فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱٤، شماره ۱، پاییز ۱٤۰۱، ص. ۲۲۳۲-۲۲۱۳

مقاله پژوهشی

تأثیر طرح‌های توسعه‌ای حمل‌ونقل همگانی بر میزان آلودگی هوای شهری با استفاده از روش پویایی سیستم

مهدی برجی، کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ایران

منصور حاجی‌حسینلو، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ایران

سیدمحمدحسین دهناد (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، ایران

E-mail: m.dehnad@qom.ac.ir

دریافت: ۱٤۰۰/۰۲/۱۸ پذیرش: ۱٤۰۰/۰۷/۱۰

چکیده

تهیه و تدوین راهبردهای کنترل آلودگی هوا یک فرایند نسبتاً پیچیده است که جوانب گوناگونی دارد؛ در شبکه‌های حمل‌ونقل شهری نیز برنامه‌های توسعه‌ای وجود دارد، لیکن مدل‌های مورد استفاده عمدتاً قادر به بررسی اثرات متقابل و همزمان کاهشی و افزایشی بر آلودگی هوا نیستند. در این پژوهش یک مدل سیستم دینامیک جهت بررسی پارامترهای مختلف مؤثر بر آلودگی هوا نسبت به بررسی بلندمدت آن‌ها در دوره زمانی ۲۰ ساله ساخته شده است. مدل مد نظر با ایجاد زیرمدل‌های اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و حمل‌ونقلی و ارتباط توامان آن‌ها جهت بررسی نقش برنامه‌های توسعه‌ای زیرساخت حمل‌ونقل همگانی در میزان آلودگی هوای شهری توسعه داده شده و به ارزیابی و مقایسه عملکرد حمل‌ونقل همگانی و کمک به اتخاذ سیاست‌های راهگشا در جهت برنامه‌ریزی و مدیریت آتی آن می‌پردازد. جهت ارزیابی مدل توسعه یافته، نتایج ١٤ شاخص در تعداد ١٤ سناریو براساس ۳ استراتژی کلی بررسی گردیده و برای ارزیابی سیاست‌ها از سه روش بی‌بعدسازی استفاده شده‌است. نتایج حاصل از مطالعه منجر به ارائه بسته پیشنهادی سیاست‌گذاری حمل‌ونقل همگانی شد که نشان می‌دهد سیاست بهبود کیفیت مترو و اتوبوس تندرو به عنوان بهترین سیاست‌ها در بین سیاست‌های دفعی و جذبی ارزیابی گردیده‌اند. نوآوری این مقاله، بررسی بلندمدت سیاست‌های متعدد و نیز لحاظ تمامی شیوه‌های حمل‌ونقل موجود در مدل پویایی سیستم می‌باشد که نتایج آن می‌تواند اساس سیاست‌گذاری حمل‌ونقل شهری شهر مشهد قرارگیرد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی هوا، حمل‌ونقل همگانی، مدل پویایی سیستم

۱. مقدمه

آلودگی هوای شهرها در سال‌های اخیر به دلیل توسعه روزافزون و افزایش میزان ترافیک در شهرهای بزرگ به یک چالش جدی در مدیریت شهری تبدیل شده است. ارتباط مستقیم کیفیت هوای شهر با زندگی و سلامت شهروندان باعث شده است که سطح آلودگی هوای شهر به عنوان یکی از معیارهای اصلی کیفیت زندگی شهری شناخته شود [Anenberg et al., 2019].

امروزه با توجه به شرایط اقتصادی – اجتماعی کلان‌شهرها، هرگونه مدیریت صحیح در برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاری برای توسعه و تقویت سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی، تأثیر بسزایی در حمل‌ونقل شهرها و به دنبال آن کاهش آلودگی هوا خواهد داشت. استفاده بهینه و مناسب از سیستم‌های حمل‌ونقل همگانی بالاخص استفاده از سیستم‌های انبوه، ستون فقرات حمل‌ونقل شهری است. در صورت عملکرد صحیح و مناسب حمل‌ونقل همگانی، علاوه بر رضایت‌مندی مستمر کاربران این سیستم‌ها، بخشی از مسافران سیستم حمل‌ونقل شخصی نیز به آن جذب خواهند شد، و از این طریق، بار ترافیکی موجود در شبکه و نیز مصرف سوخت و درنتیجه انتشار آلاینده‌ها در هوا کاهش خواهد یافت [Ostadi-Jafari and Habibian, 2014].

ابزار پویایی سیستم بر پایه نظریهٔ کنترلی بازخورد در مطالعات کمّی در حوزه تحقیقات اقتصادی–اجتماعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش پویایی سیستم از حلقه‌های بازخوردی، متغیرهای درون‌زا و برون‌زا و معادلات سیستمی به منظور مدل‌سازی پدیده‌های پیچیده استفاده می‌شود. حلقه‌های بازخوردی به عنوان زنجیرهٔ بسته‌ای از روابط علت و معلول بین متغیرها تعریف می‌شود. متغیرها به طورکلی به سه دسته تقسیم می‌شوند: متغیرهای حالت که محل انباشته شدن جریان‌ها در طول زمان هستند، متغیرهای نرخ که بیانگر جریان‌های ورودی یا خروجی به متغیرهای حالت در هر دورهٔ زمانی هستند و متغیرهای کمکی که به وسیلهٔ آنها حلقه‌های بازخوردی کامل می‌شوند. مدل‌سازی سیستم با استفاده از ابزار پویایی سیستم به نحو موثری می‌تواند به منظور تحلیل و بررسی مسائل پیچیده اقتصادی–اجتماعی به کار رود [Karami et al., 2017].

در مجموع مطالعه حاضر در نظر دارد با ارائه یک مدل پویایی سیستم به این سوال پاسخ دهد که با فرض هایی همچون تغییر در قیمت گذاری و تغییر در نحوه تخصیص بودجه وهمچنین نوسازی ناوگان چگونه می توان به ارتقاء حمل و نقل همگانی و شاخص های پایداری دست یافت.

۲. پیشینه تحقیق

در این بخش ابتدا تحقیقاتی که مساله آلودگی هوا را با روشهای مختلف مطالعه کرده‌اند، مرور می‌شوند. سیواکومار و همکاران با استفاده از رویکرد مدل‌سازی ریاضی، آلودگی هوای شهر جامشدپور را پیش‌بینی کردند. بررسی‌های آنها نشان داد که ۵۳ درصد از آلودگی ها مربوط به NOx و ۷ درصد مربوط به منابع داخلی و ٤٠ درصد مربوط به وسایل حمل و نقل بوده است [Sivakumar, 2007]. ون و همکاران، تحلیلی روی رابطه همگرایی حمل‌ونقل همگانی و کیفیت هوا انجام دادند. میانگین غلظت سالانه دی اکسید گوگرد به عنوان شاخص کیفیت هوا و شاخص سهم حمل و نقل همگانی در بین همه حالت ها به عنوان شاخص حمل و نقل عمومی انتخاب شد. نتیجه نشان داد که یک رابطه تعادل بلند مدت بین این دو شاخص وجود دارد [Wen et al., 2020].

یانگ و همکاران با بکارگیری یک روش شبیه سازی همبسته برای ارزیابی آلودگی ترافیک از طریق پشتیبانی از زیرساخت حمل و نقل یکپارچه و طراحی فضای عمومی، مطالعاتی در شهر پکن انجام دادند [Yang et al., 2020]. ارکان و همکاران از روش پویایی سیستم برای بررسی پتانسیل کاهش آلاینده‌های هوا با پیشنهاد سیاست‌های توسعه حمل و نقل همگانی در ایالات متحده استفاده نمودند. به عنوان نمونه نشان دادند که ۹ درصد افزایش در سهم حمل و نقل همگانی، این امکان را دارد که تا سال ۲۰۵۰، سالانه ۷٦٦ هزار تن، انتشار Co_2 را کاهش دهد [Ercan, Onat and Tatari, 2016].

وفاآرانی باهدف کاهش آلودگی هوا مدل SD، از آلایندگی حمل‌ونقل شهری و آلایندگی صنایع ساخت و سیاست‌هایی چون کنترل میزان فعالیت صنایع ارتقاء جایگاه حمل‌ونقل عمومی و تغییر محدود طرح ترافیک را پیشنهاد داد [Vafa-Arani et al., 2014].

آرمه و همکاران آلودگی هوای ناشی از سیستم حمل و نقل شهر آکرا در غنا را با رویکرد پویایی سیستم‌ها بررسی کردند که در آن حجم ترافیک به عنوان تنها عامل افزایش آلودگی هوا مدنظر قرار گرفته است. آنها عواملی همچون توسعه حمل و نقل عمومی، توسعه ظرفیت بزرگراهها و مدیریت تقاضای سفر را در مدل خود به عنوان سیاستهای کاهش آلودگی هوا مدنظر قرار دادند [Armah, Yawson and Pappoe, 2010].

لیو و همکاران یک مدل قیمتگذاری تراکم را به منظور رفع مشکل حجم ترافیک ارائه کردند. سیاست‌های پیشنهاد شده در تحقیق مذکور بر توسعه حمل و نقل همگانی و افزایش درآمدهای اتوبوسهای شهری و تاثیرات آن بر الگوی سفر شهروندان بوده است [Liu et al., 2015].

هو و همکاران به‌منظور تحلیل توسعه سیستم حمل و نقل بار شهری مبتنی بر حمل و نقل ریلی در شهر پکن از روش پویایی سیستم بهره بردند. سه متغیر تصمیم گیری در هشت سناریو در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفتند. یافته‌ها ایشان نشان داد که طرح های شبکه حمل و نقل ریلی مسافری شهری با بودجه و ظرفیت بالاتر منجر به کاهش گسترده تر کم شدن ازدحام ترافیک، آلودگی هوا و تصادفات می شود [Hu et al., 2020]. سوریانی و همکاران با تدوین چارچوب روش پویایی سیستم، به مدل-سازی و شبیه‌سازی اثربخشی سیستم حمل و نقل برای کاهش تراکم ترافیک از طریق توسعه سناریوها و استراتژی‌هایی برای شهر سورابایا در اندونزی پرداختند. نتایج نشان داد که با اتخاذ استراتژی‌های مورد بررسی در این پژوهش، اثربخشی می تواند تا ۸۰ درصد به عنوان تأثیر افزایش اثربخشی عملیاتی و خدماتی، به کاهش ازدحام ترافیک کمک کند [Suryani et al., 2020].

