Journal of Environmental Research
Vol. 14, No. 27, Spring & Summer 2023

Journal Homepage: www.iraneiap.ir
Print ISSN: 2008-9597 Online ISSN 2008-9590

Predicting the Impact of Using Euro 5 Gasoline on Air Pollution Levels in the City of Shiraz

Document Type
Research Paper

Received
2023/02/14

Accepted
2023/06/12

Ali Hossein Ostadzad[*1], Ghasem Nahavandi[2], Golafarin Zare[3]

1. Assistant Professor, Department of Economics, University of Larestan, Fars, Iran
2. Deputy Supervisor and Monitoring of the Fars, Department of the Environment, Fars, Iran
3. Head of Fars Environmental Research and Technology Department, Department of the Environment, Fars, Iran

DOI: 10.22034/eiap.2023.179281

Abstract

If we be aware of the trend of air pollution and the factors affecting pollution, we can reduce these factors and think of important measures for them and work to protect the environment, including the air, which in turn reduces the long run social and economic costs of pollution. The Euro 5 emissions's standard has been implemented in EU member states since 2009. This law was supposed to be implemented in Iran from 2012, but it faced many obstacles. In this study, due to growing trend of pollution in major cities of the Iran, the emission of carbon monoxide (an indicator of pollution) has been simulated using the system dynamics approach in the period 2021-2042 for the city of Shiraz (as a case study). By continuing the current situation, the population of Shiraz increases through two natural population growth and migration. Appropriate air pollution control strategies have been proposed using public transportation, technical inspection, traffic management, and the offer of alternative fuels. Based on the simulation results in different scenarios, replacing Euro 4 gasoline with Euro 5, carbon monoxide emissions in Shiraz will be significantly reduced in the long run. Otherwise, the continuation of the current trend in 1420, carbon monoxide will become a serious challenge for the city of Shiraz.

Keywords: Air Pollution, System Dynamics, Shiraz, Simulation, Euro 5

* Corresponding author: Email: a.ostadzad@lar.ac.ir

Introduction

Pollution refers to introducing contaminants into the environment, causing harm to living organisms, and disrupting the natural order. With their concentrated industrial and vehicular activities, cities have become significant sources of air pollution. The global increase in air pollution and growing awareness among individuals have fueled the environmental movement, aiming to mitigate the negative impacts of production on the environment. Strategies and technologies exist to reduce air pollution, including proper land use, urban planning, and transportation infrastructure design.

One significant contributor to air pollution is the combustion of fossil fuels like coal and oil. Reducing their usage or transitioning to cleaner fuels can significantly decrease air pollution. Clean energy sources such as wind, solar, and hydropower are vital in mitigating air pollution as they do not release harmful emissions.

Without effective environmental policies, the concentration of pollutants in Shiraz City is projected to exceed permissible limits, leading to short-term and long-term adverse effects. Identifying pollution sources is crucial but time-consuming in air pollution modeling. Modeling air pollution requires the consideration of multiple variables to understand, analyze, and plan for the issue. Implementing specific measures can bring noticeable improvements to air quality in cities. This study aims to develop a model that identifies the main factors contributing to air pollution in Shiraz, examines the causes and sources of pollutants, and provides forecasts to facilitate necessary actions and planning for pollution management and control. One focus of this study is the use of higher-standard fuels to reduce pollution.

In Shiraz, continued reliance on fossil fuel consumption and the growth of other pollution sources (such as population, migration, traffic, energy consumption, and aging vehicles) will increase air pollution. The rising number of private cars and increased gasoline usage are significant contributors. This trend can be mitigated by implementing various scenarios, such as promoting CNG-fueled vehicles, reducing monthly travel rates, and expanding green spaces in Shiraz to reduce air pollution.

In 2000, the "Comprehensive Program to Combat Air Pollution in Tehran" was developed and approved to achieve clean and breathable air in the capital within 10 years. The program encompasses seven key areas, including standardizing new vehicles, phasing out old vehicles, enhancing public transportation, improving fuel quality, implementing technical vehicle inspections, managing traffic, and conducting public education. The program was implemented in collaboration with various entities, including the Ministry of Industries, the Ministry of Oil, the Environmental Protection Organization, the Tehran Municipality, and the Traffic Police.

A comprehensive transportation and traffic plan for Tehran was prepared and approved in 2007. This plan not only focuses on expanding and enhancing the quality of public transit but also emphasizes the phase-out of old cars and motorcycles, the production of dual-fuel vehicles, and the expansion of compressed natural gas availability. These objectives are aligned with Iran's fourth economic development plan and are integrated into this comprehensive plan.

While most pollution modeling studies have focused on Tehran, it is essential to note that other major cities will also face pollution challenges in the near future. This study aims to address this gap by modeling pollution in Shiraz. The goal is to simulate pollution and explore various scenarios to reduce pollution levels. The impacts of each scenario on pollution will be examined, and the most effective scenario for reducing pollution in Shiraz will be proposed to policymakers.

Using a system dynamics approach, this research will simulate the emission of environmental pollutants, explicitly focusing on air pollution, from 2020 to 2041. Six key variables will be considered: fossil fuel consumption, urban development, traffic, the number of personal vehicles, industrial development, and green space. Cause-effect diagrams and flow charts will be created by establishing the interrelationships among these variables. Mathematical functions and relations, derived from valid theories and expert opinions, will be used to define the behavior and impacts of these variables on each other, leading to simulation.

Considering the unique factors influencing urban growth in each city under study, and the lack of emphasis on identifying the most influential factors on population growth in Shiraz, it is essential to conduct a distinctive study for this city. Urban development and population migration from rural to urban areas are significant global phenomena. Despite facing challenges such as transportation and traffic, limited investment and financial resources, heterogeneous neighborhood structures, safety concerns, and environmental pollution, Shiraz still possesses growth potential and remains an attractive destination for migration. However, without proper planning, the city's population growth and expansion will exacerbate existing problems and create new ones, including environmental issues and air pollution.

In conclusion, air pollution is a critical issue that requires assessment as the first step. Therefore, the importance of this research lies in examining the levels of pollutants, such as carbon monoxide, carbon dioxide, and other pollutants in Shiraz's air. The study also aims to analyze the role and behavior of social and economic variables in air pollution over time. Ultimately, the research seeks to formulate a dynamic hypothesis on air pollution in Shiraz, filling a gap in existing studies on this topic.

Research Method

Given the complex and dynamic nature of the issue, the System Dynamics method was employed in this study. System Dynamics combines quantitative and qualitative analysis to understand the behavior of complex systems. It has various applications, including policy development and environmental protection. In modeling the spread of carbon monoxide in Shiraz City, the study followed the five stages proposed by Sterman. The first stage involved problem framing, which included examining the historical trends of carbon monoxide dispersion and identifying key variables within the model. Documentary data collection methods were utilized at this stage. The second stage focused on formulating dynamic hypotheses of the problem, identifying the underlying structures that drive the system's behavior using subsystem diagrams, causal loop diagrams, and flow-stock maps. Dynamic hypotheses were formulated based on information from the literature and expert opinions. The third stage involved formulating the simulated model by estimating parameters, establishing mathematical relationships between variables, and determining initial conditions. Some parameters and functions were derived from the existing research literature, while others were evaluated based on logical relationships between variables. The model was then simulated using the Vensim software. The fourth stage focused on testing the simulated model, and the fifth stage involved designing, evaluating, and suggesting policies and scenarios for reducing carbon monoxide levels in Shiraz City. These policies were inputted into the simulated model using Vensim software, and the results were obtained in the form of diagrams illustrating the dispersion of carbon monoxide under the influence of these policies.

Results

The Euro 5 pollution standard was implemented in the member states of the European Union in 2009 and was intended to be adopted in Iran starting in 2011, but it faced challenges in practical implementation. As the number of vehicles increased and atmospheric studies indicated rising pollutant levels, governments and legislative bodies worldwide began efforts to reduce vehicle emission levels. In line with these developments, the European Union established the Euro emission standards, which limit pollutant gas emissions from vehicles sold in EU countries. Under the Clean Air Act, automakers were required to produce vehicles in compliance with the Euro 5 standard starting in 2019. However, due to sanctions, the implementation of this law was delayed by a year, and it was expected to be enforced from the first of Farvardin 2020. It is hoped that in the coming years, the number of Euro 5 cars in the country will increase, leading to improved air quality in metropolitan cities.

The first scenario evaluated in this study was the continuation of the current state. Simulation results revealed that without any intervention, the level of carbon monoxide pollution in the air of Shiraz would significantly increase, reaching 24 ppm by 1420. This increase is attributed to population growth and urbanization, which contribute to direct and indirect carbon monoxide emissions. Direct emissions arise from energy consumption in infrastructure and transportation, while indirect emissions stem from industrial production and household consumption of goods and services. Strategies such as promoting public transportation, implementing technical inspections, managing traffic, and proposing alternative fuels are recommended to control air pollution effectively.

The second scenario examined the replacement of Euro 4 gasoline with Euro 5, considering domestic automakers may be hesitant to produce Euro 5 vehicles. By implementing this scenario and transitioning to Euro 5 gasoline consumption starting from 2023, the carbon monoxide emission factor would reduce to 0.1 grams per liter (compared to 0.3 grams per liter with Euro 4 gasoline). This change would lead to a significant decrease in carbon monoxide levels in the air. It is projected that by 1420, the emissions will reach 11.4 ppm. However, even with the implementation of this scenario, the upward trend of carbon monoxide emissions would persist. Therefore, adopting additional policies concurrently with this measure is crucial to address the issue effectively.

پژوهش‌های محیط‌زیست، سال ۱٤، شماره ۲۷، بهار و تابستان ۱٤۰۲، از صفحه ۳ تا ۲۳

پیش‌بینی تاثیر استفاده از بنزین یورو ۵ بر وضعیت انتشار آلودگی هوا در شهر شیراز

علی حسین استادزاد[۱]، قاسم نهاوندی[۲]، گل آفرین زارع[۳]

۱. دکتری اقتصاد، عضو هیات علمی مجتمع آموزش عالی لارستان، ایران
۲. کارشناسی ارشد شیمی فیزیک، معاون نظارت و پایش اداره کل محیط زیست فارس، ایران
۳. دکتری برنامه ریزی محیط زیست، رئیس اداره تحقیقات و فناوری اداره کل محیط زیست فارس، ایران

تاریخ وصول مقاله: ۱٤۰۱/۱۱/۲۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱٤۰۲/۰۳/۲۲

چکیده

با آگاهی از روند آلودگی هوا و عوامل تاثیر گذار بر انتشار آلودگی هوا، برای کنترل این عوامل می‌توان تدابیر مهمی اندیشید و در راستای حفظ محیط زیست و از جمله کیفیت هوا برآمد. با توجه به روند رو به رشد آلایندگی در شهرهای بزرگ کشور در این پژوهش به عنوان یک مورد مطالعاتی با استفاده از رویکرد پویایی شناسی سیستم، انتشار آلاینده مونواکسیدکربن (شاخصی از آلودگی هوا) در دوره زمانی ۱۳۹۹–۱۴۲۰ برای شهر شیراز شبیه‌سازی شده است. هدف از این پژوهش مدل‌سازی انتشار آلاینده مونواکسیدکربن و ارزیابی سیاست استفاده از بنزین یورو ۵ به جای یورو ۴ جهت کاهش و یا کنترل آلودگی هوای شهر شیراز در بلند مدت می‌باشد. جمعیت شهر، حجم ترافیک، توسعه شهر و شهرنشینی، فضای سبز، مهاجرت، مصرف سوخت‌های فسیلی بر اساس ادبیات تحقیق به عنوان متغیرهای کلیدی موثر در تولید مونواکسیدکربن در نظر گرفته شده‌اند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی در سناریوهای مختلف، با جایگزینی بنزین یورو چهار با بنزین یورو پنج، انتشار مونواکسیدکربن در شهر شیراز به صورت قابل توجهی در بلند مدت کاهش خواهد یافت. در غیر این صورت و ادامه روند فعلی در سال ۱۴۲۰ مونواکسیدکربن به یک چالش جدی برای شهر شیراز تبدیل خواهد شد.

