić et al., 2023) به بررسی چالش‌های فعلی و فناوری‌های نوظهور برای افزایش کارایی انرژی، ایمنی، و پایداری حمل و نقل ریلی پرداختند. آن‌ها تأکید کردند که یکپارچه‌سازی فناوری‌های مختلف می‌تواند به تحقق اهداف پایداری کمک کند.

کول (Koul, 2025) مروری جامع بر تولید سبز در عصر فناوری هوشمند ارائه داد و نشان داد که فناوری‌های دیجیتال نقش کلیدی در دستیابی به اهداف پایداری دارند. همچنین،

برفی استفاده شد. با توجه به ماهیت بین‌رشته‌ای موضوع، خبرگان از سه حوزه کلیدی انتخاب شدند: متخصصان صنعت ریلی، متخصصان فناوری‌های صنعت ۴،۰، و متخصصان مدیریت فناوری. فرآیند دستیابی به خبرگان از طریق مراجعه به شرکت راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران، مرکز تحقیقات راه‌آهن، دانشکده‌های مهندسی راه‌آهن، دانشکده‌های مهندسی صنایع و کامپیوتر دانشگاه‌های برتر کشور، و شرکت‌های دانش‌بنیان فعال در حوزه حمل و نقل هوشمند انجام شد.

معیارهای انتخاب خبرگان شامل 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 بود. گروه خبرگان مشارکت‌کننده شامل ۱۵ نفر از متخصصان با سابقه کاری ۱۵ تا ۲۲ سال بودند که از تنوع مناسبی برخوردار بودند. از نظر مدرک تحصیلی، ۹ نفر دارای مدرک دکتری و ۶ نفر دارای مدرک کارشناسی ارشد بودند. خبرگان در رشته‌های مختلفی شامل مهندسی راه‌آهن، مهندسی کامپیوتر، مهندسی صنایع، مهندسی برق، هوش مصنوعی، مدیریت فناوری اطلاعات، مهندسی انرژی، مدیریت کارآفرینی، علوم کامپیوتر، مدیریت منابع انسانی، و مهندسی سیستم تحصیل کرده بودند. همچنین خبرگان در سمت‌های مدیریتی و تخصصی مختلفی از جمله مدیرعامل، معاون فناوری اطلاعات، اعضای هیئت علمی، مدیران ارشد شرکت‌های دانش‌بنیان، کارشناسان ارشد امنیت سایبری، مشاوران انرژی و محیط زیست، و مدیران پروژه‌های دیجیتال فعالیت می‌کردند که تضمین‌کننده جامعیت و اعتبار نظرات جمع‌آوری شده است. مشخصات گروه خبرگان در جدول ۱ ارائه شده است.

انتخاب ۱۵ خبره بر اساس اصل اشباع نظری و توصیه‌های متدولوژیکی انجام شد. بر اساس مطالعات پیشین، برای رسیدن به اشباع نظری در پژوهش‌های کیفی، تعداد ۱۲ تا ۲۰ مصاحبه معمولاً کافی است. همچنین، برای روش BWM، حداقل ۱۰

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال هفدهم / شماره سوم (۶۸) // بهار ۱۴۰۵

داله‌سکا و مروگالسکا (Dalewska & Mrugalska, 2025) به بررسی جنبه‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی حمل و نقل نوآورانه پرداختند.

فرانچسکا، کدینا و مونترو (Francisca, Codina & Montero, 2022) مدل ترکیبی قوی تقسیم‌بندی/تخصیص ترافیک برای حمل و نقل ریلی و جاده‌ای بار ارائه دادند. این مطالعه نشان داد که یکپارچه‌سازی سیستم‌های حمل و نقل مختلف و استفاده از مدل‌های ریاضی پیشرفته می‌تواند به بهینه‌سازی قابل توجه عملکرد شبکه‌های حمل و نقل منجر شود. بررسی ادبیات موجود نشان می‌دهد که علی‌رغم تحقیقات گسترده در زمینه کاربرد فناوری‌های صنعت ۴،۰ در حمل و نقل ریلی، شکاف‌های مهمی در این حوزه وجود دارد. نخست، اکثر مطالعات بر جنبه‌های فنی و فناوری متمرکز بوده و کمتر به بررسی جامع عوامل مؤثر بر بلوغ دیجیتال پرداخته‌اند. همچنین، مطالعات کمی در زمینه اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر بلوغ دیجیتال در صنعت ریلی انجام شده است. علاوه بر این، استفاده از روش‌های فازی برای مدیریت عدم قطعیت‌های موجود در قضاوت‌های خبرگان کمتر مورد توجه قرار گرفته است. شرایط و محدودیت‌های خاص کشورهای در حال توسعه نیز کمتر در مطالعات قبلی در نظر گرفته شده است. این شکاف‌ها ضرورت انجام پژوهش حاضر را تأیید می‌کند.

۳. روش پژوهش

این پژوهش بر اساس رویکرد آمیخته (کیفی-کمی) طراحی شده است که در مرحله اول از روش کیفی برای شناسایی عوامل مؤثر بر بلوغ دیجیتال استفاده شده و در مرحله دوم از روش کمی برای اولویت‌بندی این عوامل بهره گرفته شده است. این رویکرد امکان بهره‌گیری از مزایای هر دو روش را فراهم می‌کند و نتایج جامع‌تری ارائه می‌دهد.

برای انتخاب خبرگان جهت شناسایی عوامل مؤثر بر ارزیابی بلوغ دیجیتال در صنعت ریلی، از روش نمونه‌گیری هدفمند و گلوله

اولویت‌بندی عوامل کلیدی موثر بر ارزیابی بلوغ دیجیتال در صنعت ریلی مبتنی بر روش بهترین-بدترین فازی

خبره توصیه می‌شود. معیار ۱۵ سال سابقه کار بر این اساس
انتخاب شد که متخصصان بتوانند تحولات دو دهه اخیر صنعت
ریلی و ظهور فناوری‌های صنعت ۴,۰ را به طور کامل در نظر

گیرند. تنوع تخصصی خبرگان (مهندسی ریلی، فناوری اطلاعات،
مدیریت) اطمینان از پوشش جامع موضوع را فراهم کرد.

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	توسعه دهنده 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 کسب و کار	دکتری	مدیریت کارآفرینی	۱۸	مدل‌های کسب و کار دیجیتال	مشاور مدل‌های کسب و کار نوآورانه
E13	عضو هیئت علمی دانشگاه	دکتری	علوم کامپیوتر	۱۷	کلان داده و تحلیل داده	مجری طرح‌های داده‌محور در حمل و نقل
E14	مدیر آموزش و توسعه	کارشناسی ارشد	مدیریت منابع	۱۶	توسعه سرمایه	طراح برنامه‌های توسعه

کد خبره	سمت سازمانی	مدرک تحصیلی	رشته تحصیلی	سابقه کار (سال)	حوزه تخصصی	سابقه پروژه‌های مرتبط
E15	مدیر فناوری‌های نوین	دکتری	مهندسی سیستم	۱۵	دوقلوی دیجیتال و واقعیت افزوده	مهارت‌های دیجیتال توسعه‌دهنده سیستم‌های شبیه‌سازی دیجیتال

ابزار گردآوری داده‌ها شامل مصاحبه نیمه‌ساختاریافته بود که سؤالات آن در پنج محور اصلی طراحی گردید. محور اول شامل سؤالات مقدماتی برای آشنایی با زمینه تخصصی و تجربیات خبرگان در حوزه‌های صنعت ریلی، فناوری‌های صنعت ۴,۰ و پروژه‌های دیجیتالی‌سازی بود. محور دوم مربوط به شناسایی و بررسی ابعاد اصلی بلوغ دیجیتال در صنعت ریلی، اهمیت نسبی هر بُعد، و شاخص‌های قابل اندازه‌گیری برای هر بُعد بود. محور سوم متمرکز بر فناوری‌های کلیدی صنعت ۴,۰ شامل هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، دوقلوی دیجیتال، کلان‌داده و چالش‌های پیاده‌سازی آن‌ها در صنعت ریلی بود. محور چهارم به بررسی موضوعات امنیت سایبری، مدیریت ریسک‌های دیجیتال و راهکارهای حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی اختصاص یافت. محور پنجم شامل سؤالاتی درباره پایداری زیست‌محیطی، مسائل اقتصادی تحول دیجیتال، توسعه منابع انسانی و چالش‌های سازمانی مرتبط با دیجیتالی‌سازی بود. مصاحبه‌ها در محل کار مصاحبه‌شوندگان یا به صورت آنلاین انجام گرفت و قبل از انجام مصاحبه، محورهای کلی سؤالات برای آمادگی قبلی به اطلاع مصاحبه‌شوندگان رسانده شد.

