بررسی و ارزیابی سیستم مناسب روسازی راه‌آهن سریع‌السیر با استفاده از روش DEMATEL فازی

مقاله علمی – پژوهشی

سیدعظیم حسینی *، دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
حسین ملکی طولابی، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: azim_hosseini@azad.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۰– پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵
صفحه ۳۹۰-۳۷۹

چکیده

امروزه، در بسیاری از کشورهای درحال‌توسعه، در راستای دستیابی به اهداف رشد و توسعه پایدار، نیازمند افزایش سرمایه‌گذاری در پروژه‌های زیربنایی می‌باشند. از طرفی، موفقیت کشورها در پروژه‌های زیربنایی و عمرانی ازجمله ویژگی‌های توسعه آنان به شمار می‌آید. در چند دهه اخیر، با ظهور خطوط سریع‌السیر، حمل‌ونقل ریلی شاهد پیشرفت‌ها و تحولات عمده‌ای بوده که ازجمله آن می‌توان به کاهش فاصله اعزام قطارها، افزایش ظرفیت و مهم‌تر از همه، افزایش سرعت قطارها اشاره نمود. نظر به ویژگی‌های خطوط سریع‌السیر و محدودیت ناوگان هوایی، اکثر کشورها استفاده از قطارهای سریع‌السیر را مطمئن‌ترین و به‌صرفه‌ترین روش جابه‌جایی یافته‌اند. برهمین اساس، هدف اصلی این تحقیق، بررسی و اولویت‌بندی سیستم‌های روسازی مناسب قطارهای سریع‌السیر است. جهت تجزیه‌وتحلیل داده‌ها، ابتدا روش‌های مهم روسازی قطارهای سریع‌السیر، با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای شناسایی گردید و در فرآیند تحلیل، از نظرات خبرگان که شامل ۳ کارفرما، ٤ شرکت پیمانکاری، ٤ شرکت مشاور و ۱۱ استاد دانشگاه بود، بهره گرفته شد. در این پژوهش، تعداد ۷ روش که بیشترین درجه تکرارپذیری را داشته‌اند، انتخاب گردید. در ادامه، جهت استفاده از روش DEMATEL فازی، هریک از روش‌ها امتیازدهی گردید و درنهایت تأثیرگذاری و تأثیرپذیری هریک از عوامل، مشخص گردید. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که سیستم رهدا MRT (B1) به‌عنوان تأثیرپذیرترین عامل و روش طرح ساتو (B5) به‌عنوان تأثیرگذارترین گزینه جهت اجرای روسازی راه‌آهن سریع‌السیر، مطرح است.

واژه‌های کلیدی: قطار سریع‌السیر، روسازی، توسعه پایدار، منطق فازی

۱-مقدمه

اهمیت بخش حمل‌ونقل به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های زیربنایی هر کشور در تحرک و پویایی جامعه جهت دستیابی به اهداف برنامه‌های توسعه اقتصادی و اجتماعی کشور، بر کسی پوشیده نیست؛ اما یکی از اصلی‌ترین عواملی که می‌تواند در امر سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی‌های کلان مدیران ارشد کشور به‌منظور تحقق اهداف فوق، نقش هدایت‌کننده‌ای را ایفا نماید، وجود پیش‌بینی دقیقی از میزان جابجایی‌ها در بخش حمل‌ونقل است که امکان جهت‌گیری صحیح مدیران، کارشناسان و دست‌اندرکاران امر حمل‌ونقل را درزمینه تعیین اهداف، سیاست‌ها و برنامه‌های کلان این بخش فراهم می‌کند. حال با توجه به هزینه بسیار زیاد بخش ریلی در ساخت و توسعه خطوط و تأمین ناوگان موردنیاز، اهمیت پیش‌بینی در این سیستم حمل‌ونقل، دوچندان می‌شود (یقینی و طالبی، ۱۳۹۲). از دید ناظر سوار بر قطار، وجه تمایز خطوط آهن سریع‌السیر با خطوط معمولی، سرعت حرکت بالای قطار و درنتیجه اعمال شتاب‌های جانبی و قائم به واگن و مسافرین

است. از دیدگاه مشخصات فنی لازم برای خطوط آهن، نکته مهم حفظ ایمنی و پایداری خط به هنگام عبور قطار است. لذا همواره در طرح خطوط آهن سریع‌السیر دو جنبه اساسی که یکی حصول اطمینان از حرکت ایمن قطار در سراسر طول خط و دیگری ایجاد شرایط شتاب قابل‌تحمل برای مسافرین و رعایت آسایش آن‌ها است، مدنظر است (نجاتی، روانشادنیا و ساده، ۱۳۹۶). قطارهای پرسرعت در کشورهای مختلفی از قبیل فرانسه (T.G.V)، ژاپن (شینکانسی) و آلمان (I.C.E) مورداستفاده قرار دارند و امروزه قریب به‌اتفاق راه‌آهن‌های مدرن و پیشرفته دنیا در پی دستیابی و استفاده از تکنولوژی قطارهای پرسرعت است. در کشورها از حدود ده سال قبل در قسمت‌های مختلف، راه‌اندازی قطارهای پرسرعت در مسیرهای پرترافیک همواره مطرح و موردبحث هست. یکی از مهم‌ترین پارامترهای موردبحث در ایجاد خطوط پرسرعت، سیستم روسازی مناسب این‌گونه سرعت هست و طبق تعریف خط پرسرعت خطی است که اختصاصاً برای سرعت ۲۵۰ کیلومتر در ساعت به بالا ساخته و تجهیز باشد و یا خط موجودی که برای سرعت حدود ۲۰۰ کیلومتر در ساعت ارتقاءیافته باشد (نجاتی، روانشادنیا و ساده، ۱۳۹۶).

در این‌گونه خطوط، نوع سیستم روسازی، ریل‌ها، تراورس‌ها و ادوات و نوع اجرا و روی ساخت و هزینه‌های تعمیر و نگهداری و زمان عملیات تعمیر و نگهداری کاملاً از سیستم کلاسیک مجزا است. به‌علت افزایش و تعدد معیارها، اتخاذ تصمیم بهینه، دشوار است لذا جهت انتخاب سیستم مناسب روسازی راه‌آهن سریع‌السیر (به‌طور خاص برای کشور ایران) بایستی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره[1] فازی استفاده نمود. بر این اساس در این مقاله، به بررسی و ارزیابی سیستم روسازی راه‌آهن سریع‌السیر برای گروه ۱ (سرعت ۲۵۰ کیلومتر در ساعت به بالا) بر پایه ۷ روش مهم همراه با امتیازبندی و وزن‌دهی با آن‌ها، تعیین می‌گردد. در فضای تصمیم‌گیری چندمعیاره با استفاده از تکنیک DEMATEL[2] فازی، این مسئله تحلیل می‌شود. در این راستا از کارشناسان خبره و جمعی از اساتید دانشگاه در تعیین معیارهای تصمیم‌گیری و امتیازدهی به آن‌ها، استفاده می‌گردد. همچنین فرضیات موردبحث در پژوهش حاضر عبارتند از:

-روش DEMATEL فازی می‌تواند رتبه‌بندی دقیقی از عوامل اثرگذار بر انتخاب سیستم مناسب روسازی راه‌آهن سریع‌السیر، ارائه کند.

