

اولویت‌بندی اقتصادی-اجرایی سیاست‌های حمل و نقل پایدار در تهران: تحلیل سناریوها و تصمیم‌گیری چندمعیاره با رویکرد مرحله‌ای

نادر قائم‌مقامی نوری^۱، صدیق رئیسی^۲، فرهاد حسین‌زاده لطفی^۳، علی شهابی^۴

^۱ دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی، گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دبی، امارات متحده عربی

^۲ استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران (نویسنده مسئول: raissi@azad.ac.ir)

^۳ استاد، گروه ریاضی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

^۴ استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵-۰۴-۱۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵-۰۴-۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵-۰۴-۲۵

چکیده

تهران با چالش‌های هم‌زمان ازدحام ترافیکی، آلودگی مزمن هوا و محدودیت‌های شدید مالی و اجرایی مواجه است. در چنین شرایطی، پرسش کلیدی سیاست‌گذاری نه صرفاً تشخیص اثرگذارترین مداخله، بلکه تعیین اولویت اجرایی، نقش مکمل و توالی مرحله‌ای سیاست‌ها است. این مطالعه با هدف پاسخ به این پرسش، یازده گزینه سیاستی شامل هفت سیاست منفرد و چهار بسته ترکیبی را برای افق ۲۰۲۴-۲۰۳۰ ارزیابی می‌کند. روش پژوهش کمی و دومرحله‌ای است. ابتدا پیامدهای سناریوها از یک شبیه‌ساز ترکیبی بالادستی مبتنی بر پویایی سیستم، مدل‌سازی عامل‌بنیان و یادگیری ماشین استخراج شد؛ سپس معیارها با روش CRITIC وزن‌دهی و گزینه‌ها با TOPSIS رتبه‌بندی شدند. همچنین، چندین ساختار وزن‌دهی سیاستی برای تحلیل حساسیت نتایج به کار رفته است. معیارهای ارزیابی ده‌گانه‌اند و سه حوزه اثرگذاری حمل و نقلی، کاهش آلودگی و هزینه سلامت، و امکان‌پذیری مالی-اجرایی را پوشش می‌دهند. یافته‌ها نشان می‌دهد بسته کم‌ریسک (سناریوی ۸) در وزن‌دهی متوازن مناسب‌ترین گزینه آغازین است. کاهش آلودگی محلی ناوگان (سناریوی ۶) ستون سیاست هوای پاک و مدیریت زمانی تقاضای سفر (سناریوی ۱) بهترین نقطه شروع در شرایط محدودیت مالی شدید است. نوآوری اصلی مقاله در ارائه چارچوبی کاربردی برای اولویت‌بندی اقتصادی-اجرایی سیاست‌ها و طراحی نقشه راه مرحله‌ای حمل و نقل پایدار در شرایط محدودیت منابع است.

واژه‌های کلیدی: آلودگی هوا، اولویت‌بندی سیاستی، تصمیم‌گیری چندمعیاره، تهران، حمل و نقل پایدار

۱. مقدمه

تهران در دهه‌های اخیر به نمونه‌ای روشن از هم‌زمانی بحران‌های حمل و نقلی، محیط‌زیستی و مالی در مدیریت شهری تبدیل شده است. رشد تقاضای سفر، تمرکز فعالیت‌های اداری و خدماتی، وابستگی بخشی از سفرهای روزانه به خودروی شخصی، فرسودگی بخشی از ناوگان، محدودیت ظرفیت شبکه و فشار مزمن آلودگی هوا، مدیریت شهری را در برابر مجموعه‌ای از انتخاب‌های دشوار قرار داده است. در ادبیات حمل و نقل پایدار، چنین وضعیتی صرفاً مسئله جابه‌جایی نیست، بلکه با کیفیت زندگی، سلامت، دسترسی، هزینه‌های اجتماعی، مصرف انرژی و پایداری مالی شهر پیوند دارد (Banister, 2008; Goldman & Gorham, 2006; Rupprecht Consult, 2019; United Nations Human Settlements Programme [UN-Habitat], 2022). در شرایط تهران، این پیوندها با محدودیت‌های بودجه‌ای، چالش‌های هماهنگی نهادی و ملاحظات عدالت دسترسی و آثار توزیعی نیز همراه است که در انتخاب و اولویت‌بندی سیاست‌ها نقش تعیین‌کننده دارند.

کاهش زمان تلف‌شده، کاهش پیمایش خودرومحور، افزایش سهم حمل و نقل عمومی، کاهش ذرات معلق، کنترل هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی و حفظ پذیرش اجتماعی، همگی اهداف مطلوب سیاست‌گذاری‌اند؛ اما کمتر سیاستی می‌تواند همه این اهداف را به‌طور هم‌زمان، سریع و بدون هزینه محقق کند. از این جهت، مسئله اصلی سیاست‌گذاری حمل و نقل پایدار در تهران صرفاً انتخاب «بهترین سیاست فنی» نیست. پرسش مهم‌تر آن است که در شرایط محدودیت مالی، فشار یارانه‌ای، دشواری نهادی، حساسیت اجتماعی و ضرورت کاهش آلودگی، کدام سیاست برای آغاز اجرا مناسب‌تر است و کدام سیاست باید در قالب بسته‌ای مکمل یا مشروط به تأمین منابع و ظرفیت بیشتر دنبال شود. این مسئله به‌ویژه برای شهری مانند تهران اهمیت دارد که با هزینه‌های محیط‌زیستی و سلامت عمومی، و همچنین محدودیت‌های جدی در بودجه شهرداری و سرمایه‌گذاری حمل و نقل عمومی مواجه است (Ahmadi et al., 2022; Bayat et al., 2020; Jafari Shahrestani et al., 2022).

ادبیات جهانی نشان می‌دهد سیاست‌های حمل و نقل شهری زمانی از پایداری بیشتری برخوردارند که آثار مستقیم، غیرمستقیم و توزیعی آن‌ها هم‌زمان در نظر گرفته شود. قیمت‌گذاری ورود به محدوده مرکزی می‌تواند تقاضای استفاده از خودروی شخصی را کاهش دهد، اما اگر کیفیت و ظرفیت حمل و نقل عمومی کافی نباشد، ممکن است پذیرش اجتماعی آن کاهش یابد و آثار محیط‌زیستی مورد انتظار نیز به‌طور کامل محقق نشود (Axsen & Long, 2025; Hosford et al., 2021; Selmoune et al., 2020). بهبود کیفیت خدمت حمل و نقل عمومی می‌تواند سهم سفرهای همگانی را افزایش دهد، اما معمولاً به سرمایه‌گذاری، هزینه‌های عملیاتی و تعهدات یارانه‌ای نیاز دارد. پاک‌سازی یا نوسازی ناوگان نیز از منظر کاهش آلاینده‌های محلی اهمیت دارد، ولی به تنهایی سیاست کاهش ازدحام نیست و بدون مدیریت تقاضا یا بهبود خدمت، الزاماً فشار شبکه را کاهش نمی‌دهد. بنابراین، مقایسه سیاست‌های حمل و نقل پایدار باید چندبعدی باشد و نمی‌تواند تنها بر یک پیامد فنی یا محیط‌زیستی استوار شود.

در تهران، این چندبعدی بودن با زمینه‌های حقوقی و اجرایی نیز پیوند دارد. سیاست‌هایی مانند کنترل ورود خودرو به محدوده مرکزی، مدیریت پارک حاشیه‌ای، بهبود خدمت حمل و نقل عمومی، نوسازی ناوگان، کاهش آلاینده‌گی وسایل نقلیه و حمایت از کرایه حمل و نقل عمومی، در تجربه یا برنامه‌های مدیریت شهری جایگاه داشته‌اند. قانون هوای پاک و آیین‌نامه‌های اجرایی آن نیز بر کنترل آلودگی منابع متحرک، معاینه فنی، محدودیت وسایل نقلیه فرسوده، نوسازی ناوگان و گسترش حمل و نقل عمومی تأکید دارند (Clean Air Act of Iran, 2017; National Laws and Regulations Portal, 2021). ارزیابی نظام حمل و نقل تهران نیز بر ضرورت تلفیق مدیریت تقاضا، تقویت حمل و نقل عمومی و اصلاح سازوکارهای اجرایی تأکید کرده است (United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific [UNESCAP], 2020). با این حال، وجود مجموعه‌ای از ابزارهای سیاستی به معنای وجود اولویت اجرایی روشن نیست. مدیریت شهری همچنان باید مشخص کند کدام مداخله را می‌توان

با ریسک کمتر آغاز کرد، کدام گزینه باید نقش مکمل داشته باشد و اجرای کدام بسته به منابع مالی و هماهنگی نهادی بیشتری وابسته است.

مطالعات پیشین، بخش‌های مهمی از این مسئله را بررسی کرده‌اند. برخی پژوهش‌ها وضعیت و شاخص‌های حمل و نقل پایدار را سنجیده یا الگوهای ارزیابی پایداری را برای ایران و تهران توسعه داده‌اند (Heidarpour & Jaberi, 2022; Norouzi et al., 2023). گروهی دیگر، یک پروژه، مداخله یا مجموعه‌ای از گزینه‌های حمل و نقلی را با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره ارزیابی کرده‌اند (Morouji et al., 2011; M. Shahbazi et al., 2021). همچنین، روش‌هایی مانند VIKOR، TOPSIS و سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره سابقه گسترده‌ای در ارزیابی گزینه‌های حمل و نقلی و برنامه‌ریزی شهری دارند (Behzadian et al., 2011; Hwang & Yoon, 1981; Opricovic & Tzeng, 2004; Zavadskas & Turskis, 2012). با این وجود، بخش عمده این مطالعات یا بر سنجش وضعیت، یا بر ارزیابی یک مداخله و یا بر رتبه‌بندی گزینه‌ها بر پایه ماتریس‌های نسبتاً ایستا تمرکز دارند. در نتیجه، پیوند میان پیامدهای پویای سناریوها، محدودیت‌های مالی و اجرایی، و تعیین زمان و شرط اجرای سیاست‌ها همچنان نیازمند بررسی بیشتر است.

بر این اساس، مسئله دقیق پژوهش حاضر، تبدیل پیامدهای سناریویی سیاست‌های حمل و نقل به یک اولویت اقتصادی-اجرایی در شرایط محدودیت منابع است. خروجی‌های شبیه‌سازی می‌توانند نشان دهند هر مداخله چه اثری بر ازدحام، آلودگی، سفر، آلودگی و هزینه سلامت دارد، اما به تنهایی مشخص نمی‌کنند کدام گزینه با محدودیت سرمایه‌گذاری، تعهدات یارانه‌ای و ظرفیت نهادی مدیریت شهری تهران سازگارتر است. هدف پژوهش حاضر، رفع این فاصله از طریق ارزیابی هم‌زمان اثرگذاری و امکان‌پذیری یازده گزینه شامل هفت سیاست منفرد و چهار بسته ترکیبی در افق ۲۰۲۴ تا ۲۰۳۰ است. برای این منظور، مقادیر سناریویی از خروجی‌های کنترل‌شده یک شبیه‌ساز ترکیبی بالادستی مبتنی بر پویایی سیستم، مدل‌سازی عامل‌بنیان و یادگیری ماشین استخراج و به یک ماتریس تصمیم ده معیاره تبدیل شده‌اند. معیارها، پیامدهای حمل و نقلی، کاهش آلودگی و هزینه سلامت و امکان‌پذیری مالی و اجرایی را پوشش می‌دهند. وزن‌دهی عینی معیارها با روش CRITIC و رتبه‌بندی گزینه‌ها با روش TOPSIS انجام می‌شود و پایداری نتایج نیز در چند ساختار وزن‌دهی و آزمون‌های حساسیت بررسی می‌گردد. تمرکز مقاله بر لایه تصمیم‌گیری پسانساریویی است؛ بنابراین، هدف آن بازتولید جزئیات کامل معماری شبیه‌ساز نیست، بلکه تبدیل خروجی‌های سناریویی به اطلاعات قابل استفاده برای تصمیم‌گیری مدیریت شهری است.

تمایز پژوهش حاضر در استفاده صرف از یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره نیست، بلکه در پیوند میان پیامدهای پویای سناریوها، محدودیت‌های مالی و نهادی و منطق اجرای مرحله‌ای سیاست‌ها قرار دارد. رتبه‌بندی در این مطالعه فقط برای معرفی گزینه‌ی دارای بیشترین امتیاز به کار نمی‌رود، بلکه برای تشخیص نقش و شرایط اجرای گزینه‌ها استفاده می‌شود؛ به گونه‌ای که بتوان میان اقدام مناسب برای آغاز، سیاست مکمل، محور هوای پاک و بسته توسعه‌ای مشروط تمایز قائل شد. بر این مبنا، پرسش اصلی پژوهش چنین است: در شرایط هم‌زمان ازدحام شبکه، آلودگی هوا و محدودیت مالی و اجرایی مدیریت شهری تهران، کدام سیاست‌ها یا بسته‌های سیاستی حمل و نقل پایدار برای آغاز اجرا مناسب‌ترند و کدام گزینه‌ها باید به مراحل بعد یا تحقق پیش‌شرط‌های مالی و نهادی موکول شوند؟

مقاله پس از مقدمه در پنج بخش تنظیم شده است. بخش دوم، مبانی نظری، مطالعات تجربی و جایگاه پژوهش را تبیین می‌کند. بخش سوم، منشأ داده‌های سناریویی، منطق انتخاب گزینه‌ها و معیارها و مراحل وزن‌دهی و رتبه‌بندی را توضیح می‌دهد. در بخش چهارم، نتایج رتبه‌بندی و آزمون‌های حساسیت گزارش می‌شود. بخش پنجم، یافته‌ها را با مطالعات پیشین مقایسه

می‌کند، نقش ویژگی‌های خاص تهران را در شکل‌گیری نتایج توضیح می‌دهد و دلالت‌های اجرایی آن‌ها را استخراج می‌نماید. بخش ششم نیز به جمع‌بندی یافته‌های محوری، محدودیت‌های مطالعه و مسیرهای پژوهش آینده اختصاص دارد.

۲. پیشینه‌ی نظری و تجربی

۲-۱. مبانی نظری و چارچوب تحلیلی

حمل و نقل پایدار معمولاً بر سه پایه دسترسی، پایداری محیط‌زیستی و کارایی اقتصادی استوار است. در این رویکرد، هدف فقط جابه‌جایی سریع‌تر نیست، بلکه فراهم‌کردن دسترسی ایمن، مقرون به صرفه، کم‌آلاینده و قابل اتکا برای شهروندان و فعالیت‌های اقتصادی است. راهنماهای برنامه‌ریزی حمل و نقل پایدار شهری بر یکپارچگی میان کاربری زمین، حمل و نقل عمومی، مدیریت تقاضا، مشارکت ذی‌نفعان، عدالت دسترسی و پایش مستمر تأکید می‌کنند (European Commission [EC], 2019; Rupprecht Consult, 2021). دستورکار توسعه پایدار و گزارش‌های شهری سازمان ملل نیز دسترسی ایمن و پایدار را بخشی از کیفیت زندگی شهری و تاب‌آوری شهرها می‌دانند (United Nations [UN], 2015; United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2019; UN-Habitat, 2022). بر این مبنا، چارچوب تحلیلی مقاله حاضر سه حوزه را هم‌زمان در نظر می‌گیرد: کارایی و دسترسی حمل و نقلی، کاهش آثار خارجی محیط‌زیستی و سلامت، و امکان‌پذیری مالی و اجرایی سیاست.

آثار سیاست‌های حمل و نقلی از مسیرهای متفاوت و گاه متعارض ظاهر می‌شوند. یک سیاست ممکن است ازدحام را کاهش دهد، اما فشار اجتماعی ایجاد کند؛ سیاست دیگر ممکن است آلودگی را کاهش دهد، ولی هزینه سرمایه‌ای بالایی داشته باشد؛ و سیاستی دیگر ممکن است از نظر مالی سبک باشد، اما اثر محیط‌زیستی محدودی بر جای بگذارد. از این جهت، کنترل تقاضا، قیمت‌گذاری و محدودیت استفاده از خودرو زمانی می‌تواند پایدار و قابل اجرا باشد که هم‌زمان به پذیرش اجتماعی، کیفیت و دسترسی گزینه‌های جایگزین و نحوه استفاده از درآمدهای حاصل از سیاست توجه شود (Hosford et al., 2021; Selmourne et al., 2020; Small & van Dender, 2007; Vickrey, 1969). این دیدگاه، سیاست‌گذاری حمل و نقل را از انتخاب یک ابزار منفرد به طراحی مجموعه‌ای از ابزارهای مکمل انتقال می‌دهد؛ زیرا محدودکردن خودروی شخصی، بدون تقویت حمل و نقل عمومی، یا توسعه حمل و نقل عمومی، بدون توجه به منابع مالی و تعهدات عملیاتی، ممکن است به نتیجه پایدار منجر نشود.