مصاحبه‌ها تا رسیدن به اشباع نظری ادامه یافت که در مجموع با ۱۵ نفر از متخصصان مصاحبه عمیق انجام شد. از مصاحبه سیزدهم 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. هر مصاحبه بین ۶۰ تا ۹۰ دقیقه به طول انجامید. با اجازه مصاحبه‌شوندگان، مصاحبه‌ها ضبط گردید و سپس متن مصاحبه‌ها پیاده‌سازی شد.

پس از انجام مصاحبه‌ها، ابعاد و شاخص‌های مؤثر بر بلوغ

دیجیتال در صنعت ریلی از طریق تحلیل نظرات خبرگان و بررسی ادبیات موجود شناسایی شدند. این فرآیند منجر به شناسایی هشت بُعد اصلی و ۳۴ شاخص فرعی برای ارزیابی بلوغ دیجیتال در صنعت ریلی شد.

پس از شناسایی و تأیید ابعاد و شاخص‌های مؤثر بر بلوغ دیجیتال از طریق تحلیل کیفی، گام بعدی اولویت‌بندی این عوامل بود. برای این منظور، از روش BWM فازی استفاده شد که توسعه‌یافته روش BWM کلاسیک است و قابلیت مدیریت عدم قطعیت‌های موجود در قضاوت‌های خبرگان را دارد (Rezaei, 2015). این روش بر اساس مقایسه زوجی فازی بهترین معیار با سایر معیارها و مقایسه زوجی فازی سایر معیارها با بدترین معیار عمل می‌کند. استفاده از اعداد فازی مثلثی امکان بیان عدم قطعیت‌های موجود در قضاوت‌های خبرگان را فراهم می‌کند.

پیاده‌سازی روش بهترین-بدترین فازی در این پژوهش شامل مراحل تفصیلی زیر بود. ابتدا، مجموعه هشت بُعد اصلی مدل تعریف شده و از خبرگان درخواست شد تا بر اساس تجربه و دانش تخصصی خود، مهم‌ترین بُعد (بهترین معیار) و کم‌اهمیت‌ترین بُعد (بدترین معیار) را در راستای دستیابی به بلوغ دیجیتال در صنعت ریلی تعیین کنند. در ادامه، برتری بهترین معیار نسبت به سایر معیارها از طریق مقایسات زوجی فازی مشخص گردید. برای این منظور، از طیف کلامی نه‌مرحله‌ای شامل "اهمیت یکسان"، "اهمیت ضعیف"، "اهمیت متوسط"، "اهمیت قوی"، "اهمیت بسیار قوی"، "اهمیت شدید"، "اهمیت خیلی شدید" و "اهمیت نهایی" استفاده شد که هر یک به اعداد فازی مثلثی $\tilde{A} = (l, m, u)$ تبدیل شدند. در این نمادگذاری، l نشان‌دهنده حداقل مقدار ممکن، m محتمل‌ترین مقدار و u

اولویت‌بندی عوامل کلیدی موثر بر ارزیابی بلوغ دیجیتال در صنعت ریلی مبتنی بر روش بهترین-بدترین فازی

حداکثر مقدار ممکن است. سپس، برتری کلیه معیارها نسبت به بدترین معیار تعیین شده با همین رویکرد فازی سنجیده شد. در نهایت، داده‌های جمع‌آوری شده وارد مدل ریاضی BWM فازی گردید که هدف آن حداقل‌سازی بیشینه انحراف فازی (ξ^*) از مقایسات ایده‌آل و محاسبه وزن‌های فازی بهینه است. این مدل به صورت مسئله بهینه‌سازی خطی فازی تعریف می‌شود:

Minimize ξ^*

Subject to:

$$|\tilde{w}B - \tilde{a}Bj \otimes \tilde{w}j| \leq \xi^* \quad \forall j$$

$$|\tilde{w}j - \tilde{a}jW \otimes \tilde{w}W| \leq \xi^* \quad \forall j$$

$$\sum \tilde{w}j = 1$$

$$\tilde{w}j \geq 0 \quad \forall j$$

که در آن $\tilde{w}B$ ، $\tilde{w}j$ و $\tilde{w}W$ به ترتیب وزن فازی بهترین معیار، معیار j ، و بدترین معیار هستند. پس از حل مدل و تعیین وزن‌های فازی، برای تبدیل آن‌ها به مقادیر قطعی از تکنیک مرکز ثقل استفاده شد که بر اساس فرمول $w = (1 + m + u)/3$ محاسبه می‌گردد.

برای تأیید اعتبار و قابلیت اطمینان نتایج، پنج روش اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت. شاخص سازگاری فازی (ξ^*) برای بررسی منطقی بودن مقایسات زوجی فازی محاسبه شد که مقادیر کمتر از ۰,۱۰ نشان‌دهنده سازگاری قابل قبول است. آزمون بازآزمایی با ۳۰ درصد از خبرگان پس از گذشت دو هفته انجام شد و ضریب همبستگی اسپیرمن بین نتایج دو مرحله محاسبه گردید. ضریب آلفای کرونباخ تعمیم‌یافته برای محیط فازی جهت سنجش پایایی درونی استفاده شد. آزمون توافق کندال فازی برای بررسی میزان اجماع بین خبرگان به کار گرفته شد. تحلیل حساسیت فازی با تغییر ۱۵ درصدی در بازه‌های فازی برای بررسی پایداری رتبه‌بندی‌ها انجام شد.

انجام این پژوهش مبتنی بر پذیرش فرضیات اساسی زیر است: اول، خبرگان انتخاب شده بر اساس معیارهای تعریف شده از دانش، تجربه و صلاحیت کافی برای شناسایی و ارزیابی عوامل مؤثر بر بلوغ دیجیتال در صنعت ریلی برخوردارند و قضاوت‌های آن‌ها معتبر و قابل اتکا است. دوم، عوامل و شاخص‌های

استخراج شده از طریق تحلیل نظرات خبرگان و بررسی ادبیات موجود، کلیه ابعاد کلیدی و تأثیرگذار بر بلوغ دیجیتال در صنعت ریلی را پوشش داده و جامعیت لازم را دارند. سوم، روش بهترین-بدترین فازی قابلیت مدیریت مؤثر عدم قطعیت‌های ذاتی موجود در قضاوت‌های انسانی را داشته و نتایج حاصل از آن معتبر و قابل اعتماد است. چهارم، ویژگی‌ها و شرایط صنعت ریلی ایران تا حد قابل توجهی با سایر کشورهای در حال توسعه مشترک بوده و یافته‌های پژوهش قابلیت تعمیم به این کشورها را دارد.

۴. تحلیل داده‌ها

بررسی نظرات خبرگان و تحلیل داده‌های حاصل از مصاحبه‌ها با ۱۵ خبره صنعت ریلی و فناوری‌های صنعت ۴,۰ منجر به شناسایی هشت بُعد اصلی و ۳۴ شاخص فرعی برای ارزیابی بلوغ دیجیتال در صنعت ریلی شد. این ابعاد طیف گسترده‌ای از عوامل تأثیرگذار بر تحول دیجیتال را پوشش می‌دهند که از جنبه‌های فناورانه گرفته تا موضوعات سازمانی، اقتصادی، زیست‌محیطی، و انسانی را شامل می‌شود.

نتایج حاصل از تحلیل نظرات خبرگان نشان داد که خبرگان عوامل فناورانه را به عنوان محور اصلی تحول دیجیتال در نظر می‌گیرند، اما در عین حال بر اهمیت کاربرد عملی این فناوری‌ها و تحقق منافع ملموس از آن‌ها تأکید دارند. همچنین، موضوعاتی نظیر امنیت سایبری، پایداری زیست‌محیطی، توسعه زیرساخت‌های بومی، مدیریت منابع انسانی، و ایجاد مدل‌های اقتصادی جدید به عنوان عوامل کلیدی شناخته شدند. علاوه بر این، خبرگان بر وجود چالش‌ها و موانع مختلف در مسیر دیجیتالی‌سازی تأکید کردند که مدیریت مناسب آن‌ها برای موفقیت در تحول دیجیتال ضروری است.

