مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی
دفتر مطالعات اجتماعی
مسلسل: ۲۱۱۱۰ آبان ۱۴۰۴

سلسله گزارش‌های تحلیل و شبیه‌سازی سیستمی (۴):
تحلیل دینامیکی آلودگی هوای کلان‌شهر تهران

بسم الله الرحمن الرحيم

تاریخ انتشار:
۱۴۰۴/۸/۴

شماره مسلسل:
۲۱۱۱۰

مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی

عنوان گزارش:

سلسله گزارش‌های تحلیل و شبیه‌سازی سیستمی (۴): تحلیل دینامیکی آلودگی هوای کلان‌شهر تهران

نوع گزارش:

طرح / لایحه ☐ ، نظارتی ☐ ، راهبردی ■ ، پیش‌نویس قانونی ☐

نام دفتر:
مطالعات اجتماعی (مرکز شبیه‌سازی و مطالعات سیستمی)

تهیه و تدوین‌کنندگان:
رویا سلطانی، سحر اخگر، نسیم غنبر طهرانی، حمیدرضا ایزدبخش، شاهین جوادی (مرکز شبیه‌سازی و مطالعات سیستمی)

مدیرمطالعه:
هادی افراسیابی

ناظران علمی:
هادی افراسیابی، محمدحسن معادی رودسری

ویراستار ادبی:
اکرم وحدانی‌فر

گرافیک و صفحه آرایی:
محمد دهقانی شهرابی

واژه‌های کلیدی:
۱. آلودگی هوا
۲. شاخص غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از ۲٫۵ میکرون ($PM_{2.5}$)
۳. سیستم دینامیک

تاریخ شروع مطالعه: ۱۴۰۲/۱۰/۱۰

دفتر مطالعات اجتماعی

فهرست مطالب

چکیده ۶
خلاصه مدیریتی ۷
۱. مقدمه ۷
۲. پیشینه پژوهش ۸
۳. چارچوب مدل دینامیکی آلودگی هوا ۱۲
۴. نمودارهای حالت- جریان مدل آلودگی هوا ۱۵
۵. ارزیابی اعتبار مدل آلودگی هوا ۲۳
۶. سیاستگذاری ۲۴
۷. جمع‌بندی و پیشنهادها ۲۷
منابع و مآخذ ۲۹

فهرست جداول

جدول ۱. پیشینه پژوهش تحلیل آلودگی هوا با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها ۹
جدول ۲. گزارش‌های منتشر شده توسط مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی ۱۱
جدول ۳. متغیرهای اصلی در هریک از بخش‌های زیرسیستم منابع متحرک ۱۵

فهرست شکل‌ها

شکل ۱. مرز سیستم و زیرسیستم‌های مدل آلودگی هوا ۱۳
شکل ۲. ساختار کلی مدل آلودگی هوا ۱۴
شکل ۳. نمودار حالت- جریان زیرسیستم منابع ثابت ۱۶
شکل ۴. بخش مجموع انتشار آلاینده‌های اتوبوس ۱۷
شکل ۵. بخش مجموع انتشار آلاینده‌های موتورسیکلت ۱۸
شکل ۶. بخش مجموع انتشار آلاینده‌های تاکسی و خودروی سواری ۱۹
شکل ۷. بخش مجموع انتشار آلاینده‌های کامیون ۲۰
شکل ۸. نمودار حالت- جریان زیرسیستم ظرفیت محیطی ۲۱
شکل ۹. بخش اول نمودار حالت- جریان زیرسیستم پیامدهای آلودگی هوا ۲۲
شکل ۱۰. بخش دوم نمودار حالت- جریان زیرسیستم پیامدهای آلودگی هوا ۲۲
شکل ۱۱. رفتار واقعی و شبیه‌سازی شده غلظت ذرات کوچک‌تر از ۲٫۵ میکرون PM2.5 در هوای تهران .. ۲۳
شکل ۱۲. نمودار روند شبیه‌سازی شده اثر سیاست‌های مربوط به حوزه زیرسیستم منابع ثابت ۲۵
شکل ۱۳. نمودار روند شبیه‌سازی شده اثر سیاست‌های مربوط به حوزه زیرسیستم منابع متحرک ۲۶
شکل ۱۴. نمودار روند شبیه‌سازی شده اثر سیاست‌های مربوط به دو حوزه زیرسیستم منابع ثابت و متحرک ۲۷

سلسله‌گزارش‌های تحلیل و شبیه‌سازی سیستمی (۴):
تحلیل دینامیکی آلودگی هوای کلان‌شهر تهران

Doi: 10.22034/report.mrc.2025.1404.33.7.21110

چکیده

هدف از مطالعه حاضر، مدل‌سازی غلظت آلاینده ذرات معلق در هوا ($PM_{2.5}$ و PM_{10}) و ارزیابی سیاست‌های مختلف برای کاهش این آلاینده‌ها در هوای شهر تهران به‌عنوان مطالعه موردی است. به‌منظور تصمیم‌سازی برای سیاستگذاران و کمک به اتخاذ سیاست‌ها و استراتژی‌های مناسب برای حل مسئله آلودگی هوا، با استفاده از متدولوژی پویایی‌شناسی سیستم‌ها، عوامل پویای مؤثر بر غلظت ذرات معلق در هوای تهران شناسایی و روابط علّی و حلقوی بین آنها فرموله شده، با اجرای مدل (با استفاده از میانگین سالیانه داده‌های بازه زمانی بیست و دوساله بین سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲) و ساخت داشبورد مدیریتی، نتایج اجرای اقدامات پیشنهادی به‌منظور کاهش غلظت ذرات معلق در هوا شبیه‌سازی و در نهایت سیاست‌ها و استراتژی‌های مناسب برای کاهش آلودگی هوا ارائه می‌شود که می‌تواند در کاهش آلودگی هوا در سال‌های آتی مؤثر باشند.

خلاصه مدیریتی

بیان/شرح مسئله

با رشد جمعیت و صنعتی شدن، آلودگی هوا به یکی از معضلات جدی و مهم در کلان‌شهرها، ازجمله تهران، تبدیل شده است که علاوه‌بر هزینه‌های اقتصادی، پیامدهایی جبران‌ناپذیر برای سلامت مردم، اجتماع و زیست‌محیط به‌همراه دارد. به‌عبارتی، آلودگی هوا موجب کاهش بهره‌وری و تعطیلی صنایع و مراکز خدماتی می‌شود و عوارض جانبی بسیاری برای سلامت انسان‌ها، حیوانات و محیط زیست دارد و مطلوبیت شهر را برای زندگی کاهش می‌دهد. مهم‌ترین شاخص‌های آلودگی هوا، شاخص ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرون (PM_{10}) و شاخص ذرات معلق کوچک‌تر از ۲٫۵ میکرون ($PM_{2.5}$) است. با افزایش شاخص‌های مذکور پیامدهای زیان‌بار آلودگی هوا به‌ویژه بر سلامتی مردم بیشتر می‌شود. با شناسایی منابع انتشار ذرات معلق و ارتباط علّی حلقوی بین آنها و مدل‌سازی پیچیدگی‌های این سیستم می‌توان اثر سیاست‌های پیشنهادی را به‌منظور کاهش انتشار و غلظت ذرات معلق شبیه‌سازی کرد و راهکارهای مناسبی پیشنهاد داد.

نقطه نظرات/یافته‌های کلیدی

با توجه به مطالعات صورت‌گرفته، این موارد در مرز سیستم درنظر گرفته شده‌اند:

- غلظت ذرات معلق ناشی از دو منبع کلی است:

۱. منابع ثابت: آلودگی ناشی از مصرف گاز و مصرف سوخت جایگزین توسط صنایع، نیروگاه‌ها و پالایشگاه‌ها، آلودگی ناشی از پایانه‌های مسافری و پمپ‌های بنزین و آلودگی ناشی از مصرف گاز بخش خانگی و تجاری و انتشار ذرات معلق ناشی از سوزاندن زباله.

۲. منابع متحرک: انتشار احتراقی و انتشار غیراحتراقی وسایل نقلیه عمومی (تاکسی و اتوبوس)، وسایل نقلیه شخصی، موتورسیکلت، کامیون.

- پیامدهای مهم آلودگی هوا عبارت‌اند از:

۱. پیامدهای اجتماعی (سلامتی): افزایش تعداد بیماران و تعداد فوتی‌ها و... .

۲. پیامدهای اقتصادی: هزینه‌های ناشی از تعطیلی صنایع و کاهش بهره‌وری، هزینه‌های بهداشتی و درمانی و... .

پیشنهاد راهکارهای تقنینی، نظارتی یا سیاستی

سیاست‌های پیشنهادی در بخش منابع ثابت عبارت‌اند از: اعطای تسهیلات برای نوسازی موتورخانه‌ها و عایق‌بندی ساختمان‌ها، اعمال مقررات و جرائم بر ضرورت استفاده از فیلترهای تصفیه آلاینده‌ها توسط نیروگاه‌ها و صنایع، ارتقای تکنولوژی صنایع، بهسازی نیروگاه‌ها و توسعه نیروگاه‌های سیکل ترکیبی و تجدیدپذیر.

سیاست‌های پیشنهادی در بخش منابع متحرک عبارت‌اند از: کاهش ترددهای غیرضروری با غیرحضوری کردن خدمات یا استفاده از سرویس مشترک برای کارکنان اداره‌ها و سازمان‌ها، ارتقای کیفیت و جدیت در معاینه فنی خودروها، ارتقای سطح فناوری وسایل نقلیه و استفاده از کاتالیزورهای تصفیه آلاینده.

کاهش قابل توجه آلودگی هوای کلان‌شهر تهران نیازمند اجرای سیاست‌های همزمان (بسته سیاستی) در دو حوزه منابع ثابت و منابع متحرک است و هر سیاستی به‌تنهایی نمی‌تواند گامی مؤثر در راستای حل معضل آلودگی هوای شهر تهران باشد.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر رشد جمعیت موجب گسترش شهرها، افزایش حجم ترافیک و توسعه صنایع در حاشیه شهرها و درنتیجه افزایش آلودگی هوا شده است که چالشی اساسی در مدیریت شهری محسوب می‌شود. ارتباط مستقیم کیفیت هوای شهر با زندگی و سلامت شهروندان باعث شده است که سطح آلودگی هوای شهر به‌عنوان یکی از معیارهای اصلی کیفیت زندگی شهری شناخته شود.

از آثار آلودگی هوا می‌توان تأثیر منفی بر اکوسیستم، خرابی نما و سطوح ساختمان‌ها و بناهای قدیمی، کاهش قابلیت دید و کاهش

بهره‌وری را نام برد؛ آلودگی هوا همچنین به‌عنوان تهدید بزرگی برای سلامت جامعه شناخته شده است. آلودگی هوا با افزایش تعداد بیماری‌ها و مراجعات به بیمارستان‌ها و همچنین تعطیلی مشاغل و مدارس نیز همراه است [۱]. بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که مرگ‌ومیر زودرس بزرگ‌ترین هزینه آلودگی است؛ بنابراین، ارزش‌گذاری مرگ‌ومیر منتسب به آلودگی، به تعیین اندازه و شدت مشکل کمک می‌کند [۲].

مسئله تحلیل آلودگی هوا، در حوزه سیستم‌های اقتصادی- اجتماعی قرار می‌گیرد که فاکتورهای بسیاری با تأثیرات عمدتاً غیرخطی و پیچیده در آن نقش دارند. بنابراین، ابزار پویایی‌شناسی سیستم‌ها که اولین بار در دهه ۱۹۵۰ میلادی در دانشگاه صنعتی ماساچوست (MIT) پیشنهاد شد، می‌تواند به تحلیل مناسب آلودگی هوا کمک کند. در روش پویایی‌شناسی سیستم‌ها از حلقه‌های بازخوردی و روابط علّی و معلولی بین متغیرها، متغیرهای درون‌زا و برون‌زا و معادلات سیستمی به‌منظور مدل‌سازی پدیده‌های پیچیده استفاده می‌شود. به این منظور، ابتدا زیرسیستم‌های تأثیرگذار شناسایی می‌شوند و سپس با تعیین مرزهای سیستم، متغیرهای اصلی تأثیرگذار تعیین و معادلات ریاضی براساس داده‌های تاریخی استخراج و در نهایت رفتار سیستم شبیه‌سازی می‌شود.

پژوهش حاضر، با درنظر گرفتن زیرسیستم‌های منابع ثابت تولیدکننده آلودگی، منابع متحرک تولیدکننده آلودگی، عوامل محیطی و پیامدهای آلودگی هوا به بررسی مسئله آلودگی هوا با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها می‌پردازد و رفتار سیستم را درنتیجه اتخاذ سیاست‌های مختلف کنترلی، شبیه‌سازی می‌کند. به‌این‌ترتیب، در چارچوب روابط علت و معلولی پیچیده این سیستم می‌توان تأثیر سیاست‌های مختلف قابل اجرا را بر کاهش آلودگی هوای شهر تهران سنجید. شایان ذکر است، به‌منظور احصای عوامل تأثیرگذار بر تولید آلودگی هوای تهران و شناسایی روابط علّی و حلقوی بین آنها، رویدادی با عنوان «یادگیری پویایی‌های آلودگی هوا» با حضور جمعی از متخصصان و خبرگان این حوزه برگزار شد. همچنین جلساتی با تحلیلگران و اساتید متخصص دانشگاه‌های کشور برگزار شد که نتایج آن در این گزارش استفاده شده است.

