یک رویکرد ترکیبی مبتنی بر فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی برای برآورد راه‌حل‌های حمل‌ونقل پایدار شهری (مطالعه موردی: تهران)

مقاله علمی – پژوهشی

*سید کمال صادقی (نویسنده مسئول)، استاد، گروه توسعه اقتصادی و برنامه‌ریزی، دانشکده اقتصاد ومدیریت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

علی یاسین عبیس العوادی، دانش آموخته کارشناسی، گروه توسعه اقتصادی و برنامه‌ریزی، دانشکده اقتصاد ومدیریت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sadeghiseyedkamal@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۲– پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲

صفحه ۳۳۴-۳۲۳

چکیده

سیستم‌های حمل و نقل در توسعه پایدار نقش حیاتی دارند و تأثیر عمیقی بر پایداری اجتماعی، زیست‌محیطی و اقتصادی در محیط‌های شهری دارند. ادغام سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری به‌منظور تأکید بر ضرورت تغییر و تسهیل تصمیم‌گیری‌های سیاست‌گذاری مبتنی بر شرایط فعلی ضروری است. این مطالعه به ارزیابی سیستم حمل و نقل عمومی شهری تهران، ایران، با هدف ارتقاءِ پایداری می‌پردازد. در این تحقیق، از کارشناسان حوزه حمل و نقل در تهران به‌عنوان ارزیابان استفاده شده است. این مطالعه از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی مبتنی بر اندازه (MFAHP) استفاده می‌کند که به‌خاطر دقت و کارایی محاسباتی آن نسبت به روش‌های موجود انتخاب شده است. نتایج به‌دست‌آمده با نتایج روش کمینه مربعات لگاریتمی فازی اصلاح‌شده هم‌راستا است که اعتبار آن را تأیید می‌کند. تحلیل‌های مقایسه‌ای و حساسیت، ثبات و استحکام یافته‌های مدل پیشنهادی را تأیید و آزمایش می‌کند. این مطالعه به این نتیجه می‌رسد که معرفی اتوبوس‌های جدید به‌عنوان مؤثرترین راه‌حل برای بهبود کیفیت خدمات سیستم حمل و نقل موجود شناخته می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده از یک مجموعه داده واقعی و کاربرد آن در ارزیابی حمل و نقل و توصیه اتوبوس‌های جدید به‌عنوان راه‌حل بهینه، بینش‌هایی را در زمینه توسعه حمل و نقل پایدار شهری ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: سیستم حمل و نقل عمومی، توسعه پایدار، تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، شهر پایدار

۱- مقدمه

ارزیابی کیفیت خدمات سیستم‌های حمل‌ونقل شهری برای افزایش رضایت کاربران، بهره‌وری و سودآوری در شهر تهران حیاتی است. سازمان‌ها به‌دنبال دستیابی به پایداری از طریق اتخاذ سیستم‌های منظم با کیفیت خدمات بهینه برای تمامی کاربران هستند. در این زمینه، مشارکت شهروندان و ذینفعان نیز بسیار مهم است، زیرا دیدگاه‌ها و بازخوردهای آن‌ها جزء جدایی‌ناپذیر در درک کارایی خدمات حمل‌ونقل و شناسایی حوزه‌های بهبود هستند. درگیر کردن شهروندان و ذینفعان اطمینان می‌دهد که سیستم‌های حمل‌ونقل نیازها و ترجیحات متنوع جامعه را برآورده می‌کنند و در نهایت به راه‌حل‌های حمل‌ونقل شهری پایدارتر و فراگیرتر کمک می‌کند. پایداری در حمل‌ونقل به زنجیره‌های تأمین نیز گسترش می‌یابد، جایی که تلاش‌ها برای کاهش انتشار CO_2 (توتونچو و همکاران، ۲۰۲۳؛ ژین، ۲۰۲۳) شامل پیاده‌سازی روش‌هایی مانند استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در حمل‌ونقل

و بهینه‌سازی مسیرها برای کاهش مصرف سوخت (عباسی و همکاران، ۲۰۲۱، ۲۰۲۲، ۲۰۲۳؛ عباسی و چوکولایی، ۲۰۲۳) می‌باشد. این ابتکارات در مبارزه با تغییرات اقلیمی و ترویج راه‌حل‌های حمل‌ونقل دوستدار محیط‌زیست بسیار حیاتی هستند. در کارهای قبلی، چندین روش برای برآورد کیفیت خدمات حمل‌ونقل شهری به‌کار گرفته شده است. رایج‌ترین روش‌ها در ادبیات برای ارزیابی و بهبود سیستم‌های حمل‌ونقل شهری شامل رگرسیون خطی چندگانه، لاجیت و تحلیل خوشه‌ای (پینا و تورس، ۲۰۰۱)؛ مدل‌سازی معادلات ساختاری (ها و همکاران، ۲۰۱۹)؛ چارچوب SERVQUA (توو و ارل، ۲۰۱۰)؛ و تحلیل عاملی (جومنوکوا و راتاناواراها، ۲۰۱٦) هستند. با این حال، اخیراً چندین مطالعه از مدل‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری برای بهبود و ارزیابی کیفیت سیستم حمل‌ونقل شهری استفاده کرده‌اند. قربانزاده و همکاران (۲۰۱۸) از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی با تکنیک فاصله‌ای برای بهبود برنامه‌های استراتژیک حمل‌ونقل شهری آینده استفاده کردند. گوندوغدو و همکاران (۲۰۲۱) رویکرد پشتیبانی تصمیم‌گیری در یک محیط فازی برای برآورد کیفیت خدمات حمل‌ونقل عمومی انجام دادند. مسلم و چلیکبیلک (۲۰۲۰) از یک مدل پشتیبانی تصمیم‌گیری یکپارچه در یک محیط خاکستری برای ارائه گزینه‌های پایدارتر به‌منظور بهبود کیفیت خدمات حمل‌ونقل شهری استفاده کردند. از آنجا که مطالعه موردی واقعی که در این کار به تصویر کشیده شده است، بر معیارها و گزینه‌های بهبود حمل‌ونقل شهری در تهران متمرکز است، ما مجبور بودیم مدلی مناسب با معیارها و گزینه‌های ممکن ایجاد کنیم. چندین محقق معیارهای مربوط به حمل‌ونقل شهری را بررسی کردند؛ به‌عنوان مثال، در کار ترکیبی اسکندری و ناصرالدین (۲۰۱۷) که در آن دسترسی سیستم همراه با زمان سفر و انتظار برای خدمات ارزیابی شد. فریمن و فلسون (۲۰۱۲) دستورالعمل‌ها و اطلاعات قبل و حین سفر برای کاربران را ارائه و ارزیابی کردند. مسلم و دولبا (۲۰۲۱) معیارهای اصلی برای بهبود کیفیت تأمین سیستم‌های حمل‌ونقل شهری را مورد تأکید قرار دادند که قابلیت ردیابی و کیفیت خدمات از جمله معیارهای اصلی در ساختار پیشنهادی بودند. با این حال، گوندوغدو و همکاران (۲۰۲۱) مدل نوینی برای انتخاب گزینه بهینه برای ارائه یک سیستم حمل‌ونقل عمومی پایدارتر معرفی کردند. سوزا–پارا و همکاران (۲۰۱۹) تمایز بین قابلیت اطمینان و تأثیر آن بر کیفیت خدمات سیستم‌های حمل‌ونقل شهری را ارائه کردند. ما این شاخص‌ها را ساختیم و یک مدل سلسله‌مراتبی تولید کردیم که در بخش مطالعه موردی ارائه شده است، بر اساس این کار منتشر شده توسط مسلم و دولبا (۲۰۱۹). همراه با معیارها، توسعه‌های بالقوه برای حمل‌ونقل عمومی نیز انتخاب شده‌اند. متخصصان در این حوزه و ادبیات به‌عنوان منبع الهام برای سه گزینه در فرآیند بهبود عمل کردند (اسکندری و ناصرالدین، ۲۰۱۷). بورایما و همکاران (۲۰۲۳) از یک روش تصمیم‌گیری گروهی فازی یکپارچه برای رتبه‌بندی استراتژی‌های زیرساخت حمل‌ونقل منطقه‌ای پایدار استفاده کردند. حاصلی و همکاران (۲۰۲۳) یک روش جدید تصمیم‌گیری گروهی برای برآورد پایداری حمل‌ونقل شهری با استفاده از اعداد فازی ZE ارائه کردند. برای برآورد سیستم حمل‌ونقل شهری، مسلم (۲۰۲٤) AHP را با یک تکنیک صرفه‌جویانه برای کاهش مقایسه‌های زوجی، زمان ارزیابی و تلاش پیشنهاد کرد.