هر یک از ابعاد شناسایی شده شامل شاخص‌های متعددی هستند که جنبه‌های مختلف آن بُعد را پوشش می‌دهند و امکان ارزیابی دقیق‌تر وضعیت بلوغ دیجیتال را فراهم می‌کنند. این شاخص‌ها

بر اساس تجربیات عملی خبرگان، بررسی ادبیات موجود، و کیفی نهایی ارزیابی بلوغ صنعت حمل و نقل ریلی مبتنی بر نسل شرایط خاص صنعت ریلی ایران طراحی شده‌اند. جدول ۲ مدل چهارم صنعت را به تفصیل نشان می‌دهد.

جدول ۲. مدل کیفی نهایی ارزیابی بلوغ صنعت حمل و نقل ریلی مبتنی بر نسل چهارم صنعت

ابعاد اصلی	شاخص‌های ارزیابی
فناوری‌های پیشرفته صنعت ۴،۰ در حمل و نقل ریلی	سطح یکپارچه‌سازی اینترنت اشیا در زیرساخت‌های ریلی
	میزان بهره‌گیری از هوش مصنوعی در فرآیندهای عملیاتی
	سطح نضج تحلیل کلان‌داده در تصمیم‌گیری عملیاتی
	درجه تکامل فناوری دوقلوی دیجیتال
	میزان خودکارسازی فرآیندهای کنترلی و عملیاتی
امنیت سایبری و مدیریت ریسک دیجیتال	میزان بلوغ پروتکل‌های امنیتی بومی
	درجه آمادگی عملیاتی در برابر تهدیدات سایبری
	سطح بلوغ حفاظت و مدیریت اطلاعات حساس
	میزان آمادگی تداوم عملیات و مدیریت بحران
	سطح پیاده‌سازی استانداردهای امنیتی در IoT
پایداری و سازگاری با محیط زیست	سطح بلوغ کاهش مصرف انرژی و بهینه‌سازی سوخت
	میزان پیشرفتگی در توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر
	درجه بلوغ مدیریت آلودگی و تأثیرات زیست‌محیطی
	سطح تکامل مدیریت پسماند و منابع
	میزان انطباق با استانداردهای پایداری
کاربردهای عملی و بهبود عملکرد	درجه بلوغ بهینه‌سازی فرآیندهای عملیاتی
	سطح هوشمندی مدیریت دارایی
	میزان پیشرفتگی در ارتقای تجربه مسافران و خدمات
	درجه تکامل سیستم‌های کنترل و نظارت پیشرفته
	سطح توسعه زیرساخت‌های ارتباطی و مخابراتی
زیرساخت‌های بومی و آمادگی فنی	میزان بومی‌سازی تجهیزات و فناوری‌های نوین
	سطح همگرایی با استانداردهای بین‌المللی
	قابلیت اتصال و یکپارچگی با سیستم‌های موجود
	توانمندی در تعمیر و نگهداری تجهیزات پیشرفته
	آمادگی زیرساختی برای نوآوری‌های آینده
مدیریت دانش و توسعه سرمایه انسانی	میزان آموزش و مهارت‌افزایی نیروی انسانی
	سطح انطباق نیروی کار با فناوری‌های جدید
	درجه توانمندسازی منابع انسانی در حوزه دیجیتال
	برنامه‌های مدیریت تغییر و چابک‌سازی سازمانی

اولویت‌بندی عوامل کلیدی مؤثر بر ارزیابی بلوغ دیجیتال در صنعت ریلی مبتنی بر روش بهترین-بدترین فازی

ابعاد اصلی	شاخص‌های ارزیابی
اقتصاد دیجیتال و مدل‌های کسب‌وکار نوین	نظام‌های مستندسازی و انتقال دانش فنی
	سطح همکاری با دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی
	میزان سرمایه‌گذاری در فناوری‌های دیجیتال
	سطح توسعه خدمات نوین مبتنی بر دیجیتال
	بهره‌وری اقتصادی و کاهش هزینه‌های عملیاتی
چالش‌ها و موانع دیجیتالی‌سازی	میزان توسعه مدل‌های درآمدی جدید
	سطح غلبه بر موانع فنی و سازمانی پیاده‌سازی
	میزان تأمین مالی پایدار پروژه‌های نوآوری
	سطح بلوغ استانداردسازی و قابلیت مقیاس‌گذاری

در حمل و نقل ریلی "به عنوان بهترین معیار (مهم‌ترین بُعد) و بُعد "چالش‌ها و موانع دیجیتالی‌سازی" به عنوان بدترین معیار (کم‌اهمیت‌ترین بُعد) انتخاب شدند. این انتخاب نشان‌دهنده درک خبرگان از نقش محوری فناوری‌های پیشرفته در تحول دیجیتال صنعت ریلی است. جدول ۳ نتایج مقایسه زوجی فازی بهترین معیار (فناوری‌های پیشرفته صنعت ۴,۰) نسبت به سایر معیارها را نشان می‌دهد. این مقایسه‌ها بر اساس میانگین هندسی نظرات خبرگان حاصل شده است.

پس از شناسایی ابعاد و شاخص‌های مؤثر بر بلوغ دیجیتال در صنعت ریلی، مرحله بعدی شامل اولویت‌بندی این عوامل با استفاده از روش BWM فازی بود. این فرآیند در دو مرحله اصلی انجام شد: ابتدا ابعاد اصلی هشت‌گانه مورد رتبه‌بندی قرار گرفتند و سپس شاخص‌های مربوط به هر بُعد به طور جداگانه اولویت‌بندی شدند. برای انجام این کار، از همان ۱۵ خبره که در مرحله شناسایی عوامل مشارکت داشتند، درخواست شد تا مقایسات زوجی فازی را انجام دهند.

بر اساس نظرات خبرگان، بُعد "فناوری‌های پیشرفته صنعت ۴,۰

جدول ۳. مقایسه زوجی فازی بهترین معیار نسبت به سایر معیارها

مقدار غیرفازی	اعداد فازی مثلثی	معیار مقایسه‌شونده
۱	(۱, ۱, ۱)	D1: فناوری‌های پیشرفته صنعت ۴,۰
۳	(۲, ۳, ۴)	D2: امنیت سایبری و مدیریت ریسک دیجیتال
۵	(۴, ۵, ۶)	D3: پایداری و سازگاری با محیط زیست
۲	(۱, ۲, ۳)	D4: کاربردهای عملی و بهبود عملکرد
۳	(۲, ۳, ۴)	D5: زیرساخت‌های بومی و آمادگی فنی
۴	(۳, ۴, ۵)	D6: مدیریت دانش و توسعه سرمایه انسانی
۳	(۱, ۲, ۳)	D7: اقتصاد دیجیتال و مدل‌های کسب‌وکار نوین
۷	(۶, ۷, ۸)	D8: چالش‌ها و موانع دیجیتالی‌سازی

برابر ۰/۰۶۸ محاسبه شد که نشان‌دهنده سازگاری قابل قبول قضاوت‌های خبرگان است.

جدول ۴ وزن‌های نهایی ابعاد مدل ارزیابی بلوغ حاصل از روش BWM فازی را نشان می‌دهد. شاخص سازگاری فازی (ξ^*)

جدول ۴. وزن نهایی ابعاد مدل ارزیابی بلوغ حاصل از BWM فازی

رتبه	وزن نهایی	وزن فازی (مثلی)	بُعد مدل
۱	۰/۲۸۵	(۰/۲۷۱، ۰/۲۸۵، ۰/۲۹۹)	فناوری‌های پیشرفته صنعت ۴,۰ در حمل و نقل ریلی
۲	۰/۱۷۳	(۰/۱۶۴، ۰/۱۷۳، ۰/۱۸۲)	کاربردهای عملی و بهبود عملکرد
۳	۰/۱۴۲	(۰/۱۳۴، ۰/۱۴۲، ۰/۱۵۰)	اقتصاد دیجیتال و مدل‌های کسب‌وکار نوین
۴	۰/۱۱۸	(۰/۱۱۱، ۰/۱۱۸، ۰/۱۲۵)	امنیت سایبری و مدیریت ریسک دیجیتال
۵	۰/۰۹۵	(۰/۰۸۹، ۰/۰۹۵، ۰/۱۰۱)	زیرساخت‌های بومی و آمادگی فنی
۶	۰/۰۸۹	(۰/۰۸۳، ۰/۰۸۹، ۰/۰۹۵)	مدیریت دانش و توسعه سرمایه انسانی
۷	۰/۰۶۷	(۰/۰۶۱، ۰/۰۶۷، ۰/۰۷۳)	پایداری و سازگاری با محیط زیست
۸	۰/۰۳۱	(۰/۰۲۷، ۰/۰۳۱، ۰/۰۳۵)	چالش‌ها و موانع دیجیتالی‌سازی
			شاخص سازگاری فازی (ξ*) = ۰/۰۶۸