حق‌شناس یک مدل پویایی سیستم برای آنالیز پایداری حمل‌ونقل شهر اصفهان ابداع کرد که بر اساس اطلاعات وابسته به شهرهای جهان بود. مدهای اصلی مدل، مدل عرضه، توزیع شیوه‌های حمل‌ونقل و توازن عرضه و تقاضا و ایجاد سفر بودند و سیاست‌های مؤثر برای حمل‌ونقل پایدار اصفهان شناسایی و بیان شد که توسعه حمل‌ونقل اصفهان بیشترین اهمیت را دارد [Haghshenas, Vaziri and Gholamialam, 2015].

خسروی و همکاران در منطقه تجاری شهر اصفهان سیاستهای مدیریت تقاضای حمل و نقل شهری در هسته تجاری شهر را با استفاده از سیستم پویا در مقیاس بزرگ ارزیابی نمودند. بر اساس یافته‌های این مطالعه در میان سیاست های ترکیبی، تکمیل توسعه شبکه مترو همزمان با قیمت گذاری کمربندی موثرترین سیاست ترکیبی برای کاهش آلودگی هوا و مصرف انرژی و افزایش روانی ترافیک در آینده بوده است [Khosravi, Haghshenas and Salehi, 2020].

وکیلی و همکاران باهدف مدیریت تقاضا حمل‌ونقل، توزیع مدهای حمل‌ونقل را بررسی و به شاخص‌های جذابیت خودرو شخصی جذابیت حمل‌ونقل همگانی و سود حمل‌ونقل همگانی پرداختند و سیاست‌هایی چون کاهش دسترسی خودرو شخصی افزایش قیمت پارکینگ و افزایش قیمت سوخت را در مطالعه‌شان اعمال کردند [Vakili, Isaai and Barsari, 2008].

در مدل‌سازی و برنامه‌ریزی‌های مرسوم برای برآورد تقاضای حمل‌ونقل روش استاتیکی به‌کار می‌رود که روند رشد متغیرهای مورد توجه برنامه‌ریزی در دوره زمانی بلندمدت برخلاف واقع تقریباً ثابت فرض می‌شود [Guzmán et al., 2008; Pfaffenbichler, 2003]

در مطالعه حاضر از مدل‌های پویایی سیستم برای رفع این نقیصه استفاده شده‌است. مدل پویایی سیستم می‌تواند وضعیت متغیرها را نه تنها در انتها، بلکه در سایر زمان‌ها مورد بررسی قرار داده و تاخیرهای زمانی آنی و طولانی را برای سایر پارامترها لحاظ نماید [Meadows and Wright, 2008; Sterman

2002].

در پژوهشی توسط استادی جعفری و حبیبیان اثر ترکیبی سیاست‌های مدیریت تقاضای حمل‌ونقل با استفاده از مدل پویایی سیستم در بلند مدت مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد که ترکیب سیاست قیمت‌گذاری پارکینگ و دیگر سیاست‌ها، اثر قابل توجهی در کاهش هزینه‌های تحمیل شده بر جامعه دارد [Ostadi-Jafari and Habibian, 2014].

در مطالعات دیگری نیز در شهر مشهد با رویکرد پویایی سیستم، به تحلیل شبکه حمل‌ونقل این شهر پرداخته شده است. صالحی و همکاران در سال ۱۳۹۸ با استفاده از داده های حمل ونقل همگانی و نظر خبرگان، نمودار علی حلقوی حمل ونقل همگانی شهر مشهد طراحی و با استفاده از نرم افزار ونسیم شبیه سازی کردند. نتایج نشان داد با دو برابر شدن بودجه، ۷۰ درصد و با سه برابر شدن بودجه، ۹۱ درصد به میزان تقاضای حمل ونقل عمومی اضافه می شود. همچنین نشان دادند که کاهش قیمت اتوبوس تا ۵۰ درصد باعث خواهد شد ۱۰ درصد به تعداد مسافران استفاده کننده از اتوبوس اضافه شود [Salehi et al., 2020].

علاوه بر این استادی جعفری و حبیبیان در مطالعه‌ای در شهر مشهد، سه سیاست افزایش بهای سوخت اتومبیل شخصی، قیمت گذاری ساعتی پارکینگ و قیمت گذاری ورود به محدوده طرح ترافیک، هر کدام در قالب چهار سطح مختلف مورد بررسی قرار دادند[Ostadi-Jafari and Habibian, 2014]. مطالعه دیگری نیز توسط برجی و حاجی‌حسینلو به بررسی بررسی نقش پارامترهای انسانی و ترافیکی در بهبود حمل ونقل همگانی با استفاده از روش پویایی سیستم‌ها در شهر مشهد پرداختند [Borji and Hoseinloo, 2016].

حمل‌و نقل همگانی یکی از زمینه‌های مورد تأیید و تأکید مطالعات پیشین و سیاست‌های غالب مجموعه‌های توسعه پایدار تلقی می‌شود [Vafa-arani et al., 2014; Vakili et al., 2008]. با توجه به گستردگی مطالعات در خصوص حمل‌ونقل همگانی آن دسته از پژوهش‌هایی که با رویکرد پویایی سیستم به بررسی شاخص‌های حمل‌ونقل و آلودگی هوا پرداخته‌اند مرور گردید. از جمله ضعف‌ها و کمبودها در مطالعات پیشین عدم تمرکز بر حمل و نقل همگانی در تحقیقات پویایی سیستم بود و همچنین ضعف دیگر در لحاظ شیوه‌های انتخاب وسیله نقلیه در مطالعات پیشین است. باتوجه به رویکرد این تحقیق در بهبود حمل ونقل همگانی ضمن حصول ساخت مدل مفهومی از ادبیات تحقیق، لزوم لحاظ روابط علت و معلول بین عوامل متعدد و اضافه نمودن شیوهٔ اتوبوس تندرو، مترو، اتوبوس، تاکسی، سواری شخصی و موتورسیکلت به حلقه‌های مفهومی مدل مشهود است. در نهایت باتوجه به تحقیقات پیشین به بررسی و جمع بندی شاخص‌های ارزیابی حمل‌ونقل همگانی پرداخته شد که متناسب با اهداف تحقیق تکمیل و در جدول (۱) گنجانده شده‌اند.

۳. روش شناسی تحقیق

همانطور که اشاره شد، رویکرد پویایی سیستم به دلیل استفاده از حلقه‌های علت و معلول می‌تواند پیچیدگی بین متغیرها و همچنین تاثیرگذاری آن‌ها در دوره‌های زمانی مختلف بر روی یکدیگر را شبیه‌سازی کند. در این مقاله، یک مدل بر پایه حلقه‌های علت و معلول به منظور مطالعه معضل آلودگی هوا بر اساس اطلاعات مطالعات جامع سالهای ۱۳۷۳ الی ۱۳۹۰ شهر مشهد پرداخته و اعتبارسنجی شده و پس‌ازآن سال ۱۳۹۵ به‌عنوان سال مبنای برنامه‌ریزی قرارگرفته است و بر مبنای آن عوامل تاثیرگذار شناسایی شده و رفتار سیستم در نتیجه اتخاذ سیاست‌های مختلف شبیه‌سازی می‌شود.

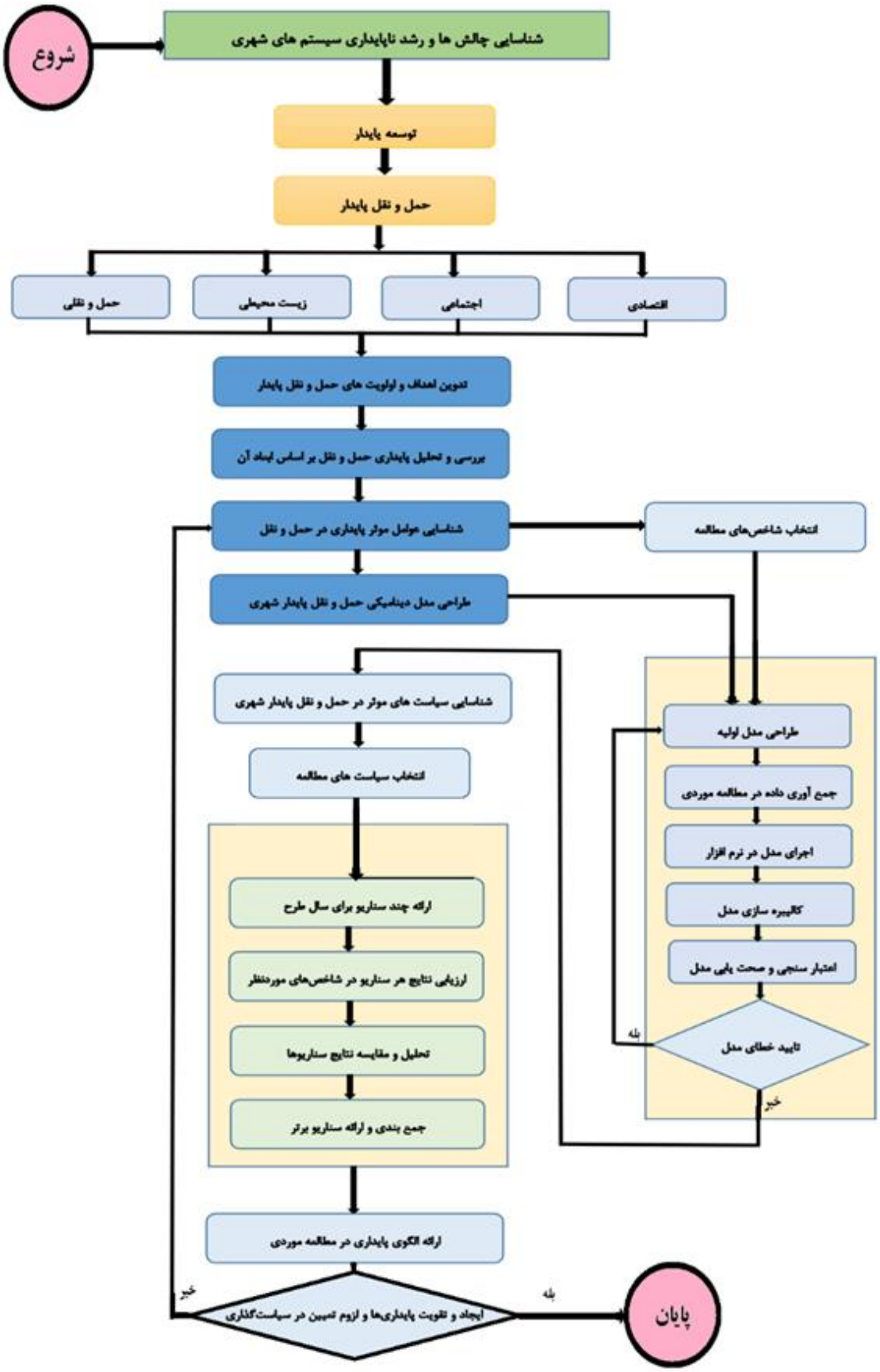
به منظور شبیه‌سازی رفتار این سیستم، ابتدا زیرسیستم‌های تاثیرگذار شناسایی می‌شوند و سپس با تعیین مرزهای سیستم، متغیرهای اصلی تاثیرگذار تعیین شده و معادلات ریاضی بر اساس داده‌های تاریخی استخراج می‌شوند. در چارچوب روابط علت و معلولی پیچیده این سیستم می‌توان تأثیر سیاست‌های مختلف قابل اجرا را بر کاهش آلودگی هوای شهر سنجید.