۲. پیشینه پژوهش

پژوهش‌های مختلفی به بررسی معضل آلودگی هوا در کشورهای مختلف پرداخته‌اند. در جدول ۱ خلاصه‌ای از مطالعات صورت‌گرفته با هدف بررسی عوامل آلوده‌کننده هوا، عوامل تأثیرگذار بر آن و ارائه راهکار برای کنترل و کاهش آثار این عوامل با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها آورده شده‌اند. عمده این پژوهش‌ها، اثر ترافیک و حمل‌ونقل شهری بر آلودگی هوا را بررسی کرده و راهکارهایی را برای کاهش آلودگی هوا متناسب با وضعیت منطقه مورد بررسی پیشنهاد داده‌اند. از بررسی پژوهش‌های موجود درمورد آلودگی هوا برای شهر تهران با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها، مشاهده می‌شود که پژوهش‌هایی که به تمام ابعاد مسئله آلودگی هوا پرداخته باشند، به‌ندرت یافت می‌شوند. منابع متحرک (با موضوع ترافیک و حمل‌ونقل شهری، ماشین‌های شخصی، دوگانه‌سوز کردن خودروها)، عوامل طبیعی (با موضوع فضای سبز) و منابع ثابت (با موضوع آلودگی حاصل از ساختمان‌های صنعتی و غیرصنعتی)، ازجمله ابعادی محسوب می‌شوند که در پژوهش‌های مختلف به یک یا دو بعد از آنها پرداخته شده است. در این راستا، مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی نیز مطالعاتی را روی مسئله آلودگی هوا انجام داده است که تمرکز هریک بر یک زیرسیستم (منابع متحرک یا منابع ثابت) بوده و راهکارهایی را برای کاهش آلودگی هوا، پیشنهاد داده است. مطالعات صورت‌گرفته توسط مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱. پیشینه پژوهش تحلیل آلودگی هوا با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها

ردیف	عنوان مقاله	نویسندگان	سال	موضوع کلیدی	مطالعه موردی	آلاینده معیار	زیرسیستم‌های مورد بررسی	سناریوها	نتایج
۱	مدل‌سازی دینامیکی اثر سیاست دوگانه‌سوز کردن خودروها بر میزان آلودگی و مصرف انرژی	فرتوک‌زاده و اشراقی [۳]	۱۳۹۴	بررسی اثر دوگانه‌سوز کردن خودروها بر آلودگی هوا	ایران		خودروهای گازسوز، دوگانه‌سوز و بنزینی	ایجاد سبد سوخت در کشور، توسعه خودروهای CNG سوز	کاهش سرعت رشد یارانه‌ها و آلودگی هوا و توسعه خودروهای گازسوز
۲	مدل‌سازی انتشار مونوکسید کربن در شهر تبریز با رویکرد از پویایی‌شناسی سیستم	بافنده‌زنده و همکاران [۴]	۱۳۹۸	ارزیابی سناریوهای مختلف برای کاهش آلودگی هوا	شهر تبریز	CO	مصرف سوخت، ترافیک، فضای سبز و توسعه صنعتی	استفاده از بنزین یورو ۴، کاهش نرخ سفر ماهیانه، کاهش میزان گاز مصرفی هر واحد مسکونی و تجاری، توسعه فضای سبز	جایگزینی بنزین یورو ۴ و کاهش نرخ سفر ماهیانه
۳	Technology improvement in fuel and automotive industries	شاه قلیان و حاجی حسینی [۵]	۲۰۰۹	ارزیابی متغیرهای اثرگذار بر آلودگی هوا	شهر تهران	NO, CO, SO_2, NO_2, PM_{10}	رشد جمعیت و سلامت	-----	رشد نمایی شاخص آلودگی هوا
۴	A Systems Dynamics Approach to Explore Traffic Congestion and Air Pollution Link in the City of Accra, Ghana	آرماه و همکاران [۶]	۲۰۱۰	بررسی ارتباط بین تراکم ترافیک و آلودگی هوا	شهر آکرا در کشور غنا		ترافیک	مدیریت تقاضای سفر، برنامه‌ریزی و سیاستگذاری دولت، مدیریت عرضه	مدیریت تقاضای سفر
۵	A system dynamics modeling for urban air pollution: A case study of Tehran, Iran	وفا آرانی و همکاران [۷]	۲۰۱۴	ارائه یک مدل پویایی سیستم برای پیش‌بینی رفتار متغیرهای کلیدی اثرگذار بر آلودگی هوا	شهر تهران		حمل‌ونقل شهری و صنایع	ساخت جاده، بهبود فناوری در سوخت و صنایع خودروسازی، برنامه کنترل ترافیک، توسعه زیرساخت حمل‌ونقل عمومی	سیاست بهبود کیفیت سوخت و توسعه حمل‌ونقل عمومی
۶	System Dynamic Modeling of Air Pollution in Megacities: An Investigation in Megacity of Tehran	گودرزی و همکاران [۸]	۲۰۱۶	مدل‌سازی آلودگی هوا با استفاده از پویایی سیستم	شهر تهران	$PM_{2.5}$	ترافیک و حمل‌ونقل شهری	توسعه ناوگان حمل‌ونقل عمومی	توسعه حمل‌ونقل عمومی

ردیف	عنوان مقاله	نویسندگان	سال	موضوع کلیدی	مطالعه موردی	آلاینده معیار	زیرسیستم‌های مورد بررسی	سناریوها	نتایج
۷	Linking a transport Dynamic Model with an Emissions Model to Aid Air Pollution Evaluations of Transports policies in Latin America	گوزمن و اورجولا [۹]	۲۰۱۷	بررسی ارتباط بین الگوی تقاضای سفر مسافران با آلودگی هوا	شهر بوگوتا در کشور کلمبیا	CO2	حمل‌و نقل شهری	افزایش استفاده از گاز CNG، استفاده از اتوبوس با انتشار صفر (اتوبوس برقی)	استفاده از گاز طبیعی در ناوگان حمل‌ونقل عمومی
۸	Air Pollution Mitigation in Metropolitan Areas Using SD Approach	حسین‌آباد و موراگا [۱۰]	۲۰۱۷	ارزیابی سیاست‌های مختلف برای کاهش آلودگی هوا با استفاده از پویایی سیستم	شهر مکزیکوسیتی	CO2	حمل‌ونقل شهری و مالیات بر صنایع	مالیات بر صنایع تولیدکننده آلودگی، استفاده از انرژی تجدیدپذیر به‌عنوان یک ضرورت، توسعه سیستم حمل‌ونقل عمومی	توسعه حمل‌ونقل عمومی
۹	Research on Air Pollution Control Measures Based on SD: A Case Study of Beijing	یائو و همکاران [۱۱]	۲۰۱۹	کنترل آلودگی هوا با استفاده از پویایی سیستم	شهر پکن	PM2.5	وسایل نقلیه و صنایع	کنترل شدید ارزش‌افزوده مصرف انرژی بالا و صنایع با آلودگی بالا، محدودیت شماره‌گذاری وسایل نقلیه، افزایش پوشش گیاهی شهری، افزایش حمایت مالی دولت و سرمایه‌گذاری برای کاهش آلودگی هوا	کنترل ارزش‌افزوده صنایع با آلودگی بالا و محدودیت وسایل نقلیه
۱۰	Analyzing Tehran's Air Pollution Using SD approach	شهسواری‌پور و همکاران [۱۲]	۲۰۲۲	بررسی آلودگی هوا با استفاده از پویایی سیستم	شهر تهران	VOC, CO, NOX, SOX, PM	ماشین‌های شخصی و ساختمان‌های صنعتی و غیرصنعتی و پوشش گیاهی	-----	تولید ماشین‌های سازگار با محیط زیست و حفظ و گسترش پوشش گیاهی
۱۱	Effect of urban traffic restriction policy on improving air quality based on SD and a non–homogeneous discrete grey model	چن و همکاران [۱۳]	۲۰۲۲	بررسی آلودگی هوا و ترافیک با استفاده از پویایی سیستم	شهر پکن	CO, HC, NOX, PM	ترافیک	محدودیت رانندگی، محدودیت خرید ماشین، توسعه حمل‌ونقل عمومی	استفاده همزمان از محدودیت‌های ترافیکی و توسعه حمل‌ونقل عمومی
۱۲	Modeling the Impact of Road Dust on Air Pollution: A Sustainable System Dynamics Approach	خان و همکاران [۱۴]	۲۰۲۳	بررسی اثر انتشار غیراحتراقی بر آلودگی هوا با استفاده از پویایی سیستم	شهر دهلی	PM	حمل‌ونقل جاده‌ای و عوامل محیطی	استفاده از سیستم آب‌پاش، ممنوعیت سنگ‌زنی و برش مصالح ساختمانی در فضای باز، سیستم تهویه اگزوز	استفاده از سیستم آب‌پاش برای کنترل انتشار

مأخذ: یافته‌های پژوهش.

جدول ۲. گزارش‌های منتشرشده توسط مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی

ردیف	عنوان گزارش	نویسندگان	سال	موضوع کلیدی	مطالعه موردی	زیرسیستم‌های مورد بررسی	نتایج
۱	بررسی راهکارهای پیشنهادی برای کاهش آثار مصرف سوخت‌های مایع جایگزین در نیروگاه‌ها بر آلودگی هوای کلان‌شهرهای کشور	دفتر مطالعات زیربنایی، گروه محیط زیست	۱۴۰۰	بررسی راهکارهایی برای کاهش آثار استفاده از سوخت‌های مایع	نیروگاه‌های شهر تهران	----	احداث نیروگاه تجدیدپذیر و گوگردزدایی از سوخت‌های مایع
۲	راهکارهای کم‌هزینه و زودبازده برای کاهش آلودگی هوای تهران	دفتر مطالعات زیربنایی، گروه محیط زیست	۱۴۰۱	معرفی پانزده راهکار کوتاه‌مدت برای منابع مختلف آلاینده هوا	شهر تهران	-----	اثربخشی این راهکارها
۳	پویایی‌شناسی آلودگی هوا	رضایی و همکاران	۱۴۰۲	تحلیل پویایی‌شناسی آلودگی هوا	شهر تهران	منابع ثابت، منابع متحرک، پیامدهای آلودگی هوا	افزایش کیفیت حکمرانی و اصلاح الگوی مصرف
۴	آلودگی هوا تهدیدی جدی برای سلامت	دفتر مطالعات زیربنایی، گروه محیط زیست	۱۴۰۲	بررسی اثر آلودگی هوا بر وضعیت سلامت و مرگ‌ومیر	ایران	-----	تعیین اهداف کمّی برای برنامه جامع کاهش آلودگی هوا
۵	بررسی وضعیت آلایندگی اُزون در آلودگی هوای کشور	دفتر مطالعات زیربنایی، گروه محیط زیست	۱۴۰۲	ارائه راهکار برای کاهش آلاینده اُزون	شهر تهران	منابع متحرک	اجرای طرح کتاب در جایگاه‌های سوخت
۶	آسیب‌شناسی ماده (۶) قانون هوای پاک درزمینه معاینه فنی وسایل نقلیه	دفتر مطالعات زیربنایی، گروه محیط زیست	۱۴۰۳	آثار معاینه فنی خودروها بر کاهش آلودگی هوا، افزایش ایمنی و کاهش تصادفات و کاهش مصرف سوخت	ایران	-----	لزوم اصلاح رویه تعرفه‌گذاری مراکز معاینه فنی، انطباق مدت معافیت معاینه فنی با گارانتی، تقویت نظارت بر مراکز معاینه فنی

مأخذ: همان.