نتایج نشان می‌دهد که بُعد "فناوری‌های پیشرفته صنعت ۴,۰" با وزن نهایی ۰/۲۸۵ در رتبه اول اهمیت قرار گرفت. این نتیجه منطقی است زیرا فناوری‌های پیشرفته به عنوان محرک اصلی تحول دیجیتال در صنعت ریلی محسوب می‌شوند. در رتبه دوم، بُعد "کاربردهای عملی و بهبود عملکرد" با وزن ۰/۱۷۳ قرار گرفت که نشان‌دهنده اهمیت پیاده‌سازی عملی فناوری‌ها و تأثیر آن‌ها بر بهبود عملکرد است. اقتصاد دیجیتال و مدل‌های کسب‌وکار نوین با وزن ۰/۱۴۲ در رتبه سوم قرار گرفت که تأکید بر اهمیت جنبه‌های اقتصادی تحول دیجیتال دارد. پس از تعیین اولویت ابعاد اصلی، مرحله بعدی شامل رتبه‌بندی شاخص‌های موجود در هر بُعد بود. این فرآیند برای درک

عمیق‌تر اولویت‌های موجود در هر بُعد و ارائه راهنمای دقیق‌تری برای تصمیم‌گیری‌های عملی ضروری بود. برای هر بُعد، همان روش BWM فازی به کار گرفته شد و خبرگان شاخص‌های هر بُعد را به طور جداگانه مورد مقایسه و رتبه‌بندی قرار دادند. خبرگان "میزان بهره‌گیری از هوش مصنوعی در فرآیندهای عملیاتی" را به عنوان مهم‌ترین شاخص و "سطح نضج تحلیل کلان‌داده در تصمیم‌گیری عملیاتی" را به عنوان کم‌اهمیت‌ترین شاخص در بُعد فناوری‌های پیشرفته صنعت ۴,۰ انتخاب کردند. این انتخاب منعکس‌کننده نقش کلیدی هوش مصنوعی به عنوان محرک اصلی تحولات صنعت ۴,۰ در نظر خبرگان است. جدول ۵ نتایج رتبه‌بندی این شاخص‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۵. وزن نهایی شاخص‌های بُعد فناوری‌های پیشرفته صنعت ۴,۰

رتبه	وزن نهایی	وزن فازی (مثلی)	شاخص
۱	۰/۳۱۲	(۰/۲۹۶، ۰/۳۱۲، ۰/۳۲۸)	میزان بهره‌گیری از هوش مصنوعی در فرآیندهای عملیاتی
۲	۰/۲۴۸	(۰/۲۳۵، ۰/۲۴۸، ۰/۲۶۱)	درجه تکامل فناوری دوقلوی دیجیتال
۳	۰/۱۸۶	(۰/۱۷۴، ۰/۱۸۶، ۰/۱۹۸)	سطح یکپارچه‌سازی اینترنت اشیا در زیرساخت‌های ریلی
۴	۰/۱۵۴	(۰/۱۴۳، ۰/۱۵۴، ۰/۱۶۵)	میزان خودکارسازی فرآیندهای کنترلی و عملیاتی
۵	۰/۱۰۰	(۰/۰۹۱، ۰/۱۰۰، ۰/۱۰۹)	سطح نضج تحلیل کلان‌داده در تصمیم‌گیری عملیاتی
			شاخص سازگاری فازی (ξ*) = ۰/۰۶۱

در بُعد کاربردهای عملی و بهبود عملکرد، "درجه بلوغ بهینه‌سازی فرآیندهای عملیاتی" به عنوان بهترین معیار و "سطح

اولویت‌بندی عوامل کلیدی موثر بر ارزیابی بلوغ دیجیتال در صنعت ریلی مبتنی بر روش بهترین-بدترین فازی

هوشمندی مدیریت دارایی" به عنوان بدترین معیار شناسایی شدند. این انتخاب نشان‌دهنده تأکید خبرگان بر اهمیت بهینه‌سازی فرآیندها به عنوان هدف اصلی پیاده‌سازی فناوری‌های

دیجیتال است. جدول ۶ نتایج رتبه‌بندی این شاخص‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۶. وزن نهایی شاخص‌های بُعد کاربردهای عملی و بهبود عملکرد

شاخص	وزن فازی (مثلی)	وزن نهایی	رتبه
درجه بلوغ بهینه‌سازی فرآیندهای عملیاتی	(۰/۲۹۷، ۰/۲۸۴، ۰/۲۷۱)	۰/۲۸۴	۱
میزان پیشرفتگی در ارتقای تجربه مسافران و خدمات	(۰/۲۷۴، ۰/۲۶۳، ۰/۲۴۸)	۰/۲۶۳	۲
درجه تکامل سیستم‌های کنترل و نظارت پیشرفته	(۰/۲۵۰، ۰/۲۳۷، ۰/۲۲۴)	۰/۲۳۷	۳
سطح هوشمندی مدیریت دارایی	(۰/۲۲۹، ۰/۲۱۶، ۰/۲۰۳)	۰/۲۱۶	۴
شاخص سازگاری فازی (۵*) = ۰/۰۴۹			

خبرگان "بهره‌وری اقتصادی و کاهش هزینه‌های عملیاتی" را به عنوان مهم‌ترین شاخص و "میزان توسعه مدل‌های درآمدی جدید" را به عنوان کم‌اهمیت‌ترین شاخص در بُعد اقتصاد دیجیتال و مدل‌های کسب‌وکار نوین انتخاب کردند. این نگرش

نشان‌دهنده اولویت خبرگان در تحقق منافع اقتصادی فوری و قابل اندازه‌گیری است. جدول ۷ نتایج رتبه‌بندی این شاخص‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۷. وزن نهایی شاخص‌های بُعد اقتصاد دیجیتال و مدل‌های کسب‌وکار نوین

شاخص	وزن فازی (مثلی)	وزن نهایی	رتبه
بهره‌وری اقتصادی و کاهش هزینه‌های عملیاتی	(۰/۳۱۲، ۰/۲۹۸، ۰/۲۸۴)	۰/۲۹۸	۱
میزان سرمایه‌گذاری در فناوری‌های دیجیتال	(۰/۲۸۱، ۰/۲۶۷، ۰/۲۵۳)	۰/۲۶۷	۲
سطح توسعه خدمات نوین مبتنی بر دیجیتال	(۰/۲۵۴، ۰/۲۴۱، ۰/۲۲۸)	۰/۲۴۱	۳
میزان توسعه مدل‌های درآمدی جدید	(۰/۲۰۷، ۰/۱۹۴، ۰/۱۸۱)	۰/۱۹۴	۴
شاخص سازگاری فازی (۵*) = ۰/۰۵۷			

در بُعد امنیت سایبری و مدیریت ریسک دیجیتال، "درجه آمادگی عملیاتی در برابر تهدیدات سایبری" به عنوان بهترین معیار و "سطح پیاده‌سازی استانداردهای امنیتی در IoT" به عنوان بدترین معیار شناخته شد. این انتخاب نشان‌دهنده تأکید خبرگان

بر آمادگی عملیاتی و پاسخ فوری به تهدیدات به عنوان اولویت اول امنیت سایبری است. جدول ۸ نتایج رتبه‌بندی این شاخص‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۸. وزن نهایی شاخص‌های بُعد امنیت سایبری و مدیریت ریسک دیجیتال

شاخص	وزن فازی (مثلی)	وزن نهایی	رتبه
درجه آمادگی عملیاتی در برابر تهدیدات سایبری	(۰/۲۸۷، ۰/۲۷۳، ۰/۲۵۹)	۰/۲۷۳	۱
میزان بلوغ پروتکل‌های امنیتی بومی	(۰/۲۵۴، ۰/۲۴۱، ۰/۲۲۸)	۰/۲۴۱	۲
سطح بلوغ حفاظت و مدیریت اطلاعات حساس	(۰/۲۰۸، ۰/۱۹۶، ۰/۱۸۴)	۰/۱۹۶	۳
میزان آمادگی تداوم عملیات و مدیریت بحران	(۰/۱۷۶، ۰/۱۶۴، ۰/۱۵۲)	۰/۱۶۴	۴

فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال هفدهم / شماره سوم (۶۸) // بهار ۱۴۰۵

شاخص	وزن فازی (مثلثی)	وزن نهایی	رتبه
سطح پیاده سازی استانداردهای امنیتی در IoT	(۰/۱۳۷، ۰/۱۲۶، ۰/۱۱۵)	۰/۱۲۶	۵
شاخص سازگاری فازی (۵*) = ۰/۰۶۵			

خبرگان در بُعد زیرساخت های بومی و آمادگی فنی، "سطح توسعه زیرساخت های ارتباطی و مخابراتی" را به عنوان مهم ترین شاخص و "سطح همگرایی با استانداردهای بین المللی" را به عنوان کم اهمیت ترین شاخص تشخیص دادند. این رویکرد نشان دهنده تأکید بر اهمیت زیرساخت های ارتباطی به عنوان پایه و اساس پیاده سازی فناوری های دیجیتال است. جدول ۹ نتایج رتبه بندی این شاخص ها را نشان می دهد.