از سوی دیگر، مسئله آلودگی هوا و سلامت عمومی، حمل و نقل شهری را به حوزه اقتصاد سلامت و هزینه‌های اجتماعی پیوند می‌دهد. PM_{2.5} یکی از شاخص‌های کلیدی آلودگی هوا و خطر سلامت است و برنامه‌ریزی حمل و نقل می‌تواند از طریق کاهش انتشار و مواجهه با آلاینده‌ها بر سلامت شهری اثر بگذارد (Nieuwenhuijsen, 2016; World Health Organization, 2021). در سطح جهانی نیز مدیریت تقاضا، تغییر رفتار سفر، بهبود حمل و نقل عمومی و پاک‌سازی فناوری ناوگان، به‌عنوان مسیرهای مکمل کاهش آثار اقلیمی و آلودگی حمل و نقل مطرح شده‌اند (Creutzig et al., 2018; EC, 2020; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022). با این حال، کاهش جرم آلاینده را نمی‌توان لزوماً معادل کاهش یکسان همه هزینه‌های سلامت دانست؛ زیرا تبدیل کاهش انتشار به منفعت سلامت به الگوی مواجهه، رابطه دوز-پاسخ و شیوه ارزش‌گذاری بار بیماری وابسته است. به همین دلیل، در پژوهش حاضر کاهش PM_{2.5} و کاهش شاخص هزینه سلامت به‌صورت دو معیار مرتبط، اما متمایز، وارد تحلیل شده‌اند.

این تعارض میان اهداف و محدودیت‌ها، مسئله پژوهش را به یک تصمیم چندمعیاره تبدیل می‌کند. تصمیم‌گیرنده شهری با معیارهایی ناهمگن، جهت‌های مطلوب متفاوت و ترجیحات سیاستی متغیر روبه‌رو است. در چارچوب مقاله حاضر، میان «مطلوبیت پیامدی» و «امکان‌پذیری اجرا» تمایز گذاشته می‌شود. معیارهای حمل و نقلی، آلودگی و سلامت نشان می‌دهند هر سیاست در

صورت اجرا چه پیامدی ایجاد می‌کند؛ در مقابل، فشار مالی، هزینه سرمایه‌ای، نیاز یارانه و پیچیدگی اجرا نشان می‌دهند آغاز و تداوم آن تا چه اندازه با ظرفیت مدیریت شهری سازگار است. بنابراین، سیاست دارای بیشترین اثر فنی لزوماً مناسب‌ترین سیاست برای آغاز اجرا نیست و سیاست کم‌هزینه نیز لزوماً راه‌حل کامل مسئله محسوب نمی‌شود.

۲-۲. مطالعات تجربی

در ادبیات داخلی، بخشی از مطالعات به سنجش وضعیت حمل و نقل پایدار پرداخته‌اند. این مطالعات نشان داده‌اند که وضعیت حمل و نقل از منظر پایداری در دوره‌های مورد بررسی با چالش‌های جدی مواجه بوده و حمل و نقل زمینی هزینه‌های اقتصادی و محیط‌زیستی قابل توجهی تحمیل کرده است (Heidarpour & Jaber, 2022). این خط پژوهشی اهمیت و ابعاد مسئله را روشن می‌کند، اما عمدتاً در سطح تشخیص وضعیت باقی می‌ماند و به این پرسش پاسخ مستقیم نمی‌دهد که در شرایط محدودیت منابع، کدام سیاست اجرایی باید در اولویت قرار گیرد. در مطالعات جدیدتر، تلاش‌هایی برای طراحی الگوی ارزیابی حمل و نقل پایدار شهری با تأکید بر منطقه کلان‌شهری تهران انجام شده است. این پژوهش‌ها ابعاد و مؤلفه‌های پایداری حمل و نقل شهری را شناسایی کرده‌اند و نشان داده‌اند که موضوع حمل و نقل پایدار تهران در ادبیات اقتصاد و برنامه‌ریزی شهری جایگاه روشنی دارد (Norouzi et al., 2023). با این حال، تمرکز آن‌ها بیشتر بر تدوین الگو و شاخص‌های ارزیابی است و نه مقایسه سناریوهای سیاستی مشخص از نظر اثر، هزینه، یارانه و پیچیدگی اجرا.

پیوند آلودگی هوا و اقتصاد شهری نیز در مطالعات تهران برجسته شده است. برآوردهای انجام‌شده درباره هزینه مرگ‌های ناشی از آلودگی هوا در تهران نشان می‌دهد که $PM_{2.5}$ بار سلامت و هزینه اقتصادی سنگینی بر شهر تحمیل می‌کند (Bayat et al., 2020). همچنین، تحلیل‌های هزینه-فایده اجتماعی درباره کنترل آلودگی خودروهای سبک، اهمیت مداخله در منابع انتشار متحرک را نشان داده‌اند (Tahamipour Zarandi & Moghise, 2022). این مطالعات مبنای محکمی برای ورود پیامدهای سلامت و هزینه‌های اجتماعی به ارزیابی سیاست فراهم می‌کنند، اما معمولاً اثرات سلامت را همراه با ازدحام، سهم شیوه‌های سفر، هزینه سرمایه‌ای، یارانه و دشواری اجرا در یک چارچوب تصمیم واحد مقایسه نمی‌کنند.

پایداری مالی شهرداری تهران و مسئله کسری بودجه شهرداری‌ها نیز زمینه اقتصادی تصمیم‌گیری درباره سیاست‌های حمل و نقل را تقویت می‌کند. شواهد موجود نشان می‌دهد شهرداری تهران از نظر برخی نسبت‌های بدهی و دارایی با وضعیت ناپایداری مالی مواجه است و کسری بودجه شهرداری‌ها نیز با ناپایداری منابع درآمدی ارتباط دارد (Ahmadi et al., 2022; Jafari, 2022). این مطالعات نشان می‌دهند که محدودیت مالی در تهران یک ملاحظه جانبی نیست، بلکه می‌تواند دامنه و زمان اجرای سیاست‌های حمل و نقل را تعیین کند. با این حال، در این جریان پژوهشی کمتر مشخص شده است که چگونه می‌توان محدودیت‌های مالی را مستقیماً با پیامدهای حمل و نقلی و محیط‌زیستی سناریوهای مشخص تلفیق و به اولویت اجرایی تبدیل کرد.

در حوزه مطالعات حمل و نقل تهران، پژوهش‌هایی درباره قیمت‌گذاری ازدحام، رفتار سفر، محدوده‌های ترافیکی، انتشار آلاینده‌ها و برنامه‌های هوای پاک انجام شده است. بخشی از این مطالعات اثر محدوده‌های ترافیکی تهران بر رفتار جابه‌جایی و تغییر سیاست قیمت‌گذاری را از منظر انتخاب شیوه سفر بررسی کرده‌اند (Mamdoohi & Hamrang Ghoortlar, 2021; Salarvandian et al., 2017). مطالعات نشان می‌دهند که قیمت‌گذاری و محدودیت دسترسی می‌توانند بر استفاده از خودروی شخصی و انتخاب شیوه سفر اثر بگذارند، اما نتیجه آن‌ها به کیفیت گزینه‌های جایگزین، ساختار فضایی شهر و نحوه اجرای سیاست وابسته است. محدودیت این مطالعات برای مسئله حاضر آن است که عموماً بر یک ابزار یا یک پیامد رفتاری متمرکزند

و نقش هم‌زمان کاهش آلاینده‌گی ناوگان، یارانه حمل و نقل عمومی، هزینه سرمایه‌ای و ظرفیت اجرایی را در تعیین اولویت سیاست بررسی نمی‌کنند.

در حوزه آلودگی نیز مطالعات موجودی انتشار و مدل‌سازی سیستمی نشان داده‌اند که منابع متحرک و ساختار ناوگان در آلودگی هوای تهران نقش مهمی دارند (Abbasi et al., 2024; H. Shahbazi et al., 2016, 2019; Tahsiri & Arab, 2023; Vafa-Arani et al., 2014). این مطالعات اهمیت کنترل انتشار ناوگان فرسوده، موتورسیکلت‌ها و وسایل نقلیه متوسط و سنگین را برجسته می‌کنند و پیشنهاد تجربی مناسبی برای سناریوهای پاک‌سازی و نوسازی ناوگان فراهم می‌آورند. با این حال، کاهش شدت انتشار یک سیاست فناوری و محیط‌زیستی است و به تنهایی درباره پیامد آن بر ازدحام، تقاضای سفر یا فشار مالی مدیریت شهری تصمیم‌گیری نمی‌کند. از این جهت، نتایج این مطالعات باید در کنار مطالعات رفتار سفر و امکان‌پذیری اقتصادی تفسیر شوند.

در کنار این جریان‌ها، مطالعات شبیه‌سازی پویایی سیستم و مدل‌سازی سیاستی، ظرفیت مهمی برای بازنمایی بازخوردها، انباشت‌ها و تأخیرهای سیاست‌های حمل و نقل فراهم کرده‌اند (Haghshenas et al., 2015; Rassafi et al., 2014; Shepherd, 2014; Suryani et al., 2020). مزیت این مطالعات در آن است که پیامد سیاست‌ها را به صورت مسیرهای زمانی و در چارچوب روابط متقابل میان تقاضا، ظرفیت، ازدحام، انرژی و محیط‌زیست بررسی می‌کنند. اگرچه، خروجی آن‌ها معمولاً در سطح مقایسه آثار سناریوها باقی می‌ماند و کمتر به یک اولویت‌بندی صریح اقتصادی-اجرایی تبدیل می‌شود که مشخص کند کدام سیاست باید فوراً، کدام سیاست به عنوان مکمل و کدام گزینه مشروط به تأمین منابع اجرا شود.

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره نیز برای تبدیل معیارهای ناهمگن به رتبه‌بندی قابل تفسیر به کار گرفته شده‌اند. TOPSIS بر فاصله گزینه‌ها از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی تکیه دارد، در حالی که CRITIC وزن معیارها را بر اساس پراکندگی اطلاعات و تعارض میان معیارها محاسبه می‌کند (Diakoulaki et al., 1995; Hwang & Yoon, 1981). مرورهای روش‌شناختی نشان داده‌اند که TOPSIS و سایر روش‌های چندمعیاره در مسائل حمل و نقل، محیط‌زیست، انرژی و برنامه‌ریزی شهری کاربرد گسترده‌ای دارند (Behzadian et al., 2012; Opricovic & Tzeng, 2004; Zavadskas & Turskis, 2011). در ایران نیز از روش‌های چندمعیاره برای ارزیابی پروژه‌های حمل و نقل شهری و سیستم‌های حمل و نقل پایدار استفاده شده است (Morouji et al., 2011; M. Shahbazi et al., 2021). محدودیت این جریان آن است که بسیاری از کاربردها بر پروژه‌های عمرانی، شاخص‌های عمومی یا ماتریس‌های تصمیم‌ایستا و وزن‌های مبتنی بر قضاوت تمرکز دارند. در مقابل، گزینه‌های پژوهش حاضر سیاست‌ها و بسته‌های قابل اجرا هستند و مقادیر ماتریس تصمیم آن‌ها از مسیرهای پویای سناریویی استخراج شده است.

۲-۳. جایگاه پژوهش

مرور ادبیات نشان می‌دهد چهار مرحله مرتبط، اما غالباً جدا از یکدیگر، در مطالعات پیشین وجود دارد: تشخیص وضعیت پایداری، برآورد پیامد سیاست، سنجش امکان‌پذیری اجرا و تعیین اولویت و توالی اقدام. مطالعات شاخص محور عمدتاً وضعیت و ابعاد مسئله را تشخیص می‌دهند؛ مطالعات آلودگی و سلامت، اهمیت هزینه‌های اجتماعی و کنترل منابع متحرک را نشان می‌دهند؛ مطالعات رفتار سفر و قیمت‌گذاری، پاسخ کاربران به ابزارهای محدودکننده را بررسی می‌کنند؛ و مدل‌های شبیه‌سازی، مسیرهای زمانی پیامدها را بازنمایی می‌نمایند. همچنین، روش‌های چندمعیاره امکان مقایسه گزینه‌ها را فراهم می‌کنند. با این بررسی، کمتر پژوهشی این چهار مرحله را در یک چارچوب واحد برای پاسخ به مسئله اجرایی تهران به هم پیوند داده است.

کمبود اصلی ادبیات موجود، فقدان مطالعه درباره اثر سیاست‌ها یا فقدان روش رتبه‌بندی نیست، بلکه نبود پیوند نظام‌مند میان «اثر سناریویی»، «قیود مالی و نهادی» و «زمان و شرط اجرای سیاست» است. بسیاری از مطالعات مشخص می‌کنند کدام

شاخص مهم‌تر یا کدام سیاست از نظر یک پیامد مؤثرتر است، اما کمتر توضیح می‌دهند که اگر مدیریت شهری هم‌زمان با فشار مالی، تعهد یارانه‌ای، محدودیت سرمایه‌گذاری، پیچیدگی نهادی و حساسیت اجتماعی روبه‌رو باشد، کدام سیاست را باید نخست آغاز کند و کدام گزینه را به تأمین پیش‌شرط‌های بیشتر موکول نماید.

پژوهش حاضر این فاصله را در سه سطح هدف قرار می‌دهد. نخست، ماتریس تصمیم از خروجی مسیرهای سناریویی یک چارچوب شبیه‌سازی و نه صرفاً از قضاوت‌های منفصل یا شاخص‌های ایستا ساخته می‌شود. دوم، مطلوبیت حمل و نقلی، محیط‌زیستی و سلامت در کنار امکان‌پذیری مالی و اجرایی ارزیابی می‌شود؛ بدون آنکه اثرگذاری فنی به تنهایی معادل اولویت اجرا تلقی گردد. سوم، خروجی تحلیل صرفاً یک رتبه‌بندی عددی نیست، بلکه به تفکیک نقش سیاست‌ها و طراحی توالی اجرا ترجمه می‌شود: اقدام فوری، بسته آغازین متوازن، ستون هوای پاک، اهرم مکمل و بسته توسعه‌ای مشروط. به این ترتیب، سهم مقاله در تقویت حلقه میان شبیه‌سازی پیامدها و تصمیم اقتصادی-اجرایی درباره ترتیب و شرط اجرای سیاست‌های حمل و نقل پایدار در تهران قرار دارد.

۳. روش پژوهش

۳-۱. نوع پژوهش و منطق کلی

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر طراحی، کمی و دوجمله‌ای است. در مرحله نخست، پیامدهای گزینه‌های سیاستی نسبت به مسیر پایه از چارچوب شبیه‌سازی بالادستی استخراج می‌شوند و در مرحله دوم، این پیامدها در قالب یک ماتریس تصمیم چندمعیاره برای وزن‌دهی و رتبه‌بندی گزینه‌ها به کار می‌روند. واحد تحلیل، هفت سیاست منفرد و چهار بسته ترکیبی حمل و نقل پایدار در تهران است و هدف، پشتیبانی از تعیین اولویت اقتصادی و اجرایی آن‌هاست. تمرکز مقاله حاضر بر مرحله پس از سناریوسازی، یعنی تبدیل خروجی‌های سناریویی به معیارهای قابل مقایسه و استخراج اولویت‌های اجرایی، قرار دارد.

