

## Original article

## Assessing Impact of Development Scenarios on the Social Cost of Energy Consumption in Industry in Isfahan Province using a System Dynamics Approach

Hossein Abolghasemzadeh<sup>1</sup>

Elnaz Zekri<sup>2</sup>

Banafsheh Zahraie<sup>3</sup>

Mohsen Nasser<sup>4\*</sup>

1. Graduate Student, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2. PhD Candidate, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
3. Associate Prof., School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
4. Associate Prof., School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

\*Corresponding author: Mohsen Nasser, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: mnasser@ut.ac.ir

Received: 17 September 2023

Accepted: 14 November 2023

### ABSTRACT

**Introduction and purpose:** Greenhouse gas emissions and air pollutants are major challenges facing humanity today, mainly due to the consumption of energy sources. Industry makes an important contribution to the development of a country, but also contributes to increased energy consumption, which is unavoidable. To address this issue, the use of energy and emissions modeling can be very helpful in understanding the processes involved in reducing energy consumption, identifying emissions patterns and assessing the social costs associated with these emissions.

**Methods:** In this study, a systemic dynamics model was developed to calculate greenhouse gas emissions and air pollutants in the industrial sector of Isfahan province. The model considers industrial energy consumption for the years 2011-2020 and estimates the social costs associated with these emissions. Various development scenarios were applied to the model and the reduction in social costs was calculated.

**Results:** The social costs associated with greenhouse gas emissions and air pollutants were between 2.58 and 3.79 million dollars (based on 2002 USD). The highest social costs occurred in 2012 and the lowest in 2014. Carbon dioxide was found to be the largest contributor to these social costs.

**Conclusion:** Mazut fuel and the resulting greenhouse gas emissions are the main contributors to social costs in the study area, and industry and power plants are known to be the main consumers of this fuel. Therefore, the scenario in which mazut fuel is banned from industry has the greatest impact on reducing social costs. Furthermore, despite the higher efficiency of combined cycle power plants compared to gas-fired power plants, the scenario of converting gas-fired power plants into combined cycle power plants is recognized as the last proposed scenario to reduce social costs.

**Keywords:** Energy, Greenhouse Gases (GHGs), Regional development, System dynamics, Social costs

► **Citation:** Abolghasemzadeh H, Zekri E, Zahraie B, Nasser M. Assessing Impact of Development Scenarios on the Social Cost of Energy Consumption in Industry in Isfahan Province using a System Dynamics Approach. Journal of Health Research in Community. Winter 2023;9(4): 95-110.

## مقاله پژوهشی

## ارزیابی تأثیر سناریوهای توسعه بر هزینه‌های اجتماعی ناشی از مصرف انرژی صنایع استان اصفهان با رویکرد پویایی‌های سیستم

## چکیده

حسین ابوالقاسم زاده<sup>۱</sup>  
الناز ذکری<sup>۱</sup>  
بنفشه زهرایی<sup>۲</sup>  
محسن ناصری<sup>۳\*</sup>

**مقدمه و هدف:** امروزه، انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های هوا از جمله چالش‌های مهم بشر محسوب می‌شوند. یکی از علت‌های اصلی این انتشار مصرف حامل‌های انرژی است. صنایع در توسعه کشورها نقش بسیار مهمی ایفا می‌کنند و همین موضوع باعث افزایش مصرف حامل‌های انرژی توسط صنایع می‌شود؛ بنابراین، مدل‌سازی مصرف انرژی و انتشار گازهای مذکور می‌تواند به‌طور دخور توجهی در شناخت روندهای کاهش مصرف انرژی، الگوی انتشار و هزینه‌های اجتماعی مرتبط با آن‌ها به ما کمک کند.

**روش کار:** در این مطالعه، مدلی با استفاده از رویکرد پویایی‌های سیستم به‌منظور محاسبه‌ی گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های هوا در بخش صنعت استان اصفهان تولید شده است. در این مدل، میزان مصرف انرژی صنایع در سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹ و هزینه‌های اجتماعی ناشی از این انتشارات محاسبه می‌شوند. سپس، سناریوهای توسعه در این مدل اعمال و میزان کاهش هزینه‌های اجتماعی محاسبه می‌شود.

**یافته‌ها:** هزینه‌های اجتماعی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های هوا بین ۲/۵۸ تا ۳/۷۹ میلیون دلار بر مبنای دلار آمریکا در سال ۱۳۸۱ بوده است. بیشترین هزینه‌های اجتماعی در سال ۱۳۹۲ و کمترین آن در سال ۱۳۹۴ ثبت شده است. همچنین، دی‌اکسید کربن بیشترین سهم را در هزینه‌های اجتماعی دارد.

**نتیجه‌گیری:** سوخت مازوت و انتشار گاز گلخانه‌ای ناشی از آن علت اصلی ایجاد هزینه‌های اجتماعی در منطقه مد نظر است و صنایع و نیروگاه‌ها مصرف‌کننده‌های اصلی این سوخت هستند؛ در نتیجه، سناریو حذف سوخت مازوت از صنایع بیشترین تأثیر را در کاهش هزینه‌های اجتماعی دارد. همچنین، علی‌رغم کارایی بیشتر نیروگاه‌های سیکل ترکیبی نسبت به نیروگاه‌های گازی، سناریو تبدیل نیروگاه‌های گازی به سیکل ترکیبی آخرین سناریو پیشنهادی برای کاهش هزینه‌های اجتماعی است.

**کلمات کلیدی:** انرژی، گازهای گلخانه‌ای، توسعه‌ی منطقه، پویایی‌های سیستم، هزینه‌های اجتماعی

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گرایش مهندسی محیط‌زیست، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲. دانشجوی دکتری، گرایش مهندسی محیط‌زیست، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳. دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۴. دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

\* نویسنده مسئول: محسن ناصری، دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

Email: mnasseri@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۳

◀ **استناد:** ابوالقاسم زاده، حسین؛ ذکری، الناز؛ زهرایی، بنفشه؛ ناصری، محسن. ارزیابی تأثیر سناریوهای توسعه بر هزینه‌های اجتماعی ناشی از مصرف انرژی صنایع استان اصفهان با رویکرد پویایی‌های سیستم. مجله تحقیقات سلامت در جامعه، زمستان ۱۴۰۲؛ ۹(۴): ۹۵-۱۱۰.

## مقدمه

انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های هوا به یکی از معضلات جدی و پیچیده‌ی بشر تبدیل شده است. این انتشارات

ناشی از فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه مصرف سوخت‌های فسیلی است و به تخریب محیط‌زیست، بروز و تشدید بیماری‌های قلبی و تنفسی، افزایش ابتلا به آسم و در نهایت، افزایش مرگ‌ومیر منجر می‌شود [۱،۲]. طبق گزارش بانک جهانی در سال ۲۰۱۶، میزان خسارت وارد شده توسط آلودگی هوا در ایران، در حدود ۳۰ میلیارد دلار برآورد شده که این رقم معادل ۲/۴۸ درصد کل تولید ناخالص داخلی کشور است [۳]. انرژی پیشران اصلی توسعه در ایران است و نقشی اساسی در افزایش تولید صنعتی در بخش اقتصادی و اجتماعی ایفا می‌کند؛ اما به دلیل درک نادرست سیاست‌گذاران از تأثیر مصرف انرژی بر مشکلات محیط‌زیستی، هدف بیشتر تصمیمات مدیریتی رسیدن به موفقیت‌های اقتصادی و افزایش درآمد است و جنبه‌های محیط‌زیستی در این برنامه‌ها لحاظ نمی‌شود. بر اساس آمار حاضر، با افزایش جمعیت و شهرنشینی، تقاضای انرژی در کشور ایران رو به افزایش است و به دلیل نقش آفرینی سوخت‌های فسیلی در قالب اصلی‌ترین منبع عرضه انرژی در کشور، امکان بروز پیچیدگی‌هایی میان تقاضا و عرضه انرژی و همچنین، اهداف اقتصادی و مسائل محیط‌زیستی اجتناب‌ناپذیر است. در نتیجه، وجود روش مؤثر برنامه‌ریزی عرضه و تقاضا با در نظر گرفتن مسائل محیط‌زیستی امری ضروری است [۴،۵]. پویایی‌های سیستم (System dynamics) روشی مناسب به‌منظور ارزیابی بلندمدت سیاست‌ها با شاخص‌های متنوع در مقیاس بزرگ است که در آن، روابط بین متغیرها با حلقه‌های علی و معلولی نمایش داده می‌شود. از مزایای این روش می‌توان به سادگی و توانایی آن در بررسی عملکرد مدل از منظرهای گوناگون و بر اساس تفکر سیستمی اشاره کرد [۶].