۳. چارچوب مدل دینامیکی آلودگی هوا

۳-۱. فرضیات دینامیکی مدل

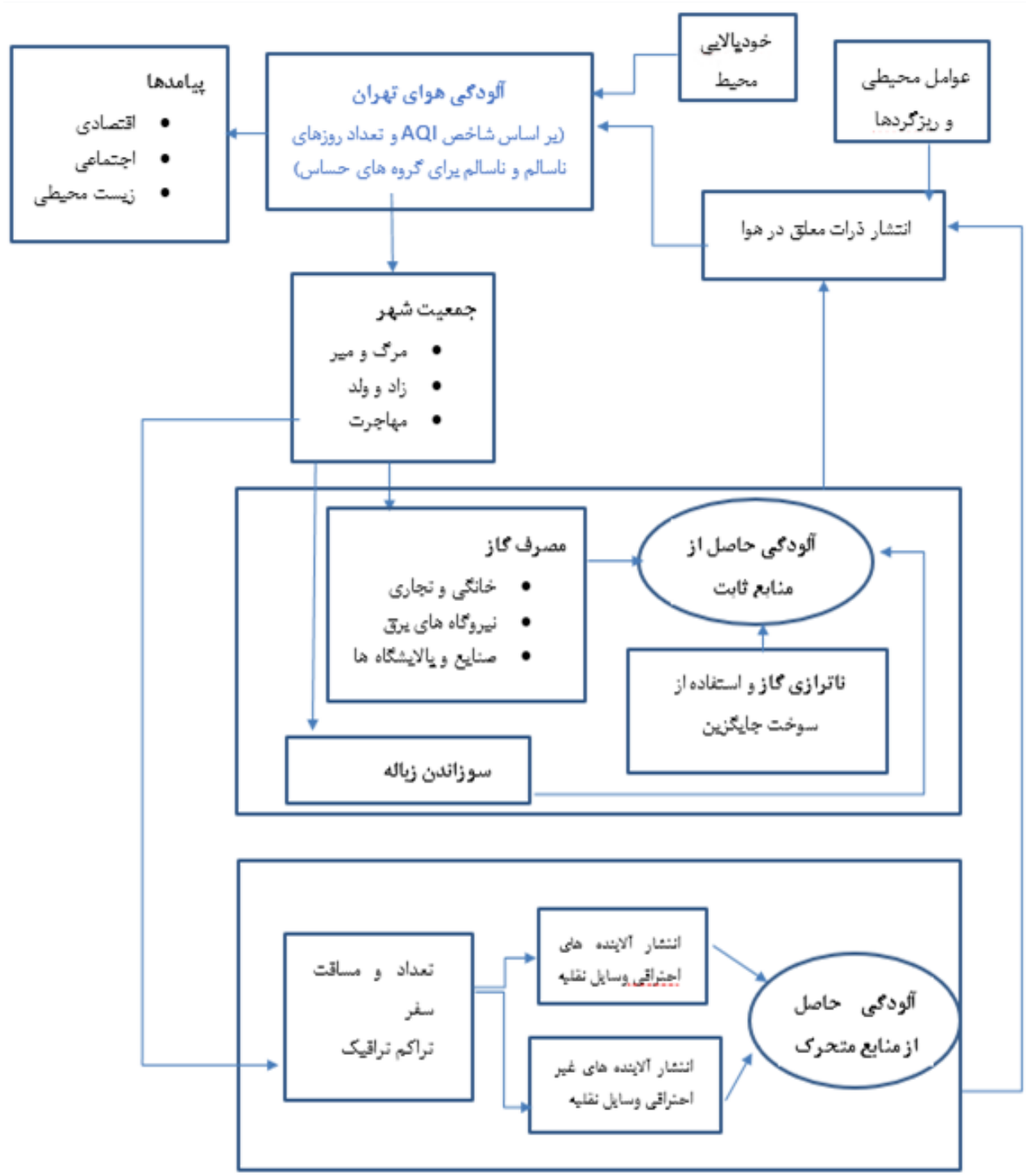
- افزایش مصرف گاز علاوه‌بر ایجاد آلودگی، موجب ناترازی گاز می‌شود و بنابراین مصرف سوخت جایگزین در نیروگاه‌ها افزایش می‌یابد. البته ازسوی دیگر افزایش مصرف گاز ممکن است به تعطیلی و شیفت‌بندی صنایع بینجامد و مصرف سوخت و تولید آلودگی کم شود.
- افزایش غلظت آلاینده ذرات معلق ($PM_{2.5}$ و PM_{10}) به افزایش تعداد روزهای آلوده شهر تهران (تعداد روزهای ناسالم برای گروه‌های حساس و تعداد روزهای ناسالم) منجر می‌شود.
- مصرف گاز توسط بخش خانگی و تجاری، صنایع و نیروگاه‌ها، و همچنین مصرف سوخت جایگزین به‌دلیل ناترازی گاز موجب افزایش انتشار ذرات معلق $PM_{2.5}$ توسط منابع ثابت در هوا می‌شود.
- وسایل نقلیه فرسوده (وسایل نقلیه شخصی، تاکسی، اتوبوس و مینی‌بوس، کامیون و وسایل نقلیه سنگین و موتورسیکلت) با افزایش انتشار احتراقی موجب افزایش غلظت ذرات معلق $PM_{2.5}$ توسط منابع ثابت در هوا می‌شود.
- افزایش مسافت سفر با افزایش انتشار آلاینده‌های (احتراقی و غیراحتراقی)، موجب افزایش غلظت ذرات معلق توسط منابع متحرک در هوا می‌شود.
- برخی عوامل محیطی مانند ریزگردها، وارونگی دما و تشکیل جزیره حرارتی موجب افزایش آلودگی هوا و باران‌های اسیدی می‌شود.
- آلودگی هوا پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی دارد که به‌کارگیری اقدامات اصلاحی برای کاهش آلودگی را الزام‌آور می‌کند.
- استفاده از فیلترهای تصفیه آلاینده توسط صنایع و نیروگاه‌ها، بهسازی نیروگاه‌ها و توسعه نیروگاه‌های تجدیدپذیر، موجب کاهش آلودگی حاصل از منابع ثابت می‌شوند.
- گسترش حمل‌ونقل برقی عمومی، تولید و واردات خودروهای برقی، اسقاط خودروهای فرسوده، اجرای قوانین ترافیکی و غیرحضوری کردن خدمات موجب کاهش آلودگی حاصل از منابع متحرک می‌شوند.

۳-۲. مرز سیستم

مدل دینامیکی آلودگی هوا شامل چهار زیرسیستم است:

- زیرسیستم اول، زیرسیستم منابع ثابت است که شامل آلودگی حاصل از مصرف گاز توسط بخش خانگی و تجاری، صنایع و نیروگاه‌ها، آلودگی حاصل از سوزاندن زباله‌ها و آلودگی حاصل از مصرف سوخت جایگزین توسط نیروگاه‌هاست. ورودی این زیرسیستم از مدل دینامیک رشد جمعیت و مدل دینامیک شدت انرژی می‌آید.
- زیرسیستم دوم، زیرسیستم منابع متحرک است که شامل انتشار آلاینده‌های احتراقی و غیراحتراقی انواع وسایل نقلیه مانند خودروی سواری، تاکسی، اتوبوس و موتورسیکلت است. ورودی این زیرسیستم از مدل دینامیک ترافیک می‌آید.
- زیرسیستم سوم، عوامل محیطی حذف‌کننده آلودگی مانند پوشش گیاهی، باد و باران، عوامل محیطی تشدیدکننده آلودگی مانند جزیره حرارتی، فرم شهری و اثر وارونگی دما و عوامل محیطی ایجادکننده آلودگی هوا مانند ریزگردهاست.
- زیرسیستم چهارم پیامدهای آلودگی هواست که به سه دسته پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی دسته‌بندی می‌شود.
- مرز سیستم و زیرسیستم‌های مدل دینامیکی آلودگی هوا و ارتباط بین زیرسیستم ها در شکل ۱ نمایش داده شده است.

شکل ۱. مرز سیستم و زیرسیستم‌های مدل آلودگی هوا

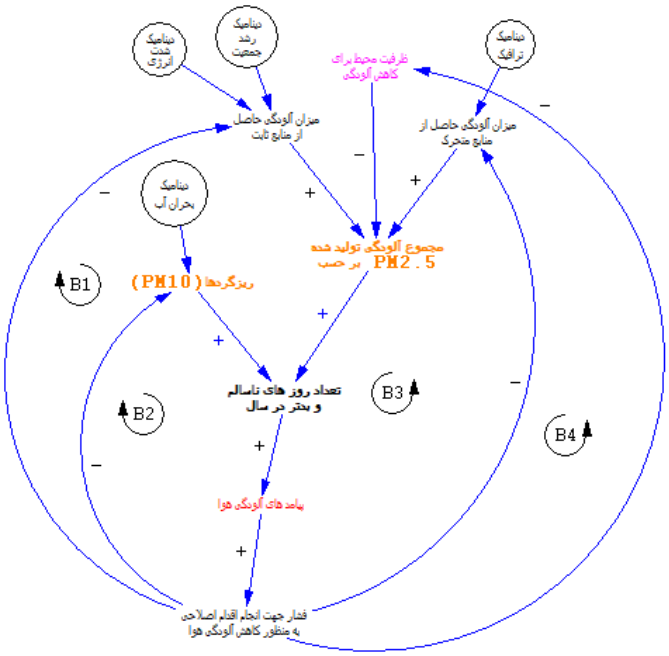


مأخذ: یافته‌های پژوهش.

۳-۳. ساختار کلی روابط علّی و معلولی مدل دینامیکی آلودگی هوا

همان‌طور که اشاره شد، مدل درنظر گرفته شده برای تحلیل آلودگی هوای تهران شامل چهار زیرسیستم است. منابع عمده آلودگی هوا، ذرات معلق با قطر کمتر از 10 میکرومتر PM_{10} منتشر شده از ریزگردها (با منشأ داخلی و خارجی ناشی از بحران آب) و ذرات معلق دارای قطر کمتر از ۲/۵ میکرومتر ($PM_{2.5}$) منتشر شده از منابع ثابت (ناشی از مصرف گاز، مصرف سوخت جایگزین و سوزاندن زباله) و منابع متحرک (انتشار آلاینده‌های احتراقی و غیراحتراقی انواع وسایل‌نقلیه) هستند که هریک از عوامل پویای متعددی نشئت گرفته می‌شود. ساختار کلی علّی حلقوی مدل دینامیکی آلودگی هوا در شکل ۲ نمایش داده شده که شامل چهار حلقه تعدیل‌کننده است.

شکل ۲. ساختار کلی مدل آلودگی هوا



مأخذ: همان.

■ **حلقه B۱ (زیرسیستم منابع ثابت):** با رشد جمعیت، آلودگی منابع ثابت و درنتیجه مجموع انتشار (غلظت) ذرات معلق افزایش می‌یابد که موجب افزایش تعداد روزهای ناسالم برای گروه‌های حساس می‌شود و درنتیجه پیامدهای آلودگی هوا و فشار به‌منظور انجام اقدام اصلاحی افزایش پیدا می‌کند. با اعمال سیاست‌های اصلاحی، آلودگی حاصل از منابع ثابت کاهش می‌یابد.

■ **حلقه B۲ (زیرسیستم پیامدهای آلودگی هوا):** ریزگردها موجب افزایش غلظت ذرات معلق PM_{10} و افزایش تعداد روزهای ناسالم و بدتر در سال می‌شود و درنتیجه پیامدهای آلودگی هوا و فشار به‌منظور انجام اقدام اصلاحی را افزایش می‌دهد. با اعمال سیاست‌های اصلاحی، آلودگی با منشأ ریزگردها (گرد و غبار) کاهش می‌یابد.

■ **حلقه B۳ (زیرسیستم منابع متحرک):** انتشار ذرات ناشی از آلاینده‌های احتراقی و غیراحتراقی وسایل نقلیه متحرک موجب افزایش غلظت ذرات معلق $PM_{2.5}$ و درنتیجه افزایش تعداد روزهای ناسالم و بدتر در سال می‌شود که با افزایش پیامدها، فشار برای انجام اقدام اصلاحی افزایش می‌یابد. با اعمال سیاست‌های اصلاحی، آلودگی حاصل از منابع متحرک کاهش پیدا می‌کند.

■ **حلقه B۴ (زیرسیستم عوامل محیطی):** کاهش ظرفیت محیطی موجب افزایش ذرات معلق در هوا می‌شود که خود تعداد روزهای ناسالم برای گروه‌های حساس و پیامدها و درنتیجه فشار برای انجام اقدام اصلاحی را افزایش می‌دهد. با اعمال اقدام اصلاحی، ظرفیت محیط برای کاهش آلودگی افزایش می‌یابد.

۴. نمودارهای حالت- جریان مدل آلودگی هوا

۴-۱. نمودار حالت- جریان زیرسیستم منابع ثابت

در شکل ۳، ارتباطات بین آلودگی منابع ثابت ناشی از ذرات معلق منتشر شده از مصرف گاز توسط نیروگاه‌ها برای تولید برق، ذرات معلق منتشر شده از مصرف گاز توسط صنایع و پالایشگاه‌ها، ذرات معلق منتشر شده از مصرف گاز توسط بخش خانگی و تجاری، ذرات معلق منتشر شده از سوزاندن زباله‌ها، ضایعات و کابل‌ها، و ذرات معلق منتشر شده از مصرف سوخت جایگزین توسط نیروگاه‌هاست. در این مطالعه، داده‌های مربوط به میزان آلودگی تولید شده توسط هریک از منابع ثابت، از سیاهه انتشار سال ۱۳۹۶ استخراج شده که در پیوست ۳ آورده شده است. درخصوص آلودگی منتشر شده از سوزاندن زباله، طبق گزارش مرکز مطالعات راهبردی و آموزش وزارت کشور [۱۵]، منتشر شده در مردادماه سال ۱۴۰۲، متوسط سرانه زباله تولید شده در تهران ۳۲۰ کیلوگرم در سال است. طبق مقاله شکوهمند [۱۶]، به‌ازای سوزاندن یک تن زباله، به‌طور متوسط بین ۱۲ تا ۲۰ کیلوگرم ذرات معلق منتشر می‌شود. البته بخشی از زباله سوزانده می‌شود که در مدل درنظر گرفته شده است.

