Original Article

Evaluation of Air Pollution Effects in Yazd City Based on DPSIR Framework and System Dynamics Approach

Zahra Dehghan Manshadi,[1*] Esmail Salehi,[1] Parastoo Parivar[2]

[1] Department of Environmental Planning and Management and HSE, Faculty of Environment, Tehran, Iran

[2] Department of Environmental Sciences, School of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran

Introduction: Since immigration and economic expansion have occurred concurrently in Yazd over the last two decades, housing and transportation requirements have increased, as has infrastructure development to support these needs. Moreover, climate change and a succession of droughts have adversely affected the city's air quality. Urban air pollution is a major problem that affects the environment, human health, and structures. To reduce air pollution in the city of Yazd, present efforts include the construction of restricted bicycle routes, the monitoring and regulation of air pollution in industrial areas, and the implementation of fine particulate control systems. Given the extensive and progressive impacts of air pollution on the city, it is crucial to provide planners with a comprehensive understanding of air pollution and future circumstances, including potential scenarios, from the outset. This study used the DPSIR framework and the system dynamics technique to establish causal relationships between the influencing variables and city air pollution.

Material and Methods: To gain a more comprehensive understanding of the cause-and-effect relationships that govern the system, the driving force, pressure, state, impact, and response variables were identified in the initial phase of this research methodology. Subsequently, during the modeling phase, the subsystems influencing the air quality were incorporated using the DPSIR framework. These subsystems comprised the environment, population, economy, landscape, transportation, and energy. The causal loop diagram was employed to illustrate the interrelationships among the variables. The stock and flow diagram was utilized in the final stage to generate scenarios and forecast forthcoming trends. The determination coefficient (R2) is a factor in establishing the accuracy of the simulation. Using the determination coefficient, the historical trend and simulation of two variables—urban population and the number of industrial licenses—were compared to validate the model.

Results and Discussion: By analyzing the system's critical variables, including urban population, investment in industrial areas, and water transferred to Yazd city, this study determined that their respective

[*] Corresponding Author Email Address: dehghan.zahra@ut.ac.ir

نسخه پیش انتشار

growth rates were 62, 54.76, and 16.54 percent. Furthermore, the computation of ED, PD, AREA_AM, and CONTAG metrics indicated that patches have tended to concentration and increased density. The primary cause of greenhouse gas emissions in the city is vehicles, the initial scenario pertains to regulating their quantity. The quantity of greenhouse gas emissions will decrease by 26.94% between 2015 and 2040 if the number of vehicles remains unchanged; conversely, if the present trajectory persists, it will escalate by 33.96%. In the second scenario, which ensued after the city became industrialized, an examination was conducted to determine the impact of a reduction in the quantity of industrial permits on air pollution. The findings of this study indicate that a reduction in the quantity of industrial licenses corresponds to a 56.01 percent decrease in greenhouse gas emissions. Furthermore, when scenarios 1 and 2 (with the number of vehicles held constant and the number of industrial licenses reduced) are combined, the emissions amount to 67.04 percent.

Conclusion: The results suggest that the primary source of pollution in Yazd city is the emission of greenhouse gases, primarily due to the rise in vehicle usage. On the other hand, the development of industry is the driving force behind the urban expansion. Consequently, reducing greenhouse gas emissions is one of the most effective methods for mitigating air pollution. Regulating the number of vehicles and intercity travel, as well as regulating industry, can accomplish this. Additionally, the development of fuel-efficient automobiles powered by renewable energy sources could serve as a viable approach to mitigating air pollution. The findings of this study demonstrate that a unidimensional approach to addressing the intricate issue of urban air pollution is ineffective. Instead, to implement comprehensive and integrated measures, it is necessary to identify inter-scale and cause-and-effect relationships. System dynamics is an appropriate methodology for comprehending such matters. It provides planners and decision-makers with a clear representation of the issue at hand, identifies effective and efficient variables, and explains the causal relationships that connect them. Additionally, scenario writing can assess the effectiveness of potential solutions.

Keywords: System thinking, System dynamics approach, Air pollution, Yazd city

مقاله پژوهشی

ارزیابی اثرات آلودگی هوا در شهر یزد بر اساس چارچوب DPSIR و رویکرد پویایی سیستم

زهرا دهقان منشادی[1]†، اسماعیل صالحی[1]، پرستو پریور[2]

[1] گروه برنامه‌ریزی و مدیریت محیط زیست و HSE، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

[2] گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد ، یزد، ایران

سابقه و هدف: در شهر یزد طی دو دهه اخیر، رشد اقتصادی و به دنبال آن افزایش مهاجرت، موجب بالا رفتن تقاضای مسکن، حمل‌ونقل و همچنین رشد زیرساخت‌های مربوط به آن‌ها شده است. از سوی دیگر تغییرات اقلیمی و خشک‌سالی‌های پی‌درپی نیز بر کیفیت هوای شهر اثر منفی داشته است. چنین نیرومحرکه‌هایی روی متغیرهای فشار از نوع منشأ شامل (ترافیک، مصرف سوخت و اتلاف انرژی) و محل جذب آلاینده‌ها یعنی مساحت فضاهای سبز و باز شهری مؤثر است. افزایش آلاینده‌های هوای شهری، اثرات مخربی روی سلامت انسان، تنوع زیستی و فرسودگی بناها دارد. اقداماتی که تاکنون به‌طور ناپیوسته در راستای کنترل آلودگی هوا در شهر یزد انجام‌شده شامل توسعه مسیرهای دوچرخه‌سواری به‌طور محدود، کنترل و پایش آلودگی هوا در شهرک‌های صنعتی و طرح‌های مرتبط با کنترل ریزگردها می‌باشد. ولی با توجه به اثرات گسترده و پیش‌رونده آلودگی هوا در این شهر در مرحله نخست باید تصویر کاملی از آلودگی هوا و شرایط آینده، همچنین سناریوهای محتمل، در اختیار برنامه‌ریزان قرار گیرد. ازاین‌رو، در این پژوهش از چارچوب DPSIR و رویکرد پویایی سیستم برای تعیین روابط علت و معلولی بین متغیرهای اثرگذار و اثرپذیر بر آلودگی هوای شهر استفاده‌شده و شرایط پیش رو نیز مدل‌سازی شده است.

مواد و روش‌ها: در اولین مرحله از روش این پژوهش، به‌منظور درک بهتر از روابط علت و معلولی حاکم بر سیستم به شناسایی عوامل نیرومحرکه، فشار، وضعیت، اثر و پاسخ پرداخته‌شده است. سپس با ورود به فاز مدل‌سازی پویایی سیستم ابتدا بر اساس چارچوب DPSIR، زیرسیستم مؤثر بر کیفیت هوای شهر معرفی‌شده‌اند که شامل زیرسیستم‌های جمعیت، اقتصاد، سیمای سرزمین، حمل‌ونقل، انرژی و محیط‌زیست هستند. برای نشان دادن تغییرات در زیرسیستم سیمای سرزمین با استفاده از نرم‌افزار Fragstats، متریک‌های ED، PD، AREA_AM و CONTAG بر اساس نقشه پوشش اراضی شهر یزد محاسبه شدند. سپس روابط میان متغیرها به‌کارگیری نمودار علت- معلولی در نرم‌افزار Vensim نشان داده شد و در آخرین مرحله نیز نمودار انباشت- جریان در

† Corresponding Author Email Address: dehghan.zahra@ut.ac.ir

نسخه پیش انتشار

همین نرم‌افزار برای سناریوسازی و پیش‌بینی روندهای آینده به کار رفت. به‌منظور اعتبارسنجی مدل نیز روند تاریخی و شبیه‌سازی دو متغیر جمعیت شهری و تعداد مجوزهای صنعتی با استفاده از ضریب تبیین مقایسه شده است.

نتایج و بحث: در این پژوهش با به‌کارگیری مدل‌سازی پویایی سیستم و بررسی متغیرهای کلیدی مانند جمعیت شهری، سرمایه‌گذاری در کارگاه‌های صنعتی و میزان آب انتقالی به شهر یزد مشخص شد که به ترتیب نرخ رشدی به میزان ۶۲، ۵۴/۷۶ و ۱۶/۵۴ درصدی داشته‌اند. تحلیل تغییرات ساختار سیمای سرزمین و محاسبه متریک‌های ED، PD، AREA_AM و CONTAG نیز نشان داد، در سطح سیمای سرزمین لکه‌ها به سمت خوشه‌ای و متراکم‌تر شدن پیش رفته و گردآمدگی زیاد و انتشار ضعیف انواع لکه‌ها نمایانگر این است که توزیع آن‌ها مناسب نیست و درنتیجه خرد دانگی در سطح سیمای سرزمین مشهود است. ازآنجاکه خودروها منبع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای در شهر هستند، بنابراین سناریوی اول مربوط به کنترل تعداد آن‌ها است. در صورت ثابت ماندن تعداد خودروها از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۰، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ۲۶/۹۴٪ کاهش خواهد یافت اما در صورت ادامه روند موجود ۳۳/۹۶ ٪ افزایش پیدا می‌کند. به دنبال صنعتی شدن شهر، در سناریوی دوم، تأثیر کاهش تعداد جوازهای صنعتی بر آلودگی هوا بررسی‌شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، در صورت کاهش تعداد مجوزهای صنعتی، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ۵۶/۰۱ درصد و در صورت ترکیب سناریو ۱ و ۲ (ثابت ماندن تعداد خودروها و کاهش مجوزهای صنعتی) ۶۷/۰۴ درصد کاهش خواهد یافت.

نتیجه‌گیری: نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که عامل اصلی آلودگی در شهر یزد، انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از افزایش تعداد خودروها است و از سوی دیگر افزایش رشد شهر درنتیجه توسعه صنعت است. بنابراین یکی از بهترین راهبردها برای کاهش آلودگی هوا، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است که از دو طریق یکی با کنترل تعداد خودروها و سفرهای درون‌شهری و دیگری کنترل صنعت، حاصل می‌شود. همچنین تولید خودروهای سازگاربامحیط‌زیست که می‌توانند به منابع انرژی تجدید پذیر به‌عنوان سوخت متکی باشند، می‌تواند راه‌حل مناسبی برای کاهش آلاینده‌های هوا باشد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که نگاه یک‌سویه به مسئله فرا پیچیده آلودگی هوای شهری کمکی به حل آن نمی‌کند. بلکه نیاز به اقدامات یکپارچه و کل‌نگری دارد که از طریق کشف روابط بین مقیاسی و علت و معلولی حاصل می‌شود. پویایی سیستم، رویکردی مناسب برای درک چنین مسائلی است. به‌طوری‌که می‌تواند تصویر شفافی از مسئله، متغیرهای اثرگذار و اثرپذیر و روابط علت و معلولی بین آن‌ها برای برنامه ریزان و تصمیم سازان فراهم کند. همچنین از طریق سناریونویسی می‌توان اثربخشی راه‌حل‌های ممکن را ارزیابی نمود.

واژه‌های کلیدی: تفکر سیستمی، رویکرد پویایی سیستم، آلودگی هوا، شهر یزد

مقدمه

شهرنشینی سریعی که در سال‌های اخیر در شهرهای ایران رخ‌داده، منجر به کاهش کیفیت محیط‌زیست و چالش‌های متعدد ازجمله آلودگی هوا شده است. کیفیت هوا و میزان آلاینده‌ها در شهر ناشی از تعامل پیچیده بین شرایط اکولوژیکی و عوامل انسانی بوده و تهدیدی قابل‌توجه برای سلامت شهروندان به شمار می‌آید (Khoshakhlagh et al., 2023). آلودگی هوا اغلب در ذرات معلق (PM)، ازن (O_3)، دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) و دی‌اکسید گوگرد (SO_2) از منظر آسیب به‌سلامت انسان تعریف می‌شود. در مطالعات آلودگی هوا، مونوکسید کربن (CO) و ترکیبات آلی فرار نیز در نظر گرفته می‌شوند، زیرا آن‌ها پیش سازهای تشکیل ازن و ذرات معلق هستند (Melamed *et al*., 2016). به‌طورکلی، ذرات معلق (PM) با قطر آئرودینامیکی کمتر از ۲.۵ میکرومتر (PM2.5)، دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) و ازن سطح زمین (O_3) به‌عنوان زیان‌بارترین آلاینده‌های هوای شهری طبقه‌بندی‌شده‌اند (Jalili et al., 2021).