مرور متون مرتبط روشن می‌کند که تأثیر افزایش تولید ناخالص داخلی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای دارای دو مرحله است. در مرحله اول، با افزایش تولید ناخالص داخلی، انتشار دی‌اکسید کربن نیز افزایش می‌یابد؛ اما از نقطه‌ای به بعد، با افزایش تولید ناخالص داخلی، انتشار کاهش می‌یابد [۷]. تولید برق پاک

نقشی بسیار کلیدی در کاهش انتشار ایفا می‌کند و همچنین، تأثیر مثبتی بر اقتصاد تحت محدودیت‌های انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌گذارد [۸]. طبق مطالعه‌ای از کلی و همکاران (۲۰۱۹)، سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر با اعمال سیاستی مناسب و متعادل، می‌تواند در آمریکا تا سال ۲۰۵۰، سهم انرژی تجدیدپذیر را به ۴۰ درصد افزایش و ۱۷ درصد از انتشار دی‌اکسید کربن را کاهش دهد [۹]. سیاست‌های کاهش انتشار، از جمله استفاده از انرژی‌های پاک، بسیار حائز اهمیت هستند. اگر روند کنونی مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای ادامه یابد، میانگین قیمت تولید انرژی ۵۰ درصد و میانگین دمای جهان ۲/۴ تا ۲/۷ درجه‌ی سانتی‌گراد تا سال ۲۱۰۰، افزایش خواهد یافت [۱۰،۱۱]. ونگ و همکاران (۲۰۱۶) به تجزیه و تحلیل رابطه‌ی میان انتشار دی‌اکسید کربن، رشد اقتصادی و مصرف انرژی در کشور چین پرداختند. نتایج نشان داد که کشور چین برای رشد سریع اقتصادی خود نیازمند استفاده از انرژی‌های کربنی است و همین عاملی برای افزایش قابل ملاحظه‌ی دی‌اکسید کربن است [۱۲]. یکی دیگر از روش‌های مهم و کم‌هزینه‌ی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مدیریت تقاضای برق و سوخت است. اشراقی و فاکهی (۱۳۹۴) اعلام کردند که در صورت کاهش ۵ درصدی مصرف برق در ساعات پرمصرف تا سال ۲۰۳۵، بیش از ۳۰۰ میلیون دلار در کشور صرفه‌جویی می‌شود [۱۳]. آلودگی هوا به افزایش هزینه‌های سلامت خصوصی و عمومی منجر می‌شود. تأثیر آلودگی هوا بر هزینه‌های سلامت عمومی بیشتر از سلامت خصوصی است و افزایش نرخ شهرنشینی این تأثیر را تشدید می‌کند [۱۴]. مطالعه‌ای در کشور کره‌ی جنوبی نشان داد که با افزایش هریک از گازهای  $PM_{10}$ ،  $O_3$  و  $NO_2$  به صورت مجزا، هزینه‌های سلامت افزایش می‌یابد [۱۵]. نوع آلاینده نقش مهمی در تعیین هزینه‌های اجتماعی دارد. به‌عنوان مثال، در کلان‌شهر تهران، آلاینده‌ی  $PM_{2.5}$  با مقدار ۱۶،۶۱۶،۱۸۷ دلار به‌ازای هر تن، دارای بیشترین هزینه‌ی اجتماعی است؛ باین‌حال، این آلاینده کمترین

و سومین استان پرجمعیت است و رتبه‌ی اول شهرنشینی کشور ایران را داراست و شهرهای مهم آن اصفهان، کاشان، گلپایگان و نجف‌آباد است. این استان با مساحتی حدود ۱۰۶،۷۸۶ کیلومترمربع از شمال به استان‌های قم و سمنان، از جنوب به استان‌های فارس و کهگیلویه و بویراحمد، از غرب به استان‌های مرکزی، لرستان و چهارمحال بختیاری و از شرق به استان‌های یزد و خراسان جنوبی محدود است [۲۰]. از مشخصات بارز آب‌وهوایی استان اصفهان می‌توان به بارش کم آن (متوسط کمتر از ۱۲۲/۷ میلی‌متر) و بادهای تند آن اشاره کرد. استان اصفهان به دلیل داشتن شهرک‌های صنعتی بسیار، کارخانه‌های فولاد، سیمان و... یکی از مناطق مهم صنعتی در ایران به شمار می‌رود. ماشین‌های صنعتی سنگین زیادی در اصفهان انرژی‌هایی نظیر گازوئیل، بنزین و گاز طبیعی مصرف می‌کنند که همین امر باعث بروز آلودگی در این استان می‌شود. همچنین، یکی از نیروگاه‌های بزرگ برق ایران، نیروگاه منتظری، با تولید برق بیش از ۱۰/۷۳۵ گیگاوات‌ساعت در این استان واقع شده است [۲۱]. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی استان اصفهان را نشان می‌دهد.

#### منابع و جمع‌آوری داده‌ها

برای به دست آوردن مقدار برق مصرفی و فرآورده‌های



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی استان اصفهان

سهم انتشار را نسبت به سایر آلاینده‌ها دارد. همچنین، آلاینده‌ی CO با وجود انتشار چشمگیر، کمترین هزینه‌ی اجتماعی را (مقدار تقریبی ۶۶/۳ دلار به‌ازای هر تن) نسبت به سایر آلاینده‌ها دارد [۱۶]. علاوه بر این، متغیرهای محیط‌زیستی مانند  $PM_{2.5}$  و دما، به افزایش هزینه‌های سلامت در کشورهای درحال توسعه منجر می‌شوند. کشورهای پُردرآمد تأثیرپذیری بیشتری از متغیرهای محیط‌زیست نسبت به کشورهای کم‌درآمد دارند [۱۷]. همچنین، تأثیر آلودگی هوا بر سلامت انسان‌ها ناهمگون است و مردان و ساکنان مناطق شهری بیشتر در معرض خطر ابتلا به بیماری‌های ناشی از آلودگی هوا قرار می‌گیرند [۱۸].

طبق ترانزنامه‌ی انرژی کشور، بخش صنعت استان اصفهان بیشترین مصرف برق را در میان استان‌های دیگر کشور در سال ۱۳۹۷ داشته است [۱۹]. از این رو، هدف این مطالعه محاسبه‌ی هزینه‌های اجتماعی واردشده از مصرف انرژی صنایع استان اصفهان و ارزیابی تأثیر سیاست‌های مختلف بر کاهش این هزینه‌ها به‌منظور درک بهتر سیاست‌گذاران برای اعمال سیاست‌های توسعه است. در این تحقیق، مدل مفهومی پویای انرژی-محیط‌زیست برای بخش صنعت استان اصفهان توسعه یافته است. با استفاده از این مدل، میزان مصرف انرژی و انتشار حاصل از آن در طی سال‌های ۹۰ تا ۹۹، با رویکرد پویایی‌های سیستم محاسبه شده است. در انتها، هزینه‌های اجتماعی ناشی از گازهای گلخانه‌ای  $CO_2$ ،  $CH_4$ ،  $N_2O$  و آلاینده‌های  $NO_x$ ،  $SO_x$ ، CO و  $PM_{2.5}$  بررسی شده است.

## روش کار

### منطقه‌ی مطالعاتی

استان اصفهان با مختصات جغرافیایی ۳۷ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۱ دقیقه عرض شمالی و ۴۱ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۳۹ دقیقه طول شرقی در مرکز ایران زمین واقع است. این استان با مرکزیت شهر اصفهان، ششمین استان پهناور

