



## Explaining the Effects of Climate Elements in Tehran's Metropolis Air Quality

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Ramezani R.<sup>1</sup> MA,  
Alijani B.\* PhD,  
Reza B.<sup>1</sup> PhD

#### How to cite this article

Ramezani R, Alijani B, Reza B. Explaining the Effects of Climate Elements in Tehran's Metropolis Air Quality. Geographical Researches Quarterly Journal. 2018;33(3):154-169.

\*Department of Geography, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

<sup>1</sup>Department of Geography, & Science & Research, Islamic Azad University, Tehran, Iran

#### \*Correspondence

Address: Department of Geography, Literature and Humanities Faculty, Kharazmi University, Southwest Mofatheh Street, Tehran, Iran.  
Phone: 02186072716  
Fax: 02186072789  
bralijani@gmail.com

#### Article History

Received: June 30, 2018  
Accepted: October 29, 2018  
ePublished: December 09, 2018

### ABSTRACT

**Introduction and Background** Atmospheric pollutants are elements whose high concentrations cause damage to the Earth's biological cycles, and its concentration is usually determined by concentrations of air pollutants such as nitrogen dioxide, sulfur dioxide, carbon monoxide, ozone and suspended particles. Air pollutants have changed the composition of air and affect the air quality of local, regional and global climate. Air quality is strongly influenced by climatic conditions, topography, automobiles and industries, transportation system and the type and amount of pollutants.

**Aims** The purpose of this study is to investigate the direct and indirect effects of climate elements on the quality and pollution of Tehran metropolitan air.

**Methodology** The research method is quantitative-analytical and the data also includes selected meteorological parameters and air pollution in Tehran. The path analysis method was used to study the effects of climate elements on air quality in Tehran metropolis. This method investigates the causal relations of direct and indirect effects and the total effect of each of the independent variables on dependent variables which is Tehran air quality and interprets the relationships and correlations observed between them. In the process of analyzing the path, a theoretical diagram based on the possible effects of variables relative to each other will be considered as the initial assumption, and then after the path analysis, variables affecting the final graph of the path are specified and interpreted.

**Conclusion** The results of the research have shown that, given the wide and important performance of meteorological data in this study, we must consider the meteorological factor as a decisive parameter that has great control over many other factors affecting the air quality of Tehran. This factor has played a significant role in both direct and indirect effects on Tehran's air quality.

**Keywords** Path Analysis; Conceptual Model; Climate Elements; Air Quality; Tehran Metropolis

### CITATION LINKS

[Abbasi Jebli; 2011] Investigating the air pollution process in ...; [Abbasi, et al.; 2013] Climatic factors of winter season affected ...; [Abedini; 1999] The effect of sustainability on the concentration ...; [Akbari, et al.; 2015] Monthly zonation of air pollution and its relationship ...; [Bidokhti & Sharaeipour; 2010] Meteorological conditions of acute air ...; [Croxford, et al.; 1996] Spatial distribution of urban pollution ...; [Doherty et al.; 2013] Impacts of climate change on surface ...; [Entezari; 2003] Statistical and synoptic study of tehran air ...; [Fayyaz; 2006] Track analysis, student ...; [Fenger; 1999] Urban air quality. Atmospheric ...; [Frank, et al.; 2000] Linking land use with household ...; [Isa Lo, et al.; 2011] Spatial vulnerability and air pollution ...; [Jacob & Winner; 2009] Effect of climate change on air ...; [Javan Bakhat Amiri & Khatami; 2012] Investigating the relationship ...; [Javid; 2012] Spatial distribution and seasonal ...; [Johnson & Wichern; 1992] Applied multivariate mtatistical ...; [Mahoori; 2012] Path analysis training in ...; [Mohammadi & Robati; 2009] The role of climatic parameters in the distribution ...; [Naghavi; 2013] Synoptic analysis of climatic elements ...; [Park, et al.; 2012] The visualization by analyzing the ...; [Peel, et al.; 2013] Impact of nitrogen and climate change ...; [Ren et al.; 2007] Influence of ozone pollution and climate ...; [Roshan, et al.; 2009] The effect of air pollution on climatic ...; [Safavi & Alijani; 2006] Geographical factors investigating Tehran's ...; [Saligheh & Kakhki Mahneh; 2015] Investigating the relationship between climate ...; [Schaub & Paoletti; 2007] Introductory remarks to the special issue ...; [Schweitzer & Zhou; 2010] Neighborhood air quality, respiratory health ...; [Taghavi; 2011] Time and spatial distribution of air pollution ...; [Taheri & Hosseini; 2017] Pending particles, resources, measurements ...; [Vaseghi & Zibaei; 2008] Prediction of air pollution in ...; [Zebardast & Riazi; 2015] Indicators of the human environment and its ...

## تبیین تأثیرات عناصر آب و هوایی در کیفیت هوای کلان‌شهر تهران

پذیرش نهایی: ۱۳۹۷/۸/۷

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۴/۹

DOI: 10.29252/geores.33.3.154

### چکیده

**مقدمه:** آلاینده‌های جوی عناصری هستند که غلظت زیاد آن‌ها سبب صدمه به چرخه‌های زیستی زمین می‌شود و مقدار آن نیز معمولاً به وسیله غلظت آلاینده‌های هوا مانند دی‌اکسید نیتروژن<sup>۱</sup>، دی‌اکسید گوگرد<sup>۲</sup>، دی‌اکسید کربن<sup>۳</sup>، ازن<sup>۴</sup> و ذرات معلق<sup>۵</sup> مشخص می‌شود. آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های بشری نسبت ترکیبات هوا را تغییر و بر کیفیت هوای محلی، منطقه‌ای و آب‌وهوای جهانی تأثیر می‌گذارند. کیفیت هوا به شدت متأثر از شرایط آب‌وهوایی، توپوگرافی، خودروها و صنایع، سیستم حمل‌ونقل و نوع و میزان آلاینده‌ها می‌باشد.

**اهداف:** هدف از این پژوهش ردیابی چگونگی تأثیر مستقیم و غیرمستقیم عناصر آب‌وهوایی در کیفیت و آلودگی هوای کلان‌شهر تهران می‌باشد.

**مواد و روش‌ها:** تحقیق به روش کمی - تحلیلی است و داده‌های مورد استفاده شامل پارامترهای هواشناسی و آلودگی هوا در تهران می‌باشند. به منظور بررسی اثرات عناصر اقلیمی بر کیفیت هوا در کلان‌شهر تهران از روش تحلیل مسیر استفاده شد. این روش روابط علی، اثرات مستقیم، غیرمستقیم و اثر کلی هر یک از متغیرهای مستقل را بر متغیرهای وابسته یعنی کیفیت هوای تهران را بررسی می‌کند و روابط و همبستگی‌های بین آن‌ها را تفسیر می‌کند. در فرایند تحلیل مسیر یک نمودار نظری بر اساس اثرات احتمالی متغیرها ترسیم و متغیرهای مؤثر بر روی گراف نهایی مسیر مشخص و تفسیر می‌شوند.

**نتیجه‌گیری:** نتایج تحقیق نشان داده است با توجه به عملکرد وسیع و مهم داده‌های هواشناسی در این مطالعه، باید عامل هواشناسی را به عنوان پارامتر تعیین‌کننده و اساسی که قدرت کنترل زیادی بر بسیاری از شاخص‌های دیگر مؤثر در میزان کیفیت هوا تهران دارد، دانست؛ زیرا هم در ارتباط مستقیم و هم در اثرات غیرمستقیم بر کیفیت هوای تهران نقش پررنگ و بارزی ایفا کرده است.

**واژگان کلیدی:** تحلیل مسیر، مدل مفهومی، عناصر آب‌وهوا، کیفیت هوا، کلان‌شهر تهران.

1 Nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>)  
2 Sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>)  
3 Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>)  
4 Ozone (O<sub>3</sub>)  
5 Particulate Matter (PM)

## مقدمه

آلاینده‌های جوی عناصری هستند که غلظت زیاد آن‌ها سبب صدمه به چرخه‌های زیستی زمین می‌شود و مقدار آن نیز معمولاً به وسیله غلظت آلاینده‌های هوا مانند دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد، متواکسید کربن، ازن و ذرات معلق مشخص می‌شود (Croxford, Penn, & Hillier, 1996). آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های بشری نسبت ترکیبات هوا را تغییر و بر کیفیت هوای محلی، منطقه‌ای و آب‌وهوای جهانی تأثیر می‌گذارند. کیفیت هوا به شدت متأثر از شرایط آب‌وهوایی، توپوگرافی، خودروها و صنایع، سیستم حمل‌ونقل و نوع و میزان آلاینده‌ها می‌باشد.