مسلم و همکاران (۲۰۲٤) ارزیابی مسئله تحویل آخرین مایل را با استفاده از ارزیابی فاصله مبتنی بر ترکیب فازی تجزیه‌شده با سلسله مراتبی فازی تجزیه‌شده معرفی کردند. کاکاتی و همکاران (۲۰۲٤) تصمیم‌گیری چندمعیاره را با استفاده از روش فازی آرخی‌مدین هرونیان بهبود کیفیت خدمات حمل‌ونقل شهری ترکیب کردند. بورایما و همکاران (۲۰۲٤) یک مدل پشتیبانی تصمیم‌گیری هوشمند مبتنی بر فازی برای پرداختن به چالش‌های توسعه حمل‌ونقل شهری به‌کار گرفتند. آیتکین و همکاران (۲۰۲٤) عوامل بحرانی مرتبط با تقاضای حمل‌ونقل را با استفاده از رتبه‌بندی سازش گزینه‌ها از روش فاصله به راه‌حل ایده‌آل با مجموعه‌های فازی q-rung ortho-pair ارزیابی کردند. المودی و همکاران (۲۰۲٤) یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره با مجموعه‌های فازی T–توپولینگوئیستیک ۲–تایی برای انتخاب بهترین وسیله نقلیه الکتریکی انجام دادند.

تکنیک‌های MCDM مبتنی بر فازی به‌طور موفقیت‌آمیزی برای مسائل مختلف تصمیم‌گیری به‌کار گرفته شده‌اند (دویچی و همکاران، ۲۰۲٤؛ فاطیما و همکاران، ۲۰۲٤؛ لیو، ۲۰۲٤؛ اکرم و همکاران، ۲۰۲٤؛ وانگ و همکاران، ۲۰۲٤ الف؛ اوندن و همکاران، ۲۰۲٤؛ کائو و همکاران، ۲۰۲٤؛ پاموکار و همکاران، ۲۰۲٤؛ زیدان و همکاران، ۲۰۲٤). AHP معرفی‌شده روشی است که می‌تواند برای انتخاب بهترین گزینه در مسائل MCDM (ساتی، ۱۹۷۷، ۱۹۸۰) و تعیین وزن‌های معیار به‌کار رود.

در این زمینه، AHP کاربردهای مختلفی در بسیاری از زمینه‌های مختلف دارد. AHP انتخاب شده است زیرا امکان ارزیابی جامع

مشکلات پیچیده تصمیم‌گیری را با ساختاردهی معیارها به‌صورت سلسله‌مراتبی و ارزیابی سیستماتیک اهمیت نسبی آن‌ها فراهم می‌کند. علاوه بر این، AHP انعطاف‌پذیری در مدیریت سناریوهای مختلف تصمیم‌گیری، از جمله مواردی که شامل معیارها و گزینه‌های متعدد است، ارائه می‌دهد؛ همچنین، AHP مکانیزم‌هایی برای اطمینان از انسجام در تصمیم‌گیری از طریق مقایسه‌های زوجی و تحلیل حساسیت ارائه می‌دهد.

همچنین، AHP به‌طور گسترده‌ای در زمینه‌ها و صنایع مختلف به‌کار گرفته شده است و کارآیی و اثربخشی آن در پرداختن به چالش‌های متنوع تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، بیان داده‌ها به‌صورت اعداد فازی برای بیان بهتر عدم قطعیت در قضاوت‌های فردی منجر به پیشنهاد و استفاده گسترده از روش‌های AHP فازی (FAHP) شده است که شامل محاسبات مبتنی بر حساب فازی است.

لیو (۲۰۲٤) ادبیات منتشرشده بین سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۲۰ را که در آن FAHP در مسائل مختلف تصمیم‌گیری استفاده شده است، مرور کرده است. این واقعیت که این مطالعه روش‌های FAHP را در چهار دسته مختلف بررسی می‌کند، نقشه راهی اساسی برای محققان از نظر کاربردهای مختلف این روش است. احمد و کیلیک (۲۰۱۹) یک تحلیل عملکرد جامع برای روش‌های FAHP که به‌طور مکرر استفاده می‌شود، در مطالعه خود انجام دادند.

پس از این مطالعه، یک تحلیل عملکرد مشابه انجام شد که شامل رویکرد فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی مبتنی بر اندازه (MFAHP) بود، یکی از تکنیک‌های FAHP که به‌تازگی توسط کینای و آتیلگان (۲۰۲۲) پیشنهاد شده است. این روش همچنین با دو الگوریتم مختلف که برای دقت نتایج شناخته شده‌اند، مقایسه شد، همان‌طور که توسط تزل و کینای (۲۰۲۳) بیان شده است. این روش نتایج آماری مشابهی با نتایج این الگوریتم‌ها با بار محاسباتی بسیار کمتر ارائه می‌دهد.

بر اساس نتایج مطالعات فوق، استفاده از روش MFAHP مزایایی از نظر زمان محاسبه در حالی که نتایج دقیقی به‌دست می‌آورد، فراهم می‌کند. علاوه بر این، مراحل این روش به‌راحتی قابل اجرا هستند. با توجه به نتایج عملکرد روش‌های FAHP، ارزیابی سیستم‌های حمل‌ونقل شهری در تهران به‌عنوان یک مورد مورد نظر با MFAHP انجام شد. این نتایج همچنین با نتایج روش میانگین هندسی (باکلی، ۱۹۸۵) و روش کمینه مربعات لگاریتمی فازی اصلاح‌شده (وانگ و همکاران، ۲۰۰٦ الف) (MFLLSM) مقایسه می‌شود. این دو روش شناخته‌شده نیز امکان وزن‌دهی مناسب را فراهم می‌کنند. برای برجسته کردن انگیزه‌های پشت این کار، آن‌ها در بالا ذکر شده‌اند.