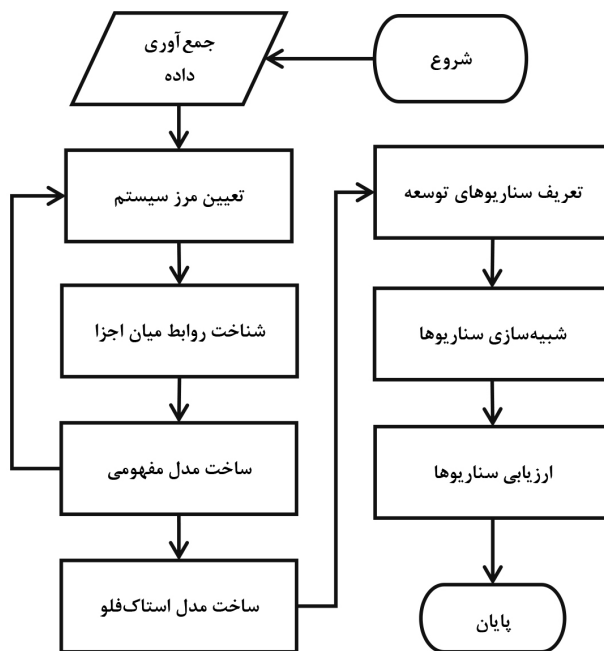
آن، اجزای مختلف سیستم تحت عنوان متغیرهای حالت، نرخ و کمکی با یکدیگر بازخورد دارند. همچنین، پویایی‌های سیستم با تفکر سیستمی همسو است و توانایی دیدن جهان به‌عنوان سیستمی پیچیده و به‌هم‌پیوسته را دارد. در این تحقیق، از بستر نرم‌افزار ونسیم (vensim) به‌منظور مدل‌سازی پویایی‌های سیستم استفاده شده است. طبق تعریف ارائه‌شده توسط ونتانا (Ventana) در نسخه‌ی متنی راهنمای کاربران این نرم‌افزار، ونسیم ابزار مدل‌سازی پویا برای شبیه‌سازی و تحلیل مدل‌های پویایی سیستم است. این ابزار از مدل‌های ذخیره و جریان و حلقه‌های علت و معلولی برای ساخت مدل استفاده می‌کند. متغیرهای مختلف در این نرم‌افزار را کاربران به سه صورت متغیرهای حالت، نرخ و کمکی معرفی کرده‌اند. این متغیرها به‌وسیله‌ی کمان‌هایی درون نرم‌افزار با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند و معادلات آن‌ها را کاربر به مدل وارد می‌کند [۲۶]. تمامی مراحل انجام این تحقیق در شکل ۲ به‌صورت کلی نشان داده شده است.

در ابتدا، مدلی مفهومی با هدف مطالعه‌ی حاضر ساخته شده است. شکل ۳ نشان‌دهنده‌ی مدل مفهومی ساخته‌شده برای منطقه‌ی مدنظر است. در ساخت مدل مفهومی و در گام اول، مرز سیستم مشخص می‌شود. در رویکرد پویایی‌های سیستم، مرز سیستم به مطالعه‌ی مدنظر بسیار وابسته است. اجزایی که درون مرز قرار دارند، می‌توانند بر یکدیگر اثرگذار باشند؛ اما اجزای خارج از مرز تنها اثر یک‌طرفه دارند. به عبارت دیگر، جزء درونی مرز نمی‌تواند بر جزء خارج از مرز اثر بگذارد؛ اما خلاف این امر امکان‌پذیر است و اجزای خارج از مرز سیستم بر اجزای درون مرز سیستم اثرگذاری یک‌طرفه دارند. با توجه به شکل ۳، مشخص است که توسعه‌ی کشور خارجی به‌عنوان عضوی خارج از مرز و شناخته‌شده، به‌صورت مستقیم، بر تولید صنعتی اثر می‌گذارد. برای توسعه‌ی مدلی مفهومی در گام بعد، باید آنچه قرار است مطالعه کنیم، واکاوی شود و بعد از جمع‌آوری اطلاعات، با توجه به نوع و دسترسی آن‌ها، ساختار مناسب مدل مفهومی ساخته شود. در

نفتی و گاز طبیعی مصرف‌شده در بخش صنعت، میزان مصرف سوخت نیروگاه‌ها و همچنین، اطلاعات پالایشگاه در این تحقیق، از گزارش‌های سالانه‌ی وزارت نیرو و وزارت نفت به نام‌های ترازنامه‌ی انرژی و ترازنامه‌ی هیدروکربوری استفاده شده است. برای جمع‌آوری اطلاعات در خصوص میزان برق تولیدی در هر نیروگاه و سهم تولید آن و همچنین، ارزش افزوده، از گزارش‌های سالنامه‌ی آماری استان اصفهان استفاده شده است [۲۲،۲۳]. برای جمع‌آوری اطلاعات در خصوص ضرایب انتشار برای گازهای گلخانه‌ای از ضرایب انتشار IPCC و برای ضرایب انتشار آلاینده‌های هوا از گزارش آژانس محیط‌زیست اروپا (EEA) استفاده شده است [۲۴،۲۵].

#### روش تحقیق

پویایی‌های سیستم به‌منظور شناخت بهتر روابط میان اجزای سیستم به کار می‌رود و نوعی رویکرد تفکر سیستمی است که در



شکل ۲: مراحل انجام کار

می شوند که این انتشار را انتشار غیرمستقیم صنایع می نامند. البته، باید به این موضوع توجه کرد که صنایع بزرگ فولاد و ذوب آهن که صنایع بزرگ هستند، خود نیروگاه دارند و بخش مهمی از برق مصرفی خود را تولید می کنند. انتشار حاصل از نیروگاه های صنایع بزرگ را انتشار مستقیم صنایع می نامند. همچنین، گاز طبیعی و فرآورده های نفتی استفاده شده برای تولید برق نیروگاه های صنایع بزرگ نیز جزء مصارف صنایع حساب می شوند.

$$E_f = ER \times CI \quad (2)$$

در رابطه ی ۲،  $E_f$ ، ER و CI به ترتیب، برق مصرفی پالایشگاه به ازای پالایش هر مترمکعب نفت خام، ضریب برق مصرفی پالایشگاه و نفت خام ورودی است [۲۲].

$$NG = NG_c \times CI \quad (3)$$

در رابطه ی ۳، NG و  $NG_c$  به ترتیب، گاز طبیعی مصرفی پالایشگاه و ضریب مصرف گاز طبیعی به ازای پالایش هر مترمکعب نفت خام است [۲۲].

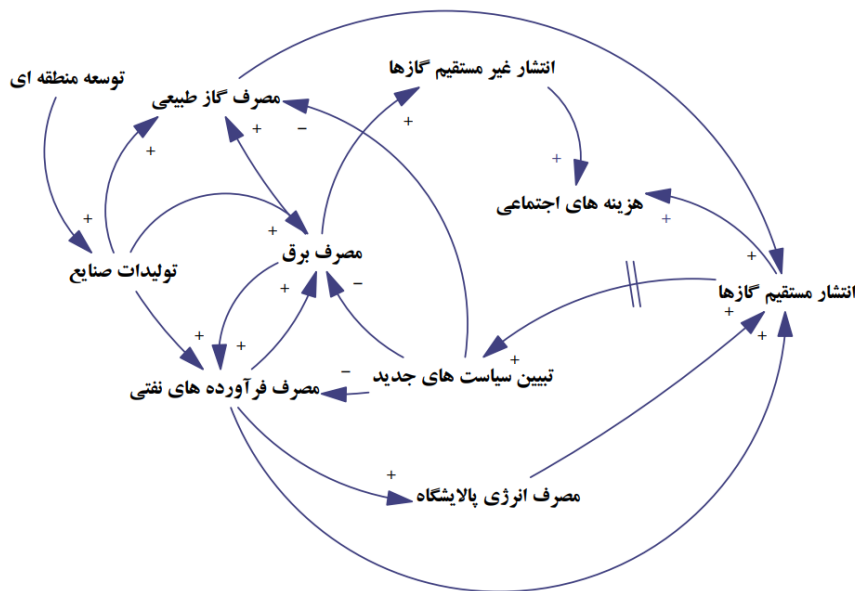
$$ECP = TE \times P_{sh} \times EP_c \quad (4)$$

گام بعد و پس از جمع آوری داده ها و مشخص شدن روابط بین اجزا، ساخت مدل استاک فلو (Stock-flow) تکمیل می شود. در این مرحله، با توجه به اطلاعات جمع آوری شده، میزان فرآورده های نفتی مصرفی، میزان نفت خام پالایش شده ی لازم و گاز طبیعی مصرفی صنایع به مدل وارد می شود و انتشارهای مربوط محاسبه می شوند.

$$E_{g,f} = Q_f \times LHV_f \times EF_{f,g} \quad (1)$$

در رابطه ی فوق،  $E_{g,f}$  گاز گلخانه ای منتشر شده،  $Q_f$  حجم سوخت مصرفی،  $LHV_f$  ارزش حرارتی خالص سوخت مصرفی  $f$  و  $EF_{f,g}$  ضریب انتشار گاز گلخانه ای  $g$  ناشی از مصرف سوخت  $f$  است [۲۴، ۲۵].

سپس، میزان برق مصرفی و گاز طبیعی پالایشگاه اصفهان (به عنوان یکی از صنایع مهم انرژی در مرز منطقه ی بررسی شده) محاسبه می شود و با توجه به سهم هر نیروگاه در تولید برق استان اصفهان، میزان برق تولیدی هر نیروگاه، سوخت مصرفی هر نیروگاه و در نهایت، انتشار حاصل از این سوخت ها محاسبه



شکل ۳: مدل مفهومی پویایی سیستم توسعه داده شده

## یافته‌ها

در این پژوهش، پارامترهای مختلفی اعم از انرژی کل مصرفی، انتشار مستقیم و غیرمستقیم گازهای گلخانه‌ای، انتشار آلاینده‌های هوا، هزینه‌های اجتماعی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های هوا و هزینه‌های اجتماعی مصرف برق برای بخش صنایع استان اصفهان در سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹ محاسبه و در نهایت، تأثیر سناریوهای توسعه بر آن‌ها بررسی شده است.