قلمرو اصلی تحلیل، شهر تهران است و رتبه‌بندی گزینه‌ها برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری در سطح مدیریت شهری انجام می‌شود. با این حال، به دلیل تمرکز بخشی از فعالیت‌ها، سفرها، مواجهه با آلودگی و مداخلات سیاستی در هسته مرکزی، منطقه ۱۲ نیز به عنوان قلمرو مکمل تحلیل حساسیت مکانی وارد مطالعه شده است. معیارهای اصلی حمل و نقلی، محیط‌زیستی، سلامت و مالی در سطح تهران تعریف شده‌اند؛ و کاهش $PM_{2.5}$ در منطقه ۱۲ برای سنجش اثر نسبی سیاست‌ها در هسته مرکزی به ماتریس تصمیم افزوده شده است. از این جهت، نتایج منطقه ۱۲ به عنوان شاخص حساسیت مکانی تفسیر می‌شوند، نه پیش‌بینی نقطه‌ای و مستقل برای آن منطقه. معیارهای نهایی با هدف پوشش سه حوزه اثرگذاری حمل و نقلی، پیامدهای آلودگی و سلامت و امکان‌پذیری مالی و اجرایی انتخاب شدند. مبنای انتخاب، تعریف عملیاتی، واحد گزارش، و جهت مطلوب هر معیار در ادامه ارائه می‌شود.

۳-۲. منشأ مقادیر سناریویی، محدودیت‌های مدل بالادستی و تبدیل آن‌ها به ماتریس تصمیم

مقادیر ماتریس تصمیم از لایه سناریوسازی بالادستی استخراج شده‌اند. هدف این بخش، توضیح منشأ این مقادیر، نحوه تبدیل خروجی‌های سناریویی به معیارهای قابل مقایسه و حدود استنباط از آن‌هاست. از آنجا که تمرکز مقاله حاضر بر اولویت‌بندی اقتصادی و اجرایی گزینه‌ها قرار دارد، معماری فنی، کالیبراسیون تفصیلی پارامترها و همه مراحل توسعه شبیه‌ساز گزارش نمی‌شود؛ لذا، سازوکار کلی آن به اندازه‌ای تشریح می‌شود که ارتباط میان سناریوهای سیاستی و مقادیر ماتریس تصمیم روشن باشد.

چارچوب بالادستی، یک شبیه‌ساز ترکیبی حلقه‌بسته برای تحلیل سناریوهای حمل و نقل پایدار در تهران است. در این چارچوب، پویایی سیستم، مدل‌سازی عامل‌بنیان و یادگیری ماشین در یک چرخه سالانه و بر پایه مجموعه‌ای مشترک از متغیرها با یکدیگر تعامل دارند. حلقه‌بسته بودن به این معناست که پیامدهای هر سال، مانند تغییر سهم شیوه‌های سفر، ازدحام، هزینه سفر، وضعیت ناوگان و فشار مالی، بخشی از شرایط آغازین سال بعد را تشکیل می‌دهند. از این جهت، مدل برای هر گزینه یک مسیر پیوسته در افق ۲۰۲۴ تا ۲۰۳۰ تولید می‌کند، نه مجموعه‌ای از برآوردهای مستقل و گسسته برای سال‌های مختلف.

چرخه سالانه مدل با برآورد گرایش اولیه سهم شیوه‌های سفر آغاز می‌شود. لایه یادگیری ماشین این گرایش را با استفاده از اطلاعات سال‌های گذشته و متغیرهای قابل دسترس در زمان پیش‌بینی برآورد می‌کند. سپس لایه عامل‌بنیان آن را با توجه به ویژگی‌های هر سناریو، از جمله قیمت‌گذاری دسترسی، محدودیت پارکینگ، تغییر کرایه، کیفیت و ظرفیت حمل و نقل عمومی، امکان جایگزینی شیوه سفر و میزان تبعیت از سیاست تعدیل می‌کند. عامل‌ها در این چارچوب، واکنش‌های رفتاری و اجرایی به سیاست‌ها را بازنمایی می‌کنند و به معنای شبیه‌سازی تک‌تک مسافران یا وسایل نقلیه نیستند. پس از این مرحله، لایه پویایی سیستم تغییرات تقاضای سفر و سهم شیوه‌ها را به پیامدهایی مانند پیمایش، ازدحام، زمان تلف‌شده، مصرف انرژی، انتشار آلاینده‌ها، بار سلامت، هزینه‌های عملیاتی، نیاز یارانه‌ای، هزینه سرمایه‌ای و فشار مالی مدیریت شهری مرتبط می‌سازد. نتایج هر سال در وضعیت مدل ثبت و به سال بعد منتقل می‌شوند تا آثار تدریجی و بازخوردهای هر سیاست حفظ شود.

بر پایه این چرخه، فرایند تولید ماتریس تصمیم در چهار گام انجام شد. نخست، مسیر پایه به‌عنوان ادامه روند بدون اجرای مداخله سیاستی جدید تعریف گردید. دوم، سیاست‌های منفرد و بسته‌های ترکیبی بر اساس منطق و ضوابط تشریح‌شده در بخش ۳-۳ تعیین شدند. سوم، برای هر گزینه، تغییرات نسبت به مسیر پایه در افق ۲۰۲۴ تا ۲۰۳۰ استخراج و در قالب ده معیار تصمیم خلاصه شد. چهارم، معیارهای C1 تا C6 به‌صورت بهبود نسبت به مسیر پایه و معیارهای C7 تا C10 به‌صورت هزینه، فشار یا امتیاز نامطلوب وارد ماتریس شدند. در مرحله نرمال‌سازی نیز جهت معیارهای هزینه‌ای معکوس شد تا مقدار نرمال‌شده بزرگ‌تر در همه معیارها بیانگر وضعیت مطلوب‌تر باشد.

خروجی‌های سناریویی، حوزه‌هایی مانند زمان تلف‌شده، پیمایش معادل سواری، سهم حمل و نقل عمومی، PM2.5، شاخص هزینه سلامت، فشار مالی، هزینه سرمایه‌ای، نیاز یارانه‌ای و پیچیدگی اجرا را پوشش می‌دهند. این خروجی‌ها به‌جای آنکه صرفاً به‌عنوان نتایج شبیه‌سازی گزارش شوند، به معیارهای تصمیم‌ساز تبدیل شده‌اند تا مقایسه منظم گزینه‌ها امکان‌پذیر شود. بنابراین، زنجیره تحلیل از تعریف اهرم‌های سیاستی آغاز می‌شود، با تولید مسیرهای سناریویی و تشکیل ماتریس تصمیم ادامه می‌یابد، و پس از وزن‌دهی و رتبه‌بندی، به تفسیر اقتصادی و اجرایی گزینه‌ها منتهی می‌شود.

برای کنترل مسیر پایه، خروجی‌های سهم شیوه‌های سفر با داده‌های تاریخی تهران و منطقه ۱۲ مقایسه شدند. بخشی از داده‌های انتهای دوره تاریخی نیز به‌عنوان دوره آزمون کنار گذاشته شد تا توان مدل در بازسازی مسیر پایه بررسی شود. پس از آن، جهت و دامنه تغییرات هر سناریو با سازوکار مورد انتظار آن تطبیق داده شد؛ برای مثال، سیاست‌های کاهش آلودگی ناوگان باید اثر مستقیم‌تری بر PM2.5 داشته باشند، درحالی‌که سیاست‌های صرفاً قیمتی یا پارکینگ، بدون تغییر فناوری ناوگان یا تقویت حمل و نقل عمومی، الزاماً اثر مستقیم بزرگی بر آلودگی ایجاد نمی‌کنند. با این حال، این ارزیابی به بازسازی مسیر پایه در سطح سهم شیوه‌های سفر مربوط است و نباید به‌عنوان اعتبارسنجی مستقل همه خروجی‌های محیط‌زیستی، سلامت و مالی شبیه‌ساز تفسیر شود.

مقادیر گزارش‌شده در جدول‌های تصمیم، میانگین اثر هر سناریو در افق ۲۰۲۴ تا ۲۰۳۰ هستند، مگر آنکه به مقدار سال پایانی اشاره شده باشد. استفاده از میانگین دوره، وابستگی رتبه‌بندی به یک سال خاص یا یک اثر کوتاه‌مدت را کاهش می‌دهد و

برای سیاست‌هایی که پیامدهای آن‌ها به تدریج ظاهر می‌شود، تصویر باثبات‌تری فراهم می‌آورد. در عین حال، این مقادیر به ساختار مدل، مفروضات رفتاری، داده‌های ورودی، شدت مداخلات و افق تحلیل وابسته‌اند؛ از این جهت، باید آن‌ها را برآوردهایی مقایسه‌ای برای سنجش تفاوت گزینه‌ها دانست، نه پیش‌بینی قطعی آثار اجرای واقعی سیاست‌ها.

۳-۳. گزینه‌های سیاستی و محدودیت‌های پوشش سناریوها

گزینه‌های مورد ارزیابی به صورت هدفمند و پیش از مرحله وزن‌دهی و رتبه‌بندی انتخاب شدند. انتخاب آن‌ها بر چهار ضابطه استوار بود: نخست، ارتباط مستقیم با مسائل و اختیارات سیاستی مدیریت حمل و نقل تهران؛ دوم، پوشش سازوکارهای متمایز مداخله شامل مدیریت تقاضا، کنترل دسترسی و پارکینگ، حمایت و بهبود حمل و نقل عمومی و اصلاح انتشار و فناوری ناوگان؛ سوم، امکان بازنمایی سازوکار هر گزینه در شبیه‌ساز بالادستی و استخراج خروجی‌های قابل مقایسه برای افق ۲۰۲۴ تا ۲۰۳۰؛ و چهارم، پرهیز از هم‌پوشانی بیش از اندازه گزینه‌ها و حفظ اندازه‌ای از مجموعه تصمیم که تفسیر رتبه‌بندی را ممکن سازد. این اهرم‌ها در اسناد قانونی و برنامه‌ای و تجربه مدیریت حمل و نقل و هوای پاک تهران نیز جایگاه دارند (Clean Air Act of Iran, 2017; National Laws and Regulations Portal, 2021; UNESCAP, 2020).

هفت سناریوی منفرد برای جداسازی اثر سازوکارهای اصلی سیاستی تعریف شدند: مدیریت زمانی تقاضای سفر؛ قیمت‌گذاری دسترسی؛ مدیریت پارکینگ؛ حمایت هدفمند از کرایه؛ بهبود کیفیت، ظرفیت و قابلیت اعتماد حمل و نقل عمومی؛ کاهش آلاینده‌های محلی ناوگان موجود؛ و گذار به ناوگان پاک تاکسی و اتوبوس. تفکیک این اهرم‌ها امکان می‌دهد مشخص شود هر نوع مداخله، مستقل از سایر ابزارها، چه الگوی پیامدی و چه الزامات مالی و اجرایی دارد.

چهار سناریوی ترکیبی برای بررسی مکمل‌بودن ابزارها و مقایسه معماری‌های متفاوت بسته سیاستی طراحی شدند، نه برای پوشش همه ترکیب‌های ریاضی ممکن. سناریوی ۸ یک بسته ترکیبی سبک است که چند اهرم کم‌شدت را برای آزمون امکان دستیابی به تعادل میان اثرگذاری و قابلیت اجرا تلفیق می‌کند. سناریوی ۹ منطق فشار-کشش در هسته مرکزی را با ترکیب محدودیت دسترسی و پارکینگ با حمایت و بهبود حمل و نقل عمومی و پاک‌سازی سبک ناوگان بازنمایی می‌کند. سناریوی ۱۰ بر توسعه حمل و نقل عمومی و کاهش قوی‌تر انتشار و گذار ناوگان متمرکز است. سناریوی ۱۱ نیز یک بسته یکپارچه با پوشش هم‌زمان مدیریت تقاضا، قیمت‌گذاری، پارکینگ، بهبود خدمت و اصلاح فناوری ناوگان را با شدت‌های عمدتاً متوسط بررسی می‌کند. به این ترتیب، چهار بسته نماینده سطوح و جهت‌گیری‌های متمایز مداخله‌اند: بسته ترکیبی سبک، بسته هسته مرکزی، بسته حمل و نقل عمومی محور و پاک و بسته یکپارچه.

مجموعه سناریوها جامع همه سیاست‌های ممکن نیست، بلکه دامنه‌ای هدفمند از گزینه‌های قابل بازنمایی و مقایسه در افق کوتاه تا میان‌مدت مطالعه است. سیاست‌هایی مانند توسعه گسترده مبتنی بر حمل و نقل عمومی، شبکه فراگیر دوچرخه، حمل و نقل خردمقیاس و مداخلات مبتنی بر هوش مصنوعی، به دلیل نیاز به افق بلندتر، داده‌ها و زیرمدل‌های مستقل یا نبود ورودی سناریویی هم‌سطح، در ماتریس حاضر وارد نشده‌اند. حذف این گزینه‌ها به معنای کم‌اهمیت‌بودن آن‌ها نیست، بلکه برای حفظ سازگاری داده‌ها و قابلیت مقایسه گزینه‌های منتخب انجام شده است. شدت‌های «سبک»، «متوسط» و «قوی» نیز سطوح نسبی مداخله در شبیه‌ساز را نشان می‌دهند و جایگزین مقادیر خام پیامدی و مالی گزارش‌شده در جدول‌های تصمیم نیستند. تعریف اجزای یازده گزینه و منطق طراحی آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

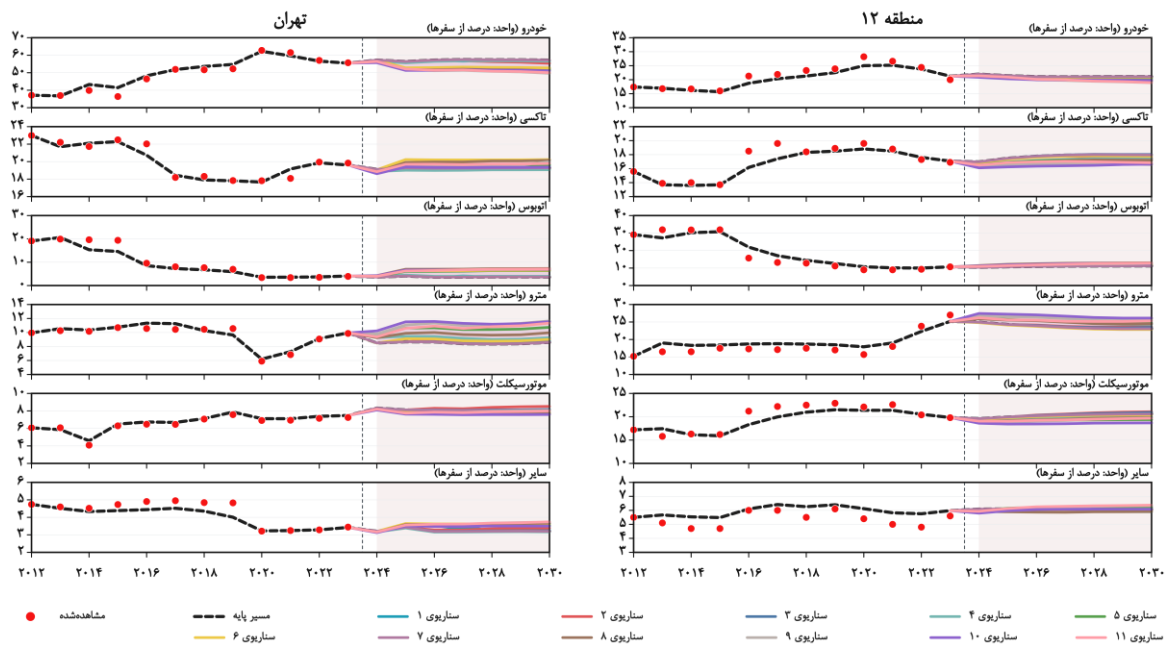
جدول ۱. گزینه‌های سیاستی مورد ارزیابی

سناریو	عنوان فارسی	نوع	اجزا و منطق بسته	منطق طراحی و کارکرد مورد انتظار
سناریوی ۱	مدیریت زمانی تقاضای سفر	منفرد	مدیریت زمان سفر، دورکاری هدفمند، ساعات کاری شناور	نماینندگی مداخلات زمان‌بندی تقاضا با نیاز سرمایه‌ای مستقیم محدود
سناریوی ۲	قیمت‌گذاری دسترسی به محدوده مرکزی	منفرد	کنترل و قیمت‌گذاری ورود به هسته مرکزی	نماینندگی ابزار قیمتی کنترل دسترسی به هسته مرکزی
سناریوی ۳	مدیریت پارکینگ در مرکز شهر	منفرد	کنترل پارک حاشیه‌ای و توقف در مرکز شهر	نماینندگی مدیریت فضای توقف و کنترل تقاضای خودرویی در مرکز شهر
سناریوی ۴	حمایت هدفمند از کرایه حمل و نقل عمومی	منفرد	یارانه‌ای هدفمند کرایه و حمایت از تقاضای حمل و نقل عمومی	نماینندگی حمایت قیمتی از تقاضای حمل و نقل عمومی
سناریوی ۵	بهبود خدمت حمل و نقل عمومی	منفرد	افزایش کیفیت، قابلیت اعتماد، ظرفیت و دسترسی	نماینندگی بهبود عرضه، کیفیت و قابلیت اعتماد حمل و نقل عمومی
سناریوی ۶	کاهش آلاینده‌های محلی ناوگان	منفرد	کاهش شدت انتشار محلی ناوگان موتورسیکلت، تاکسی و اتوبوس	نماینندگی کاهش شدت انتشار آلاینده‌های محلی ناوگان موجود
سناریوی ۷	گذار به ناوگان پاک	منفرد	نوسازی و برقی‌سازی تاکسی و اتوبوس ناوگان	نماینندگی نوسازی و گذار فناورانه ناوگان
سناریوی ۸	بسته‌ی سبک	ترکیبی	سناریوی ۱ + سناریوی ۳ (سبک) + سناریوی ۴ + سناریوی ۶ (متوسط)	آزمون مکمل بودن چند اهرم با شدت سبک
سناریوی ۹	بسته‌ی مدیریت هسته‌ی مرکزی با رویکرد فشار-کشش	ترکیبی	سناریوی ۲ + سناریوی ۳ (سبک) + سناریوی ۴ (متوسط) + سناریوی ۵ (متوسط) + سناریوی ۶ (سبک)	آزمون بسته فشار-کشش متمرکز بر هسته مرکزی
سناریوی ۱۰	بسته‌ی حمل و نقل عمومی محور و پاک	ترکیبی	سناریوی ۴ + سناریوی ۵ + سناریوی ۶ قوی + سناریوی ۷ (متوسط) + سناریوی ۳ (سبک)	آزمون بسته توسعه حمل و نقل عمومی و پاک‌سازی و گذار ناوگان
سناریوی ۱۱	بسته‌ی یکپارچه متوازن	ترکیبی	سناریوی ۱ (متوسط) + سناریوی ۲ (متوسط) + سناریوی ۳ (متوسط) + سناریوی ۵ + سناریوی ۶ (متوسط) + سناریوی ۷ (متوسط)	آزمون بسته یکپارچه با پوشش تقاضا، دسترسی، خدمت و فناوری