داده‌های موردنیاز به منظور ایجاد و شبیه‌سازی چنین سیستمی از منابع گوناگونی همچون داده‌های محیط زیستی، داده‌های ترافیکی و ... استخراج شده‌اند. درادامه، تلاش شده با تدوین شاخص‌های ارزیابی حمل‌ونقل همگانی، سیاست‌های مؤثر در بهبود پایداری سیستم در دوره بلند مدت، به‌کارگیری شوند. برای این منظور در دوره زمانی ۲۰ ساله، ١٤ سناریو برای افق ١٤١٥ در مدل اعمال و نتایج آن در ١٤ شاخص عمده کاهش آلودگی هوا ارزیابی شده‌است. درنهایت این سناریوها با استفاده از سه روش بی‌بعدسازی مورد سنجش قرار گرفته و بهترین سناریوها برای بهبود حمل‌ونقل همگانی درجهت کاهش آلودگی هوای شهر مشهد درسال ١٤١٥ معرفی شده‌است.

جدول ۱. معیارهای انتخابی جهت سنجش پایداری مدل حاضر

شماره	معیار	واحد	علامت
١	دسترسی به حمل‌ونقل همگانی	دقیقه	+
٢	سطح آلودگی صوتی در مناطق شهری	دسی‌بل	−
٣	مصرف سالیانه گازوئیل به تعداد خودرو گازوئیل سوز	لیتر به‌وسیله نقلیه	−
٤	مصرف سالیانه بنزین به تعداد خودرو بنزین سوز	لیتر به‌وسیله نقلیه	−
٥	تولید سالیانه آلاینده NOX به مساحت منطقه	کیلوگرم	−
٦	تولید سالیانه آلاینده HC به مساحت منطقه	کیلوگرم	−
٧	تولید سالیانه آلاینده CO به مساحت منطقه	کیلوگرم	−
٨	سهم حمل‌ونقل همگانی به شخصی	درصد	+
٩	سهم سفرهای صورت گرفته با اتوبوس در سفرهای روزانه	درصد	+
١٠	سهم سفرهای صورت گرفته با اتوبوس تندرو در سفرهای روزانه	درصد	+
١١	سهم سفرهای صورت گرفته با مترو در سفرهای روزانه	درصد	+
١٢	سهم سفرهای صورت گرفته با تاکسی در سفرهای روزانه	درصد	+
١٣	سهم سفرهای صورت گرفته با خودرو شخصی در سفرهای روزانه	درصد	−
١٤	سهم سفرهای صورت گرفته با دوچرخ در سفرهای روزانه	درصد	−

همانطور که در بخش قبل مرور شد، طی چند دهه اخیر، مدل‌های متعددی تلاش برای نمایش چگونگی رفتار و عملکرد سیستم‌های مختلف داشته‌اند. برحسب توفیق این مدل‌ها در میزان دقت خروجی‌ها، پیش‌بینی رویدادهای آینده و میزان جامع نگری آنها در انتخاب متغیرهای مؤثر بر سیستم توجه به استفاده از آن در سطوح مختلف بیشتر بوده‌است. در میان این مدل‌ها، مدل‌های پویایی سیستم در قیاس با سایر مدل‌ها به واسطه درنظرگیری روابط علت- معلول و بازخورد میان متغیرها و لحاظ نمودن تأخیر و یا اثرات غیریکسان پارامترها در طول زمان، روش مناسبی برای ارزیابی‌های بلندمدت قلمداد می‌شوند [Rassafi, Ostadi-Jafari and Javanshir, 2014]. عناصر تشکیل دهنده مدل پویایی سیستم شامل متغیرهای مستقل (علت)، متغیرهای وابسته (معلول) و پیکان‌های نشان‌دهنده جهت ارتباط میان علت و معلول است. ارتباط میان این متغیرها سبب تشکیل حلقه‌های بازخوردی می‌شود. حلقه‌های بازخوردی به دو دسته حلقه‌های بازخوردی مثبت و منفی تقسیم می‌شوند [Sterman, 2002]. شکل (١)، دیاگرام انجام پژوهش را نشان می‌دهد. در ادامه زیرمدل‌های مفهومی در چهار بخش اقتصادی، اجتماعی، زیست محیطی و حمل‌ونقل بیان شده است.



شکل ۱. مراحل انجام تحقیق

۳-۱ زیر مدل مفهومی اقتصادی

بهبود شبکه و سامانه‌های حمل‌ونقل شهری می‌تواند در کاهش هزینه‌های جابجایی برای تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان، بهبود سفرهای شغلی برای نیروی کار به‌صورت مستقیم و کاهش هزینه‌های تصادفات، زمان سفر و استهلاک وسایل نقلیه به‌صورت غیرمستقیم مؤثر باشد. در مدل به‌کارگیری شده، متغیرهای مستقل و وابسته در زیر مدل اقتصادی حمل‌ونقل پایداری با در نظرگیری رویکرد تفکیکی میان عرضه و تقاضای اقتصادی و تعامل دوجانبه میان آن، ارائه‌شده است. در عرضه اقتصادی، درآمدها، هزینه‌ها و بودجه دولتی، تشکیل‌دهندهٔ منابع مالی حمل‌ونقل می‌باشند. تمامی هزینه‌های صورت گرفته در دو گروه طرح‌های مطالعاتی و مدیریتی، بخش عمده‌ای از منابع مالی را به خود اختصاص داده و هزینه‌های زیست‌محیطی که به‌عنوان اثرات منفی و غیرمستقیم استفاده از سامانه حمل‌ونقل تلقی می‌شود، از بخشی از منابع مالی حمل‌ونقل که صرف تعدیل اثرات منفی می‌شود، کسر می‌گردد. این اقدام در جهت راهبرد حمل‌ونقل پایدار مبنی بر پرداخت هزینه تولید آلاینده‌های محیطی توسط نسل امروزی پیش‌بینی‌شده است. نتایج اختصاص اعتبار در بخش برنامه‌ریزی و مطالعات حمل‌ونقل، امکان سیاست‌گذاری جهت تعیین سهم مالیات و عوارض ، ونیز سوبسید و قیمت‌گذاری‌ها را فراهم کرده و با آموزش و فرهنگ‌سازی در جامعه می‌توان مصرف منابع طبیعی و سایر امکانات را بر اساس توصیه‌ها و اهداف توسعه پایدار مدیریت نمود. از سوی دیگر، بخشی از هزینه‌ها که جهت توسعه زیرساخت‌ها و گسترش سامانه‌های حمل‌ونقل صورت می‌پذیرد، اشتغال‌زایی را افزایش داده و به‌این‌ترتیب موجب رشد اقتصادی می‌گردد. با بهبود اقتصاد شهری، میزان دادوستد افزایش‌یافته و در پی آن تقاضای سفر افزایش می‌یابد. هم‌چنین، اختصاص بخش عمده‌ای از هزینه‌ها در مدیریت، نگهداری و برنامه‌ریزی سامانه حمل‌ونقل، شاخص‌های جابجایی و دسترسی را بهبود می‌بخشد.

۳-۲ زیر مدل مفهومی اجتماعی

ریشه اصلی و بنیادین چالش حمل‌ونقل به انسان وابسته بوده و لازم است موضوع حمل‌ونقل شهری از دیدگاه انسانی بالاخص در استفاده از وسیله نقلیه مورد تأمل قرار گیرد. از سوی دیگر، بهبود حمل‌ونقل در رفاه اجتماعی و برابری افراد جامعه اثر گذاشته، به‌طوری‌که حمل‌ونقل بخشی از زندگی و تأمین نیازهای روزمره می‌باشد. اساسی‌ترین محورهای عرضه اجتماع، متغیرهای جمعیت و کاربری زمین می‌باشند در بخش جمعیت، آمارگیری نفوس در سال مبنا در مناطق شهری صورت می‌پذیرید و پس‌ازآن نرخ متولدین، نرخ مرگ‌ومیر و مهاجرت جمعیت، برافزایش یا کاهش آن در سال‌های آتی تأثیرگذار است. فرم و ساختار توسعه شهری تعیین‌کننده الگوی کاربری زمین قلمداد می‌شود. مطابق با این الگو، پارامترهای کاربری زمین شامل مساحت پارک و فضای سبز، اماکن اقامتی و تفریحی، قرارگیری یا عدم قرارگیری و فاصله تا مرکز شهر بوده که به‌طور مستقیم بر میزان تقاضای سفر تأثیرگذار است. هم‌چنین انتخاب محل سکونت به‌عنوان یک عامل تأثیرگذار از الگوی کاربری زمین، به نسبت قیمت زمین و درآمد به‌دست‌آمده بر تقاضای سفر اثر می‌گذارد.

۳-۳ زیر مدل مفهومی حمل‌ونقل

در بخش تسهیلات حمل‌ونقل؛ عرضه حمل‌ونقل همگانی، پارکینگ، شبکه معابر و تجهیزات ایمنی موردتوجه قرار می‌گیرد. در این میان، فاکتورهای بخش عرضه حمل‌ونقل همگانی شامل تعداد خطوط، ایستگاه‌ها، وسایل نقلیه و کیفیت آن، شاخص‌های مناسبی برای ارزیابی سطح پوشش دهی و دسترسی کاربران به ناوگان حمل‌ونقل همگانی قلمداد می‌گردد. هم‌چنین نحوه قیمت‌گذاری و تعیین سیاست‌های مالی بر مدیریت سامانه‌های حمل‌ونقل بسیار تأثیرگذار است. در بخش توزیع سفر از روابط گرانش بهره گرفته‌شده و فاکتورهای زمان بین مناطق و شرایط اقتصادی و اجتماعی لحاظ گردیده است. یکی از اساسی‌ترین، مطلوبیت‌های پویایی سیستم، به‌کارگیری آن در بخش تفکیک سفر است.