قرار گرفتن در معرض این آلاینده‌ها با میزان ابتلا به بیماری‌های قلبی عروقی و عفونت‌های تنفسی، زوال عقل، کاهش امید به زندگی، پارکینسون، اختلالات روان‌شناختی، بیماری کلیوی، دیابت و مشکلات مربوط به سیستم تولیدمثل و زادآوری مرتبط است (Jalili et al., ۲۰۲۱; Khalili & Nasrabadi, ۲۰۲۲; Yang et al., ۲۰۲۰; Yang et al., ۲۰۲۳). علاوه بر این، مطالعات همه‌گیرشناسی در دو دهه اخیر نشان داده است که آلودگی هوا یکی از علل اصلی مرگ‌ومیر است. از سوی دیگر صنعتی شدن و رشد جمعیت نقش اصلی را در آلودگی هوا به‌خصوص در مناطق شهری ایفا می‌کند (Bose & Roy Chowdhury, ۲۰۲۳). ازاین‌رو، بررسی نقش توسعه شهرها بر کیفیت محیط‌زیست و به‌طور خاص کیفیت هوا جهت پیشبرد اهداف توسعه پایدار شهری ضروری است.

در دهه‌های گذشته پیشرفت انسان به‌منظور درک فرآیندهای اکولوژیکی قابل‌توجه بوده است. آنچه سبب محدودیت در پیش‌بینی رفتار سیستم‌های اجتماعی- اکولوژیکی می‌شود، پیچیدگی و در هم تنیدگی روابط متقابل مؤلفه‌های این سیستم در دنیای واقعی است، به‌ویژه هنگامی‌که فشارهای محیطی تحت عنوان اختلال‌ها با منشأ طبیعی و انسانی به‌طور مداوم بر این سیستم‌ها تحمیل می‌شوند (Dehghan Manshadi et al., 2023; Madani et al., 2022).

نسخه پیش انتشار

در زمینه شناسایی متغیرهای اثرگذار بر آلودگی هوا از روش‌های متنوعی استفاده می‌شود. از میان این روش‌ها می‌توان به مدلIPAT[‡] اشاره کرد که توسط Ehrlich and Holdren (1971) ارائه شد و اولین مدل به کار گرفته‌شده در زمینه تحلیل عوامل اصلی تخریب محیط‌زیست به شمار می‌رود. این مدل، عوامل اثرگذار را به مؤلفه‌هایی مانند اندازه جمعیت (P)، رونق اقتصادی و به‌عبارت‌دیگر مصرف سرانه یا سطح تولید (A) و فناوری (T) طبقه‌بندی می‌کند (Ai et al., ۲۰۲۲). در این مدل از تعداد افراد در منطقه مطالعاتی به‌عنوان اندازه جمعیت و از تولید ناخالص داخلی به‌عنوان شاخصی برای نشان دادن رونق اقتصادی استفاده می‌گردد که هر دو می‌توانند به‌عنوان نیرومحرکه، تأثیر منفی بر محیط‌زیست داشته باشند. پیشرفت فناوری نیز به‌عنوان ابزاری کارآمد و مهم به‌منظور کاهش اثرات منفی این دو مؤلفه به شمار می‌آید و در این مدل به‌عنوان عاملی جبرانی است (Li et al., ۲۰۲۳; Sadeghi et al., ۲۰۱۶). ازآنجاکه انتقادهایی مبنی بر استوار بودن مدلIPAT برفرض تناسب میان عوامل تأثیرگذار و محدودیت‌های معادله آن مطرح شد، Dietz and Rosa (1994) به‌منظور توسعه آن، مدل STIRPAT[§] را ارائه کردند که امکان آزمون فرضیه‌های تجربی و در نظر گرفتن اثرات تصادفی جمعیت، رونق اقتصادی و فناوری توسط رگرسیون را فراهم می‌کند (Ojaghlou et al., ۲۰۲۳). چارچوب نیرومحرکه-فشار-وضعیت-اثر-پاسخ نیز که برمبنای روابط علت و معلولی میان داده‌ها است، در این زمینه باهدف نشان دادن پیوندهای عوامل اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی، چگونگی تأثیرگذاری سیاست‌ها و قوانین تحت عنوان پاسخ‌هایی در برابر وضعیت موجود و یافتن بهترین پاسخ به‌کاررفته است (Ji et al., ۲۰۲۳; Parivar et al., ۲۰۲۳). تعدادی از پژوهش‌ها به‌منظور جامعیت بیشتر روش و امکان تجزیه‌وتحلیل و پیش‌بینی تحت سناریوهای مختلف این چارچوب را به همراه مدل‌سازی پویایی سیستم استفاده کردند (Parivar et al., ۲۰۲۳; Zare et al., ۲۰۱۹). پویایی سیستم روشی برای یادگیری سیستم‌های پیچیده است که با مدل‌سازی فرآیند در طول زمان سروکار دارد و می‌تواند به ما در درک بهتر پویایی‌های اکولوژیکی کمک کند. پویایی سیستم نه‌تنها یک نحوه تفکر بلکه ابزاری است که کمک می‌کند تا در مدل‌سازی، مسائلی مانند تاخیرات زمانی، بازخوردها و غیرخطی بودن رفتارهای سیستم و فرایندهای مرتبط، در نظر گرفته شود (Naderi et al., 2021; Wang et al., 2023). درنتیجه، با توجه به اینکه مدل‌های ذهنی انسان به دلیل محدودیت‌هایی که دارند در مواجهه با پیچیدگی سیستم‌های اجتماعی- اکولوژیکی منجر به راه‌حل‌های مقطعی و کم اثر می‌شوند، در مقابل به‌کارگیری رویکردهایی مانند پویایی سیستم با توجه به این‌که برنامه‌ریزان را از پیامدهای جبران‌ناپذیر و بدون بازگشت

[‡] Integrated Population, Affluence & Technology
[§] Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology

تصمیم‌ها در مقیاس‌های جهانی و محلی آگاه می‌کنند، یک ضرورت است (Naderi et al., 2021). پویایی سیستم فرآیندی است که مسیر رفت و برگشتی دارد درنتیجه طی چنین مسیری از طریق بازخوردها، تکرار و پرسش‌های مداوم، موجب درک بهتر متخصصان و برنامه‌ریزان نسبت به مسئله موردپژوهش می‌شود (Sterman, 2011).

شهر یزد، در فلات مرکزی ایران، در منطقه‌ای با آب‌وهوای خشک و سرزمین کویری واقع‌شده است. باوجود محدودیت‌های طبیعی در این منطقه، شهر یزد در دهه‌های اخیر ازنظر فیزیکی در حال گسترش بوده است (Parivar et al., 2021). هدف از این پژوهش شناسایی عوامل مؤثر و روابط علت و معلولی بین آن‌ها برشدت و کیفیت آلودگی هوای شهر یزد و روند تشدید آلودگی طی دهه‌های آتی می‌باشد.

پیشینه پژوهش

استفاده از پویایی سیستم برای مطالعه محیط‌زیست شهری در سال‌های اخیر موردتوجه قرارگرفته است. برای مثال Li و همکاران (۲۰۲۰) برای روشن شدن روابط علت و معلولی میان مؤلفه‌های تاب‌آوری شهری در کلان‌شهر پکن از مدل‌سازی پویایی سیستم استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که بیشتر از هر عامل دیگری ارتقای تاب‌آوری شهری به شرایط اقتصادی و اجتماعی جامعه بستگی دارد (Li et al., 2020). Wang و همکاران (۲۰۲۱) با به‌کارگیری مدل‌سازی پویایی سیستم طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۵ به بررسی رابطه بین سیستم‌های اجتماعی-اقتصادی و محیط زیستی و تأثیر آن بر ظرفیت برد منابع آب در شهر چانگچون چین پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که در صورت ادامه روند موجود، ظرفیت برد منابع آب به کاهش ادامه داده و در سال ۲۰۲۵ به ۰/۴۳۱خواهد رسید که مقدار آن پایین‌تر از حد عادی ظرفیت برد خواهد بود (Wang et al., 2021). شهسواری پور و همکاران (۲۰۲۲) از یک مدل پویایی سیستم برای شبیه‌سازی آلودگی هوای تهران به مدت بیست سال (از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۱) استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بهترین راهبردها برای کاهش آلودگی هوا، ساخت خودروهای دوستدار محیط‌زیست و حفاظت از فضای سبز شهری است (Shahsavari-Pour et al., 2022). زارع و همکاران (۲۰۱۹) برای ارزیابی جامع منابع آب حوضه گرگانرود-قره سو به ترکیب چارچوب نیرو محرکه-فشار-وضعیت-اثر-پاسخ (DPSIR) و مدل‌سازی پویایی سیستم پرداختند و کارایی آن را تائید کردند (Zare et al., 2019). Wangو Fu(۲۰۲۳) به‌منظور پیش‌بینی تغییرات ظرفیت برد منابع آب در استان شانکسی چین و باهدف ارتقای توسعه‌ای هماهنگ میان جمعیت، اقتصاد، منابع آب و محیط‌زیست، چارچوب DPSIR و مدل‌سازی پویایی سیستم را ترکیب کردند. نتایج این پژوهش نشان داد، ظرفیت برد منابع آب

نسخه پیش انتشار

شانکسی تا سال ۲۰۳۰ در صورتی افزایش خواهد یافت که طی طرح‌های حفاظتی از مصرف بیشتر آب خصوصاً برای توسعه اقتصادی جلوگیری شود (Wang & Fu, ۲۰۲۳). پریور و همکاران (۲۰۲۳) طی پژوهشی باهدف نشان دادن اثرات توسعه شهری بر تاب‌آوری منابع آب در مناطق خشک از چارچوب DPSIR و مدل‌سازی پویایی سیستم استفاده کردند. در این پژوهش، طبق سناریو ادامه وضع موجود، تا سال ۲۰۳۰ توسعه صنعتی با افزایش ۶۸ درصدی و توسعه شهری با افزایش ۶۲ درصدی به‌عنوان دو نیرومحرکه مهم بر تاب‌آوری منابع آب در شهر یزد شناخته شدند (Parivar et al., 2023). دهقان منشادی و همکاران (۲۰۲۴) از مدل‌سازی پویایی سیستم برای بررسی روند ظرفیت برد شهر تهران استفاده کردند. در این پژوهش، شاخص پایداری منابع آب به‌عنوان یک شاخص مؤثر شناخته شد که بررسی روند آن طی سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ نشان داد در سال ۲۰۲۶ به پایین‌تر از ۰/۱ خواهد رسید و ذخیره آب نمی‌تواند میزان تقاضای آب شهری پس از سال ۲۰۲۵ را پشتیبانی کند (Dehghan Manshadi et al., 2024).