۴-۲. نمودارهای حالت- جریان زیرسیستم منابع متحرک

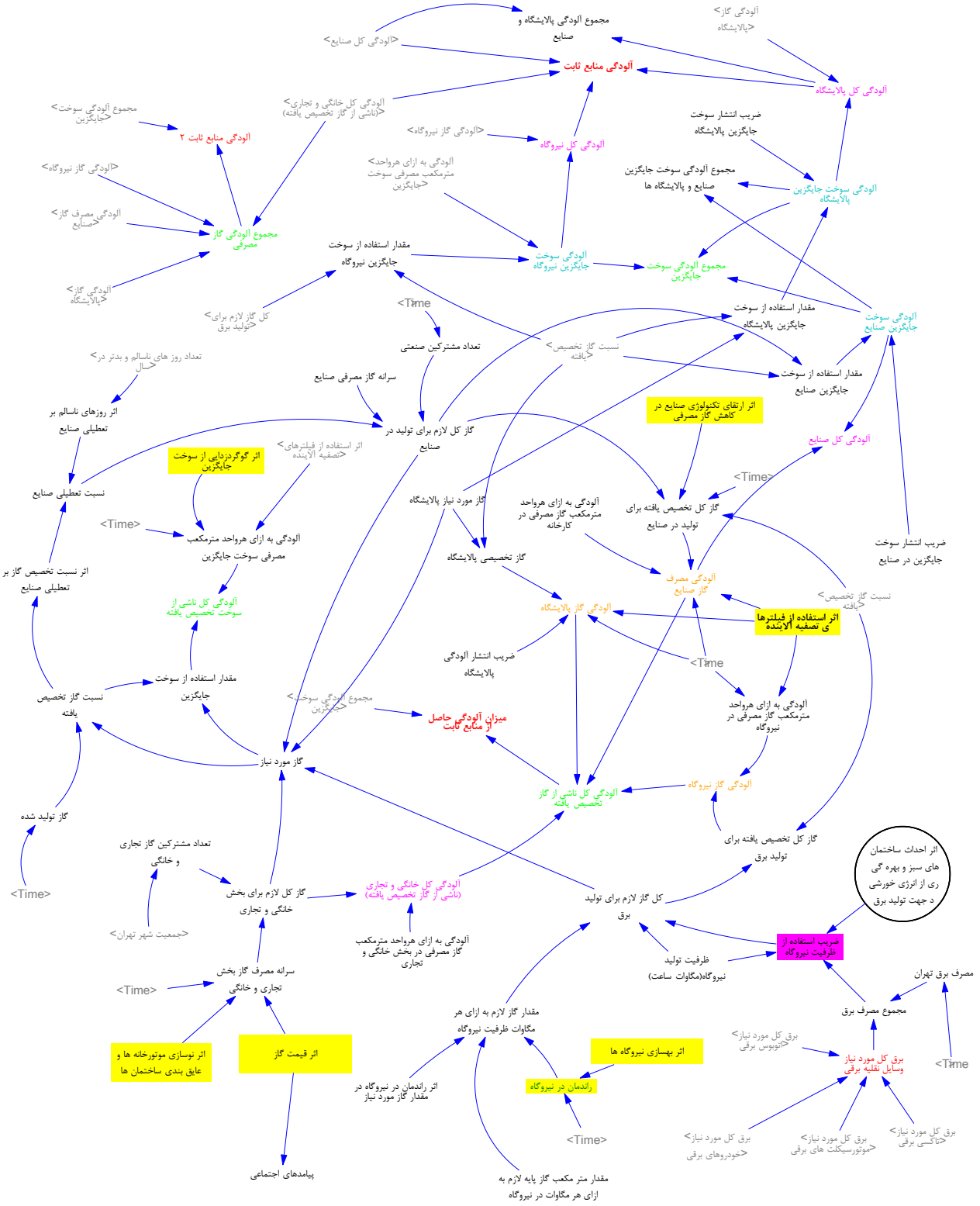
زیرسیستم منابع متحرک خود شامل بخش مجموع انتشار آلاینده‌های اتوبوس، بخش محاسبه مجموع انتشار آلاینده‌های موتورسیکلت، بخش محاسبه مجموع انتشار آلاینده‌های تاکسی و خودروی سواری و بخش محاسبه مجموع انتشار آلاینده‌های کامیون است که در شکل‌های ۴ تا ۷ نشان داده شده است. متغیرهای اصلی در هریک از بخش‌های زیرسیستم منابع متحرک در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳. متغیرهای اصلی در هریک از بخش‌های زیرسیستم منابع متحرک

زیرسیستم منابع متحرک					
نام متغیر	وسیله نقلیه در عمر مفید	وسیله نقلیه فرسوده	نرخ تبدیل وسیله نقلیه نو به فرسوده	اسقاط وسیله نقلیه	ورود وسیله نقلیه نو
نوع متغیر	حالت	حالت	نرخ	نرخ	نرخ
نام متغیر	عمر اسقاط وسیله نقلیه	تأثیر فرسودگی وسیله نقلیه بر انتشار احتراقی	اثر تراکم ترافیک بر میزان انتشار	اثر کیفیت سوخت بر ضریب انتشار	اثر معاینه فنی بر ضریب انتشار
نوع متغیر	برون‌زا	کمکی	برونزا	برونزا	برونزا
نام متغیر	اثر سطح فناوری بر روس ضریب انتشار	میانگین مسافت هر سفر و تعداد سفرهای انجام شده	انتشار احتراقی وسیله نقلیه	انتشار غیراحتراقی وسیله نقلیه	میزان آلودگی حاصل از منابع متحرک
نوع متغیر	برونزا	برونزا	کمکی	کمکی	کمکی

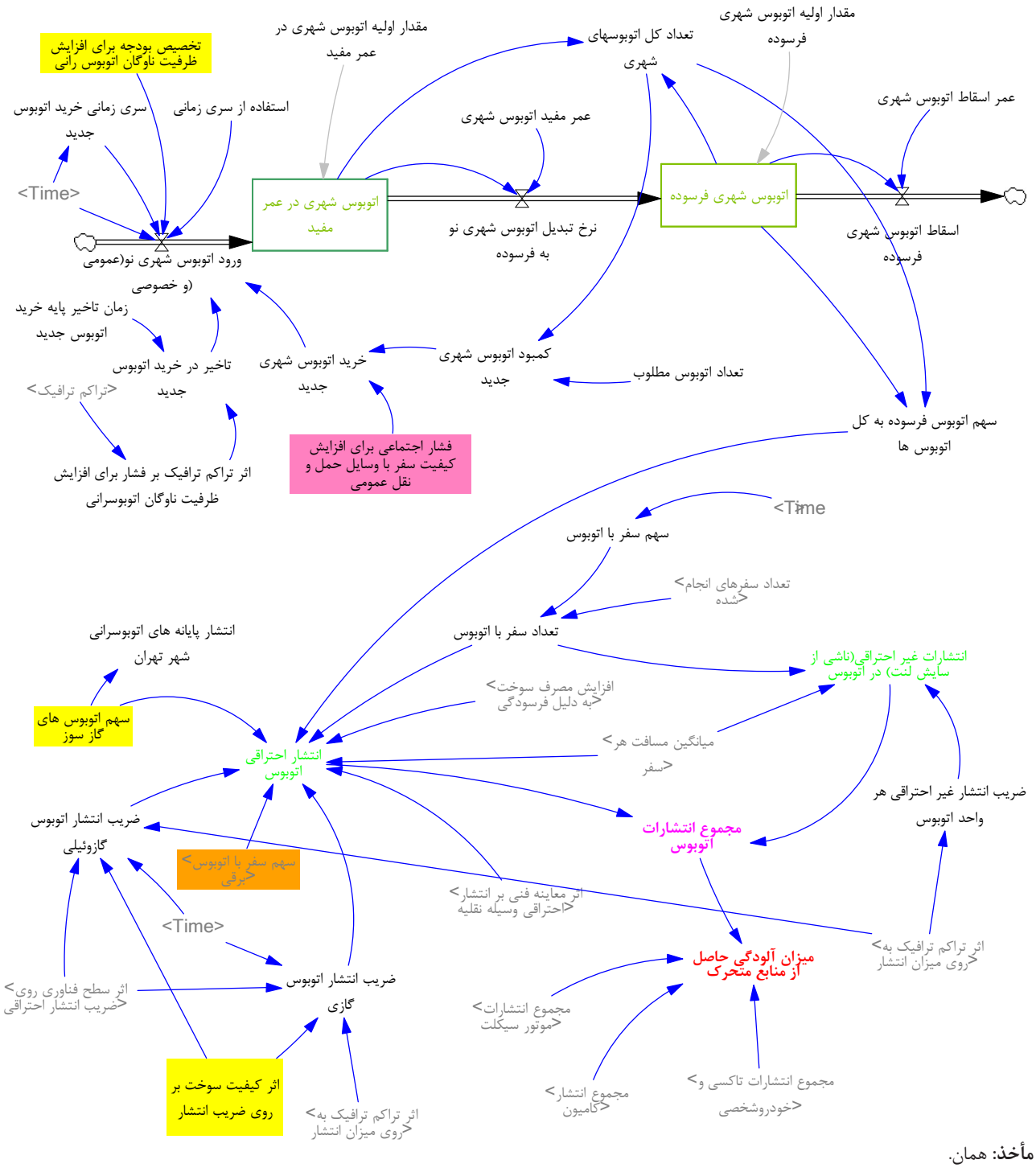
مأخذ: همان.

شکل ۳.نمودار حالت-جریان زیرسیستم منابع ثابت



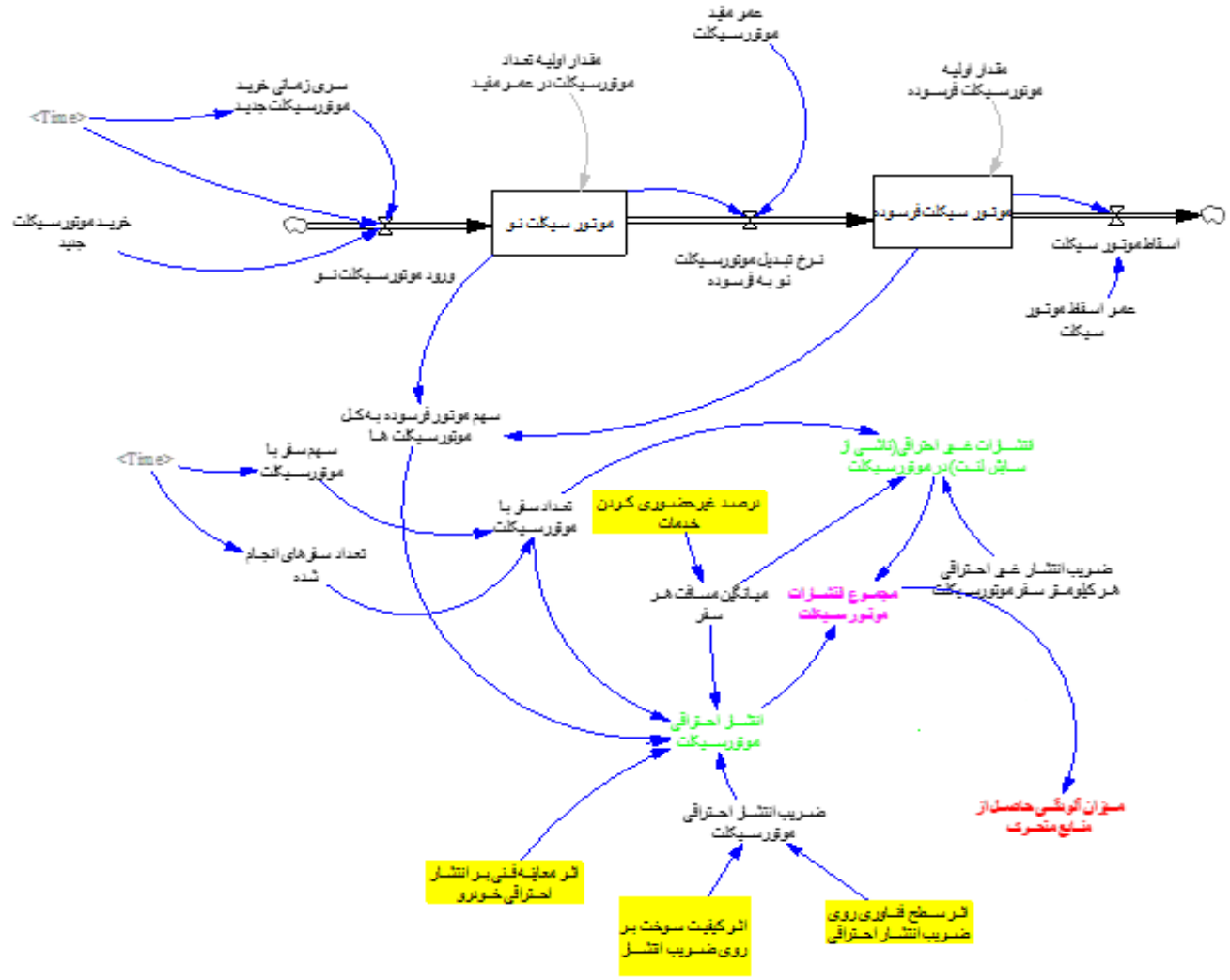
مأخذ: همان.