جدول ۲. کنترل کیفیت مقادیر سناریویی در سطح سهم شیوه‌های سفر

قلمرو	دوره کنترل	R ²	MAE واحد درصد	RMSE واحد درصد
تهران	بازسازی تاریخی ۲۰۱۲-۲۰۲۳	۰.۹۹۴	۰.۶۴۴	۱.۲۲۶
منطقه‌ی ۱۲	بازسازی تاریخی ۲۰۱۲-۲۰۲۳	۰.۹۴۷	۱.۱۴۸	۱.۶۱۴
تهران	آزمون نگه‌داشته ۲۰۲۲-۲۰۲۳	۰.۹۸۴	۱.۵۷۰	۲.۳۱۸
منطقه‌ی ۱۲	آزمون نگه‌داشته ۲۰۲۲-۲۰۲۳	۰.۶۹۴	۲.۷۵۷	۳.۹۲۹

برای تکمیل کنترل عددی جدول ۲، شکل ۱ بازسازی تاریخی سهم شیوه‌های سفر و مسیرهای برون‌افکنی سناریوها را در تهران و منطقه ۱۲ نشان می‌دهد. این شکل برای گزارش کامل معماری مدل بالادستی ارائه نمی‌شود، بلکه نقش آن روشن کردن منشأ مسیر پایه و حدود تفسیر نتایج سناریویی است. در این چارچوب، تهران قلمرو اصلی تصمیم‌گیری و رتبه‌بندی است و منطقه ۱۲ به‌عنوان شاخص حساسیت هسته مرکزی استفاده می‌شود؛ از این رو، نتایج منطقه ۱۲ باید بیشتر از منظر جهت، شدت نسبی و سازگاری سازوکاری تفسیر شوند، نه به‌عنوان پیش‌بینی نقطه‌ای مستقل.



شکل ۱. بازسازی تاریخی و مسیرهای برون‌افکنی سهم شیوه‌های سفر در تهران و منطقه ۱۲. نقاط قرمز مقادیر مشاهده‌شده تاریخی، خط مشکی خط‌چین مسیر پایه، و خطوط رنگی مسیر سناریوهای سیاستی را نشان می‌دهند. دوره تاریخی برای کنترل بازسازی مسیر پایه و دوره ۲۰۲۴ تا ۲۰۳۰ برای نمایش دامنه مسیرهای سناریویی استفاده شده است. مقادیر بر حسب درصد سهم از سفرها گزارش شده‌اند.

۳-۴. معیارهای تصمیم‌گیری و مبنای انتخاب آن‌ها

معیارهای تصمیم‌گیری با هدف پوشش هم‌زمان سه حوزه انتخاب شده‌اند: اثرگذاری حمل و نقلی، پیامدهای محیط‌زیستی و سلامت، و امکان‌پذیری مالی-اجرایی. به دلیل محدودیت داده‌های خرد خانوار و اطلاعات دقیق توزیعی، معیارهای عدالت دسترسی، آثار اجتماعی-توزیعی و عدالت مکانی به صورت مستقل وارد ماتریس تصمیم نشده‌اند و تنها به صورت تفسیری در بحث سیاستی لحاظ شده‌اند. جدول ۳ معیارها، نوع، واحد گزارش، جهت مطلوب و نقش تفسیری آن‌ها را نشان می‌دهد. معیارهای C1 تا C6 از نوع منفعت‌اند و مقدار بیشتر آن‌ها مطلوب‌تر است؛ معیارهای C7 تا C10 از نوع هزینه‌اند و مقدار کمتر آن‌ها مطلوب‌تر است. برخی معیارها، به‌ویژه C6، C7 و C10، ماهیت شاخصی دارند و برای مقایسه‌ی نسبی سناریوها به کار می‌روند، نه برای ارائه‌ی برآورد مستقل ریالی یا نهادی.

جدول ۳. معیارهای تصمیم‌گیری

کد	عنوان معیار	نوع	واحد گزارش	جهت مطلوب	نقش تفسیری/تعریف عملیاتی
C1	کاهش اتلاف زمان خودرو در تهران	منفعت	درصد تغییر نسبت به مسیر پایه	بیشتر بهتر	کاهش ازدحام و زمان تلف‌شده

C2	کاهش پیمایش معادل سواری در تهران	منفعت	درصد تغییر نسبت به مسیر پایه	بیشتر بهتر	کاهش بار شبکه خودرومحور
C3	افزایش سهم حمل و نقل عمومی	منفعت	درصد تغییر نسبت به مسیر پایه	بیشتر بهتر	تغییر الگوی سفر به سمت حمل و نقل همگانی
C4	کاهش PM2.5 در تهران	منفعت	درصد تغییر نسبت به مسیر پایه	بیشتر بهتر	بهبود کیفیت هوای کلان شهری
C5	کاهش PM2.5 در منطقه ۱۲	منفعت	درصد تغییر نسبت به مسیر پایه	بیشتر بهتر	شاخص حساسیت هسته‌ی مرکزی، نه پیش‌بینی نقطه‌ای مستقل
C6	شاخص کاهش هزینه‌ی سلامت مرتبط با PM2.5 در تهران	منفعت	درصد تغییر نسبت به مسیر پایه	بیشتر بهتر	شاخص نسبی پیوند کاهش PM2.5 با کاهش بار سلامت و هزینه‌ی اجتماعی
C7	شاخص فشار مالی خالص	هزینه	شاخص نسبی، بدون واحد	کمتر بهتر	فشار نسبی سیاست بر منابع مدیریت شهری
C8	هزینه‌ی سرمایه‌ای پیاده‌سازی	هزینه	میلیارد ریال در سال، میانگین افق	کمتر بهتر	نیاز سرمایه‌گذاری و زیرساخت
C9	افزایش نیاز یارانه‌ی حمل و نقل عمومی	هزینه	درصد تغییر نسبت به مسیر پایه	کمتر بهتر	تعهد جاری و فشار عملیاتی
C10	پیچیدگی اجرایی	هزینه	امتیاز ۱ تا ۵	کمتر بهتر	غربال‌گری ظرفیت نهادی، فنی و اجتماعی لازم برای اجرا

در جدول فوق، معیارهای C1 تا C6 به صورت بهبود نسبت به مسیر پایه گزارش شده‌اند و مقدار بیشتر آنها مطلوب‌تر است. C3 افزایش نسبی سهم حمل و نقل عمومی نسبت به مسیر پایه را نشان می‌دهد و نباید به عنوان افزایش واحد درصد تفسیر شود. معیار C7 شاخص نسبی فشار مالی خالص و بدون واحد است. C8 میانگین سالانه هزینه سرمایه‌ای پیاده‌سازی را در افق تحلیل و بر حسب میلیارد ریال در سال نشان می‌دهد. C9 درصد تغییر نیاز یارانه حمل و نقل عمومی نسبت به مسیر پایه است. C10 امتیاز پیچیدگی اجرا در بازه ۱ تا ۵ است و مقدار کمتر آن مطلوب‌تر محسوب می‌شود. C6 شاخص نسبی کاهش بار یا هزینه سلامت مرتبط با ذرات معلق کوچک‌تر از ۲.۵ میکرون است و به عنوان برآورد ریالی مستقل از همه پیامدهای سلامت تفسیر نمی‌شود.

انتخاب این ده معیار بر اساس ارتباط مستقیم با اولویت‌های اجرایی مدیریت شهری تهران انجام گرفته است. شاخص‌های مهم دیگری نیز در لایه شبیه‌سازی بالادستی تولید می‌شوند، اما برای جلوگیری از هم‌پوشانی معیارها و حفظ شفافیت رتبه‌بندی، همه خروجی‌های ممکن به عنوان معیار مستقل وارد ماتریس نشده‌اند. به ویژه، معیار C10 (پیچیدگی اجرایی) به صورت امتیاز کلی غربال‌گری طراحی شده و جایگزین ارزیابی نهادی تفصیلی نیست.

۳-۵. ماتریس خام تصمیم و توضیحات تفسیری آن

ماتریس خام تصمیم از یازده گزینه‌ی سیاستی و ده معیار تشکیل شده است. مقادیر گزارش شده، میانگین تغییر هر سناریو نسبت به مسیر پایه در افق ۲۰۲۴ تا ۲۰۳۰ هستند. به دلیل تفاوت واحد و مقیاس معیارها، مقایسه مستقیم مقادیر میان معیارهای مختلف پیش از نرمال‌سازی مجاز نیست؛ عملکرد گزینه‌ها را اگرچه می‌توان درون هر معیار با یکدیگر مقایسه کرد.

برای خوانایی، ماتریس در دو بخش ارائه شده است: جدول ۴ معیارهای حمل و نقلی، محیط‌زیستی و سلامت و جدول ۵ معیارهای مالی و اجرایی را گزارش می‌کند.

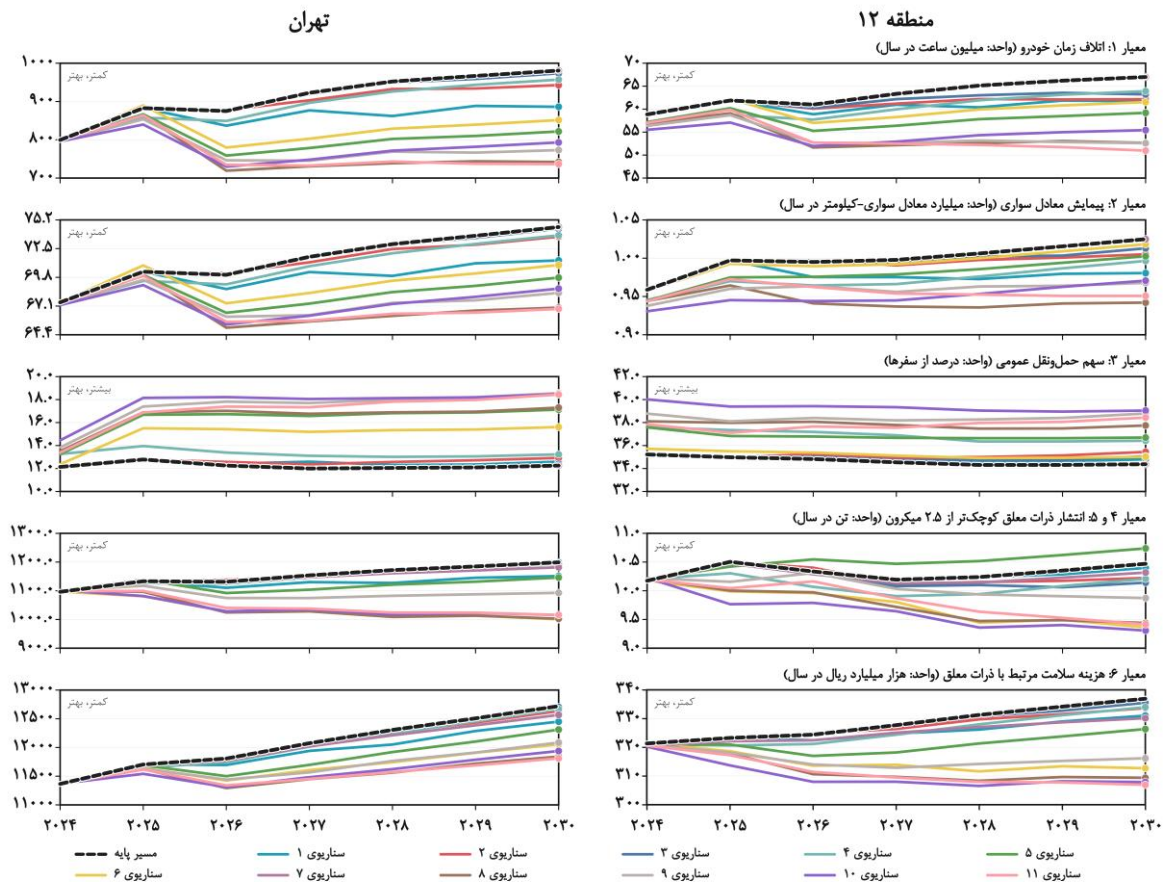
در جدول ۴، معیارهای C1 تا C6 از نوع منفعت‌اند و مقدار بیشتر آن‌ها نشان‌دهنده بهبود بیشتر نسبت به مسیر پایه است. در C1، C2، C4، C5 و C6 مقدار مثبت به معنای کاهش شاخص نامطلوب و در C3 به معنای افزایش نسبی سهم حمل و نقل عمومی است. مقدار C3 نباید به عنوان افزایش واحد درصدی سهم تفسیر شود. مقادیر منفی کوچک C4 و C5 در برخی سناریوها نشان‌دهنده افزایش محدود PM2.5 نسبت به مسیر پایه است؛ تفسیر سیاستی این الگو در بخش بحث ارائه می‌شود.

جدول ۴. ماتریس خام تصمیم؛ معیارهای حمل و نقلی، محیط‌زیستی و سلامت، بر اساس درصد تغییر نسبت به مسیر پایه در میانگین افق ۲۰۲۴ تا ۲۰۳۰.