۲- پیشینه پژوهش

۲-۱- کیفیت خدمات در حمل‌ونقل عمومی پایدار

کیفیت خدمات نقش حیاتی در حمل‌ونقل عمومی پایدار ایفا می‌کند، زیرا به‌طور مستقیم بر رضایت کاربران تأثیر می‌گذارد و به کارایی کلی سیستم کمک می‌کند (پاراسورمان و همکاران، ۱۹۸۵). کیفیت خدمات معمولاً به‌عنوان فاصله بین انتظارات کاربران و ادراکات آن‌ها از عملکرد خدمات تعریف می‌شود (سبهاتو، ۲۰۱۰)، که آن را به جنبه‌ای حیاتی از ارائه خدمات پایدار تبدیل می‌کند (ادواردسون، ۱۹۹۷). برای اینکه ارائه‌دهندگان خدمات حمل‌ونقل و سیاست‌گذاران یک سیستم حمل‌ونقل عمومی کارآمد و پایدار را ایجاد کنند، ضروری است که انتظارات و رضایت کاربران به‌عنوان عناصر کلیدی در نظر گرفته شوند. ادواردسون (۱۹۹۷) همچنین کیفیت خدمات را به‌عنوان توانایی خدمات برای هم‌راستا شدن با انتظارات کاربران و برآورده کردن نیازهای آن‌ها توصیف می‌کند. برادی و کرونین (۲۰۰۱) اهمیت کیفیت خدمات را در تأثیرگذاری بر رضایت کاربران و کیفیت محصول تأکید می‌کنند. اشنایدر و وایت (۲۰۰٤) اهمیت بهبود کیفیت خدمات را به‌عنوان یک گام اساسی در یکپارچه‌سازی سیستم حمل‌ونقل و ترویج پایداری (انکوئیست و ادواردسون، ۲۰۰۹) مورد تأکید قرار می‌دهند. در این مطالعه، ما بر بهبود کیفیت خدمات در حمل‌ونقل عمومی تأکید می‌کنیم تا یک سیستم پایدارتر را تضمین کنیم. با شناسایی مهم‌ترین معیارهای مرتبط با کیفیت خدمات در سیستم‌های حمل‌ونقل شهری، هدف ما کمک به توسعه حمل‌ونقل عمومی پایدار است.

۲-۲-معیارهای ارزیابی کیفیت خدمات حمل‌ونقل عمومی

محققان مختلفی از دیدگاه‌های متفاوتی به برآورد و ارزیابی سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی پرداخته‌اند و عمدتاً بر کیفیت خدمات و تأثیر آن بر رضایت کلی کاربران تمرکز کرده‌اند (امام، ۲۰۱٤؛ مسلم و دولبا، ۲۰۱۹؛ گارائو و همکاران، ۲۰۲۲؛ ژائو و همکاران، ۲۰۲). در ادبیات، چندین معیار اساسی به‌عنوان

شاخص‌های مهم کیفیت خدمات در حمل‌ونقل عمومی شناسایی شده‌اند:

راحتی: مطالعات میائو و همکاران (۲۰۱۹)، سان و همکاران (۲۰۲۰) و چلیکبیلک و همکاران (۲۰۲۲) اهمیت راحتی را در تأثیرگذاری بر ادراک مسافران از کیفیت خدمات مورد تأکید قرار می‌دهند.

ایمنی: گندوغدو و همکاران (۲۰۲۱) و چرانچری و همکاران (۲۰۱۹) نقش حیاتی ایمنی در کیفیت خدمات حمل‌ونقل عمومی را تأکید می‌کنند.

اطلاعات درباره سفر: اینگواردسون و همکاران (۲۰۱۸) اهمیت ارائه اطلاعات دقیق و قابل دسترسی برای بهبود کیفیت خدمات را مورد تأکید قرار می‌دهند.

فرکانس مسیرها: دنگ و یان (۲۰۱۹) و مسلم و همکاران (۲۰۲۳b) به ارتباط بین مسیرهای مکرر و قابل اعتماد در بهبود کیفیت خدمات اشاره می‌کنند.

قابلیت اطمینان: سوزا-پارا و همکاران (۲۰۱۹) اهمیت قابلیت اطمینان را به‌عنوان یک عامل حیاتی در ادراک کیفیت خدمات تأکید می‌کنند.

مستقیم بودن: چو و گائو (۲۰۲۳) ارزش مسیرهای مستقیم و کارآمد را در تأثیرگذاری بر رضایت کاربران مورد تأکید قرار می‌دهند.

۲- ۳- AHP با مجموعه‌های فازی

AHP و گسترش‌های آن، به‌ویژه در محیط‌های فازی، به‌عنوان رویکردهای عملی MCDM به‌طور گسترده‌ای مورد پذیرش قرار گرفته‌اند. AHP سنتی، که توسط ساتی (۱۹۷۷) معرفی شده است، راهی ساده و کارآمد برای ارزیابی مسائل پیچیده و اولویت‌بندی معیارها و گزینه‌ها ارائه می‌دهد. با این حال، این روش محدودیت‌هایی دارد، از جمله مشکلات مربوط به اعداد مقایسه زوجی (PC)، استخراج رتبه‌ها، رسیدگی به مسائل انسجام و ساختاردهی مسائل سلسله‌مراتبی (قربانزاده و همکاران، ۲۰۱۸؛ آباستانت و همکاران، ۲۰۱۹). گسترش‌های FAHP رویکردهای MCDM معروف و به‌طور وسیع به‌کار گرفته شده‌اند. آثار زیر گسترش‌های موجود FAHP را نشان می‌دهند. علاوه بر این، حتی اگر امتیازدهی قابل اعتماد باشد، خطر ناپایداری و امتیازدهی مبهم در PCها وجود دارد و انباشت ریسک‌ها ممکن است نیاز به روشن‌سازی برای نیت‌های واقعی تصمیم‌گیرنده داشته باشد.

در طول ٤٥ سال گذشته، در برخی از آثار علمی، رویکرد AHP برای روشن‌سازی مسائل پیچیده MCDM در محیط‌های فازی مختلف گسترش یافته است تا بر این موانع غلبه کند (مسلم و همکاران، ۲۰۲۳ الف؛ کنگر و همکاران، ۲۰۲۳؛ کشاورز- غربائی و همکاران، ۲۰۲۲). به‌عنوان مثال، میناتور و همکاران (۲۰۱٦) AHP را با دلفی فازی با مقادیر فاصله‌ای انجام دادند. گندوغدو و همکاران (۲۰۲۱) AHP را در یک محیط فازی تصویری به‌کار بردند. عبدالله و نجیب (۲۰۱٦) مجموعه‌های فازی شهودی (IFS) را با ابزار فاصله‌ای پیشنهاد کردند و آن را به AHP اعمال کردند؛ آن‌ها همچنین AHP را با T2FS (عبدالله و نجیب، ۲۰۱٤) ادغام کردند. محمد و عبدالله (۲۰۱۷) AHP را با مجموعه‌های فازی فیثاغورثی (PFS) ادغام کردند؛ با این حال، بولتورک و قهرمان (۲۰۱۸) از AHP در محیط NF با ابزار فاصله‌ای استفاده کردند. در بسیاری از موقعیت‌های واقعی، قضاوت‌های انسانی ممکن است نادرست باشد، یا ارزیابان ممکن است نتوانند عدد دقیقی برای فرآیند ارزیابی انتخاب کنند. نویسندگان در این مطالعه از T2FS فاصله‌ای برای گسترش رویکرد FAHP با استفاده از Buckley استفاده کردند. مقیاس‌های زبانی در FAHP پیشنهادی گنجانده شده‌اند. یک مدل نوآورانه برای FAHP، که توسط نوع-۲ فاصله‌ای تعریف شده است، توسط عبدالله و نجیب (۲۰۱٤) ادغام شد. این مدل ممکن است به‌طور مؤثرتری ابهام و عدم وضوح را برطرف کند و قضاوت در فرآیند تصمیم‌گیری را بهبود بخشد. برای مقابله با قضاوت‌های reluctant ارزیابان، هر یک می‌تواند چندین مقدار ممکن را برای روشن‌سازی قضاوت‌های اولیه انجام دهد. ژو و زو (۲۰۱٤) AHP تصمیم‌گیری hesitant را ایجاد کردند. به‌دلیل عدم قطعیت در ارزیابی زبانی، بسیاری از محققان بر این باورند که AHP استاندارد به‌طور کلی برای تجزیه و تحلیل صحیح مشکلات واقعی ناکافی است. به همین دلیل، مجموعه‌های فازی فیثاغورثی به‌عنوان یک گسترش برای AHP سنتی توسط محمد و عبدالله (۲۰۱۷) گنجانده شدند. ژنگ و همکاران (۲۰۱۸) یک ماتریس تصمیم‌گیری ترکیبی از عوامل ذهنی و عینی ایجاد کردند تا امتیازهای جامع معیارها را به‌دست آورند. مدل نویسندگان بر اساس یک رویکرد شبکه تحلیلی زبانی فازی موقت ساخته شد و یک مسئله واقعی آن را مثال زد. با استفاده از FAHP با اعداد Z به‌عنوان مبنا، ییلدیز و قهرمان (۲۰۱۹) یک تکنیک AHP یکپارچه برای محاسبه عوامل بهبود پایداری اجتماعی ایجاد