شکل ۴. بخش مجموع انتشار آلاینده‌های اتوبوس



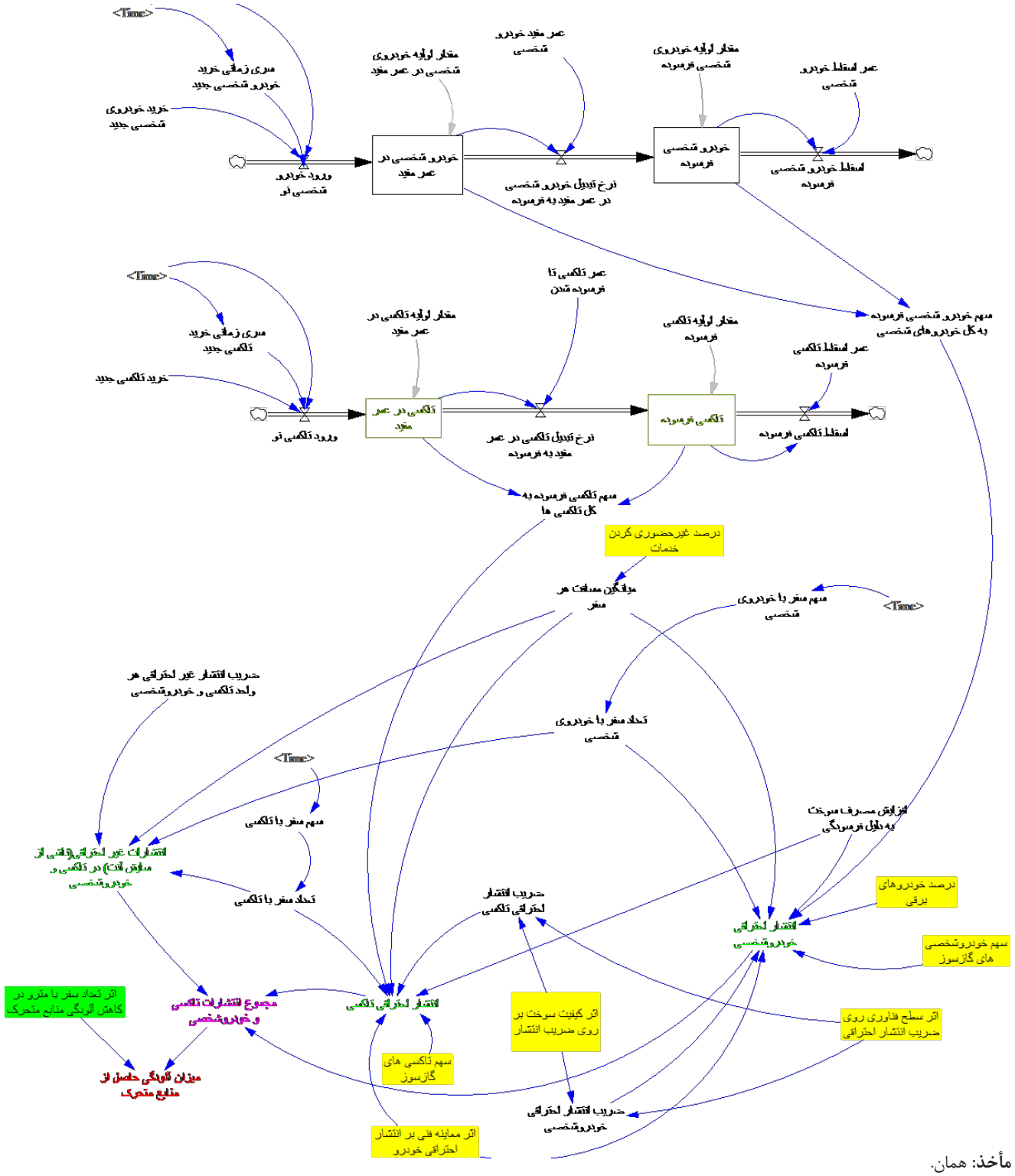
مأخذ: همان.

شکل ۵.بخش مجموع انتشار آلاینده‌های موتورسیکلت



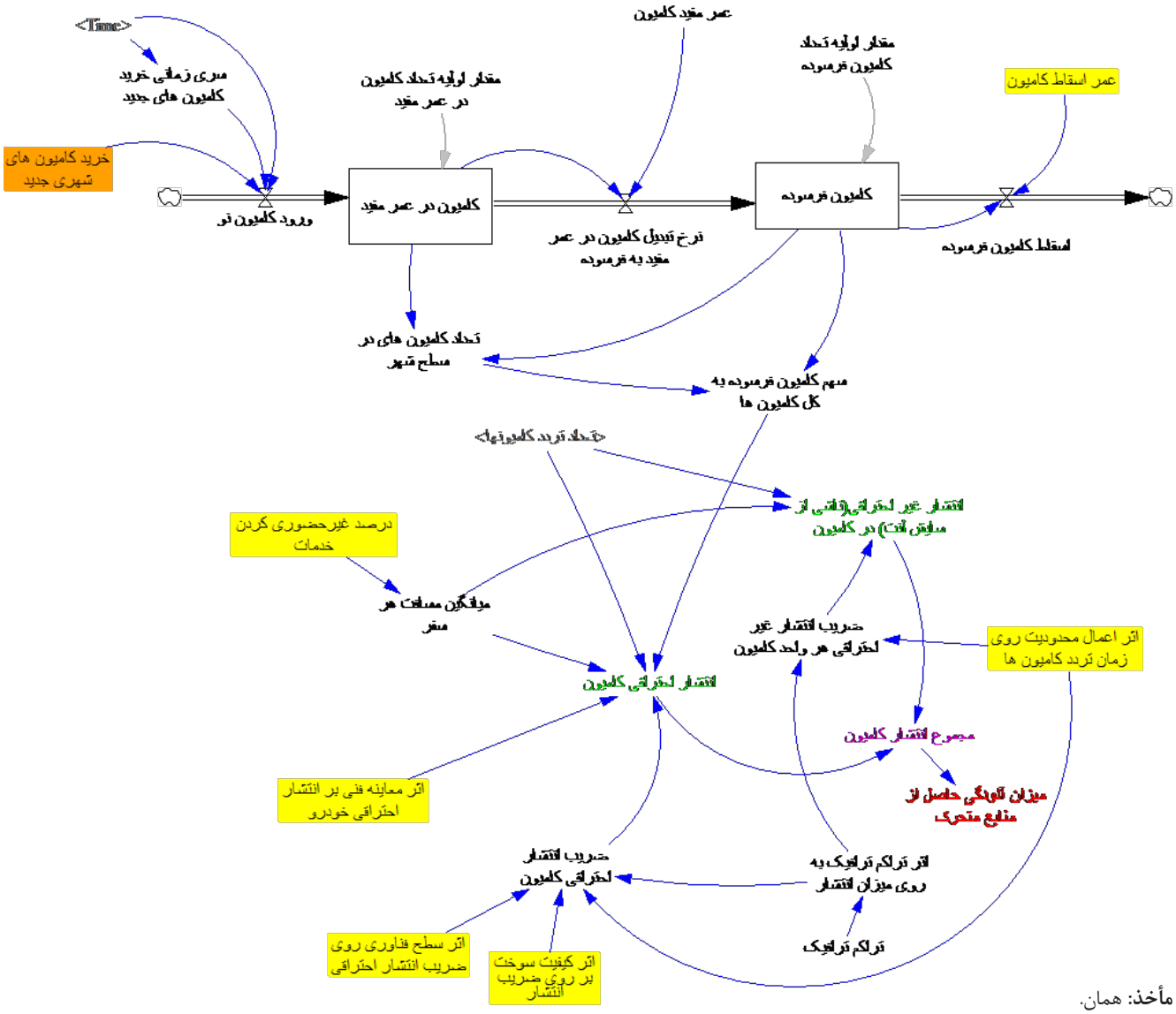
مأخذ: همان.

شکل ۶. بخش مجموع انتشار آلاینده‌های تاکسی و خودروی سواری



مأخذ: همان.

شکل ۷. بخش مجموع انتشار آلاینده‌های کامیون



مأخذ: همان.

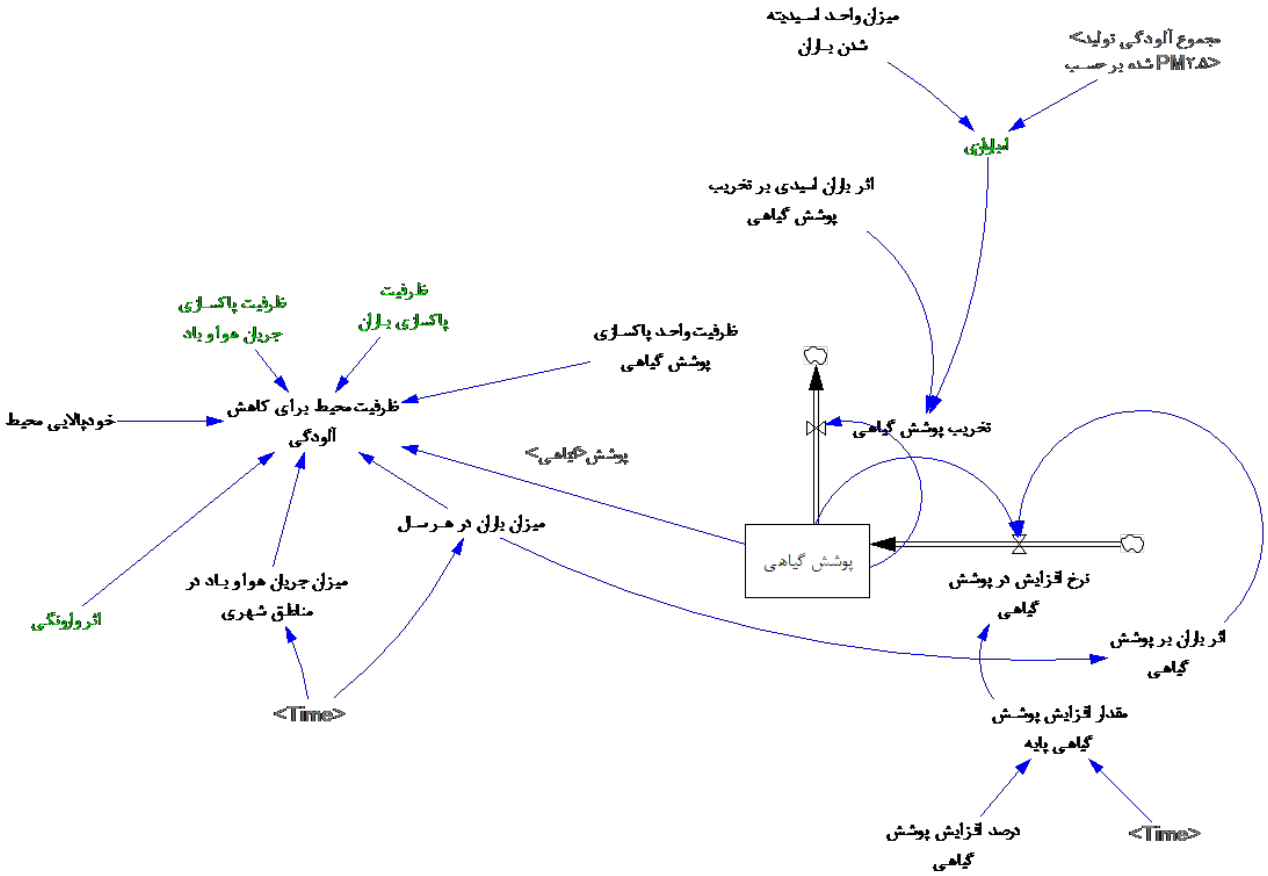
۳-۴. نمودارهای حالت- جریان زیرسیستم عوامل محیطی

برخی عوامل محیطی مانند ریزگردها، وارونگی دما، تشکیل جزیره حرارتی موجب افزایش آلودگی هوا و برخی دیگر از عوامل محیطی مانند پوشش گیاهی و جریان باد موجب پراکندگی آلودگی هوا می‌شوند. این عوامل محیطی می‌توانند به‌صورت مقطعی آلودگی حاصل از انتشار ذرات معلق ریز را از بین ببرند، اما اثر آنها موقتی است و مجدد با انتشار ذرات معلق از منابع انتشار، آلودگی ایجاد می‌شود.

■ **جزیره حرارتی:** پدیده‌ای است که به‌موجب آن منطقه موردنظر شهر، درجه حرارت گرم‌تر از محیط اطراف خود را تجربه می‌کنند. مهم‌ترین اثر پدیده جزیره حرارتی، آلودگی هواست. در مطالعه مرکز مطالعات راهبردی و آموزش وزارت کشور (گروه پژوهشی آینده پژوهشی راهبردی) [۱۷]، عوامل مؤثر بر تشکیل جزیره حرارتی و راهکارهای کاهش آن بررسی شده است.

■ **وارونگی دما:** وارونگی دما (وارونگی گرمایی یا این ورژن) به پدیده‌ای گفته می‌شود که در آن برخلاف حالت طبیعی با افزایش ارتفاع، دما نیز زیاد می‌شود و در این شرایط درجه حرارت پایین جو کمتر از طبقه فوقانی است. وارونگی دما باعث به دام افتادن آلودگی هوا در ارتفاع نزدیک زمین می‌شود. شکل ۸ نمودار حالت- جریان زیرسیستم ظرفیت محیطی را نشان می‌دهد.

شکل ۸. نمودار حالت- جریان زیرسیستم ظرفیت محیطی



مأخذ: همان.