در این بخش، ابتدا سفرهای صورت گرفته توسط گروه‌های دارای وسیله نقلیه و کسانی که وسیله نقلیه در اختیار ندارند، تفکیک‌شده‌اند. سپس با استفاده از توابع «زمان، هزینه و دسترسی» به‌عنوان مطلوبیت‌های سفر، سهم سفرهای انجام‌شده با وسایل نقلیه همگانی و شخصی مشخص‌شده است. مدل پویایی سیستم قادر است تغییرات صورت گرفته این توابع را در طول زمان اندازه‌گیری کرده و میزان تأثیرات آن‌ها را در تفکیک سفر لحاظ نماید.

۳-٤ زیر مدل مفهومی زیست محیطی

در بخش زیست محیطی، عوامل تأثیرگذاری از قابیل ناوگان وسایل نقلیه، کاربری زمین، منابع سوخت و انرژی و قوانین و دستورالعمل‌های زیست‌محیطی لحاظ شده است. وضعیت تولید انرژی و سهم منابع تجدید ناپذیر در حمل‌ونقل، تحت تأثیرِ قوانین و دستورالعمل‌ها و میزان توجه دولت‌ها به سبد تولید انرژی و میزان سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین می‌باشد.

ناوگان وسایل نقلیه ارتباط مستقیم با میزان مصرف سوخت و تولید آلاینده‌های هوا دارد. قوانین موجود و فاکتورهایی از قبیل بهای سوخت، مالیات و متوسط عمر وسایل نقلیه از زیر مدل‌های اقتصادی بر تعداد ناوگان وسایل نقلیه تأثیرگذار است. هم‌چنین وضعیت اقتصادی افراد جامعه و سرانه مالیکت وسیله نقلیه نیز بر میزان تولید و عرضه خودروهای با سوخت تجدید ناپذیر و پاک مؤثر می‌باشد.

٤. ساخت مدل

در این بخش، چهار زیر مدل فوق تجمیع گردیده و با به‌کارگیری دیاگرام‌های علّت – معلول، ارتباط میان مؤلفه‌های مدل نمایش داده‌شده است. با ترسیم مدل مفهومی حمل‌ونقل پایدار شهری، درواقع مهم‌ترین متغیر اثرگذار و اثرپذیری از حمل‌ونقل بر حوزه‌های اقتصاد، محیط‌زیست و اجتماع انتخاب گردیده است. براین اساس، نمودار جریان بر مبنای ساختار علّی سببی تولید و ترسیم‌شده است. در ادامه به بیان چند نمونه از آن پرداخته‌شده است.

جمعیت(+) ← سرانه وسیله نقلیه(–) ← تمایل سفر به‌وسیله نقلیه شخصی(–) ← تقاضای حمل‌ونقل غیر موتوری(+) ← سلامتی شهروندان(+) ← نرخ مرگ‌ومیر(–) ← جمعیت(+)

جمعیت(+) ← سرانه مالکیت نقلیه(–) ← تمایل سفر به‌وسیله نقلیه شخصی(–) ← تقاضای حمل‌ونقل غیر موتوری(+) ← حجم ترافیک(+) ← تراکم ترافیک(+) ← متوسط سرعت(–) ← زمان سفر(+) ← مصرف سوخت(+) ← تولید آلاینده‌های هوا(+) ← سلامتی شهروندان (–) ← نرخ مرگ‌ومیر(+)← جمعیت(–)

تقاضای سفر با حمل‌ونقل همگانی (+) ← درآمد حمل‌ونقل همگانی(+) ← درآمد حمل‌ونقل(+) ← منابع مالی حمل‌ونقل(+) ← بهبود حمل‌ونقل همگانی(+) ← تقاضای سفر با حمل‌ونقل همگانی (+)

حلقه‌های (۱) و(٤) حلقه‌های با قطبیعت مثبت و سایر و حلقه‌ها دارای قطبیعت منفی می‌باشند.

لازم به ذکر است برای رعایت اختصار در شکل صرفاً جزئیات مد مترو در نمودار ارائه شده که برای سایر شیوه ها نیز این جزئیات در نظر گرفته شده است.

در مرحله بعد، روابط ریاضی میان متغیرها در نمودار جریان مشخص‌شده است. به این منظور، با به‌کارگیری نرم‌افزار پویایی سیستم ونسیم زیر مدل‌های اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و حمل‌ونقل مدل گردیده است. در محیط نرم‌افزار پویایی سیستم ونسیم متغیرها به ۵ دسته متغیرهای حالت، نرخ، ثابت، کمکی و خارجی (برون‌زا) تقسیم‌بندی می‌شود. متغیر حالت نشان‌دهنده مقدار سطح متغیر در طول زمان و تغییر افزایشی یا کاهشی توسط متغیر نرخ است که در نهایت رفتار پویایی سیستم را در طول زمان مشخص می‌کند. متغیر ثابت در طول زمان تغییر پیدا نخواهد کرد و متغیر خارجی به‌صورت مستقل عمل نموده و تحت تأثیر تغییرات متغیرهای درون مدل نمی‌باشد. مقادیر جدید متغیر حالت بر اساس تغییرات افزایشی یا کاهشی در دوره آینده به دست می‌آیند. این موضوع در رابطه (۱) نمایش داده‌شده است

Meadows & Wright, 2008; Pfaffenbichler]
2003]:

$$Z_K = Z_J + (Z_{R.JK} - A_{R.JK})(D_T) \qquad (۱)$$

در این رابطه متغیر Zk مقدار جدید متغیر سطح Z در زمان K، ZJ: متغیر سطح Z در زمان J (واحد)، ZR: نرخ جریان ورودی، AR: نرخ جزیان خروجی، DT: فاصله زمانی میان J و K، K و J: زمان حقیقی و قبلی هستند.

٤-١ بخش اقتصادی مدل پویایی سیستم

در این بخش، متغیرهای منابع حمل‌ونقل، سرمایه توسعه سامانه‌های هوشمند، عرضه پارکینگ غیر حاشیه‌ای و تعداد تاکسی‌های دولتی و خصوصی به‌صورت متغیر حالت در نظر گرفته‌شده‌اند. در زمینه منابع مالی حمل‌ونقل، متغیرهای درآمد و بودجه ثابت دولتی به‌عنوان نرخ ورودی و متغیرهای هزینه و میزان سرمایه‌گذاری در بخش محیط‌زیست نرخ خروجی معرفی‌شده است.

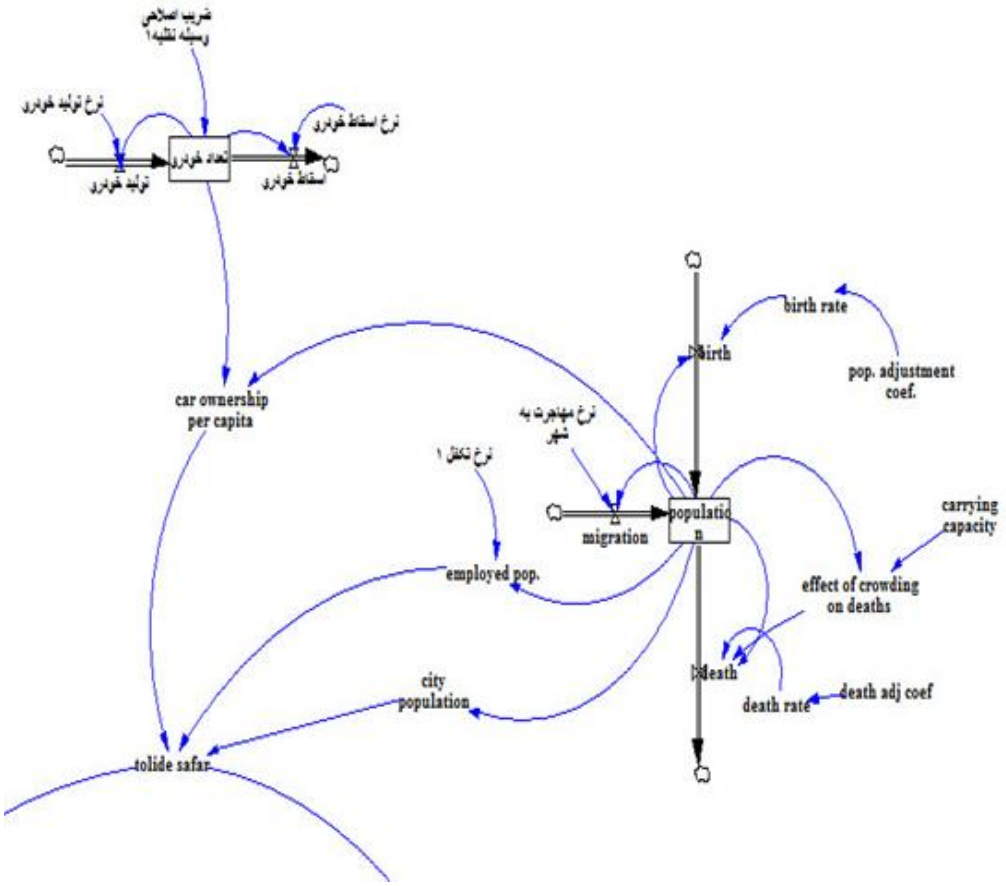
درآمدهای حمل‌ونقل شامل درآمد حمل‌ونقل همگانی (مترو،اتوبوس تندرو، اتوبوسرانی و تاکسیرانی)، پارکینگ حاشیه‌ای و غیر حاشیه‌ای و دریافت مالیات و عوارض و هزینه‌های مستقیم سرمایه‌گذاری شده در بخش حمل‌ونقل در زیر بخش‌های بهبود ناوگان حمل‌ونقل همگانی، ساخت معابر، سرمایه توسعه سامانه‌های هوشمند، ساخت پارکینگ، مطالعات و برنامه‌ریزی و هزینه نیروی انسانی است. هم‌چنین، فرض شده است که سرمایه‌گذاری در بخش محیط‌زیست به توسعه حمل‌ونقل غیر موتوری و انرژی‌های تجدید ناپذیر پرداخته شود. با محاسبه خسارت وارده بر محیط‌زیست و تفاضل میزان سرمایه‌گذاری جهت کاهش پیامدهای منفی بر روی محیط‌زیست، خسارات جبران نشده ناشی از حمل‌ونقل محاسبه خواهد شد. این خسارات مجموعه‌ای از آلاینده‌های هوا، صوت، آب و تولید زباله در هر یک از وسایل نقلیه بوده که در جدول (۲) هزینه هرکدام به‌ازای یک کیلومتر- وسیله نقلیه آورده شده است.