جدول ۹. وزن نهایی شاخص های بُعد زیرساخت های بومی و آمادگی فنی

شاخص	وزن فازی (مثلثی)	وزن نهایی	رتبه
سطح توسعه زیرساخت های ارتباطی و مخابراتی	(۰/۲۳۴، ۰/۲۲۱، ۰/۲۰۸)	۰/۲۲۱	۱
میزان بومی سازی تجهیزات و فناوری های نوین	(۰/۲۰۶، ۰/۱۹۴، ۰/۱۸۲)	۰/۱۹۴	۲
قابلیت اتصال و یکپارچگی با سیستم های موجود	(۰/۱۹۹، ۰/۱۸۷، ۰/۱۷۵)	۰/۱۸۷	۳
آمادگی زیرساختی برای نوآوری های آینده	(۰/۱۹۰، ۰/۱۷۸، ۰/۱۶۶)	۰/۱۷۸	۴
توانمندی در تعمیر و نگهداری تجهیزات پیشرفته	(۰/۱۴۵، ۰/۱۳۴، ۰/۱۲۳)	۰/۱۳۴	۵
سطح همگرایی با استانداردهای بین المللی	(۰/۰۹۶، ۰/۰۸۶، ۰/۰۷۶)	۰/۰۸۶	۶
شاخص سازگاری فازی (۵*) = ۰/۰۷۲			

در رتبه بندی شاخص های بُعد مدیریت دانش و توسعه سرمایه انسانی، خبرگان "سطح انطباق نیروی کار با فناوری های جدید" را به عنوان بهترین معیار و "نظام های مستندسازی و انتقال دانش فنی" را به عنوان بدترین معیار انتخاب کردند. این انتخاب منعکس کننده اولویت خبرگان در آماده سازی نیروی انسانی برای کار با فناوری های نوین است. وزن های فازی و قطعی محاسبه شده برای شاخص های این بُعد در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۱۰. وزن نهایی شاخص های بُعد مدیریت دانش و توسعه سرمایه انسانی

شاخص	وزن فازی (مثلثی)	وزن نهایی	رتبه
سطح انطباق نیروی کار با فناوری های جدید	(۰/۲۵۸، ۰/۲۴۶، ۰/۲۳۴)	۰/۲۴۶	۱
میزان آموزش و مهارت افزایی نیروی انسانی	(۰/۲۳۱، ۰/۲۱۹، ۰/۲۰۷)	۰/۲۱۹	۲
درجه توانمندسازی منابع انسانی در حوزه دیجیتال	(۰/۱۹۴، ۰/۱۸۳، ۰/۱۷۲)	۰/۱۸۳	۳
برنامه های مدیریت تغییر و چابک سازی سازمانی	(۰/۱۶۸، ۰/۱۵۷، ۰/۱۴۶)	۰/۱۵۷	۴
سطح همکاری با دانشگاه ها و مراکز تحقیقاتی	(۰/۱۳۵، ۰/۱۲۵، ۰/۱۱۵)	۰/۱۲۵	۵
نظام های مستندسازی و انتقال دانش فنی	(۰/۰۷۸، ۰/۰۷۰، ۰/۰۶۲)	۰/۰۷۰	۶
شاخص سازگاری فازی (۵*) = ۰/۰۵۸			

خبرگان در بُعد پایداری و سازگاری با محیط زیست، "سطح مهم ترین شاخص و "سطح تکامل مدیریت پسماند و منابع" را به عنوان کم اهمیت ترین شاخص شناسایی کردند. این رویکرد

اولویت‌بندی عوامل کلیدی موثر بر ارزیابی بلوغ دیجیتال در صنعت ریلی مبتنی بر روش بهترین-بدترین فازی

نشان‌دهنده تمرکز بر کاهش مصرف انرژی به عنوان اولویت اول
در پایداری زیست‌محیطی است. جدول ۱۱ نتایج رتبه‌بندی این شاخص‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱۱. وزن نهایی شاخص‌های بُعد پایداری و سازگاری با محیط زیست

رتبه	وزن نهایی	وزن فازی (مثلی)	شاخص
۱	۰/۲۹۷	(۰/۲۸۴، ۰/۲۹۷، ۰/۳۱۰)	سطح بلوغ کاهش مصرف انرژی و بهینه‌سازی سوخت
۲	۰/۲۴۱	(۰/۲۲۹، ۰/۲۴۱، ۰/۲۵۳)	میزان پیشرفتگی در توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر
۳	۰/۲۰۳	(۰/۱۹۲، ۰/۲۰۳، ۰/۲۱۴)	درجه بلوغ مدیریت آلودگی و تأثیرات زیست‌محیطی
۴	۰/۱۳۵	(۰/۱۲۴، ۰/۱۳۵، ۰/۱۴۶)	میزان انطباق با استانداردهای پایداری
۵	۰/۱۲۴	(۰/۱۱۳، ۰/۱۲۴، ۰/۱۳۵)	سطح تکامل مدیریت پسماند و منابع
شاخص سازگاری فازی (۰/۰۵۳ = ξ^*)			

در بُعد چالش‌ها و موانع دیجیتالی‌سازی، خبرگان "میزان تأمین مالی پایدار پروژه‌های نوآوری" را به عنوان بهترین معیار (مهم‌ترین چالش) و "سطح بلوغ استانداردسازی و قابلیت مقیاس‌گذاری" را به عنوان بدترین معیار (کم‌اهمیت‌ترین چالش) انتخاب کردند. این نگرش منعکس‌کننده اهمیت تأمین مالی پایدار به عنوان اصلی‌ترین مانع در مسیر دیجیتالی‌سازی است. نتایج رتبه‌بندی این شاخص‌ها در جدول ۱۲ ارائه شده است.

جدول ۱۲. وزن نهایی شاخص‌های بُعد چالش‌ها و موانع دیجیتالی‌سازی

رتبه	وزن نهایی	وزن فازی (مثلی)	شاخص
۱	۰/۳۸۹	(۰/۳۷۵، ۰/۳۸۹، ۰/۴۰۳)	میزان تأمین مالی پایدار پروژه‌های نوآوری
۲	۰/۳۵۲	(۰/۳۳۹، ۰/۳۵۲، ۰/۳۶۵)	سطح غلبه بر موانع فنی و سازمانی پیاده‌سازی
۳	۰/۲۵۹	(۰/۲۴۶، ۰/۲۵۹، ۰/۲۷۲)	سطح بلوغ استانداردسازی و قابلیت مقیاس‌گذاری
شاخص سازگاری (۰/۰۴۱ = ξ^*)			

همان‌طور که در جداول فوق مشاهده می‌شود، تمامی شاخص‌های سازگاری فازی محاسبه شده کمتر از ۰/۱۰ بوده که نشان‌دهنده سازگاری قابل قبول قضاوت‌های فازی خبرگان است. بیشترین مقدار شاخص سازگاری فازی ۰/۰۷۲ بود که مربوط به بُعد زیرساخت‌های بومی و آمادگی فنی است.

علاوه بر این، آزمون بازآزمایی فازی با ۵ نفر از خبرگان انجام شد که ضریب همبستگی اسپیرمن بین وزن‌های فازی دو نوبت رتبه‌بندی برای ابعاد اصلی ۰/۹۳ و برای شاخص‌ها ۰/۹۰ به دست آمد. ضریب آلفای کرونباخ تعمیم یافته برای محیط فازی ۰/۹۱ محاسبه شد. آزمون کندال فازی نیز مقدار W فازی ۰/۷۸ برای ابعاد اصلی و ۰/۷۵ برای شاخص‌ها را نشان داد. همچنین، فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال هفدهم / شماره سوم (۶۸) / بهار ۱۴۰۵

۵. بحث و تفسیر نتایج

نتایج رتبه‌بندی ابعاد اصلی نشان می‌دهد که بُعد "فناوری‌های پیشرفته صنعت ۴،۰" با وزن ۰/۲۸۵ در اولویت اول قرار دارد. این نتیجه با یافته‌های مطالعات پیشین مطابقت دارد که نقش محوری فناوری را در تحول دیجیتال تأیید می‌کند (Laiton-Bonadiez et al., 2022; Gerhátová, Zitrický &

مدل‌های کسب‌وکار جدید تأکید کرده‌اند، سازگار است. تحول دیجیتال باید منجر به ایجاد ارزش اقتصادی و بهبود عملکرد مالی شود تا پایدار باشد.