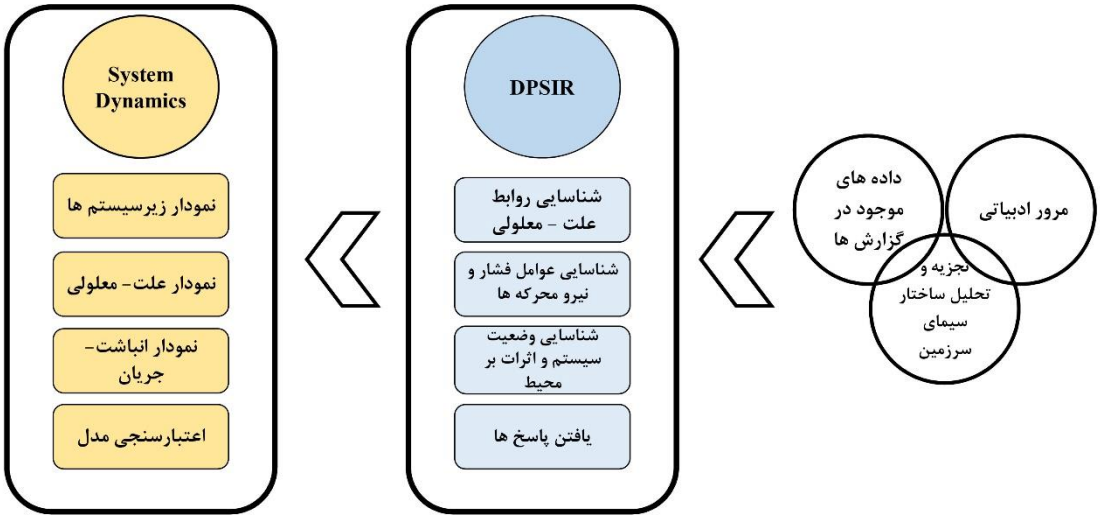
مواد و روش‌ها

منطقه موردپژوهش

شهر یزد با وسعت ۱۱۰کیلومترمربع در بخش مرکزی فلات ایران با ارتفاع ۱۲۱۵ متر از سطح دریا و مختصات ۵۲ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۳۷ دقیقه طول شرقی و ۲۹ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی قرارگرفته است. اقلیم شهر یزد بر اساس روش طبقه‌بندی دومارتن خشک و میانگین بارندگی به‌طور متوسط ۶۰ میلی‌متر در سال است (Iran Meteorological Organization, ۲۰۲۴). شهر یزد قدمتی طولانی درروند شهرنشینی داشته و مدل رشد شهری آن چندین بار تغییر کرده است (Rahbarianyazd, 2022). در شکل ۱ موقعیت مکانی شهر یزد نمایش داده‌شده است.

شکل ۱- موقعیت مکانی شهر یزد

در پژوهش حاضر از چارچوب DPSIR و مدل پویایی سیستم برای ارزیابی اثرات آلودگی هوا در شهر یزد استفاده‌شده که در شکل ۲، فرایند روش تحقیق نشان داده‌شده است. شروع مدل‌سازی پویایی سیستم ازنظر مفهومی می‌تواند مبهم و پیچیده باشد. یکی از چالش‌های پیش رو در ابتدا، درک تنوع داده‌ها در مورد جنبه‌های مختلف مسئله و سازمان‌دهی آن داده‌ها به روشی معنادار برای تجزیه‌وتحلیل و استفاده برای توسعه مدل کمی است. در نخستین گام مدل‌سازان با این پرسش مواجه می‌شوند که «چگونه بدانیم چه چیزی باید بدانیم» (Zare et al., ۲۰۱۹). این سؤال بسیار مهم است زیرا مدل‌سازان را راهنمایی می‌کند که از کجا شروع کنند، کدام داده‌ها، اطلاعات و گزارش‌ها مهم است و ارتباط متقابل میان متغیرها چیست (Dehghan Manshadi et al., ۲۰۲۴). مطابق شکل ۲، این پژوهش، چارچوب DPSIR را به‌عنوان یک روش مفید برای شاخت محدوده مسئله و عوامل تأثیرگذار در فرآیند مدل‌سازی به کار گرفته و برای شناسایی متغیرهای مربوط به این چارچوب و ارتباطات میان اجزاء آن از بررسی روند داده‌های موجود در آمارنامه‌ها و گزارش‌های شهرداری یزد، تجزیه‌وتحلیل سیمای سرزمین شهر با متریک‌ها و مرور ادبیاتی در این حوزه استفاده کرده است.



شکل ۲- فرایند روش تحقیق

چارچوب نیرومحرکه- فشار-وضعیت-اثر-پاسخ

با توجه به تعداد زیاد متغیرها و روابط پیچیده بین آن‌ها در مسئله آلودگی هوای شهری، نیاز به روش‌ها و ابزارهای مدل‌سازی است که به پژوهشگران در این راستا کمک کند. ازاین‌رو، فن‌های مدل‌سازی مفهومی مانند چارچوب نیرو محرکه-فشار-وضعیت-اثر-پاسخ ازجمله روش‌های مؤثر در بررسی اثرات محیط زیستی آلودگی هوای شهرها هستند (Wang & Fu, ۲۰۲۳).

چارچوب DPSIR توسط سازمان همکاری اقتصادی و توسعه** در سال ۱۹۹۳ و آژانس محیط‌زیست اروپا در سال ۱۹۹۵ توسعه‌یافته است. در حال حاضر، محققان DPSIR را به‌عنوان یک چارچوب مهم برای تحقیقات توسعه پایدار در نظر می‌گیرند و از آن برای ارزیابی تغییرات محیط زیستی استفاده می‌کنند (Agramont et al., 2022; Carr et al., 2007). پیش‌بینی وضعیت در سیستم‌های اجتماعی- اکولوژیکی تابع پیچیده‌ای است که شامل منابع آب، جمعیت، توسعه اقتصادی، علم و فناوری، زمان و عوامل دیگر می‌شود و انواع مختلفی از مکانیسم‌های بازخوردی در آن وجود دارد. محققان از چارچوب پرکاربردی به نام چارچوب نیرومحرکه- فشار-وضعیت-اثر-پاسخ استفاده می‌کنند که می‌تواند زیرسیستم‌ها را از پنج دیدگاه مختلف بررسی کند و علاوه بر شناسایی بهتر روابط علی معلولی می‌تواند در انتخاب و به‌کارگیری شاخص‌های مناسب مفید باشد (Zare et al., 2019). این چارچوب شاخص‌های ارزیابی را به پنج نوع تقسیم می‌کند:

** Organization for Economic Co-operation and Development

نیرومحرکه (D)، فشار (P)، وضعیت (S)، اثر (I) و پاسخ (R). نیرومحرکه‌ها به‌عنوان موانع توسعه پایدار شناخته‌شده و منجر به وقوع رفتارهای پیچیده در اکوسیستم‌ها می‌شوند. شاخص‌های وضعیت، روند فعلی را منعکس می‌کنند و ویژگی قابل‌اندازه‌گیری هستند که توسط ترکیبی از نیرومحرکه‌ها و عوامل فشار ایجاد می‌شود. شاخص‌های اثر، منعکس‌کننده نتیجه نهایی هستند که تأثیر بر انسان تحت عمل نیروی محرکه و فشار را منعکس می‌کنند. پاسخ مجموعه‌ای از اقدامات است که انسان برای جلوگیری از وضعیت‌های محیط‌زیستی غیرمنتظره در مواجهه با اختلال انجام می‌دهد (Zhang et al., 2021).

پویایی‌شناسی سیستم

پروفسور فارستر از موسسه فناوری ماساچوست رویکرد پویایی سیستم را در اواخر دهه ۱۹۵۰ پایه‌گذاری کرد. «پویایی صنعتی» اولین کتاب او بود که در سال ۱۹۶۱ منتشر شد (Coyle, 1997). میدوز[††] و همکاران نیز در سال ۱۹۷۲ با انتشار کتابی به نام «محدودیت‌های رشد[‡‡]» با استفاده از تفکر سیستمی و نمودارهای علت و معلولی توضیح دادند که چگونه سیاست‌ها در جهان باعث ایجاد ناپایداری بدون فروپاشی ناگهانی، غیرقابل‌کنترل و فراهم کردن قابلیت تأمین نیازهای اساسی جامعه می‌شود (Meadows et al., 1972). «محدودیت‌های رشد» نمونه‌ای از پتانسیل پویایی سیستم به‌عنوان ابزاری برای کمک به درک سیستم‌های پیچیده‌ی اجتماعی- اکولوژیکی است که هنوز هم به‌عنوان یک منبع ارزشمند برای تفکر در مورد آینده‌ی پایدار در نظر گرفته می‌شود (Elsawah et al., 2017). پویایی سیستم یک روش تجزیه‌وتحلیلی و بازخوردی بر مبنای رایانه است. در این رویکرد با توجه به روابط علت و معلولی و مکانیسم‌های بازخوردی و درنتیجه روشن شدن پیامدهای وقوع هر سناریو، می‌توان به تصمیم‌گیری رسید (Naderi et al., 2021). مدل‌سازی یک توالی خطی از مراحل نیست بلکه یک فرآیند بازخوردی است. مدل‌ها از طریق تکرار پیوسته، پرسش مداوم، آزمایش و اصلاح بررسی می‌شوند. هدف اولیه، مرز و دامنه مدل‌سازی را تعیین می‌کند اما آنچه روند مدل‌سازی نشان می‌دهد، می‌تواند روی درک مسئله و هدف برنامه‌ریز تغییر ایجاد کند. در هر پروژه مدل‌سازی، مراحل بار ها و بار ها می‌توانند تکرار شوند (Sterman, 2000).

[††] Meadows
[‡‡] Limits to growth

نسخه پیش انتشار

شبیه به هر تکنیک مدل‌سازی، مدل‌سازی پویایی سیستم نیز لازم است با مرحله مهم و اساسی مرزبندی و شناسایی مسئله شروع شود. در عمل، این اولین گام یک کار چالش‌برانگیز است (Nabavi et al., 2017). درواقع توسعه‌ی مدل شامل دو مرحله‌ی اصلی است. در مرحله اول، نمودار علّت - معلولی و به دنبال آن نمودار حالت-جریان را ایجاد می‌کنیم. نمودار علّت - معلولی به پژوهشگر کمک می‌کند تا با نشان دادن متغیرهای مهم سیستم و درک روابط میان آن‌ها ساختار مسئله را به‌طور کامل و شفاف ترسیم کند (Dehghan Manshadi & Parivar, ۲۰۲۳). به گفته استرمن (۲۰۰۰)، یک نمودار علّت - معلولی می‌تواند برای به نمایش درآوردن مدل‌های ذهنی فردی و تیمی استفاده شود (Sterman, 2000). مورکرافت (۲۰۱۵) استدلال می‌کند که عمل ساختن نمودار علّت - معلولی به افراد کمک می‌کند تا فراتر از نتایج فوری و روابط خطی فکر کنند و اثرات تأخیر و حلقه‌های بازخوردی را در نظر بگیرند. فرآیند توسعه نمودارهای علّت - معلولی به‌خودی‌خود ضروری است زیرا موجب گفت‌وگو میان ذینفعان در مورد ساختار مسئله و به اشتراک‌گذاری دانش برای پشتیبانی از فرآیند یادگیری و ایجاد درک مشترک از بروز مسئله خواهد شد (Morecroft, 2015). از نمودارهای انباشت- جریان برای نشان دادن "فیزیک مسئله" یا ساختار فیزیکی ایجادکننده مسئله با به‌کارگیری متغیرهای انباشت و جریان (عناصر مسئله) استفاده می‌شود. متغیرهای انباشت (همچنین به‌عنوان حالت نیز نامیده می‌شود) یک سیستم کلیدی هستند که تصمیم‌گیرنده بر اساس اطلاعات آن به نظارت و مدیریت می‌پردازد. متغیرهای جریان نیز فرآیندهای اثرگذار بر نحوه ساخت و تخلیه انباشت‌ها در مدل می‌باشند (Richmond, 1993). نحوه تفکر در نمودارهای انباشت-جریان درک دقیق‌تری از پویایی مسئله به ما خواهد داد، که ممکن است در نمودار علت و معلولی میسر نشود. به‌عنوان‌مثال، متغیر انباشت منجر به تفکر عمیق در مورد معنا و نقش هر متغیر و چگونگی اندازه‌گیری آن‌ها می‌شوند. همچنین خطاهای سیستماتیک بالقوه، مانند اشتباه در همبستگی و علیت را برجسته می‌کنند. نمودارهای انباشت-جریان را می‌توان با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی مانند ونسیم پیاده‌سازی کرد. رسم نمودار انباشت-جریان، امکان ارزیابی و پیش‌بینی اثرات سناریوها و استراتژی‌های مختلف را فراهم می‌کند (O'Keeffe et al., 2022). در این پژوهش، رسم نمودار علّت - معلولی و انباشت- جریان در نرم‌افزار ونسیم[§§] انجام‌شده است.