## سناریوهای توسعه

اولین گام معرفی سیاست‌های کاهش انرژی و کاهش انتشار و ارزیابی آن‌ها برای محاسبه‌ی پتانسیل کاهش انتشار و مصرف انرژی و هزینه‌های اجتماعی در این پژوهش است. با استفاده از اسناد بالادستی کشور و دو گزارش مربوط به انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، از قبیل برنامه‌ی راهبردی ملی تغییر اقلیم و برنامه‌ی بلندمدت توسعه‌ی بخش انرژی کشور ایران [۲۸،۲۹]، سیاست‌هایی متناسب با مدل توسعه‌یافته جمع‌آوری شده است که در جدول ۱ معرفی شده‌اند. سیاست‌های شماره‌ی ۱ و ۲ مربوط به مصرف گاز طبیعی و فراورده‌های نفتی صنایع و سیاست‌های شماره‌ی ۳، ۴ و ۵ مربوط به کاهش انتشار ناشی از مصرف برق صنایع هستند. سناریو ۱ به صرفه‌جویی در مصرف انرژی صنایع اشاره می‌کند که این امر مستلزم کاهش ۱۰ درصدی شدت

در رابطه‌ی ۴، ECP نمایانگر سوخت مصرفی هر نیروگاه و TE،  $P_{sh}$  و  $EP_c$  به ترتیب، معرف برق کل مصرفی، سهم هر نیروگاه و ضریب سوخت مصرفی هر نیروگاه به‌ازای تولید ۱ مگاوات ساعت برق است [۲۷].

همان‌طور که در قسمت قبل گفته شد، برای محاسبه‌ی میزان آلاینده‌های هوا از ضرایب انتشار آلاینده‌ی آرژانس محیط‌زیست اروپا استفاده شده است. برای محاسبه‌ی میزان انتشار آلاینده‌ها، مثل انتشار گاز گلخانه‌ای، از روش ضرایب انتشار (رابطه‌ی ۱) استفاده شده است. در مرحله‌ی بعد، با استفاده از میزان گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های انتشاریافته، میزان هزینه‌های اجتماعی واردشده به منطقه توسط انتشار این گازها محاسبه شده است. به‌منظور محاسبه‌ی میزان هزینه‌های اجتماعی از ضرایب بین‌المللی اعلامی در گزارش ترانزنامه‌ی انرژی ایران (۱۳۹۱) استفاده شده است. این ضرایب بر مبنای ارزش پولی سال ۱۳۸۱ محاسبه شده و در نهایت، با استفاده از ارزش ریالی دلار آمریکا در سال ۱۳۸۱ که برابر با ۸۰۱ تومان بود، میزان هزینه‌های اجتماعی بر اساس واحد ارزی دلار آمریکا گزارش شده است.

در مرحله‌ی آخر، با اعمال سیاست‌های توسعه‌ی شناسایی شده در بخش انرژی و تغییر ضرایب مصرف انرژی، میزان پتانسیل سیاست‌های موجود برای کاهش مصرف انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلاینده‌های هوا و هزینه‌های اجتماعی ناشی از انتشار گازهای مدنظر محاسبه شده و بر اساس نتایج به‌دست آمده، تأثیر این سیاست‌ها بر بخش‌های مختلف ارزیابی شده است.

جدول ۱: سیاست‌های توسعه

ردیف	سیاست	مأخذ
۱	کاهش ۱۰ درصدی شدت انرژی صنایع	برنامه‌ی راهبردی ملی تغییر اقلیم (۱۳۹۶)
۲	حذف سوخت مازوت از مصارف صنایع	برنامه‌ی بلندمدت توسعه‌ی بخش انرژی ایران (۱۳۹۳)
۳	افزایش بهره‌وری نیروگاه‌ها به میزان ۱۰ درصد	برنامه‌ی راهبردی ملی تغییر اقلیم (۱۳۹۶)
۴	تبدیل نیروگاه‌های گازی به سیکل ترکیبی	برنامه‌ی بلندمدت توسعه‌ی بخش انرژی ایران (۱۳۹۳)
۵	استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به میزان ۱۵ درصد در تولید برق	برنامه‌ی بلندمدت توسعه‌ی بخش انرژی ایران (۱۳۹۳)

ترکیبی بر مصرف انرژی در شکل ۴ آمده است. بر این اساس، بیشترین مقدار انرژی در سال ۱۳۹۹ و کمترین مقدار در سال ۱۳۹۴ اتفاق می افتد (روند صعودی). گفتنی است که با اعمال سناریوها (به صورت جمعی)، ۱۰ درصد انرژی مصرفی کاهش پیدا می کند.

#### انتشار گازهای گلخانه ای

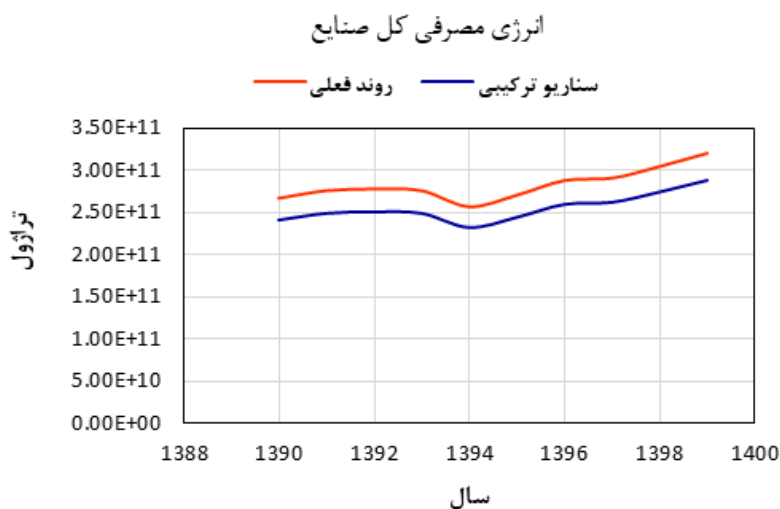
انتشار گازهای گلخانه ای از عوامل مهم ایجاد بی توازن در محیط زیست است. بر اساس نتایج مدل سازی، انتشار کل گازهای گلخانه ای صنایع در شکل ۵ ارائه شده است. همچنین، تصریح می شود که انتشار گازهای گلخانه ای شامل هر دو نوع انتشار مستقیم و غیرمستقیم است. انتشار مستقیم ناشی از مصرف سوخت ها و انتشار غیرمستقیم ناشی از مصرف برقی است که انتشار در جای دیگری تولید کرده است؛ اما در محل مصرف انتشار رخ نمی دهد [۳۰].

طبق شکل ۵، کمترین مقدار انتشار در سال ۱۳۹۴ و بیشترین انتشار در سال ۱۳۹۹ رخ داده است. از این مقدار، ۳۰ تا ۳۶ درصد شامل انتشار غیرمستقیم است که مقدار درخور توجهی است. همچنین، با اعمال سناریو ترکیبی، مقدار انتشار بین ۱۸/۵۶ تا ۳۵/۴۴ درصد کاهش می یابد.

انرژی صنایع است. سوخت مازوت به عنوان سوختی فسیلی، بسیار بی کیفیت است؛ از این رو، حذف سوخت مازوت، به خصوص در نیروگاه ها، دستاوردی بزرگ به حساب می آید که در سناریو ۲ معرفی می شود. در بخش برق، یکی از راه های کاهش آلودگی ها افزایش بهره وری نیروگاه ها است که در سناریو ۳، افزایش ۱۰ درصدی بهره وری نیروگاه ها نسبت به قبل در نظر گرفته شده است. همچنین، با تبدیل نیروگاه های گازی به نیروگاه سیکل ترکیبی، می توان از انرژی گاز طبیعی برای بخار کردن آب بهره برد و از بخار آب حاصل شده به منظور تولید برق استفاده کرد. این امر در سناریو ۴ معرفی شده است. از طرفی، به استفاده از انرژی های پاک در سال های اخیر، بسیار توجه شده است که در این پژوهش، این امر در سناریو ۵ معرفی شده است.