در شهرها آلاینده‌های متعددی تولید می‌شود که مجموع آن‌ها مه دود شهری را تشکیل می‌دهند، عمده‌ترین آلاینده‌های تشکیل‌دهنده مه دود شهری عبارت‌اند از: اکسیدهای نیتروژن، متواکسید کربن، ازن، اکسیدهای گوگرد و غبار. در تشکیل مه دود و کیفیت هوا عناصر آب‌وهوایی مثل تابش، رطوبت، دما، پایداری جو، وارونگی دما، سمت و سرعت باد مؤثرند. کیفیت هوا نشان‌دهنده تأثیرات بسیار گسترده بر سیستم‌های بیولوژیکی، فیزیک، اقتصاد و سلامت جامعه انسانی که حاصل افزایش گازهای گلخانه‌ای در طیف وسیعی از منابع، از جمله صنعت، تولید برق، حمل‌ونقل، و منابع خانگی می‌باشد. گسترش شهرنشینی و توسعه شهرها به همراه افزایش شتابان جمعیت و توسعه فعالیت‌های صنعتی با مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی بر شدت این آلودگی افزوده است (Ren et al., 2007). تغییر شرایط آب‌وهوا می‌تواند تأثیر کاهنده یا فزاینده‌ای در میزان کیفیت هوا در مناطق بزرگ شهری داشته باشد (Schaub & Paoletti, 2007). هرچند بسیاری از خطرات مرتبط با تشدید آلودگی هوا در شهرها با بهبود خدمات بهداشتی - درمانی قابل کنترل هستند، اما هزینه‌های بهبود شرایط محیطی و افزایش سطح خدمات بهداشتی و آسایش حرارتی و نیز جبران اثرات کاهش کیفیت هوا در شهرها، مستلزم صرف هزینه‌های زیادی از طرف بخش‌های خصوصی و دولتی در این زمینه‌ها می‌باشد. علاوه بر این، تشدید آلودگی هوا و کاهش کیفیت هوا ناشی از شرایط آب‌وهوا، سبب تشدید تعارضات روحی و روانی و ناهنجاری‌های مختلف اجتماعی و فرهنگی می‌شود.

شاخص کیفیت هوا یک ابزار کلیدی جهت آگاهی از کیفیت هوا، نحوه اثر آلودگی هوا بر سلامت و روش‌های محافظتی در برابر آلودگی هوا است. شاخص کیفیت هوا (AQI)<sup>۱</sup> برای پنج آلاینده اصلی هوا یعنی ذرات معلق، دی‌اکسید نیتروژن، ازن سطح زمین، متواکسید کربن و دی‌اکسید گوگرد محاسبه می‌شود (Taheri & Hosseini, 2017).

شهر تهران یکی از آلوده‌ترین شهرهای جهان به شمار می‌رود و در طی سال از هر سه روز یک روز توسط یکی یا چند آلاینده‌های اصلی هوا تهران آلوده است. عوامل متعددی از جمله مصرف سوخت‌های فسیلی ناشی از حمل‌ونقل، صنایع و مصارف خانگی و رشد افسارگسیخته جمعیت و توسعه شهری و عوامل جغرافیایی در ایجاد و دوام آلودگی آن نقش دارند؛ اما اثر عناصر آب‌وهوایی نظیر فشار هوا (باد و جهت باد) دما و وارونگی دمایی و بارش در تهران نقش تعیین‌کننده و مؤثری در تشدید این آلودگی و یا پاک‌سازی هوای شهر تهران دارند (Safavi & Alijani, 2006). با توجه به مسئله آلودگی هوای کلان‌شهر تهران و تأثیرات آن در حوزه‌های اجتماعی، مدیریت شهری و سلامت و نیز نقش تعیین‌کننده عناصر آب‌وهوایی در تشدید یا پاک‌سازی آلودگی هوا در این کلان‌شهر، در این پژوهش به منظور دریافت چگونگی تأثیرات عناصر آب‌وهوایی بر شاخص کیفیت هوای تهران تلاش شده است تا با به کارگیری روش آماری تحلیل مسیر به ردیابی و تبیین اثرات عناصر آب‌وهوایی در آلودگی و کیفیت هوای تهران پرداخته شود.

در طول سال‌های اخیر تلاش‌های بسیاری در بررسی روابط بین آلودگی هوا و پارامترهای آب و هواشناسی انجام شده و چندین روش آماری پیشنهاد شده است. تحقیق حاضر به دنبال بررسی اثرات عناصر آب‌وهوایی در آلودگی و کیفیت هوای کلان‌شهر تهران می‌باشد. بر همین مبنا بررسی‌های زیادی در متون داخلی و خارجی انجام گرفته که شرح آن در مطالب زیر آمده است.

بررسی اثر پایداری شدید بر تمرکز آلودگی هوای شهرهایی مانند تهران نشان می‌دهد غلظت آلاینده‌های جوی به‌ویژه با وضع توپوگرافی خاصی که دارد در شرایط مختلف هواشناختی تغییر می‌کند و پایداری هوا که منجر به سکون نسبی هوا می‌شود، مهم‌ترین عامل افزایش آلودگی هوای شهر بوده و آلودگی هوا تحت شرایط پایداری به شدت افزایش می‌یابد. علاوه بر این شار گرما، ارتفاع اولیه وارونگی نیز به گونه‌ای بارز در این موضوع تأثیرگذار می‌باشند و نقش توپوگرافی در تمرکز آلودگی هوای تهران در شرایط مختلف متفاوت است (Abedini, 1999). تحلیل تأثیر آلودگی هوا بر نوسانات اقلیمی شهر تهران نشان داد که اقلیم شهر تهران در دوره آلوده نسبت به دو دوره قبل، از نوسان بیشتری برخوردار بوده و نوسانات اقلیم منطقه در دوره آلوده به صورت افزایش دما، افزایش پتانسیل سیلاب خیزی و تغییر اقلیم به سوی وضعیتی گرم و مرطوب‌تر بوده است (Roshan, Khosh Akhlagh, Negahbani, & Mirkentoli, 2009). در میزان آلودگی هوا، فشار هوا، پایداری و ناپایداری آن تأثیرگذار می‌باشد و بررسی انجام شده در خصوص شرایط هواشناختی جو بالا و وضعیت حاد آلودگی هوا در شهر تهران نشان داد که اگر سیستم‌های پشته یا حباب همراه با وارونگی‌های دمای سطحی باشند، آلودگی‌های شدید و مداومی رخ می‌دهد (Bidokhti & Sharaeipour, 2010). در مطالعه تحلیل سینوپتیکی و پس از بررسی بر روی نقشه‌های ترکیبی عناصر آب‌وهوای مؤثر بر آلودگی هوای شهر تهران نیز آمده به نسبت کاهش میزان بارندگی، رطوبت، فراوانی و میزان سرعت بادهای سطح زمین؛ میزان آلاینده‌های جو افزایش می‌یابد (Taghavi, 2011). علاوه بر این مطالعه، بررسی آسیب‌پذیری فضایی و بحران آلودگی هوا در کلان‌شهر تهران نیز نشان داد که نواحی غرب و جنوب شهر تهران به سبب تراکم بالای جمعیت و همچنین منابع آلاینده آسیب‌پذیری بیشتری را نسبت به سایر بخش‌های شهر از خود نمود می‌دهد که می‌تواند زنگ خطری برای سلامت شهروندان ساکن در این بخش از شهر باشد (Isa Lo, Shahmoradi, Bahrami, & Sadat Aghamiri, 2011). در همین راستا جاوید در سال ۱۳۹۱ با بررسی و تحلیل توزیع مکانی و تغییرات فصلی نشست آلاینده‌های هوا در ایستگاه‌های هواشناسی انتخابی استان تهران دریافت که شرایط حاد آلودگی معمولاً در شرایطی اتفاق می‌افتد که سرعت باد کمتر است و ذرات به راحتی روی سطح نشست پیدا می‌کنند (Javid, 2012). زبردست و ریاضی (۱۳۹۴) نیز در بررسی شاخص‌های محیط انسان‌ساخت و تأثیرات آن بر آلودگی هوای شهر تهران نشان دادند که غلظت آلاینده‌ها در نواحی مرکزی و غیر مرکزی شهر متفاوت بوده و شاخص‌های محیط انسان‌ساخت با غلظت آلاینده‌های هواداری همبستگی می‌باشند (Zebardast & Riazi, 2015). در مطالعه و تحلیل توزیع زمانی و مکانی آلاینده‌های شاخص آلودگی هوای شهر مشهد و عوامل مؤثر بر آن، این نتیجه حاصل شده که برای تمام آلاینده‌ها به جز ازن، پاییز، آلوده‌ترین فصل سال و آذر آلوده‌ترین ماه بوده است. ولی در مورد ازن، نتایج ارزیابی‌ها آلوده‌ترین فصل را فصل تابستان و آلوده‌ترین ماه را ماه خرداد نشان داد (Naghavi, 2013). در خصوص پهنه‌بندی ماهانه میزان آلودگی هوای مشهد و بررسی نحوه ارتباط آن با عوامل اقلیمی نشان داده شد که در بیشتر ماه‌ها، بیشترین آلودگی هوا در مرکز شهر با داشتن ترافیک بیشتر و نیز میزان بارش و سرعت باد کمتر و جهت باد موافق مشهود است (Akbari, Fakheri, Pourgholamhassan, & Akbari, 2015). در شهر تبریز با بررسی عوامل آب‌وهوای فصل زمستان متأثر از آلاینده‌های هوا مشخص شد با افزایش میزان غلظت آلاینده‌ها دما نیز به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد و بیشترین همبستگی را با آلاینده‌های هوا دارد و باینکه آلاینده‌های هوا تأثیر کمی بر میزان بارش و رطوبت دارند ولی در روزهایی که آلودگی هوا به‌خصوص ذرات گردوغبار

دارای غلظت بیشتری در هوا می‌باشند، باعث افزایش بارش می‌گردند (Abbasi, Sari Saraf, & Moghani Bileh Savar, 2013).