تحلیل ساختار سیمای سرزمین شهر یزد

[§§] Vensim

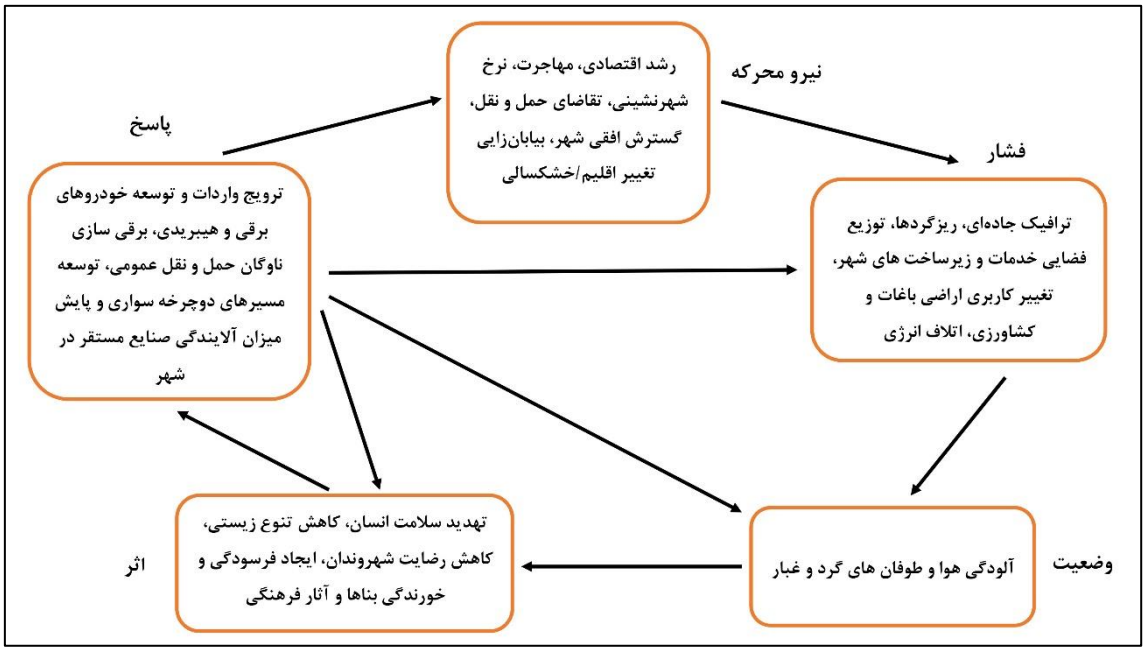
در این پژوهش برای نشان دادن تغییرات ساختاری در مقیاس لندسکیپ از محاسبه متریک‌های ED***، PD†††، AREA_AM و CONTAG استفاده‌شده است. متریکED و PD نشان‌دهنده خرد دانگی‡‡‡ و متریک AREA_AM نشان‌دهنده اندازه لکه است (Kubacka & Piniarski, ۲۰۲۴). کاهش تدریجی اندازه لکه‌ها در یک لندسکیپ نیز گویای پدیده خرد دانگی است (Masoudi et al., ۲۰۲۴). متریک CONTAG نیز نحوه پراکندگی انواع لکه را نسبت به هم نشان می‌دهد (Parvar et al., ۲۰۲۴). این متریک‌ها بر اساس نقشه‌های پوشش اراضی (در سه دوره زمانی) به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ (پانزدهم اوت ۱۹۹۶ و شانزدهم اوت ۲۰۰۶) سنجنده TM و لندست ۸ (بیست و دوم اوت ۲۰۱۶) سنجنده OLI در نرم‌افزار FRAGSTAT محاسبه‌شده است.

یافته‌های پژوهش

در شکل ۳، چارچوب نیرومحرکه-فشار-وضعیت – اثر - پاسخ در رابطه با مسئله آلودگی هوای شهر یزد نشان داده‌شده است. در شهر یزد طی دو دهه اخیر، رشد اقتصادی و به دنبال آن افزایش مهاجرت به این شهر، باعث افزایش تقاضای مسکن و حمل‌ونقل همچنین رشد زیرساخت‌های مربوط به آن‌ها شده است. از سوی دیگر تغییرات اقلیمی و خشک‌سالی‌ها روی کیفیت هوای این شهر با افزایش کانون‌های گردوغبار اثر منفی داشته است. چنین نیرومحرکه‌هایی روی متغیرهای فشار از نوع منشأ شامل (ترافیک، مصرف سوخت و اتلاف انرژی) و محل جذب آلاینده‌ها یعنی فضاهای سبز و باز شهری مؤثر بوده است. مجموعه متغیرهای ذکرشده، با افزایش آلاینده‌ها، کیفیت هوای شهری را به‌شدت تحت تأثیر قرار داده است. افزایش آلاینده‌های هوای شهری، اثرات مخربی روی سلامت انسان، تنوع زیستی و فرسودگی بناها دارد. اقداماتی که تاکنون به‌طور ناپیوسته در این شهر در راستای کنترل آلودگی هوا انجام‌شده است شامل توسعه مسیرهای دوچرخه‌سواری به‌طور محدود، کنترل و پایش آلودگی هوا در شهرک‌های صنعتی و طرح‌های مرتبط با کنترل ریزگردها می‌باشد. ولی با توجه به اثرات گسترده و پیش‌رونده آلودگی هوا در شهر یزد در مرحله نخست باید تصویر کاملی از آلودگی هوا و شرایط آینده، همچنین سناریوهای محتمل، در اختیار برنامه‌ریزان قرار گیرد. ازاین‌رو، در این پژوهش با استفاده از رویکرد پویایی سیستم، شرایط پیش رو در ارتباط با آلودگی هوای شهر یزد مدل‌سازی شده است.

نسخه پیش انتشار

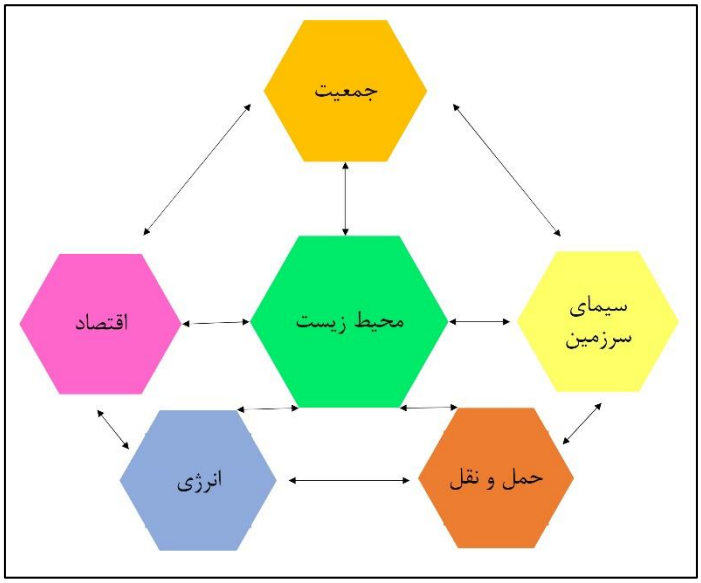
*** Edge Density (ED)
††† Patch Density
‡‡‡ Fragmentation



شکل ۳- چارچوب نیرومحرکه- فشار-وضعیت-اثر-پاسخ

زیرسیستم‌های مؤثر بر کیفیت هوای شهر یزد

بر اساس چارچوب نیرومحرکه-فشار-وضعیت – اثر و پاسخ ترسیم‌شده در این پژوهش که در بخش قبل تشریح شد (شکل ۳)، شش زیرسیستم اصلی برای مدل آلودگی هوای شهر یزد در نظر گرفته‌شده است که در شکل ۴ نمایش داده‌شده است و در ادامه توضیح داده خواهد شد.



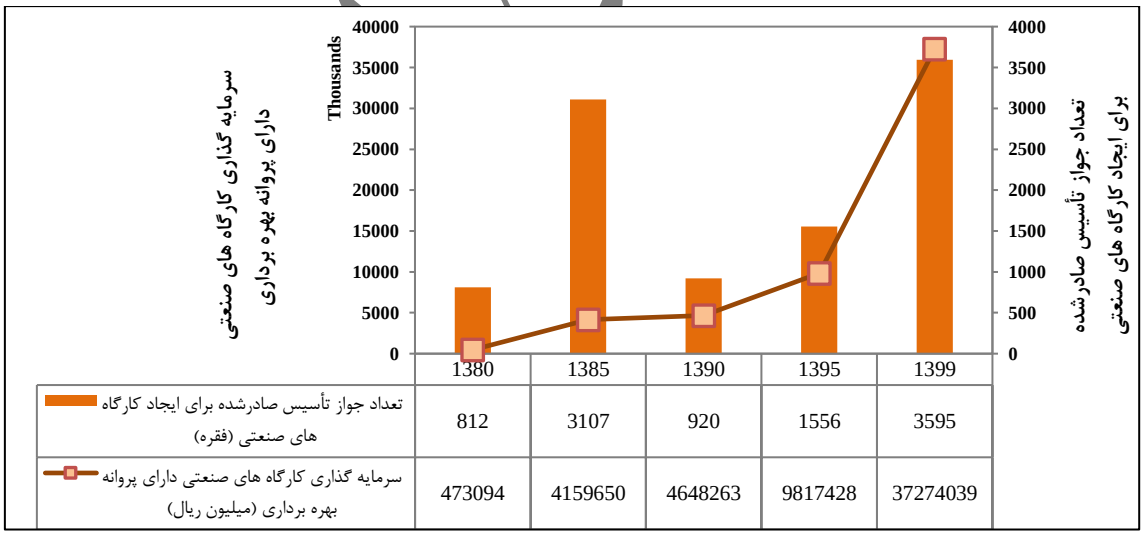
شکل ۴- زیرسیستم‌های مؤثر بر کیفیت هوای شهر یزد

زیرسیستم جمعیت

جمعیت شهر یزد با رشد ۶۲ درصد از ۳۲۶۷۷۶ نفر در سال ۱۳۷۵ به ۷۲۵۸۰۰ نفر در سال ۱۴۰۰ رسیده است. تعداد مهاجران به شهر نیز از ۹۰۳۷۷ نفر در ۱۳۷۵ به ۹۵۷۵۰ نفر در سال ۱۳۹۵ برآورد می‌شود (Statistical Center, ۲۰۲٤). در پی این افزایش جمعیت، تغییراتی در ساختار شهر رخداده که نشان‌دهنده توسعه افقی شهر می‌باشد. به همین دلیل هرچند شهر یزد ازنظر اندازه شهر، شهر میانی محسوب می‌شود اما با سرعت زیادی به سمت پراکنده رویی پیش رفته است (Karimkhani & Saraei, ۲۰۲۰).