کلید واژه‌ها: آلودگی هوا، پویایی‌شناسی سیستم، شیراز، شبیه‌سازی، یورو ۵

*نویسنده مسئول: Email: a.ostadzad@lar.ac.ir

DOI: 10.22034/eiap.2023.179281
DOR: 20.1001.1.20089597.1402.14.27.1.3

سرآغاز

بر اساس مطالعه (Komilovna, 2019) آلودگی به ورود آلاینده‌ها به یک محیط که باعث ناپایداری، اختلال، آسیب یا ناراحتی برای موجودات زنده شود، گفته می‌شود. بر اساس مطالعه (Carrington, 2017) در سال ۲۰۱۵ آلودگی هوا باعث مرگ ۹ میلیون انسان شده است. این در حالی است که بر اساس گزارشی از سازمان جهانی بهداشت، آلودگی هوا در سال ۲۰۱۲ باعث مرگ ۷ میلیون انسان در سراسر جهان بوده است، که این از نکات مهمی است که می‌تواند توجیهی برای انجام مطالعات در زمینه کاهش آلودگی هوا باشد (Piqueras & Vizenor, 2016) . این آمارهای هشدار دهنده افزایش مرگ و میر ناشی از آلودگی هوا و نشانی از اهمیت موضوع است. وجود دستگاه‌های فراوان (صنعتی و خودرویی) در یک منطقه به صورت متراکم باعث شده است که شهرها منبع اصلی ایجاد آلودگی هوا شوند. افزایش میزان آلودگی هوا در جهان و همچنین افزایش افراد آگاه، سبب شکل‌گیری جنبش محیط‌زیست شده است، که هدف اصلی آن کاهش اثرات منفی محیط‌زیستی ناشی از تولید کالای نهایی می‌باشد (Currell & Han, 2017).

استراتژی‌ها و تکنولوژی‌های مختلفی برای کاهش آلودگی هوا وجود دارد، ابتدایی‌ترین مرحله، استفاده صحیح از زمین و برنامه‌ریزی کاربری آن و تعیین و طراحی زیرساخت‌های حمل و نقل می‌باشد (Díaz, G., et al. 2020).

در اکثر کشورهای توسعه یافته، برنامه‌ریزی کاربری اراضی بخش مهمی از سیاست‌های اجتماعی است که تضمین می‌کند از زمین با بهره‌وری مناسب، به نفع اقتصاد و جمعیت گسترده‌تر استفاده می‌شود و همچنین حفاظت از محیط‌زیست در نظر گرفته شده است. با توجه به این که بخش زیادی از آلودگی هوا بر اثر احتراق مشتقات سوخت‌های فسیلی مانند زغال سنگ و نفت ایجاد می‌شود، کاهش استفاده از این سوخت‌ها و یا استفاده از سوخت‌های با استاندارد بالاتر می‌تواند باعث کاهش شدید آلودگی هوا شود. موثرترین این روش‌ها استفاده از منابع انرژی پاک مانند انرژی‌های بادی، خورشیدی و آبی است که باعث آلودگی هوا نمی‌شوند (Novan, 2015; Rahman et al., 2017) .

همچنین جایگزینی خودروهای بنزینی با خودروهایی با سوخت‌های با آلایندگی کمتر مانند خودروهای گازسوز یا استفاده از خودروهای تمام برقی، می‌تواند به کاهش آلودگی هوا کمک کند (Wu & Zhang, 2017). در آینده‌ای نه چندان دور در صورتی که سیاست‌های صحیح محیط‌زیستی برای کنترل آلودگی هوا صورت نگیرد، غلظت آلاینده‌های شهر شیراز در بسیاری از موارد و در روزهای بسیاری از سال، چندین برابر حد مجاز خواهد شد، که اثرات سوء کوتاه و بلندمدت را به دنبال دارد.

شناسایی منابع آلاینده از مهم ترین و زمان برترین مراحل مدل سازی آلودگی هواست. برای مدل سازی آلودگی هوای یک منطقه نمی‌توان تنها یک متغیر را در نظر گرفت؛ بلکه باید متغیر های فراوانی را مورد مطالعه، بررسی و برنامه‌ریزی قرار داد. برخی اقدامات، تغییرات محسوسی در وضعیت آلودگی هوای کلان شهرها ایجاد می‌کند. بنابراین، انجام یکسری اقدامات می‌تواند کاهش آلودگی هوا را به دنبال داشته باشد که اتخاذ روش های نوین سنجش آلاینده‌های هوا یکی آنهاست. هدف اصلی این تحقیق ارایه مدلی است که به کمک آن بتوان عوامل اصلی آلودگی هوا در کلان شهر شیراز را مشخص و با بررسی علل و عوامل تولید این آلاینده‌ها و پیش‌بینی آلودگی هوا، اقدامات و برنامه‌ریزی‌های لازم در راستای مدیریت و کنترل آلودگی هوا را انجام داد. یکی از این موارد استفاده از سوخت با استاندارد آلایندگی بالاتر است. که هدف اصلی این تحقیق بررسی این سیاست می‌باشد. با ادامه روند کنونی مصرف سوخت‌های فسیلی و رشد دیگر منابع انتشار آلودگی هوا (مانند جمعیت، مهاجرت، ترافیک، مصرف انرژی فسیلی، تعداد خودروهای فرسوده و ...) در کلان شهر شیراز، آلودگی هوا افزایش خواهد یافت. از عمده‌ترین دلایل این افزایش می‌توان به افزایش تعداد خودروهای شخصی در شهر شیراز که منجر به افزایش استفاده از بنزین می‌شود اشاره کرد. این منجر به افزایش تعداد روزهای آلاینده در شهر شیراز خواهد شد. اما در این روند امکان کاهش آلودگی هوا با اجرای سناریوهای مختلف مانند استفاده از خودروهای با سوخت CNG و کاهش نرخ معمول سفرهای ماهانه، توسعه فضای سبز در شهر شیراز و ... امکان‌پذیر خواهد بود.

در مطالعه (Vafa- Arani et al., 2014) یک مدل پویایی سیستم به منظور برآورد رفتار پارامترهای موثر بر آلودگی هوای تهران ارایه شده است. مدل پیشنهادی شامل دو زیر سیستم است: ۱. حمل و نقل شهری، ۲. صنایع آلاینده هوا. در مطالعه فوق، چندین سیاست برای کاهش آلودگی هوا ارایه شده است. نتایج نشان می‌دهد که سیاست‌های بهبود فناوری در صنایع سوخت‌رسانی خودرو و بهبود زیرساخت‌های حمل و نقل در جهت کاهش آلودگی

هوا موثر هستند.

در مطالعه (Jia, Liu, & Yan, 2019) به منظور بررسی تاثیر سیاست هزینه آلودگی هوا (APCF)[1] بر انتشار آلودگی در چین، یک مدل مدیریت پویایی با رویکرد پویایی سیستم طراحی و با استفاده از نرم‌افزار Vensim پیاده سازی شده است. این مدل برای شبیه‌سازی و ارزیابی تاثیر سیاست APCF بر ترافیک و میزان انتشار آلودگی (به ویژه مونوکسیدکربن (CO)، هیدروکربن (HC) و ذرات معلق (PM)) در پکن در طول سال‌های ۲۰۱۱- ۲۰۲۵ در سناریوهای مختلف طراحی شده است. روایی و اعتبار مدل توسط آزمون مدل و اعتبارسنجی مدل تأیید می‌شود و با استفاده از تحلیل حساسیت، محدوده معقولی از APCF تعیین شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که سیاست APCF به طور موثر سناریوی «برد- برد» کاهش انتشار را تحقق می‌بخشد. به طور خاص، نتایج شبیه‌سازی همچنین برخی از تاثیرات سیاست مانند اثر برگشت (از سیاست APCF پایین)، اثر نقطه انعطاف (از سیاست APCF بالا) و اثر کاهش حاشیه‌ای (بین سیاست APCF متوسط و بالا) را نشان می‌دهد.

در مطالعه (Shahgholian & Hajihosseini, 2009) آلودگی هوای تهران و ارتباط آن با سلامت جامعه و رشد جمعیت با استفاده از مدلسازی سیستم‌های پویا تحلیل شده است. در مرحله اول، با استفاده از حلقه‌های علیتی، رابطه بین پارامترهای موثر در آلودگی هوای تهران در نظر گرفته شده است، سپس این حلقه‌های علیتی به نمودار جریان تبدیل شده‌اند و سرانجام، مدل بسط داده شده با استفاده از نرم‌افزار Vensimشبیه‌سازی شده اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ۱. افزایش وزش باد، به عنوان یک پارامتر که تحت کنترل ما نیست، نقشی اساسی در تضعیف وارونگی دما و کاهش آلودگی هوا دارد. ۲. تنظیم موتور مداوم اتومبیل، می‌تواند در کاهش آلودگی هوا موثر باشد. ۳. برنامه و خط‌مشی کاهش میزان مهاجرت به تهران، در بلند مدت می‌تواند مانع از رشد بی‌رویه جمعیت و افزایش آلاینده‌های صنعتی گردد. که با کنترل این دو مورد در نهایت منجر به یک کاهش قابل توجهی در آلودگی هوا می‌گردد. ۴. استفاده از فیلترهای بیشتر برای آلاینده‌های تولید شده در کارخانه‌ها در یک برنامه بلند مدت تاثیر بسیار زیادی در کاهش آلودگی هوای تهران خواهد داشت. ۵. افزایش استفاده از بنزین بدون سرب باعث کاهش آلودگی هوا تا حد مطلوب خواهد شد. ۶. با کاهش تعداد اتومبیل‌های قدیمی و انتقال کارخانه‌ها به خارج از شهرها، ما می‌توانیم شاهد کاهش آلودگی هوا در بلندمدت باشیم. ۷. تنظیم محدودیت‌های ترافیکی بر اساس پلاک‌های اتومبیل، به عنوان یک برنامه مهم، تاثیر بسیار زیادی در کاهش آلودگی هوا خواهد داشت.

برنامه‌ای تحت عنوان «برنامه جامع مبارزه با آلودگی هوای تهران» در سال ۱۳۷۹ طراحی و تصویب شد تا طبق این برنامه ظرف مدت ۱۰ سال هوای پایتخت به کیفیت سالم و قابل تنفس برسد. این برنامه شامل ۷ محور ذیل می‌باشد: استانداردسازی خودروهای نو، از رده خارج کردن خودروهای فرسوده، ارتقای حمل و نقل عمومی، بهبود کیفیت سوخت، معاینه فنی خودروها، مدیریت ترافیک و آموزش همگانی. این برنامه با همکاری وزارت صنایع، وزارت نفت، سازمان حفاظت محیط زیست، شهرداری تهران و پلیس راهنمایی و رانندگی به اجرا درآمد. در پی آن در پاییز ۱۳۸۶ «طرح جامع حمل و نقل و ترافیک تهران تهیه و تصویب شد. در ارتباط با کاهش آلودگی هوا، این طرح– علاوه بر گسترش و بهبود کیفیت حمل و نقل عمومی، از رده خارج کردن کلیه خودروها و موتورسیکلت‌های فرسوده، تولید خودروهای دوگانه‌سوز و همچنین توسعه عرضه گاز طبیعی فشرده، که از اهداف برنامه چهارم توسعه اقتصادی ایران هستند و در این طرح نیز گنجانده شده‌اند.