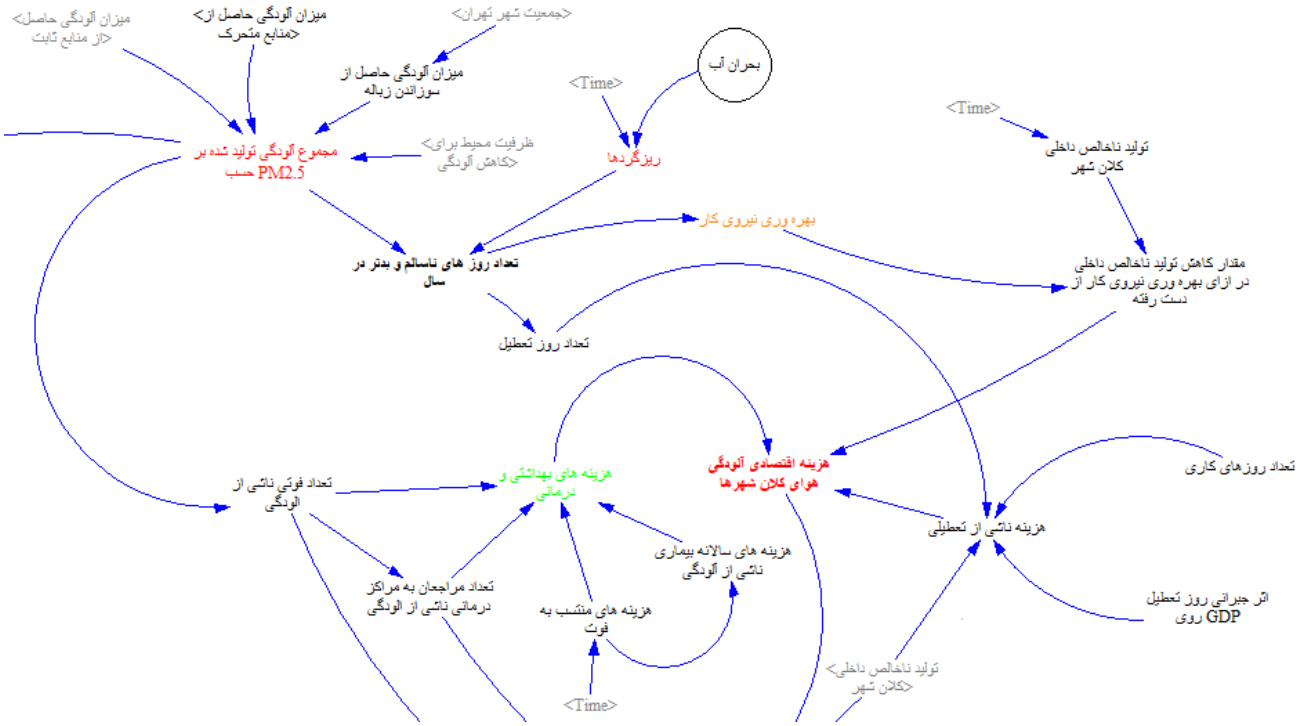
۴-۴. نمودار حالت- جریان زیرسیستم پیامدهای آلودگی هوا

پیامدهای آلودگی هوا به سه دسته هزینه‌های اقتصادی، پیامدهای اجتماعی و پیامدهای زیست‌محیطی دسته‌بندی می‌شوند:

- هزینه‌های اقتصادی شامل کاهش تولید ناخالص داخلی در اثر کاهش بهره‌وری نیروی انسانی و تعطیلی صنایع و همچنین هزینه‌های بهداشتی و درمانی ناشی از آلودگی هوا و از دست دادن ارزش زندگی سرمایه‌های انسانی درنتیجه کاهش طول عمر افراد در اثر آلودگی هواست. در این مطالعه، هزینه‌های منتسب به فوت، براساس رویکرد ارزش آماری زندگی (LSV) محاسبه شده است. ارزش آماری زندگی برای عمرهایی که از دست داده یا به‌دست آورده شده، ارزش‌های پولی اختصاص می‌دهد. روش ابتدایی برای تعیین تأثیر اقتصادی مرگ‌ومیر زودرس ناشی از آلودگی هوا، ضرب کردن تعداد مرگ‌ومیر پیش‌بینی شده، در برآورد LSV برای هر کشور است. در این رویکرد، تعداد موارد مرگ منتسب بدون درنظر گرفتن گروه سنی مورد توجه است. باتوجه‌به گزارش دوازده‌ساله (۱۴۰۱-۱۳۹۰) کیفیت هوای شهر تهران (تغییرات زمانی و مکانی غلظت‌ها، آثار بهداشتی و اقتصادی) [۱۸]، به‌ازای هریک مورد مرگ منتسب، خسارتی معادل ۲۶۸۱۹۱ دلار برای ایران برآورد شده است.
- پیامدهای زیست‌محیطی شامل تخریب پوشش گیاهی در اثر باران‌های اسیدی و کاهش کیفیت محصولات کشاورزی و از بین رفتن گونه‌های جانوری می‌تواند باشد. همچنین ذرات معلق می‌توانند سبب خنثی شدن برگ، کاهش توانایی فتوسنتز، کاهش رشد و باروری گیاهان شوند.
- پیامدهای اجتماعی شامل کاهش مطلوبیت زندگی در شهرها و درنتیجه افزایش نرخ مهاجرت از شهرها و افزایش حمل‌ونقل‌های بین‌شهری، آثار روانی افزایش تعداد فوتی‌ها و تعداد مراجعان به مراکز درمانی، آثار جانبی تعداد روزهای تعلیمی ازدست‌رفته و غیره می‌تواند باشد.

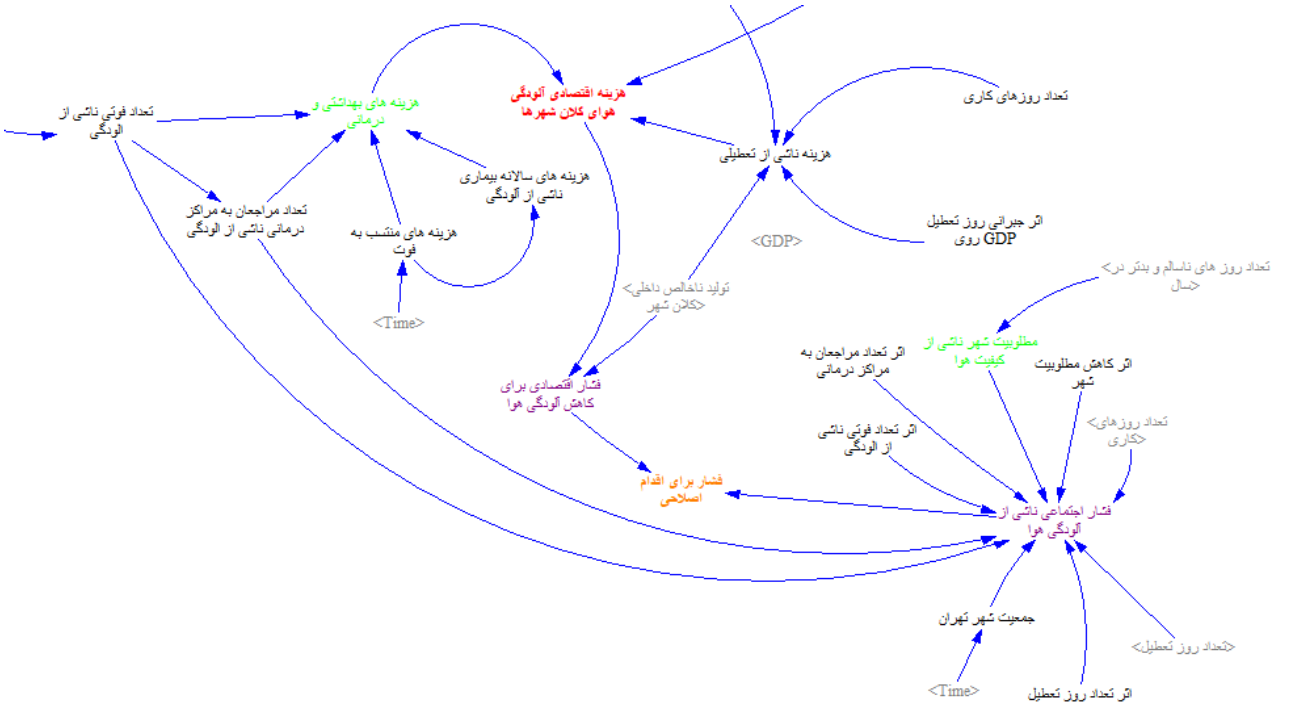
شکل‌های ۹ و ۱۰ نمودار حالت- جریان زیرسیستم پیامدهای آلودگی هوا را نشان می‌دهند.

شکل ۹. بخش اول نمودار حالت-جریان زیرسیستم پیامدهای آلودگی هوا



مأخذ: همان.

شکل ۱۰. بخش دوم نمودار حالت-جریان زیرسیستم پیامدهای آلودگی هوا



مأخذ: همان.

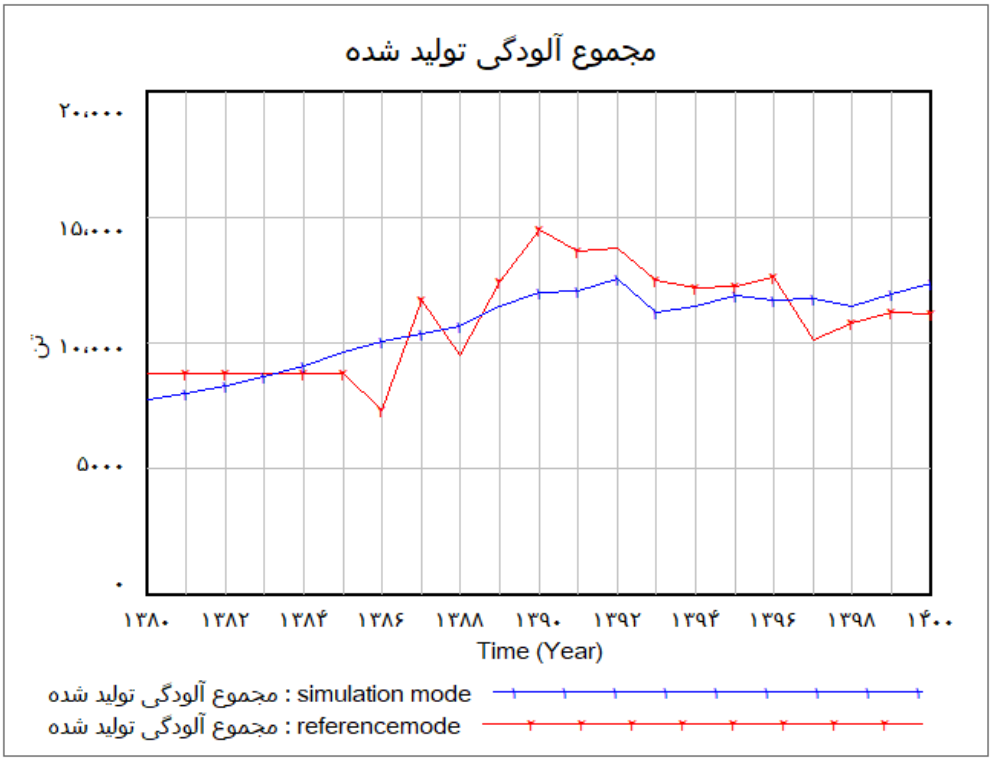
۵. ارزیابی اعتبار مدل آلودگی هوا

یکی از معیارهای ارزیابی اعتبار مدل، تطبیق مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل و مقادیر واقعی مدل مطابق رفتارهای مرجع[1] است. رفتارهای مرجع وارد شده برای برخی از متغیرها در مدل دینامیکی آلودگی هوا، از داده‌های منتشر شده در ترازنامه انرژی [۱۹] و سامانه اطلاعات آماری استان تهران [۲۰] استخراج شده است. برای برخی دیگر از متغیرها به‌دلیل فقدان اطلاعات و داده‌های مورد نیاز، از داده‌هایی استفاده شده است که خود برگرفته از یک مدل شبیه‌سازی است که داده‌هایش از مراجع زیر اخذ شده‌اند:

- سالنامه آماری شهرداری تهران [۲۱].
- سیاهه انتشار آلاینده‌های هوای کلان‌شهر تهران منتشر شده در سال ۱۳۹۶ [۲۲].
- سیاهه انتشار آلاینده‌های هوای کلان‌شهر تهران منتشر شده در سال ۱۳۹۲ [۲۲].
- گزارش دوازده‌ساله (۱۴۰۱-۱۳۹۰) کیفیت هوای شهر تهران: تغییرات مکانی، زمانی غلظت‌ها، آثار بهداشتی و اقتصادی [۲۳].

همان‌طور که در شکل ۱۱ نمایش داده شده است، نتایج شبیه‌سازی رفتار مجموع انتشار (غلظت) ذرات معلق $PM_{2.5}$ طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰، با مقدار واقعی آن (رفتار مرجع) تا حدود زیادی مطابقت دارد. به‌منظور تحلیل بیشتر، از آماره تایل[2] برای ارزیابی اعتبار مدل نیز استفاده شده است. مقدار شاخص تایل برابر ۰,۰۵۷۴ به‌دست آمده است که کوچک بودن و نزدیک بودن آن به صفر نشان‌دهنده خوب بودن رفتار شبیه‌سازی شده مدل است.

شکل ۱۱. رفتار واقعی و شبیه‌سازی شده غلظت ذرات کوچک‌تر از ۲,۵ میکرون PM۲,۵ در هوای تهران [۲۴]



1. Reference Mode
2. Theil 'Statistics

۶. سیاستگذاری

رویکرد سیاستگذاری به‌کمک مدل‌سازی، امکان ارزیابی نتایج تصمیمات و اقدامات بر کل سیستم را قبل از پیاده‌سازی فراهم می‌آورد. سیاست‌های پیشنهاد شده در این مطالعه به دو گروه سیاست‌های مربوط به منابع ثابت، سیاست‌های مربوط به منابع متحرک قابل تفکیک هستند که فرض شده است از سال ۱۴۰۴ اعمال می‌شوند.