-به‌روز کردن و بررسی همه عوامل تأثیرگذار، موجب انتخاب دقیق و کارآمدتر این نوع سیستم، خواهد شد.

۲-پیشینه تحقیق

در سال ۱۳۸۶، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، در نشریه شماره ۳۹۴ با عنوان دستورالعمل طراحی و نظارت بر روسازی راه‌آهن سریع‌السیر، در خصوص روش‌های اجرا سیستم روسازی ریلی راه‌آهن سریع‌السیر، اعلام نموده است که روش‌های اجرای آن توسط شرکت‌های راه‌آهن و به خصوص پیمانکاران این امر در دنیا مورداستفاده قرار می‌گیرد و از تنوع نسبتاً زیادی برخوردار است؛ اما در یک تقسیم‌بندی کلی، روش‌های احداث را به دو گروه ریل‌گذاری پیوسته و ریل‌گذاری منقطع، تقسیم‌بندی می‌کنند. البته با توجه به روش نصب تراورس‌ها نیز می‌توان روش اجرای عملیات را طبقه بندی نمود که این خود متأثر از روش ریل گذاری است (نشریه شماره ۳۹۴، ۱۳۸۶). شرکت راه‌آهن شهری تهران و حومه (مترو) در سال ۱۳۸۶، با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی، به مقایسه فنی در خصوص سیستم روسازی ریلی مسیر خط هفت متروی تهران پرداخت و اعلام نمود که سیستم روسازی با تراورس دی بلوک مدفون در دال بتنی، گزینه ارجح در اجرای سیستم روسازی در قطارهای سریع السیر خواهد بود (شرکت راه‌آهن شهری تهران و حومه، ۱۳۸۶). یاداو و همکاران در سال ۲۰۰۷ میلادی، به بررسی موردی قطارهای سریع‌السیر در کشورهای اروپایی و شرق آسیا پرداختند و پس از بررسی روش‌های مختلف اجرای روسازی راه‌آهن‌های سریع‌السیر، دریافت‌اند که انتخاب نوع سیستم مناسب در اجرای روسازی در این نوع قطارها بیشتر با تمرکز بر روی مسائل اقتصادی انتخاب‌شده است و سایر عوامل از رده پایین‌تری برخوردار هست. همچنین این نوع راه‌آهن‌ها جهت استفاده در فواصل حدود ۲۰۰ تا ۸۰۰ کیلومتر، خصوصاً در ۳۰۰ تا ۶۰۰ کیلومتر توجیه‌پذیر است (Yadav et al., 2007). کوریا و همکاران در سال ۲۰۱۱ میلادی به بررسی سایش موجدار ریلی در خطوط راه‌آهن با سرعت‌بالا پرداختند و این عامل را شایع‌ترین مورد خرابی در این نوع خطوط اعلام نمودند. نتایج پژوهش آن‌ها حاکی از آن است که انتخاب سیستم مناسب روسازی در خطوط سریع‌السیر راه‌آهن، موجب کاهش اثرات منفی این نوع خرابی خواهد شد (Correa et al., 2011). طی پژوهش پورای و پریست در سال ۲۰۱۱ میلادی که با تحقیقات میدانی و نیز استفاده از نرم‌افزار ABAQUS، صورت پذیرفت، به بررسی ارتعاشات در

روش‌های مختلف اجرای روسازی راه‌آهن‌های سریع‌السیر، پرداختند و مشخص گردید که عدم انتخاب روش صحیح در اجرای روسازی، ضمن افزایش آلودگی صوتی، باعث لرزش بیشتر قطار و درنتیجه عدم احساس آرامش مسافران و نیز تخریب سریع‌تر خطوط راه‌آهن خواهد شد (Powrie and Priest, 2011). طی پژوهش برخورداری و فلاحی سال ۱۳۹۱، با عنوان "انواع روسازی بدون بالاستی خطوط راه‌آهن و مزایا و معایب هرکدام و ارائه یک سیستم مناسب روسازی بدون بالاست در ایران" دریافت‌اند که سیستم روسازی بالاستی، سیستم مرسوم و قدیمی بوده ولی با توجه به هزینه‌های تعمیر و نگهداری بالای بالاست، بهتر است از سیستم روسازی بدون بالاست استفاده گردد. همچنین سیستم روسازی کوپلاژ مدفون، سیستمی است که در ایران تجربه‌شده ولی به لحاظ اقتصادی، مقرون‌به‌صرفه نبوده و بهتر است از سیستم جایگزین بانام سیستم روسازی رهدا، استفاده گردد (برخورداری و فلاحی، ۱۳۹۱). طی تحقیقات کی‌منش و گنجی در سال ۱۳۹۳ که به بررسی مشخصات قطارهای سریع‌السیر پرداختند، مشخص گردید باتوجه به این‌که حدود ۹۰ درصد هزینه اجرای قطارهای سریع‌السیر مربوط به ساخت زیرساخت مناسب است، با انتخاب سیستم مناسب قطارهای سریع السیر، ضمن کاهش هزینه‌ها، می‌توان رفاه اجتماعی را نیز فراهم نمود (کی‌منش و گنجی، ۱۳۹۳). در سال ۱۳۹۳، رحمانی و حمیدی در تحقیق خود به بررسی و لزوم استفاده از راه‌آهن سریع‌السیر پرداختند و اعلام نمودند که توسعه حمل‌ونقل ریلی به‌ویژه راه‌آهن سریع‌السیر به دلیل دارا بودن مزیت‌هایی از قبیل آلودگی بسیار کم، قابلیت بالای ترانزیت، کاهش حوادث رانندگی، قابلیت بسیار بالا در بخش جابه‌جایی مسافر، رفاه و ایمنی بیشتر و کاهش مصرف انرژی، نیازمند برنامه‌ریزی دقیق و تدوین استراتژی است (رحمانی و حمیدی، ۱۳۹۳).