از دیگر مطالعات در زمینه کاربرد سیستم‌های پویا در مدلسازی آلودگی شهرهای مختلف می‌توان به مطالعات (Moraga & Rabiei Hosseinabad, 2017; Armah et al., 2010; Hosseinabad & Moraga, 2017; Vallero, 2014; Jia et al., 2019; Feng et al., 2013; Beckx et al., 2009; Goodarzi et al., 2016) اشاره کرد. همان گونه که مشاهده می‌شود بیشتر مطالعات داخل در زمینه مدلسازی آلودگی مربوط به شهر تهران می‌باشد. این در حالی است که تمام کلان شهرها مشکل آلودگی مانند تهران را در آینده‌ای نه چندان دور خواهند داشت. با توجه به این که تا کنون برای شهر شیراز مدلسازی برای آلودگی انجام نشده است در این تحقیق به دنبال مدلسازی کاربردی آلودگی شهر شیراز می‌باشیم. پس از مدلسازی سناریوهای مختلف برای کاهش آلودگی تعریف خواهد شد و تاثیر هر سناریو بر آلودگی بررسی می‌گردد. در نهایت به سیاست‌گذار بهترین سناریو با بیشترین اثرگذاری برای کاهش آلودگی شهر شیراز پیشنهاد خواهد شد.

در این پژوهش با استفاده از رویکرد پویایی سیستم، انتشار آلاینده‌های محیطزیستی (هوا) در دوره زمانی مشخص ۱۳۹۹– ۱۴۲۰ شبیه‌سازی خواهد شد. در این مطالعه شش متغیر کلیدی

مصرف سوخت‌های فسیلی، توسعه شهرنشینی، ترافیک، تعداد خودروهای شخصی در منطقه، توسعه صنعتی و فضای سبز در نظر گرفته خواهد شد. پس از تعیین متغیرها و چگونگی ارتباط آنها با یکدیگر نمودارهای علت- معلولی و حالت و جریان را تشکیل داده و سپس با کمک گرفت از نظریه‌های معتبر در حوزه ادبیات مساله و افراد خبره و متخصص در این حوزه چگونگی رفتار و اثرگذاری متغیرها بر یکدیگر در قالب روابط و توابع ریاضی تعریف شده و در گام بعدی اقدام به شبیه‌سازی خواهد شد.

با توجه به منحصر به فرد بودن عوامل موثر بر رشد شهر در هر منطقه شهری مورد مطالعه و عدم تمرکز مطالعات پیشین بر یافتن موثرترین عوامل بر رشد جمعیت کلان‌شهر شیراز، این شهر نیازمند مطالعه‌ای منحصر به‌فرد در این خصوص است. توسعه شهری و مهاجرت جمعیت از روستاها به شهرها از مهمترین پدیده‌های جهانی است (Niu et al., 2019). بنابراین، شیراز به‌عنوان یکی از مهمترین مناطق شهری، اگر چه با مشکلات و محدودیت‌های بسیاری از جمله وضعیت حمل‌ونقل شهری و ترافیک؛ سرمایه‌گذاری و کمبود منابع مالی ارزی و ریالی، ساختار ناهمگون کالبدی محله‌ها، ایمنی و آلودگی‌های محیط‌زیستی مواجه است. ولی همچنان بسیاری از امکانات در شهر شیراز مستعد رشد و توسعه بوده و جذابیت زیادی برای مهاجرت خواهد داشت. با توجه به رشد جمعیت و وسعت شهر شیراز و عدم پیش‌بینی راهکارهای مناسب، در آینده مشکلات بیشتری (از جمله مشکلات محیط‌زیستی و آلودگی هوا) برای شهر ایجاد خواهد شد.

رشد و گسترش شهر فرآیندی است که بر تمام نظام‌ها و ساختارهای شهر به طور مستقیم یا غیرمستقیم تاثیر می‌گذارد. رشد شهری یک نظام پیچیده است، که شامل ابعاد فیزیکی، اقتصادی، اجتماعی و محیطی است (Bai et al., 2018). توسعه شهری و مهاجرت جمعیت از روستاها به شهرها از مهمترین پدیده‌های جهانی است. همچنین روند تشکیل و رشد شهرها و کلان شهرها در کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه متفاوت است. یکی از تفاوت‌های مهم شهرنشینی کشورهای در حال توسعه با توسعه‌یافته، ناهم‌زمانی سطح صنعتی شدن با سطح شهرنشینی بوده است. در کشورهای توسعه یافته، شهرنشینی با صنعتی شدن آغاز شده و با آن ادامه یافته است؛ در حالی‌که در کشورهای در حال توسعه، شهرنشینی برون‌زا بیشتر بر پایه رشد خدمات شکل گرفته است که نتیجه آن تمرکز جمعیت در مراکز شهری خود روی جهان سوم و گرایش بیشتر شهروندان به بخش خدمات بوده است، به گونه‌ای که برخی پژوهشگران، شهرنشینی در این‌گونه کشورها را شهرنشینی خدماتی یا شهرنشینی بخش سومی خوانده‌اند (Gong et al., 2017).

درنهایت می‌توان اذعان داشت که بحث پیرامون آلودگی هوا از جنبه‌های مختلف دارای اهمیت می‌باشد و اولین گام درزمینه آلودگی هوا ارزیابی است؛ بنابراین اهمیت و ارزش این پژوهش در بررسی وضعیت آلاینده مونواکسیدکربن، دی‌اکسیدکربن و گازهای آلاینده دیگر در هوای شهر شیراز، بررسی نقش و نحوه رفتار متغیرهای اجتماعی و اقتصادی در آلودگی هوای شهر شیراز در طول زمان و در نهایت تدوین فرضیه پویای آلودگی هوای شهر شیراز می‌باشد.

محدوده و قلمرو مورد مطالعه

این بخش از تحقیق شامل مروری بر مطالعات مشابه با مطالعه حاضر می‌باشد. در مطالعه (Vafa-Arani et al., 2014) یک مدل پویایی سیستم به منظور برآورد رفتار پارامترهای موثر بر آلودگی هوای تهران ارایه شده است. مدل پیشنهادی شامل دو زیر سیستم است: ۱. حمل و نقل شهری، ۲. صنایع آلاینده هوا. در مطالعه فوق، چندین سیاست برای کاهش آلودگی هوا ارایه شده است. نتایج نشان می‌دهد که سیاست‌های بهبود فناوری در صنایع سوخت رسانی خودرو و بهبود زیرساخت‌های حمل و نقل در جهت کاهش آلودگی هوا موثر هستند.

در مطالعه (Jia, et al. ,2019) به منظور بررسی تاثیر سیاست هزینه آلودگی هوا بر انتشار آلودگی در چین، یک مدل مدیریت پویایی با رویکرد پویایی سیستم طراحی و با استفاده از نرم‌افزار Vensim پیاده سازی شده است. این مدل برای شبیه‌سازی و ارزیابی تاثیر سیاست APCF بر ترافیک و میزان انتشار آلودگی (به ویژه مونوکسیدکربن (CO)، هیدروکربن (HC) و ذرات معلق (PM)) در پکن در طول سال‌های ۲۰۱۱- ۲۰۲۵ در سناریوهای مختلف طراحی شده است. اعتبار مدل توسط آزمون مدل و اعتبارسنجی مدل تایید می‌شود و با استفاده از تحلیل حساسیت، محدوده معقولی از APCF تعیین شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که سیاست APCF به طور موثر سناریوی «برد- برد» کاهش انتشار را تحقق می‌بخشد. به طور خاص، نتایج شبیه‌سازی همچنین برخی از تاثیرات سیاست مانند اثر برگشت (از سیاست APCF پایین)، اثر نقطه انعطاف (از سیاست APCF بالا) و اثر کاهش حاشیه‌ای (بین سیاست APCF متوسط و بالا) را نشان

می‌دهد.

در مطالعه (Shahgholian & Hajihosseini, 2009) آلودگی هوای تهران و ارتباط آن با سلامت جامعه و رشد جمعیت با استفاده از مدلسازی سیستم‌های پویا تحلیل شده است. در مرحله اول، با استفاده از حلقه‌های علیتی، رابطه بین پارامترهای موثر در آلودگی هوای تهران در نظر گرفته شده است، سپس این حلقه‌های علیتی به نمودار جریان تبدیل شده‌اند و سرانجام، مدل بسط داده شده با استفاده از نرم‌افزار Vensimشبیه‌سازی شده اند. نتایج تحقیق (Shahgholian & Hajihosseini, 2009) نشان می‌دهد که ۱. افزایش وزش باد، به عنوان یک پارامتر که تحت کنترل ما نیست، نقشی اساسی در تضعیف وارونگی دما و کاهش آلودگی هوا دارد. ۲. تنظیم موتور مداوم اتومبیل، می‌تواند در کاهش آلودگی هوا موثر باشد. ۳. برنامه و خط‌مشی کاهش میزان مهاجرت به تهران، در بلند مدت می‌تواند مانع از رشد بی‌رویه جمعیت و افزایش آلاینده‌های صنعتی گردد. که با کنترل این دو مورد در نهایت منجر به یک کاهش قابل توجهی در آلودگی هوا می‌گردد. ۴. استفاده از فیلترهای بیشتر برای آلاینده‌های تولید شده در کارخانه‌ها در یک برنامه بلند مدت تاثیر بسیار زیادی در کاهش آلودگی هوای تهران خواهد داشت. ۵. افزایش استفاده از بنزین بدون سرب باعث کاهش آلودگی هوا تا حد مطلوب خواهد شد. ۶. با کاهش تعداد اتومبیل‌های قدیمی و انتقال کارخانه‌ها به خارج از شهرها، ما می‌توانیم شاهد کاهش آلودگی هوا در بلندمدت باشیم. ۷. تنظیم محدودیت‌های ترافیکی بر اساس پلاک‌های اتومبیل، به عنوان یک برنامه مهم، تاثیر بسیار زیادی در کاهش آلودگی هوا خواهد داشت.