۶-۱. سیاستگذاری در حوزه منابع ثابت

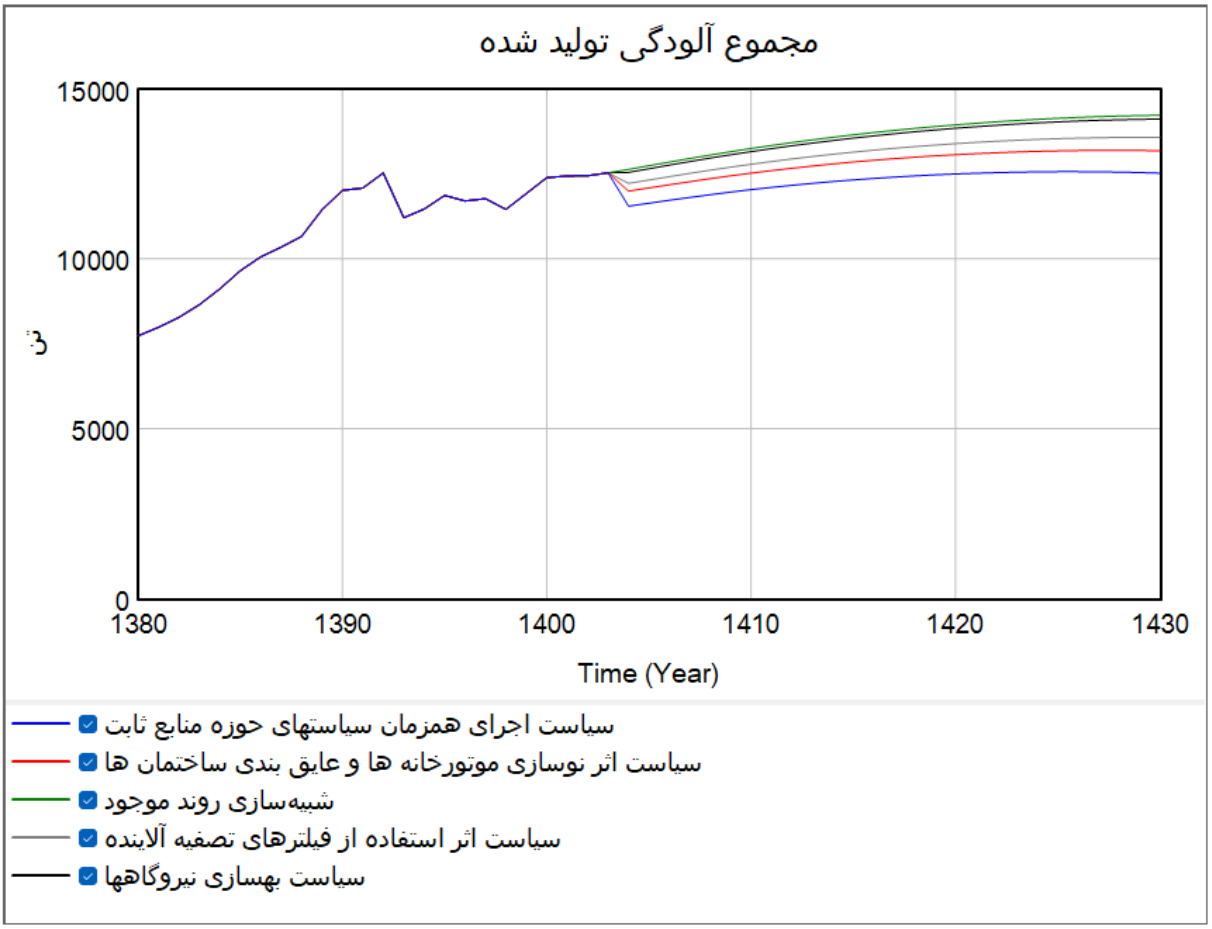
نتایج شبیه‌سازی سیاست‌های مربوط به زیرسیستم منابع ثابت بر مجموع آلودگی تولید شده برحسب $PM_{2.5}$ در شکل ۱۲ ارائه شده است. روند شبیه‌سازی شده (Simulation Mode) در شکل مذکور شبیه‌سازی ادامه وضعیت روند موجود را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، اجرای همزمان چندین سیاست مختلف در حوزه منابع ثابت می‌تواند نتایج بهتری بر کاهش غلظت آلودگی هوا داشته باشد. در مقام مقایسه سیاست‌های مختلف بررسی شده در حوزه منابع ثابت می‌توان به‌ترتیب اثرگذاری، سیاست نوسازی موتورخانه‌ها و عایق‌بندی ساختمان‌ها، سیاست استفاده از فیلترهای تصفیه آلاینده در صنایع و سیاست بهسازی نیروگاه‌ها را نام برد.

لازم به ذکر است که افزایش مصرف گاز موجب ناترازی گاز و مصرف سوخت جایگزین (نفت گاز یا نفت کوره) و درنتیجه انتشار ذرات معلق ریز در هوا می‌شود. راهکار اساسی برای کاهش استفاده از سوخت‌های جایگزین توسط نیروگاه‌ها، می‌تواند توسعه نیروگاه‌های سیکل ترکیبی یا نیروگاه‌های تجدیدپذیر و استفاده از سوخت‌های پاک مانند بیوگاز باشد. البته باید توجه داشت بحث منابع مالی برای این سرمایه‌گذاری‌ها مطرح است. هرچند قیمت برق در مقایسه با این سرمایه‌گذاری‌ها ناچیز است، در بلندمدت آثار اقتصادی و اجتماعی چشمگیری خواهد داشت.

سیاست استفاده از فیلترهای تصفیه آلاینده می‌تواند راهکاری برای کاهش آلودگی و غلظت ذرات معلق باشد. باتوجه به درصد وابستگی بالای تولید برق کشور به گاز طبیعی، تنوع‌بخشی در سبد انرژی برای تولید برق می‌تواند راهکاری برای کاهش استفاده از سوخت‌های جایگزین به‌دلیل ناترازی گاز باشد. یکی از راهکارهای کاهش مصرف گاز، می‌تواند عایق‌بندی ساختمان‌ها و اعمال مشوق‌ها یا جرائم در قیمت گاز مصرفی باشد. سیاست بهسازی نیروگاه‌ها موجب افزایش راندمان نیروگاه‌ها و درنتیجه کاهش مصرف گاز و مصرف سوخت جایگزین نیروگاه‌ها می‌شود و آلودگی ناشی از آن را کاهش می‌دهد.

- با سیاست اعمال مقررات و جرائم بر ضرورت استفاده از فیلترهای تصفیه آلاینده‌ها توسط نیروگاه‌ها و صنایع، و فرض اثر ۲۰درصدی آن در کاهش آلودگی، آلودگی ناشی از مصرف گاز صنایع و نیروگاه‌ها و آلودگی ناشی از مصرف سوخت جایگزین کاهش می‌یابد. اما در آلودگی ناشی از مصارف گاز خانگی و تجاری تأثیری ندارد.
- با سیاست اعطای تسهیلات برای نوسازی موتورخانه‌ها و عایق‌بندی ساختمان‌ها و فرض اثر ۲۰درصدی آن در کاهش سرانه مصرف گاز بخش تجاری و خانگی، آلودگی ناشی از گاز تخصیص‌یافته به بخش تجاری و خانگی کاهش می‌یابد. ازسویی، با کاهش مصرف گاز بخش تجاری و خانگی، گاز بیشتری می‌تواند حسب نیاز به صنایع و نیروگاه‌ها تخصیص یابد. در مجموع، آلودگی منابع ثابت و آلودگی کل کاهش پیدا می‌کند.

شکل ۱۲. نمودار روند شبیه‌سازی شده اثر سیاست‌های مربوط به حوزه زیر سیستم منابع ثابت



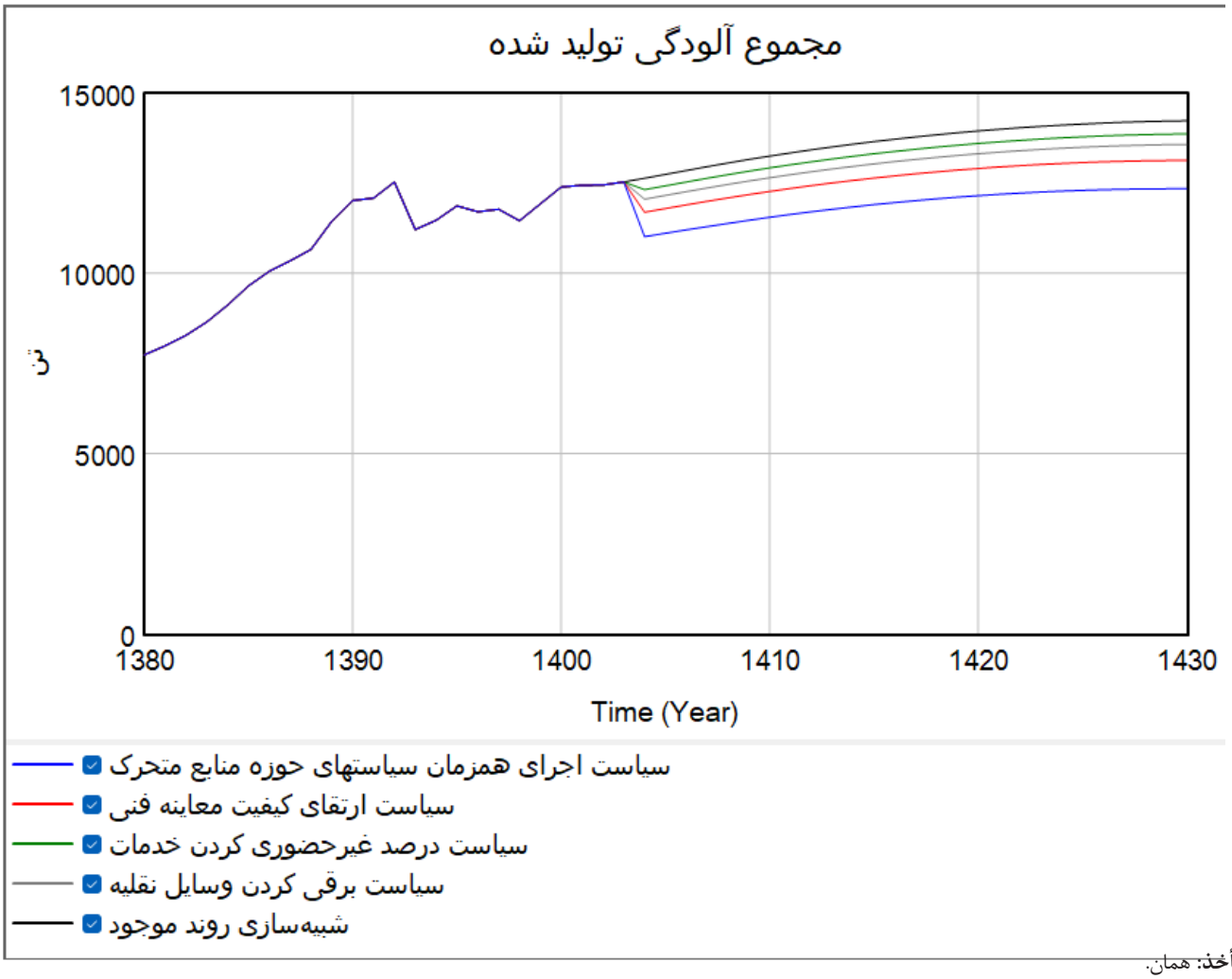
مأخذ: یافته‌های پژوهش.

۲-۶. سیاستگذاری در حوزه منابع متحرک

نتایج شبیه‌سازی سیاست‌های مربوط به زیرسیستم منابع متحرک بر مجموع آلودگی تولید شده برحسب $PM_{2.5}$ در شکل ۱۳ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، اجرای همزمان چندین سیاست مختلف در حوزه منابع متحرک می‌تواند نتایج بهتری بر کاهش غلظت آلودگی هوا داشته باشد. در مقام مقایسه سیاست‌های مختلف بررسی شده در حوزه منابع متحرک می‌توان به‌ترتیب اثرگذاری، سیاست غیرحضوری کردن خدمات، سیاست ارتقای سطح فناوری وسایل نقلیه، سیاست ارتقای کیفیت معاینه فنی و سیاست برقی کردن وسایل نقلیه را نام برد.