سردلوا و ویکان طی پژوهش خود در سال ۲۰۱۵ میلادی، به اهمیت موضوع نوسازی خطوط راه‌آهن در مقیاس جهانی پرداختند و در ادامه اقدام به تجزیه‌وتحلیل و طراحی پل‌های فولادی با مسیر بدون بالاست در خطوط سریع‌السیر راه‌آهن، نمودند (Serdelová and Vičan, 2015). در پژوهش فداکار ماسوله و کی منش که در سال ۱۳۹۵ صورت پذیرفت، به بررسی هزینه‌های ساخت و نگهداری خطوط ریلی سریع‌السیر پرداختند و اعلام نمودند که راه‌آهن سریع‌السیر نسل پیشرفته وسایل نقلیه است. این روش، در حال رقابت با سایر سیستم‌های حمل‌ونقل و در رأس آن‌ها روش هوایی است، چراکه دارای پنج مقوله ایمنی، راحتی، دسترسی، صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌ها است (فداکار ماسوله و کی منش، ۱۳۹۵). در پژوهشی که در سال ۱۳۹۵، توسط صاحب الزمانی در مورد سیستم روسازی هوشمند در راه‌آهن‌های سریع‌السیر انجام گرفت، مشخص گردید که انتخاب سیستم مناسب جهت روسازی راه‌آهن‌های سریع‌السیر موجب به افزایش قابلیت اطمینان و کیفیت، کاهش زمان نصب و راه‌اندازی، کاهش آلودگی صوتی و کاهش هزینه‌های نگهداری خواهد شد (صاحب‌الزمانی، ۱۳۹۵).

صدر و همکاران در پژوهشی که در سال ۱۳۹۵ انجام دادند، اعلام نمودند که به دلیل آن‌که حمل‌ونقل ریلی یکی از امن‌ترین و پاک‌ترین شیوه‌های حمل و بار و مسافر است، لذا تحقیق بر روی عملکرد زیرسیستم‌های آن می‌تواند موضوعی در راستای نیاز صنعت باشد. ازاین‌رو، داشتن مدلی جهت سیستم کنترل سرعت قطار الکتریکی با لحاظ لغزش چرخ بر روی ریل، می‌تواند مفید واقع گردد (صدر و همکاران، ۱۳۹۵).

کین و جائو در سال ۲۰۱۷ میلادی به بررسی تحولات و چشم‌انداز فناوری‌های راه‌آهن سریع‌السیر در چین پرداختند و در مورد مواد با کارایی بالا و تکنیک‌های نوین ساخت و نصب روسازی قطارهای سریع‌السیر، روش‌های مختلفی را ارائه نمودند (Qin & Gao, 2017). طی تحقیق خوشبخت و همکاران که در سال ۱۳۹۶ صورت پذیرفت، اعلام گردید که مسئله مسیریابی وسیله نقلیه شامل مسیریابی برای یک ناوگان وسیله نقلیه به‌منظور سرویس‌دهی به تعدادی مشتری باهدف کمینه‌سازی فاصله‌های پیموده شده توسط همه وسایل نقلیه است. به همین منظور، یک الگوریتم ترکیبی اصلاحی مورچگان برای حل مسئله مسیریابی وسیله نقلیه ارائه نمودند. نتایج روی ۱۶ مثال استاندارد، کارایی روش پیشنهادی آن‌ها را در به دست آوردن جواب‌های باکیفیت نسبت به بهترین روش‌های فرا ابتکاری نشان می‌دهد (خوشبخت و همکاران، ۱۳۹۶).

سلماس نیا و همکاران در سال ۱۳۹۷ در پژوهشی به بررسی بهینه‌سازی چندهدفه متوسط زمان سفر در خطوط مترو با در نظر گرفتن توأم اثرات مکانی و پراکندگی، پرداختند و مشخص گردید که تنظیم زمان‌های پیشروی قطارها (فاصله زمانی میان شروع حرکت دو قطار متوالی) یک مسئله مهم برای

شرکت‌های راه‌آهن شهری محسوب می‌گردد. ازاین‌رو، به‌منظور بررسی عملکرد رویکرد پیشنهادی، خط ٤ مترو تهران مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده برتری رویکرد پیشنهادی را نسبت به تکنیک‌های موجود نشان می‌دهد (سلماس نیا و همکاران، ۱۳۹۷). طی پژوهش نتوسیوس و همکاران در سال ۲۰۱۹ میلادی که به بررسی میزان ارتعاش در انواع مهم روسازی راه‌آهن سریع‌السیر پرداختند، مشخص گردید که انتخاب سیستم مناسب روسازی باعث ارتعاش کمتر خواهد شد (Ntotsiosa et al., 2019). لایراتزاکیس و همکاران در مقاله خود که در سال ۲۰۲۰ میلادی صورت گرفت، به دلیل آن‌که ارتعاش ناشی از قطارهای سریع‌السیر تأثیرات منفی بر ساکنین اطراف این نوع خطوط دارد، با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS به مدل‌سازی انواع مهم زیرسازی خطوط سریع‌السیر پرداختند (Lyratzakis et al., 2020).

وان و همکاران طی پژوهشی در سال ۲۰۲۰ میلادی، به بررسی زیرسازی خطوط راه‌آهن سریع‌السیر بدون بالاست پرداختند. پژوهش آن‌ها که بر اساس مطالعات میدانی و آزمایشگاهی انجام گرفت، مشخص نمود که استفاده از مصالح و خطوط جدید در این نوع خطوط، موجب کاهش نشست زیرسازی در آن‌ها خواهد شد (Wan et al., 2020).

طی تحقیقی که توسط وانگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ میلادی، صورت گرفت به بررسی روش طراحی زیرسازی خطوط راه‌آهن سریع‌السیر با سرعت ٤۰۰ کیلومتر بر ساعت پرداختند و پارامترهای اساسی طراحی یک ساختار مناسب در مسیرهای بدون بالاست با سرعت‌بالا را ارائه نمودند به‌نحوی‌که سبب بهینه‌سازی طراحی زیرسازی این نوع خطوط می‌شود و همچنین موجب خواهد گردید که از قطارهای سریع‌السیر در سرعت‌های بالای ٤۰۰ کیلومتر بر ساعت نیز استفاده نمود (Wang et al., 2020).