از دیگر مطالعات در زمینه کاربرد سیستم‌های پویا در مدلسازی آلودگی شهرهای مختلف می‌توان به مطالعات (Moraga & Rabiei, 2017) اشاره کرد. همان گونه که مشاهده می‌شود بیشتر مطالعات داخل در زمینه مدل‌سازی آلودگی هوا مربوط به شهر تهران می‌باشد. این در حالی است که تمام کلان شهرها مشکل آلودگی هوا مانند تهران را در آینده‌ای نه چندان دور خواهند داشت. با توجه به این که تا کنون برای شهر شیراز مدل‌سازی برای آلودگی هوا انجام نشده است در این تحقیق به دنبال مدل‌سازی کاربردی آلودگی هوا شهر شیراز می‌باشیم. پس از مدل‌سازی سناریوهای مختلف برای کاهش آلودگی هوا تعریف خواهد شد و تاثیر هر سناریو بر آلودگی هوا بررسی می‌گردد. در نهایت به بررسی سیاست‌گذاری استفاده از بنزین یورو ۵، برای کاهش آلودگی هوای شهر شیراز مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

روش تحقیق

روش مورد استفاده در این مطالعه با توجه به پیچیدگی مساله و پویا بودن آن، روش پویایی شناسی سیستم است. پویایی شناسی سیستم، روشی است که تجزیه وتحلیل مقادیر کمّی و کیفی را به منظور درک تحول یک سیستم پیچیده، با یکدیگر ترکیب می‌کند. پویایی شناسی سیستم در موارد مختلفی از جمله توسعه و بهبود سیاستگذاری (Ghaffarzadegan et al., 2011) و حفاظت از محیط زیست به طور گسترده کاربرد دارد. در این تحقیق برای مدل‌سازی انتشار مونواکسیدکربن در شهر شیراز، پنج مرحله معرفی شده توسط استرمن به کار گرفته شده است (Sterman, 2001). اولین مرحله چارچوب بندی مساله (انتخاب مرز مدل) است. در این مرحله، تاریخچه و روند گذشته انتشار مونواکسیدکربن و متغیرهای دیگر موجود در الگو مورد بررسی قرار گرفته، متغیرهای کلیدی، قلمرو زمانی و مکانی مساله مشخص شده است. در این مرحله روش گردآوری داده به صورت اسنادی می‌باشد.

در مرحله دوم فرضیه پویای مساله تدوین خواهد شد. در این مرحله ساختاری که رفتار مساله را به وجود آورده، به صورت فرضیه‌های پویا شناسایی خواهد شد. برای این کار نمودار زیرسیستم، نمودارهای علّی حلقوی و نقشه‌های جریان- انباشت به کار رفته است. فرضیه‌های پویا بر اساس اطلاعات به دست آمده از ادبیات موضوع و همچنین دیدگاه افراد خبره در این حوزه تدوین شده‌اند. در مرحله سوم، مدل شبیه‌سازی شده از طریق تخمین پارامترها، بیان روابط ریاضی بین متغیرها و تعیین شرایط اولیه متغیرها تدوین خواهد شد. برخی از پارامترها و توابع با مراجعه به ادبیات تحقیق به دست آمد و برخی دیگر بر اساس روابط منطقی موجود بین متغیرها توسط محققین برآورد شده اند. در نهایت مدل با استفاده از نرم‌افزار ونسیم شبیه‌سازی شده است. مرحله چهارم اختصاص به آزمون مدل شبیه‌سازی شده دارد.

در نهایت در مرحله پنجم سیاست‌ها و سناریوهای کاهش میزان مونوکسیدکربن در هوای شهر شیراز، طراحی، ارزیابی و پیشنهاد شدند. سیاست‌ها به صورت ورودی به مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار ونسیم وارد شد، نتایج این سیاست‌ها به صورت نمودارهایی که انتشار مونواکسیدکربن را تحت تاثیر این سیاست‌ها نشان

می‌دهد، به دست آمده است.
پس از اطمینان از اعتبار مدل (مقایسه داده‌های به دست آمده از مدل طراحی شده با داده‌های تحقق یافته برای سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰)، سیاست استفاده از بنزین یورو ۵ در سناریوهای مختلف برای کاهش انتشار مونواکسیدکربن مورد ارزیابی قرار گرفته است. پس از آن نتایج هر کدام از سناریوها ارایه خواهد شد.
با شناخت مراحل نظری تدوین مدل در پویایی‌های سیستم و آشنایی با انواع مدل ها، می‌توان مدل‌سازی را در سه مرحله به شرح زیر انجام داد: الف. تشکیل و ترسیم نمودارهای علی- حلقوی، ب. تدوین و ترسیم نمودارهای جریان، پ. نوشتن معادلات ریاضی (داینامو)
نمودارهای علی- حلقوی در پویایی‌های سیستم سه نقش مهم ایفا می‌کنند: ۱. در طول تدوین مدل به صورت ساختار مقدمانی فرضیه‌های علّی به مدلسازی کمک می‌کند. ۲. تصویر ساده‌ای از مدل ارایه می‌دهد. ۳. عملکرد نهایی سیستم را مشخص می‌کند.
همه پویایی‌ها تنها از فعل‌وانفعالات دو نوع از حلقه‌های بازخوردی به وجود می‌آیند، حلقه‌های مثبت (خود فزاینده) و حلقه‌های منفی (خود اصلاح) (García, 2020) . حلقه‌های مثبت خود فزاینده‌اند. حلقه‌های مثبت تمایل دارند هر آنچه را در یک سیستم رخ می‌دهد تقویت کنند. این بازخورد را معمولاً با علامت مثبت (+) نشان می‌دهند که بیان‌کننده این موضوع است که علت با معلول رابطه مستقیم (مثبت) دارد. حلقه‌های منفی خود اصلاح هستند. آن‌ها تغییر را خنثی می‌کنند. این بازخورد را معمولاً با علامت منفی (-) نشان می‌دهند که بیان‌کننده این موضوع است که علت با معلول رابطه معکوس (منفی) دارد (Torres, ,2017) .

مرزهای تحقیق

در این بخش به منظور مشخص کردن مرزهای الگو به بررسی داده‌های تحقیق خواهیم پرداخت. تعیین آلاینده شاخص آلودگی هوا برای اولویت‌بندی برنامه‌های پایش، پیشگیری و کاهش آلودگی هوای شهر شیراز ضرورت دارد. شهر شیراز دارای یازده منطقه شهرداری و چهار ایستگاه سنجش آلودگی هوا در مناطق ۱، ۲، ۷ و۱۰ می‌باشد که به طور پیوسته شش آلاینده ی ذرات معلق با قطر کمتر از ۲/۵ میکرون، ذرات معلق با قطر کمتر از ۱۰ میکرون، دی‌اکسیدنیتروژن، دی‌اکسیدگوگرد، ازن و مونوکسیدکربن را اندازه‌گیری می‌کند. شاخص کیفیت هوای شیراز در سال ۱۳۹۶، ۳۴۸ روز هوای پاک و سالم، ۱۵ روز هوای ناسالم برای گروه‌های حساس و ۲ روز هوای ناسالم را نشان می‌دهد. ذرات معلق با قطر کمتر از ۲/۵ میکرون در ۲۱۲ روز آلاینده ی شاخص شهر شیراز بوده است که شامل ۱۳۳ روز کیفیت هوا متوسط، ۱۳ روز ناسالم برای گروه‌های حساس و یک روز ناسالم می‌باشد. مونوکسیدکربن برای ۱۳۶ روز آلاینده شاخص بوده است که از این تعداد، ۴۸ روز کیفیت هوا خوب، ۸۶ روز متوسط، یک روز ناسالم برای گروه‌های حساس و یک روز ناسالم بوده است. دی‌اکسید نیتروژن برای یک روز آلاینده‌ی شاخص در کیفیت هوای ناسالم برای گروه‌های حساس بوده است.
بررسی آمار و نتایج ایستگاه‌های پایش آلودگی هوای شهر شیراز نشان می‌دهد که در برخی از روزها میزان مونواکسیدکربن هشت ساعته از بالاترین حد مجاز این آلاینده بیشتر بوده است. بر اساس اطلاعات ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا، حدود هفتاد درصد روزهای آلوده برحسب پارامتر مونواکسیدکربن در دو فصل پاییز و زمستان و حدود سی درصد در فصل بهار و تابستان قرار دارد (با توجه به مطلب ذکر شده در بالا ۷۰ درصد ۱۳۶ روز معادل با ۹۵ روز خواهد بود.). با توجه به اطلاعات ایستگاه‌های مرکز پایش و کنترل آلودگی هوای شهر شیراز و مرکز کنترل اداره کل حفاظت محیط‌زیست فارس، ایستگاه دروازه کازرون (مرکز شهر) آلوده ترین ایستگاه بر اساس آلاینده مونواکسیدکربن می‌باشد. به دلیل وجود بازار و تمرکز سایر مراکز تجاری در این منطقه، در تمام ساعات روز ترافیک سنگینی در این منطقه حاکم است. اگر چه این محدوده ده تا پانزده درصد کل شهر و دو تا پنج درصد شبکه معابر را به خود اختصاص داده است، اما به دلیل موقعیت تجاری خود، پنجاه تا شصت درصد مشکلات ترافیکی کل شهر در این محدوده قرار دارد. علاوه بر ترافیک و حجم انبوه خودروها در این منطقه، فقدان فضای سبز کافی نیز عامل دیگری در آلودگی هوای این منطقه می‌تواند باشد. سرانه فضای سبز در این منطقه ۴/۳۵ متر مربع است. این سرانه با توجه به موقعیت جغرافیایی و جمعیت زیادی که از نقاط دیگر شهر و همچنین استان به آن سرازیر می‌شوند مقداری ناچیز محسوب می‌شود. در جدول (۱) وضعیت آلودگی هوا در سال ۱۳۹۹ آورده شده است.

جدول (۱): میانگین ماهانه آلاینده‌های هوای شهر شیراز به تفکیک ایستگاه‌های سنجش و پایش (سال ۱۳۹۹)

ماخذ: Department of the Environment, Fars, Iran

ماه	ایستگاه دروازه کازرون				ایستگاه میدان امام حسین			
	SO2 PPb	O3 PPb	PM2.5 µg/m3	CO PPM	SO2 PPb	O3 PPb	PM2.5 µg/m3	CO PPM
فروردین	۶/۳۸	۳۷/۹	۹/۵۸	۲/۴۷	۹	۲۲/۵	۲۹/۸	۱
اردیبهشت	۷/۵	۳۴/۳	۲۳/۳	۲/۶۵	۱۰/۳	۲۸/۴	۳۴/۲	۱/۵
خرداد	۸/۳۷	۳۷/۳۷	۲۰/۰۲	۲/۶۹	۹/۲	۲۷/۸	۲۵/۹	۱/۵
تیر	۸/۱۴	۴۱/۲۵	۲۱/۸۵	۲/۷۶	۱۰/۳	۳۱	۳۷/۱	۱/۳
مرداد	۸/۹۹	۳۲/۲۵	۲۶/۱۸	۲/۷۳	۱۲/۶	۱۸	۲۳/۴	۳/۲
شهریور	۸/۹۶	۲۳/۴۲	۲۴/۴	۲/۹	۱۰/۱	۲۹/۲	۲۶/۶	۱/۷
مهر	۸/۴۹	۱۸/۸۲	۳۹/۱۱	۲/۹	۷/۹	۱۹/۸	۴۹/۸	۱/۳
آبان	۹/۶۹	۱۵/۴۷	۳۵/۵۱	۳/۶۸	۵/۶۷	۱۹/۱	۴۲/۳	۲/۶
آذر	۸/۶۹	۳۱/۷۱	۳۲/۱	۳/۰۹	۹/۹	۲۴/۷	۳۴/۷	۱/۹
دی	۱۰/۳۲	۴۶/۱۳	۲۹/۴۷	۳/۳۴	۶/۹۸	۱۷/۵	۳۲/۷	۱/۷
بهمن	۹/۷۶	۱۹/۹۵	۲۱/۵	۲/۹۷	۱۰/۲	۱۳/۵	۲۹/۷	۲/۳
اسفند	۸/۹	۱۸/۲۴	۳۴/۵۷	۲/۷۹	۹/۵۶	۱۰/۵۴	۳۴/۶	۱

در این تحقیق برای داده‌های میزان جذب دی‌اکسیدکربن توسط فضای سبز، میانگین طول عمر افراد، میانگین مصرف بنزین در هر کیلومتر طی شده خودروهای سواری، نرخ مصرف CNG در هر کیلومتر طی شده، نرخ حذف مونواکسیدکربن در هوا، از داده‌های ایران استفاده شده است و فرض گردیده است که شهر شیراز نیز از همان روند تبعیت می‌کند. از طرفی داده‌های ضریب انتشار مونواکسیدکربن از مصرف CNG در بخش حمل و نقل، ضریب انتشار مونواکسیدکربن از مصرف مازوت، ضریب انتشار مونواکسیدکربن از مصرف گازوئیل، ضریب انتشار مونواکسیدکربن از مصرف بنزین، ضریب انتشار مونواکسیدکربن از مصرف گاز طبیعی توسط واحدهای صنفی و ضریب انتشار مونواکسیدکربن از مصرف گاز طبیعی توسط خانوار که همان عملا داده‌های ضریب انتشار می‌باشند از داده‌های جهانی استفاده شده است.