سناریو	C1: کاهش اتلاف زمان خودرو در تهران	C2: کاهش پیمایش معادل سواری در تهران	C3: افزایش نسبی سهم حمل و نقل عمومی در تهران	C4: کاهش ذرات معلق کوچک‌تر از ۲.۵ میکرون در تهران	C5: کاهش ذرات معلق کوچک‌تر از ۲.۵ میکرون در منطقه ۱۲	C6: کاهش شاخص هزینه سلامت در تهران
سناریوی ۱	۵.۴۴	۲.۲۸	۱.۸۷	۲.۱۹	۰.۱۴	۱.۱۷
سناریوی ۲	۱.۶۹	۰.۵۱	۲.۹۲	-۰.۰۵	-۰.۴۶	۰.۲۷
سناریوی ۳	۰.۳۳	۰.۰۹	۰.۴۹	۰.۰۰	-۰.۲۴	۰.۰۵
سناریوی ۴	۲.۳۸	۱.۰۳	۸.۷۰	۰.۴۷	۱.۵۶	۰.۴۰
سناریوی ۵	۱۱.۶۷	۴.۴۴	۳۳.۳۰	۲.۹۳	۲.۴۰	۲.۲۴
سناریوی ۶	۹.۲۲	۳.۱۹	۲۲.۵۲	۹.۹۸	۲۰.۹۸	۳.۲۴
سناریوی ۷	-۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۷۵	۱.۲۶	۰.۶۰
سناریوی ۸	۱۶.۳۶	۶.۵۲	۳۴.۷۹	۹.۸۶	۱۵.۰۳	۴.۲۹
سناریوی ۹	۱۴.۵۶	۵.۵۹	۴۲.۰۱	۵.۴۴	۸.۵۱	۳.۲۰
سناریوی ۱۰	۱۴.۴۲	۵.۷۳	۴۴.۵۳	۹.۵۱	۱۹.۵۸	۴.۰۶
سناریوی ۱۱	۱۶.۲۰	۶.۴۴	۳۹.۳۳	۹.۰۵	۱۴.۶۵	۴.۳۱

مقادیر جدول ۴ درصد تغییر میانگین دوره ۲۰۲۴ تا ۲۰۳۰ نسبت به مسیر پایه را نشان می‌دهند. در معیارهای C1، C2، C4، C5 و C6، مقدار مثبت بیانگر کاهش شاخص نامطلوب است و در C3 مقدار مثبت افزایش نسبی سهم حمل و نقل عمومی

را نشان می‌دهد. شکل ۲ مسیر سالانه معیارهای C1 تا C6 را برای سناریوی پایه و گزینه‌های سیاستی نمایش می‌دهد و امکان مقایسه میان اثر متوسط دوره و نحوه شکل‌گیری آن در طول زمان را فراهم می‌کند.



شکل ۲. مسیر سالانه شاخص‌های منتخب تصمیم در افق ۲۰۲۴ تا ۲۰۳۰. شکل، مسیر سناریوی پایه و سناریوهای سیاستی را برای معیارهای اصلی جدول ۴ نشان می‌دهد.

در جدول ۵، معیارهای C7 تا C10 از نوع هزینه‌اند و مقدار کمتر آن‌ها مطلوب‌تر است. C7 شاخص نسبی و بدون واحد فشار مالی خالص، C8 میانگین سالانه هزینه سرمایه‌ای، C9 درصد تغییر نیاز یارانه حمل و نقل عمومی نسبت به مسیر پایه و C10 امتیاز پیچیدگی اجرا در بازه ۱ تا ۵ است. مقدار صفر C8 در برخی سناریوها به معنای نبود همه هزینه‌های اداری و اجرایی نیست، بلکه نشان می‌دهد در تعریف ماتریس، هزینه سرمایه‌ای مستقیم و زیرساختی قابل توجهی برای آن گزینه منظور نشده است. مقدار منفی C9 نیز نشان‌دهنده کاهش محدود نیاز یارانه نسبت به مسیر پایه است.

جدول ۵. ماتریس خام تصمیم؛ معیارهای مالی و اجرایی در افق ۲۰۲۴ تا ۲۰۳۰ بر اساس واحد اختصاصی هر معیار گزارش شده است.

سناریو	C7: فشار مالی خالص، شاخص بدون واحد	C8: هزینه سرمایه‌ای، میلیارد ریال در سال	C9: نیاز یارانه حمل و نقل عمومی، درصد نسبت به مسیر پایه	C10: پیچیدگی اجرا، امتیاز ۱ تا ۵
سناریوی ۱	۰.۰۰۰۷	۰.۰۰	-۰.۰۶	۱.۰۰
سناریوی ۲	۰.۰۰۸۳	۲۳۶.۷۳	۴.۱۹	۱.۵۰
سناریوی ۳	۰.۰۰۱۵	۴۳.۴۹	۰.۷۳	۱.۵۰
سناریوی ۴	۰.۰۳۱۸	۰.۰۰	۱۲.۵۰	۱.۲۰

سناریوی ۵	۰.۱۳۶۹	۲۱۲۳۵.۴۴	۵۱.۶۰	۳.۰۰
سناریوی ۶	۰.۱۱۷۴	۱۰۲۶.۸۸	۴۸.۵۵	۲.۰۰
سناریوی ۷	۰.۰۲۹۶	۴۴۴۱.۷۵	۱۲.۱۵	۳.۲۰
سناریوی ۸	۰.۱۵۸۸	۶۸۴.۸۶	۶۵.۰۱	۲.۵۰
سناریوی ۹	۰.۱۶۸۴	۱۷۴۵۶.۱۷	۶۶.۳۰	۳.۵۰
سناریوی ۱۰	۰.۲۰۵۳	۲۵۵۸۲.۱۵	۷۹.۰۳	۴.۵۰
سناریوی ۱۱	۰.۱۸۱۵	۲۵۵۴۵.۸۸	۷۰.۵۲	۴.۲۰

مقادیر جدول ۵ دارای واحدهای متفاوت‌اند و نباید همگی به‌عنوان درصد تغییر خوانده شوند. نرمال‌سازی و هم‌جهت‌سازی این معیارها پیش از وزن‌دهی و رتبه‌بندی در بخش ۳-۶ توضیح داده می‌شود. برای ارائه یک نمای مقایسه‌ای از تفاوت الگوی عملکرد گزینه‌ها، شکل ۳ وضعیت نسبی یازده سناریو را در حوزه‌های حمل و نقل، هوا و سلامت، امکان‌پذیری مالی و سهولت اجرا نشان می‌دهد. این شکل رتبه‌بندی نهایی نیست و فقط برای نمایش تفاوت نمای عملکرد سناریوها پیش از اجرای TOPSIS ارائه شده است.

	سهولت اجرا	امکان‌پذیری مالی	هوا و سلامت	حمل و نقل
سناریوی ۱	۱.۰۰	۱.۰۰	۰.۱۷	۰.۲۴
سناریوی ۲	۰.۸۶	۰.۹۷	۰.۰۲	۰.۰۸
سناریوی ۳	۰.۸۶	۰.۹۹	۰.۰۰	۰.۰۲
سناریوی ۴	۰.۹۴	۰.۹۰	۰.۰۸	۰.۱۷
سناریوی ۵	۰.۴۳	۰.۲۸	۰.۳۱	۰.۷۱
سناریوی ۶	۰.۷۱	۰.۵۹	۰.۹۲	۰.۵۲
سناریوی ۷	۰.۳۷	۰.۸۴	۰.۱۰	۰.۰۰
سناریوی ۸	۰.۵۷	۰.۴۶	۰.۹۰	۰.۹۳
سناریوی ۹	۰.۲۹	۰.۲۲	۰.۵۷	۰.۹۰
سناریوی ۱۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۹۴	۰.۹۲
سناریوی ۱۱	۰.۰۹	۰.۰۸	۰.۸۷	۰.۹۵

مقادیر: امتیاز نرمال‌شده ۰ تا ۱ (واحد: بدون واحد)

شکل ۳. نمای مقایسه‌ای عملکرد یازده گزینه سیاستی.

۳-۶. نرمال‌سازی و وزن‌دهی

از آنجا که معیارهای تصمیم‌گیری واحد، مقیاس و جهت مطلوب متفاوتی دارند، پیش از وزن‌دهی و رتبه‌بندی، همه معیارها نرمال و هم‌جهت شدند. برای معیارهای منفعت، مقدار نرمال‌شده از رابطه‌ی زیر به دست آمد:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (1)$$

برای معیارهای هزینه، جهت معیار معکوس شد تا مقدار بزرگتر در همه‌ی معیارها نشان‌دهنده‌ی وضعیت مطلوب‌تر باشد:

$$r_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (2)$$

در این روابط، x_{ij} مقدار خام گزینه‌ی i در معیار j و r_{ij} مقدار نرمال‌شده و هم‌جهت‌شده است. پس از این مرحله، همه‌ی معیارها در بازه‌ی صفر تا یک قرار گرفتند و قابلیت ورود به فرایند وزن‌دهی و رتبه‌بندی را پیدا کردند.

وزن‌دهی عینی معیارها با روش CRITIC انجام شد. این روش اهمیت هر معیار را بر اساس دو ویژگی تعیین می‌کند: میزان پراکندگی معیار میان گزینه‌ها و میزان اطلاعات غیرتکراری آن نسبت به سایر معیارها. بنابراین، معیاری که هم بین گزینه‌ها تمایز بیشتری ایجاد کند و هم با سایر معیارها هم‌پوشانی کمتری داشته باشد، وزن بالاتری دریافت می‌کند. مقدار اطلاعاتی معیار j به صورت زیر محاسبه شد:

$$C_j = s_j \times \sum_{k=1}^m (1 - \rho_{jk}) \quad (3)$$

که در آن s_j انحراف معیار معیار j و ρ_{jk} ضریب هم‌بستگی میان معیارهای j و k است. سپس وزن معیار j از رابطه‌ی زیر به دست آمد:

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^m C_j} \quad (4)$$

علاوه بر وزن‌های CRITIC، چهار ساختار وزن‌دهی سیاستی نیز برای تحلیل حساسیت تعریف شد: وزن‌دهی متوازن، اولویت هوای پاک، اولویت حمل و نقل، و اولویت مالی-اجرایی. این وزن‌ها ترجیحات قطعی تصمیم‌گیرندگان نیستند، بلکه ساختارهای تحلیلی برای آزمون پایداری نتایج‌اند. به بیان دیگر، هر ساختار وزن‌دهی یک جهان تصمیم فرضی را نشان می‌دهد که در آن سیاست‌گذار به یکی از ابعاد مسئله، وزن بیشتری می‌دهد. از این رو، در تفسیر نتایج، پایداری رتبه‌ها در چند ساختار وزن‌دهی اهمیت بیشتری از رتبه‌ی یک گزینه در یک ستون منفرد دارد. جدول ۶ وزن‌های مورد استفاده در تحلیل را نشان می‌دهد.

جدول ۶. وزن معیارها در ساختارهای مختلف

معیار	CRITIC	متوازن	هوای پاک	حمل و نقل	مالی/اجرایی
C1	۰.۰۸۶	۰.۱۳۰	۰.۰۸۰	۰.۲۳۰	۰.۰۸۰
C2	۰.۰۸۵	۰.۰۸۰	۰.۰۴۰	۰.۱۵۰	۰.۰۴۰
C3	۰.۰۹۳	۰.۱۲۰	۰.۰۷۰	۰.۲۲۰	۰.۰۶۰
C4	۰.۰۸۷	۰.۱۳۰	۰.۲۲۰	۰.۰۷۰	۰.۰۷۰
C5	۰.۰۸۲	۰.۱۳۰	۰.۲۴۰	۰.۰۶۰	۰.۰۶۰
C6	۰.۰۸۴	۰.۱۰۰	۰.۱۴۰	۰.۰۶۰	۰.۰۷۰
C7	۰.۱۲۹	۰.۱۰۰	۰.۰۷۰	۰.۰۷۰	۰.۲۲۰
C8	۰.۱۲۳	۰.۰۸۰	۰.۰۵۰	۰.۰۵۰	۰.۱۷۰

معیار	CRITIC	متوازن	هوای پاک	حمل و نقل	مالی/اجرایی
C9	۰.۱۳۱	۰.۰۶۰	۰.۰۴۰	۰.۰۴۰	۰.۱۲۰
C10	۰.۱۰۰	۰.۰۷۰	۰.۰۵۰	۰.۰۵۰	۰.۱۱۰

وزن‌ها بی‌واحد هستند و جمع وزن‌ها در هر ساختار وزن‌دهی برابر ۱ است.

۳-۷. رتبه‌بندی با TOPSIS

پس از نرمال‌سازی، هم‌جهت‌سازی و وزن‌دهی معیارها، گزینه‌ها با روش TOPSIS رتبه‌بندی شدند. منطق این روش آن است که گزینه‌ی مطلوب باید هم‌زمان، بیشترین نزدیکی را به راه‌حل ایده‌آل مثبت و بیشترین فاصله را از راه‌حل ایده‌آل منفی داشته باشد. ابتدا ماتریس نرمال‌شده‌ی وزن‌دار به‌صورت زیر محاسبه شد:

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij} \quad (5)$$

در این رابطه، w_j وزن معیار j ، مقدار نرمال‌شده و هم‌جهت‌شده گزینه i در معیار j و v_{ij} مقدار وزن‌دار آن است. از آنجا که همه‌ی معیارها در مرحله‌ی قبل هم‌جهت شده‌اند، راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی برای هر معیار به ترتیب بیشینه و کمینه مقادیر وزن‌دار تعریف می‌شود:

$$A^+ = \{\max(v_{ij})\}, \quad A^- = \{\min(v_{ij})\} \quad (6)$$

سپس فاصله‌ی هر گزینه از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی با روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - A_j^+)^2} \quad (7)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - A_j^-)^2}$$

در نهایت، امتیاز نزدیکی نسبی هر گزینه از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$CC_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (8)$$

مقدار CC_i بین صفر و یک قرار دارد و مقدار بالاتر آن نشان‌دهنده‌ی نزدیکی بیشتر به راه‌حل ایده‌آل و رتبه‌ی بهتر است. رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها بر اساس مقدار نزولی (CC_i) انجام می‌شود.

۴. یافته‌ها

نتایج وزن‌دهی CRITIC نشان می‌دهد معیارهای مالی و اجرایی، به‌ویژه نیاز یارانه حمل و نقل عمومی، فشار مالی خالص و هزینه سرمایه‌ای، سهم قابل توجهی از وزن معیارها را به خود اختصاص داده‌اند. مجموع وزن معیارهای C7 تا C10 برابر با ۰.۴۸۳ است (جدول ۶)؛ یعنی، تقریباً نیمی از وزن عینی مسئله تصمیم به امکان‌پذیری مالی و اجرایی مربوط می‌شود. این نتیجه نشان می‌دهد که در ارزیابی سیاست‌های حمل و نقل تهران، معیارهای مالی و اجرایی در کنار پیامدهای حمل و نقلی، محیط‌زیستی و سلامت نقش تعیین‌کننده دارند. نتایج رتبه‌بندی بر مبنای میانگین پیامدهای سناریوها در افق ۲۰۲۴ تا ۲۰۳۰ محاسبه شده‌اند.

و با توجه به محدودیت‌های مدل و داده‌ها، همراه با آزمون‌های حساسیت تفسیر می‌شوند. جدول ۷ امتیازها و رتبه‌های TOPSIS را در پنج ساختار وزن‌دهی گزارش می‌کند.

جدول ۷. نتایج رتبه‌بندی گزینه‌ها با روش TOPSIS

سناریو	امتیاز متوازن	رتبه متوازن	رتبه CRITIC	رتبه هوای پاک	رتبه حمل و نقل	رتبه مالی/اجرایی
سناریوی ۸	۰.۷۲۱	۱	۲	۲	۱	۷
سناریوی ۶	۰.۶۷۵	۲	۱	۱	۶	۵
سناریوی ۱۱	۰.۶۳۰	۳	۸	۴	۲	۱۰
سناریوی ۱۰	۰.۶۲۷	۴	۱۰	۳	۴	۱۱
سناریوی ۹	۰.۵۷۶	۵	۹	۵	۳	۸
سناریوی ۵	۰.۴۵۵	۶	۱۱	۶	۵	۹
سناریوی ۱	۰.۴۲۱	۷	۳	۷	۷	۱
سناریوی ۴	۰.۳۶۹	۸	۴	۸	۸	۴
سناریوی ۲	۰.۳۵۶	۹	۵	۱۰	۹	۲
سناریوی ۳	۰.۳۵۱	۱۰	۶	۹	۱۰	۳
سناریوی ۷	۰.۳۱۰	۱۱	۷	۱۱	۱۱	۶

امتیاز TOPSIS بی‌واحد و در بازه صفر تا یک است و مقدار بیشتر آن نشان‌دهنده نزدیکی بیشتر گزینه به راه‌حل ایده‌آل است. در ساختار وزن‌دهی متوازن، سناریوی ۸ با امتیاز ۰.۷۲۱ در رتبه نخست قرار گرفت و سناریوهای ۶ و ۱۱ به ترتیب رتبه‌های دوم و سوم را کسب کردند. سناریوهای ۱۰، ۹ و ۵ نیز در رتبه‌های چهارم تا ششم قرار گرفتند. در مقابل، سناریوهای ۱، ۴، ۲، ۳ و ۷ رتبه‌های هفتم تا یازدهم را به دست آوردند.