٤-٢ بخش زیست‌محیطی مدل پویایی سیستم

با محاسبه و تقاضای روزانه سفر به تفکیک وسایل نقلیه و در اختیار داشتن متوسط سرعت وسایل نقلیه، حجم روزانه ترافیک در شبکه شهری محاسبه می‌شود از تقسیم ظرفیت معابر به حجم کل ترافیک، میانگین تراکم ترافیک در مناطق شهر به دست خواهد آمد. هم‌چنین، زمان تأخیر به دست آمده در این بخش از مدل، تأثیر مستقیم بر روی مصرف سوخت وسایل نقلیه خواهد گذارد [Pataki et al., 2009]. خروجی‌های زیر مدل زیست‌محیطی، شامل مصرف سوخت وسایل نقلیه بنزین سوز و گازسوز، آلودگی صوتی وسایل نقلیه سبک و سنگین و تولید آلاینده‌های هوا توسط اتوبوس، تاکسی، وسیله نقلیه شخصی و دوچرخ است. در این میان، متغیرهای سرعت و تراکم ترافیک به علت تأثیر مستقیم بر روی این موارد آورده شده است.

٤-٣ بخش اجتماعی مدل پویایی سیستم

متغیرهای به‌کاررفته در بخش اجتماعی دارای ماهیت جمعیتی، فرهنگی و سایر خصوصیات مرتبط با ساختار شهری است. با توجه به ارتباط متغیرهای به‌کاررفته در این بخش با تولید، جذب و توزیع سفر از زیر مدل‌ها حمل‌ونقلی این مطالعه و به دلیل ایجاد پیوستگی در مدل ایجاد سفر، درواقع این دو بخش با یکدیگر تلفیق گردیده‌اند. در شکل (۲) زیر مدل اقتصادی مدل سیستم پویایی نمایش داده‌شده است.



شکل ۲. زیر مدل ایجاد سفر در مدل سیستم پویایی

٤-٤ بخش حمل‌ونقلی مدل پویایی سیستم

جهت مدل‌سازی فرایند تصمیم‌گیری از مدل ایجاد سفر از اطلاعات طرح جامع حمل و نقل شهری استفاده شده است. [آمارنامه شهری مشهد،۱۳۹۲] مرحله بعد از پیش‌بینی سفرهای آینده، تعیین درصد استفاده‌کنندگان از هر یک از انواع وسایل نقلیه موجود است. در انجام سفر، مسافرین از میان گزینه‌های موجود، با توجه به شرایط اقتصادی و اجتماعی، نوع سرویس ارائه‌شده و مطلوبیت نسبی آن‌ها نسبت به یکدیگر، یکی از طرق وسیله نقلیه شخصی، حمل‌ونقل همگانی، دوچرخه‌سواری و یا پیاده‌روی را انتخاب می‌نماید. با توجه به نتایج مطالعات «تحلیل نتایج آمارگیری مبدا-مقصد ساکنین شهر مشهد»، [مطالعات جامع حمل و نقل مشهد، ۱۳۸۹] این انتخاب فرایند پیچیده‌ای است که وابسته به خصوصیات و نوع سفر، خصوصیات سفر کننده و خصوصیات مربوط به تسهیلات حمل‌ونقل همگانی می‌باشد. خصوصیات و نوع سفر شامل عواملی از قبیل اهداف سفر و ساعتی که سفر در آن انجام می‌گیرد، است. مطابق با رویکرد این مقاله و ابعاد موضوع پایداری، مجموع اهداف سفر و مجموع تعداد سفرهای روزانه (در یک سال) بین مبادی و مقاصد مختلف در نظر گرفته‌شده است. بنابراین خصوصیات و نوع سفر در مرحله تفکیک سفر مدل پویای حمل‌ونقل پایداری شهری تأثیرگذار نیست. عامل خصوصیات سفرکننده به معنای مالکیت یا دسترسی به وسایل شخصی، است. هم‌چنین خصوصیات مربوط به تسهیلات حمل‌ونقل شهری به دودسته، عوامل کمی، شامل هزینه‌های سفر و زمان سفر و عوامل کیفی شامل راحتی، ایمنی، قابلیت اعتماد، نظم خدمات‌دهی و غیره تقسیم‌بندی شده است.

در مرحله تفکیک سفر، ابتدا تقاضای سفر با وسیله نقلیه موتوری و حمل‌ونقل غیر موتوری از یکدیگر تفکیک‌شده است. تقاضای

سفر با حمل‌ونقل غیر موتوری شامل شیوه‌های پیاده‌روی و دوچرخه‌سواری بوده و تفاضل این مقدار از کل سفرهای صورت گرفته تقاضای سفر با وسایل نقلیه موتوری را نتیجه می‌دهد. در ادامه بر اساس خصوصیات سفر کننده، استفاده‌کنندگان وسایل نقلیه موتوری به دودسته کسانی که وسیله نقلیه شخصی در اختیاردارند و کسانی که وسیله نقلیه شخصی (اتومبیل یا موتورسیکلت) در دسترس ندارند، از یکدیگر مجزا گردیده است. علت این موضوع، افزایش دقت در تغییر شاخص‌ها و مطلوبیت سفر با تغییر در سیاست‌های پیش‌بینی‌شده برای گروه‌های مختلف مسافران است.

شیوه‌های حمل‌ونقل موردنظر به دودسته حمل‌ونقل همگانی شامل اتوبوس، تاکسی، مترو و بی آرتی و حمل نقل شخصی شامل اتومبیل شخصی و موتورسیکلت تقسیم‌بندی شده است. مطلوبیت استفاده هر یک از این شیوه‌ها تقاضای سفر با شیوه مورد نظر را ایجاد می‌نماید. عوامل مؤثر در تمایل سفر با وسایل نقلیه شامل فاکتور زمان سفر، هزینه سفر و کیفیت وسایل نقلیه هستند. تمایل سفر با وسیله نقلیه x از مجموع حاصل‌ضرب فاکتورهای مطلوبیت در وزن نسبی آنان به دست می‌آید. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته با استفاده از روش نظرسنجی از افراد خبره و کارشناس وزن فاکتورهای زمان سفر، هزینه سفر و کیفیت وسیله نقلیه تعیین‌شده است، شیوه کار به این صورت بود که طبق جدولی به تفکیک گروه‌های سنی بر اساس نظر کارشناسان شرکت‌کننده در نظرسنجی به هریک از فاکتورهای زمان، هزینه و کیفیت در انتخاب وسیله نقلیه به ترتیب اولویت از خیلی زیاد تا خیلی کم نمرات ۵ تا ۱ داده‌شده و سپس با توجه به پراکندگی جمعیت گروهای سنی موردنظر طبق گزارشات مطالعات جامع حمل نقل در شهر موردمطالعه مقایسه وزنی بین فاکتورها انجام‌شده و درنهایت وزن فاکتورهای زمان سفر، هزینه سفر و کیفیت وسیله نقلیه طبق جدول (۲) به دست آمد.

جدول ۲. محاسبه وزن فاکتورهای زمان سفر، هزینه سفر و کیفیت وسیله نقلیه

گروه سنی	فراوانی	زمان سفر		کیفیت و راحتی وسیله نقلیه		هزینه	
	جمعیت	امتیاز نظرسنجی	وزن	امتیاز نظرسنجی	وزن	امتیاز نظرسنجی	وزن
زیر ۲۰ سال	۱٦۸٥۸۹۸	٤,٥	۷٥۸٦٥٤۱	٥	۸٤۲۹٤۹۰	۳	٥۰٥۷٦۹٤
۲۰ تا ۳۰ سال	۱۹٤٥۷۱۳	٥	۹۷۲۸٥٦٥	۳	٥۸۳۷۱۳۹	٤	۷۷۸۲۸٥۲
۳۰ تا ٤۰ سال	۱۳٤٥٦٦۰	٥	٦۷۲۸۳۰۰	۳	٤۰۳٦۹۸۰	۳	٤۰۳٦۹۸۰
٤۰ تا ٥۰ سال	۱۱٤٥۸٥۹	٤,٥	٥۱٥٦۳٦٦	٤	٤٥۸۳٤۳٦	۳	۳٤۳۷٥۷۷
بیشتر از ٥۰ سال	۸۲٦۱۹۷	۳	۲٤۷۸٥۹۱	٥	٤۱۳۰۹۸٥	٤	۳۳۰٤۷۸۸
متوسط وزنی		٤,٥٥۸		۳,۸۸۷		۳,۳۹۸	
درصد از کل (وزن فاکتور)		۰,۳۸٤		۰,۳۲۸		۰,۲۸٦	

٤-٥ اطلاعات مربوط به مدل

در بخش اقتصادی بر اساس بررسی‌های صورت گرفته متوسط سرعت آزاد حرکت وسایل نقلیه در مناطق ۵ گانه مشهد برابر ۵۰/۱ کیلومتر بر ساعت اعلام گردیده هم‌چنین ارزش متوسط ساعتی شهروندان با فرض ارزش تولید ناخالص داخلی در حدود ۲۲۰ دلار بر نفر در ماه مقداری برابر ۱۲۵۰۰ ریال در سال ۱۳۸٦ در نظر گرفته می‌شود [مطالعات جامع حمل و نقل ترافیک مشهد، ۱۳۸۹].

در سال ۹۲ بر اساس آمارنامه حمل‌ونقل و ترافیک شهرداری مشهد کل فضای پارک حاشیه‌ای برابر ۹۰۷٤ و غیر حاشیه‌ای برابر ٤٤۲۷ عدد است. با در نظر گرفتن هزینه ۱٤/۷٥ میلیون ریال برای ساخت یک واحد پارکینگ غیرحاشیه‌ای در سال ۱۳۹۰ و میزان بودجه تخصیص‌یافته به ساخت پارکینگ در مناطق، تعداد فضای پارک غیرحاشیه‌ای قابل ساخت در هرسال به دست

می‌آید. هم‌چنین هزینه پارک ساعتی غیر حاشیه‌ای در سال ۹۲ برای وسایل نقلیه شخصی و موتورسیکلت به ترتیب ۵۰۰۰ و ۲۰۰۰ ریال در نظر گرفته‌شده است. سایر هزینه‌های سفر با وسیله نقلیه به ازای یک کیلومتر وسیله‌نقلیه در سال ۱۳۹۲ در جدول (۳) نمایش داده‌شده است. به دلیل عدم ثابت بودن هزینه‌های حمل‌ونقل و زیست‌محیطی در طول زمان، متغیر نرخ تورم سالیانه به‌صورت یک تابع مراجعه‌ای در مدل لحاظ گردیده و با توجه به نرخ تورم سالانه براساس گزارش بانک مرکزی از سال ۱۳۷۳ تا ۱۳۹۵ وارد مدل گردیده است. در اطلاعات مربوط به بخش زیست‌محیطی نیز میزان آلاینده‌های شهر CO و HC (که رابطه مستقیم با سرعت وسیله نقلیه دارند) در سال ۸۵ نسبت به ۱۳۸۰ به ترتیب دارای رشد ۵۷ و ۳۳ درصدی بوده که این مسئله می‌تواند دلیل برافزایش تراکم ترافیک و شرایط ناسالم وضعیت هوا در شهر مشهد باشد.