بررسی اثر پارامترهای اقلیمی در پراکنش آلودگی هوای منطقه ویژه اقتصادی پتروشیمی ماهشهر نشان داده است که میزان غلظت آلاینده‌ها در شرایط جوی پایدار بیشتر از شرایط جوی ناپایدار و خنثی بوده و میزان غلظت گاز دی‌اکسید نیتروژن در منطقه بیشتر از میزان غلظت گاز دی‌اکسید گوگرد می‌باشد (Mohammadi & Robati, 2009). در بررسی ارتباط بین آلاینده‌های شاخص کیفیت هوا و پارامترهای هواشناسی در تهران با رویکرد آنالیز رگرسیون نیز مشخص شد با توجه به معنی‌دار بودن ارتباط بین پارامترهای هواشناسی و آلاینده‌ها، پارامترهای هواشناسی می‌توانند در میزان آلاینده‌گی هوای شهر تهران مؤثر واقع شوند (Javan Bakhat Amiri & Khatami, 2012). انتظاری (۱۳۸۲) به مطالعه آماری و سینوپتیکی آلودگی هوای تهران از طریق معادله رگرسیون پرداخته است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داده است که معادله رگرسیون دی‌اکسید گوگرد قدرت پیش‌بینی عالی برای پیش‌بینی متغیرهای وضع هوا (دما، رطوبت، بارندگی، سرعت باد و مقدار ابر) دارد (Entezari, 2003). در مطالعه و بررسی روند آلودگی هوای شهر اصفهان و همبستگی آن با فاکتورهای اقلیمی مشخص شد همبستگی بین پارامترهای آلودگی هوا و فاکتورهای اقلیمی در شهر اصفهان بین پارامترهای مختلف و همچنین دو سال مورد مطالعه متفاوت و دارای معادله چند متغیره بوده است. جهت و سرعت باد نیز به‌عنوان فاکتورهای اقلیمی مؤثر در کاهش غلظت آلاینده‌ها به‌خصوص ذرات معلق ۱۰ میکرون و دی‌اکسید کربن شناخته‌شده و رابطه معکوسی بین رطوبت نسبی و دما برای آلاینده‌های دی‌اکسید نیتروژن و دی‌اکسید گوگرد وجود داشته است (Abbasi, 2011).

در مطالعه و بررسی روابط بین عناصر آب‌وهوایی و نوسانات آلودگی هوای شهر مشهد با استفاده از سه مدل متفاوت شبکه عصبی احتمالی، مدل رگرسیون خطی و مدل پرسپترون چندلایه، آلاینده‌های هوا و پارامترهای آب‌وهوای مورد تحلیل قرار گرفتند و مشخص شد مدل شبکه عصبی احتمالی، توانسته است رابطه منطقی بین آلودگی هوا و پارامترهای هواشناسی برقرار کند و از بین عناصر آب‌وهوای تأثیرگذار بر منواکسید کربن، رطوبت نسبی و جهت باد بیشترین اثر را داشته‌اند (Saligheh & Kakhki Mahneh, 2015). در بررسی و پیش‌بینی آلودگی هوا با روش رگرسیونی و غیر رگرسیونی در شهر شیراز نیز دریافتند که مدل ARMA قادر است آلودگی هوای شیراز را با دقت ۹۵ درصد پیش‌بینی و روند آلودگی هوا را در آینده نزدیک مورد ارزیابی قرار دهند (Vaseghi & Zibaei, 2008).

در زمینه روابط آلاینده‌ها و شرایط آب‌وهوایی، فنگر معتقد است علاوه بر منابع آلودگی هوا محلی، فعالیت‌های شهری به میزان قابل توجهی باعث آلودگی‌های مرزی و افزایش غلظت‌های جهانی گازهای گلخانه‌ای می‌شود و تلاش برای حل مشکلات شهری با معرفی فن‌آوری‌های پاکیزه و با کارآمدتر انرژی تأثیرات مثبتی بر این مشکلات بزرگ دارد. از سوی دیگر، تلاش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی شهر با گسترش فعالیت‌ها، ممکن است ترافیک بیشتری را تولید کند و بنابراین اثر متفاوتی داشته باشد (Fenger, 1999). اسوایزر و زو نیز در مقایسه میزان قرار داشتن در معرض آلودگی هوای محلی، در نواحی فشرده و پراکنده، دریافتند که غلظت ازن در نواحی فشرده به شکل معناداری پایین‌تر، اما میزان قرارگیری در معرض آلودگی ازن در این نواحی بیشتر است (Schweitzer & Zhou, 2010). در مطالعه ارتباط شاخص‌های محیط انسان‌ساخت شهری با میزان انتشار آلاینده‌های VOC، دی‌اکسید نیتروژن و دی‌اکسید کربن ارتباط معناداری بین شاخص‌های محیط انسان‌ساخت و میزان انتشارات وسایل نقلیه دریافت شد که با افزایش تراکم مسکونی و اشتغال و ارتقای ارتباطات شبکه راه‌ها و کاهش فاصله محل زندگی و کار، میزان انتشار آلاینده‌ها به میزان قابل توجهی کاهش یافته است (Frank, Stone, & )



برای دستیابی به تحلیل مناسب و درست از چگونگی اثرات عناصر آب‌وهوایی بر کیفیت هوای تهران، از پارامترهای منتخب هواشناسی استفاده شده است. با توجه به محدودیت بازه زمانی داده‌های کیفیت هوا که از سال ۲۰۰۶ بوده دوره آماری مورد مطالعه در این روش از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۶ (۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵) به مدت ۱۱ سال و به صورت ماهانه در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از روش رگرسیونی به بازیابی داده‌های مفقوده و آماده‌سازی آن جهت انجام تحلیل مسیر پرداخته شد. برای انجام این روش لازم است که همه مناطق تهران به صورت یک کل دیده شود تا اثرات متغیرهای منتخب در میزان کیفیت هوای کل تهران مورد تحلیل قرار گیرد. به همین منظور برای داده‌های هواشناسی (که از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد) از میانگین ماهانه داده‌های منتخب شامل میانگین‌های ماهانه دمای هوا، مجموع بارش، سرعت باد در ایستگاه‌های حاشیه و درون کلان‌شهر تهران (ایستگاه‌های فرودگاه مهرآباد، چیتگر، شمیران و ژئوفیزیک) استفاده شد. برای داده‌های آلودگی هوا - که از شرکت کنترل کیفیت هوای تهران دریافت شد - نیز میانگین ماهانه همه سنجنده‌های آلودگی هوا شامل متغیرهای دی‌اکسید کربن، ازن، دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد، ذرات معلق ۱۰ میکرون و ذرات معلق ۲/۵ میکرون در نظر گرفته شد.

شاخص کیفیت هوا، شاخصی جهت اطلاع‌رسانی و پیش‌بینی روزانه کیفیت هوا می‌باشد که کیفیت هوا و میزان ارتباط با سطح سلامت را به شهروندان ارائه می‌دهد. این شاخص برای پنج آلاینده اصلی هوا یعنی ذرات معلق، دی‌اکسید نیتروژن، ازن سطح زمین، منواکسید کربن و دی‌اکسید گوگرد محاسبه و در شش سطح طبقه‌بندی شده و دامنه آن بین ۰ تا ۵۰۰ می‌باشد (شکل ۲). هرچه مقدار این شاخص بالاتر باشد از کیفیت هوا کاسته می‌شود (Taheri & Hosseini, 2017).