تغییر ساختار وزن‌دهی موجب جابه‌جایی رتبه برخی گزینه‌ها شد. در وزن‌دهی CRITIC، سناریوی ۶ رتبه نخست، سناریوی ۸ رتبه دوم و سناریوی ۱ رتبه سوم را به دست آوردند. در ساختار اولویت هوای پاک، سناریوهای ۶، ۸ و ۱۰ سه رتبه نخست را کسب کردند. در ساختار اولویت حمل و نقل، سناریوی ۸ در رتبه نخست و سناریوهای ۱۱ و ۹ در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفتند. در ساختار اولویت مالی و اجرایی، سناریوهای ۱، ۲ و ۳ سه رتبه نخست را به دست آوردند، درحالی‌که سناریوهای ۱۰ و ۱۱ به رتبه‌های یازدهم و دهم منتقل شدند. این جابه‌جایی نشان می‌دهد رتبه گزینه‌ها به میزان توجه به اثرگذاری یا امکان‌پذیری وابسته است. شکل ۴ موقعیت نسبی گزینه‌ها را از نظر اثرگذاری و امکان‌پذیری اجرا نشان می‌دهد.



شکل ۴. نقشه‌ی جایگاه سیاست‌ها بر اساس اثرگذاری و قابلیت اجرا.

همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، برخی گزینه‌ها پیامدهای حمل و نقلی و محیط‌زیستی بیشتری دارند، اما از نظر هزینه، نیاز یارانه یا پیچیدگی اجرا با محدودیت بیشتری مواجه‌اند. در مقابل، برخی گزینه‌ها از نظر اجرا ساده‌تر و کم‌هزینه‌ترند، اما دامنه اثر محدودتری دارند. سناریوی ۸ در ساختار متوازن در موقعیتی قرار می‌گیرد که در آن، اثرگذاری نسبتاً بالا با هزینه سرمایه‌ای و پیچیدگی کمتر از بسته‌های سنگین‌تر همراه شده است. سناریوی ۶ نیز در بعد آلودگی و سلامت جایگاه بالایی دارد، درحالی‌که سناریوی ۱ از نظر معیارهای مالی و اجرایی وضعیت مطلوب‌تری نشان می‌دهد.

برای بررسی پایداری رتبه‌ها، عملکرد گزینه‌ها در پنج ساختار وزن‌دهی مقایسه شد. جدول ۸ خلاصه تغییرات رتبه گزینه‌های منتخب را نشان می‌دهد. سناریوی ۸ در چهار ساختار از پنج ساختار در میان سه رتبه نخست قرار گرفت و میانگین رتبه آن برابر با ۲.۶ بود. سناریوی ۶ نیز در سه ساختار در میان سه گزینه نخست قرار داشت و میانگین رتبه ۳ را ثبت کرد. سناریوهای ۱ و ۱۱ هرکدام در دو ساختار در میان سه رتبه نخست قرار گرفتند. این تعداد برای سناریوهای ۹ و ۱۰ برابر با یک ساختار بود.

جدول ۸. خلاصه‌ی حساسیت رتبه‌ها

سناریو	بهترین رتبه	بدترین رتبه	میانگین رتبه	حضور در سه رتبه‌ی نخست	برداشت
سناریوی ۸	۱	۷	۲.۶	۴	گزینه متوازن و پایدارترین بسته‌ی آغازین
سناریوی ۶	۱	۶	۳.۰	۳	ستون هوای پاک و کاهش ذرات معلق
سناریوی ۱	۱	۷	۵.۰	۲	اقدام فوری در محدودیت مالی
سناریوی ۱۱	۲	۱۰	۵.۴	۲	بسته‌ی اثرگذار اما مشروط
سناریوی ۹	۳	۹	۶.۰	۱	بسته‌ی هسته‌ی مرکزی، نیازمند ظرفیت اجرا
سناریوی ۱۰	۳	۱۱	۶.۴	۱	بسته‌ی پاک و قوی، اما مالی/اجرایی سنگین

دامنه رتبه‌ها در پنج ساختار وزن‌دهی، نشان‌دهنده پایداری گزینه‌ها است.

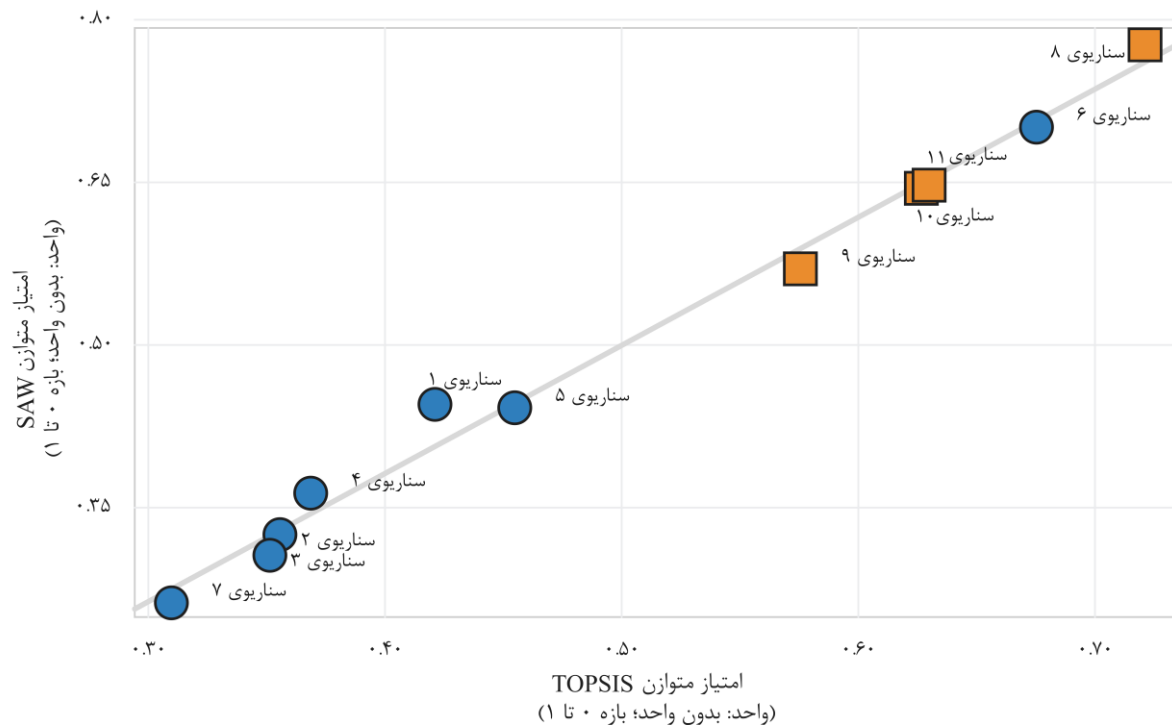
در جدول ۸، بهترین رتبه سناریوی ۸ برابر با ۱ و بدترین رتبه آن برابر با ۷ است. دامنه رتبه سناریوی ۶ از ۱ تا ۶ و دامنه رتبه سناریوی ۱ از ۱ تا ۷ تغییر می‌کند. بسته‌های گسترده‌تر، به‌ویژه سناریوهای ۱۰ و ۱۱، در ساختارهای اثرمحور جایگاه بالاتری دارند، اما در ساختار مالی و اجرایی افت رتبه بیشتری نشان می‌دهند. شکل ۵ دامنه تغییر رتبه گزینه‌ها را در پنج ساختار وزن‌دهی نمایش می‌دهد.



شکل ۵. پایداری رتبه‌ای گزینه‌ها در پنج ساختار وزن‌دهی

شکل ۵ نشان می‌دهد جایگاه گزینه‌های اصلی در برابر تغییر وزن معیارها یکسان نیست. سناریوهای ۸ و ۶ در چند ساختار وزن‌دهی رتبه‌های بالایی حفظ می‌کنند، درحالی‌که رتبه سناریوی ۱ با افزایش وزن معیارهای مالی و اجرایی بهبود می‌یابد. در مقابل، سناریوهای ۱۰ و ۱۱ با افزایش وزن امکان‌پذیری مالی و اجرایی به رتبه‌های پایین‌تر منتقل می‌شوند. بنابراین، تحلیل حساسیت از اتکا به یک ساختار وزن‌دهی منفرد جلوگیری می‌کند و تفاوت عملکرد گزینه‌ها در شرایط مختلف تصمیم را نشان می‌دهد.

برای بررسی وابستگی نتایج به روش رتبه‌بندی، یک آزمون تکمیلی با روش مجموع وزنی ساده، SAW، انجام شد. شکل ۶ رابطه میان امتیازهای متوازن Topsis و SAW را نشان می‌دهد. هم‌راستایی کلی امتیازهای Topsis و SAW و قرارگرفتن گزینه‌های دارای امتیاز بیشتر در ناحیه مشابه نمودار نشان می‌دهد که جایگاه نسبی گزینه‌های اصلی صرفاً به استفاده از یک روش تجمیع وابسته نیست. در آزمون SAW نیز سناریوهای ۸ و ۶ در میان گزینه‌های برتر ساختار متوازن باقی ماندند و سناریوی ۱ در ساختار مالی و اجرایی رتبه نخست را حفظ کرد. این نتیجه به معنای یکسان بودن کامل رتبه‌ها در دو روش نیست، بلکه نشان می‌دهد پیام کلی رتبه‌بندی در برابر تغییر روش تجمیع دگرگون نمی‌شود.



شکل ۶. مقایسه‌ی امتیاز متوازن TOPSIS و SAW برای کنترل پایداری روش

علاوه بر مقایسه TOPSIS و SAW، چند آزمون تکمیلی برای بررسی حساسیت نتایج نسبت به معیارها و وزن‌ها انجام شد. در وزن‌دهی برابر، حذف معیار C10، نصف کردن وزن C10 و حذف معیار C5، سناریوهای ۸ و ۶ همچنان در دو رتبه نخست ساختار متوازن باقی ماندند. آزمون حذف C5 نشان داد جایگاه این دو گزینه صرفاً ناشی از معیار PM2.5 منطقه ۱۲ نیست. هنگامی که فقط معیارهای اثرگذاری C1 تا C6 در تحلیل باقی ماندند، سناریوهای ۱۰ و ۱۱ جایگاه بالاتری به دست آوردند. در مقابل، هنگامی که تحلیل فقط بر معیارهای امکان‌پذیری C7 تا C10 استوار شد، سناریوی ۱ در رتبه نخست قرار گرفت. این نتایج تفاوت میان رتبه‌بندی مبتنی بر اثرگذاری و رتبه‌بندی مبتنی بر امکان‌پذیری را آشکار می‌کند.

برای شفاف‌سازی معیار پیچیدگی اجرا، جدول ۹ امتیاز پنج مؤلفه‌ی تشکیل‌دهنده‌ی C10 را گزارش می‌کند. این مؤلفه‌ها شامل سرمایه‌گذاری فیزیکی، تعدد نهادهای درگیر، حساسیت اجتماعی، وابستگی فناورانه یا ناوگانی و دشواری پایش و اجرا هستند. وزن مؤلفه‌ها برابر در نظر گرفته شده و امتیاز C10 از میانگین آن‌ها به دست آمده است. نتایج جدول ۹ نشان می‌دهد سناریوی ۱ با امتیاز ۱ کمترین پیچیدگی اجرایی را دارد. سناریوهای ۲ و ۳ نیز با امتیاز ۱.۵ در سطح پایین پیچیدگی قرار می‌گیرند. سناریوی ۸ با امتیاز ۲.۵ در سطح میانی است، درحالی‌که سناریوهای ۱۰ و ۱۱ با امتیازهای ۴.۵ و ۴.۲ بیشترین پیچیدگی اجرایی را نشان می‌دهند. این تفاوت‌ها با تغییر رتبه گزینه‌ها در ساختار مالی و اجرایی سازگار است. معیار C10 برای مقایسه نسبی الزامات اجرایی گزینه‌ها طراحی شده است و جایگزین ارزیابی نهادی تفصیلی محسوب نمی‌شود.

در مجموع، نتایج رتبه‌بندی و تحلیل حساسیت سه الگوی اصلی را نشان می‌دهند: نخست، برخی گزینه‌ها در چند ساختار وزن‌دهی جایگاه نسبتاً باثباتی دارند؛ دوم، بسته‌های گسترده‌تر در معیارهای اثرگذاری عملکرد مطلوب‌تری نشان می‌دهند، اما در معیارهای مالی و اجرایی با افت رتبه مواجه می‌شوند؛ و سوم، گزینه‌های ساده‌تر و دارای نیاز سرمایه‌ای کمتر در ساختار مالی و اجرایی جایگاه بهتری دارند، اما از نظر دامنه اثر در رتبه‌های پایین‌تری قرار می‌گیرند. تفسیر سیاستی این الگوها و تعیین نقش هر گزینه در توالی اجرا در بخش بعد ارائه می‌شود.

جدول ۹. مؤلفه‌های معیار پیچیدگی اجرا

سناریو	سرمایه‌گذاری فیزیکی	تعدد نهادها	حساسیت اجتماعی	وابستگی فناوریانه/ناوگانی	دشواری پایش/اجرا	C10
سناریوی ۱	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰
سناریوی ۲	۱.۰	۲.۰	۲.۵	۱.۰	۱.۰	۱.۵
سناریوی ۳	۱.۵	۱.۵	۱.۵	۱.۰	۲.۰	۱.۵
سناریوی ۴	۱.۰	۱.۵	۱.۵	۱.۰	۱.۰	۱.۲
سناریوی ۵	۳.۵	۳.۰	۲.۵	۲.۵	۳.۵	۳.۰
سناریوی ۶	۲.۰	۲.۰	۱.۵	۲.۵	۲.۰	۲.۰
سناریوی ۷	۴.۰	۳.۰	۱.۵	۴.۵	۳.۰	۳.۲
سناریوی ۸	۲.۰	۲.۵	۲.۰	۳.۰	۳.۰	۲.۵
سناریوی ۹	۳.۰	۴.۰	۴.۰	۲.۵	۴.۰	۳.۵
سناریوی ۱۰	۵.۰	۴.۵	۳.۵	۵.۰	۴.۵	۴.۵
سناریوی ۱۱	۵.۰	۴.۵	۴.۰	۴.۰	۳.۵	۴.۲
امتیاز مؤلفه‌های پیچیدگی اجرا در بازه ۱ تا ۵ گزارش شده است. مقدار کمتر نشان‌دهنده پیچیدگی اجرایی کمتر است و C10 میانگین پنج مؤلفه است.						

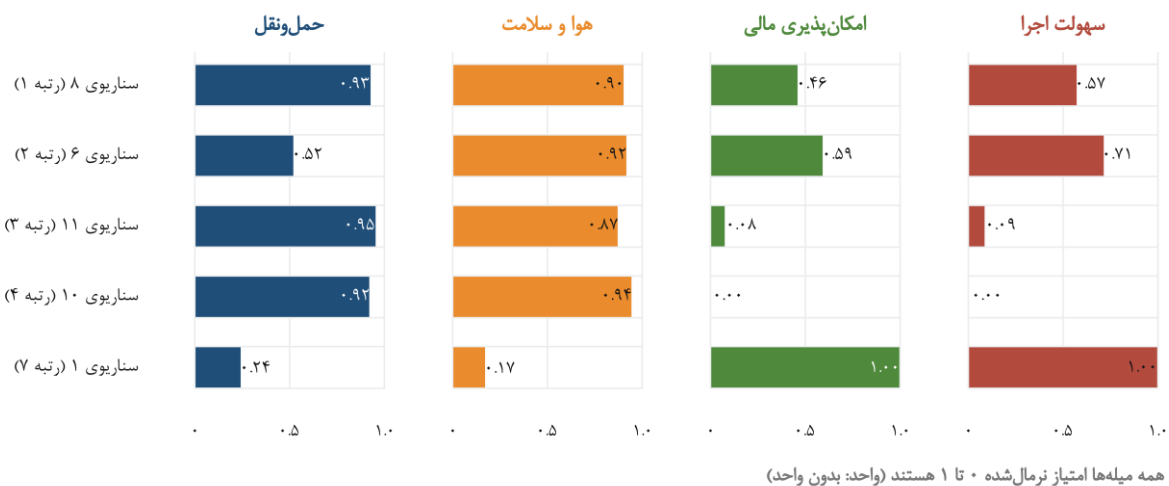
۵. بحث و تفسیر یافته‌ها

یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که اولویت‌بندی سیاست‌های حمل و نقل پایدار در تهران حاصل موازنه میان دو دسته ملاحظه است: از یک سو، میزان بهبود پیامدهای حمل و نقلی، محیط‌زیستی و سلامت است؛ و از سوی دیگر، ظرفیت مالی، نهادی و اجرایی لازم برای تحقق آن پیامدها. نقشه جایگاه سیاست‌ها در شکل ۴ نیز این تعارض را نشان می‌دهد؛ برخی گزینه‌ها از نظر اثرگذاری در موقعیت مطلوبی قرار دارند، اما با کاهش قابلیت اجرا مواجه‌اند و برخی دیگر، با وجود سهولت بیشتر اجرا، دامنه محدودی از مسئله را پوشش می‌دهند. بنابراین، رتبه نخست را نباید معادل برتری مطلق یک سیاست در همه شرایط دانست؛ بلکه هر گزینه باید بر اساس نقش مناسب آن در فرایند اجرا تفسیر شود.