در تحقیق دهقانی فیل‌آبادی و حسامیان که در سال ۱۳۹۸ صورت پذیرفت، اعلام نمودند، در بسیاری از مسائل تصمیم‌گیری، برای مقابله با ابهام موجود در داده‌های زبانی، از مجموعه‌های فازی استفاده می‌شود. بااین‌حال، برای انجام مقایسه بین شاخص‌ها و تعیین رتبه گزینه‌ها، در حین فرایند حل مسئله این داده‌ها دیفازی می‌شوند. دیفازی سازی باعث می‌شود بخش زیادی از اطلاعات مسئله از بین برود. ازاین‌رو، یک روش پیشنهادی برای رتبه‌بندی فازی در تصمیم‌گیری چندشاخصه چند دوره‌ای در محیط فازی نوع-۲ ارائه نمودند. نتایج حاصل نشان داد که رتبه‌بندی گزینه‌ها درروش پیشنهادی، از جامعیت بیشتری نسبت به روش پیشین، برخوردار است. سپس ارزیابی ابعاد کیفیت خدمات سناریوهای حمل‌ونقل عمومی شهرکرد به‌عنوان‌مثال کاربردی واقعی ارائه شد و رتبه فازی گزینه‌ها تعیین گردید (دهقانی فیل‌آبادی و حسامیان، ۱۳۹۸). طی پژوهش لینگ و همکاران که در سال ۲۰۲۰ میلادی، انجام پذیرفت، به بررسی ارتعاش زمین و سروصدای ناشی از قطارهای پرسرعت خصوصاً قطارهای شهری پرداختند و انواع مختلف و مهم روش‌های اجرایی این نوع خطوط را بررسی نمودند و مشخص گردید که استفاده از بلوک‌های الاستیک بهترین عملکرد را در جذب نیروهای ریل چرخ قطار با فرکانس متوسط و بالا را دارد (Ling et al., 2020).

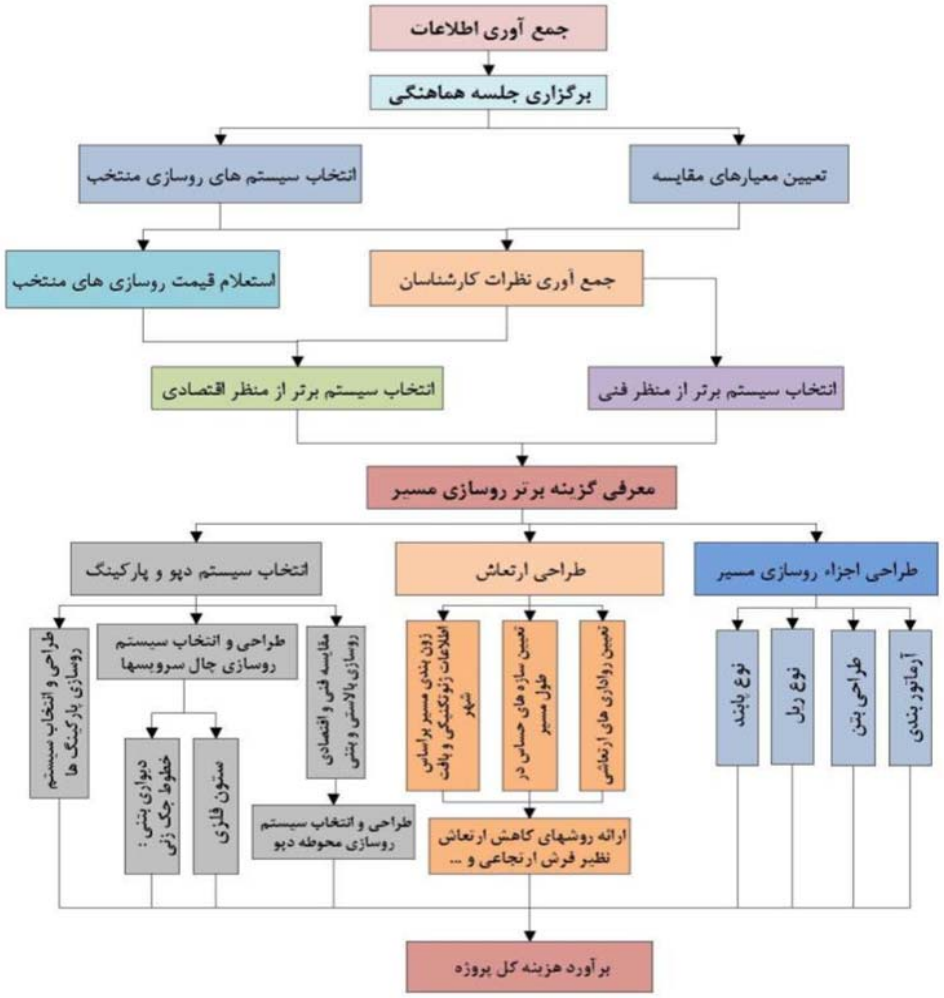
پونز و همکاران در سال ۲۰۲۰ میلادی، در پژوهش خود، به بررسی و مقایسه زیرسازی راه‌آهن سریع‌السیر بالاست و بدون بالاست پرداختند. طی پژوهش آن‌ها مشخص گردید که جهت انتخاب سیستم مناسب، عوامل اقتصادی، محیطی و فنی، حائز اهمیت می‌باشند (Pons et al., 2020).

طی تحقیقات اصغری و همکاران که در سال ۲۰۲۱ میلادی، صورت گرفت، به بررسی و ارزیابی عددی تأثیر نوع سیستم روسازی راه‌آهن سریع‌السیر بر عملکرد این نوع قطارها نمودند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد که عدم انتخاب سیستم مناسب روسازی راه‌آهن سریع‌السیر، موجب تغییر شکل‌ها و خرابی در زیرسازی آن‌ها خواهد شد، به‌نحوی‌که با افزایش سرعت از ۱۲۰ به ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت، شاهد ۲۵ درصد تغییر شکل زیرسازی خواهیم بود (اصغری و همکاران، ۲۰۲۱).

در مورد فرآیند تصمیم‌گیری در یک مسئله خاص، هنگامی‌که تعداد معیارها و انتخاب‌ها زیاد باشد، فرآیند تصمیم‌گیری نیز پیچیده خواهد بود. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، شاخه-ای از روش‌های تصمیم‌گیری هستند که با استفاده از روابط ریاضی و استدلال‌های عقلی، فرآیند تصمیم‌گیری را برای انسان تسهیل می‌سازند. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌دفعات توسط محققین مختلف در حل مسائل واقعی مورداستفاده قرارگرفته است و تحقیقات فراوانی در سال‌های اخیر، روش DEMATEL فازی را تائید می‌کنند (Chen, Lin and Huang, 2006).