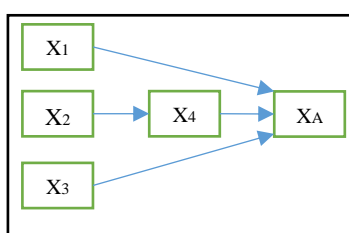
AQI	کیفیت هوا
0-50	پاک
51-100	سالم (متوسط)
101-150	ناسالم برای گروه‌های حساس
151-200	ناسالم
201-300	بسیار ناسالم
301-500	خطرناک

شکل ۲- شاخص کیفیت هوا در شرایط مختلف (شرکت کنترل کیفیت هوای شهرداری تهران)

در این پژوهش به منظور بررسی و مطالعه چگونگی تأثیر عناصر آب‌وهوایی بر کیفیت هوای کلان‌شهر تهران، از روش تحلیل مسیر استفاده می‌شود. این روش که اولین بار توسط سوول رایت در سال ۱۹۳۴ توسعه یافته، تعمیم یافته از رگرسیون چند متغیره است که در آن به بررسی اثرات متغیر (متغیرهای) مستقل و متغیر (متغیرهای) وابسته پرداخته می‌شود. روابط علی این متغیرها، در نهایت به صورت یک ساختار نموداری و در قالب مدل و خطوط علی با متغیر یا متغیرهای وابسته نشان داده می‌شود (Mahoori, 2012). این مدل می‌تواند علاوه بر بیان آثار مستقیم، آثار غیرمستقیم و اثر کل هر یک از متغیرهای مستقل را برای متغیرهای وابسته نشان دهد و بایان منطقی، روابط و همبستگی مشاهده شده بین آن‌ها را تفسیر کند (Johnson & Wichern, 1992). اولین قدم در انجام روش تحلیل مسیر، ایجاد نمودار مسیر نظری می‌باشد به این معنا که محقق می‌بایست برای فرایند اجرایی تحلیل مسیر یک نمودار نظری بر مبنای تأثیر و تأثرات احتمالی متغیرها نسبت به

همدیگر به‌عنوان فرض اولیه ایجاد کند و سپس بعد از تحلیل مسیر، متغیرهای خنثی را حذف و متغیرهای تأثیرگذار را در نمودار نهایی مسیر بررسی کند (Fayyaz, 2006).

اصول کار در تحلیل مسیر بر یک نمودار نظری مسیر متکی است که در آن پیوندهای علی احتمالی بین متغیرها از طریق رسم پیکان‌های جهت‌دار از سوی متغیرهای علت به سوی متغیرهای معلول آشکار می‌شود (شکل ۳). در این نمودار می‌توان همبستگی بین متغیرها و رابطه بین متغیرهای علت با معلول را با استفاده از معادلات مدل رگرسیونی با ضرایب مسیر و مقدار خطای مشخص نشان داد. با توجه به شکل ۱ در یک نمودار مسیر، متغیر درونی  $Y(XA)$ ،  $X$  متغیر علت دارد، یعنی از  $X$  متغیر موجود در مدل به سوی  $Y$  پیکان‌هایی رسم می‌شود. رابطه رگرسیون چندگانه عبارت‌اند از:



$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_r x_r + e \quad \text{رابطه (۱)}$$

### شکل ۳- نمونه نمودار مسیر با ۴ متغیر

که  $Y$  متغیر معلول،  $b_i$  ها ضرایب رگرسیونی متغیرهای  $X$  و  $b$  ضریب ثابت می‌باشند و  $e$  نیز مقدار خطا می‌باشد. ضرایب رگرسیونی استاندارد شده در تحلیل مسیر برای مقادیر استاندارد شده متغیرهای  $X$  و  $Y$  نیز از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$Pxy_i = b_i \frac{S_{xi}}{S_y} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در این رابطه  $S_{xi}$  انحراف استاندارد متغیر  $X_i$  و  $S_y$  انحراف معیار استاندارد متغیر  $Y$  است. بنابراین معادله رگرسیونی بر اساس ضرایب مسیر عبارتند از:

$$Z = Pxy_1 Z_1 + Pxy_2 Z_2 + \dots + Pxy_i Z_x + e_i \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در اینجا  $Z$  یک متغیر بیرونی،  $Z_1$ ،  $Z_2$  و  $Z_x$  متغیرهای درونی و  $e_i$  مقدار خطای علل بیرونی مدل می‌باشد. برای محاسبه ضرایب مسیر از همبستگی‌های مشاهده شده استفاده می‌شود. میزان ارتباط و همبستگی بین متغیرها نیز با استفاده از ضرایب همبستگی برآورد و از رابطه زیر به دست می‌آید: این ارتباط بین  $-1 < r < 1$  بوده و هرچه که این همبستگی به قدر مطلق ۱ نزدیک‌تر باشد میزان همبستگی قوی‌تر می‌باشد (Fayyaz, 2006).

$$r_{zz} = \frac{1}{N} \sum Z_x \quad \text{رابطه (۴)}$$

مجموع اثرات مستقیم و غیرمستقیم را اثر کل می‌نامند. در پژوهش‌ها نیز معمولاً به تفسیر اثرات مستقیم و غیرمستقیم و اثر کل توجه می‌شود. در تحلیل مسیر در خصوص آزمون مفروضات مدل، از سطح معنی‌داری، ضریب کنترل یا آماره  $R^2$  و کمیت خطا  $e$  استفاده می‌شود. متغیرهایی را که مقدار بتای آن‌ها در سطح خطای کوچک‌تر از ۰/۰۵ معنی‌دار نشود نیز از مدل حذف می‌شوند.

در این مقاله به‌منظور بررسی اثرات متغیرهای آب‌وهوایی منتخب و پارامترهای آلودگی هوا در میزان کیفیت هوا، بعد از ترسیم نمودار نظری تحلیل مسیر که اصل اولیه در استفاده از روش تحلیل مسیر می‌باشد، به آماده‌سازی داده‌ها جهت

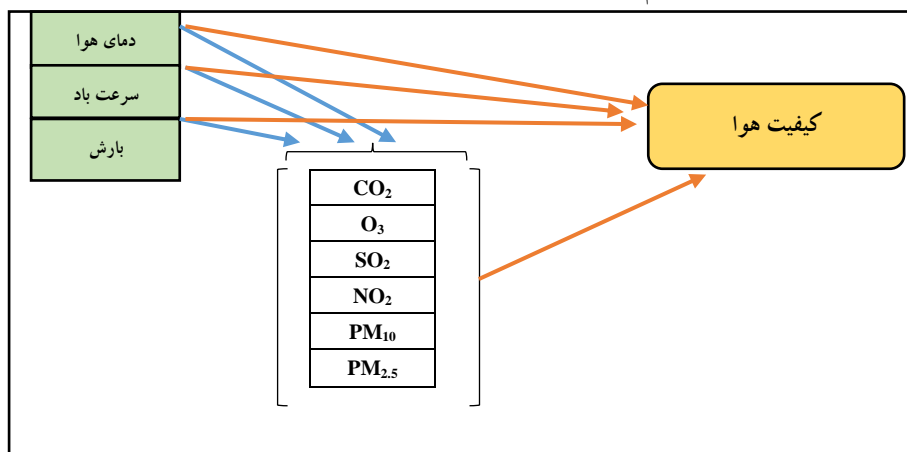
استفاده از روش تحلیل مسیر پرداخته می‌شود؛ سپس با توجه به میزان همبستگی داده‌ها، ضرایب کنترل، سطح معنی‌داری و بررسی سطح روابط داده‌ها، ابتدا ضرایب رگرسیون تأثیرات مستقیم متغیرهای مستقل ( داده‌های منتخب هواشناسی و شاخص‌های آلودگی هوا) نسبت به متغیر وابسته یعنی شاخص کیفیت هوا استخراج و تحلیل می‌شود. در گام بعد، متغیرهای آلودگی هوا به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته می‌شود تا تأثیرات غیرمستقیم داده‌های هواشناسی در کیفیت هوا محاسبه و تحلیل شود. سپس با توجه به ارزیابی و آزمون مفروضات و میزان تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم به برآورد اثر کل همه متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته پرداخته و جدول اثرات کل تشکیل می‌گردد. درنهایت با توجه به جدول اثرات کل به ترسیم مدل تحلیل مسیر متغیرها بر مبنای نمودار نظری مدل پرداخته و نتایج مورد تحلیل و تفسیر قرار می‌گیرد. روش کار در بررسی روابط عناصر آب‌وهوایی و آلودگی هوا در کلان‌شهر تهران به شرح زیر توضیح داده شده است.