- سیاست ارتقای کیفیت معاینه فنی، انتشار آلاینده‌های احتراقی انواع وسایل نقلیه و درنتیجه مجموع آلودگی منابع متحرک و آلودگی کل را کاهش می‌دهد.
- سیاست غیرحضوری کردن خدمات، با کاهش مسافت سفر، هم انتشار آلاینده‌های احتراقی و هم انتشار آلاینده‌های غیراحتراقی و درنتیجه مجموع آلودگی منابع متحرک و آلودگی کل را کاهش می‌دهد. همان‌طور که اشاره شد، انتشار آلاینده‌های غیراحتراقی ناشی از سایش لنت است و با کم شدن مسافت سفر کاهش می‌یابد. غیرحضوری کردن خدمات و بهره‌گیری از خدمات دولت الکترونیک و کاهش پراکندگی مراکز خدماتی می‌تواند راهکاری برای کاهش غلظت ذرات معلق ناشی از انتشار آلاینده‌های غیراحتراقی وسایل نقلیه باشد. ازسویی با کم شدن تعداد سفرها، انتشار آلاینده‌های احتراقی نیز کاهش می‌یابد؛ اما ازسوی دیگر کاهش سفرها و خلوت شدن معابر، باعث جذب سفرهای شخصی می‌شود.
- سیاست برقی کردن وسایل نقلیه موجب کاهش انتشار آلاینده‌های احتراقی و درنتیجه کاهش آلودگی منابع متحرک و مجموع آلودگی‌ها می‌شود.

شکل ۱۳. نمودار روند شبیه‌سازی شده اثر سیاست‌های مربوط به حوزه زیرسیستم منابع متحرک

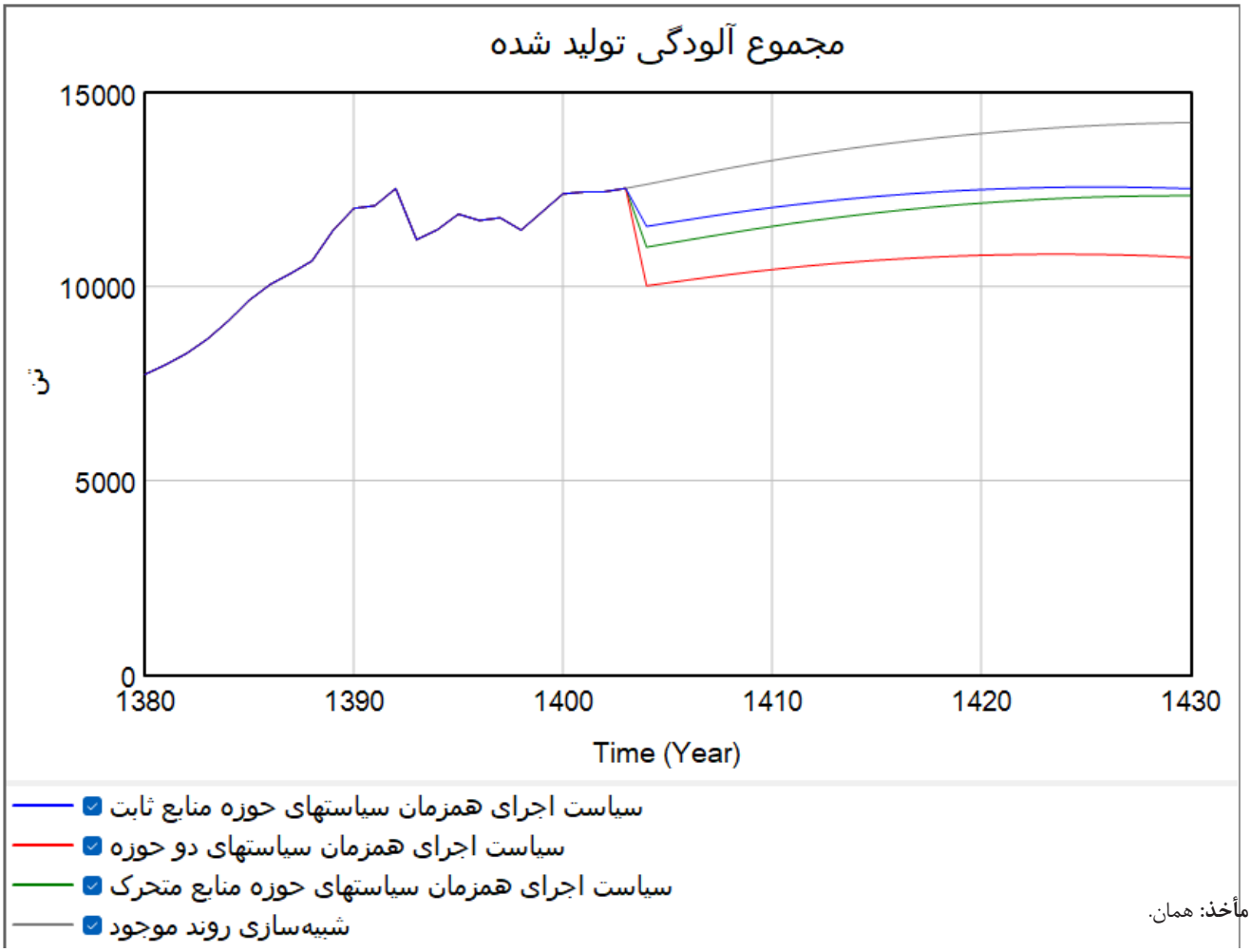


مأخذ: همان.

۳-۶. سیاستگذاری همزمان در دو حوزه منابع ثابت و متحرک

نتایج شبیه‌سازی سیاست‌های همزمان مربوط به زیرسیستم‌های منابع ثابت و متحرک بر مجموع آلودگی تولید شده بر حسب $PM_{2.5}$ در شکل ۱۴ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، اجرای همزمان سیاست‌های مختلف در هر دو حوزه منابع ثابت و متحرک (بسته سیاستی) می‌تواند کاهش غلظت آلودگی هوا را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. در مقام مقایسه سیاست‌های همزمان بررسی شده در حوزه منابع متحرک نسبت به سیاست‌های همزمان بررسی شده در حوزه منابع ثابت اثرگذاری بیشتری دارند.

شکل ۱۴. نمودار روند شبیه‌سازی شده اثر سیاست‌های مربوط به دو حوزه زیرسیستم منابع ثابت و متحرک



مأخذ: همان.

۷. جمع‌بندی و پیشنهادها

غلظت ذرات معلق آلاینده در هوا سهم قابل‌توجهی در تعداد روزهای ناسالم و بدتر در سال دارد که پیامدهای جبران‌ناپذیری شامل هزینه‌های بهداشتی و درمانی، هزینه‌های اقتصادی ناشی از تعطیلی صنایع و کاهش بهره‌وری و همچنین پیامدهای اجتماعی را به‌دنبال دارد. در این تحقیق با مدل‌سازی و تحلیل عوامل پویای ایجادکننده این آلاینده و تعیین روابط علّی و حلقوی بین آنها و بررسی زیرسیستم‌های منابع ثابت و منابع متحرک به‌عنوان منابع ایجادکننده آلودگی و زیرسیستم عوامل محیطی به‌عنوان منبع تشدید یا کاهش آلودگی، سیاست‌های پیشنهادی، شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل ارائه شدند.

سیاست‌های پیشنهادی در بخش منابع ثابت عبارت از سیاست اعطای تسهیلات به‌منظور نوسازی موتورخانه‌ها و عایق‌بندی ساختمان‌ها، اعمال مقررات و جرائم بر ضرورت استفاده از فیلترهای تصفیه آلاینده‌ها توسط نیروگاه‌ها و صنایع، ارتقای تکنولوژی صنایع، بهسازی نیروگاه‌ها و توسعه نیروگاه‌های سیکل ترکیبی و تجدیدپذیرند.

همچنین سیاست‌های پیشنهادی در بخش منابع متحرک شامل کاهش ترددهای غیرضروری با غیرحضوری کردن

خدمات یا استفاده از سرویس مشترک برای کارکنان اداره‌ها و سازمان‌ها، ارتقای کیفیت و جدیت در معاینه فنی خودروها و استفاده از کاتالیزورهای تصفیه آلاینده و برقی کردن وسایل نقلیه هستند.

در خاتمه باید گفت که کاهش قابل‌توجه آلودگی کلان‌شهر تهران نیازمند اجرای سیاست‌های همزمان (بسته سیاستی) در دو حوزه منابع ثابت و منابع متحرک است و هر سیاستی به‌تنهایی نمی‌تواند گامی مؤثر در راستای حل معضل آلودگی هوای شهر تهران باشد.

منابع و مآخذ

[1] Nasari, M. M., Szyszkowicz, M., Chen, H., Crouse, D., Turner, M. C., Jerrett, M., Pope, C. A., Hubbell, B., Fann, N., Cohen, A., Gapstur, S. M., Diver, W. R., Stieb, D., Forouzanfar, M. H., Kim, S.-Y., Olives, C., Krewski, D., & Burnett, R. T. (2016). Ac.

[2] World Bank. Iran—Energy: Environment Review Policy Note. Washington, DC. © World Bank.

[۳] فرتوک‌زاده، حمیدرضا و حسن اشراقی، (۱۳۹۴)، «مدل‌سازی دینامیکی اثر سیاست دوگانه‌سوز کردن خودروها بر میزان تولید آلودگی و مصرف انرژی»، فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، شماره ۱۹، صص ۲۵۵-۲۷۰.

[۴] بافنده‌زند، علیرضا و همکاران، (۱۳۹۸)، «مدل‌سازی انتشار مونواکسید کربن در شهر تبریز با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم»، پژوهش‌های محیط‌زیست، شماره ۱۰، صص ۲۵۵-۲۷۰.

[5] Shahgholian, K. and H. Hajihosseini, "A dynamic model of air pollution, health, and population growth using system dynamics: A study on Tehran-Iran (with computer simulation by the software Vensim)", International Journal of Computer and Systems Engineering.

[6] Armah, F.A., D.O. Yawson, and A.A. Pappoe, (2010), "A systems dynamics approach to explore traffic congestion and air pollution link in the city of Accra, Ghana", Sustainability, Vol 2, No 1, pp 252-265..

[7] Vafa-Arani, H., et al., (2014), "A system dynamics modeling for urban air pollution: A case study of Tehran, Iran", Transportation Research Part D: Transport and Environment, No 31: pp 21-36.

[8] Goodarzi, F., et al., (2016), "System dynamics modelling of air pollution in megacities: An investigation in megacity of Tehran", Applied environmental and biological sciences, Vol 6, No 8, pp 7-13.

[9] Guzman, L.A. and J.P. Orjuela, (2017), "Linking a transport dynamic model with an emissions model to aid air pollution evaluations of transport policies in Latin America". Transportmetrica B: Transport Dynamics, Vol 5, No 3, pp 265-280.

[10] Moraga, R. and E.R. Hosseinabad, (2017), "A system dynamics approach in air pollution mitigation of metropolitan areas with sustainable development perspective: a case study of Mexico City", Journal of Applied Environmental and Biological Sciences, Vol 7, No 12.

[11] Yao, C., et al., (2020), Research on Air Pollution Control Measures Based on System Dynamics A

Case Study of Beijing. in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing.
[12] Shahsavari-Pour, N., et al., (2022), "Analyzing Tehran's Air Pollution Using System Dynamics Approach", Sustainability, Vol 14, No 3, p 1181.
[13] Chen, Z., Z. Zan, and S. Jia, (2022), "Effect of urban traffic-restriction policy on improving air quality based on system dynamics and a non-homogeneous discrete grey model", Clean technologies and environmental policy, Vol 24, No 8, pp 2365-2384.
[14] Khan, S., et al., (2023), "Modelling the Impact of Road Dust on Air Pollution: A Sustainable System Dynamics Approach", in E3S Web of Conferences, EDP Sciences.
[15] https://rtmz.ir/assets/visitors/assets/rahbordi_file/3.pdf.
[۱۶] شکوهمند حسین، آلودگی محیط زیستی ناشی از سوزاندن زباله.
[17]https://ier.tums.ac.ir/uploads/24/2023/Apr/19/%D9%85%D8%B7%D8%A7%D9%84%D8%B9%D9%87%2012%20%D8%B3%D8%A7%D9%84%D9%87%20%DA%A9%DB%8C%D9%81%DB%8C%D8%AA%20%D9%87%D9%88%D8%A7%DB%8C%20%D8%AA%D9%87%D8%B1%D8%A7%D9%86.pdf/
[18] https://mcsst.ir/wp-content/uploads/2023/09/FSG-SMSD-1636.pdf/
[۱۹] ترازنامه انرژی (https://pep.moe.gov.ir/).
[20] https://amar.thmporg.ir/.
[۲۱] سالنامه آماری شهرداری تهران
(https://www.amar.org.ir/salnameh-amari).
[۲۲] سیاهه انتشار آلاینده‌های هوای کلان‌شهر تهران منتشر شده در سال ۱۳۹۲،
(https://hshahbazi.ir/fa/report).
[۲۳] مرکز تحقیقات آلودگی هوا، پژوهشکده محیط زیست دانشگاه علوم پزشکی تهران.
[۲۴] بررسی شرایط کیفی هوای تهران از سال ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۱ با تمرکز بر آلاینده های PM10 و PM2.5 .

گزیده سیاستی

کاهش قابل توجه آلودگی هوای کلان‌شهر تهران نیازمند اجرای سیاست‌های همزمان (بسته سیاستی) در دو حوزه منابع ثابت و منابع متحرک است و هر سیاستی به‌تنهایی نمی‌تواند گامی مؤثر در راستای حل معضل آلودگی هوای شهر تهران باشد.

مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی

تهران، خیابان پاسداران، روبروی پارک نیاوران (ضلع جنوبی، پلاک ۸۰۲)

تلفن: ۷۵۱۸۳۰۰۰ صندوق پستی: ۵۸۵۵-۱۵۸۷۵ پست الکترونیک: mrc@majles.ir

وب‌سایت: rc.majles.ir