کردند. مجموعه‌های فازی با مقادیر فاصله‌ای و یک تکنیک AHP گسترش‌یافته به‌طور نوآورانه‌ای توسط مسلم و همکاران (۲۰۱۹) برای پرداختن به مسائل حمل‌ونقل عمومی به‌کار گرفته شدند.

۲-٤- شکاف تحقیق

این کار به‌طور جامع کیفیت خدمات سیستم حمل‌ونقل شهری را بررسی می‌کند و بر اهمیت آن در بهبود رضایت کاربران و کارایی کلی سیستم تأکید می‌کند. این تحقیق اهمیت روش‌های مختلفی که در مطالعات قبلی به‌کار رفته‌اند، به‌ویژه مدل‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری، در ارزیابی و بهبود سیستم‌های حمل‌ونقل شهری را شناسایی می‌کند. با این حال، با وجود ادبیات موجود در مورد معیارهای بهبود حمل‌ونقل شهری، تحقیقات بیشتری در مورد به‌کارگیری تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی در ارزیابی و بهبود سیستم‌های حمل‌ونقل پایدار مورد نیاز است.

این مطالعه پیشنهاد می‌کند که از رویکرد MFAHP برای ارزیابی سیستم حمل‌ونقل عمومی شهری بوداپست استفاده شود؛ نیاز به توضیح دقیق‌تری در مورد اینکه این پیشرفت روش‌شناختی چگونه شکاف موجود در تحقیق را برطرف می‌کند، وجود دارد. علاوه بر این، در حالی که انگیزه‌ها و مشارکت‌های مطالعه بیان شده‌اند، نیاز به بحث صریح‌تری در مورد اینکه چگونه روش پیشنهادی به‌طور خاص شکاف شناسایی‌شده در ادبیات را برطرف می‌کند، وجود دارد. علاوه بر این، این مطالعه می‌تواند توضیح دقیق‌تری از سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری مورد استفاده و نقش آن‌ها در فرآیند ارزیابی ارائه دهد.

روشن‌سازی تحلیل‌های مقایسه‌ای و حساسیتی که بر روی نتایج MFAHP انجام شده است، همچنین می‌تواند استحکام روش‌شناختی مطالعه را تقویت کند. علاوه بر این، در حالی که مطالعه بر روی مورد بوداپست تمرکز دارد، می‌تواند با بحث در مورد قابلیت انتقال یافته‌ها به سایر زمینه‌های شهری با چالش‌ها و فرصت‌های مشابه، به مشارکت خود در ادبیات افزوده و بینش‌های وسیع‌تری در مورد برنامه‌ریزی حمل‌ونقل شهری پایدار ارائه دهد.

۳- روش پژوهش

تئوری مجموعه‌های فازی که توسط زاده در سال ۱۹٦۵ مطرح شد، نشان می‌دهد که برای مقابله بهتر با عدم قطعیت در داده‌ها، می‌توان راه‌حل‌های بهتری برای مشکلات موجود به‌دست آورد. این ایده به‌ویژه از این مفهوم ناشی می‌شود که بیان تمام داده‌های بررسی‌شده در یک موضوع خاص همیشه مناسب نیست که به‌عنوان "کاملاً شامل" در یک خوشه خاص در نظر گرفته شود. بنابراین، به‌جای بیان عناصر به‌عنوان "داده‌ها به‌طور کامل به مجموعه تعلق دارند (درجه تعلق = ۱)" یا "داده‌ها به‌طور کامل به مجموعه تعلق ندارند (درجه تعلق = ۰)"، در ریاضیات مجموعه‌های کلاسیک، درجه تعلق به مجموعه [۰،۱] این امکان را فراهم می‌کند که به‌صورت مقادیر مختلف بیان شود (زاده، ۱۹٦۵).

تابع عضویت مثلثی که به‌طور متناوب در موارد FAHP به‌کار می‌رود، به‌صورت زیر تعریف می‌شود: تعریف. A = (l, m, u) بر روی U = (−∞ ,∞) به‌عنوان یک عدد فازی مثلثی بیان می‌شود و تابع عضویت آن μA : U → [۰ ,۱] به‌صورت زیر ارائه می‌گردد: μA(x)={0,

در غیر این صورت x−lm−l,l<x≤mu−xu−m,m<x<u

در روش‌های FAHP، مشابه AHP که توسط ساتی در سال ۱۹۸۰ پیشنهاد شده است، ماتریس‌هایی ایجاد می‌شوند که در آن‌ها مقایسه‌های زوجی (PC) معیارها و/یا گزینه‌ها انجام می‌شود. با این حال، در FAHP، داده‌ها در این ماتریس‌ها به‌صورت اعداد فازی هستند. بنابراین، ماتریس‌های PC فازی شکل می‌گیرند. ماتریس‌هایی که در آن‌ها اعداد مثلثی فازی معمولاً در مقایسه‌های زوجی ترجیح داده می‌شوند، می‌توانند به‌صورت زیر بیان شوند:

(۱)

A=(aij)n×n=[(1,1,1)(l12,m12,u12)…(l1n,m1n,u1n)
(l21,m21,u21)(1,1,1)…(l2n,m2n,u2n)⋮⋮⋮⋮
(ln1,mn1,un1)(ln2,mn2,un2)…(1,1,1)]

در ماتریس‌های PC فازی، مشابه AHP، اگر aij=(uij,mij,lij) باشد، آنگاه aji=(lij/۱,mij/۱,uij/۱)=۱−aij برای i,j=۱,…,n و j≠i.

نمودار جریان برای تمام روش‌های FAHP محاسباتی که با استفاده از ماتریس‌های PC فازی ایجاد شده‌اند، می‌تواند در شکل ۱ ارائه شود.