روند انجام مطالعات انتخاب سیستم روسازی در راه‌آهن سریع‌السیر

استفاده از تجربیات حاصل از پروژه‌های پیشین به مهندسین کمک می‌کند تا پروژه‌های پیش رو را با صرف هزینه و وقت کمتر و یا به عبارت ساده‌تر با حداکثر راندمان انجام دهند. پس از انجام مطالعات اولیه و برگزاری جلسات همفکری با کارشناسان امر و استفاده از تجربیات آنان، سیستم روسازی منتخب برای مسیر اصلی تعیین می‌گردد. با توجه به این‌که نظر برخی کارفرمایان بر هماهنگ بودن سیستم‌های روسازی مسیر و محوطه دپو هست، بنابراین مرحله گزینش روسازی محوطه دپو پس از انتخاب روسازی مسیر اصلی است. از طرفی دیگر با توجه به این‌که سیستم جاذب ارتعاش از نوع ساختار سیستم روسازی تبعیت می‌کند، بنابراین این نکته حائز اهمیت است که گزینش این سیستم پس از انتخاب قطعی روسازی مسیر صورت پذیرد. سیستم‌های انتخاب‌ش ده برای مسیر اصلی، محوطه دپو و نیز سیستم جاذب ارتعاشات اساس مطالعات مرحله دوم را تشکیل داده و از آن مهم‌تر، هزینه‌های اجرایی پروژه را تحت تأثیر قرار می‌دهند (راد و بابایی، ۱۳۸۹).



شکل ۱. روند انجام مطالعات انتخاب سیستم روسازی در راه‌آهن سریع‌السیر (راد و بابایی، ۱۳۸۹)

۳-روش تحقیق

روش گردآوری اطلاعات در پژوهش حاضر، از نوع توصیفی- تحلیلی بر پایه مطالعات کتابخانه‌ای است. اطلاعات لازم در این پژوهش، با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای و همچنین، ضمن تکمیل چک‌لیست به‌صورت کیفی جمع‌آوری‌شده و پس‌ازآن برای انجام محاسبات ازنظر کارشناسان خبره درزمینه روسازی قطار سریع‌السیر و با توجه به

جدول ارائه‌شده درروش DEMATEL فازی برای تبدیل اطلاعات کیفی به‌کمی استفاده‌شده است.

٤-روش DEMATEL فازی

روش DEMATEL فازی اولین بار توسط BMI[3] در مرکز تحقیق جنوا در سال ۱۹۷۳ میلادی به‌کار گرفته شد. این روش، یک روش توسعه‌یافته برای ساخت و تحلیل یک مدل ساختاری برای تحلیل اثر روابط میان معیارهای پیچیده است. گرچه تصمیم‌گیری در محیط فازی برای تقسیم‌بندی فاکتورهای پیچیده بسیار سخت است (Chang, Chang and Wu, 2011). برای استفاده از این روش، به‌نظر کارشناسان نیاز است و این نظرات دربردارنده عبارت کلامی مبهم و دوپهلو است. به‌منظور یکپارچه‌سازی و رفع ابهام آن‌ها، بهتر است که این عبارات به اعداد فازی تبدیل شوند. کدبندی تبدیل به اعداد مثلثی فازی که توسط لی در سال ۱۹۹۹ میلادی پیشنهادشده و مورد تائید قرارگرفته است، در جدول ۱ ارائه‌شده است.

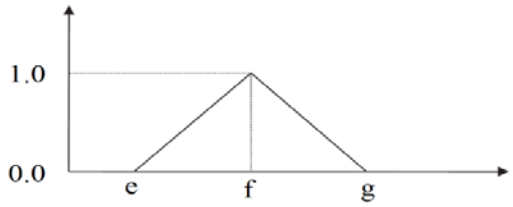
جدول ۱. تناظر عبارات کلامی و عدد تأثیر معادل با آن با مقادیر اعداد فازی مثلثی (Chang, Chang and Wu, 2011)

عدد تأثیر	عبارات کلامی	اعداد فازی
۰	بدون تأثیر	(۰،۰،۰،۲۵)
۱	تأثیر خیلی کم	(۰،۰،۲۵،۰،۵)
۲	تأثیر کم	(۰،۲۵،۰،۵،۰،۷۵)
۳	تأثیر زیاد	(۰،۵،۰،۷۵،۱)
٤	تأثیر خیلی زیاد	(۰،۷۵،۱،۱)

مراحل روش DEMATEL فازی به‌شرح ذیل هست:

گام اول: جهت ساخت یک ماتریس مقایسه دوبه‌دو در این مرحله، با استفاده از پرسشنامه از افراد خبره و کارشناس، خواسته می‌شود که میزان تأثیر هر شاخص را طبق جدول ۱، در مقیاس ۰ تا ٤ ارزیابی کنند (Li et al., 2020).

گام دوم: در این مرحله، بایستی ماتریس روابط مستقیم (A) محاسبه گردد که با توجه اعداد فازی مثلثی (TFN) بهره می‌گیریم. هر عدد فازی مثلثی را با e، f و g برای توضیح یک واقعه فازی بیان می‌شود. پارامترهای e، f و g به‌ترتیب کمترین، امیدوارکننده‌ترین و بیشترین مقدار ممکن را تعیین می‌کنند. شکل ۲ پارامترهای e، f و g را در بازه [۰،۱] نشان می‌دهد (Deng, 1999).



شکل ۲. اعداد فازی مثلثی (Deng, 1999)

با فرض $x_{ij}^k = e_{ij}^k . f_{ij}^k . g_{ij}^k$ که در آن $1 \le k \le K$ مقدار ارزیابی فازی بوده و k^{th} نرخ شرکت‌کننده در پژوهش است که در مورد میزان تأثیرگذاری i بر روی j است. اگر K تعداد شرکت‌کنندگانی باشد که علیت رابین n موانع شناسایی‌شده تخمین می‌زنند، ورودی‌های داده‌شده توسط شرکت‌کنندگان منجربه ایجاد یک ماتریس n×n می‌شود، یعنی خواهیم داشت: $X^k = x_{ij}^k$ که در آن $k = 1.2.3 \dots . n$ (تعداد شرکت-کنندگان در پژوهش) است و از معادله ۱ به‌دست می‌آید (Li et al., 2020).

$$a_{ij} = \frac{1}{k \sum xkij} \quad (۱)$$

پس‌ازآن، بایستی فرآیند رفع تصحیح اعداد فازی را به اعداد واضح تبدیل کرد تا انجام عملیات ماتریس امکان‌پذیر شود. معادله ۲ برای تبدیل ماتریس رابطه مستقیم فازی استفاده شد (Li et al., 2020).

$$I_T = \frac{1}{6}(e + 4f + g) \quad (۲)$$

گام سوم: ساخت ماتریس رابطه مستقیم اولیه نرمال (D) (Li et al., 2020).

$$m = \min[\frac{1}{max \sum_{j=1}^{n} |a_{ij}|} \cdot \frac{1}{max \sum_{i=1}^{n} |a_{ij}|}] \quad (۳)$$

$$D = \mathrm{m} \times \mathrm{A} \quad (٤)$$

گام چهارم: به‌دست آوردن ماتریس رابطه کل

$$T = (I - D)^{-1} \quad (۵)$$

که در آن I ماتریس هویت و T ماتریس رابطه کل ($T = [t_{ij}]_{n\times n}$) است (Li et al., 2020).