دیگر داده‌ها و پارامترهای مورد استفاده در این تحقیق از سازمان مدیریت حمل و نقل مسافر شهرداری شیراز، سازمان پارک‌ها و فضای سبز شهرداری شیراز، شرکت گاز استان فارس و شرکت پالایش و پخش جمع آوری شده است (فضای شهری، میانگین سرعت اتوبوس در شهر، میانگین مسافت طی شده توسط هر تاکسی در سال، میانگین مصرف گازوئیل در هر کیلومتر طی شده اتوبوس، نرخ خرید خودرو، نرخ تعطیلی واحدهای صنعتی، مهاجرت معکوس، نرخ زاد و ولد، نرخ مصرف سرانه نفت کوره در واحد صنعتی، مصرف بنزین سرانه موتورسیکلت، نرخ ساخت فضای سبز، میزان تخریب فضای سبز، کل مصرف خانگی NG، تعداد افراد خانوار، نرخ رشد صنعتی، مهاجرت به منطقه، نرخ مصرف گاز طبیعی به ازای هر واحد صنعتی، سرانه مصرف بنزین خانوار، درصد خودروی حذف شده در سال، درصد اتوبوس اضافه شده به ناوگان حمل و نقل عمومی، درصد مصرف نفت کوره به عنوان سوخت در هر واحد صنعتی، درصد اتوبوس حذف شده از ناوگان حمل و نقل عمومی، نرخ تاکسی اضافه شده به ناوگان حمل و نقل عمومی، نرخ تاکسی حذف شده از ناوگان حمل و نقل عمومی، درصد خودروهای شخصی دوگانه سوز، درصد تاکسی‌های دوگانه سوز، نرخ سفر به ازای هر خانوار در شهر، نسبت تولد به مرگ). در ادامه به شبیه‌سازی الگو پرداخته شده است.

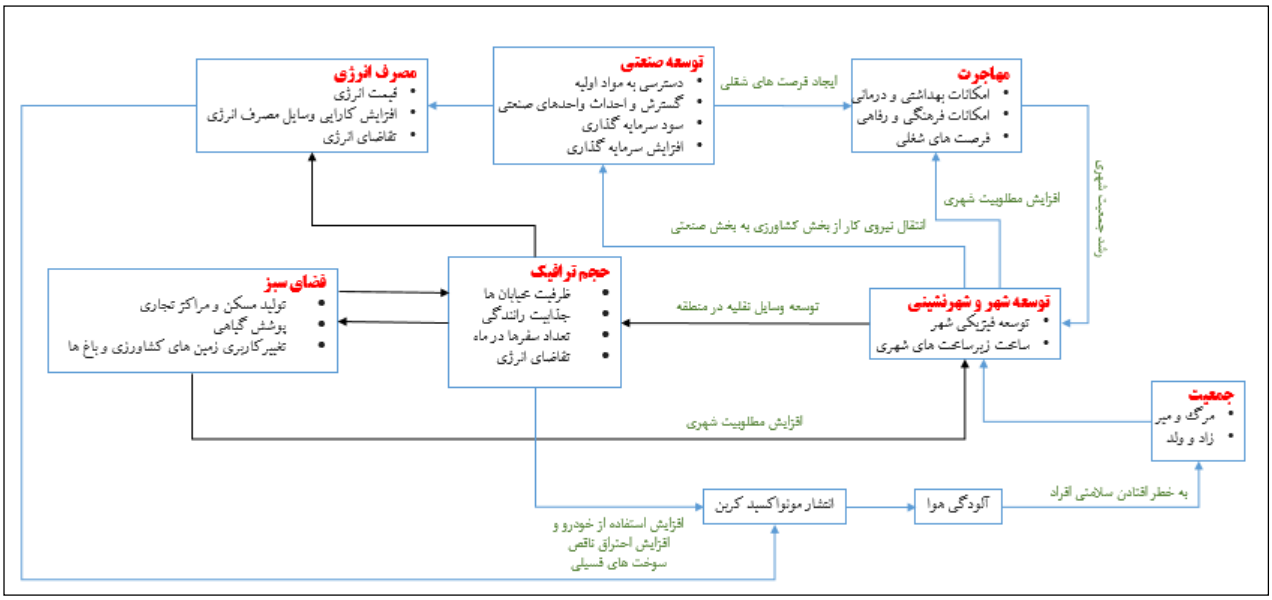
تدوین فرضیه پویا (مدل‌سازی و سناریوسازی)

فرضیه پویا، چگونگی بروز مساله و ساختار آن را در قالب یک تئوری توضیح می‌دهد. در این مقاله برای تدوین فرضیه پویا، نمودار زیرسیستم، نمودارهای علّی حلقوی و نمودارهای حالت- جریان به کار رفته است.

- نمودار زیرسیستم

نمودار زیرسیستم معماری کلی مدل را نشان می‌دهد. شکل(۱) نمودار زیرسیستم مربوط به انتشار مونوکسیدکربن را نشان می‌دهد. این نمودار بر اساس داده‌های به دست آمده از اسناد و مدارک،

ادبیات موضوع و مصاحبه با خبرگان تدوین شده است.



شکل (۱): نمودار زیرسیستم آلودگی هوا

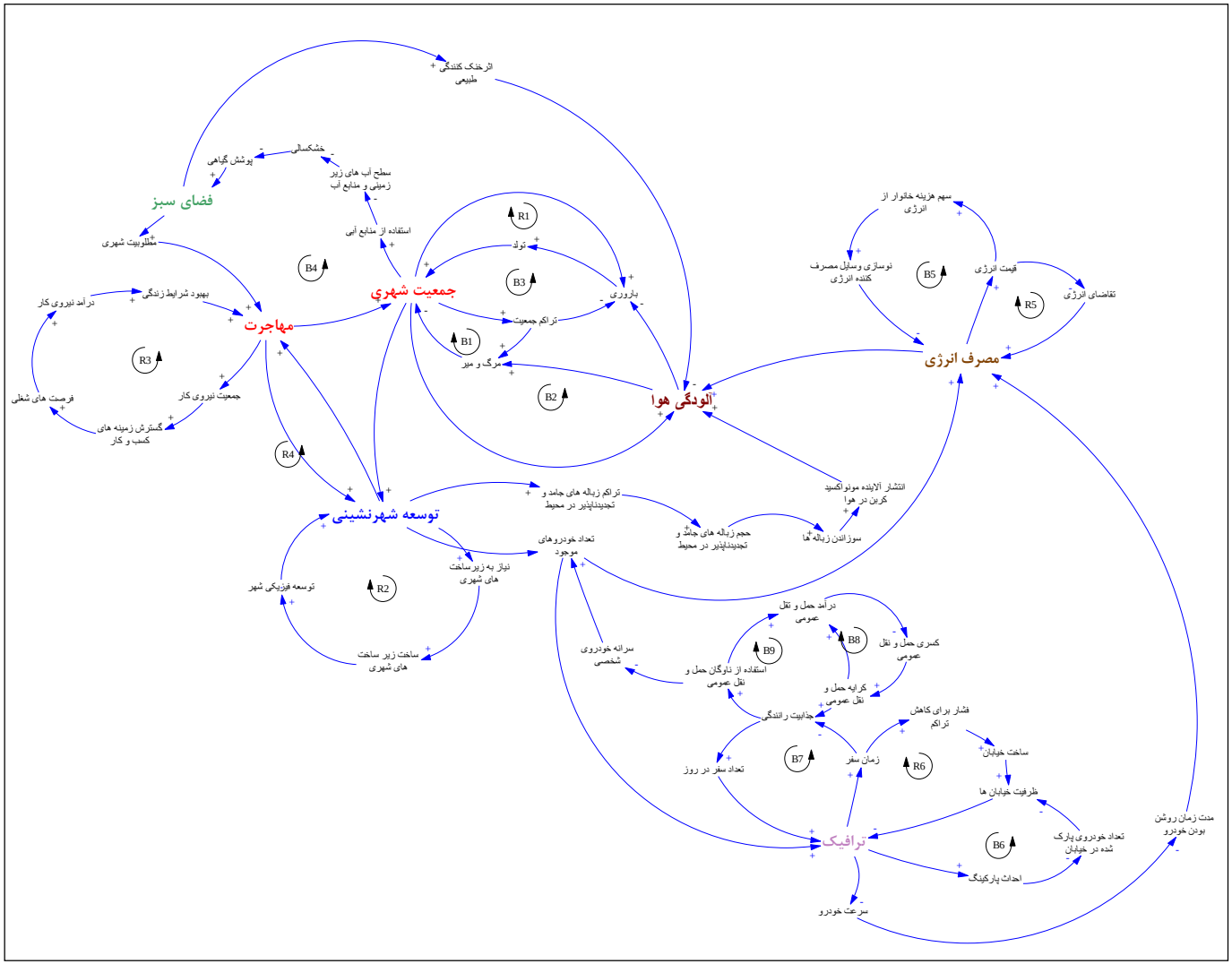
همان‌گونه که در شکل(۱) مشخص گردیده است، مدل آلودگی هوای در نظر گرفته شده دارای ۷ زیر سیستم می‌باشد. در ادامه پیش از ورود برای طراحی نمودار علی- حلقوی هر کدام از زیر سیستم‌ها به صورت خلاصه مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت.

گسترش شهرنشینی، به خصوص در دوره معاصر، سبب توجه بسیاری از صاحب نظران گونا گون به مسایل و پیامدهای ناشی از توسعه شهرنشینی شده و پژوهش در مورد چگونگی رشد و توسعه کلان‌شهرها در کشورهای در حال توسعه، از چندین دهه قبل مورد توجه صاحب نظران قرار گرفته است.