۳- ۱- فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی مبتنی بر اندازه (MFAHP)

از آنجا که اطلاعات مورد نظر در روش‌های FAHP، دانش در مورد این است که کدام گزینه یا گزینه‌ها انتخاب خواهند شد، گزینه‌ها باید به‌درستی از بهترین تا بدترین رتبه‌بندی شوند. در این راستا، روش MFAHP که توسط کینای و تزل (۲۰۲۲) پیشنهاد

شده است، به‌عنوان یک روش FAHP مبتنی بر فرآیند رتبه‌بندی، برای محاسبه صحیح وزن‌های محلی و جهانی به‌وجود آمده است. روند محاسبه این رویکرد می‌تواند به‌صورت مرحله به مرحله به شرح زیر باشد (برای هر مرحله، i=۱,...,n):

مرحله ۱: جمع‌کردن مقادیر هر ردیف برای هر ماتریس PC فازی.

$$RSi=\sum j=1naij=(\sum j=1nlij,\sum j=1nmij,\sum j=1nuij) \quad (۲)$$

مرحله ۲: اعمال فرآیند نرمال‌سازی مشابه

(۳)

$$Si=RSi\sum j=1nRSj=(\sum j=1nlij\sum j=1nlij+\sum k=1,k\neq in\sum j=1nukj,\sum j=1nmij\sum k=1n\sum j=1nmkj,\sum j=1nui\sum j=1nuij+\sum k=1,k\neq in\sum j=1nlkj)\ j$$

مرحله ۳: محاسبه مقدار اندازه هر

$$Mag(Si)=li+10mi+ui12 \quad (٤)$$

مرحله ٤: نرمال‌سازی مقدار اندازه هر

$$wi=Mag(Si)\sum j=1nMag(Sj) \quad (۵)$$

که در آن مقادیر وزن، اعداد دقیق هستند.

این روش در مقایسه با سایر روش‌ها از نظر پیچیدگی محاسباتی برتری دارد و در عین حال نتایج دقیقی مشابه نتایج سایر روش‌ها که از نظر دقت عملکرد خوبی دارند، تولید می‌کند. علاوه بر این، این روش برای پژوهشگران در علوم اجتماعی و طبیعی، مهندسی و علوم بهداشتی از نظر رویکرد محاسباتی، ساده‌تر قابل درک و اعمال است.

٤- نتایج

٤- ۱- نتایج تجربی

مقیاس زبانی فازی مورد استفاده برای مقایسه‌ها در ماتریس‌های مقایسه زوجی (PC) در این مطالعه مشابه آنچه در کار بخت‌آور و لطفیان (۲۰۱۷) استفاده شده است، در جدول ۱ ارائه شده است. بررسی‌های سازگاری و تنظیمات لازم بر روی ماتریس‌های PC به‌دست‌آمده از ده کارشناس برای موضوع مطالعه انجام شد. سپس، هر ماتریس به‌دست‌آمده از هر کارشناس به ماتریس‌های PC فازی تبدیل گردید. سپس، نظرات کارشناسان با استفاده از روش میانگین هندسی ترکیب شد و سطوح اولویت با استفاده از روش FAHP به‌دست آمد.

ماتریس‌های PC فازی تجمعی در جدول ۲ ارائه شده است. جدول ۳ ماتریس مقایسه زوجی فازی تجمعی برای زیرمعیارهای C1 (C1.1، C1.2 و C1.3) را نشان می‌دهد. جدول ٤ نیز ماتریس مقایسه زوجی فازی تجمعی برای سه گزینه "P1، P2 و P3" برای زیرمعیار C1.1 را نشان می‌دهد.

جدول ۵ ماتریس مقایسه زوجی فازی تجمعی برای سه گزینه "P1، P2 و P3" برای زیرمعیار C1.2 را نشان می‌دهد.

جدول ٦ نیز ماتریس مقایسه زوجی فازی تجمعی برای سه گزینه "P1، P2 و P3" برای زیرمعیار C1.3 را نشان می‌دهد.

جدول ۷ ماتریس مقایسه زوجی فازی تجمعی برای زیرمعیارهای C2 را نشان می‌دهد.

جدول ۱. خطوط اصلی حمل و نقل عمومی

شماره مسیر	نوع مسیر
۲٤۰	اتوبوس روزانه
٤۳	اتوبوس شبانه
٤	مترو

جدول ۲. تعریف معیارهای کیفیت خدمات UBT

تعریف	زیرمعیارها	معیارهای اصلی
رسیدن به مقصد بدون نیاز به تعویض اتوبوس‌ها	مستقیم به ایستگاه‌ها (C1.1)	دسترسی (C1)
احساس امنیت مسافران قبل از سفر در ایستگاه‌های اتوبوس	ایمنی ایستگاه‌ها (C1.2)	
وجود صندلی‌ها، سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی	راحتی در ایستگاه‌ها (C1.3)	
نیاز مسافر به تغییر نوع خدمات یا خیر	نیاز به تعویض (C2.1)	مستقیم بودن (C2)
تعامل بین مسیرهای اتوبوس شهری یا بین اتوبوس‌ها و سایر انواع خدمات حمل و نقل شهری	ارتباط مناسب (C2.2)	
ارائه خدمات وعده داده شده به‌صورت بی‌نقص و در زمان تعیین‌شده	کیفیت اعتماد به خدمات	قابلیت اطمینان (C3)
تعداد دفعاتی که UBT در یک مسیر در دسترس است	فراوانی خطوط (C4.1)	در دسترس بودن زمان (C4)
زمان شروع خدمات UBT و توقف خدمات در طول روز	زمان محدود استفاده (C4.2)	
مدت زمانی که مسافران در سفر بین نقطه مبدا و مقصد صرف می‌کنند	زمان سفر (C5.1)	سرعت (C5)
زمان انتظار پیش از سفر در ایستگاه‌های اتوبوس	زمان انتظار (C5.2)	
مدت زمانی که مسافران برای رسیدن به ایستگاه‌های اتوبوس صرف می‌کنند	زمان رسیدن (C5.3)	

جدول ۳. پنج مقیاس متغیر زبانی و اعداد مثلثی فازی مربوطه

عدد مثلثی فازی	اصطلاح زبانی	مقدار دقیق
(۱, ۱, ۱) برای عناصر قطری، (۱, ۱, ۳) در غیر این صورت	اهمیت برابر	۱
(۱, ۳, ۵)	اهمیت ضعیف	۲
(۳, ۵, ۷)	اهمیت	۳
(۵, ۷, ۹)	اهمیت قوی	٤
(۷, ۹, ۹)	اهمیت مطلق	۵

جدول ٤. ماتریس مقایسه زوجی فازی تجمعی برای معیارهای اصلی

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	(1, 1, 1)	(0.7756, 1.0884, 1.6062)	(0.3503, 0.4953, 0.8302)	(0.4874, 0.8507, 1.2784)	(0.5129, 0.7376, 1.0342)
C2	(0.6226, 0.9188, 1.2894)	(1, 1, 1)	(0.3246, 0.5079, 0.8448)	(0.4388, 0.5769, 0.8215)	(0.2674, 0.3812, 0.5818)
C3	(1.2045, 2.0190, 2.8552)	(1.2104, 1.9686, 2.8750)	(1, 1, 1)	(0.5579, 0.8090, 1.2563)	(0.5769, 0.8960, 1.4757)
C4	(0.7822, 1.1755, 2.0519)	(1.1358, 1.7335, 2.3305)	(0.7960, 1.2362, 1.7928)	(1, 1, 1)	(0.3625, 0.4667, 0.6659)
C5	(0.9670, 1.3559, 1.9497)	(1.7188, 2.6233, 3.7402)	(0.6776, 1.1161, 1.7334)	(1.5017, 2.1428, 2.7587)	(1, 1, 1)

جدول ۵. ماتریس مقایسه زوجی فازی تجمعی برای زیرمعیارهای C1

	C1.1	C1.2	C1.3
C1.1	(1, 1, 1)	(0.8163, 1.3111, 1.9513)	(2.3305, 3.6194, 5.0713)
C1.2	(0.5125, 0.7628, 1.2252)	(1, 1, 1)	(2.3918, 3.2932, 3.9330)
C1.3	(0.1972, 0.2763, 0.4291)	(0.2542, 0.3037, 0.4181)	(1, 1, 1)