زیرسیستم اقتصادی

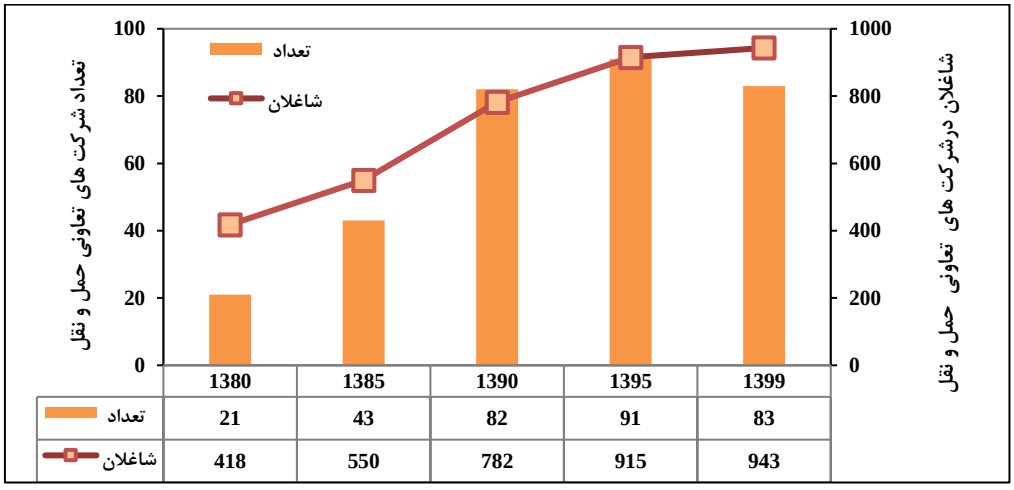
از عوامل اصلی جذب جمعیت در شهر یزد، افزایش فعالیت‌های صنعتی بوده به‌طوری‌که طی دو دهه اخیر تولید ناخالص داخلی در استان یزد به میزان ۲۰۰ درصد افزایش‌یافته است (Plan and Budget Organization, 2022). همچنین از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹، تعداد جواز تأسیس صادرشده توسط سازمان صنعت، معدن و تجارت برای ایجاد کارگاه‌های صنعتی و سرمایه‌گذاری کارگاه‌های صنعتی دارای پروانه بهره‌برداری به ترتیب نرخ رشد ۱۶/۰۴ و ۵۴/۷۶ درصدی داشته است (House of Industry and Mine and Trade of Yazd, 2022).



شکل ۵- توسعه صنعتی در شهر یزد از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹

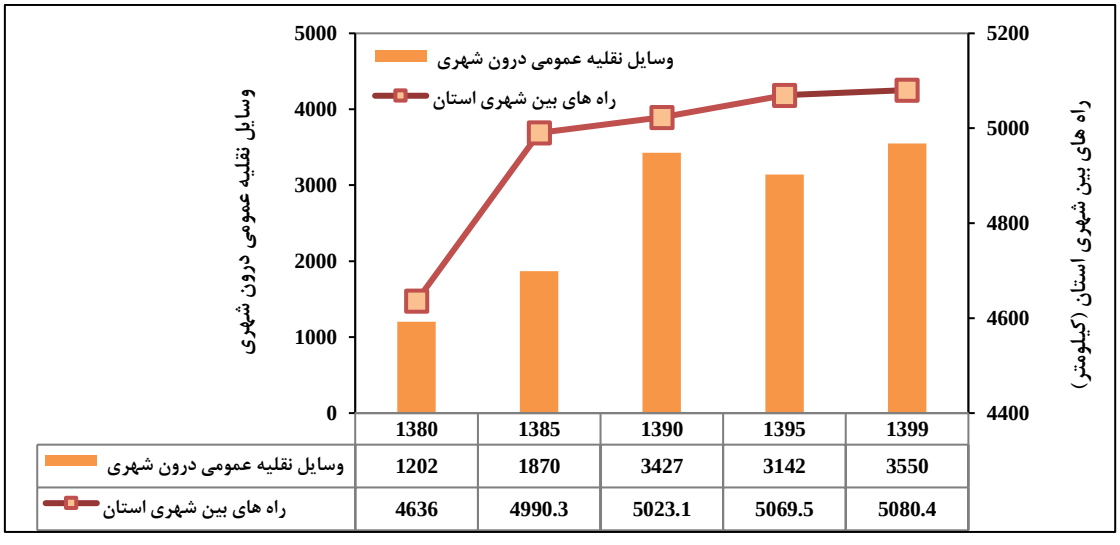
زیرسیستم حمل‌ونقل

با افزایش جمعیت، سیستم حمل‌ونقل در شهر گسترش‌یافته به‌طوری‌که تعداد شرکت‌های تعاونی حمل‌ونقل و شاغلان در این بخش از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹ به ترتیب نرخ رشد ۱۴/۷۳ و ۸/۴۸ درصدی داشته است. در بازه زمانی مشابه، نرخ رشد مجموع وسایل نقلیه عمومی درون‌شهری (اتوبوس، مینی‌بوس و تاکسی) و راه‌های بین‌شهری استان نیز ۱۱/۴ و ۰/۹ درصد می‌باشد (Yazd Municipality, 2020).



	1380	1385	1390	1395	1399
تعداد	21	43	82	91	83
شاغلان	418	550	782	915	943

شکل ۶- توسعه حمل‌ونقل در شهر یزد از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹

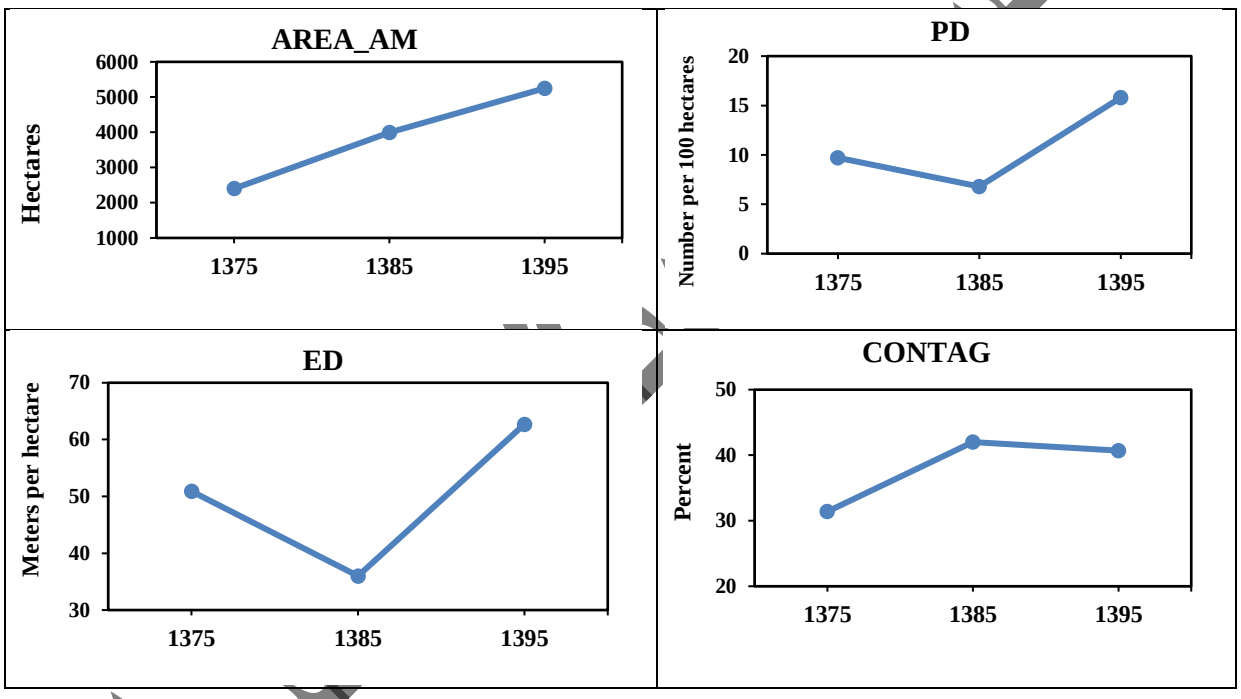


	1380	1385	1390	1395	1399
وسایل نقلیه عمومی درون شهری	1202	1870	3427	3142	3550
راه های بین شهری استان	4636	4990.3	5023.1	5069.5	5080.4

شکل ۷- توسعه وسایل نقلیه عمومی و راه‌های بین‌شهری استان یزد از ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹

زیرسیستم سیمای سرزمین

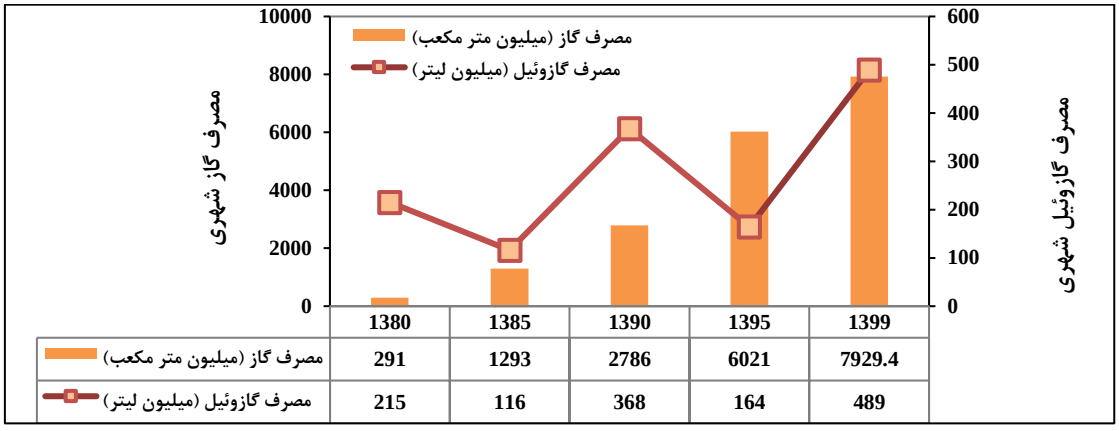
بررسی ساختار سیمای سرزمین شهر یزد از سال ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۵ نشان می‌دهد که متریک‌های ED، PD، AREA_AM و CONTAG افزایش‌یافته است. این افزایش نشان‌دهنده این است که در سطح سیمای سرزمین لکه‌ها به سمت خوشه‌ای و متراکم‌تر شدن پیش رفته‌اند. گردآمدگی زیاد و انتشار ضعیف انواع لکه‌ها نشان می‌دهد که توزیع آن‌ها در سیمای سرزمین مناسب نبوده و درنتیجه خرد دانگی در سطح سیمای سرزمین مشهود است.



شکل ۸- وضعیت متریک‌های سیمای سرزمین در شهر یزد طی سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۵

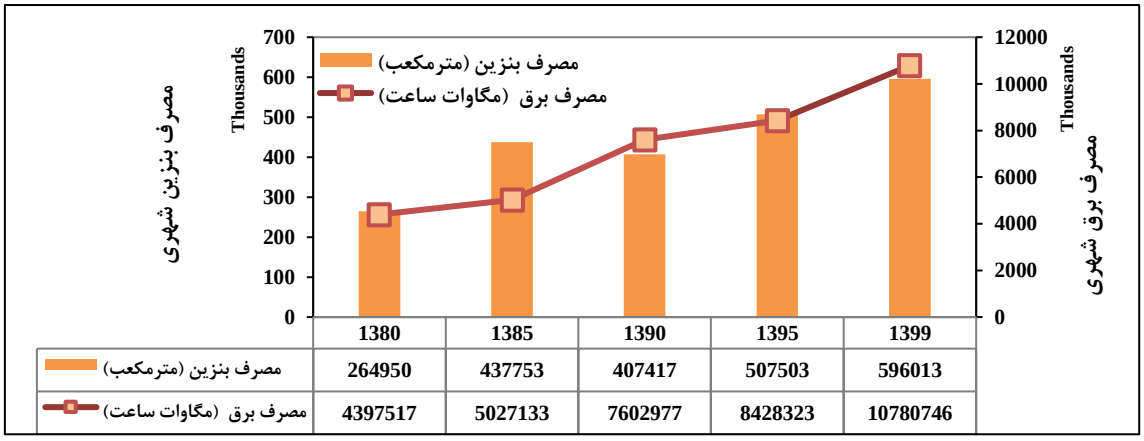
زیرسیستم انرژی

در این زیرسیستم، برای نشان دادن وضعیت مصرف انرژی از مقادیر مصرف برق، گاز، گازوئیل و بنزین از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹ استفاده‌شده است. مطابق شکل ۹، میزان مصرف گاز و گازوئیل شهری به ترتیب از ۲۹۱ میلیون مترمکعب و ۲۱۵ میلیون لیتر در سال ۱۳۸۰ به ۷۹۲۹/۴ میلیون مترمکعب و ۴۸۹ میلیون لیتر در سال ۱۳۹۹ رسیده است (Yazd Municipality, 2020). بنابراین مصرف گاز و گازوئیل شهری در این بازه زمانی به ترتیب نرخ رشد ۳۹/۱۷ و ۸/۵۶ درصدی داشته است. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده‌شده است، نرخ رشد مصرف بنزین و برق شهری نیز از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹ به ترتیب ۸/۴۴ و ۹/۳۸ درصد می‌باشد.