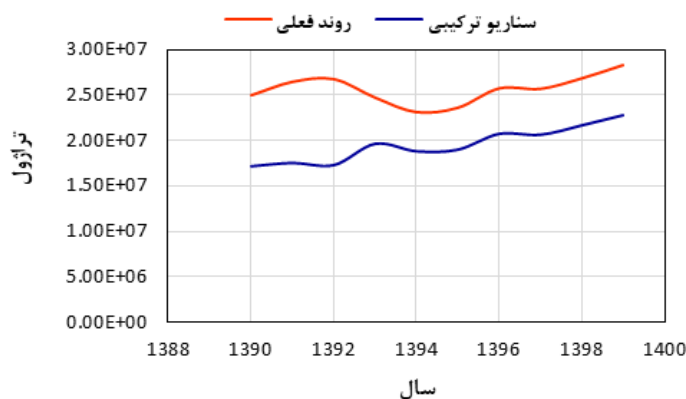
#### انرژی مصرفی کل صنایع

مقدار انرژی مصرفی ناشی از صنایع مطابق با شکل ۴ است. انرژی مصرفی شامل مصارف گاز طبیعی صنایع و پالایشگاه، فرآورده های نفتی مصرفی صنایع و برق مصرفی صنایع و پالایشگاه است که به صورت تراژول گزارش شده است. همچنین، میزان تأثیر سناریو



شکل ۴: نمودار مصرف انرژی کل صنایع

انتشار کل گاز گلخانه‌ای صنایع معادل دی‌اکسید کربن



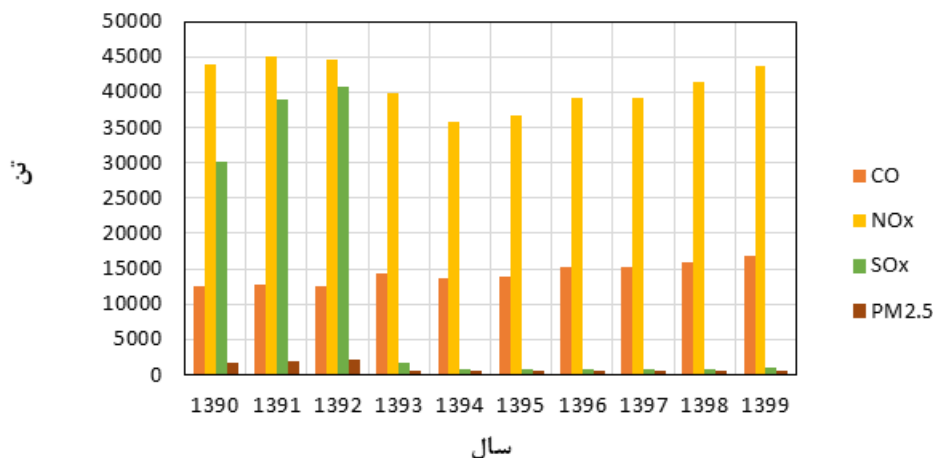
شکل ۵: انتشار کل گازهای گلخانه‌ای بخش صنایع

#### انتشار آلاینده‌های هوا

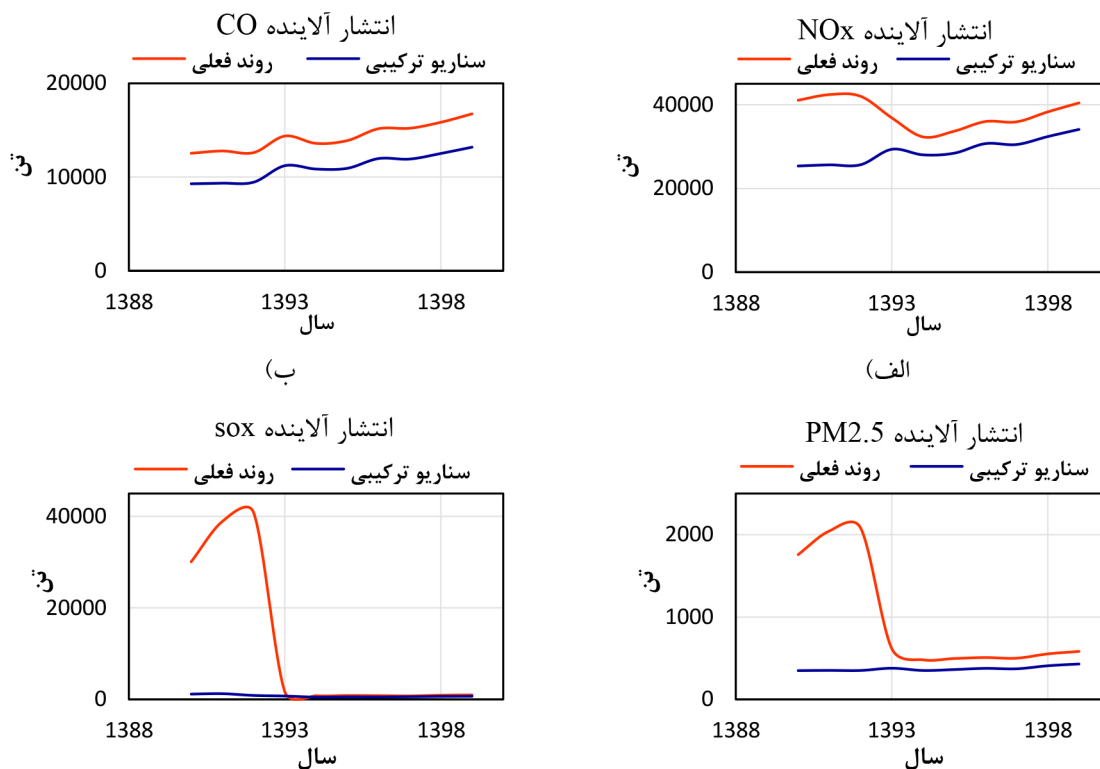
در این پژوهش، میزان انتشار آلاینده‌های  $NO_x$ ،  $SO_x$ ،  $CO$  و  $PM_{2.5}$  محاسبه شد و نتایج در شکل ۶ ارائه شده است. بیشترین آلاینده‌ی منتشرشده  $NO_x$  و کمترین آلاینده  $PM_{2.5}$  است. در شکل ۷، مقادیر انتشار و تأثیر سناریو تجمعی هریک از آلاینده‌ها به تفکیک، رؤیت پذیر است. با توجه به شکل ۷، مقدار انتشار  $SO_x$  و  $PM_{2.5}$  از سال ۱۳۹۳ بسیار کاهش پیدا کرده و بیشترین

تأثیر با اعمال سناریو تجمعی بر این دو آلاینده ایجاد شده است. دلیل این امر مربوط به ضرایب انتشار این دو آلاینده است. ضرایب انتشار این دو گاز مقادیر بسیار زیادی برای سوخت مازوت دارد و برای سوخت‌های دیگر بسیار کمتر است؛ در نتیجه، به دلیل اینکه از سال ۱۳۹۳، مصرف مازوت به خصوص در نیروگاه‌ها، کاهش بسیار زیادی داشته است و در سناریو تجمعی نیز به دلیل وجود سناریو دوم که به حذف مصرف مازوت منجر می‌شود، مقدار انتشار این

انتشار آلاینده‌های هوا صنایع



شکل ۶: انتشار آلاینده‌های هوا به تفکیک نوع آلاینده



شکل ۷: انتشار آلاینده های هوا و تأثیر سناریو تجمعی به تفکیک نوع آلاینده ها

دو آلاینده بسیار زیاد کاهش می یابد. ناشی از انتشار گازهای گلخانه ای و آلاینده های هوا است. جدول

۲ هزینه های اجتماعی ناشی از انتشار آلاینده های هوا و گازهای

گلخانه ای را به واحد میلیون دلار آمریکا در سال پایه ی ۱۳۸۱ نشان

می دهد. در این جدول، هزینه های اجتماعی به دو بخش هزینه های

هزینه های اجتماعی

مهم ترین هدف این پژوهش به دست آوردن هزینه های اجتماعی

جدول ۲: هزینه های اجتماعی به تفکیک مصرف سوخت و مصرف برق

سال	درصد هزینه ی اجتماعی ناشی از مصرف برق صنایع (%)	درصد هزینه ی اجتماعی ناشی از مصرف سوخت صنایع (%)	کل هزینه ی اجتماعی (میلیون دلار بر مبنای سال ۱۳۸۱)
۱۳۹۰	۴۴/۵۸	۵۵/۴۲	۳/۴
۱۳۹۱	۴۸/۷۶	۵۱/۲۴	۳/۷۳
۱۳۹۲	۴۹/۶۴	۵۰/۳۶	۳/۷۹
۱۳۹۳	۳۱/۶۵	۶۸/۳۵	۲/۷۹
۱۳۹۴	۳۰/۳۳	۶۹/۶۷	۲/۵۸
۱۳۹۵	۳۲/۰۴	۶۷/۹۶	۲/۶۳
۱۳۹۶	۳۳/۰۸	۶۶/۹۲	۲/۸۷
۱۳۹۷	۳۴/۴۸	۶۵/۵۲	۲/۸۶
۱۳۹۸	۳۳/۸۹	۶۶/۱۱	۳
۱۳۹۹	۳۴/۶۷	۶۵/۳۳	۳/۱۶