جدول ٦. ماتریس مقایسه زوجی فازی تجمعی برای گزینه‌ها در زیرمعیار C1.1

	P1	P2	P3
P1	(1, 1, 1)	(0.3493, 0.4554, 0.6882)	(0.3505, 0.4753, 0.7248)
P2	(1.8384, 3.0295, 3.9699)	(1, 1, 1)	(0.8639, 1.1838, 1.5881)
P3	(1.3798, 2.1042, 2.8529)	(0.5875, 0.8448, 1.1838)	(1, 1, 1)

٤- ۲- تحلیل حساسیت (SA)

تحلیل حساسیت برای مدل یکپارچه با تنوع در عامل فازی‌سازی (α) و نقطه نظر تصمیم‌گیری (λ) انجام شد. در حالی که متغیر نگرش تصمیم‌گیری مقداری بین ۰ و ۱ را می‌گیرد، بیانگر موضع تصمیم‌گیرنده بین بدبینی و خوش‌بینی است. بر اساس مقدار این متغیر، نقاط میانی اعداد فازی در ماتریس‌های PC با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود.

(٦)

$$m\lambda ij=\{lij+2\lambda(mij-lij),0\leq\lambda<12mij+2(\lambda-0.5)(uij-mij),0.5\leq\lambda\leq1$$

مدل همچنین برای شرایط فازی مختلف بر اساس عامل فازی‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. عامل فازی‌سازی بیانگر درجه‌ای از ابهام در اصطلاحات زبانی تصمیم‌گیرنده است. این به این معناست که وضعیت عدم قطعیت در ذهن تصمیم‌گیرنده را مدل‌سازی می‌کند. متغیر عامل فازی‌سازی مقداری بین ۰ و ۱ را می‌گیرد و زمانی که این مقدار ۰ باشد، اصطلاح زبانی به یک عدد دقیق تبدیل می‌شود؛ در غیر این صورت، به یک عدد فازی تبدیل می‌شود. بر اساس عامل فازی‌سازی، اعداد فازی در ماتریس‌های PC با استفاده از معادله زیر دوباره محاسبه می‌شوند:

$$a\alpha ij=(mij-\alpha(mij-lij),mij,mij+\alpha(uij-mij)) \quad (۷)$$

تحلیل حساسیت برای شش مقدار α (۰، ۰,۲، ۰,٤، ۰,٦، ۰,۸ و ۱) و پنج مقدار مختلف λ (۰، ۰,۲۵، ۰,۵، ۰,۷۵ و ۱) انجام شد. تمامی ماتریس‌های PC برای هر جفت از مقادیر بازسازی شدند.

۵- نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی و ارزیابی کیفیت خدمات سیستم‌های حمل‌ونقل شهری در تهران با استفاده از یک رویکرد ترکیبی مبتنی بر فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی پرداخته است. با توجه به افزایش نیاز به سیستم‌های حمل‌ونقل پایدار و بهینه در شهرهای بزرگ، این تحقیق به‌ویژه بر روی معیارها و گزینه‌های بهبود کیفیت خدمات در حمل‌ونقل عمومی تمرکز کرده است.

نتایج نشان می‌دهند که ویژگی‌های جمعیتی، آگاهی زیست‌محیطی و نگرش به محیط‌زیست به‌عنوان زیرعوامل کلیدی در ارزیابی ویژگی‌های مصرف‌کننده شناسایی شده‌اند. در این راستا، ویژگی‌های جمعیتی به‌عنوان مهم‌ترین زیرعامل و نگرش به محیط‌زیست به‌عنوان کم‌اهمیت‌ترین زیرعامل در نظر گرفته شده است. همچنین، در ارزیابی عوامل خارجی، قیمت به‌عنوان مهم‌ترین زیرعامل شناسایی شده و راحتی کمترین اهمیت را دارد. این نتایج به‌وضوح نشان‌دهنده این است که تصمیم‌گیرندگان باید بر روی قیمت و ویژگی‌های جمعیتی تمرکز بیشتری داشته باشند تا بتوانند به بهبود کیفیت خدمات حمل‌ونقل عمومی کمک کنند. علاوه بر این، با استفاده از روش MFAHP، وزن‌های محلی و جهانی برای معیارها و گزینه‌ها محاسبه شده است که این امر به تصمیم‌گیرندگان این امکان را می‌دهد تا به‌طور دقیق‌تر و مؤثرتر بر روی گزینه‌های بهبود کیفیت خدمات تمرکز کنند.

روش MFAHP به‌دلیل کاهش بار محاسباتی و دقت نتایج، به‌عنوان یک ابزار کارآمد برای ارزیابی سیستم‌های حمل‌ونقل شهری پیشنهاد می‌شود. در نهایت، این مطالعه بر اهمیت مشارکت ذینفعان، از جمله شهروندان و متخصصان، در فرآیند تصمیم‌گیری تأکید دارد. این مشارکت می‌تواند به شناسایی بهتر نیازها و ترجیحات جامعه کمک کند و در نهایت به توسعه راه‌حل‌های حمل‌ونقل پایدارتر و مؤثرتر در تهران منجر شود. با توجه به چالش‌های موجود در سیستم‌های حمل‌ونقل شهری، نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان یک مبنای قوی برای برنامه‌ریزی و بهبود کیفیت خدمات حمل‌ونقل عمومی در تهران و سایر شهرهای مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

٦- مراجع

-Abastante, F., Corrente, S., Greco, S., Ishizaka, A., & Lami, I.M. (2019). A new parsimonious AHP methodology: assigning priorities to many objects by comparing pairwise few reference objects. *Expert Systems with Applications*, *127*, 109–120.

-Abbasi, S., & Choukolaei, H. A. (2023). A systematic review of green supply chain network design literature focusing on carbon policy. *Decision Analytics Journal*, *6*, 100189.

-Abbasi, S., Daneshmand-Mehr, M., & Ghane Kanafi, A. (2021). The sustainable supply chain of CO2 emissions during the coronavirus disease (COVID-19) pandemic. *Journal of Industrial Engineering International*, *17*(4), 83–108.

-Abbasi, S., Daneshmand-Mehr, M., & Ghane Kanafi, A. (2022). Designing Sustainable Recovery Network of End-of-Life Product during the COVID-19 Pandemic: A Real and Applied Case Study. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, *2022*(1), 6967088.

-Abbasi, S., Zahmatkesh, S., Bokhari, A., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2023). Designing a vaccine supply chain network considering environmental aspects. *Journal of Cleaner Production*, *417*, 137935.

-Abdullah, L., & Najib, L. (2014). A new preference scale of intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process in multi-criteria decision-making problems. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, *26*(2), 1039–1049.

-Abdullah, L., & Najib, L. (2016). A new preference scale MCDM method based on interval-valued intuitionistic fuzzy sets and the analytic hierarchy process. *Soft Computing*, *20*, 511–523.

-Ahmed, F., & Kilic, K. (2019). Fuzzy analytic hierarchy process: a performance analysis of various algorithms. *Fuzzy Sets and Systems*, *362*, 110–128.

-Akram, M., Noreen, U., & Deveci, M. (2024). An outranking method for optimizing anti-aircraft missile systems with 2-tuple linguistic m-polar fuzzy data. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *132*, 107923.

-Alamoodi, A. H., Albahri, O. S., Deveci, M., Albahri, A. S., Yussof, S., Dinçer, H., & Sharaf, I. M. (2024). Selection of electric bus models using 2-tuple linguistic T-spherical fuzzy-based decision-making model. *Expert Systems with Applications*, *249*, 123498.