قرارگیری بُعد "امنیت سایبری و مدیریت ریسک دیجیتال" در رتبه چهارم با وزن ۰/۱۱۸ نشان‌دهنده اهمیت متوسط این بُعد در نظر خبرگان است. این یافته تا حدودی متفاوت از انتظارات است، زیرا با توجه به افزایش تهدیدات سایبری، انتظار می‌رفت این بُعد در اولویت بالاتری قرار گیرد. این نتیجه ممکن است نشان‌دهنده عدم آگاهی کافی از اهمیت امنیت سایبری یا تمرکز بیشتر بر جنبه‌های فنی و عملیاتی باشد. در این بُعد، "درجه آمادگی عملیاتی در برابر تهدیدات سایبری" با وزن ۰/۲۷۳ بالاترین اولویت را کسب کرد. این یافته با تأکیدات لوپزآگیلار و همکاران (López-Aguilar et al., 2022) و ورونکو (Voronko, 2024) بر اهمیت آمادگی عملیاتی در برابر تهدیدات سایبری مطابقت دارد.

قرارگیری بُعد "زیرساخت‌های بومی و آمادگی فنی" در رتبه پنجم با وزن ۰/۰۹۵ نشان‌دهنده اهمیت متوسط این بُعد در نظر خبرگان است. این یافته تا حدودی غیرمنتظره است، زیرا زیرساخت‌های فنی به عنوان پایه و اساس پیاده‌سازی فناوری‌های دیجیتال محسوب می‌شوند. این رتبه‌بندی ممکن است نشان‌دهنده این باشد که خبرگان فرض کرده‌اند زیرساخت‌های اولیه تا حد قابل قبولی موجود است یا اینکه تمرکز بیشتر بر کاربرد فناوری‌ها به جای توسعه زیرساخت‌ها در اولویت قرار دارد. با این حال، در میان شاخص‌های این بُعد، توسعه زیرساخت‌های ارتباطی و مخابراتی بالاترین اولویت را کسب کرد که منطقی است، زیرا بدون ارتباطات مناسب، پیاده‌سازی سایر فناوری‌های دیجیتال امکان‌پذیر نخواهد بود.

بُعد "مدیریت دانش و توسعه سرمایه انسانی" در رتبه ششم با وزن ۰/۰۸۹ قرار گرفت که اولویت نسبتاً پایین این بُعد را نشان می‌دهد. این نتیجه نگران‌کننده است، زیرا منابع انسانی به عنوان مهم‌ترین عامل موفقیت در تحول دیجیتال شناخته می‌شوند. این

(Klapita, 2021). فناوری‌های پیشرفته نظیر هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، و دوقلوی دیجیتال به عنوان محرک‌های اصلی تحول دیجیتال در صنعت ریلی عمل می‌کنند و بدون آن‌ها امکان دستیابی به بلوغ دیجیتال وجود ندارد.

در میان شاخص‌های بُعد فناوری‌های پیشرفته صنعت ۴،۰، هوش مصنوعی با وزن ۰/۳۱۲ در اولویت اول قرار گرفت. این نتیجه با یافته‌های آل و همکاران (Ale et al., 2024) که نقش کلیدی هوش مصنوعی در تحول دیجیتال صنعت ریلی را تأیید کرده‌اند، مطابقت دارد. هوش مصنوعی قابلیت‌هایی نظیر پیش‌بینی، بهینه‌سازی، و تصمیم‌گیری خودکار را فراهم می‌کند که برای بهبود عملکرد سیستم‌های ریلی حائز اهمیت است. فناوری دوقلوی دیجیتال نیز در رتبه دوم با وزن ۰/۲۴۸ قرار گرفت. این نتیجه با مطالعات ایراندونیا و همکاران (Errandonea et al., 2021) که اهمیت دوقلوی دیجیتال در شبیه‌سازی و بهینه‌سازی عملیات ریلی را نشان داده‌اند، سازگار است. دوقلوی دیجیتال امکان آزمایش سناریوهای مختلف، پیش‌بینی رفتار سیستم، و بهینه‌سازی عملیات را بدون تأثیر بر سیستم واقعی فراهم می‌کند. قرارگیری بُعد "کاربردهای عملی و بهبود عملکرد" در رتبه دوم با وزن ۰/۱۷۳ نشان‌دهنده اهمیت پیاده‌سازی عملی فناوری‌ها و تأثیر آن‌ها بر بهبود عملکرد است. این یافته منطقی است، زیرا صرف داشتن فناوری‌های پیشرفته بدون کاربرد عملی آن‌ها منجر به تحول دیجیتال نخواهد شد. همان‌طور که بوستوس و همکاران (Bustos et al., 2021) و گائو، ژانگ و پنگ (Gao, Zhang & Peng, 2022) نیز تأکید کرده‌اند، پیاده‌سازی موفق فناوری‌ها در فرآیندهای عملیاتی کلید موفقیت در تحول دیجیتال است.

حضور بُعد "اقتصاد دیجیتال و مدل‌های کسب‌وکار نوین" در رتبه سوم با وزن ۰/۱۴۲ نشان‌دهنده اهمیت جنبه‌های اقتصادی تحول دیجیتال است. این یافته با نتایج مطالعات فرانز، آیالا و لاراناگا (Franz, Ayala & Larranaga, 2024) و سداجو و همکاران (Sedaju et al., 2024) که بر اهمیت توسعه

اولویت‌بندی عوامل کلیدی موثر بر ارزیابی بلوغ دیجیتال در صنعت ریلی مبتنی بر روش بهترین-بدترین فازی

همراه است که مدیریت مناسب آن‌ها برای موفقیت ضروری است. در این بُعد، تأمین مالی پایدار پروژه‌های نوآوری به عنوان مهم‌ترین چالش شناخته شد که نشان‌دهنده درک خبرگان از اهمیت منابع مالی کافی برای تحول دیجیتال است.

نتایج این مطالعه تا حد زیادی با یافته‌های مطالعات پیشین مطابقت دارد. مطالعه لایتون‌بونادیز و همکاران (Laiton-Bonadiez et al., 2022) نیز نشان داد که فناوری‌های پیشرفته صنعت ۴,۰ نظیر هوش مصنوعی و اینترنت اشیا بیشترین کاربرد را در صنعت ریلی دارند. همچنین، مطالعه گرهاتووا، زیتریکی و گاسپاریک (Gerhátová, Zitrický & Gašparik, 2021) نیز اهمیت کاربردهای عملی فناوری‌ها را تأیید کرده است. تفاوت اصلی این مطالعه با مطالعات پیشین در استفاده از روش فازی BWM برای مدیریت عدم قطعیت‌های موجود در قضاوت‌های خبرگان است. این رویکرد امکان ارائه نتایج دقیق‌تر و قابل اعتمادتری را فراهم می‌کند.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

این پژوهش با هدف اولویت‌بندی عوامل کلیدی موثر بر ارزیابی بلوغ دیجیتال در صنعت ریلی با استفاده از روش بهترین-بدترین فازی انجام شد. یافته‌های حاصل نشان داد که از میان هشت بُعد شناسایی شده، فناوری‌های پیشرفته صنعت ۴,۰ با وزن ۰/۲۸۵ در اولویت نخست قرار دارد، که در آن هوش مصنوعی با وزن ۰/۳۱۲ مهم‌ترین شاخص محسوب می‌شود. کاربردهای عملی و بهبود عملکرد با وزن ۰/۱۷۳ در رتبه دوم و اقتصاد دیجیتال و مدل‌های کسب‌وکار نوین با وزن ۰/۱۴۲ در رتبه سوم اهمیت قرار گرفتند. این نتایج تأیید می‌کند که موفقیت در تحول دیجیتال صنعت ریلی نیازمند رویکردی جامع است که ضمن بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته، بر کاربرد عملی و توجیه اقتصادی آن‌ها تأکید دارد.