۵. نتایج و بحث

در مطالعه حاضر، شهر مشهد به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب گردیده و سنجش و ارزیابی سیاست‌های مدیریتی بر روی شاخص‌های پایداری این شهر صورت می‌پذیرد. شهر مشهد دومین کلان‌شهر بزرگ ایران است و جمعیت آن بر اساس سرشماری صورت گرفته در سال ۹۰ برابر ۲/۹۳۳/۰۰۰ نفر می‌باشد، [نهمین آمارنامه حمل و نقل مشهد،۱۳۹۲] و سالانه بیش از ۱۲ میلیون نفر زائر به این شهر تردد می‌نمایند[مطالعات جامع حمل و نقل و ترافیک شهر مشهد،۱۳۹۳] که نیاز به ارتقاء سیستم و بهبود کیفیت حمل‌ونقل همگانی از ضروریات مبرم این شهر محسوب می‌شود و می‌تواند الگوی مناسبی برای تعمیم نتایج در سایر شهرهای کشور باشد. سیاست‌های موردنظر این مطالعه در سه گروه قیمت‌گذاری، تخصیص بودجه، نوسازی ناوگان تدوین گردیده و در جدول (٤) نمایش داده‌شده و در ١٤ شاخص انتخابی براساس سه روش طبق روابط ۲،۳ و ٤ بی‌بعد سازی و ارزیابی می‌گردند. در سناریوهای به‌کاررفته این مطالعه تنها مقادیر یکی از سیاست‌ها تغییریافته و ارزیابی‌شده‌اند به‌طوری‌که تغییر شاخص‌های ارزیابی نسبت به تغیر هرکدام از سیاست‌ها بررسی‌شده است. برای هر سیاست با توجه به مقادیر اولیه سه مقدار متغیر دیگر تعریف‌شده است، که در جدول (٤) قابل مشاهده است.

$$I_d = \frac{\sum \frac{I_{nr}}{I_{ni}}}{m} \quad (۲)$$

$$I_d = \frac{I_{nr}}{I_{ni}} \quad (۳)$$

$$I_d = \frac{\sum I_n - I_{n-1}}{m} \quad (٤)$$

I_d: شاخص مقایسه I_{nr}: مقدار اولیه شاخص در سال n ام، I_{ni}: مقدار شاخص در سال n ام تحت سناریو I، I_{n-1}: مقدار شاخص در سال n-1 ام، m: دوره ارزیابی (در این مطالعه ۲۰سال) در رابطه (۲) برای شاخص‌های مثبت نسبت عدد هرسال به مقدار اولیه خود محاسبه‌شده و بی بعد گشته‌اند، و در شاخص‌های منفی این نسبت به‌صورت معکوس انجام‌شده و مقدار اولیه هرسال برمقدار آن سال برای هر سناریو بخش شده است. سپس میانگین این اعدادِ بی بعد بین سال‌های ۹۰ تا ١٤١٥ برای هر سناریو مشخص‌شده و در مرحله بعد میانگین تمامی شاخص‌ها برای بررسی پایداری سیستم نسبت به هر سناریو محاسبه گردیده‌است.

جدول ۳. محاسبه هزینه‌های واحد سفر با وسیله نقلیه در سال ۹۲

وسیله نقلیه	زیرگروه هزینه	فرایند محاسبه (وسیله نقلیه کیلومتر)	مقدار اولیه
اتومبیل شخصی	هزینه سوخت	با فرض مصرف ۸ لیتر بر ۱۰۰ کیلومتر و هزینه سوخت ۱۰۰۰۰ ریال	۸۰۰
	هزینه پارک	هزینه ساعتی پارک غیر حاشیه‌ای در پارکینگ‌های طبقاتی و روباز به‌طور متوسط ۵۰۰۰ و ۲۰۰۰ ریال	۲۵۰۰
	عوارض طرح ترافیک	عوارض مصوب روزانه در سال ۸۷ و ۱۳۸۸	۲۵۰۰
	هزینه سرمایه‌ای	هزینه اولیه ۱۰۰/۰۰۰/۰۰۰ ریال و متوسط کارکرد ۱۲۰۰۰ کیلومتر	۹۰۰

وسیله نقلیه	زیرگروه هزینه	فرایند محاسبه (وسیله نقلیه کیلومتر)	مقدار اولیه
	تعمیر و نگهداری و بیمه	با فرض تعمیر ۱۰/۰۰۰/۰۰۰ ریال در سال و کارکرد ۱۲۰۰۰ کیلومتر در سال و هزینه بیمه سالانه به ازای خودرو در کیلومتر ۶۰۰ ریال	۱۰۰۰
اتوبوس	بلیط	قیمت بلیط در شهر مشهد	۳۰۰۰
اتوبوس تندرو	بلیط	قیمت بلیط در شهر مشهد	۶۰۰۰
مترو	بلیط	قیمت بلیط در شهر مشهد	۵۵۰۰

در رابطه (۳)، میانگین اعداد بی بعد از شاخص‌های ارزیابی تنها برای سال هدف یعنی سال ۱۴۱۵ نسبت به سناریوها محاسبه‌شده و با یکدیگر مقایسه گشته‌اند که این تحلیل نشان می‌دهد کدام‌یک از سناریوها پایداری بیشتر حمل‌ونقل شهر مشهد در پایان ۲۰ سال دوره برنامه‌ریزی را نتیجه می‌دهد.

در رابطه (۴) تفاضل مقادیر هرسال با سال بعد برای شاخص‌ها در هرکدام از سناریوها محاسبه‌شده و سپس نسبت به تفاضل همان دو سال پیاپی با مقدار اولیه شاخص‌ها مانند روش اول بی‌بعد شده و میانگین کل شاخص‌ها پس از اجرای تمامی سناریوها گردآوری‌شده‌اند. سه سناریو، با شرایط بدون بعد سازی متوسط مقادیر شاخص‌ها درتمامی سال‌های مطالعه، در سال افق طرح و متوسط تفاضل مقادیر شاخص‌ها درتمامی سال‌های مطالعه مقایسه شدند. جدول (۵) نتایج کمی مدل و مقادیر اعداد حاصل از متغییر های وابسته با روش بدون بعدسازی متوسط مقادیر شاخص‌ها درتمامی سال‌های مطالعه طبق رابطه ۲ و مقایسه سناریوها، را نشان می‌دهد. مقادیر حاصل از روابط (۳) و (۴) نیز محاسبه و با مقایسه تمام سیاست‌ها در هرسه روش شش سیاست برتر برای مقایسه وزنی انتخاب و در جدول (۶) گردآوری شده‌اند، به اینصورت که سناریوهایی که در مجموع هرسه روش پس از نمره‌دهی بیشتر از بقیه مسلط شده‌اند به صورت بسته پیشنهادی سیاست گذاری برای دست‌یابی به پایداری حمل‌و نقل همگانی در سال افق طرح ارائه می‌شوند که می‌توانند به‌عنوان مبنای برنامه‌ریزی مدیران در آینده قرار بگیرند.

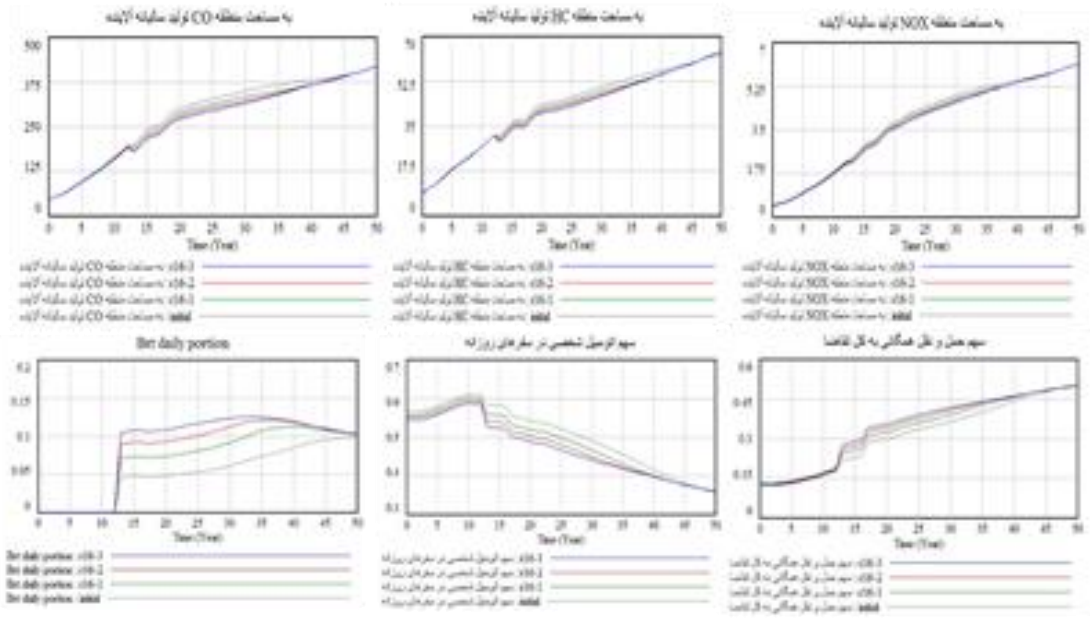
در شکل (۳) و شکل (۴) نمودارهای خروجی شاخص‌ها تحت سیاست‌های به ترتیب، ارتقاء کیفیت بی‌آرتی و ارتقاء کیفیت اتوبوس دیده می شود. در این شکل‌ها سال صفر به‌عنوان سال پایه طرح (۱۳۷۳)، سال ۲۲ به‌عنوان سال مبنای برنامه‌ریزی (۱۳۹۵) و سال ۴۲ به‌عنوان سال افق طرح (۱۴۱۵) مشخص است هم‌چنین این شکل‌ها تا سال ۱۴۲۳ روند افزایشی یا کاهشی شاخص‌ها را جهت رویت اثرات سناریوها نمایش داده است. در این شکل‌ها "initial" مقدار اولیه شاخص و r1,r2,r3 مقادیر شاخص برای اجرای حالت اول و دوم و سوم هر سیاست را نشان می‌دهند.