-Aytekin, A., Korucuk, S., & Görçün, Ö.F. (2024). Determining the factors affecting transportation demand management and selecting the best strategy: a case study. *Transport Policy*, *146*, 150–166.

-Bakhtavar, E., & Lotfian, R. (2017). Applying an integrated fuzzy gray MCDM approach: a case study on mineral processing plant site selection. *International Journal of Mining and Geological Engineering*, *51*(2), 177–183.

-Edvardsson, B. (1997). Quality in new service development: key concepts and a frame of reference. *International Journal of Production Economics*, *52*(1-2), 31–46.

-Edvardsson, B., Enquist, B. (2009). *Values-based Service for Sustainable Business: Lessons from IKEA*. Routledge, London, UK.

-Fatima, A., Ashraf, S., & Jana, C. (2024). Approach to multi-attribute decision making based on spherical fuzzy Einstein Z-number aggregation information. *Journal of Operations Intelligence*, *2*(1), 179–201. **doi.org/10.31181/jopi21202411.**

-Fellesson, M., & Friman, M. (2008). Perceived satisfaction with public transport service in nine European cities. In *Journal of the Transportation Research Forum*, Vol. 47, No. 3.

doi.org/10.5399/osu/jtrf.47.3.2126.

-Garau, C., Desogus, G., Barabino, B., & Coni, M. (2022). Accessibility and public transport mobility for a smart(er) island: evidence from Sardinia (Italy). *Sustainable Cities and Society*, *87*, 104145.

-Ghorbanzadeh, O., Moslem, S., Blaschke, T., & Duleba, S. (2018). Sustainable urban transport planning considering different stakeholder groups by an interval-AHP decision support model. *Sustainability*, *11*(1), 9.

-Gündoğdu, F.K., Duleba, S., Moslem, S., & Aydın, S. (2021). Evaluating public transport service quality using picture fuzzy analytic hierarchy process and linear assignment model. *Applied Soft Computing*, *100*, 106920.

-Ha, S.T., Ibrahim, W.H.W., Lo, M.C., & Mah, Y.S. (2019). Factors affecting satisfaction and loyalty in public transport using partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM). *Transport*, *10*, 60. **doi.org/10.35940/ijitee.L3453.1081219**

-Haseli, G., Bonab, S. R., Hajiaghaei-Keshteli, M., Ghoushchi, S. J., & Deveci, M. (2024). Fuzzy ZE-numbers framework in group decision-making using the BCM and CoCoSo to address sustainable urban transportation. *Information Sciences*, *653*, 119809.

-Imam, R. (2014). Measuring public transport satisfaction from user surveys. *International Journal of Business Management*, *9*(6), 106.

-Ingvardson, J.B., Nielsen, O.A., Raveau, S., & Nielsen, B.F. (2018). Passenger arrival and waiting time distributions depend on train service frequency and station characteristics: a smart card data analysis. *Transport Research Part C*, *90*, 292–306.

-Jomnonkwao, S., & Ratanavaraha, V. (2016). Measurement modeling of the perceived service quality of a sightseeing bus service: an application of hierarchical confirmatory factor analysis. *Transport Policy*, *45*, 240–252.

doi.org/10.1016/j.tranpol.2015.04.001

-Kakati, P., Senapati, T., Moslem, S., & Pilla, F. (2024). Fermatean fuzzy Archimedean Heronian Mean-Based Model for estimating sustainable urban transport solutions. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *127*, 107349.

-Bolturk, E., & Kahraman, C. (2018). A novel interval-valued neutrosophic AHP with cosine similarity measure. *Soft Computing*, *22*(15), 4941–4958.

-Bouraima, M. B., Ayyildiz, E., Ozcelik, G., Tengecha, N. A., & Stević, Ž. (2024). Alternative prioritization for mitigating urban transportation challenges using a Fermatean fuzzy-based intelligent decision support model. *Neural Computing and Applications*, *36*(13), 7343-7357.

-Bouraima, M.B., Qiu, Y., Stević, Ž., & Simić, V. (2023). Assessment of alternative railway systems for sustainable transportation using an integrated IRNSWARA and IRNCoCoSo model. *Socio-Economic Planning Sciences*, *86*, 101475.

-Brady, M.K., & Cronin Jr., J.J. (2001). Some new thoughts on conceptualizing perceived service quality: a hierarchical approach. *Journal of Marketing*, *65*, 34–49.

-Buckley, J.J. (1985). Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, *17*(3), 233–247.

-Cao, Y., Han, X., Wu, X., Deveci, M., Kadry, S., & Delen, D. (2024). Evaluation of food waste treatment techniques using the complex q-rung orthopair fuzzy generalized TODIM method with weighted power geometric operator. *Journal of Environmental Management*, *353*, 120105.

-Çelikbilek, Y., Moslem, S., & Duleba, S. (2023). A combined grey multi criteria decision making model to evaluate public transportation systems. *Evolving Systems*, 1-15.

-Cheranchery, M.F., Bhattacharyya, K., Salih, M., & Maitra, B. (2019). A proactive approach to assess safety level of urban bus stops. *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*, *26*(3), 260–270.

-Chu, K.F., & Guo, W. (2023). Deep reinforcement learning of passenger behavior in multimodal journey planning with proportional fairness. *Neural Computing and Applications*, *35*(27), 20221–20240.

-Deng, Y., & Yan, Y. (2019). Evaluating Route and Frequency Design of Bus Lines Based on Data Envelopment Analysis with Network Epsilon-Based Measures. *Journal of Advanced Transportation*, *2019*(1), 5024253.

-Deveci, M., Mishra, A. R., Rani, P., Gokasar, I., Isik, M., Delen, D., ... & Daim, T. (2024). Evaluation of intelligent transportation system implementation alternatives in metaverse using a Fermatean fuzzy distance measure-based OCRA model. *Information Sciences*, *657*, 120008.

-Duleba, S., & Moslem, S. (2019). Examining Pareto optimality in analytic hierarchy process on real data: an application in public transport service development. *Expert Systems with Applications*, *116*, 21–30.

-Duleba, S., & Moslem, S. (2021). User satisfaction survey on public transport by a new PAHP-based model. *Applied Sciences*, *11*(21), 10256.

-Moslem, S., Stević, Ž., Tanackov, I., &Pilla, F. (2023a). Sustainable development solutions of public transportation: an integrated IMFSWARA and Fuzzy Bonferroni operator. *Sustainable Cities and Society*, *93*, 104530.

-Nassereddine, M., & Eskandari, H. (2017). An integrated MCDM approach to evaluate public transportation systems in Tehran. *Transport Research Part Policy and Practice*, *106*, 427–439. **doi.org/10.1016/j.tra.2017.10.013**

-Önden, İ., Pamucar, D., Deveci, M., As, Y., Birol, B., & Yıldız, F.S. (2024). Prioritization of transfer centers using GIS and fuzzy Dombi Bonferroni weighted Assessment (DOBAS) model. *Expert Systems with Applications*, *238*, 121827.

-Pamucar, D., Deveci, M., Gokasar, I., Brito-Parada, P. R., & Martínez, L. (2024). Evaluation of process technologies for sustainable mining using interval rough number based heronian and power averaging functions. *Knowledge-Based Systems*, *289*, 111494.

-Parasuraman, A., Zeithaml, V.A., & Berry, L.L. (1985). A conceptual model of service quality and its implications for future research. *Journal of Marketing*, 41–50.