جدول ۳: سهم گازهای مختلف در هزینه‌های اجتماعی (%)

سال	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM <sub>2.5</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
۱۳۹۰	-/۶۹	۷/۷۲	۱۶/۱۳	۲/۲۲	۷۳/۱۹	-/۰۳۶
۱۳۹۱	-/۶۴	۷/۲۴	۱۹/۰۱	۲/۳۵	۷۰/۷۱	-/۰۳۵
۱۳۹۲	-/۶۲	۷/۰۶	۱۹/۶۱	۲/۳۵	۷۰/۳۰	-/۰۳۶
۱۳۹۳	-/۹۶	۸/۵۹	۱/۰۷	-/۹۵	۸۸/۳۷	-/۰۳۵
۱۳۹۴	-/۹۸	۸/۳۰	-/۵۵	-/۷۹	۸۹/۳۱	-/۰۳۵
۱۳۹۵	-/۹۸	۸/۳۲	-/۵۷	-/۸۰	۸۹/۲۶	-/۰۳۵
۱۳۹۶	-/۹۹	۸/۲۱	-/۵۱	-/۷۶	۸۹/۴۸	-/۰۳۵
۱۳۹۷	-/۹۹	۸/۲۱	-/۴۷	-/۷۵	۸۹/۵۳	-/۰۳۴
۱۳۹۸	-/۹۹	۸/۲۹	-/۵۵	-/۷۹	۸۹/۳۲	-/۰۳۵
۱۳۹۹	-/۹۹	۸/۳۰	-/۵۵	-/۷۹	۸۹/۳۱	-/۰۳۵

ناشی از برق و هزینه‌های ناشی از سوخت‌های فسیلی تقسیم شده است. طبق جدول، هزینه‌های اجتماعی در طول سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۷ در حال کاهش بوده و سپس، در سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹، افزایش هزینه‌های اجتماعی مشاهده می‌شود. همچنین، هزینه‌های اجتماعی ناشی از سوخت فسیلی در همه‌ی سال‌ها بیشتر است و سهم هزینه‌های اجتماعی ناشی از برق در طی سال‌های مدل‌سازی، در حال کاهش است.

در جدول ۳، سهم آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای مختلف از هزینه‌های اجتماعی نمایش داده شده است. با توجه به جدول ۳،

گاز دی‌اکسید کربن بیشترین سهم را در ایجاد هزینه‌های اجتماعی دارد. همچنین، در طی سال، هزینه‌های ناشی از آلاینده‌ی SO<sub>x</sub> به‌طرز چشمگیری کاهش یافته است.

در جدول ۴، میزان تأثیر سناریوهای مختلف بر کاهش هزینه‌های اجتماعی آمده است. طبق جدول، سناریو ۲ به‌دلیل حذف کامل مازوت از صنایع و نیروگاه‌های بخاری، بیشترین تأثیر را در کاهش هزینه‌های اجتماعی دارد. سناریو ۴ به‌دلیل اینکه به‌صورت جزئی، مصارف گاز طبیعی و گازوئیل را تنها در بخش نیروگاهی کاهش می‌دهد و تأثیری در مصارف انرژی صنایع و

جدول ۴: درصد (%) کاهش هزینه‌های اجتماعی در سناریوهای مختلف

سال	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴	سناریو ۵	سناریو ترکیبی
۱۳۹۰	۹/۵۳	۴۷/۷۳	۴/۹۳	-۱/۴۳	۶/۶۹	۴۳/۶۸
۱۳۹۱	۹/۵۳	۵۰/۵۶	۵/۳۶	-۱/۲۶	۷/۳۱	۴۷/۵۸
۱۳۹۲	۹/۵	۵۰/۸۷	۵/۴۶	-/۵۲	۷/۴۵	۴۹/۲۴
۱۳۹۳	۹/۳۶	۳۱/۷۴	۳/۸۱	۳/۱۴	۴/۷۵	۲۱/۶۰
۱۳۹۴	۹/۳۲	۲۸/۵۷	۳/۷۲	۲/۸۰	۴/۵۵	۱۹
۱۳۹۵	۹/۴۲	۳۰/۰۲	۳/۷۹	۳/۵۳	۴/۸۱	۱۹/۹۰
۱۳۹۶	۹/۴۰	۳۰/۶۸	۳/۹۰	۳/۴۳	۴/۹۶	۱۹/۷۶
۱۳۹۷	۹/۵۵	۴۱/۸۶	۳/۸۹	۳/۱۸	۵/۱۷	۱۹/۹۶
۱۳۹۸	۹/۴۴	۳۱/۵۴	۳/۹۴	۲/۷۱	۵/۰۸	۱۹/۶۰
۱۳۹۹	۹/۴۷	۳۲/۲۳	۳/۹۹	۲/۷۷	۵/۲۰	۱۹/۸۳
میانگین	۹/۴۵	۳۶/۵۸	۴/۲۸	۱/۹۴	۵/۶	۲۸/۰۲

سوخت های بی کیفیت همچون مازوت ندارد، کمترین تأثیر را در کاهش هزینه های اجتماعی دارد.

## بحث و نتیجه گیری

با ادامه ی افزایش روند توسعه در مناطق مختلف، میزان مصرف انرژی در همه ی بخش ها، به خصوص بخش صنایع، روز به روز در حال افزایش است؛ از این رو، با افزایش مصرف انرژی، افزایش گازهای گلخانه ای و آلاینده های هوا امری اجتناب ناپذیر است و این انتشارها به ایجاد هزینه های اجتماعی مختلف منجر می شوند که سلامت انسان ها و محیط زیست را تهدید می کند [۱، ۲]. در این پژوهش، چهارچوبی برای ارزیابی سیاست های توسعه با هدف ملاحظه ی هزینه های اجتماعی و آلودگی های محیط زیستی با رویکرد پویایی های سیستم در بخش انرژی صنایع استان اصفهان برای سال های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹ توسعه داده شده است. در این تحقیق، هزینه های اجتماعی ناشی از گازهای گلخانه ای و آلاینده های هوا به صورت هم زمان بررسی و مقایسه شد. همچنین، هزینه های اجتماعی ناشی از مصرف برق و سوخت های فسیلی محاسبه و با یکدیگر مقایسه شد.

نتایج نشان داد که در طی سال های مدل سازی، میزان مصرف انرژی به صورت کلی، صعودی است و تنها در دو سال ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ افت داشته است. این افت می تواند در قالب دو دلیل بررسی و تحلیل شود. اولین دلیل کاهش فراورده های نفتی و گاز طبیعی تخصیص یافته به صنایع است که این امر احتمالاً به دلیل صرفه جویی در انرژی در خلال سال های مدنظر است. سیاست تصمیم گیران حوزه ی انرژی در مرحله ی اول، تأمین انرژی خانگی است و در صورت کمبود انرژی، سوخت رسانی به بخش مسکونی در اولویت است. دلیل دوم کاهش بسیار زیاد (حدود ۶۰ درصدی) مصرف مازوت در سال ۱۳۹۴ است که از مقدار حدود ۱۸۹ هزار مترمکعب به حدود ۷۲ هزار مترمکعب رسیده که این امر ممکن

است به دلیل اولویت سیاست گذاری های محیط زیستی استان در کاستن آلودگی های ناشی از صنایع در آن سال باشد. سوخت مازوت نسبت به سایر فراورده های نفتی، دارای انرژی بیشتری است [۲۲]. همچنین، آلودگی و انتشار گازهای گلخانه ای آن نیز نسبت به سایر فراورده های نفتی بیشتر است [۲۴، ۲۵]. به همین دلیل، کاهش مصرف سوخت مازوت هدف سیاست های محیط زیستی است و با کاهش آن، میزان درخور توجهی از آلودگی و انتشار گازهای گلخانه ای کاهش می یابد. همچنین، این اقدام باعث کاهش مصرف انرژی می شود. دلیل اصلی افزایش مصرف انرژی در منطقه ی مورد مطالعه، وجود صنایع فولاد و ذوب آهن است. این صنایع که صنایع پرمصرف در کشور ایران شناخته شده اند، برای تولید محصولات خود، از سوخت های فسیلی به میزان چشمگیری استفاده می کنند [۳۱].