	1380	1385	1390	1395	1399
مصرف گاز (میلیون متر مکعب)	291	1293	2786	6021	7929.4
مصرف گازوئیل (میلیون لیتر)	215	116	368	164	489

شکل ۹- وضعیت مصرف گاز و گازوئیل در شهر یزد طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹

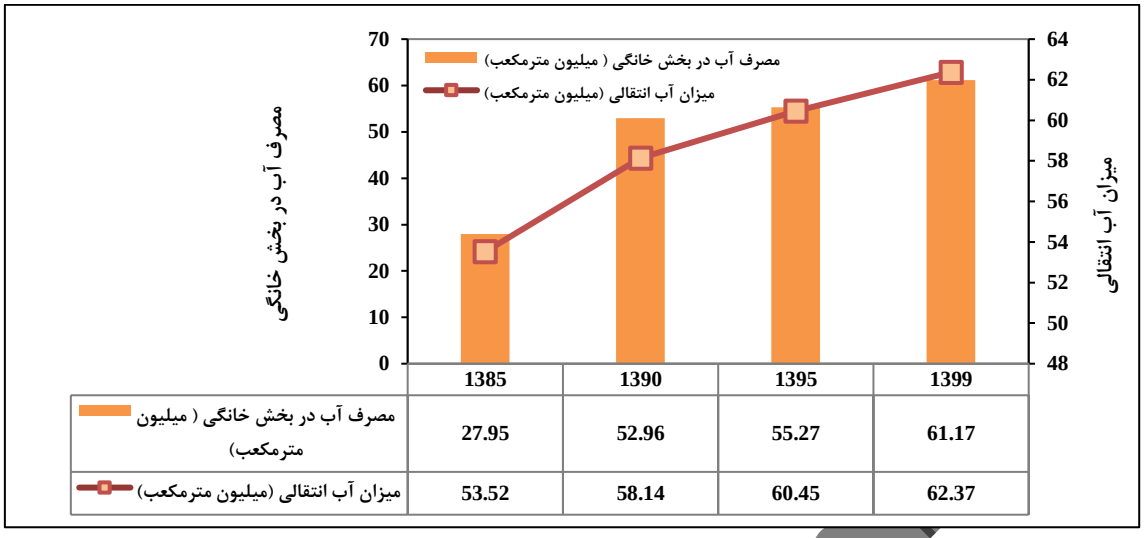


	1380	1385	1390	1395	1399
مصرف بنزین (مترمکعب)	264950	437753	407417	507503	596013
مصرف برق (مگاوات ساعت)	4397517	5027133	7602977	8428323	10780746

شکل ۱۰- وضعیت مصرف برق و بنزین در شهر یزد طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹

زیرسیستم محیط‌زیست

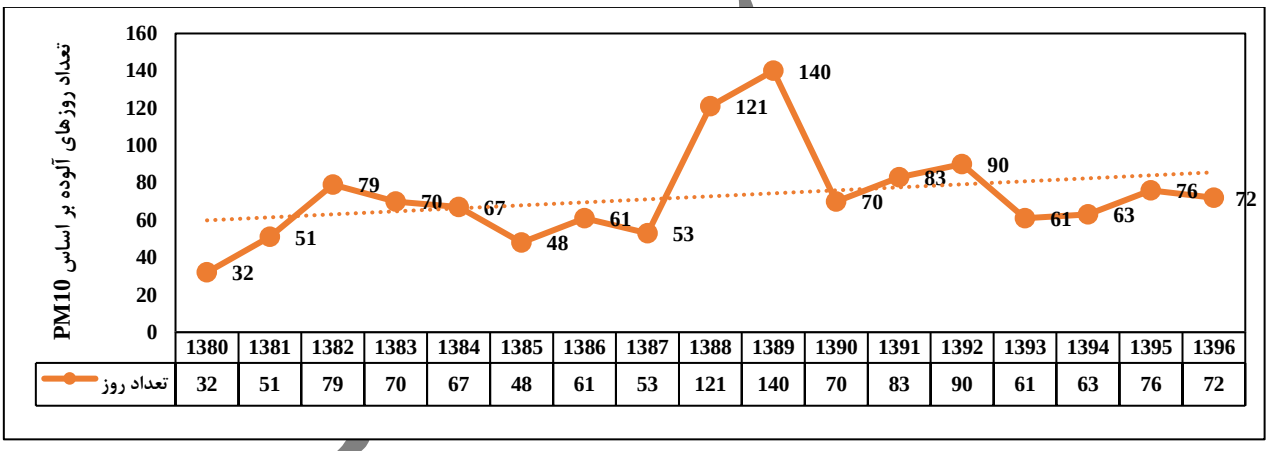
در این پژوهش، برای نشان دادن وضعیت زیرسیستم محیط‌زیست از معیارهایی نظیر آلودگی هوا و مصرف آب استفاده‌شده است. به دنبال افزایش جمعیت شهر یزد، میزان مصرف آب خانگی از ۲۷/۹۵ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۸۵ به ۶۱/۱۷ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۹۸ رسیده است (Yazd Municipality, 2020). میزان آب انتقالی به شهر یزد نیز طبق داده‌های موجود از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۸ موردبررسی قرارگرفته است که درصد افزایش آن برابر با ۱۶/۵۴٪ می‌باشد.



	1385	1390	1395	1399
مصرف آب در بخش خانگی (میلیون مترمکعب)	27.95	52.96	55.27	61.17
میزان آب انتقالی (میلیون مترمکعب)	53.52	58.14	60.45	62.37

شکل ۱۱- وضعیت مصرف آب خانگی و میزان آب انتقالی به شهر یزد طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹

در این پژوهش برای نشان دادن کیفیت هوا در شهر یزد مجموع تعداد روزهای سال که در آن ذرات PM10 بالاتر از ۱۵۰ میکروگرم در مترمکعب هوا بوده، در نظر گرفته‌شده است. PM10 شامل ذرات دارای قطر آئرودینامیکی ۱۰µ و کمتر است. مقدار این شاخص طی دوره مطالعاتی روند افزایشی داشته است که بیانگر افزایش تعداد روزهای با آلودگی گردوغبار در سال می‌باشد (Parivar et al., 2021).

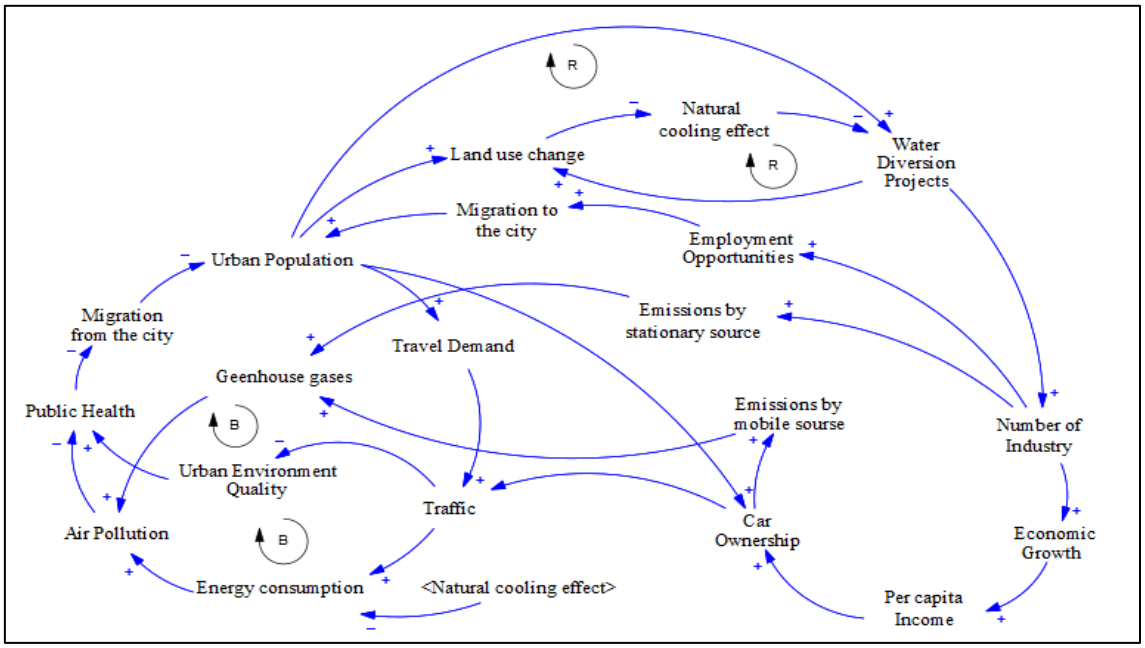


	1380	1381	1382	1383	1384	1385	1386	1387	1388	1389	1390	1391	1392	1393	1394	1395	1396
تعداد روز	32	51	79	70	67	48	61	53	121	140	70	83	90	61	63	76	72

شکل ۱۲- تعداد روزهای آلوده بر اساس PM10 از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۶

نمودار علّت - معلولی

در شکل ۱۳، با توجه به مسئله پژوهش، ارتباطات میان متغیرها با رسم حلقه‌های علّت - معلولی نشان داده‌شده است.

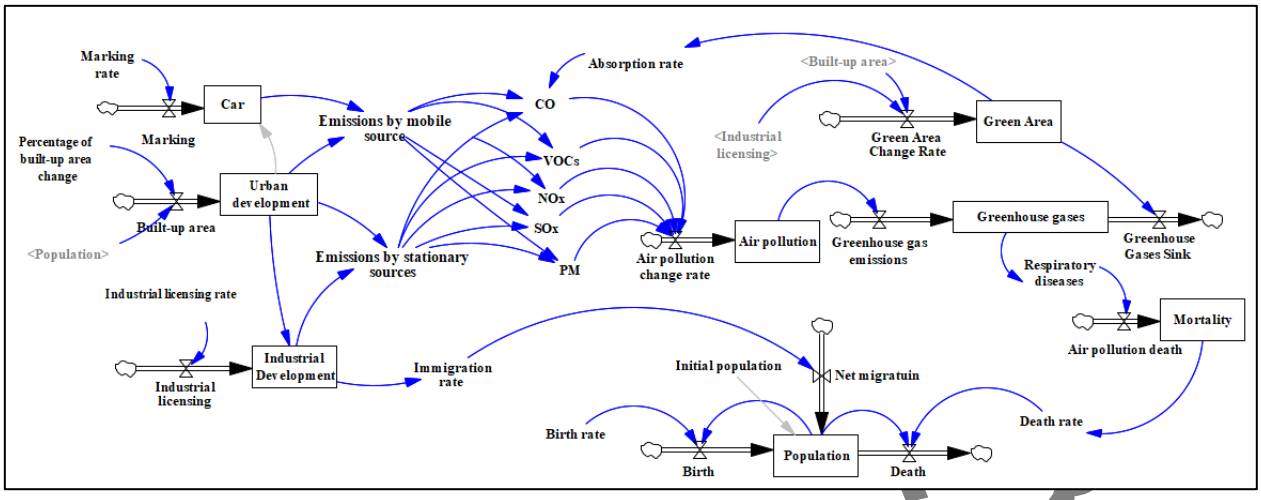


شکل ۱۳- نمودار علّت - معلولی

با بررسی که در این پژوهش روی زیرسیستم‌های مؤثر بر آلودگی هوای شهر یزد انجام گرفت (گام قبل)، نمودار علت - معلولی ترسیم شد. مطابق شکل ۱۳، رشد سریع در شهر یزد موجب تغییر کاربری اراضی و افزایش جزایر حرارتی می‌شود که با توجه به اقلیم گرم و خشک یزد، انرژی بیشتری به‌منظور تعدیل دما استفاده خواهد شد. همچنین توسعه صنعتی و رشد اقتصادی به دنبال افزایش پروژه‌های انتقال آب رخ خواهد داد که منجر به فرصت‌های شغلی بیشتر و جذب مهاجر و درنهایت افزایش جمعیت شهر می‌شود (حلقه تقویت‌کننده). از سوی دیگر، افزایش جمعیت منجر به رشد شهر، توسعه ساخت‌وسازها و افزایش تقاضای سفر و ترافیک همراه است که باعث افزایش مصرف انرژی و آلودگی هوا می‌شود. در پی آلودگی هوا، پایین آمدن سطح سلامت عمومی و کیفیت زندگی و افزایش نارضایتی ساکنان، تا حدی مهاجرت از شهر رخ خواهد داد که این می‌تواند از جمعیت شهر بکاهد (حلقه متعادل‌کننده).