در این چارچوب، سناریوی ۸ (بسته ترکیبی سبک)، با امتیاز TOPSIS برابر با ۰.۷۲۱ در ساختار وزن‌دهی متوازن رتبه نخست را کسب کرد و در چهار ساختار از پنج ساختار وزن‌دهی در میان سه گزینه نخست باقی ماند (جدول‌های ۷ و ۸، و شکل ۵). اهمیت این نتیجه در آن است که جایگاه سناریوی ۸ صرفاً به یک اولویت سیاستی یا یک مجموعه خاص از وزن‌ها وابسته نیست. این بسته چند ابزار مکمل شامل مدیریت زمانی تقاضای سفر، مدیریت سبک پارکینگ، حمایت هدفمند از کرایه حمل و نقل عمومی و پاک‌سازی متوسط آلاینده‌های محلی ناوگان را با شدت کنترل‌شده ترکیب می‌کند. از این جهت، مزیت آن بیش از آنکه ناشی از بیشینه‌کردن یک پیامد مشخص باشد، حاصل جلوگیری از ضعف شدید در ابعاد مختلف تصمیم است؛ وضعیتی که در نمای عملکرد راهبردی شکل ۷ نیز مشاهده می‌شود.

این نتیجه با ادبیات مدل‌سازی سیستمی حمل و نقل هم‌راستا است که بر وجود روابط متقابل میان تقاضای سفر، ظرفیت شبکه، کیفیت خدمت، هزینه و پیامدهای محیط‌زیستی تأکید دارد. در این رویکرد، مداخله در یک جزء از سیستم ممکن است به دلیل بازخوردهای رفتاری یا محدودیت‌های بخش‌های دیگر، اثر مورد انتظار را به‌طور کامل ایجاد نکند. مطالعات سیاست‌های

یکپارچه شهری نیز بر این نکته تأکید دارند که ترکیب هماهنگ ابزارهای مدیریت تقاضا، تقویت گزینه‌های جایگزین و اصلاح فناوری می‌تواند در مقایسه با مداخلات منفرد، دامنه گسترده‌تری از اهداف پایداری را پوشش دهد (Haghshenas et al., 2015; Melkonyan et al., 2020; Rassafi et al., 2014). تفاوت پژوهش حاضر با بخش مهمی از این مطالعات در آن است که آثار سناریوها به تنهایی مبنای تصمیم قرار نگرفته و هزینه سرمایه‌ای، فشار مالی، نیاز یارانه و پیچیدگی اجرا نیز مستقیماً وارد اولویت‌بندی شده‌اند. بنابراین، بسته‌ای که از نظر فنی اثر بیشتری دارد، الزاماً مناسب‌ترین گزینه برای آغاز فوری نیست.



شکل ۷. نمای عملکرد راهبردی گزینه‌های کلیدی

با این حال، عنوان «کم‌ریسک» برای سناریوی ۸ باید نسبی تفسیر شود. افزایش ۶۵.۰۱ درصدی نیاز یارانه حمل و نقل عمومی و رتبه هفتم این گزینه در ساختار اولویت مالی-اجرایی نشان می‌دهد که اجرای آن نیز بدون منبع مالی پایدار امکان‌پذیر نیست (جدول‌های ۵ و ۷). کم‌ریسک بودن این بسته بیشتر به هزینه سرمایه‌ای و پیچیدگی پایین‌تر آن در مقایسه با بسته‌های توسعه‌ای سنگین اشاره دارد، نه به فقدان فشار مالی. از این جهت، تعبیر دقیق‌تر آن «بسته آغازین متوازن با ریسک اجرایی کنترل‌پذیرتر نسبت به بسته‌های توسعه‌ای» است. اجرای این بسته باید با تعیین منبع تأمین یارانه، سقف تعهدات جاری و سازوکار پایش مرحله‌ای همراه باشد.

سناریوی ۶ (کاهش آلاینده‌گی محلی ناوگان) در ساختارهای وزن‌دهی CRITIC و اولویت هوای پاک رتبه نخست را به دست آورد. کاهش $PM_{2.5}$ نسبت به مسیر پایه در تهران و منطقه ۱۲ (به ترتیب ۹.۹۸ و ۲۰.۹۸ درصد) پشتوانه تجربی جایگاه این گزینه در سیاست هوای پاک است (جدول ۴). مقدار بالاتر اثر در منطقه ۱۲ با تمرکز فعالیت‌ها، تراکم تردد و مواجهه بیشتر در هسته مرکزی سازگار است؛ با این حال، به دلیل دقت پایین‌تر اعتبارسنجی در مقیاس منطقه ۱۲، این مقدار باید عمدتاً از نظر جهت و شدت نسبی تفسیر شود و نه به عنوان پیش‌بینی قطعی. اهمیت سناریوی ۶ با مطالعات انتشار آلاینده‌های تهران هم‌خوان است. این مطالعات نقش منابع متحرک، موتورسیکلت‌ها و وسایل نقلیه متوسط، سنگین و دیزلی را در انتشار آلاینده‌های محلی برجسته کرده‌اند و نوسازی یا کاهش شدت انتشار ناوگان عمومی را از اجزای مهم برنامه کنترل ذرات معلق دانسته‌اند (H. Vafa-Arani et al., 2014; Shahbazi et al., 2016, 2019; Tahsiri & Arab, 2023). بنابراین، قرارگرفتن کاهش آلاینده‌گی ناوگان در محور سیاست کوتاه‌مدت هوای پاک با شواهد پیشین سازگار است. در عین حال، این سیاست مستقیماً تقاضای سفر یا فشار شبکه را تغییر نمی‌دهد و به همین دلیل نمی‌تواند به تنهایی جایگزین مدیریت تقاضا و بهبود حمل و نقل عمومی شود.

مقایسه سناریوهای ۶ و ۷ همین تفاوت سازوکاری را روشن می‌کند. سناریوی ۷ (گذار به ناوگان پاک تاکسی و اتوبوس) از نظر کاهش انتشار فناوری‌محور اهمیت دارد، اما اثر آن بر زمان تلف‌شده تقریباً صفر است و در ساختارهای اثرمحور نیز جایگاه پایینی دارد (جدول‌های ۴ و ۷، و شکل ۳). این نتیجه به معنای بی‌اهمیت بودن برقی‌سازی نیست؛ بلکه نشان می‌دهد تغییر فناوری پیشرفته، بدون تغییر تقاضای سفر، قیمت استفاده از خودرو، مدیریت پارکینگ یا کیفیت خدمت عمومی، سیاست مستقل کاهش ازدحام محسوب نمی‌شود. افزون بر آن، ارزیابی کامل منافع محیط‌زیستی برقی‌سازی به ترکیب تولید برق، زیرساخت شارژ، عمر باتری و آثار چرخه عمر وابسته است. بنابراین، گذار پاک فناوری ناوگان باید درون یک بسته وسیع‌تر فناوری، خدمت و مدیریت تقاضا قرار گیرد.

سناریوی ۱ (مدیریت زمانی تقاضای سفر) در ساختار اولویت مالی-اجرایی رتبه نخست را کسب کرد. امتیاز پیچیدگی ۱ از ۵ نبود سرمایه‌گذاری مستقیم و زیرساختی قابل توجه در تعریف ماتریس، قابلیت آغاز سریع‌تر این سیاست را توضیح می‌دهد (جدول‌های ۵، ۷ و ۹). در عین حال، جایگاه پایین‌تر آن در ساختار وزن‌دهی متوازن نشان می‌دهد که این سیاست، هرچند برای کاهش فشار ساعات اوج و ایجاد فرصت اجرایی مناسب است، همه ابعاد مسئله حمل و نقل و آلودگی تهران را پوشش نمی‌دهد. به بیان دیگر، سناریوی ۱ باید به‌عنوان اقدام فوری و زمینه‌ساز تفسیر شود، نه راه‌حل نهایی.

یافته‌های مربوط به سناریوهای قیمت‌گذاری دسترسی و مدیریت پارکینگ نیز نشان می‌دهد که محدودکردن استفاده از خودرو، بدون تقویت گزینه‌های جایگزین و کاهش شدت انتشار ناوگان، الزاماً به بهبود هم‌زمان ازدحام و آلودگی منجر نمی‌شود. نمای عملکرد این گزینه‌ها در جدول ۴ و شکل ۳ نشان می‌دهد آثار آن‌ها در حوزه‌های مختلف یکنواخت نیست. این نتیجه موید مطالعات تهران است که نشان داده‌اند طراحی قیمت‌گذاری می‌تواند بر انتخاب شیوه سفر اثر بگذارد، اما پیامد نهایی محدودیت دسترسی به کیفیت حمل و نقل عمومی، ساختار فضایی شهر و امکان جایگزینی سفر وابسته است (Mamdoohi & Hamrang, 2017; Salarvandian et al., 2021; Ghoortlar, 2021). بنابراین، قیمت‌گذاری دسترسی و مدیریت پارکینگ در تهران بیشتر باید به‌عنوان اجزای یک بسته فشار-کشش به کار روند و نه سیاست‌هایی مستقل برای حل هم‌زمان ازدحام و آلودگی. در سوی دیگر، سناریوی ۵ (بهبود خدمت حمل و نقل عمومی) نشان می‌دهد که بهبود کیفیت، ظرفیت، دسترسی و قابلیت اعتماد حمل و نقل عمومی می‌تواند پیامدهای حمل و نقلی قابل توجهی ایجاد کند؛ اما نیاز سرمایه‌ای و یارانه‌ای آن سبب کاهش جایگاه گزینه در ساختارهای مالی-اجرایی می‌شود (جدول‌های ۴، ۵ و ۷). این نتیجه بیانگر یک تعارض اساسی در سیاست‌گذاری تهران است: حمل و نقل عمومی برای موفقیت ابزارهای محدودکننده خودرو ضروری است، اما توسعه و نگهداری آن خود به منابع پایدار و ظرفیت بهره‌برداری نیاز دارد. بنابراین، شدت و زمان اجرای برنامه‌های توسعه خدمت باید با ظرفیت تأمین مالی سرمایه‌ای و جاری هماهنگ شود.

این تعارض در سناریوهای ۱۰ (بسته حمل و نقل عمومی‌محور و پاک) و ۱۱ (بسته یکپارچه متوازن) آشکارتر است. این دو بسته از نظر پیامدهای حمل و نقلی و محیط‌زیستی در میان گزینه‌های قوی قرار دارند، اما در ساختار اولویت مالی-اجرایی به ترتیب رتبه‌های یازدهم و دهم را کسب می‌کنند. میانگین سالانه هزینه سرمایه‌ای هر یک از آن‌ها نیز حدود ۲۵.۶ هزار میلیارد ریال است و پیچیدگی اجرای آن‌ها در سطوح بالای مقیاس قرار دارد (جدول‌های ۵، ۷ و ۹). در نتیجه، افت رتبه آن‌ها ناشی از ضعف اثرگذاری نیست، بلکه محدودیت در امکان آغاز و تداوم اجرا را منعکس می‌کند. این بسته‌ها باید به‌عنوان گزینه‌های توسعه‌ای تلقی شوند که اجرای آن‌ها به تأمین مالی پایدار، برنامه روشن یارانه‌ای، هماهنگی چندپهلوی و توان نگهداری و بهره‌برداری بلندمدت وابسته است.

ویژگی‌های تهران در شکل‌گیری این الگوی رتبه‌بندی نقش تعیین‌کننده دارد. تمرکز بخش قابل توجهی از فعالیت‌های اداری، تجاری و خدماتی در هسته مرکزی، موجب می‌شود آثار سیاست‌های دسترسی و کاهش آلاینده‌گی ناوگان در منطقه ۱۲ با میانگین کل شهر متفاوت باشد. ناهمگنی و فرسودگی ناوگان و حضور گسترده موتورسیکلت، تاکسی و وسایل نقلیه دیزلی نیز اهمیت کنترل شدت انتشار را افزایش می‌دهد. در عین حال، تفاوت کیفیت و دسترسی به حمل و نقل عمومی در بخش‌های مختلف شهر سبب می‌شود که محدودیت خودرو بدون فراهم‌کردن جایگزین قابل اتکا با کاهش پذیرش یا انتقال تقاضا به شیوه‌های نامطلوب همراه شود.

محدودیت منابع مالی شهرداری و تعهدات جاری یارانه‌ای نیز اجرای هم‌زمان بسته‌های سرمایه‌بر را دشوار می‌کند. این تفسیر با مطالعات پایداری مالی شهرداری تهران و کسری بودجه شهرداری‌ها سازگار است که بر ناپایداری بخشی از منابع درآمدی و فشار تعهدات مالی تأکید کرده‌اند (Ahmadi et al., 2022; Jafari Shahrestani et al., 2022). افزون بر آن، تعدد نهادهای مسئول در حوزه‌هایی مانند قیمت‌گذاری، مدیریت تردد، توسعه حمل و نقل عمومی، معاینه فنی، نوسازی ناوگان و تنظیم ساعات کاری، هزینه هماهنگی و احتمال اجرای ناقص را افزایش می‌دهد. بنابراین، سیاستی که در شهری با منابع و ظرفیت نهادی بیشتر می‌تواند به‌صورت هم‌زمان اجرا شود، در تهران ممکن است به مرحله‌بندی و تحقق پیش‌شرط‌های بیشتری نیاز داشته باشد.

بر این اساس، تفاوت نتایج پژوهش حاضر با برخی مطالعات اثرمحور را نباید به‌عنوان ناسازگاری علمی تفسیر کرد. هنگامی که ارزیابی فقط بر آثار حمل و نقلی و محیط‌زیستی متمرکز باشد، بسته‌های گسترده‌تر مانند سناریوهای ۱۰ و ۱۱ در جایگاه بالاتری قرار می‌گیرند؛ همان‌گونه که آزمون محدود به معیارهای اثرگذاری نیز این جابه‌جایی را نشان داد. در مقابل، با تمرکز بر معیارهای امکان‌پذیری، گزینه‌های کم‌سرمایه و ساده‌تر مانند سناریوی ۱ به صدر می‌رسند. این تفاوت نشان می‌دهد که نتیجه نهایی علاوه بر سازوکار سیاست، به دامنه معیارهای تصمیم و شرایط نهادی و مالی شهر وابسته است. در تهران، محدودیت اجرا بخشی از خود مسئله سیاستی است و نمی‌توان آن را پس از انتخاب گزینه کنار گذاشت.

سهم پژوهش حاضر بیش از آنکه در کاربرد یک روش رتبه‌بندی خاص باشد، در نوع تفسیری است که از نتایج به دست می‌دهد. یافته‌ها نشان می‌دهند که «اثرگذاری بیشتر» و «اولویت بالاتر برای آغاز اجرا» الزاماً یکسان نیستند؛ زیرا برخی بسته‌ها آثار حمل و نقلی و محیط‌زیستی قوی‌تری دارند؛ اما محدودیت‌های سرمایه‌ای، یارانه‌ای و نهادی، امکان اجرای فوری آن‌ها را کاهش می‌دهد. در مقابل، برخی گزینه‌های ساده‌تر، با وجود اثر محدودتر، می‌توانند برای شروع مناسب‌تر باشند. این تفکیک، رتبه‌بندی را از انتخاب یک گزینه برتر به ابزاری برای تشخیص نقش، زمان و شروط اجرای سیاست‌ها تبدیل می‌کند و حلقه میان ارزیابی پیامدهای سیاست و تصمیم‌گیری را تقویت می‌نماید.