انتشار گازهای گلخانه ای بسیار متأثر از مصرف انرژی است [۳۲]. از همین رو، پیش بینی می شود که با افزایش مصرف انرژی، گازهای گلخانه ای نیز افزایش یابند؛ اما با توجه به نتایج، به دلیل کاهش بسیار محسوس سوخت مازوت نیروگاه ها از سال ۱۳۹۳، انتشار بخش برق بسیار کاهش یافته و همین امر سبب کاهش انتشار کل شده است [۲۴].

در خصوص انتشار آلاینده های هوا و با توجه به نقش مصرف مازوت در افزایش شایسته ی ملاحظه ی آن ها، با کاهش بسیار زیاد مصرف مازوت در بخش صنایع، به خصوص نیروگاه ها، میزان انتشار آلاینده های هوا به صورت درخور ملاحظه ای کاهش می یابد. همچنین، سوخت مازوت یکی از منابع اصلی انتشار آلاینده ی  $SO_x$  است؛ از این رو، آلاینده ی  $SO_x$  در سال های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۲، دومین آلاینده ی انتشار یافته از نظر مقدار انتشار شناخته شده؛ ولی از سال ۱۳۹۳ به بعد، کاهش چشمگیر داشته و بعد از CO در رده ی سوم جای گرفته است [۲۵].

با توجه به نتایج، هزینه های اجتماعی در طی سال های مدل سازی، در ابتدا، روندی نزولی و سپس، روندی صعودی

تفاوت در ساختار انرژی مصرفی در دو منطقه‌ی مطالعاتی باشد. همچنین، در مطالعات ذکر شده، میزان انتشار آلاینده‌ها و هزینه‌های اجتماعی ناشی از آن‌ها در تمامی بخش‌ها ارزیابی شده؛ اما در این مطالعه، تنها بخش صنایع بررسی شده است.

با اعمال سناریوهای مختلف، نتایج بر این قرار است که سناریو ترکیبی در سال‌های اولیه‌ی مدل‌سازی، هزینه‌های اجتماعی را به میزان ۴۳ تا ۴۹ درصد و در سال‌های انتهایی، به میزان ۱۹ درصد کاهش می‌دهد و این امر نشان‌دهنده‌ی کاهش اثرگذاری سناریوهای توسعه بر کاهش هزینه‌های اجتماعی در سال‌های آینده (در صورت ادامه‌ی روند کنونی) است. لذا، باید هرچه سریع‌تر با هدف کاهش هزینه‌های اجتماعی ناشی از انتشار، به اقدامات اساسی دست زد. به این منظور، ترتیب اجرای سناریوها با توجه به میزان اثرگذاری سناریوهای مختلف به گونه‌ای است که سناریوهای ۲، ۱، ۵، ۳ و ۴ در اولویت هستند. با توجه به تأثیر درخور توجهی که سناریوهای شماره‌ی ۲ و ۱ در کاهش مصرف انرژی و نوع سوخت‌های مصرفی دارند، به کاهش بیشتر هزینه‌های اجتماعی نسبت به سایر سناریوها منجر می‌شوند. از سوی دیگر، سناریوهای شماره‌ی ۵ و ۳ به دلیل کاهش تولید برق توسط نیروگاه‌های حرارتی و در نتیجه، کاهش مصرف سوخت برای تولید برق، در رتبه‌ی سوم و چهارم قرار گرفته‌اند و برای کاهش هزینه‌های اجتماعی نیز اهمیت دارند. در رابطه با سناریو شماره‌ی ۴، اگرچه میزان انتشار آلاینده‌ها از نیروگاه‌ها کاهش می‌یابد، بر اساس نتایج، تأثیر این سناریو نسبت به سایر سناریوها در کاهش هزینه‌های اجتماعی بسیار کمتر است. کاهش انتشار در این سناریو به دلیل تبدیل نیروگاه‌های گازی به نیروگاه‌های سیکل ترکیبی که راندمان بالاتری نسبت به نیروگاه‌های گازی دارند و در نتیجه، سوخت کمتری مصرف می‌کنند، رخ می‌دهد [۳۵]. با این حال، به علت ایجاد تغییرات ناچیز در مصرف انرژی و نوع سوخت، این سناریو کمترین تأثیر را در کاهش هزینه‌های اجتماعی دارد.

از محدودیت‌های مهم این پژوهش کمبود اطلاعات،

داشت و بیشتر هزینه‌های ایجاد شده ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی صنایع بود. این موضوع به دلیل افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی در صنایع به وجود آمده است. افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی ناشی از افزایش نیاز به انرژی برای تولید بیشتر است. همچنین، با افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی، میزان انتشار آلاینده‌های هوا و گازهای گلخانه‌ای افزایش می‌یابد که این موضوع به افزایش خسارت‌های اجتماعی منجر می‌شود [۱۹]. همچنین، نتایج نشان داد که به صورت میانگین،  $\text{CO}_2$ ،  $\text{NO}_x$ ،  $\text{SO}_x$ ،  $\text{PM}_{2.5}$  و  $\text{CO}$  به ترتیب، دارای بیشترین سهم در ایجاد هزینه‌های اجتماعی هستند. این نتایج با مطالعات صورت گرفته در کشور آمریکا هماهنگی دارد. در این تحقیق، هزینه‌های سلامت و هزینه‌های اجتماعی ناشی از تغییرات اقلیمی به علت انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های هوا در بخش حمل و نقل جاده‌ای بررسی شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که گاز گلخانه‌ای  $\text{CO}_2$  و آلاینده‌ی  $\text{NO}_x$  با مقادیر ۵۱ و ۱۶ میلیارد دلار، بیشترین سهم را در ایجاد هزینه‌های اجتماعی دارند [۳۳]. از این روست که با توجه به هزینه‌های اجتماعی محاسبه شده، گاز گلخانه‌ای  $\text{CO}_2$  خسارت بیشتری حتی نسبت به آلاینده‌های هوا، به اجتماع می‌زند و این نتیجه با اثرهای ملموس شهروندان سازگاری ندارد. هزینه‌های اجتماعی ناشی از آلاینده‌های هوا در هر منطقه متفاوت است. در این مطالعه، آلاینده‌های  $\text{NO}_x$  و  $\text{CO}$  به ترتیب، دارای بیشترین و کمترین مقدار هزینه‌های اجتماعی هستند. از طرفی، آلاینده‌های  $\text{NO}_x$  و  $\text{PM}_{2.5}$  به ترتیب، بیشترین و کمترین مقدار انتشار را دارند. طبق مطالعه‌ای که در کلان‌شهر تهران انجام شد، آلاینده‌ی  $\text{PM}_{2.5}$  کمترین میزان انتشار را نسبت به آلاینده‌های دیگر داشت و علاوه بر آن، دارای بیشترین سهم در هزینه‌های اجتماعی وارد شده بود. همچنین، آلاینده‌ی  $\text{CO}$  دارای کمترین نقش در هزینه‌های اجتماعی ایجاد شده بود [۱۶]. در مطالعه‌ای دیگر که در کشور چین انجام شد، نتایج نشان داد که آلاینده‌ی  $\text{PM}_{2.5}$  دلیل اصلی افزایش هزینه‌های سلامت است [۳۴]. دلیل این تفاوت می‌تواند وجود

CO<sub>2</sub> در مقایسه با آلاینده های هوا، هزینه های اجتماعی بیشتری را به منطقه ی مدنظر وارد می کند. همچنین، آلاینده ی NO<sub>x</sub> بین آلاینده های دیگر بیشترین هزینه ی اجتماعی را ایجاد می کند. مقدار هزینه های اجتماعی و میزان انتشار آلاینده ها رابطه ی خطی مستقیم ندارند. به عنوان مثال، آلاینده ی CO علی رغم انتشار زیاد، کمترین هزینه ی اجتماعی را نسبت به سایر آلاینده ها به وجود می آورد. همچنین، سوخت مازوت بیشترین تأثیر را در هزینه های اجتماعی دارد. به همین دلیل، سناریو شماره ی ۱ به عنوان بهترین سناریو برای کاهش هزینه های اجتماعی پیشنهاد می شود. این مطالعه به سیاست گذاران در بخش توسعه کمک بسیاری می کند تا هزینه های اجتماعی ناشی از سناریوهای توسعه را ارزیابی کنند و تصمیم بهتری در آینده بگیرند.

### قدردانی

این پژوهش حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد حسین ابوالقاسم زاده با کد ثبت پیشنهاده ۱۸۴۰۷۱۶ در سامانه گنج ایرانداک است. بدین وسیله، نویسندگان از تمام کسانی که در انجام این پژوهش یاری رساندند، تشکر می کنند.