جدول ٤. سیاست‌ها و سناریوهای به کار رفته در مطالعه حاضر

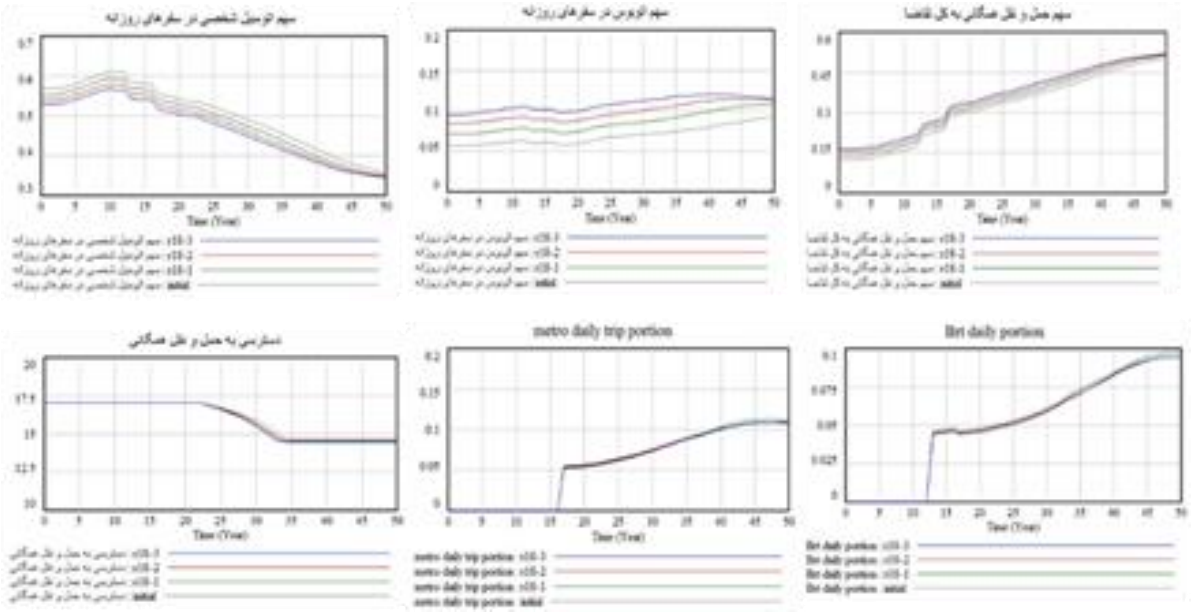
نوع (الگو)	سیاست	شماره	متغیر انتخابی	واحد	وضع موجود	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم
سیاست‌های تنبیهی یا دفعی	قیمت گذاری	۱	قیمت بلیط اتوبوس	ریال	۳۰۰۰	٤۰۰۰	۵۰۰۰	٦۰۰۰
		۲	قیمت بلیط اتوبوس تندرو	ریال	٦۰۰۰	۸۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۲۰۰۰
		۳	قیمت بلیط مترو	ریال	۵۰۰۰	۷۰۰۰	۹۰۰۰	۱۱۰۰۰
		٤	ضریب افزایش یا کاهش قیمت تاکسی	-	۱	۱,۱	۱,۲	۱,۳
		۵	هزینه سوخت اتومبیل شخصی و دوچرخ	ریال	۸۰۰	۱۰۰۰	۱۳۰۰	۱٦۰۰
		٦	هزینه روزانه ورود به طرح ترافیک	ریال	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰	٤۰۰۰۰	۵۰۰۰۰

نوع (الگو)	سیاست	شماره	متغیر انتخابی	واحد	وضع موجود	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم
	تخصیص بودجه	۷	درصد تخصیص بودجه به بهبود ناوگان حمل و نقل همگانی	درصد	۰,۳	۰,۱	۰,۵	۰,۷
			توسعه معابر	درصد	۰,٤	۰,۵	۰,۳	۰,۱
			احداث پارکینگ	درصد	۰,۱۸	۰,۲۳	۰,۱۳	۰,۱۳
			نیروی انسانی	درصد	۰,۰۵	۰,۱	۰,۰۲۵	۰,۰۲۵
			مطالعات	درصد	۰,۰۵	۰,۱	۰,۵	۰,۷
		۸	درصد تخصیص بودجه به افزایش طول شبکه مترو	درصد	۰,۳	۰,۲	۰,٤	۰,۵
			درصد تخصیص بودجه به افزایش طول شبکه اتوبوس تندرو	درصد	۰,۲	۰,۱	۰,۳	۰,٤
			ساخت ایستگاه	درصد	۰,۰۵	۰,۰۵	۰,۰۵	۰,۰۲۵
			خرید اتوبوس	درصد	۰,٤	۰,٦	۰,۲	۰,۰۵
			احداث مسیر ویژه	درصد	۰,۰۵	۰,۰۵	۰,۰۵	۰,۰۲۵
سیاست‌های تشویقی یا جذبی	نوسازی ناوگان	۹	درصد تخصیص بودجه به توسعه حمل و نقل غیر موتوری	درصد	۰,۳	۰,٤	۰,۵	۰,۷
		۱۰	نرخ اسقاط اتوبوس	درصد	۰,۰۵	۰,۰۷	۰,۰۹	۰,۱۱
		۱۱	افزایش کیفیت اتوبوس تندرو	-	۱,۷۵	٤	٦	۸
		۱۲	افزایش کیفیت تاکسی	-	۱	۳	۵	۷
		۱۳	افزایش کیفیت اتوبوس	-	۱,۵	۳	٤,۵	٦
		۱٤	افزایش کیفیت مترو	-	۲	٤	٦	۸

مطابق نمودارهای خروجی از مدل تحت سیاست‌های ارتقای کیفیت اتوبوس و اتوبوس تندرو (BRT) ملاحظه می‌شود پاسخ شاخص‌ها به تغییرات مناسب بوده و هرچه کیفیت و تسهیلات افزایش می‌یابد شاخص‌های پایداری، بهبود می یابند. بدین معنی که با افزایش نسبت سفرهای روزانه با اتوبوس تندرو در کل سفرها، سهم حمل و نقل همگانی از تولید سفر بیشتر شده و خودروهای شخصی در سفرهای روزانه کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند و در نتیجه مصرف سالیانه سوخت کاهش یافته و تولید آلاینده های CO و HC نیز کاهش می یابد.



شکل ۳. نمودارهای خروجی شاخص‌ها تحت سیاست ارتقاء کیفیت بی‌آرتی



شکل ٤. نمودارهای خروجی شاخص‌ها تحت سیاست ارتقاء کیفیت اتوبوس

جدول ۵. روش اول مقایسه سناریوها، بدون بعد سازی متوسط مقادیر شاخص‌ها درتمامی سال‌های مطالعه

شماره	متغیر انتخابی	سناریو اول	سناریو دوم	سناریو سوم	بیشینه
۱	قیمت بلیط اتوبوس	۱,۰۰۱۲	۱,۰۰۳۰	۰,۹۸۳۲	۱,۰۰۳۰
۲	قیمت بلیط اتوبوس تندرو	۰,۹۹۲۹	۰,۹۸۸۵	۰,۹۸۵۵	۰,۹۹۲۹
۳	قیمت بلیط مترو	۰,۹۹۱۵	۰,۹۸٦۵	۰,۹۸۳۲	۰,۹۹۱۵
٤	ضریب افزایش یا کاهش قیمت تاکسی	۰,۹۹۹۲	۰,۹۹۸٦	۰,۹۹۸۰	۰,۹۹۹۲
۵	هزینه سوخت اتومبیل شخصی و دوچرخ	۱,۰۰٦۸	۱,۰۱٤۹	۱,۰۲۲۳	۱,۰۲۲۳

شماره	متغیر انتخابی	سناریو اول	سناریو دوم	سناریو سوم	بیشینه
٦	هزینه روزانه ورود به طرح ترافیک	۱,۰۰۲	۱,۰۰٤٤	۱,۰۰۵۵	۱,۰۰۵۵
۷	درصد تخصیص بودجه به بهبود ناوگان حمل و نقل همگانی توسعه معابر احداث پارکینگ نیروی انسانی مطالعات	۰,۹٦٦۰	۱,۰۲۰۹	۱,۰۳۵۷	۱,۰۳۵۷
۸	درصد تخصیص بودجه به افزایش طول شبکه مترو درصد تخصیص بودجه به افزایش طول شبکه اتوبوس تندرو ساخت ایستگاه خرید اتوبوس احداث مسیر ویژه	۰,۹۹۸٦	۱,۰۰۰۳	۰,۹۹٦۷	۱,۰۰۰۳
۹	درصد تخصیص بودجه به توسعه حمل و نقل غیر موتوری	۱,۰۰۰٦	۱,۰۰۱۰	۱,۰۰۱۸	۱,۰۰۱۸
۱۰	نرخ اسقاط اتوبوس	۰,۹۹۹۹	۰,۹۹۹۸	۰,۹۹۹۷	۰,۹۹۹۹
۱۱	افزایش کیفیت اتوبوس تندرو	۱,۰٤۳٦	۱,۰٦۹۷	۱,۰۸٦۹	۱,۰۸٦۹
۱۲	افزایش کیفیت تاکسی	۱,۰۱۵٦	۱,۰۲۷۹	۱,۰۳۷۳	۱,۰۳۷۳
۱۳	افزایش کیفیت اتوبوس	۱,۰۲۷۷	۱,۰۵۰٤	۱,۰٦۹۷	۱,۰٦۹۷
۱٤	افزایش کیفیت مترو	۱,۰۱۱۱	۱,۰۱۱۰	۱,۰۱۱۱	۱,۰۱۱۱

جدول ٦. بسته پیشنهادی سیاست گذاری برای دست‌یابی به پایداری حمل‌و نقل همگانی در سال افق طرح

امتیاز اکتسابی سناریو	سناریو برتر
۱٤	افزایش کیفیت مترو
۱۲	افزایش کیفیت اتوبوس تندرو
۱۰	افزایش کیفیت اتوبوس
۱۰	افزایش کیفیت تاکسی

٦. جمع بندی

درپژوهش حاضر ضمن ایجاد یک مدل حمل‌ونقل پایدار شهری با تمرکز بر شاخص‌های حمل‌ونقل همگانی و نیز گسترش مدل نسبت به مطالعات پیشین در سطح جهانی، متغیرهای جدید وارد مدل حاضر شده و مدل بر اساس اطلاعات شهر مشهد پرداخته و اعتبارسنجی شد و حساسیت آن مورد ارزیابی قرارگرفت.

اضافه نمودن شیوه‌های مترو و بی‌آرتی در انتخاب وسیله نقلیه ازجمله نوآوری‌های پژوهش حاضر است.