گام پنجم: محاسبه مجموع سطرها (R) و جمع ستون‌ها (C)

$$R = [\sum_{j=1}^{n} t_{ij}]_{n\times 1} \quad (۶)$$

$$C = [\sum_{i=1}^{n} t_{ij}]_{1\times n} \quad (۷)$$

که در آن R نشان‌دهنده تأثیر کلی است که i بر روی j دارد و C مخفف کل تأثیر تجربه‌شده توسط i از j است (Li et al., 2020).

گام ششم: رسم نمودار علت و معلولی (علّی)

نمودار علت و معلولی (علّی) با استفاده از مجموعه داده‌های (R+C) و (R−C) رسم خواهد شد. محور افقی (R+C) است که نشان‌دهنده اهمیت شاخص است. محور عمودی (R−C) است که می‌تواند شاخص‌ها را به دوگروه علت و معلول تقسیم کند. اگر این مقدار مثبت باشد، این شاخص به گروه‌علت (تأثیرگذار) و در صورت منفی بودن، متعلق به گروه‌معلول (تأثیرپذیر) است (Lin, 2013).

مهم‌ترین سیستم‌های مناسب جهت روسازی راه‌آهن سریع‌السیر

مهم‌ترین سیستم‌های مناسب جهت روسازی راه‌آهن سریع‌السیر که در این پژوهش که با استفاده از روش مطالعه کتابخانه‌ای و همچنین استفاده از نظرات خبرگان و کارشناسان مربوطه، استخراج گردیده است، در جدول ۲ نشان داده‌شده است.

جدول ۲. مهم‌ترین سیستم‌های مناسب جهت روسازی راه‌آهن سریع‌السیر (منبع: نگارنده)

شاخص	نماد نام‌گذاری
سیستم رهدا MRT[۴]	B۱
سیستم ریل مدفون ERC	B۲
سیستم دال بتنی Shinkansen[۵]	B۳
سیستم STEDEF	B٤
طرح ساتو[۶]	B٥
سیستم IPA	B٦
سیستم دال بتنی PACT[۷]	B۷

یافته‌های تحقیق

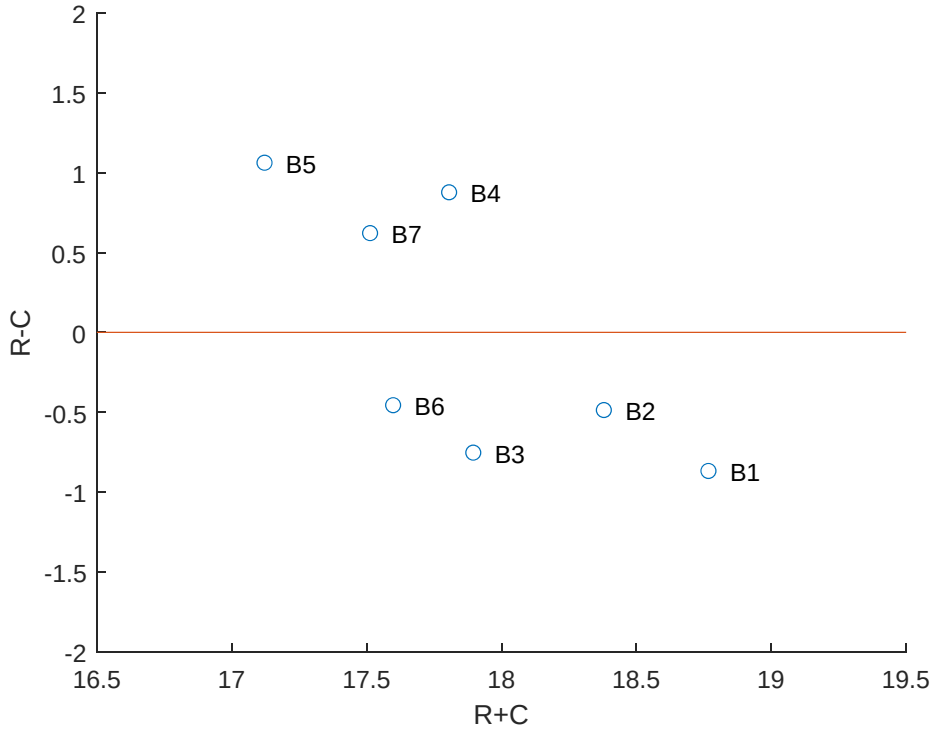
در روش DEMATEL فازی، با استفاده از جداول امتیازدهی که برای هر معیار و مقادیری که توسط خبرگان برای آن‌ها تعیین‌شده است، مقادیر Ri، Ci، R-C و R+C آن‌ها تعیین گردید. جدول امتیازدهی مهم‌ترین سیستم‌های مناسب جهت روسازی راه‌آهن سریع‌السیر در جدول ۳ ارائه‌شده است. نتایج مربوط به مهم‌ترین سیستم‌های مناسب جهت روسازی راه‌آهن سریع‌السیر با استفاده از روش DEMATEL فازی در جدول ٤ نشان داده‌شده است. نمودار علت و معلولی (علّی) نیز در شکل ۳ ارائه گردیده است.

جدول ۳. جدول امتیازدهی مهم‌ترین سیستم‌های مناسب جهت روسازی راه‌آهن سریع‌السیر

	B۱	B۲	B۳	B٤	B٥	B٦	B۷
B۱	۰	٤	٤	٤	۳	٤	٤
B۲	۳	۰	۳	۳	٤	۳	٤
B۳	۳	۳	۰	۳	٤	۳	۳
B٤	۳	۲	۳	۰	۳	۳	۲
B٥	۲	۳	۲	۳	۰	۲	۳
B٦	٤	۳	۳	۳	۲	۰	۳
B۷	۳	۳	۲	۳	۳	۲	۰

جدول ٤. جدول نتایج نهایی مهم‌ترین سیستم‌های مناسب جهت روسازی راه‌آهن سریع‌السیر

	R_i	C_i	R-C	R+C
B۱	۸/۹٥۰	۹/۸۱٦	-۰/۸٦٦	۱۸/۷٦۷
B۲	۸/۹٤٦	۹/٤۳۲	-۰/٤۸٥	۱۸/۳۷۹
B۳	۸/٥۷۱	۹/۳۲۳	-۰/۷٥۲	۱۷/۸۹٥
B٤	۹/۳٤۱	۸/٤٦٤	۰/۸۷٦	۱۷/۸۰٥
B٥	۹/۰۹۱	۸/۰۲۹	۱/۰٦۱	۱۷/۱۲۱
B٦	۸/٥۷۱	۹/۰۲٦	-۰/٤٥٥	۱۷/٥۹۸
B۷	۹/۰٦٦	۸/٤٤٥	۰/٦۲۱	۱۷/٥۱۲



شکل ۳. نمودار علت و معلولی (علّی) مهم‌ترین سیستم‌های مناسب جهت روسازی راه‌آهن سریع‌السیر

با توجه به شکل ۳ روش‌های B۱، B۲، B۳ و B٦ به‌عنوان عوامل تأثیرپذیر و روش‌های B٤، B۷ و B۵ به‌عنوان عوامل تأثیرگذار مشخص گردیدند. همچنین نتایج تحقیق نشان می‌دهد که روش B۱ (سیستم رهدا MRT) تأثیرپذیرترین عامل و روش B۵ (طرح ساتو) تأثیرگذارترین عامل جهت اجرای روسازی راه‌آهن سریع‌السیر، می‌باشند.