نمودار انباشت-جریان

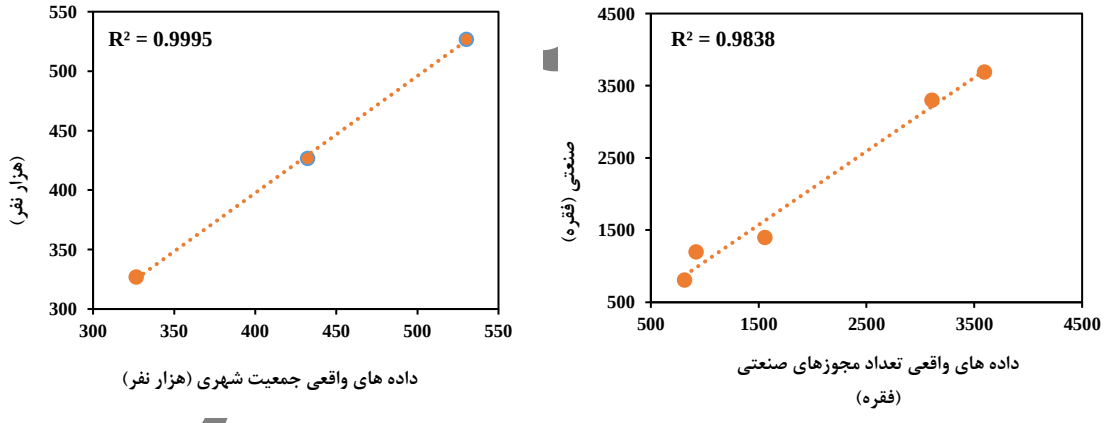
پس از تعریف زیرسیستم‌ها و روابط علّت - معلولی میان متغیرها، مدل انباشت-جریان بر پایه آن ایجاد شد و در شکل ۱۴ نمایش داده‌شده است.



شکل ۱۴- نمودار انباشت – جریان

اعتبارسنجی مدل

مطابق شکل ۱۵، در این پژوهش، اعتبارسنجی از طریق مقایسه نتیجه شبیه‌سازی متغیرهای جمعیت شهری و تعداد صنایع با داده‌های واقعی انجام‌شده است که میزان ضریب تبیین نشان می‌دهد، مدل بسط داده‌شده، عملکرد قابل قبولی دارد.

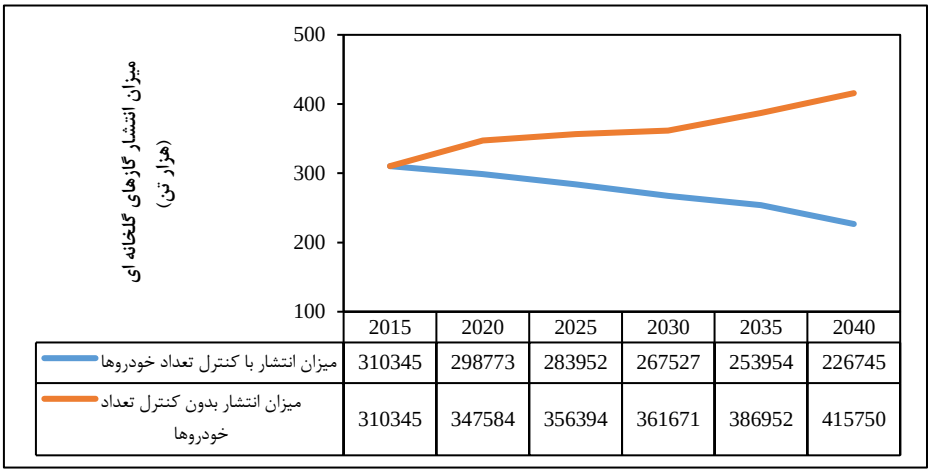


شکل ۱۵- نتایج اعتبارسنجی بر پایه ضریب تبیین

سناریوها

سناریوی ثابت ماندن تعداد خودروها

خودروها منبع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای در شهرها هستند. از سوی دیگر افزایش بیش‌ازحد آن‌ها نه‌تنها آلودگی هوای شهرها را افزایش می‌دهد، بلکه موجب ازدحام، تصادف و ... نیز خواهد شد. بنابراین توصیه می‌شود تعداد خودروها کنترل و مدیریت شود. اگر این امکان وجود ندارد، منع تردد خودروهای فرسوده نیز می‌تواند تا حدی مؤثر واقع شود. مطابق شکل ۱۶ در صورت ثابت ماندن تعداد خودروها از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۰، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ۲۶/۹۴٪ کاهش خواهد یافت اما در صورت ادامه روند موجود ۳۳/۹۶٪ افزایش پیدا می‌کند.

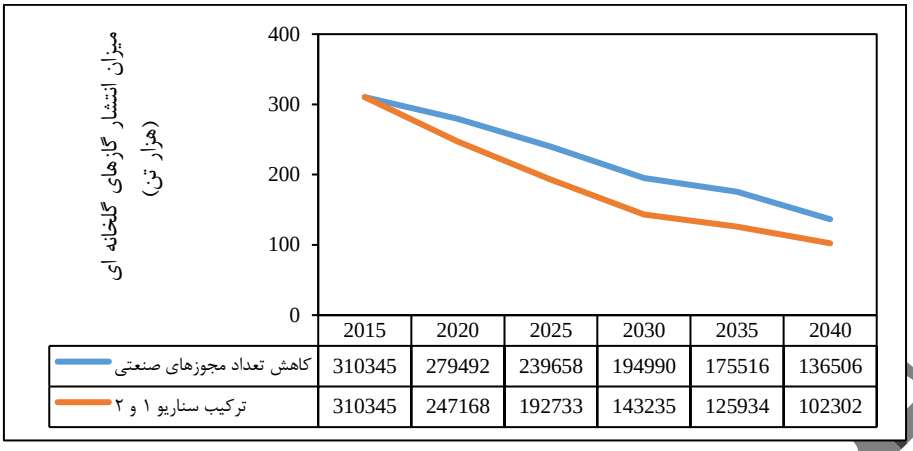


	2015	2020	2025	2030	2035	2040
میزان انتشار با کنترل تعداد خودروها	310345	298773	283952	267527	253954	226745
میزان انتشار بدون کنترل تعداد خودروها	310345	347584	356394	361671	386952	415750

شکل ۱۶- پیش‌بینی نتیجه کنترل تعداد خودروها بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۰۴۰

سناریوی کاهش تعداد مجوزهای صنعتی

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹، تعداد جواز تأسیس صادرشده توسط سازمان صنعت، معدن و تجارت یزد برای ایجاد کارگاه‌های صنعتی و سرمایه‌گذاری کارگاه‌های صنعتی دارای پروانه بهره‌برداری به ترتیب نرخ رشد ۱۶/۰۴ و ۵۴/۷۶ درصدی داشته است. بنابراین در سناریو ۲، تأثیر کاهش تعداد این جوازها بر آلودگی هوا بررسی‌شده است. مطابق شکل ۱۷، در صورت کاهش تعداد مجوزهای صنعتی، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ۵۶/۰۱ درصد و در صورت ترکیب سناریو ۱ و ۲ (ثابت ماندن تعداد خودروها و کاهش مجوزهای صنعتی) ۶۷/۰۴ درصد کاهش خواهد یافت.



	2015	2020	2025	2030	2035	2040
کاهش تعداد مجوزهای صنعتی	310345	279492	239658	194990	175516	136506
ترکیب سناریو ۱ و ۲	310345	247168	192733	143235	125934	102302

شکل ۱۷- پیش‌بینی نتیجه کاهش تعداد مجوزهای صنعتی و ترکیب سناریو ۱ و ۲ بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۰۴۰

یافته‌های پژوهش حاضر با پژوهش‌های محققانی مانند Benadkuki and Nasrollahi (2020) هم‌راستا است و نتایج محاسبات آن‌ها نیز نشان داد که در سال ۱۳۹۵ صنایع استان یزد با سهم ۸۹/۹۳ بیشترین میزان انتشار آلایندگی را داشته‌اند. طبق پژوهش Nasrollahi and Poushdouzbashi (2020)، افزایش وسایل نقلیه در شهر یزد باعث انتشار سالانه ۳۰۶ تن ذرات معلق و ۶۸۹۳۴ تن دی‌اکسید کربن می‌شود، که در این پژوهش نیز به تأثیر این عامل اشاره‌شده است. همچنین طی پژوهشی که Parivar et al. (2020) انجام دادند، با ارزیابی وضعیت ساختاری شهر، روند تغییر متریک‌های سیمای سرزمین و با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی مشخص شد، امتیاز پایداری شهر یزد ۰/۲۸ از ۱ است که با پژوهش حاضر در زمینه خرد دانگی سیمای سرزمین شهر و توزیع نامناسب انواع لکه‌ها هم‌راستا است.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با به‌کارگیری چارچوب DPSIR و مدل‌سازی پویایی سیستم به علل آلودگی هوا در شهر یزد و پیش‌بینی ادامه روند موجود پرداخت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که عامل اصلی یا مستقیم آلودگی در شهر یزد، انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از افزایش تعداد خودروها و تقاضای سفرهای درون‌شهری از سوی دیگر افزایش رشد شهر درنتیجه توسعه صنعت است. بنابراین یکی از بهترین راهبردها برای کاهش آلودگی هوا، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است که از دو طریق یکی با کنترل تعداد خودروها و سفرهای درون‌شهری و دیگری کنترل صنعت، حاصل می‌شود. تولید خودروهای سازگاربامحیط‌زیست که می‌توانند به منابع انرژی تجدید پذیر به‌عنوان سوخت متکی باشند، می‌تواند راه‌حل مناسبی برای کاهش آلاینده‌های هوا باشد. همچنین کنترل تعداد خودروها از طرق مختلف مانند مالیات، از رده خارج کردن

نسخه پیش انتشار

خودروهای فرسوده، اعطاء مشوق‌ها برای استفاده از شیوه‌های متنوع حمل‌ونقل عمومی پیشنهاد می‌شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که نگاه یک‌سویه به مسئله فرا پیچیده آلودگی هوای شهری کمکی به حل آن نمی‌کند. بلکه نیاز به اقدامات یکپارچه و کل‌نگری دارد که از طریق کشف روابط بین مقیاسی و علت و معلولی حاصل می‌شود. پویایی سیستم، رویکردی مناسب برای درک چنین مسائلی است. به‌طوری‌که می‌تواند تصویر شفافی از مسئله، متغیرهای اثرگذار و اثرپذیر و روابط علت و معلولی بین آن‌ها برای برنامه ریزان و تصمیم سازان فراهم کند. همچنین از طریق سناریونویسی می‌توان اثربخشی راه‌حل‌های ممکن را ارزیابی نمود.