با مقایسه تمام سیاست‌ها در سه روش ارزیابی شش سیاست برتر از هر روش برای مقایسه وزنی انتخاب شدند، به اینصورت که سناریوهایی که در مجموع هرسه روش پس از نمره‌دهی بیشتر از بقیه مسلط شدند به صورت بسته پیشنهادی سیاست گذاری برای دست‌یابی به پایداری حمل‌و نقل همگانی در سال افق طرح ارائه گردید که سیاست ارتقاء سطح کیفیت مترو و اتوبوس تندرو به عنوان رتبه‌های برتر سیاست‌ها ارزیابی شدند که می‌توانند به‌عنوان مبنای برنامه‌ریزی مدیران شهر مشهد در آینده قرار بگیرند.

مدل پویایی سیستم حمل‌ونقل پایدار شهری این مقاله قادر به‌اندازه گیری سطح پایداری شاخص‌ها اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و حمل‌ونقلی در کلان‌شهرها و شهرهای کوچک‌تر است، بطوریکه می‌توان علاوه بر شاخص‌های ارزیابی حمل‌ونقل همگانی مورد تأکید در این مطالعه سیاست‌های متعددی جهت ارزیابی شاخص‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی نیز مورد ارزیابی قرارگیرد.

این مدل می‌تواند در محاسبه و نمایش سیاست‌گذاری‌ها و پیامد توجه و عدم توجه به مؤلفه‌های تأثیرگذار بر حمل‌ونقل و در سطحی بالاتر، نحوه زندگی مردم، جهت برنامه‌ریزی‌های آتی در شهر مشهد نیز مؤثر باشد.

مقیاس سنجش و ارزیابی این مطالعه، یک کلان‌شهر بوده است. مطالعه بر روی مقیاس‌های کوچک‌تر و بزرگ‌تر از مقیاس این مطالعه که می‌تواند به ترتیب به بررسی تغییرات سناریوها شهری و شهرهای حاشیه‌ای واقع در اطراف شهر باشد، پیشنهاد می‌شود. در این زمینه، استفاده از نرم‌افزارهای GIS می‌تواند ثمربخش باشد.

مهمترین نتایج و خروجی‌های اخذ شده این پژوهش و ویژگی-های مدل ارائه شده در این مقاله به شرح زیر است:

- ایجاد یک مدل حمل‌ونقل پایدار شهری با تمرکز بر شاخص‌های حمل‌ونقل همگانی و نیز گسترش مدل نسبت به مطالعات پیشین در سطح جهانی
- پرداخت و اعتبارسنجی مدل نسبت به شهر مشهد و ارزیابی حساسیت آن
- اضافه نمودن شیوه‌های انتخاب وسیله نقلیه در مدل
- مقایسه تمام سیاست‌ها در سه روش ارزیابی، انتخاب شش سیاست برتر از هر روش برای مقایسه وزنی
- ارائه بسته پیشنهادی سیاست گذاری برای دست‌یابی به پایداری حمل‌و نقل همگانی در سال افق طرح
- ارزیابی سیاست ارتقاء سطح کیفیت مترو و اتوبوس تندرو به عنوان رتبه‌های برتر سیاست‌ها
- قابلیت مدل برای اندازه گیری سطح پایداری شاخص‌های اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و حمل‌ونقلی در کلان‌شهر مشهد
- قابلیت مدل در محاسبه و نمایش سیاست‌گذاری‌ها، جهت برنامه‌ریزی‌های آتی شهر مشهد

۷. مراجع

- Anenberg, S., Miller, J., Henze, D., & Minjares, R. (2019). “A global snapshot of the air pollution-related health impacts of transportation sector emissions in 2010 and 2015”. International Council on Clean Transportation: Washington, DC, USA.

- Armah, F. A., Yawson, D. O., & Pappoe, A. A. (2010). “A systems dynamics approach to explore traffic congestion and air pollution link in the city of Accra, Ghana”. Sustainability, 2(1), 252-265.

- Borji, Mahdi, (2016). “Investigating the Role of Human and Traffic Parameters in Improving Public Transportation Using System Dynamics Method”. A Thesis for the Degree of Master of Science, Supervisor: Dr. Haji Hoseinloo, Tehran, University of Khaje Nasiroddin Toosi, Department of Civil Engineering. (In Persian)

- Ercan, T., Onat, N. C., & Tatari, O. (2016). “Investigating carbon footprint reduction potential of public transportation in United States: A system dynamics approach”. Journal of cleaner production, 133, 1260-1276.

- Guzmán, L. Á., De La Hoz, D., Pfaffenbichler, P., & Shepherd, S. (2008, January). “Impacts of Fuel Consumption Taxes on Mobility Patterns and Co2 Emissions Using a System Dynamic Approach”. International Conference on Application of Advanced Technologies in Transportation.

- 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.

- Hu, W., Dong, J., Hwang, B. G., Ren, R., Chen, Y., & Chen, Z. (2020). “Using system dynamics to analyze the development of urban freight transportation system based on rail transit: A case study of Beijing”. Sustainable Cities and Society, 53, 101923.

- Karami, S., Karami, E., Buys, L., & Drogemuller, R. (2017). “System dynamic simulation: a new method in social impact assessment (SIA)”. Environmental Impact Assessment Review, 62, 25-34.

- Khosravi, S., Haghshenas, H., & Salehi, V. (2020). “Macro-Scale Evaluation of Urban Transportation Demand Management Policies in CBD by Using System Dynamics Case Study: Isfahan CBD”. Transportation Research Procedia, 48, 2671-2689.

- Liu, X., Ma, S., Tian, J., Jia, N., & Li, G. (2015). “A system dynamics approach to scenario analysis for urban passenger transport energy consumption and CO2 emissions: A case study of Beijing”. Energy Policy, 85, 253-270.

- Meadows, D. H., & Wright, D. (2008). “Thinking in systems: a primer Chelsea Green Publishing”. White River Junction, Vermont, 13.

- Ostadi-Jafari, M. & Habibian, M. (2014). “Long Term Evaluation of Transportation Demand Management Policy Pairs using a System Dynamics Model (Case Study: Mashhad Megapolis). Quarterly Journal of Transportation Engineering, 6(1), 21-34. (In Persian)

- Pataki, D. E., Emmi, P. C., Forster, C. B., Mills, J. I., Pardyjak, E. R., Peterson, T. R., & Dudley-Murphy, E. (2009). “An integrated approach to improving fossil fuel emissions scenarios with urban ecosystem studies”. Ecological Complexity, 6(1), 1-14.

- Pfaffenbichler, P. (2003). “The strategic, dynamic and integrated urban land use and transport model MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulator): Development, testing and application” (Doctoral dissertation).

- Rassaf, 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.

- Salehi, M. Salatin, M. Mohammadiyan, V. Keshavarziyan, M. (2020). “Provide a Model for Evaluating and Analyzing Different Policies on the Demand for the Use of Public Transport with a Dynamic System Approach”, Traffic Management Studies, 14(55), pp.151-175. (In Persian)

- Sivakumar, A. (2007). “Modelling transport: a synthesis of transport modelling methodologies”. Imperial College of London.

- Study Report of Mashhad Municipality (1995), “Transportation Studies and Research Center of Sharif University of Technology”, Comprehensive Transportation Studies of Mashhad Report 7414, Summary of the Report of the First Phase of Comprehensive Transportation Studies of Mashhad: Deputy of Transportation of Mashhad Municipality. (In Persian)

- Study Report of Mashhad Municipality (2011), “Construction, payment and validation of car ownership estimation models based on the base year”, Comprehensive studies of Mashhad traffic transportation: Deputy of

Transportation and Traffic of Transportation and Traffic Organization. (In Persian)

- Study Report of Mashhad Municipality (2013), "Transportation Studies and Planning Office of Mashhad Transport and Traffic Organization," The Ninth Transport Statistics of Mashhad. (In Persian)

- Study Report of Mashhad Municipality (2013), "Study and analysis of statistical data of Mashhad city statistics in the years 1379-1390". (In Persian)

- Study Report of Mashhad Municipality (2015), Summary of Management Report, "Comprehensive Studies of Transportation and Traffic of Mashhad": Deputy of Transportation and Traffic of Transportation and Traffic Organization. (In Persian)

- Sterman, J. (2002). "System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world".

- Suryani, E., Hendrawan, R. A., Adipraja, P. F., Wibisono, A., Widodo, B., & Indraswari, R. (2020). "Modelling and simulation of transportation system effectiveness to reduce traffic congestion: a system dynamics framework". Transportation Planning and Technology, 43(7), 670-697.

- 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.

- Vakili, K., Isaai, M., & Barsari, A. (2008, July). "Strategic assessment of transportation demand management policies: Tehran case study". In Proceeding of the 2008 Conference of the System Dynamics Society (pp. 20-24).

- Wen, X., Yang, T., Guo, X., & Hu, Y. "An Analysis of Cointegration Relationship between Public Transportation and Air Quality of Healthy Cities". In CICTP 2020 (pp. 2892-2903).

- Yang, L., Zhang, L., Stettler, M. E., Sukitpaneenit, M., Xiao, D., & van Dam, K. H. (2020). "Supporting an integrated transportation infrastructure and public space design: A coupled simulation method for evaluating traffic pollution and microclimate". Sustainable Cities and Society, 52, 101796.

مهدی برجی، درجه کارشناسی در مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه تبریز اخذ نموده و درجه کارشناسی ارشد را در سال ۱۳۹۵ را در رشته راه و ترابری از دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی اخذ کرده است. وی در حال حاضر دانشجوی دکتری مهندسی حمل و نقل در دانشگاه علم و صنعت ایران است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان، ایمنی ترافیک، مهندسی ترافیک، حمل و نقل پایدار و حمل و نقل همگانی است.

منصور حاجی حسینلو، درجه کارشناسی در مهندسی عمران را در سال ۱۳٦٦ از دانشگاه تبریز اخذ نموده و درجه کارشناسی ارشد را در سال ۱۳۷٤ و درجه دکتری در رشته مهندسی حمل و نقل و ترافیک را در سال ۱۳۷۷ از دانشگاه هکایدوی ژاپن اخذ نمودند. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان، ایمنی ترافیک، تحلیل رفتار رانندگان، مهندسی و کنترل ترافیک است و در حال حاضر عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی با مرتبه دانشیاری هستند.

سیدمحمدحسین دهناد، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۸ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد را در گرایش راه و ترابری در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر اخذ نمود. در سال ۱۳۹٦ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران از همان دانشگاه گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، ایمنی و کاربرد کامپیوتر در مهندسی ترافیک بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه قم است و در سال ۱۳۹۹ موفق به کسب هیئت علمی برتر در ارتباط با جامعه و صنعت و مجری طرح پژوهشی برگزیده دانشگاهی شده‌اند.