شکل ۴- روش کار در بررسی روابط تغییر آب‌وهوایی و آلودگی هوا

### شرح و تفسیر نتایج

بر مبنای روش کار مطرح‌شده، برای انجام تحلیل مسیر و بررسی روابط علی متغیرهای تأثیرگذار در کیفیت هوای تهران به طراحی مدل مفهومی و فرایند نظری تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم متغیرهای مستقل بر کیفیت هوای تهران پرداخته شد (شکل ۵). بر اساس این مدل مفهومی با انجام مرحله‌ای رگرسیون خطی به تحلیل مسیر و روابط علی بین متغیرها پرداخته شد. در انجام مراحل تحلیل مسیر و برای ردیابی تغییرات غیرمستقیم متغیرها در متغیر وابسته اصلی (متغیر کیفیت هوا)، متغیرهای مستقل به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شدند؛ مثلاً متغیر دی‌اکسید کربن که متغیر مستقل مؤثر بر کیفیت هوای تهران بوده در ارزیابی تأثیر غیرمستقیم این عامل به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد.

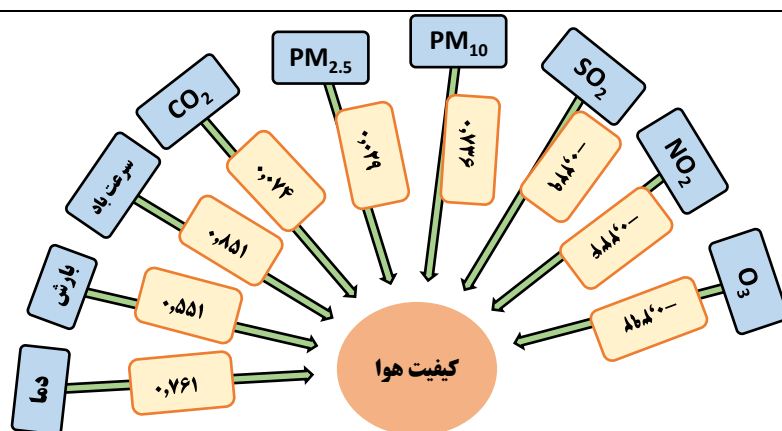


شکل ۵ - مدل مفهومی تحلیل مسیر اثرات پارامترهای هواشناسی و آلودگی هوا بر کیفیت هوا

با توجه به مدل مفهومی طرح شده (شکل ۵)، در گام نخست، متغیر کیفیت هوا به‌عنوان متغیر وابسته نهایی و متغیرهای میانگین دما، میانگین مجموع بارش، سرعت باد، دی‌اکسید کربن، ازن، دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد، ذرات معلق ۱۰ میکرون و ذرات معلق ۲/۵ میکرون به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. همان‌طور که در جدول ۱ و شکل ۶ مشاهده می‌شود، متغیرهای مستقل روابط و همبستگی بالا و مناسب با متغیر وابسته (شاخص کیفیت هوا) داشته و همه متغیرها در کیفیت هوا تأثیر مستقیم داشتند. در بین این متغیرهای مؤثر نیز پارامترهای میانگین سرعت باد با بتای (۰/۸۵۱)، میانگین دما با بتای (۰/۷۶۱) و میانگین مجموع بارش با بتای (۰/۵۵۱) بیشترین اثر مثبت را داشته است. در بین متغیرهای آلاینده، دی‌اکسید کربن با ضریب بتای ۰/۳۹۱- بالاترین ارتباط را با کیفیت هوای تهران دارد. در بین متغیرهای مستقل نیز بررسی نتایج بتای همه متغیرهای این جدول نشان می‌دهد که تقریباً همه متغیرها در کیفیت هوای تهران تأثیر داشته و این اثر در ارتباط با شرایط آب‌وهوای مثبت و در ارتباط با عوامل آلاینده هوای تهران نسبت عکس داشته است. بررسی ضریب کنترل متغیرها نیز نشان می‌دهد پارامترهای دما و باد با ضرایب کنترل (۷۲/۴ و ۶۹/۷ درصد) بیشترین واریانس تغییرات شاخص کیفیت هوا را کنترل می‌کنند.

جدول ۱ - نتایج حاصل از تحلیل مسیر عوامل اثرگذار بر روی کیفیت هوای تهران

متغیرهای مستقل	ضریب همبستگی	ضرایب رگرسیونی		ضریب	ضریب	سطح معنی‌داری
		استاندارد شده	استاندارد نشده			
		Beta	Std. Error	B	R <sup>2</sup> کنترل	
میانگین دما	۰/۸۵۱	۰/۷۶۱	۰/۰۳۲	۰/۰۹۴	۷۲/۴	۰/۰۴
میانگین مجموع بارش	۰/۷۸۹	۰/۵۵۱	۰/۰۴۷	-۰/۰۰۶	۶۲/۳	۰/۰۳۸
میانگین سرعت باد	۰/۸۳۵	۰/۸۵۱	۰/۰۲۷	-۰/۰۳۵	۶۹/۷	۰/۰۰۵
دی‌اکسید کربن	-۰/۷۶۱	-۰/۳۹۱	۰/۰۸۱	۰/۱۳۳	۵۷/۹	۰/۰۰۵
ازن	-۰/۸۱۵	-۰/۱۸۶	۰/۰۱۲	-۰/۴۰۵	۶۶/۴	۰
دی‌اکسید نیتروژن	-۰/۷۰۳	-۰/۲۳۴	۰/۰۸۹	۰/۲۲۱	۴۹/۴	۰/۰۱۴
دی‌اکسید گوگرد	-۰/۶۸۸	-۰/۲۲۹	۰/۱۲۵	-۰/۳۶۱	۴۷/۳	۰/۰۰۵
ذرات معلق ۱۰ میکرون	-۰/۷۴۱	-۰/۰۳۶	۰/۱۱۲	۰/۱۱۶	۵۴/۹	۰
ذرات معلق ۲/۵ میکرون	-۰/۶۵۵	-۰/۱۴۳	۰/۰۷۹	۰/۰۶۷	۴۲/۹	۰/۰۳۸
متغیر وابسته	کیفیت هوا					



شکل ۶- ضرایب بتای تحلیل مسیر عوامل اثرگذار بر روی شاخص‌های آلودگی هوای تهران

در تحلیل مسیر غیرمستقیم اثرات متغیرها بر کیفیت هوا نیز متغیرهای آلودگی هوا که در مرحله قبلی به‌عنوان عامل مستقل در میزان کیفیت هوای تهران بودند، در این مرحله به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد و روابط مستقیم داده‌های هواشناسی با آن‌ها یا اثرات غیرمستقیم این داده‌ها در کیفیت هوای تهران مورد بررسی قرار گرفت.

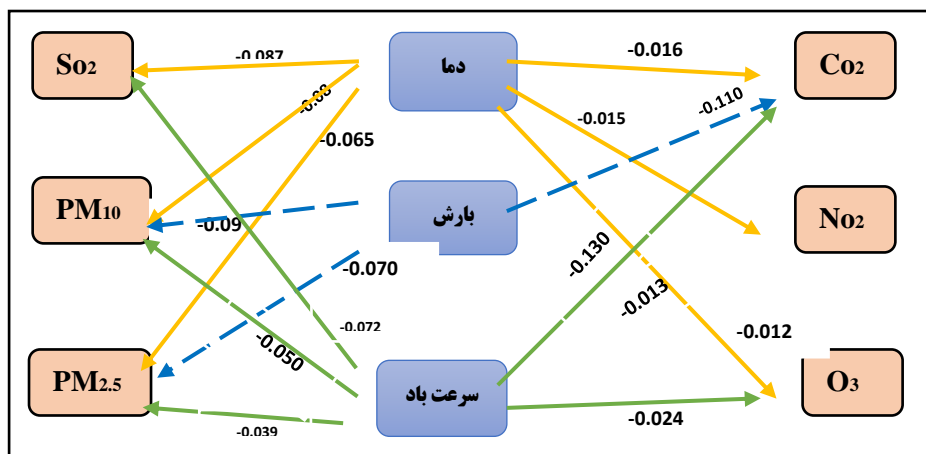
بررسی روابط متغیرهای مستقل هواشناسی و میزان دی‌اکسید که در جدول ۲ آمده است، نشان می‌دهد که پارامترهای منتخب هواشناسی دارای همبستگی مناسب و معکوس و ارتباط معنی‌دار و تأثیرگذار با میزان دی‌اکسید کربن داشته که روابط متغیرهای دما با ضریب بتای (۰/۰۱۶-)، بارش با ضریب بتای (۰/۱۱-) و سرعت باد با ضریب بتا (۰/۱۳-) با این شاخص آلودگی هوا رابطه معکوس داشته است. به این معنا که با افزایش دما، سرعت باد و مقدار بارش از میزان غلظت دی‌اکسید کربن کاسته شده است. ضرایب  $R^2$  متغیرها نیز نشان می‌دهد که پارامترهای هواشناسی در تغییرات و واریانس متغیر دی‌اکسید کربن نقش مؤثری داشته است.