۵-نتیجه‌گیری

توسعه حمل‌ونقل ریلی به‌ویژه راه‌آهن سریع‌السیر به دلیل دارا بودن مزیت‌هایی از قبیل آلودگی بسیار کم، قابلیت بالای ترانزیت، کاهش حوادث رانندگی، قابلیت بسیار بالا در بخش جابه‌جایی مسافر، رفاه و ایمنی بیشتر و کاهش مصرف انرژی نیازمند برنامه‌ریزی دقیق و تدوین استراتژی است. لذا استفاده از روش‌های جدید جهت اجرای روسازی راه‌آهن سریع‌السیر به‌عنوان رویکرد نوین، بایستی مدنظر قرار گیرد. از طرفی، در دنیای واقعی بسیاری از فاکتورهای کمی و کیفی همچون کیفیت، قیمت، انعطاف‌پذیری و عملکرد تحویل می‌بایستی برای تصمیم‌گیری‌ها، موردتوجه قرار گیرد. بدین منظور می‌توان برای تعیین نرخ‌ها و وزن‌ها از متغیرهای گفتاری استفاده نموده و آن‌ها را به‌صورت اعداد فازی بیان نمود. ازاین‌رو، در پژوهش حاضر، مهم‌ترین روش‌های اجرای روسازی راه‌آهن سریع‌السیر با استفاده از روش DEMATEL فازی موردبررسی و ارزیابی قرار گرفت. جهت تجزیه‌وتحلیل داده‌ها، ابتدا روش‌های مهم روسازی قطارهای سریع‌السیر، با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای شناسایی گردید و در فرآیند تحلیل، از نظرات خبرگان که شامل ۳ کارفرما، ٤ شرکت پیمانکاری، ٤ شرکت مشاور و ۱۱ استاد دانشگاه بود، بهره گرفته شد. در این پژوهش، تعداد ۷ روش که بیشترین درجه تکرارپذیری را داشته‌اند، انتخاب گردید. در ادامه، جهت استفاده از روش DEMATEL فازی، هریک از روش‌ها امتیازدهی گردید و درنهایت تأثیرگذاری و تأثیرپذیری هریک از عوامل، مشخص گردید. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که سیستم رهدا MRT (B۱) به‌عنوان تأثیرپذیرترین عامل و روش طرح ساتو (B۵) به‌عنوان تأثیرگذارترین گزینه جهت اجرای روسازی راه‌آهن سریع‌السیر، مطرح است. باتوجه به گستردگی موضوع و تأثیر

هر یک از روش‌های اجرای روسازی گفته‌شده بر اهداف اصلی پروژه، پیشنهاد می‌گردد در هر پژوهش، به صورت جداگانه بر روی یکی از روش‌های اجرای روسازی درراه آهن سریع‌السیر متمرکز شد و تاثیر آن را بر روی هریک از مولفه‌های زمان، هزینه و کیفیت بررسی نمود، تا نتایج حاصل از پژوهش انجام‌شده، دقیق‌تر باشد و از پیچیدگی موضوع بکاهد. همچنین، در پژوهش‌های آتی نیز می‌توان، تاثیر اهداف زیست‌محیطی و ایمنی پروژه را بررسی نمود.

٦-مراجع

-برخورداری، م.، و فلاحی، ف. (۱۳۹۱). انواع روسازی بدون بالاستی خطوط راه آهن و مزایا و معایب هر کدام و ارائه یک سیستم مناسب روسازی بدون بالاست در ایران. *اولین کنفرانس ملی زیرساخت‌های حمل و نقل، تهران*، ایران: ٢٤ بهمن.

-دهقانی فیل آبادی، ع.، و حسامیان، غ. (۱۳۹۸). یک روش پیشنهادی برای رتبه‌بندی فازی در تصمیم‌گیری چندشاخصه چند دوره‌ای در محیط فازی نوع-۲. *نشریه مدل‌سازی در مهندسی*، سال هفدهم، شماره ۵۹، ٦٥-٤٧.

-راد، م.، و بابایی، ع. (۱۳۸۹). روند مطالعات روسازی خطوط قطارهای شهری. *دوازدهمین همایش بین‌المللی حمل‌ونقل ریلی*، تهران، ایران: ۲ آبان.

-رحمانی، ز.، و حمیدی، م. (۱۳۹۳). تدوین استراتژی بکارگیری قطارهای سریع السیر ریلی در جمهوری اسلامی ایران. *پژوهشنامه حمل و نقل*، سال سوم، شماره ۱۱، ۲۵۱-۲۳۳.

-سلماس‌نیا، ع.، حسین زاده، ا.، و عبدزاده، ب. (۱۳۹۷). بهینه‌سازی چندهدفه متوسط زمان سفر در خطوط مترو با درنظر گرفتن توأم اثرات مکانی و پراکندگی. *نشریه مدل‌سازی در مهندسی*، سال شانزدهم، شماره ۵۲، ۳٤٥-۳۳۱.

-شرکت مهندسی سپاسد. (۱۳۸٦). گزارش انتخاب سیستم روسازی ریلی خط هفت متروی تهران. تهران، *انتشارات قرارگاه سازندگی خاتم‌الانبیا (ص)*.

-صاحب‌الزمانی، ن.، و صاحب‌الزمانی، پ. (۱۳۹۵). تراورس‌های هوشمند در خطوط سریع‌السیر. *نشریه نیم‌نگاه*، دوره ١٤، ٤-٣.

-صدر، س.، عرب خابوری، د.، و نمازی، م. (۱۳۹۵). مدل‌سازی سیستم کنترل سرعت قطار الکتریکی با لحاظ لغزش چرخ بر روی ریل. *نشریه مدل‌سازی در مهندسی*، سال چهاردهم، شماره ٤٧، ص ٢٥٥- ٢٦٦.

-فداکار ماسوله، ا.، و کی‌منش، م. (۱۳۹۵). بررسی هزینه های ساخت و نگهداری خطوط ریلی سریع السیر و مقایسه آن با سایر مودهای حمل و نقل. *دومین کنفرانس بین المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در عمران، معماری و مدیریت شهری*، تهران، ایران: ۳۰ اردیبهشت.