این مطالعه چندین سهم نظری و روش‌شناختی مهم ارائه می‌دهد. از منظر نظری، مدل هشت‌بُعدی توسعه یافته که شامل ۳۴

رتبه‌بندی ممکن است نشان‌دهنده کم‌توجهی به اهمیت عامل انسانی در تحول دیجیتال یا فرض اینکه مهارت‌های لازم در حال حاضر موجود است، باشد. با این حال، تجربیات جهانی نشان می‌دهد که بدون سرمایه‌گذاری مناسب در توسعه منابع انسانی و مدیریت دانش، پروژه‌های تحول دیجیتال با شکست مواجه می‌شوند. در این بُعد، انطباق نیروی کار با فناوری‌های جدید بالاترین اولویت را کسب کرد که تأکید بر ضرورت آمادگی نیروی انسانی برای پذیرش و استفاده از فناوری‌های نوین دارد. قرارگیری بُعد "پایداری و سازگاری با محیط زیست" در رتبه هفتم با وزن ۰/۰۶۷ نشان‌دهنده اولویت نسبتاً پایین این بُعد در نظر خبرگان است. این نتیجه تا حدودی نگران‌کننده است، زیرا با توجه به اهمیت روزافزون مسائل زیست‌محیطی و اهداف توسعه پایدار، انتظار می‌رفت این بُعد در اولویت بالاتری قرار گیرد. این یافته ممکن است نشان‌دهنده نگرش کوتاه‌مدت خبرگان یا تمرکز بیشتر بر جنبه‌های فنی و اقتصادی باشد. با این حال، در میان شاخص‌های این بُعد، "سطح بلوغ کاهش مصرف انرژی و بهینه‌سازی سوخت" با وزن ۰/۲۹۷ بالاترین اولویت را کسب کرد که نشان‌دهنده درک خبرگان از اهمیت کارایی انرژی است. این یافته با مطالعات کلجایک و همکاران (Kljaić et al., 2023) و عباس‌نژاد، سلطانی و کاراموزیان (Abbasnejad, Soltani & Karamoozian, 2024) که بر اهمیت بهبود کارایی انرژی در تحول دیجیتال تأکید کرده‌اند، مطابقت دارد.

قرارگیری بُعد "چالش‌ها و موانع دیجیتالی‌سازی" در رتبه آخر با وزن ۰/۰۳۱ نشان‌دهنده نگرش نسبتاً خوش‌بینانه خبرگان نسبت به امکان‌پذیری تحول دیجیتال است. این یافته می‌تواند نشان‌دهنده اعتماد خبرگان به قابلیت‌های صنعت ریلی برای غلبه بر چالش‌های موجود باشد، اما در عین حال می‌تواند خطرناک نیز باشد، زیرا نادیده گرفتن چالش‌ها و موانع واقعی می‌تواند منجر به شکست در پیاده‌سازی شود. تجربیات بین‌المللی نشان می‌دهد که تحول دیجیتال همواره با چالش‌های قابل توجهی

شاخص عملیاتی است، چارچوب جامعی برای ارزیابی بلوغ دیجیتال در صنعت ریلی فراهم می‌کند که برخلاف مطالعات پیشین، ابعاد فناورانه، سازمانی، اقتصادی، زیست‌محیطی و انسانی را به طور یکپارچه در نظر می‌گیرد. از جنبه روش‌شناختی، کاربرد روش بهترین-بدترین فازی امکان مدیریت عدم قطعیت‌های ذاتی موجود در قضاوت‌های خبرگان را فراهم کرده و وزن‌های دقیق و قابل اعتمادی برای عوامل مختلف ارائه داده است. همچنین، در نظرگیری شرایط خاص کشورهای در حال توسعه در فرآیند شناسایی و اولویت‌بندی، خلأ مهمی در ادبیات موجود را پر می‌کند.

یافته‌های این پژوهش راهکارهای عملی و کاربردی مشخصی برای مدیران و سیاست‌گذاران صنعت ریلی ارائه می‌دهد. با توجه به اولویت بالای فناوری‌های پیشرفته صنعت ۴،۰، سازمان‌های ریلی باید سرمایه‌گذاری استراتژیک و هدفمندی در هوش مصنوعی، دوقلوی دیجیتال و اینترنت اشیا انجام دهند که شامل ایجاد مراکز تحقیق و توسعه تخصصی، برقراری شراکت‌های علمی-صنعتی با دانشگاه‌ها، جذب متخصصان برتر، و اختصاص بودجه کافی برای پروژه‌های نوآوری است. اهمیت کاربردهای عملی و بهبود عملکرد ایجاد می‌کند که سازمان‌ها فرآیند پیاده‌سازی فناوری‌ها را با شناسایی دقیق نیازها، طراحی راه‌حل‌های سفارشی، اجرای پروژه‌های آزمایشی، و پایش مستمر نتایج مدیریت کنند. در حوزه اقتصادی، توسعه مدل‌های کسب‌وکار نوآورانه، ایجاد منابع درآمدی جدید از طریق خدمات دیجیتال، و تحقق بازده مناسب سرمایه‌گذاری‌ها از اولویت‌های کلیدی محسوب می‌شود.

علی‌رغم اولویت متوسط امنیت سایبری در نتایج، نادیده گرفتن این موضوع می‌تواند کل فرآیند تحول دیجیتال را با خطر مواجه کند، لذا طراحی سیستم‌های امنیتی چندلایه، توسعه پروتکل‌های بومی، آموزش کارکنان، و ایجاد تیم‌های پاسخ سریع ضروری است. همچنین، سرمایه‌گذاری در توسعه منابع انسانی از طریق برنامه‌های آموزشی تخصصی، بازآموزی نیروی کار موجود، و

ایجاد فرهنگ سازمانی مساعد برای پذیرش تغییر، یکی از پیش‌نیازهای اساسی موفقیت محسوب می‌شود. برای سیاست‌گذاران نیز تدوین سیاست‌های حمایتی، ایجاد صندوق‌های تأمین مالی نوآوری، تعیین استانداردهای ملی، و تسهیل همکاری‌های صنعت-دانشگاه توصیه می‌شود.

این پژوهش با محدودیت‌هایی مواجه بود که باید در تفسیر نتایج مدنظر قرار گیرد. محدودیت جغرافیایی پژوهش که بر صنعت ریلی ایران متمرکز بوده، تعمیم نتایج به سایر کشورها را نیازمند احتیاط و در نظرگیری تفاوت‌های ساختاری، فرهنگی و اقتصادی می‌کند. ماهیت پویای فناوری‌های صنعت ۴،۰ موجب تغییر مستمر اولویت‌ها و ظهور فناوری‌های جدید می‌شود که ممکن است بر اعتبار زمانی نتایج تأثیر گذارد. اندازه نمونه خبرگان اگرچه برای دستیابی به اشیاع نظری کافی بود، اما گسترش آن می‌تواند نتایج دقیق‌تری ارائه دهد. رویکرد روش‌شناختی که عمدتاً بر تحلیل کمی متمرکز بوده، جنبه‌های عمیق کیفی را کمتر پوشش داده است. همچنین، دسترسی محدود به برخی اطلاعات محرمانه سازمانی نیز از جمله محدودیت‌های این مطالعه محسوب می‌شود.

بر اساس یافته‌های این پژوهش، چندین جهت‌گیری برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود. انجام مطالعات تطبیقی در کشورهای مختلف برای شناسایی الگوهای مشترک و تفاوت‌های منطقه‌ای، طراحی و اعتبارسنجی ابزارهای کمی برای ارزیابی بلوغ دیجیتال، اجرای مطالعات طولی برای بررسی تغییرات اولویت‌ها در طول زمان، بررسی تأثیر عوامل شناسایی شده بر شاخص‌های عملکرد سازمانی، توسعه چارچوب‌های عملی پیاده‌سازی، مطالعه نقش فرهنگ سازمانی و رهبری، و تحلیل تأثیر عوامل خارجی نظیر سیاست‌های دولتی و فشارهای رقابتی از جمله موضوعات مهم برای تحقیقات آتی محسوب می‌شوند. در نهایت، یافته‌های این پژوهش تأیید می‌کند که تحول دیجیتال در صنعت ریلی فرآیندی چندبُعدی، پیچیده و مستمر است که موفقیت در آن مستلزم نگرش جامع، برنامه‌ریزی دقیق،

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.225>

– Bianchi, G., Fanelli, C., Freddi, F., Giuliani, F., & La Placa, A. (2025). Systematic review railway infrastructure monitoring: From classic techniques to predictive maintenance. *Advances in Mechanical Engineering*, 17(1), 16878132241285631. <https://doi.org/10.1177/16878132241285631>

– 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)* (pp. 140-148). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6128-0_14

– Brezavšček, A., & Baggia, A. (2025). Recent Trends in Information and Cyber Security Maturity Assessment: A Systematic Literature Review. *Systems*, 13(1), 52. <https://doi.org/10.3390/systems13010052>

– Bustos, A., Rubio, H., Soriano-Heras, E., & Castejon, C. (2021). Methodology for the integration of a high-speed train in maintenance 4.0. *Journal of Computational Design and Engineering*, 8(6), 1605-1621. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwab064>

– 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. <https://doi.org/10.3233/RFT-190210>

– Chowdhury, S.; Alzarrad, A. (2023). Applications of Text Mining in the Transportation Infrastructure Sector: A Review. *Information*, 14, 201. <https://doi.org/10.3390/info14040201>

سرمایه‌گذاری هدفمند، و اجرای مرحله‌ای با توجه به اولویت‌های مشخص شده است. استفاده از روش بهترین-بدترین فازی امکان ارائه راهنمای علمی و عملی قابل اعتمادی برای مدیران و سیاست‌گذاران فراهم کرده که می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های مربوط به تخصیص منابع، برنامه‌ریزی استراتژیک، و طراحی راهبردهای تحول دیجیتال مورد استفاده قرار گیرد.