با توجه به مدل مفهومی و جدول ۲، متغیر دی‌اکسید گوگرد به‌عنوان متغیر وابسته و متغیرهای منتخب هواشناسی به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. با توجه به میزان همبستگی پارامترها و تحلیل روابط بین این داده‌ها نشان داد که در میزان دی‌اکسید گوگرد، متغیرهای هواشناسی دما با ضریب بتا (۰/۰۸۷-) و سرعت باد با ضریب بتای (۰/۰۷۲-) ارتباط معنی‌دار و منفی با مقدار سولفات سدیم هوا داشته است و متغیر بارش نیز همبستگی مناسب و ارتباط معنی‌داری با این شاخص نداشته است.

در بررسی عوامل تأثیرگذار در متغیر دی‌اکسید نیتروژن مشاهده شد که متغیرهای مستقل دما و سرعت باد با ضرایب بتای (۰/۰۱۵- و ۰/۰۱۳-) ضمن داشتن همبستگی و ضریب کنترل مناسب، دارای ارتباط معنی‌دار و معکوس با متغیر اکسید نیتروژن بودند و متغیر بارش نیز ارتباط معنی‌داری با این شاخص نداشته است. تحلیل میزان همبستگی متغیرهای مستقل هواشناسی و روابط بین این پارامترها و سطح معنی‌داری آن‌ها با متغیر وابسته (ازن) نیز نشان داد که در میزان این متغیر، پارامترهای دما (با ضریب بتا ۰/۰۱۲-)، سرعت باد (با ضریب بتا ۰/۰۲۴-) ارتباط معنی‌دار و مثبتی با مقدار آلاینده ازن داشته ولی متغیر بارش با این آلاینده ارتباط قابل‌تأملی نداشته است. ضرایب کنترل پارامترهای هواشناسی نسبت به متغیر ازن نیز نشان داده است به‌غیر از داده‌های بارش، داده‌های دما و سرعت باد با ضریب  $R^2$  (۴۵/۸ و ۵۰/۶ درصد) تغییرات مهمی‌ای متغیر وابسته را تعیین کردند.

جدول ۲ - نتایج حاصل از تحلیل مسیر عوامل اثرگذار بر روی شاخص‌های آلودگی هوای تهران

متغیر مستقل	متغیر وابسته	ضریب همبستگی	ضرایب رگرسیونی استاندارد نشده		ضرایب رگرسیونی استاندارد شده		ضریب کنترل R <sup>2</sup>	سطح معنی‌داری
			B	Std. Error	Beta			
میانگین دما	دی‌اکسید کربن	-۰/۶۷۵	۰/۴۵	۰/۰۳۳	-۰/۱۶	۴۵/۶	۰/۰۴۷	
میانگین سرعت باد	دی‌اکسید کربن	-۰/۶۲۷	-۰/۴۷	۰/۰۶۶	-۰/۱۳	۳۹/۳	۰/۰۳۹	
مجموع بارش	دی‌اکسید کربن	-۰/۵۸۱	-۰/۱۵۴	۰/۰۶۶	-۰/۱۱	۳۳/۸	۰/۰۲۲	
میانگین دما	دی‌اکسید گوگرد	-۰/۶۴۱	-۰/۱۹۹	۰/۰۷۷	-۰/۰۸۷	۴۱/۱	۰/۰۴۱	
میانگین سرعت باد	دی‌اکسید گوگرد	-۰/۵۶۸	-۰/۳۱۱	۰/۰۸۱	-۰/۰۷۲	۳۲/۳	۰/۰۲۷	
مجموع بارش	دی‌اکسید گوگرد	-۰/۲۰۳	-۰/۰۵۹	۰/۲۴۲	-۰/۱۴۷	۴/۱	۰/۱۶۸	
میانگین دما	دی‌اکسید نیتروژن	-۰/۶۸	-۱/۶۷۴	۰/۰۳۱	-۰/۰۱۵	۴۶/۲	۰/۰۰۲	
میانگین سرعت باد	دی‌اکسید نیتروژن	-۰/۶۰۹	-۰/۰۵۷	۰/۰۸۸	-۰/۰۱۳	۳۷/۱	۰/۰۴۴	
مجموع بارش	دی‌اکسید نیتروژن	-۰/۱۹۹	۰/۰۵۱	۰/۰۸۱	۰/۰۷۶	۴	۰/۵۳۵	
میانگین دما	ازن	-۰/۶۷۷	۱/۲۷۵	۰/۰۴۵	-۰/۰۱۲	۴۵/۸	۰/۰۰۲	
میانگین سرعت باد	ازن	-۰/۷۱۱	۰/۰۸۴	۰/۰۵۲	-۰/۰۲۴	۵۰/۶	۰/۰۲۷	
مجموع بارش	ازن	-۰/۱۲۱	-۰/۰۰۲	۰/۳۵۳	-۰/۰۰۳	۱/۵	۰/۹۷۴	
میانگین دما	ذرات معلق ۱۰ میکرون	-۰/۷۰۴	-۰/۰۹۵	۰/۰۴۲	-۰/۰۰۸	۴۹/۶	۰/۰۴۶	
میانگین سرعت باد	ذرات معلق ۱۰ میکرون	-۰/۷۷۷	-۰/۱۳۵	۰/۰۵	-۰/۰۰۵	۶۰/۴	۰/۰۲۶	
مجموع بارش	ذرات معلق ۱۰ میکرون	-۰/۵۹۹	-۰/۱۰۴	۰/۰۵۲	-۰/۰۰۹	۳۵/۹	۰/۰۴۹	
میانگین دما	ذرات معلق ۲/۵ میکرون	۰/۶۸۸	۰/۸۹۹	۰/۰۴۳	-۰/۰۶۵	۴۷/۳	۰/۰۱	
میانگین سرعت باد	ذرات معلق ۲/۵ میکرون	-۰/۶۳۸	۰/۱۰۱	۰/۰۵	-۰/۰۳۹	۴۰/۷	۰/۰۳۸	
مجموع بارش	ذرات معلق ۲/۵ میکرون	-۰/۵۴۴	-۰/۰۲۴	۰/۰۵۲	-۰/۰۰۷	۲۹/۶	۰/۰۴۹	



شکل ۷ - ضرایب بتای حاصل از تحلیل مسیر عوامل هواشناسی منتخب بر روی شاخص‌های آلودگی هوای تهران

بررسی روابط متغیرهای مستقل در میزان ذرات معلق ۱۰ میکرون در جدول و شکل فوق آمده است. با توجه به ضرایب کنترل متغیرهای مستقل که بیانگر تبیین مناسب واریانس متغیر وابسته میانی (ذرات معلق ۱۰ میکرون) توسط متغیرهای هواشناسی می‌باشد، ضرایب همبستگی داده‌ها نشان داده است که همه متغیرهای منتخب هواشناسی در میزان این آلاینده در

شهر تهران ارتباط معنی دار و معکوس داشته است که ضرایب بتای آن نیز به ترتیب برای متغیر دما (۰/۰۸-)، سرعت باد (۰/۰۵-)، و بارش (۰/۰۹-) بوده است. بررسی عوامل تأثیرگذار در متغیر ذرات معلق ۲/۵ میکرون هم بیان می کند که همه متغیرهای مستقل (پارامترهای دما، سرعت باد، و بارش) ارتباط معنی داری با متغیر ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون داشتند. ضرایب همبستگی و میزان نیز تأییدکننده این موضوع می باشند. بررسی کلی عملکرد متغیرها در کیفیت هوای کلان شهر تهران نشان از روابط مستقیم و درونی همه متغیرها با متغیر وابسته یعنی شاخص کیفیت هوا داشته و هر کدام از این پارامترها با شدت و ضعف مختلف در میزان این شاخص تأثیرگذار بودند. با توجه به جدول ارزیابی تأثیرات کل متغیرها، نمودار تحلیل مسیر بر مبنای مدل مفهومی اولیه آن ترسیم شده که نگاه روشن تری از تأثیر و تأثرات متغیرها در کیفیت هوای تهران به نمایش می گذارد. در جدول ۳ و شکل ۷ تحلیل مسیر اثرات مستقیم و غیرمستقیم داده های مؤثر و معنادار هواشناسی و آلاینده ها در کیفیت هوای تهران نمایش داده شد که نتایج تحلیل مسیر این متغیرها نشان می دهد هر چند شاخص کیفیت هوا بر آیندی از متغیرهای آلودگی هوا می باشد ولی در بین پارامترهای مختلف تأثیرگذار در کیفیت هوا، متغیرهای آلودگی هوا تنها تأثیر مستقیم در کیفیت هوا داشته ولی پارامترهای هواشناسی به ویژه متغیرهای دما و سرعت باد علاوه بر تأثیر مستقیم بر کیفیت هوای تهران با تأثیرگذاری غیرمستقیم بر همه پارامترهای آلودگی هوا، نقش گسترده و پررنگی بر کیفیت هوای کلان شهر تهران داشته اند.