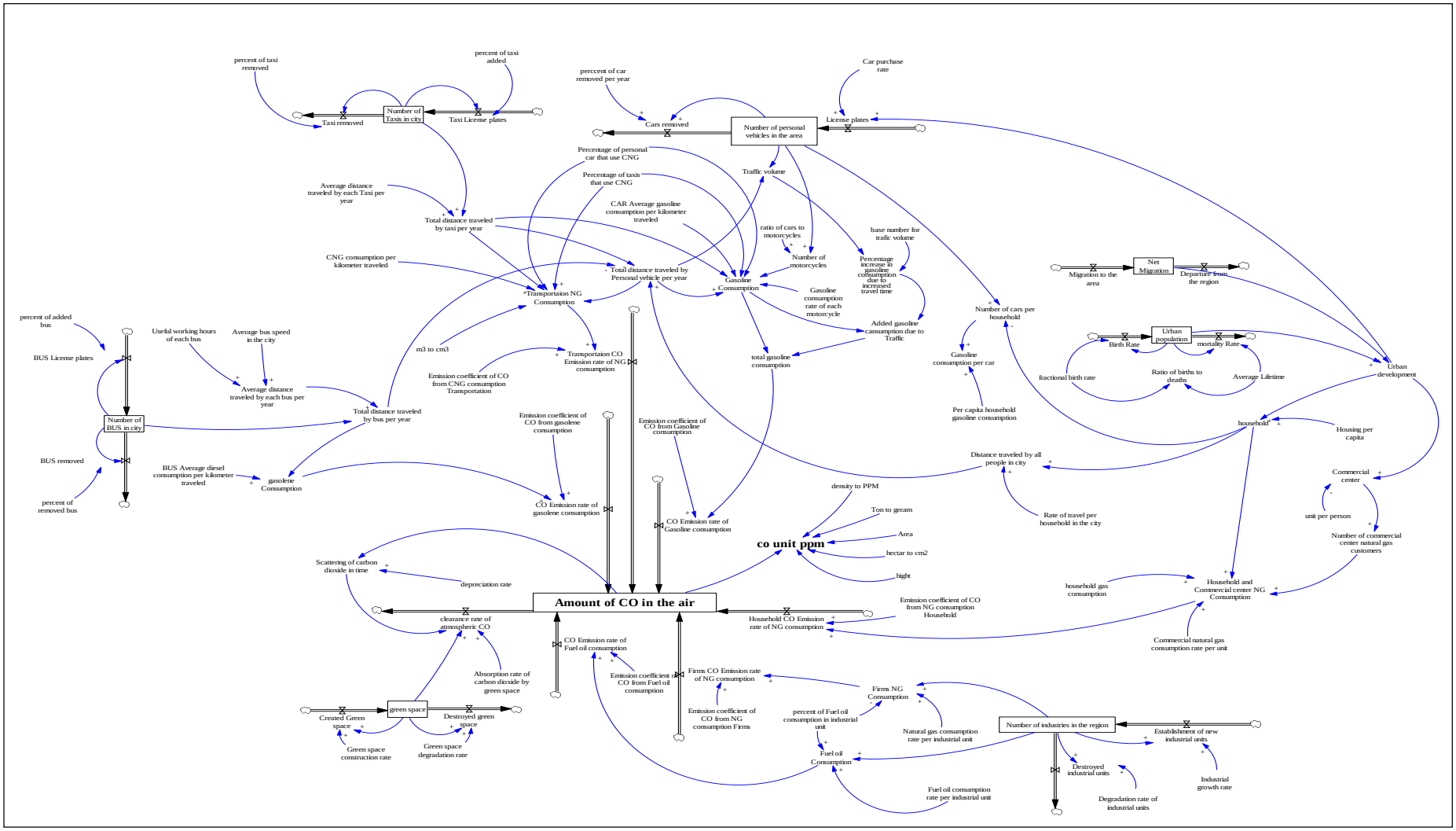
شکل وشکل) به ترتیب نمودارهای علّی- حلقوی و نقشه جریان- انباشت انتشار مونواکسیدکربن در شهر شیراز را نشان می‌دهد. نمودارهای علّی حلقوی انتشار آلاینده مونواکسیدکربن بر اساس هفت متغیر اصلی جمعیت، مهاجرت، توسعه شهر و شهرنشینی، ترافیک، توسعه صنعتی، مصرف انرژی و فضای سبز به وجود آمده‌اند.

مدل شبیه‌سازی شده از طریق تخمین پارامترها، مقادیر اولیه و توابع ریاضی شکل می‌گیرد. جدول (۲)، پارامترها و توابعی که بر اساس ادبیات موضوع را نشان می‌دهد. میزان انتشار هر یک از آلاینده‌ها از حاصل‌ضرب میزان مصرف انواع سوخت‌ها در ضرایب انتشار مربوطه به دست آمده است (Parry, et al. ,2021). برای محاسبه ضریب انتشار، ضرایب محاسبه شده توسط شرکت کنترل کیفیت هوا وابسته به شهرداری شیراز مورد استفاده قرار گرفته است.

نمودار زیرسیستم، معماری کلی مدل را نشان می‌دهد؛ اما چگونگی ارتباط بین متغیرها را در سطح عملیاتی توضیح نمی‌دهد. با استفاده از نمودارهای علّی- حلقوی و نقشه‌های جریان – انباشت می‌توانند این نقص را جبران کنند. نمودارهای علّی، ساختار بازخوردی یک سیستم را نشان می‌دهند در صورتی که نقشه‌های جریان انباشت بر ساختار فیزیکی به وجود آورنده آن بازخوردها تاکید دارند. متغیرهای جریان، نرخ افزایش یا کاهش متغیر انباشت را تعیین می‌کنند. متغیرهای انباشت (حالت)، وضعیت سیستم را مشخص کرده و اطلاعاتی را تولید می‌کنند که تصمیم‌ها بر اساس آنها اتخاذ می‌شود. با توجه به شکل (۲) در این تحقیق حدود ۹۰ حلقه بازخوردی وجود دارد.



شکل (۲): نمودار علّت-معلولی آلودگی هوای شهر شیراز



شکل (۳): نمودار حالت و جریان مونوکسید کربن

جدول (۲): روابط، مقادیر و واحدهای متغیرهای الگو

متغیر	تعریف شده در نرم افزار	مقدار	واحد
میزان جذب دی‌اکسیدکربن توسط فضای سبز	Absorption rate of carbon dioxide by green space	2×10^{-5}	Ton/(m2*Year)
فضای شهری	Area	21670	hectar
میانگین سرعت اتوبوس در شهر	Average bus speed in the city	40	km/h
میانگین مسافت طی شده توسط هر تاکسی در سال	Average distance traveled by each Taxi per year	70000	km/(Taxi*Year)
میانگین طول عمر افراد	Average Lifetime	70	Year
میانگین مصرف گازوئیل در هر کیلومتر طی شده اتوبوس	BUS Average diesel consumption per kilometer traveled	0.35	Lit/km
میانگین مصرف بنزین در هر کیلومتر طی شده خودروهای سواری	CAR Average gasoline consumption per kilometer traveled	0.08	Lit/km
نرخ خرید خودرو	Car purchase rate	0.004	car/(Person*Year)
نرخ مصرف CNG در هر کیلومتر طی شده	CNG consumption per kilometer traveled	1/200	m3/km
سرانه مصرف گاز طبیعی واحدهای تجاری کربن از مصرف بنزین	Commercial natural gas consumption rate per unit	140×10^{6}	Cm3/(unit*Year)
نرخ صرفه جویی مصرف گاز طبیعی	decreasing of CNG consumption	0	1
نرخ تعطیلی واحدهای صنعتی	Degradation rate of industrial units	0.02	1/Year
مهاجرت معکوس (خروج افراد از منطقه)	Departure from the region	5	Person/Year
نرخ حذف مونواکسیدکربن در هوا	depreciation rate	0	1/Year
ضریب انتشار مونواکسیدکربن از مصرف CNG در بخش حمل و نقل	Emission coefficient of CO from CNG consumption Transportation	1×10^{-12}	Ton/Cm3
ضریب انتشار مونواکسیدکربن از مصرف مازوت	Emission coefficient of CO from Fuel oil consumption	0.0027	Ton/Lit
ضریب انتشار مونواکسیدکربن از مصرف گازوئیل	Emission coefficient of CO from gasolene consumption	5×10^{-6}	Ton/Lit
ضریب انتشار مونواکسیدکربن از مصرف بنزین	Emission coefficient of CO from Gasoline consumption	0.3×10^{-6}	Ton/Lit
ضریب انتشار مونواکسیدکربن از مصرف گاز طبیعی توسط واحدهای صنفی	Emission coefficient of CO from NG consumption Firms	0.1×10^{-12}	Ton/Cm3
ضریب انتشار مونواکسیدکربن از مصرف گاز طبیعی توسط خانوار	Emission coefficient of CO from NG consumption Household	0.4×10^{-12}	Ton/Cm3
نرخ زاد و ولد	fractional birth rate	0.04	1/Year
نرخ مصرف سرانه نفت کوره در واحد صنعتی	Fuel oil consumption rate per industrial unit	41089	Lit/(unit*Year)
مصرف بنزین سرانه موتورسیکلت	Gasoline consumption rate of each motorcycle	900	Lit/(motor*Year)
نرخ ساخت فضای سبز	Green space construction rate	0.74×10^{-2}	1/Year

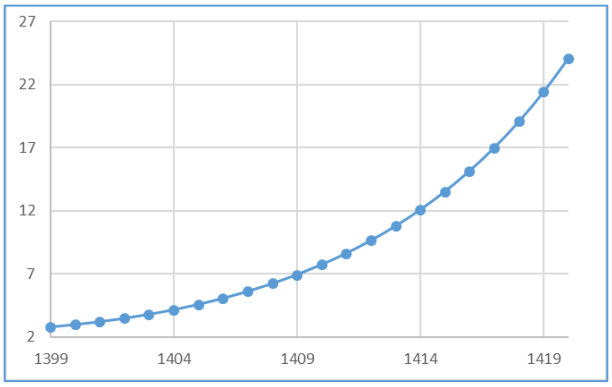
ادامه جدول (۲): روابط، مقادیر و واحدهای متغیرهای الگو

متغیر	تعریف شده در نرم افزار	مقدار	واحد
میزان تخریب فضای سبز	Green space degradation rate	10^{-3}	1/Year
کل مصرف خانگی NG	household gas consumption	2.280×10^{9}	Cm3/(household*Year)
تعداد افراد خانوار	Housing per capita	3.1	Person/household
نرخ رشد صنعتی	Industrial growth rate	0.05	1/Year
مهاجرت به منطقه	Migration to the area	5000	Person/Year
نرخ مصرف گاز طبیعی به ازای هر واحد صنعتی	Natural gas consumption rate per industrial unit	0.2×10^{12}	Cm3/(unit*Year)
سرانه مصرف بنزین خانوار	Per capita household gasoline consumption	1619	Lit/(household*Year)
درصد خودروی حذف شده در سال	perccent of car removed per year	0.01	1/Year
درصد اتوبوس اضافه شده به ناوگان حمل و نقل عمومی	percent of added bus	0.01	1/Year
درصد مصرف نفت کوره به عنوان سوخت در هر واحد صنعتی	percent of Fuel oil consumption in industrial unit	0	1
درصد اتوبوس حذف شده از ناوگان حمل و نقل عمومی	percent of removed bus	0.01	1/Year
نرخ تاکسی اضافه شده به ناوگان حمل و نقل عمومی	percent of taxi added	0.02	1/Year
نرخ تاکسی حذف شده از ناوگان حمل و نقل عمومی	percent of taxi removed	0.02	1/Year
درصد خودروهای شخصی دوگانه سوز	Percentage of personal car that use CNG	0.05	1
درصد تاکسی‌های دوگانه سوز	Percentage of taxis that use CNG	0.9	1
نرخ سفر به ازای هر خانوار در شهر	Rate of travel per household in the city	18023	km/(household*Year)
نسبت تولد به مرگ	ratio of cars to motorcycles	0.35	motor/car

نتایج

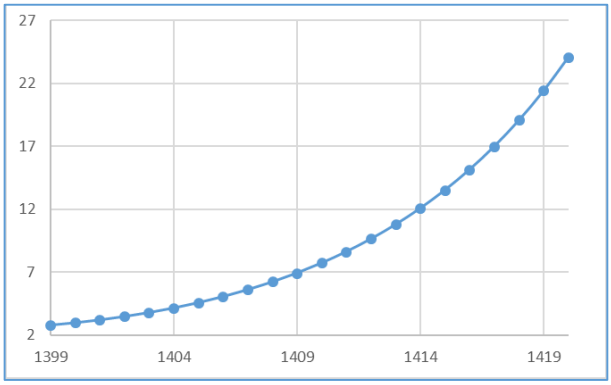
پس از اطمینان از اعتبار مدل (مقایسه داده‌های به دست آمده از مدل طراحی شده با داده‌های تحقق یافته برای سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ که کاملا داده‌های فوق بر هم تطابق دارند. که این نشان از دقت مدل برای پیش‌بینی می‌باشد.)، سیاست استفاده از بنزین یورو ۵ در سناریوهای مختلف برای کاهش انتشار مونواکسیدکربن مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه نتایج هر کدام از سناریوها ارایه می‌شود.