بر این اساس، دلالت اصلی نتایج، ضرورت یک مسیر اجرایی مرحله‌ای و قابل بازنگری است. مدیریت زمانی تقاضای سفر می‌تواند اقدام فوری باشد، کاهش آلاینده‌گی محلی ناوگان به‌طور هم‌زمان محور کوتاه‌مدت سیاست هوای پاک را تشکیل دهد و سناریوی ۸ به‌عنوان بسته آغازین متوازن اجرا شود. حرکت به سمت بسته‌های سرمایه‌برتر و یکپارچه‌تر، به‌ویژه سناریوهای ۱۰ و ۱۱، باید به تأمین مالی پایدار، ظرفیت بهره‌برداری و هماهنگی بین‌نهادی مشروط باشد؛ تمایز نقش این گزینه‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین، قیمت‌گذاری دسترسی و مدیریت پارکینگ باید با تقویت گزینه‌های جایگزین و تخصیص شفاف درآمدها به حمل و نقل عمومی، کاهش آلاینده‌گی ناوگان و حمایت از گروه‌های آسیب‌پذیر همراه شود. نتایج تحلیل حساسیت نیز نشان می‌دهد که پیام اصلی پژوهش به یک ساختار وزن‌دهی یا روش تجمیع خاص محدود نیست، هرچند اولویت‌ها همچنان به مجموعه گزینه‌ها، معیارها، شدت سناریوها و افق مطالعه وابسته‌اند؛ از این جهت، اجرای سیاست‌ها باید با پایش و بازنگری دوره‌ای همراه باشد.

۶. نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف اولویت‌بندی اقتصادی-اجرایی سیاست‌های حمل و نقل پایدار در تهران، یازده گزینه شامل هفت سیاست منفرد و چهار بسته ترکیبی را در افق ۲۰۲۴ تا ۲۰۳۰ ارزیابی کرد. داده‌های مورد استفاده در ماتریس تصمیم از خروجی‌های یک شبیه‌ساز ترکیبی بالادستی مبتنی بر پویایی سیستم، مدل‌سازی عامل‌بنیان و یادگیری ماشین استخراج شد. ده معیار تصمیم، پیامدهای حمل و نقلی، کاهش آلودگی و هزینه سلامت و امکان‌پذیری مالی و اجرایی را پوشش دادند. وزن معیارها با روش CRITIC تعیین و گزینه‌ها با TOPSIS رتبه‌بندی شدند؛ پایداری نتایج نیز در پنج ساختار وزن‌دهی و مجموعه‌ای از آزمون‌های حساسیت بررسی شد.

نتایج نشان داد که سناریوی ۸ (بسته ترکیبی سبک) مناسب‌ترین گزینه برای آغاز متوازن است. اگرچه، افزایش نیاز یارانه حمل و نقل عمومی نشان می‌دهد که برتری این گزینه به معنای کم‌هزینه بودن مطلق آن نیست و اجرای آن باید با منبع مالی مشخص و کنترل تعهدات جاری همراه باشد.

در میان سیاست‌های منفرد، سناریوی ۶ (کاهش آلایندگی محلی ناوگان) در اولویت هوای پاک جایگاه نخست را به دست آورد و کاهش قابل توجه PM2.5 را در تهران و منطقه ۱۲ نشان داد. سناریوی ۱ (مدیریت زمانی تقاضای سفر) نیز به دلیل نیاز سرمایه‌ای محدود و پیچیدگی اجرایی پایین، مناسب‌ترین اقدام فوری در وضعیت محدودیت شدید منابع شناخته شد. در مقابل، سناریوی ۱۰ (بسته حمل و نقل عمومی محور و پاک) و سناریوی ۱۱ (بسته یکپارچه متوازن) با وجود آثار حمل و نقلی و محیط‌زیستی قوی، به دلیل هزینه سرمایه‌ای، نیاز یارانه‌ای و پیچیدگی زیاد، گزینه‌هایی توسعه‌ای و مشروط محسوب می‌شوند. نتیجه محوری پژوهش آن است که سیاست حمل و نقل پایدار صرفاً از انتخاب ابزار دارای بیشترین اثر فنی حاصل نمی‌شود، بلکه به ترتیب و شروط اجرای ابزارها وابسته است. مسیر سیاستی مناسب برای تهران باید با اقدامات کم‌سرمایه و قابل تعدیل آغاز شود، به یک بسته مکمل و متوازن گسترش یابد و پس از تأمین منابع مالی، ظرفیت نهادی و آمادگی اجرایی، به بسته‌های سرمایه‌ای برتر انتقال پیدا کند. بنابراین، رتبه‌بندی ارائه‌شده بیش از آنکه بهترین سیاست مطلق معرفی کند، نقش گزینه‌ها را در قالب اقدام فوری، بسته آغازین، محور هوای پاک و بسته توسعه‌ای مشروط مشخص می‌سازد.

یافته‌ها به ساختار شبیه‌ساز بالادستی، تعریف سناریوها، معیارهای منتخب و افق مطالعه وابسته‌اند و نباید پیش‌بینی قطعی آثار اجرای واقعی تلقی شوند. دقت استنباط در سطح تهران بیشتر از منطقه ۱۲ است؛ بنابراین، نتایج منطقه ۱۲ باید عمدتاً از نظر جهت تغییر و ترتیب نسبی گزینه‌ها تفسیر شوند. همچنین، عدالت توزیعی، تفاوت آثار میان گروه‌های اجتماعی و پذیرش ذی‌نفعان به دلیل محدودیت داده‌های خرد به صورت مستقل وارد ماتریس نشده‌اند. ساختارهای وزن‌دهی نیز سناریوهای تحلیلی ترجیحات سیاستی‌اند و نه ترجیحات مستقیماً استخراج‌شده از همه ذی‌نفعان. لذا، اجرای پیشنهادها باید با پایلوت، پایش مستمر و بازنگری دوره‌ای همراه باشد.

پژوهش‌های آینده می‌توانند عدالت توزیعی و پذیرش اجتماعی را با داده‌های خرد وارد ارزیابی کنند، عدم قطعیت پارامترهای شبیه‌ساز را تا مرحله رتبه‌بندی انتقال دهند، تحلیل را در مقیاس‌های مکانی و زمانی دقیق‌تر توسعه دهند و شیوه بازگشت درآمد، تأمین مالی ناوگان و ارزیابی چرخه عمر برقی‌سازی را به طور صریح مدل‌سازی کنند. در مجموع، چارچوب حاضر ابزاری برای پیوند پیامدهای شبیه‌سازی‌شده با محدودیت‌های واقعی تصمیم‌گیری شهری فراهم می‌کند و بر ترکیب و توالی سیاست‌ها، به جای اتکا به یک مداخله منفرد، تأکید دارد.

تشکر و قدردانی

این پژوهش از حمایت مالی یا سازمانی مستقل برخوردار نبوده است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که در انجام این پژوهش تعارض منافع ندارند.

سهم نویسنده اول ۶۰ درصد، نویسنده دوم ۲۰ درصد و سهم نویسندگان سوم و چهارم هر یک ۱۰ درصد بوده است.

منابع

- Abbasi, M. T., Alesheikh, A. A., Jafari, A., & Lotfata, A. (2024). Spatial and temporal patterns of urban air pollution in Tehran with a focus on PM_{2.5} and associated pollutants. *Scientific Reports*, 14, 25150. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75678-6>
- Ahmadi, K., Demneh, N., Jahandideh, M., & Mollaei, Y. (2022). Fiscal sustainability in Tehran Municipality: Current situation and suggested reforms [In Persian]. *Urban Economics and Planning*, 3(4), 164–183. <https://doi.org/10.22034/uep.2022.367278.1295>
- Axsen, J., & Long, Z. (2025). Accepting and implementing transport pricing policies for climate: A review of evidence and research gaps. *Ecological Economics*, 238, 108740. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2025.108740>
- Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, 15(2), 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.10.005>
- Bayat, R., Hassanvand, M. S., & Daroudi, R. (2020). Economic analysis of the cost of air pollution deaths in Tehran [In Persian]. *Urban Economics and Planning*, 1(3), 188–197. <https://doi.org/10.22034/UE.2020.09.03.06>
- Behzadian, M., Otaghsara, S. K., Yazdani, M., & Ignatius, J. (2012). A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39(17), 13051–13069. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>
- Clean Air Act of Iran. (2017). Islamic Consultative Assembly [In Persian].
- Creutzig, F., Roy, J., Lamb, W. F., Azevedo, I. M. L., Bruine de Bruin, W., Dalkmann, H., Edelenbosch, O. Y., Geels, F. W., Grubler, A., Hepburn, C., Hertwich, E. G., Khosla, R., Mattauch, L., Minx, J. C., Ramakrishnan, A., Rao, N. D., Steinberger, J. K., Tavoni, M., Ürges-Vorsatz, D., & Weber, E. U. (2018). Towards demand-side solutions for mitigating climate change. *Nature Climate Change*, 8, 260–263. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0121-1>
- Diakoulaki, D., Mavrotas, G., & Papayannakis, L. (1995). Determining objective weights in multiple criteria problems: The CRITIC method. *Computers & Operations Research*, 22(7), 763–770. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(94\)00059-H](https://doi.org/10.1016/0305-0548(94)00059-H)
- European Commission. (2020). *Sustainable and smart mobility strategy—Putting European transport on track for the future* (COM(2020) 789 final).
- European Commission. (2021). *The new EU urban mobility framework* (COM(2021) 811 final).
- Goldman, T., & Gorham, R. (2006). Sustainable urban transport: Four innovative directions. *Technology in Society*, 28(1–2), 261–273. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2005.10.007>
- Haghshenas, H., Vaziri, M., & Gholamialam, A. (2015). Evaluation of sustainable policy in urban transportation using system dynamics and world cities data: A case study in Isfahan. *Cities*, 45, 104–115. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2014.11.003>
- Heidarpour, A., & Jaber, R. (2022). Sustainable transportation in Iran: Measurement and analysis of related indicators [In Persian]. *Urban Economics and Planning*, 2(4), 247–264. <https://doi.org/10.22034/UE.2022.02.04.01>
- Hosford, K., Firth, C., Brauer, M., & Winters, M. (2021). The effects of road pricing on transportation and health equity: A scoping review. *Transport Reviews*, 41(6), 766–787. <https://doi.org/10.1080/01441647.2021.1898488>
- Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications—A state-of-the-art survey*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>

- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>
- Jafari Shahrestani, A., Jahanfar, N., & Mirzaei, H. (2022). Budget deficit in municipalities: A method for calculation and control based on resource sustainability—Cases of Tehran, Mashhad, Shiraz, and Rasht [In Persian]. *Urban Economics and Planning*, 3(1), 64–75. <https://doi.org/10.22034/UE.2022.03.01.05>
- Mamdoohi, A. R., & Hamrang Ghoortlar, E. (2021). Impact of congestion pricing policy change on mode choice: The case of Tehran [In Persian]. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 37.2(1.1), 13–21. <https://doi.org/10.24200/j30.2020.53968.2606>
- Melkonyan, A., Koch, J., Lohmar, F., Kamath, V., Munteanu, V., Schmidt, J. A., & Bleischwitz, R. (2020). Integrated urban mobility policies in metropolitan areas: A system dynamics approach for the Rhine-Ruhr metropolitan region in Germany. *Sustainable Cities and Society*, 61, 102358. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102358>
- Morouji, G., Mohammadi Pour, H., & Nakhaei, E. (2011). Evaluation of sustainable transportation systems using multi-criteria decision-making methods in an uncertain environment: Case study of Tehran [Conference paper, In Persian]. *11th International Conference on Transportation and Traffic Engineering*.
- National Laws and Regulations Portal. (2021). *Executive bylaw of Article 8 of the Clean Air Act, with amendments* [In Persian].
- Nieuwenhuijsen, M. J. (2016). Urban and transport planning, environmental exposures and health: New concepts, methods and tools to improve health in cities. *Environmental Health*, 15(Suppl. 1), S38. <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0108-1>
- Norouzi, M. H., Kameli, M. J., Afandizadeh, S., & Salehi Sadaghiani, J. (2023). Study of the relationships between the components of the urban transportation system evaluation model based on sustainable development indicators: Case study of the Tehran metropolitan area [In Persian]. *Urban Economics and Planning*, 4(3), 188–210. <https://doi.org/10.22034/uep.2023.413831.1399>
- Opricovic, S., & Tzeng, G.-H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 445–455. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1)
- Rassafi, A. A., Ostadi Jafari, M., & Javanshir, H. (2014). An appraisal of sustainable urban transportation: Application of a system dynamics model. *International Journal of Transportation Engineering*, 2(1), 47–66. <https://doi.org/10.22119/ijte.2014.6708>
- Rupprecht Consult. (2019). *Guidelines for developing and implementing a sustainable urban mobility plan* (2nd ed.). European Commission.
- Salarvandian, F., Dijst, M., & Helbich, M. (2017). Impact of traffic zones on mobility behavior in Tehran, Iran. *Journal of Transport and Land Use*, 10(1), 965–982. <https://doi.org/10.5198/jtlu.2017.1087>
- Selmoune, A., Cheng, Q., Wang, L., & Liu, Z. (2020). Influencing factors in congestion pricing acceptability: A literature review. *Journal of Advanced Transportation*, 2020, 4242964. <https://doi.org/10.1155/2020/4242964>
- Shahbazi, H., Hassani, A., & Hosseini, V. (2019). Evaluation of Tehran clean air action plan using emission inventory approach. *Urban Climate*, 27, 446–456. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.01.002>
- Shahbazi, H., Reyhanian, M., Hosseini, V., & Afshin, H. (2016). The relative contributions of mobile sources to air pollutant emissions in Tehran, Iran: An emission inventory approach. *Emission Control Science and Technology*, 2, 44–56. <https://doi.org/10.1007/s40825-015-0031-x>
- Shahbazi, M., Fathi, M. R., & Jesri, N. (2021). Evaluation and prioritization of urban transport projects with a human-centered development approach using fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS [In Persian]. *Geography and Regional Planning*, 11(42), 661–677. DOR: [20.1001.1.22286462.1400.11.2.34.4](https://doi.org/10.1001.1.22286462.1400.11.2.34.4)
- Shepherd, S. (2014). A review of system dynamics models applied in transportation. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 2(2), 83–105. <https://doi.org/10.1080/21680566.2014.916236>

- Small, K. A., & van Dender, K. (2007). Fuel efficiency and motor vehicle travel: The declining rebound effect. *The Energy Journal*, 28(1), 25–52. <https://doi.org/10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol28-No1-2>
- Suryani, E., Hendrawan, R. A., Adipraja, P. F. E., & Indraswari, R. (2020). System dynamics simulation model for urban transportation planning: A case study. *International Journal of Simulation Modelling*, 19(1), 5–16. <https://doi.org/10.2507/IJSIMM19-1-493>
- Tahamipour Zarandi, M., & Moghise, M. (2022). Social cost-benefit analysis of replacing defective catalytic converters in Tehran's light vehicles to reduce air pollution [In Persian]. *Urban Economics and Planning*, 3(1), 104–120. <https://doi.org/10.22034/UE.2022.3.01.08>
- Tahsiri, A., & Arab, M. (2023). A system dynamics model for a holistic analysis of urban NOx emissions: A case study of Tehran, Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 25, 7299–7323. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02323-5>
- United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development* (A/RES/70/1).
- United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2019). *World urbanization prospects: The 2018 revision*. United Nations.
- United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific. (2020). *Assessment of urban transport system in Tehran*.
- United Nations Human Settlements Programme. (2022). *World cities report 2022: Envisaging the future of cities*.
- Vafa-Arani, H., Jahani, S., Dashti, H., Heydari, J., & Moazen, S. (2014). A system dynamics modeling for urban air pollution: A case study of Tehran, Iran. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 31, 21–36. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.05.016>
- Vickrey, W. S. (1969). Congestion theory and transport investment. *American Economic Review*, 59(2), 251–260.
- World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*.
- Zavadskas, E. K., & Turskis, Z. (2011). Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: An overview. *Technological and Economic Development of Economy*, 17(2), 397–427. <https://doi.org/10.3846/20294913.2011.593291>