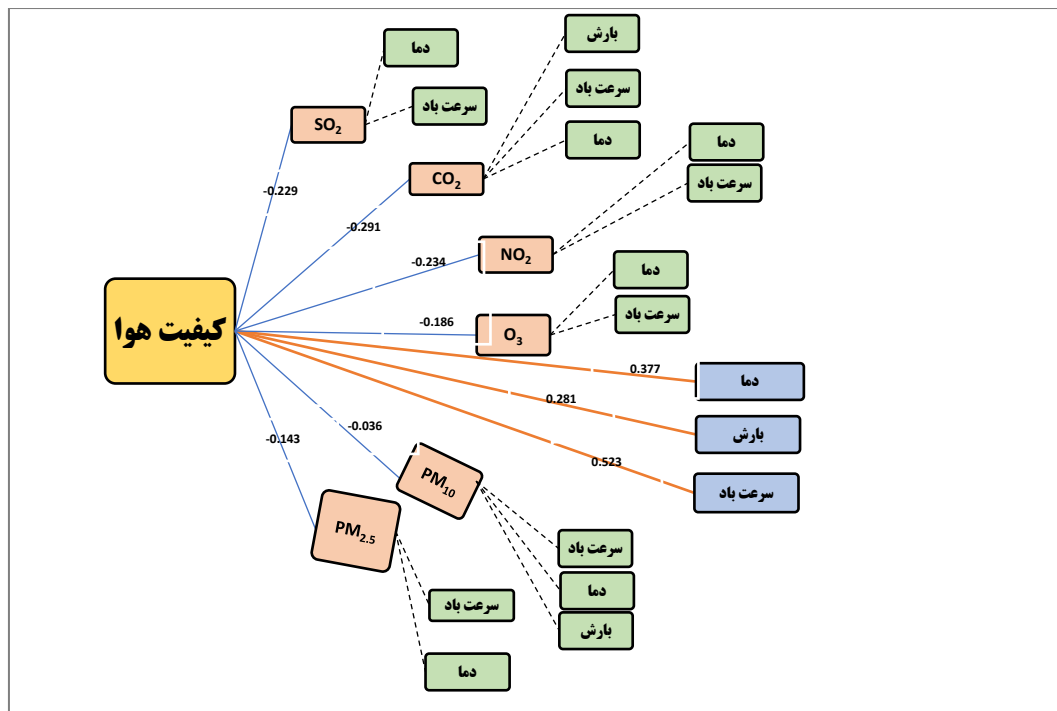
ارزیابی ضرایب همبستگی و میزان  $R^2$  متغیرهای مختلف هواشناسی و آلاینده ها نیز نشان داده است که همه پارامترها هر کدام ارتباط قابل قبولی را در متغیر وابسته داشتند و بررسی این ضرایب در تأثیرات غیرمستقیم داده های هواشناسی منتخب در متغیرهای آلودگی نیز بیانگر روابط منطقی و درعین حال منفی با همه آلاینده به عنوان متغیرهای وابسته میانی بوده است. با توجه به میزان همبستگی و ضرایب بتای پارامترهای آلاینده هوا، این متغیرها تنها به طور مستقیم و با سطح معنی داری قوی بر کیفیت هوای کلان شهر تهران تأثیر داشته اند که این تأثیر از نوع رابطه معکوس بوده است که نشان دهنده عملکرد الیکنگی متغیرهای آلودگی و کیفیت هوای تهران می باشد.

جدول ۳ - مجموع تأثیرات مستقیم، غیرمستقیم و اثرات کل متغیرها بر کیفیت هوای تهران

تأثیر کل	اثرات غیرمستقیم						اثرات مستقیم	متغیر مستقل	R <sup>2</sup>
	ذرات معلق ۲,۵ میکرون	ذرات معلق ۱۰ میکرون	ازن	دی اکسید نیتروژن	دی اکسید گوگرد	دی اکسید کربن			
۰,۳۷۷	-۰,۰۶۵	-۰,۰۸	۰,۱۲۱	-۰,۰۱۵	-۰,۰۸۷	-۰,۰۱۶	۰,۷۶۱	میانگین دما	۱
۰,۲۸۱	-۰,۰۷	-۰,۰۹	...	...	...	-۰,۱۱	۰,۵۵۱	مجموع بارش	۲
۰,۵۲۳	-۰,۰۳۹	-۰,۰۵	۰,۰۲۴	-۰,۰۱۳	-۰,۰۷۲	-۰,۱۳	۰,۸۵۱	میانگین سرعت باد	۳
۰,۳۹۱	...	...	...	...	...	...	-۰,۳۹۱	دی اکسید کربن	۴
۰,۱۸۶	...	...	...	...	...	...	-۰,۱۸۶	ازن	۵
۰,۲۳۴	...	...	...	...	...	...	-۰,۲۳۴	دی اکسید نیتروژن	۶

۰,۲۲۹	...	...	...	...	...	...	...	...	دی‌اکسید گوگرد	۷
-	...	...	...	...	...	...	...	...		
۰,۰۳۶	...	...	...	...	...	...	...	...	ذرات معلق ۱۰ میکرون	۸
-	...	...	...	...	...	...	...	...		
۰,۱۴۳	...	...	...	...	...	...	...	...	ذرات معلق ۲,۵ میکرون	۹
-	...	...	...	...	...	...	...	...		

مدل آماری نهایی حاصل از تحلیل مسیر پارامترهای مؤثر در کیفیت هوای تهران که بر مبنای مدل مفهومی تحلیل مسیر تحقیق بوده را می‌توان در نمودار تحلیل مسیر (شکل ۸) بیان نمود. با توجه به هدف این پژوهش در خصوص کیفیت تأثیرگذاری متغیرهای منتخب جوی بر کیفیت هوا، همان‌طور که در این مدل ملاحظه می‌شود پارامترهای هواشناسی با تأثیر مستقیم و متغیرهای آلودگی هوای تهران پس از تأثیرپذیری اولیه از عناصر آب‌وهواشناسی در کیفیت هوای تهران تأثیر گذاشته و در مدل نهایی تحلیل مسیر قرار می‌گیرند.



شکل ۸- مدل تحلیل مسیر تأثیرات متغیرها در کیفیت هوای تهران

### نتیجه‌گیری

تحلیل مسیر اثرات مستقیم و غیرمستقیم متغیرهای مستقل با متغیر وابسته یعنی کیفیت هوای تهران (اثرات کل متغیرها) نشان از تأثیر همه متغیرها با شدت و ضعف مختلف در کیفیت هوای تهران داشته که نقش بارز عناصر آب‌وهوایی در کیفیت هوای تهران را باید در کانون توجه قرارداد، زیرا در بین همه پارامترها، متغیرهای باد و دما با اثرات قوی‌تر در قیاس به سایر پارامترها خودنمایی کرده‌اند. تأثیرات غیرمستقیم داده‌های هواشناسی بر پارامترهای آلاینده هوا بیان از رابطه

معکوس این متغیرها با متغیرهای هواشناسی به ویژه دما و سرعت باد می‌کند به طوری که عملکرد ضعیف عناصر آب و هوایی سبب افزایش میزان آلاینده‌ها و کاهش کیفیت هوای تهران می‌شود.

باید گفت هرچند عوامل بسیار مختلف و متنوع هواشناسی، انسان‌ساخت، توپوگرافی، منابع طبیعی در میزان کیفیت هوای یک منطقه تأثیرگذار هستند ولی نتایج بررسی و تحلیل روابط متغیرهای منتخب این روش در میزان کیفیت هوای کلان‌شهر تهران نشان می‌دهد، هر یک از پارامترهای مستقل هواشناسی و آلودگی هوا، با شدت و ضعف مختلف سهمی در میزان شاخص کیفیت هوای تهران داشته و با تأثیر و تأثرات مختلف در میزان این شاخص مهم عملکرد مشخصی دارند. در این بین با توجه به عملکرد وسیع و مهم داده‌های هواشناسی در این مقوله باید عامل هواشناسی را به عنوان پارامتر تعیین‌کننده و اساسی که قدرت کنترل زیادی بر بسیاری از شاخص‌های دیگر مؤثر در میزان کیفیت هوا تهران دارد، دانست؛ زیرا هم در ارتباط مستقیم و هم در اثرات غیرمستقیم بر کیفیت هوای تهران نقش پررنگ و بارزی ایفا کرده است. با توجه به این که به کارگیری روش تحلیل مسیر در مطالعات آب و هواشناسی سابقه‌ای نداشته و این نوع روش بیشتر به صورت مدل‌های آماری در حوزه‌های اجتماعی و برنامه‌ریزی به کار رفته شده و مورد تحلیل قرار می‌گرفت، لذا پیدا کردن داده‌های مناسب برای این روش و اجرای آن در حوزه مطالعات اقلیمی و شناساندن آن به محققان این حوزه دارای محدودیت‌هایی بوده است. اگرچه روش به کار گرفته در مطالعات دیگر اقلیمی قابل تعمیم است، پیشنهاد می‌شود با مطالعه روش‌های آماری در حوزه‌ها و رشته‌های مختلف و تطبیق آن در موضوعات مطالعاتی آب و هواشناسی می‌توان روش‌های جدید در تحقیقات اقلیمی را مورد استفاده قرار داد.