۷. مراجع

– Abbasnejad, B., Soltani, S., Karamoozian, A., & Gu, N. (2024). A systematic literature review on the integration of Industry 4.0 technologies in sustainability improvement of transportation construction projects: state-of-the-art and future directions. *Smart and Sustainable Built Environment*. <https://doi.org/10.1108/SA-SBE-11-2023-0335>

– Ale, F., Daniyan, I., Aderoba, O., & Adediran, A. A. (2024). 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)* (pp. 1-10). IEEE. <https://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). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25934>

– Azambuja, A. J. G. de, Giese, T., Schützer, K., & Almeida, V. R. (2024). Digital twins in Industry 4.0 – Opportunities and challenges related to cyber security. *Procedia CIRP*, 121, 25-30.

technologies. *Systems Engineering*, 26(6), 908-924.

<https://doi.org/10.1002/sys.21697>

– Gao, X., Zhang, Y., & Peng, J. (2022). NDE 4.0 in railway industry. In *Handbook of Nondestructive Evaluation 4.0* (pp. 951-977). Cham: Springer International Publishing.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-3206-6_13

– Gerháťová, Z., Zitrický, V., & Klapita, V. (2021). Industry 4.0 implementation options in railway transport. *Transportation Research Procedia*, 53, 23-30.

<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.003>

– Gerháťová, Z., Zitrický, V., & Gašparik, J. (2021). Analysis of Industry 4.0 elements in the transport process at the entrance of the train from Ukraine to Slovakia. *Transportation Research Procedia*, 55, 165-171.

<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.06.018>

– Harrod, S. S. (2025). Railway Signal Digitalization with the European Rail Traffic Management System and Positive Train Control: Industry 4.0 Expectations and Reality. *Transportation Research Record*, 03611981241265841.

<https://doi.org/10.1177/03611981241265841>

– Kljaić, Z., Pavković, D., Čipek, M., Trstenjak, M., Mlinarić, T. J., & Nikšić, M. (2023). An Overview of Current Challenges and Emerging Technologies to Facilitate Increased Energy Efficiency, Safety, and Sustainability of Railway Transport. *Future Internet*, 15(11), 347.

<https://doi.org/10.3390/fi15110347>

– 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.

– Dalewska, M., & Mrugalska, B. (2025). Innovative Transport: Environmental, Social, and Economic Aspects. In *Human Perspectives of Industry 4.0 Organizations* (pp. 224-235). CRC Press.

– Dong, K., Romanov, I., McLellan, C., & Esen, A. (2022). Recent text-based research and applications in railways: A critical review and future trends. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 116 (2022) 105435.

<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105435>

– Errandonea, I., Goya, J., Alvarado, U., Beltrán, S., & Arrizabalaga, S. (2021, November). 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)* (pp. 164-168). IEEE.

<https://doi.org/10.1109/ISCSIC54682.2021.00039>

– Francisca, R., Codina, E., & Montero, L. (2022). A combined and robust modal-split/traffic assignment model for rail and road freight transport. *European Journal of Operational Research*, 303(3).

<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.03.008>

– Franz, M. L. C., Ayala, N. F., & Larranaga, A. M. (2024). Industry 4.0 for passenger railway companies: A maturity model proposal for technology management. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 32, 100480.

<https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2024.100480>

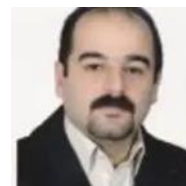
– Galizia, F. G., Bortolini, M., & Calabrese, F. (2023). A cross-sectorial review of industrial best practices and case histories on Industry 4.0

- 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.
<https://doi.org/10.1016/j.clscn.2022.100065>
- Voronko, I. (2024). The security of IoT systems in railway transport. *Transport Systems and Technologies*, (43), 90-99.
<https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-7>
- Wee, X. B., Herrera, M., Hadjidemetriou, G. M., & Parlikad, A. K. (2022). Simulation and criticality assessment of urban rail and interdependent infrastructure networks. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 03611981221103594.
– <https://doi.org/10.1177/03611981221103594>
- Zamany, A., Khamseh, A. and Iranbanfard, S. (2023). Technology Transfer in the Industry 5.0 Era: An Integrated Model of Artificial Intelligence and Human Factors. *Innovation Management Journal*, 12(4), 111-140.
<https://doi.org/10.22034/imj.2024.450323.280> 3 (In Persian)
- Zhao, Y., Yu, X., Chen, M., Zhang, M., Chen, Y., Niu, X., ... & Li, W. J. (2020). Continuous monitoring of train parameters using IoT sensor and edge computing. *IEEE Sensors Journal*, 21(14), 15458-15468.
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3026643>
- <https://doi.org/10.5281/zenodo.14586656>
- Kumar, P., Balachandra, P., & Garza-Reyes, J. A. (2023). Industry 4.0 maturity and readiness assessment: An empirical validation using confirmatory composite analysis. *Production Planning & Control*, 35(1), 1-18.
<https://doi.org/10.1080/09537287.2023.2210545>
- 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.
<https://doi.org/10.3390/s22072491>
- López-Aguilar, P., Batista, E., Martínez-Ballesté, A., & Solanas, A. (2022). Information security and privacy in railway transportation: A systematic review. *Sensors*, 22(20), 7698.
<https://doi.org/10.3390/s22207698>
- Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49-57.
<https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009>
- 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* (pp. 302-330). IGI Global.
<https://doi.org/10.4018/979-8-3693-942-0.ch017>
- Senna, P. P., Barros, A. C., Bonnin Roca, J., & Azevedo, A. (2023). Development of a digital maturity model for Industry 4.0 based on the technology-organization-environment framework. *Computers & Industrial Engineering*, 185, 109645.
<https://doi.org/10.1016/j.ci.e.2023.109645>

سمانه مرادی، درجه کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مدیریت صنعتی را در سال های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۵ از مؤسسه آموزش عالی غزالی قزوین اخذ نمود و در سال ۱۳۹۹ در مقطع دکتری رشته مدیریت صنعتی گرایش تولید و عملیات در دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین پذیرفته شد. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان، مدل های ارزیابی بلوغ سازمانی به ویژه سازمان های صنعتی می باشد.



مهرداد حسینی شکیب، فارغ التحصیل کارشناسی ریاضی کاربردی، گرایش تحقیق در عملیات از دانشگاه تهران ۱۳۶۹ و کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، گرایش مدیریت سیستم و بهره وری از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب ۱۳۷۵ بوده و در سال ۱۳۸۴ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مدیریت صنعتی، گرایش تولید و عملیات از دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران گردیده است. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان همسویی استراتژیک و کاربرد فناوری های نوین در صنعت می باشد و در حال حاضر عضو هیأت علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج می باشد.



علی بدیع زاد، درجه کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مدیریت صنعتی گرایش تحقیق در عملیات را به ترتیب در سال های ۱۳۷۳ و ۱۳۷۸ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی اخذ نمود. ایشان در سال ۱۳۸۸ موفق به کسب درجه دکتری در مدیریت صنعتی با گرایش مدیریت سیستم ها از دانشگاه علوم تحقیقات تهران گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدل های تصمیم گیری و مدیریت رشد و پویایی کسب و کار بوده و در حال حاضر عضو هیأت علمی با مرتبه استادیار از دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین می باشد.