ادامه وضع موجود (استفاده از بنزین یورو ۴ بدون جایگزینی بنزین با استفاده از بنزین یورو ۵) به این معنی است که اگر در وضعیت موجود هیچ تغییری ایجاد نشود، مقدار مونواکسیدکربن در بازه زمانی شبیه‌سازی چگونه خواهد بود؟ شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در صورت عدم مداخله، میزان مونواکسیدکربن با شیب قابل توجهی مطابق



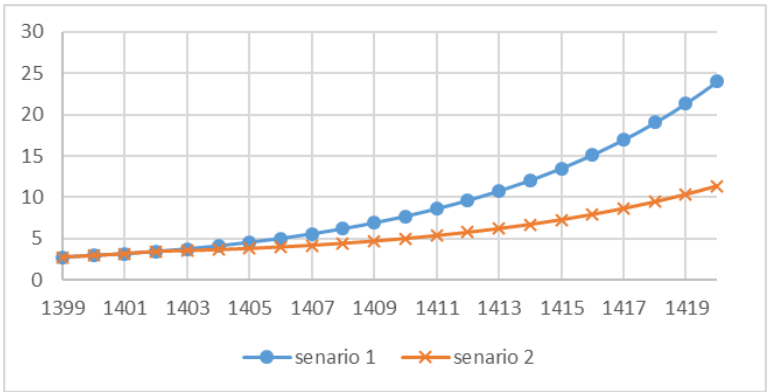
شکل (۴) افزایش خواهد یافت. بنابراین این سناریو به هیچ وجه قابل توصیه نیست.

در سناریو دوم، بنزین مصرفی خودروها در شهر شیراز از بنزین



شکل (۴): نمودار شبیه‌سازی حفظ وضعیت موجود
(محور افقی: سال – محور عمودی: انتشار CO بر حسب تن)

یورو ۴ به بنزین یورو پنج از سال ۱۴۰۲ تغییر داده می‌شود. با اجرای این سناریو از آنجایی که ضریب انتشار مونوکسیدکربن حاصل از مصرف بنزین به ۰/۱ گرم بر لیتر کاهش پیدا می‌کند، مطابق شکل (۵)، میزان مونواکسیدکربن هوا به اندازه قابل توجهی کاهش پیدا خواهد کرد. در این نمودار منحنی قرمز نشان‌دهنده رفتار متغیر در صورت اجرای این سناریو هست.

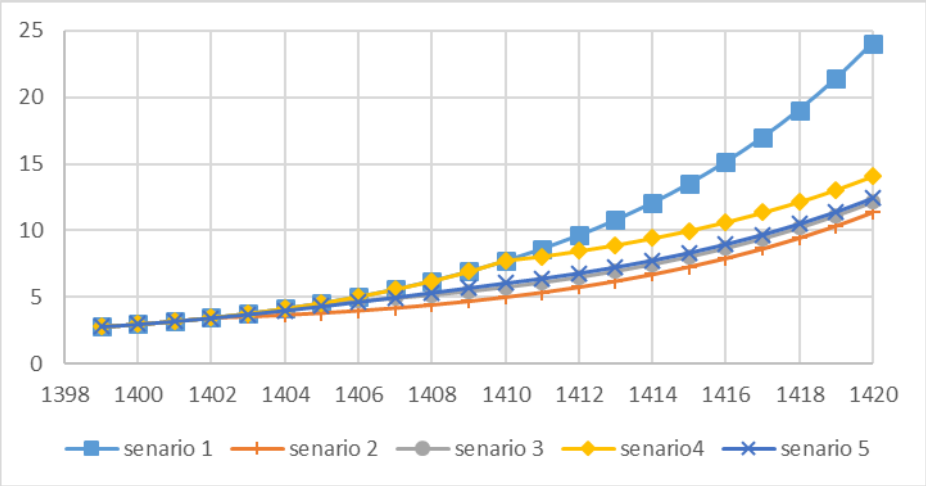


شکل (۵): نمودار شبیه‌سازی استفاده از بنزین یورو پنج (محور افقی: سال – محور عمودی: انتشار CO بر حسب تن)

در سناریوهای بعدی به ترتیب استفاده از بنزین یورو ۵ از سال ۱۴۰۵ (سناریو ۳)، حذف بنزین یورو ۴ از سال ۱۴۱۰ (سناریو ۴) و همچنین کاهش یکنواخت بنزین یورو ۴ از سال ۱۴۰۰ تا ۱۴۱۰ (سناریو ۵) در نظر گرفته شده است. نتایج هر یک از این سناریوها در جدول (۳) و همچنین شکل (۶) آورده شده است. همان‌گونه که در این نمودار مشخص است، تفاوت‌های سناریوهای مختلف قابل ملاحظه و تفاوت زیادی نیس در هز صورت استفاده از بنزین یورو ۵ رشد آلودگی هوا را کاهش خواهد داد.

از بین سناریوهای طراحی شده در بالا و با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریوی دوم یعنی استفاده از بنزین یورو پنج از سال

۱۴۰۲ بهترین سیاست می‌باشد[۲]. با این سیاست روند انتشار مونواکسیدکربن در شکل نشان داده شده است. با توجه به نمودار فوق بین سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲ میزان انتشار مونواکسیدکربن از ۲/۸ ppm به ۳/۴ ppm رسیده است. ولی بعد از آن تا سال ۱۴۲۰ روند کاهشی نرخ رشد انتشار مونواکسیدکربن را شاهد خواهیم بود. به صورتی که در سال ۱۴۲۰ میزان انتشار برابر با ۱۱/۴ ppm پیش‌بینی شده است. این به این معنی است که اجرای این سیاست به تنهایی نمی‌تواند سیاست کارآمدی باشد. باید به همراه استفاده از بنزین یورو ۵ سیاست‌های دیگر از جمله کاهش نرخ سفرهای درون شهری، توسعه حمل و نقل عمومی، صرفه جویی گاز مصرفی خانگی و غیره نیز در نظر گرفته شود.



شکل (۶): روند پیش‌بینی شده انتشار مونواکسیدکربن بر اساس سناریوهای طراحی شده (محور افقی: سال – محور عمودی: انتشار CO بر حسب تن)

جدول (۳): مقادیر پیش‌بینی شده انتشار مونواکسیدکربن در سناریوهای ۱-۵

سال	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴	سناریو ۵
۱۳۹۹	۲/۷۶۸۲	۲/۷۶۸۲	۲/۷۶۸۲	۲/۷۶۸۲	۲/۷۶۸۲
۱۴۰۰	۲/۹۵۵۷	۲/۹۵۵۷	۲/۹۵۵۷	۲/۹۵۵۷	۲/۹۵۵۷
۱۴۰۱	۳/۱۸۲۲	۳/۱۸۲۲	۳/۱۸۲۲	۳/۱۸۲۲	۳/۱۸۲۲[۳]
۱۴۰۲	۳/۴۵۰۷	۳/۴۵۰۷	۳/۴۵۰۷	۳/۴۵۰۷	۳/۴۳۱۵
۱۴۰۳	۳/۷۶۵۳	۳/۵۴۸۶	۳/۷۶۵۳	۳/۷۶۵۳	۳/۷۰۲۸
۱۴۰۴	۳/۱۳۰۵	۳/۶۷۰۰	۴/۱۳۰۵	۴/۱۳۰۵	۳/۹۹۴۸
۱۴۰۵	۳/۵۵۱۲	۳/۸۱۶۷	۴/۵۵۱۲	۴/۵۵۱۲	۴/۳۰۵۹
۱۴۰۶	۵/۰۳۳۱	۳/۹۹۰۹	۴/۷۲۵۴	۵/۰۳۳۱	۴/۶۳۳۹
۱۴۰۷	۵/۵۸۲۵	۴/۱۹۴۸	۴/۹۲۹۳	۵/۵۸۲۵	۴/۹۷۶۰
۱۴۰۸	۶/۲۰۶۵	۴/۴۳۱۰	۵/۱۶۵۵	۶/۲۰۶۵	۵/۳۲۸۶
۱۴۰۹	۶/۹۱۳۲	۴/۷۰۲۶	۵/۴۳۷۱	۶/۹۱۳۲	۵/۶۸۷۲
۱۴۱۰	۷/۷۱۱۸	۵/۰۱۲۷	۵/۷۴۷۲	۷/۷۱۱۸	۶/۰۴۶۱
۱۴۱۱	۸/۶۱۲۷	۵/۳۶۵۱	۶/۰۹۹۶	۸/۰۶۴۲	۶/۳۹۸۵
۱۴۱۲	۹/۶۲۷۸	۵/۷۶۴۰	۶/۴۹۸۵	۸/۴۶۳۱	۶/۷۹۷۵
۱۴۱۳	۱۰/۷۷۱۰	۶/۲۱۴۳	۶/۹۴۸۸	۸/۹۱۳۴	۷/۲۴۷۸
۱۴۱۴	۱۲/۰۵۷۸	۶/۷۲۱۵	۷/۴۵۶۰	۹/۴۲۰۶	۷/۷۵۴۹
۱۴۱۵	۱۳/۵۰۶۴	۷/۲۹۱۸	۸/۰۲۶۳	۹/۹۹۰۹	۸/۳۲۵۳
۱۴۱۶	۱۵/۱۳۷۸	۷/۹۳۲۶	۸/۶۶۷۱	۱۰/۶۳۱۸	۸/۹۶۶۱
۱۴۱۷	۱۶/۹۷۶۳	۸/۶۵۲۳	۹/۳۸۶۸	۱۱/۳۵۱۴	۹/۶۸۵۸

۱۴۱۸	۱۹/۰۵۰۴	۹/۴۶۰۶	۱۰/۱۹۵۱	۱۲/۱۵۹۷	۱۰/۴۹۴۱
۱۴۱۹	۲۱/۳۹۳۴	۱۰/۳۶۹۰	۱۱/۱۰۳۵	۱۳/۰۶۸۱	۱۱/۴۰۲۴
۱۴۲۰	۲۴/۰۴۴۲	۱۱/۳۹۰۶	۱۲/۱۲۵۱	۱۴/۰۸۹۷	۱۲/۴۲۴۱

تحلیل نتایج

استاندارد آلایندگی یورو ۵ سال ۲۰۰۹ در کشورهای عضو اتحادیه اروپا استفاده شد و قرار بود در ایران از سال ۱۳۹۰ به‌بعد اجرایی شود؛ ولی درعمل با موانع زیادی روبه‌رو شد. با افزایش خودروها و مشاهده مطالعات جوّی که از افزایش آلاینده‌ها خبر می‌داد، دولت‌ها و نهادهای قانون‌گذاری در سراسر جهان برای کاهش میزان انتشار آلاینده‌های خودروها دست به کار شدند. به‌موازات این اتفاقات، اتحادیه اروپا نیز با هدف مهار آلودگی هوا ناشی از وسایل نقلیه و خودروها، استانداردی برای انتشار گازهای آلاینده خودروهای فروخته‌شده در کشورهای اتحادیه اروپا تدوین کرد که به استانداردهای آلایندگی یورو معروف است.