### تضاد در منافع

نویسندگان اعلام می کنند که هیچ گونه تضاد منافی در پژوهش حاضر وجود ندارد.

به خصوص اطلاعات دقیق مصرف انرژی و میزان بازدهی مصرف انرژی دستگاه های صنایع مختلف و ناآگاهی از اقدامات کاهش انتشار و میزان کنترل آلودگی صنایع در مدت مدل سازی است. همچنین، به دلیل در دسترس نبودن تکنولوژی های استفاده شده در نیروگاه ها و صنایع، اطلاعاتی در خصوص کاهش انتشار گازهای گلخانه ای توسط تکنولوژی هایی نظیر جذب کربن در دسترس نیست. پیشنهاد می شود که در پژوهش های آینده، اثر تکنولوژی های مختلف کاهش انتشار و کنترل آلاینده های هوا در بخش صنایع در نظر گرفته شود. همچنین، می توان با لحاظ قیمت انرژی و در نظر گیری پارانه های پنهان در بخش انرژی، میزان تأثیر تغییر قیمت در حامل های انرژی بر هزینه های اجتماعی را سنجید. می توان با مدل سازی فرایند صنایع مختلف، نظیر فولاد و سیمان، میزان انتشار فرایندی ناشی از این صنایع و تأثیر آن بر هزینه های اجتماعی را بررسی کرد. در نهایت، این مدل با امکان اعمال سیاست های کاهش انتشار آلاینده های هوا و گازهای گلخانه ای، امکان مناسبی را برای کمی سازی هرگونه بهبود در محیط زیست استان اصفهان فراهم می کند.

میزان هزینه های اجتماعی در طول سال های مطالعه به طور چشمگیری افزایش یافته است. عامل اصلی این افزایش، مصرف انرژی و انتشار آلاینده های هوا و گازهای گلخانه ای است. کنترل هزینه های اجتماعی مرتبط با مصرف انرژی به مرور زمان، به صورت چشمگیری دشوارتر شده است. در بهترین حالت، در سال های ابتدایی می توان میزان هزینه های اجتماعی را تا ۴۹ درصد کاهش داد؛ اما در سال های آینده، این عدد به ۱۹ درصد کاهش خواهد یافت. نتایج نشان می دهد که گاز گلخانه ای

## References

- Mansorimoghadam S, Hormati M, Godarzi Gh. Estimation of deaths due to cardiovascular diseases, the number and number of hospital's visits due to respiratory diseases attributed to suspended particles less than 10 microns in Ahvaz metropolis. 9th air and noise pollution management conference Tehran 2022 (Persian).
- khazaei S, motesaddi S, etemad K, rashidi Y,

- Gheibipoor H, rohani M. Evaluation of the Association between Air Pollutants and Number of Cases with Severe Acute Respiratory Syndrome Recorded at Emergency Medical Centers in Tehran, Iran in 2013. *J Health Res Commun* 2016; 2(2): 37-43 (Persian).
3. Safaei Manesh B, Khochiani R. Analysis of countries based on carbon emissions (air pollution) on welfare (per capita income) and development. The third international conference on innovation in business management and economics Tehran 2022 (Persian).
  4. Hormati M, Godarzi G. Investigating the effects of carbon monoxide, sulfur dioxide, nitrogen oxides and hydrocarbons emitted by industries and their control strategies. The 9th National Conference on Air and Noise Pollution Management Tehran 2022 (Persian).
  5. Kazemi A, Hosseinzadeh M. Policy analysis of greenhouse gases' mitigation in Iran energy sector using system dynamics approach. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 2016; 35(4): 1221-30.
  6. Khosravi S, Haghshenas H, Salehi V. Macro-scale evaluation of urban transportation demand management policies in CBD by using system dynamics case study: Isfahan CBD. *Transportation Research Procedia* 2020; 48: 2671-89.
  7. Salari M, Javid RJ, NoghaniBehambari H. The nexus between CO2 emissions, energy consumption, and economic growth in the US. *Economic Analysis and Policy* 2021; 69: 182-94.
  8. Ruamsuke K, Dhakal S, Marpaung CO. Energy and economic impacts of the global climate change policy on Southeast Asian countries: A general equilibrium analysis. *Energy* 2015; 81: 446-61.
  9. Kelly C, Onat NC, Tatari O. Water and carbon footprint reduction potential of renewable energy in the United States: A policy analysis using system dynamics. *Journal of Cleaner Production* 2019; 228: 910-26.
  10. Ansell T, Cayzer S. Limits to growth redux: A system dynamics model for assessing energy and climate change constraints to global growth. *Energy Policy* 2018; 120: 514-25.
  11. Lin B, Ahmad I. Analysis of energy related carbon dioxide emission and reduction potential in Pakistan. *Journal of Cleaner Production* 2017; 143: 278-87.
  12. Wang S, Zhou C, Li G, Feng K. CO2, economic growth, and energy consumption in China's provinces: investigating the spatiotemporal and econometric characteristics of China's CO2 emissions. *Ecological indicators* 2016; 69: 184-95.
  13. Development of optimization codes for the country's energy supply system using Mathprog GN programming language. Institute of International Energy Studies 2016 (Persian).
  14. Fattahi M. The role of urbanization rate in the relationship between air pollution and health expenditures: a dynamic panel data approach. *International Letters of Social and Humanistic Sciences* 2015; 53: 68-72.
  15. An J, Heshmati A. The relationship between air pollutants and healthcare expenditure: empirical evidence from South Korea. *Environmental Science and Pollution Research* 2019; 26(31): 31730-51.
  16. Isfahanian V, Mahtochi S, Naseri K. Synthesis and estimation of social costs caused by air pollution in Tehran metropolis. 10th Air and Noise Pollution Management Conference. Tehran 2022 (Persian).
  17. Anwar A, Hyder S, Bennett R, Younis M. Impact of environmental quality on healthcare expenditures in developing countries: a panel data approach. *Healthcare (Basel)* 2022; 10(9): 1608.
  18. Gu H, Cao Y, Elahi E, Jha SK. Human health damages related to air pollution in China. *Environ Sci Pollut Res Int* 2019; 26(13): 13115-13125.
  19. Electricity and Energy Macro Planning Office (2017). energy balance sheet of 2015 Ministry of Energy. Tehran 2015 (Persian).
  20. Organization of Geology and Mineral Exploration of the country. Isfahan 2023 (Persian).
  21. Hosseiniebalam F, Ghaffaripasand O. The effects of emission sources and meteorological factors on sulphur dioxide concentration of Great Isfahan, Iran. *Atmospheric Environment* 2015; 100: 94-101.
  22. Deputy Planning Department of the Ministry of Petroleum. Hydrocarbon Balance Sheet 2014. Institute of International Energy Studies. Tehran 2016 (Persian)
  23. Management and Planning Organization of Isfahan Province. Deputy of Statistics and Information, Statistical Yearbook of Isfahan Province 1997. Program and Budget Organization. Tehran 2018 (Persian).
  24. Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
  25. Nelson DA. European Environment Agency. *Colo J. Int'l Env'tl. L. & Pol'y* 1999; 10: 153.
  26. Sterman JD. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill Inc 2002.
  27. Tavanir Organization (2015). Detailed statistics of

- Iran's power generation industry. energy production in the year 2014. Vice President of Research and Human Resources. Tehran 2014 (persian).
28. Office of the National Climate Change Plan. National Strategic Plan on Climate Change. Environmental Protection Organization.
29. Electricity and Energy Macro Planning Office. Iran's Energy Sector Development Plan. Ministry of Energy. Tehran 2013 (persian).
30. Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K, Tignor M, Miller H. IPCC fourth assessment report (AR4). *Climate change* 2007; 374.
31. Ansari N, Seifi A. A system dynamics analysis of energy consumption and corrective policies in Iranian iron and steel industry. *Energy* 2012; 43(1): 334-43.
32. Guedie R, Ngnemadon AS, Fotio HK, Nembot L. Disaggregated analysis of the effects of energy consumption on greenhouse gas emissions in Africa. *Energy Economics Letters* 2022; 9(2): 75-90.
33. Zelasky SE, Buonocore JJ. The social costs of health- and climate-related on-road vehicle emissions in the continental United States from 2008 to 2017. *Environmental Research Letters* 2021; 16(6): 065009.
34. Chen F, Chen Z. Cost of economic growth: Air pollution and health expenditure. *Sci Total Environ* 2021; 755(Pt 1): 142543.
35. Hoang TD, Pawluskiewicz DK. The efficiency analysis of different combined cycle power plants based on the impact of selected parameters. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy* 2016; 5(2): 77-85.