**پی‌نوشت:** این مقاله مستخرج از رساله دکترای تخصصی با عنوان اثرات تغییر آب و هوا در آلودگی هوای کلان‌شهر تهران می‌باشد که در دانشگاه آزاد اسلامی - واحد علوم تحقیقات به راهنمایی دکتر بهلول علیجانی و دکتر رضا برنا در سال ۱۳۹۷-۱۳۹۶ انجام شده است.

**سهم نویسندگان:** نبی‌الله رضوانی (نویسنده اول)، بهلول علیجانی (نویسنده دوم و مسئول)، پژوهشگر کمکی (۴۰٪)؛ پژوهشگر اصلی، نگارنده بحث (۴۵٪)؛ رضا برنا (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۱۵٪).

## منابع و مآخذ

- Abbasi Jebli, M. (2011). *Investigating the air pollution process in isfahan city and its correlation with climate factors*. (Master's Thesis), Faculty of Agriculture and Natural Resources, Isfahan University of Technology. (Persian)
- Abbasi, M., Sari Saraf, B., & Moghani Bileh Savar, V. (2013). *Climatic factors of winter season affected by air pollutants in Tabriz city*. Paper presented at the National Conference on Engineering and Agricultural Management, Environment and Sustainable Natural Resources, Hegmataneh Environmental Assessment Center, Hamedan. (Persian)
- Abedini, A. (1999). *The effect of sustainability on the concentration of air pollution in the city of tehran towns*. (Master's Degree), Tarbiat Modares University. (Persian)
- Akbari, E., Fakheri, M., Pourgholamhassan, E., & Akbari, Z. (2015). Monthly zonation of air pollution and its relationship with climatic factors case study: Mashhad. *Natural Environment, Natural Resources*, 68(4), 533 – 547. [DOI:10.22059/JNE.2015.56927]. (Persian)
- Bidokhti, A., & Sharaeipour, Z. (2010). Meteorological conditions of acute air pollution episodes for Tehran. *Journal of Environmental Studies*, 35(52), 1-14. (Persian)
- Croxford, B., Penn, A., & Hillier, B. (1996). Spatial distribution of urban pollution: civilizing urban traffic. *Science of The Total Environment*, 189-190, 3-9. [DOI:10.1016/0048-9697(96)05184-4]
- Doherty, R., Wild, O., Shindell, D., Zeng, G., MacKenzie, I., Collins, W., . . . Schultz, M. (2013). Impacts of climate change on surface ozone and intercontinental ozone pollution: A multi-model study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(9), 3744-3763. [DOI:10.1002/jgrd.50266]

- Entezari, A. (2003). *Statistical and synoptic study of tehran air pollution*. (PhD thesis), Tarbiat Moalem University of Tehran. (Persian)
- Fayyaz, M. (2006). Track analysis, student statistics. *Neda*, 4(2), 35-43. (Persian)
- Fenger, J. (1999). Urban air quality. *Atmospheric Environment*, 33(29), 4877-4900. [DOI:10.1016/S1352-2310(99)00290-3]
- Frank, L. D., Stone, B., & Bachman, W. (2000). Linking land use with household vehicle emissions in the central puget sound: methodological framework and findings. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 5(3), 173-196. [DOI:10.1016/S1361-9209(99)00032-2]
- Isa Lo, A. A., Shahmoradi, B., Bahrami, S., & Sadat Aghamiri, M. (2011). *Spatialulnerability and air pollution crisis in metropolis*. Paper presented at the Third National Conference on Urban Development, Islamic Azad University of Sanandaj, Sanandaj. (Persian)
- Jacob, D. J., & Winner, D. A. (2009). Effect of climate change on air quality. *Atmospheric Environment*, 43(1), 51-63. [DOI:10.1016/j.atmosenv.2008.09.051]
- Javan Bakhat Amiri, S., & Khatami, S. H. (2012). Investigating the relationship between air quality index and meteorological parameters in tehran with regression analysis. *Journal of Human and Environment*, 10(1), 15-28. (Persian)
- Javid, M. (2012). *Spatial distribution and seasonal changes of air pollutants meeting at selected meteorological stations in Tehran*. (Master's Thesis), Tarbiat Modares University, Tehran. (Persian)
- Johnson, R. A., & Wichern, D. W. (1992). *Applied multivariate mtatistical analysis* (Fifth ed.). USA, New Jersey: Prentice-Hall.
- Mahoori, R. (2012). *Path analysis training in SPSS*. Isfahan: Isfahan University. (Persian)
- Mohammadi, H., & Robati, M. (2009). The role of climatic parameters in the distribution of air pollution in the special economic zone of Mahshahr petrochemicals. *Geography Magazine*, 3(8-9), 99-121. (Persian)
- Naghavi, M. (2013). *Synoptic analysis of climatic elements affecting air pollution in Tehran*. (Master's Thesis), Islamic Azad University. Central Tehran Branch. (Persian)
- Park, D. H., Han, K. B., & Kang, I. J. (2012). *The visualization by analyzing the aelationship between the air pollutants and climatic factors using GIS*. Paper presented at the International Conference on Disaster Management, Kumamoto, Japan.
- Peel, J. L., Haeuber, R., Garcia, V., Russel, A. G., & Neas, L. (2013). Impact of nitrogen and climate change interactions on ambient air pollution and human health. *Biogeochemistry*, 114(1-3), 121-134. [DOI:10.1007/s10533-012-9782-4]
- Ren, W., Tian, H., Chen, G., Liu, M., Zhang, C., Chappelka, A. H., & Pan, S. (2007). Influence of ozone pollution and climate variability on net primary productivity and carbon storage in China's grassland ecosystems from 1961 to 2000. *Environmental Pollution*, 149(3), 327-335. [DOI:10.1016/j.envpol.2007.05.029]
- Roshan, G., Khosh Akhlagh, F., Negahbani, S., & Mirkentoli, J. (2009). The effect of air pollution on climatic oscillations of tehran city. *Environmental Sciences Journal*, 7(1), 173-192. (Persian)
- Safavi, S. Y., & Alijani, B. (2006). Geographical factors investigating Tehran's air pollution. *Geographical Researches Quarterly Journal*, 38(58), 99-112. (Persian)
- Saligheh, M., & Kakhki Mahneh, H. (2015). Investigating the relationship between climate elements and air pollution fluctuations, case: Mashhad city. *Geography and Environmental Hazards*, 14(4), 77-94. [DOI:10.22067/geo.v4i2.31769]. (Persian)
- Schaub, M., & Paoletti, E. (2007). Introductory remarks to the special issue – XXII IUFRO World Congress, 2005 Brisbane – Air pollution and climate change: A global overview of the effects on forest vegetation. *Environmental Pollution*, 147(3), 429. [DOI:10.1016/j.envpol.2006.08.040]
- Schweitzer, L., & Zhou, J. (2010). Neighborhood air quality, respiratory health, and vulnerable populations in compact and sprawled regions. *Journal of the American Planning Association*, 76(3), 363-371. [DOI:10.1080/01944363.2010.486623]
- Taghavi, H. (2011). *Time and spatial distribution of air pollution indexes in Mashhad city and its effective factors*. (Master's Thesis), Ferdowsi University of Mashhad. (Persian)
- Taheri, A., & Hosseini, V. (2017). *Pending particles, resources, measurements and outcomes, technical report of tehran municipal air quality control* (QP96 / 06/01, U / 01). Retrieved from <http://air.tehran.ir/portals/0/ReportFiles/AirPollution/51.pdf>
- Vaseghi, E., & Zibaei, M. (2008). Prediction of air pollution in Shiraz. *Journal of Environmental Studies*, 34(47), 65-72. (Persian)
- Zebardast, E., & Riazi, H. (2015). Indicators of the human environment and its effects on air pollution, case study: The perimeter of four stations of air quality measurement in Tehran city. *Fine Arts-Architecture and Urban Development*, 20(1), 55-66. (Persian)