استانداردهای آلایندگی اروپا میزان بیشینه مجاز برای انتشار گازهای آلاینده خودروهای جدید فروخته‌شده در کشورهای اتحادیه اروپا را تعریف می‌کند. این استاندارد انتشار اکسیدهای نیتروژن (NOx)، هیدروکربن‌ها (THC)، هیدروکربن‌های بدون متان (NMHC)، مونوکسیدکربن (CO) و ذرات معلق (PM) را شامل می‌شود. طبق این استاندارد، استفاده از فیلتر DPF در تمامی خودروهای دیزلی اجباری است. این فیلترها قابلیت جذب ۹۹ درصد ذرات جامد را دارند. همچنین برای نخستین‌بار در استاندارد یورو ۵، خودروهای بنزینی مجهز به پیشرانه‌های GDI نیز به استفاده از فیلتر ذرات معلق ملزم شدند.

براساس قانون هوای پاک، باید تمام خودروسازان از ابتدای سال ۱۳۹۸ خودروهایشان را مطابق با استاندارد یورو ۵ تولید می‌کردند که به بهانه تحریم، اجرای این قانون را یک سال عقب انداختند و قرار شد از اول فروردین ۱۳۹۹، این قانون اجرا شود. امید می‌رود در سال‌های آینده، تعداد خودروهای یورو ۵ در کشور افزایش یابد تا بهبود کیفیت هوای کلان‌شهرها را شاهد باشیم.

ادامه وضع موجود اولین سناریویی بود که در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با فرض عدم مداخله در سیستم و ادامه وضعیت موجود، میزان انتشار آلاینده مونواکسیدکربن در هوای شهر شیراز افزایش قابل توجهی خواهد داشت (پیش‌بینی می‌شود در سال ۱۴۲۰ به ppm ۲۴ برسد). با ادامه وضعیت موجود، جمعیت شهر شیراز از دو طریق رشد طبیعی جمعیت و مهاجرت، افزایش می‌یابد. با افزایش جمعیت، شهرنشینی توسعه یافته در نتیجه میزان مونواکسیدکربن از دو مسیر مستقیم و غیرمستقیم افزایش خواهد یافت. انتشار مستقیم در نتیجه مصرف انرژی‌هایی همچون برق، سوخت‌های گرمایشی، گازوییل و بنزین، به دلیل استفاده از زیرساخت‌ها و حمل‌ونقل خواهد بود. انتشار غیر مستقیم نیز از ناحیه تولیدات صنعتی که خانوارها مصرف کننده نهایی آنها هستند مانند لباس، لوازم خانگی و همچنین خدمات و غذاهای مورد استفاده خانوارها، افزایش خواهد یافت. استراتژی‌های مناسب کنترل آلودگی هوا را استفاده از حمل ونقل عمومی، معاینه فنی، مدیریت ترافیک و پیشنهاد سوخت جایگزین ارایه نموده اند (Moghadam, Jozi, Hejazi, Zaeimdar, & Malmasi, 2021).

در سناریوی دوم جایگزینی بنزین یورو چهار با بنزین یورو پنج مورد بررسی قرار گرفته است (ذکر این نکته ضروری است که با استانداردسازی و یا نوسازی خودروهای موجود نیز می‌توان با استفاده از بنزین یورو چهار به ضریب انتشار ۰/۱ گرم انتشار مونواکسیدکربن به ازای هر لیتر مصرف بنزین رسید. با توجه به عدم تمایل خودروسازان داخلی به تولید خودروهای یورو ۵، در این تحقیق سیاست استفاده از بنزین یورو۵ مورد بررسی قرار گرفته است.). در این سناریو، بنزین مصرفی خودروها در شهر شیراز به بنزین یورو پنج از سال ۱۴۰۲ تغییر داده شد. با اجرای این سناریو از آنجایی که ضریب انتشار مونواکسیدکربن حاصل از مصرف بنزین یورو ۵ به ۰/۱ گرم بر لیتر کاهش پیدا می‌کند (ضریب انتشار مونواکسیدکربن حاصل از مصرف بنزین یورو ۴، ۰/۳ گرم بر لیتر مصرف بنزین می‌باشد.)، میزان مونواکسیدکربن هوا به اندازه قابل توجهی کاهش پیدا خواهد کرد. با اجرای این سناریو پیش‌بینی می‌شود در سال ۱۴۲۰ میزان انتشار مونواکسیدکربن به ppm ۱۱/۴ برسد. یعنی با اجرای این سناریو همچنان میزان انتشار مونواکسیدکربن در شهر شیراز روندی صعودی خواهد داشت و نیاز است که همزمان سیاست‌های دیگری با اجرای این سیاست اتخاذ گردد.

یادداشت‌ها

1. Air Pollution Charging Fee

۲. هدف از این تحقیق این می‌باشد که تاثیر استفاده از بنزین یورو ۵ به جای یورو ۴ مورد بررسی قرار گیرد. ذکر این نکته ضروری است که در مدل طراحی شده می‌توان متغیرهای مختلفی را به مدل اضافه نمود و مدل را تکمیل تر کرد. از جمله اضافه کردن استفاده از مازوت در نیروگاه ها، رشدهای اقتصادی مختلف و ...

۳. سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ برای تست مدل استفاده شده است و داده‌های به دست آمده منطبق با داده‌های تحقق یافته در این دو سال می‌باشد. برای سال ۱۴۰۱ نیز هنوز رشدی صورت نگرفته است و منطبق شدن سناریوهای مختلف بر هم در این سه سال طبیعی است.

فهرست منابع

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.

Bai, Y., Deng, X., Jiang, S., Zhang, Q., & Wang, Z. (2018). Exploring the relationship between urbanization and urban eco-efficiency: Evidence from prefecture-level cities in China. *Journal of cleaner production, 195*, 1487-1496.

Beckx, C., Panis, L. I., Arentze, T., Janssens, D., Torfs, R., Broekx, S., & Wets, G. (2009). A dynamic activity-based population modelling approach to evaluate exposure to air pollution: methods and application to a Dutch urban area. *Environmental Impact Assessment Review, 29*(3), 179-185.

Carrington, D. (2017). Global pollution kills 9m a year and threatens' survival of human societies'. *The Guardian, 20*(10).

Currell, M. J., & Han, D. (2017). The Global Drain: Why China's water pollution problems should matter to the rest of the world. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development, 59*(1), 16-29.

Díaz, G., Macia, H., Valero, V., Boubeta-Puig, J., & Cuartero, F. (2020). An Intelligent Transportation System to control air pollution and road traffic in cities integrating CEP and Colored Petri Nets. *Neural Computing and Applications, 32*(2), 405-426.

Department of the Environment, Fars, Iran.

Feng, Y., Chen, S., & Zhang, L. (2013). System dynamics modeling for urban energy consumption and CO2 emissions: A case study of Beijing, China. *Ecological Modelling, 252*, 44-52.

García, J. M. (2020). *Theory and Practical Exercises of System Dynamics: Modeling and Simulation with Vensim PLE. Preface John Sterman*: Juan Martin Garcia.

Ghaffarzadegan, N., Lyneis, J., & Richardson, G. P. (2011). How small system dynamics models can help the public policy process. *System Dynamics Review, 27*(1), 22-44.

Gong, H., Simwanda, M., & Murayama, Y. (2017). An internet-based GIS platform providing data for visualization and spatial analysis of urbanization in major Asian and African cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 6*(8), 257.

Goodarzi, F., Ershadi, M., Arsanjani, M. A., & Firouzshahi, M. (2016). System dynamics modelling of air pollution in megacities: An investigation in megacity of Tehran. *Applied environmental and biological sciences, 6*(8), 7-13.

Hosseinabad, E. R., & Moraga, R. J. (2017). *Air Pollution Mitigation in Metropolitans Using System Dynamics Approach.* Paper presented at the IIE Annual Conference. Proceedings.

James, J., Li, V. O., & Lam, A. Y. (2012). *Sensor deployment for air pollution monitoring using public transportation system.* Paper presented at the 2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation.

Jia, S., Liu, X., & Yan, G. (2019). Effect of APCF policy on the haze pollution in China: A system dynamics approach. *Energy Policy, 125*, 33-44.

Komilovna, A. M. (2019). Waste as a source of environmental pollution. *Научные исследования*(4 (30)).

McGee, J. A., & York, R. (2018). Asymmetric relationship of urbanization and CO2 emissions in less developed countries. *PloS one*, *13*(12), e0208388.

Moghadam, R., Jozi, S. A., Hejazi, R., Zaeimdar, M., & Malmasi, S. (2021). A Strategic Management Plan for Reducing Air Pollution Using the SWOT Model: A Case Study of District 2 of Tehran Municipality. *Anthropogenic Pollution*, *5*(2), 85-92.

Moraga, R., & Rabiei Hosseinabad, E. (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*, *7*(12), 164-174.

Niu, F., Wang, F., & Chen, M. (2019). Modelling urban spatial impacts of land-use/transport policies. *Journal of Geographical Sciences*, *29*(2), 197-212.

Novan, K. (2015). Valuing the wind: renewable energy policies and air pollution avoided. *American Economic Journal: Economic Policy*, *7*(3), 291-326.

Parry, I., Black, M. S., & Vernon, N. (2021). *Still not getting energy prices right: A global and country update of fossil fuel subsidies*: International Monetary Fund.

Piqueras, P., & Vizenor, A. (2016). The rapidly growing death toll attributed to air pollution: A global responsibility. *Policy Brief for GSDR*, 1-4.

Rahman, F. A., Aziz, M. M. A., Saidur, R., Bakar, W. A. W. A., Hainin, M., Putrajaya, R., & Hassan, N. A. (2017). Pollution to solution: Capture and sequestration of carbon dioxide (CO2) and its utilization as a renewable energy source for a sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *71*, 112-126.

Shahgholian, K., & Hajihosseini, H. (2009). 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). *Int J Environ*, *3*(11), 372-379.

Sterman, J. D. (2001). System dynamics modeling: tools for learning in a complex world. *California management review*, *43*(4), 8-25.

Torres, J. P., Kunc, M., & O'brien, F. (2017). Supporting strategy using system dynamics. *European Journal of Operational Research*, *260*(3), 1081-1094.

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.

Vallero, D. A. (2014). *Fundamentals of air pollution*: Academic press.

Wu, Y., & Zhang, L. (2017). Can the development of electric vehicles reduce the emission of air pollutants and greenhouse gases in developing countries? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *51*, 129-145.