سپاسگزاری

در انجام این تحقیق از سازمان یا نهاد یا شخصی کمک مالی دریافت نشده است.

منابع

References

Agramont, A., van Cauwenbergh, N., van Griesven, A., & Craps, M. (2022). Integrating spatial and social characteristics in the DPSIR framework for the sustainable management of river basins: case study of the Katari River Basin, Bolivia. Water International, 47(1), 8-29. https://doi.org/10.1080/02508060.2021.1997021

Ai, H., Wang, M., Zhang, Y.-J., & Zhu, T.-T. (2022). How does air pollution affect urban innovation capability? Evidence from 281 cities in China. Structural Change and Economic Dynamics, 61, 166-178.

Benadkuki, F. D., & Nasrollahi, Z. (2020). The Effect of Industrial Activity Growth on Pollution in Yazd Province: a Regional Input-Output Approach. Journal of Urban Economics, 5(2), 123-134. https://www.magiran.com/paper/2500208

Bose, A., & Roy Chowdhury, I. (2023). Investigating the association between air pollutants' concentration and meteorological parameters in a rapidly growing urban center of West Bengal, India: a statistical modeling-based approach. Modeling Earth Systems and Environment, 9(2), 2877-2892. https://doi.org/10.1007/s40808-022-01670-6

Carr, E. R., Wingard, P. M., Yorty, S. C., Thompson, M. C., Jensen, N. K., & Roberson, J. (2007). Applying DPSIR to sustainable development. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 14(6), 543-555. https://doi.org/10.1080/13504500709469753

Coyle, R. G. (1997). System dynamics modelling: a practical approach. Journal of the Operational Research Society, 48(5), 544-544.

Dehghan Manshadi, Z., & Parivar, P. (2023). Evaluating the effects of urban development on the ecological carrying capacity of Isfahan city based on the system dynamics approach. Environmental Sciences, 21(3), 131-148. https://doi.org/10.48308/envs.2023.1269

Dehghan Manshadi, Z., Parivar, P., Sotoudeh, A., & Morovati Sharifabadi, A. (2023). Exploring the spatio-temporal dynamics of life support system capacity of urban regions based on ecosystem health assessment (the case of Tehran, Iran). Environment, Development and Sustainability. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10668-023-03148-6

Dehghan Manshadi, Z., Parivar, P., Sotoudeh, A., & Morovati Sharifabadi, A. (2024). Modeling urban growth effects on carrying capacity in arid and semi-arid regions using system dynamics. Ecological Modelling, 487, 110565. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110565

Dietz, T., & Rosa, E. A. (1994). Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology. Human ecology review, 1(2), 277-300.

Ehrlich, P. R., & Holdren, J. P. (1971). Impact of Population Growth: Complacency concerning this component of man's predicament is unjustified and counterproductive. Science, 171(3977), 1212-1217.

Elsawah, S., Pierce, S. A., Hamilton, S. H., Van Delden, H., Haase, D., Elmahdi, A., & Jakeman, A. J. (2017). An overview of the system dynamics process for integrated modelling of socio-ecological systems: Lessons on good modelling practice from five case studies. Environmental Modelling & Software, 93, 127-145.

House of Industry and Mine and Trade of Yazd. (2022). http://www.yazdhim.ir/

Iran Meteorological Organization. (2024).

Jalili, M., Ehrampoush, M. H., Mokhtari, M., Ebrahimi, A. A., Mazidi, F., Abbasi, F., & Karimi, H. (2021). Ambient air pollution and cardiovascular disease rate an ANN modeling: Yazd-Central of Iran. Scientific Reports, 11(1), 16937. https://doi.org/10.1038/s41598-021-94925-8

Ji, F., Luo, Z., Hu, X., Nan, Y., & Wei, A. (2023). A DPSIR Framework to Evaluate and Predict the Development of Prefabricated Buildings: A Case Study. Sustainability, 15(19), 14264. https://www.mdpi.com/2071-1050/15/19/14264

Karimkhani, A., & Saraei, M. (2020). Evaluating the Development and Guidance of Urban Growth Using the FUZZY ANP Model (Case Study: Yazd City). Physical Social Planning, 7(2), 49-62. https://doi.org/10.30473/psp.2020.7006

Khalili, M., & Nasrabadi, T. (2023). Assessment of occupational health risk due to inhalation of chemical compounds in an aircraft maintenance, repair, and overhaul company. Environmental Science and Pollution Research, 30(20), 57558-57570. https://doi.org/10.1007/s11356-023-26572-7

Khoshakhlagh, A. H., Mohammadzadeh, M., & Morais, S. (2023). Air quality in Tehran, Iran: Spatio-temporal characteristics, human health effects, economic costs and recommendations for good practice. Atmospheric Environment: X, 19, 100222. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2023.100222

Kubacka, M., & Piniarski, W. (2024). Searching for optimal solutions in a landscape fragmentation assessment: A case study from Poland–Identification of spatial data and methods. Ecological Indicators, 163, 112118.

Li, C., Zhang, Z., & Wang, L. (2023). Carbon peak forecast and low carbon policy choice of transportation industry in China: scenario prediction based on STIRPAT model. Environmental Science and Pollution Research, 30(22), 63250-63271. https://doi.org/10.1007/s11356-023-26549-6

Li, G., Kou, C., Wang, Y., & Yang, H. (2020). System dynamics modelling for improving urban resilience in Beijing, China. Resour. Conserv. Recycl., 161, 104954. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104954

Madani, K., AghaKouchak, A., & Mirchi, A. (2022). Iran's Socio-economic Drought: Challenges of a Water-Bankrupt Nation. Iranian Studies, 49(6), 997-1016. https://doi.org/10.1080/00210862.2016.1259286

Masoudi, M., Richards, D. R., & Tan, P. Y. (2024). Assessment of the Influence of Spatial Scale and Type of Land Cover on Urban Landscape Pattern Analysis Using Landscape Metrics. Journal of Geovisualization and Spatial Analysis, 8(1), 8.

Meadows, D. H., Randers, J., & Meadows, D. L. (1972). The Limits to Growth Universe Books.

Melamed, M. L., Schmale, J., & von Schneidemesser, E. (2016). Sustainable policy—key considerations for air quality and climate change. Current Opinion in Environmental Sustainability, 23, 85-91. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cosust.2016.12.003

Morecroft, J. D. (2015). Strategic modelling and business dynamics: a feedback systems approach. John Wiley & Sons.

Nabavi, E., Daniell, K. A., & Najafi, H. (2017). Boundary matters: the potential of system dynamics to support sustainability? Journal of Cleaner Production, 140, 312-323. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.032

Naderi, M. M., Mirchi, A., Bavani, A. R. M., Goharian, E., & Madani, K. (2021). System dynamics simulation of regional water supply and demand using a food-energy-water nexus approach: Application to Qazvin Plain, Iran. Journal of Environmental Management, 280, 111843. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111843

Nasrollahi, Z., & Poushdouzbashi, H. (2020). Estimation of Air Pollution Caused by Public Transport Yazd City. Journal of Environmental Sciences and Technology, 22(2), 15-29. https://www.magiran.com/paper/2172509

O'Keeffe, J., Pluchinotta, I., De Stercke, S., Hinson, C., Puchol-Salort, P., Mijic, A., . . . Collins, A. M. (2022). Evaluating natural capital performance of urban development through system dynamics: A case study from London. Science of The Total Environment, 824, 153673. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153673

Ojaghlou, M., Ugurlu, E., Kadłubek, M., & Thalassinos, E. (2023). Economic Activities and Management Issues for the Environment: An Environmental Kuznets Curve (EKC) and STIRPAT Analysis in Turkey. Resources, 12(5), 57. https://www.mdpi.com/2079-9276/12/5/57

Parivar, P., Quanrud, D., Sotoudeh, A., & Abolhasani, M. (2020). Evaluation of urban ecological sustainability in arid lands (case study: Yazd-Iran). Environment, Development and Sustainability, 1-30.
Parivar, P., Quanrud, D., Sotoudeh, A., & Abolhasani, M. (2021). Evaluation of urban ecological sustainability in arid lands (case study: Yazd-Iran). Environment, Development and Sustainability, 23(2), 2797-2826. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10668-020-00637-w
Parivar, P., Saadatmand, M., Dehghan Manshadi, Z., Morovati Sharifabadi, A., & Malekinezhad, H. (2023). Evaluation of the effect of unsustainable urban development on water bankruptcy in arid regions using the system dynamics method: case of Yazd, Iran. Sustain. Water Resour. Manag., 9(5), 166. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s40899-023-00937-9
Parvar, Z., Mohammadzadeh, M., & Saeidi, S. (2024). LCZ framework and landscape metrics: Exploration of urban and peri-urban thermal environment emphasizing 2/3D characteristics. Building and Environment, 254, 111370.
Plan and Budget Organization. (2022). Gross domestic product (GDP). Management and Planning Organization of Yazd Province Retrieved from https://yazd.mporg.ir/
Rahbarianyazd, R. (2022). The emergence and evolution of Yazd City, Iran: From a concentric planned to sectoral model. Cities, 124, 103592. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103592
Richmond, B. (1993). Systems thinking: Critical thinking skills for the 1990s and beyond. System Dynamics Review, 9(2), 113-133. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/sdr.4260090203
Sadeghi, S. K., Sojoodi, S., & Deljavan, F. A. (2016). Investigating the Effect of Demographic Variables on Environment Quality Based on STIRPAT Model. Journal of Environmental Science and Technology, 3(18), 257-275. http://sanad.iau.ir/fa/Article/839862
Shahsavari-Pour, N., Bahador, S., Heydari, A., & Fekih, A. (2022). Analyzing Tehran’s Air Pollution Using System Dynamics Approach. Sustainability, 14(3), 1181. https://www.mdpi.com/2071-1050/14/3/1181
Statistical Center. (2024). Public census of population and housing of Iran
Sterman, J. D. (2000). Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. McGraw-Hill. https://books.google.com/books?id=CCKCQgAACAAJ
Sterman, J. D. (2011). Communicating climate change risks in a skeptical world. Climatic Change, 108(4), 811-826. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10584-011-0189-3
Wang, G., Xiao, C., Qi, Z., Meng, F., & Liang, X. (2021). Development tendency analysis for the water resource carrying capacity based on system dynamics model and the improved fuzzy comprehensive evaluation method in the Changchun city, China. Ecological Indicators, 122, 107232. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107232
Wang, X., Dong, Z., & Sušnik, J. (2023). System dynamics modelling to simulate regional water-energy-food nexus combined with the society-economy-environment system in Hunan Province, China. Science of The Total Environment, 863, 160993. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160993

Wang, Z., & Fu, X. (2023). Scheme simulation and predictive analysis of water environment carrying capacity in Shanxi Province based on system dynamics and DPSIR model. Ecological Indicators, 154, 110862. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110862

Yang, B. Y., Fan, S., Thiering, E., Seissler, J., Nowak, D., Dong, G. H., & Heinrich, J. (2020). Ambient air pollution and diabetes: A systematic review and meta-analysis. Environ Res, 180, 108817. https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108817

Yang, X., Wang, L., Ma, P., He, Y., Zhao, C., & Zhao, W. (2023). Urban and suburban decadal variations in air pollution of Beijing and its meteorological drivers. Environment International, 181, 108301. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108301

Yazd Municipality. (2020). Statistical Yearbook of Yazd Province https://stat.roostanet.com/list.php?id=140

Zare, F., Elsawah, S., Bagheri, A., Nabavi, E., & Jakeman, A. J. (2019). Improved integrated water resource modelling by combining DPSIR and system dynamics conceptual modelling techniques. Journal of Environmental Management, 246, 27-41. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.033

Zhang, Z., Hu, B., & Qiu, H. (2021). Comprehensive assessment of ecological risk in southwest Guangxi-Beibu bay based on DPSIR model and OWA-GIS. Ecological Indicators, 132, 108334. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108334