Pina, V., & Torres, L. (2001). Analysis of the efficiency of local government services delivery: An application to urban public transport. *Transport Research Part Policy and Practice*, *35*(10), 929–944. **doi.org/10.1016/s0965-8564(00)00033-1**

-Saaty, T.L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, *15*(3), 234–281.

-Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process (AHP). *The Journal of the Operational Research Society*, *41*(11), 1073-1076.

-Schneider, B., & White, S.S. (2004). *Service Quality: Research Perspectives*. SAGE, Thousand Oaks, CA.

-Sebhatu, S. P. (2010). *Corporate social responsibility for sustainable service dominant logic* (Doctoral dissertation, Karlstads universitet).

-Soza-Parra, J., Raveau, S., Muñoz, J.C., & Cats, O. (2019). The underlying effect of public transport reliability on users' satisfaction. *Transport Research Part Policy and Practice*, *126*, 83–93.

-Sun, S., Fang, D., & Cao, J. (2020). Exploring the asymmetric influences of stop attributes on rider satisfaction with bus stops. *Travel Behavior and Society*, *19*, 162–169.

-Tezel, B., & Kınay, A.Ö. (2023). Performance evaluation of magnitude-based fuzzy analytic hierarchy process (MFAHP) method. *Acta Infologica*, *7*(2), 293–307.

-Too, L., & Earl, G. (2010). Public transport service quality and sustainable development: a community stakeholder perspective. *Sustainable Development*, *18*(1), 51–61.

-Tütüncü, K.A., Gül, N.N., Bölükbaş, U., & Güneri, A.F. (2023). Integer linear programming approach for the personnel shuttles routing problem in Yıldız

-Kenger, Z.D., Kenger, Ö.N., & Özceylan, E. (2023). Analytic hierarchy process for urban transportation: a bibliometric and social network analysis. *Central European Journal of Operations Research*, 1–20.

-Keshavarz-Ghorabaee, M., Amiri, M., Zavadskas, E.K., Turskis, Z., & Antuchevičienė, J. (2022). MCDM approaches for evaluating urban and public transportation systems: a short review of recent studies. *Transport*, *37*(6), 411–425.

-Kınay, A.Ö., & Atılgan, C. (2022). Providing priority degrees for the challenges of cloud-based outsourced software development projects via fuzzy analytic hierarchy process methods. *Journal of Emerging Computer Technologies*, *2*(1), 1–6.

-Kinay, A.Ö., & Tezel, B.T. (2022). Modification of the fuzzy analytic hierarchy process via different ranking methods. *International Journal of Intelligent Systems*, *37*(1), 336–364.

-Liu, Z. (2024). A distance measure of Fermatean fuzzy sets based on triangular divergence and its application in medical diagnosis. *Journal of Operations Intelligence*, *2*(1), 167–178. **doi.org/10.31181/jopi21202415**

-Miao, Q., Welch, E.W., & Sriraj, P.S. (2019). Extreme weather, public transport ridership, and moderating effect of bus stop shelters. *Journal of Transport Geography*, *74*, 125–133.

-Minatour, Y., Bonakdari, H., & Aliakbarkhani, Z.S. (2016). Extension of fuzzy Delphi AHP based on interval-valued fuzzy sets and its application in water resource rating problems. *Water Resources Management*, *30*(9), 3123–3141.

-Mohd, W.R.W., & Abdullah, L. (2017). Pythagorean fuzzy analytic hierarchy process to multi-criteria decision making. *AIP Conference Proceedings*, *1905*, 040020.

-Moslem, S. (2024). A novel parsimonious spherical fuzzy analytic hierarchy process for sustainable urban transport solutions. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *128*, 107447.

-Moslem, S., & Çelikbilek, Y. (2020). An integrated grey AHP-MOORA model for ameliorating public transport service quality. *European Transport Research Review*, *12*(1), 1–13.

-Moslem, S., Ghorbanzadeh, O., Blaschke, T., & Duleba, S. (2019). Analyzing stakeholder consensus for a sustainable transport development decision by the fuzzy AHP and interval AHP. *Sustainability*, *11*(12), 3271.

-Moslem, S., Gündoğdu, F. K., Saylam, S., & Pilla, F. (2024). A hybrid decomposed fuzzy multi-criteria decision-making model for optimizing parcel lockers location in the last-mile delivery landscape. *Applied Soft Computing*, *154*, 111321.

-Moslem, S., Saraji, M. K., Mardani, A., Alkharabsheh, A., Duleba, S., & Esztergár-Kiss, D. (2023b). A systematic review of analytic hierarchy process applications to solve transportation problems: From 2003 to 2022. *Ieee Access*, *11*, 11973-11990.

(2024). Neutrosophic bipolar fuzzy decision-based approach for developing sustainable circular business model innovation tools. *Computers & Industrial Engineering*, *189*, 109966.

-Zheng, Y., He, Y., Xu, Z., & Pedrycz, W. (2018). Assessment for hierarchical medical policy proposals using hesitant fuzzy linguistic analytic network process. *Knowledge-Based Systems*, *161*, 254–267.

-Zhou, T., Zhang, J., Peng, L., & Zhang, S. (2022). Exploring the determinants of public transport usage and shared mobilities: a case study from Nanchang, China. *Sustainable Cities and Society*, *87*, 104146.

-Zhu, B., & Xu, Z. (2014). Analytic hierarchy process-hesitant group decision making. *European Journal of Operational Research*, 239(3), 794–801.

campus in Istanbul. *Journal of Soft Computing and Decision Analytics*, *1*(1), 303–316. **doi.org/10.31181/jscda11202326**

-Xin, Y.X. (2023). The management model of bike sharing system. *Journal of Soft Computing and Decision Analytics*, *1*(1), 209–218. **doi.org/10.31181/jscda1120239**

-Yildiz, N., & Kahraman, C. (2019). Evaluation of social sustainable development factors using Buckley's fuzzy AHP based on Z-numbers. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 770–778.

-Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, *8*(3), 338–353.

-Zaidan, A. A., Deveci, M., Alsattar, H. A., Qahtan, S., Shang, W. L., Delen, D., ... & Mohammed, Z. K.

A Combined Approach Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process for Estimating Sustainable Urban Transportation Solutions (Case Study: Tehran)

Seyed Kamal Sadeghi, *Professor, Economic Development and Planning Group, Faculty of Economics and Management, University of Tabriz, Tabriz, Iran.*

Ali Yasin Obayes AlAwadi, M.Sc., Grad., Economic Development and Planning Group, Faculty of Economics and Management, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

E-mail: sadeghiseyedkamal@gmail.com

Received: February 2026- Accepted: May 2026

ABSTRACT

Transportation systems play a vital role in sustainable development and have a profound impact on social, environmental, and economic sustainability in urban environments. The integration of decision support systems is essential to emphasize the need for change and facilitate policymaking decisions based on current conditions. This study evaluates the public transportation system in Tehran, Iran, with the aim of enhancing sustainability. In this research, transportation experts in Tehran were used as evaluators. The study employs the Magnitude-Based Fuzzy Analytic Hierarchy Process (MFAHP), selected for its accuracy and computational efficiency over existing methods. The results obtained align with the results from the modified fuzzy least squares method, which confirms its validity. Comparative and sensitivity analyses test and confirm the stability and robustness of the proposed model's findings. The study concludes that the introduction of new buses is identified as the most effective solution to improve the quality of services in the existing transportation system. The results, derived from a real dataset and its application in transportation evaluation, provide insights into sustainable urban transportation development, recommending new buses as an optimal solution.

Keywords: Public Transportation System, Sustainable Development, Fuzzy Analytic Hierarchy Process, Sustainable city