-کی منش، م.، و گنجی، ر. (۱۳۹۰). مشخصات قطارهای سریع‌السیر. *اولین همایش ملی راه‌آهن سریع‌السیر در ایران*، تهران، ایران: ۱۰ اردیبهشت.

-معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری. (۱۳۸٦). دستورالعمل طراحی و نظارت بر روسازی راه‌آهن سریع‌السیر، *نشریه شماره ۳۹٤*. تهران، معاونت امور فنی.

-نجاتی، ا.، روانشادنیا، م.، و ساده، ا. (۱۳۹٦). انتخاب و رتبه‌بندی سیستم مناسب جهت اجرای روسازی راه‌آهن سریع‌السیر، با استفاده از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره. *سومین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری*، تهران، ایران: ۱۳ تا ١٤ دی.

-یقینی، م.، و طالبی، س. (۱۳۹۲). پیش‌بینی تقاضای مسافر در راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران. *کنفرانس بین‌المللی پیشرفت‌های اخیر در مهندسی راه‌آهن*، تهران، ایران: ۱۰ اردیبهشت.

-یوسفی خوشبخت، م.، دولت نژاد ثمرین، ا.، و خرم، ا. (۱۳۹٦). یک الگوریتم ترکیبی اصلاحی مورچگان برای حل

۷-پی‌نوشت‌ها

1. Multi Criteria Decision Making (MCDM)
2. Decision Making Trial and Evaluation
3. Battelle Memorial Institute
4. Rheda MRT
5. Shinkansen Slab Track
6. Studiengesellschaft Asphalt-Oberbau
7. Paved Concrete Track

مساله مسیریابی وسیله نقلیه باز ظرفیت دار. *نشریه مدل‌سازی در مهندسی*، سال پانزدهم، شماره ۵۰، ۱۹۱-۱۷۹.

-Asghari, K., Sotoudeh, S., and AliZakeri, J. (2021) .Numerical evaluation of approach slab influence on transition zone behavior in high-speed railway track. .Transportation Geotechnics, *Elsevier*. Vol. 281–9.

-Chang, B., Chang, C.W., and Wu, C.H. (2011). Fuzzy DEMATEL method for developing supplier selection criteria. Expert system with applications, *Elsevier*. Vol. 38, No. 3. 1850–1858.

-Chen, C.T., Lin, C.T., and Huang, S.F. (2006). A fuzzy approach for supplier evaluation and selection in supply chain management. *International Journal of Production Economics*. Vol. 102. 289-301.

-Correa, N., et al. (2011). Rail corrugation development in high speed lines.Wear, *Elsevier*. Vol. 271. 2438–2447.

-Deng, H. (1999). Multi criteria analysis with fuzzy pairwise comparison. *International Journal of Approximate Reasoning,* Elsevier. Vol. 21, No. 3. 215–231.

-Li, Z., et al. (2020). Fuzzy DEMATEL analysis of barriers to Block chain based life cycle assessment in *China*. *Computers & Industrial Engineering,* Elsevier. Vol. 147. 1–10.

-Lin, R. J. (2013). Using fuzzy DEMATEL to evaluate the green supply chain management practices. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier. Vol. 40. 32–39.

-Ling, L., et al. (2020). Dynamic interaction between rail vehicles and vibration-attenuating slab tracks. *Construction and Building Materials,* Elsevier. Vol. 258. 1–16.

-Lyratzakis, A., Tsompanakis, Y., and Psarropoulos, P.N. (2020). Efficient mitigation of high-speed trains induced vibrations of railway embankments using expanded polystyrene blocks. *Transportation Geotechnics,* Elsevier. Vol. 22. 1–13.

-Ntotsiosa, E., Thompsona, D.J., and Hussein, F.M. (2019). A comparison of ground vibration due to ballasted and slab tracks. *Transportation Geotechnics*, Elsevier. Vol. 21. 1–10.

-Pons, J.J., et al. (2020). Life cycle assessment of a railway tracks substructures: Comparison of ballast and ballast less rail tracks. *Environmental Impact Assessment Review*, Elsevier, Vol. 85. 1-11.

-Qin, S., and Gao, Z. (2017). Developments and Prospects of Long-Span High-Speed Railway Bridge Technologies in China . *Engineering*, Elsevier. Vol. 3, No. 6. 787–794.

-Serdelová, K., and Vičan, J. (2015). Analysis and design of steel bridges with ballast less track. *Procedia Engineering*, Elsevier. Vol. 111. 702–708.

-Shri R.K. Yadav., et al. (2007). Case Studies High Speed Rail System. *Project Group*: USA, 1–9.

-Wan, Z., et al. (2020). Remediation of mud pumping in ballastless high-speed railway using polyurethane chemical injection. *Construction and Building Materials*, Elsevier. Vol. 259. 1–9.

-Wang, T., et al. (2020). Method for slab track substructure design at a speed of 400 km/h. *Transportation Geotechnics*, Elsevier. Vol. 24. 1–15.

-William, P., and Jeffrey, Priest. (2011). Behavior of ballastedtrack during high speedtrain passage. *University of Southampton*, UK. 1–51.

Examining an Appropriate Express Railway Pavement System Using Fuzzy DEMATEL Method

Seyed Azim Hosseini, Associate Professor, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
Hossien Maleki Toulabi, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

E-mail: azim_hosseini@azad.ac.ir

Received: February 2024- Accepted: June 2024

ABSTRACT
Today, many developing countries are seeking to increase investment in infrastructure projects to achieve sustainable development. On the other hand, the countries' success in infrastructure and development projects is what constitutes their progress. In recent decades, with the development of high-speed lines, railway transportation has seen major developments, including reduced time of dispatching trains, increased capacity, and, most importantly, increased speed of trains. Considering high-speed lines and limited aerial fleet, most countries have begun to use high-speed trains as the most reliable and most cost-effective method of transportation. Accordingly, this study mainly aimed to examine and prioritize pavement systems suitable to high-speed trains. For data analysis, first, major high-speed train pavement system techniques were identified using library studies, while for the analysis process, experts, including 3 employers, 4 contractors, 4 consulting companies, and 11 academic professors, were interviewed. In this study, 7 most frequent techniques were selected. Then, using the fuzzy DEMATEL method, each of the techniques was scored, and finally, it was determined how each factor affected and was effective on the systems. The findings revealed that the Rheda MRT (B1) system was most affected, with the Studiengesellschaft Asphalt-Oberbau design (B5) method, most effective on the implementation of the high-speed railway pavement system

Keywords: High-Speed Train, Pavement, Sustainable Development, Fuzzy Logic