

واکاوی ارتباط میان عناصر هواشناسی و آلاینده‌های جوی معیار در تبریز با استفاده از مدلسازی آماری

پریسا کهراری^۱، شهریار خالدی^{۱*}، قاسم کیخسروی^۱ و سید جلیل علوی^۲

^۱ گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۲ گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، مازندران، ایران

سابقه و هدف: افزایش پرشتاب جمعیت، رشد سریع شهرنشینی و صنعتی شدن در سال‌های اخیر که عموماً با افزایش تقاضا و مصرف انرژی و در نتیجه افزایش منابع انتشار آلاینده‌ها همراه بوده است، آلودگی هوا به عنوان یکی از بزرگ‌ترین بحران‌های حال حاضر جوامع شهری و به تبع آن خطرات زیست محیطی و بهداشتی مربوطه را از لحاظ زمانی و مکانی تشدید کرده است. از سوی دیگر، عناصر هواشناسی به طور مستقیم بر میزان آلاینده‌ها و همچنین مدت زمان حضور آنها در جو تأثیر می‌گذارد و پژوهش حاضر به منظور بررسی ارتباط متغیرهای هواشناسی و آلاینده‌های جوی معیار در شهر تبریز انجام گرفته است.

مواد و روش‌ها: مطالعه حاضر ضمن بررسی وضعیت عناصر هواشناسی (دما، بارش، سرعت باد، رطوبت نسبی، تابش، ساعات آفتابی و ابرناکی) و آلاینده‌های جوی معیار (کربن منوکسید (CO)، نیتروژن دی اکسید (NO₂)، گوگرد دی اکسید (SO₂)، ازن (O₃)، ذرات معلق با قطر کمتر از ۱۰ میکرون (PM₁₀) و ذرات معلق با قطر کمتر از ۲/۵ میکرون (PM_{2.5}) در شهر تبریز در بلند مدت (۲۰۲۱-۲۰۰۴)، به بررسی ارتباط بین آلاینده‌ها و متغیرهای هواشناسی در مقیاس‌های زمانی ماهانه و فصلی با استفاده از آزمون همبستگی پیرسون در سطح اطمینان ۹۵ درصد و تأثیر این عناصر بر غلظت آلاینده‌ها با استفاده از مدل رگرسیون خطی چند متغیره (MLR) و مدل جمعی تعمیم یافته (GAM) در نرم افزار آماری R 4.3.1 پرداخته است.

نتایج و بحث: بر اساس نتایج حاصل از تحلیل همبستگی پیرسون، آلاینده‌های NO₂، PM_{2.5} و SO₂ و همچنین آلاینده های PM₁₀ و PM_{2.5} همبستگی مثبت معنادار قابل توجهی را به صورت جفتی نشان داده‌اند بنابراین به نظر می‌رسد که این آلاینده‌ها دارای منابع انتشار مشابه هستند. همچنین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که غلظت آلاینده‌های معیار هوا در تبریز در طول کل دوره آماری در مقیاس‌های زمانی ماهانه و فصلی تحت تأثیر شرایط آب و هوایی قرار داشته و در مقیاس ماهانه، آلاینده‌های NO₂ و PM_{2.5} دارای بیشترین همبستگی منفی با پارامترهای دما، سرعت باد و ساعات آفتابی و بیشترین همبستگی مثبت با رطوبت نسبی، PM_{2.5} دارای بیشترین همبستگی مثبت با فشار هوا، CO و SO₂ دارای بیشترین همبستگی منفی با تابش، O₃ دارای همبستگی مثبت قوی با دما، سرعت باد و ساعات آفتابی و بیشترین همبستگی منفی با فشار، رطوبت نسبی و ابرناکی و آلاینده‌های NO₂ و

* Corresponding Author: Email Address. shahriar_khaledi6@yahoo.com

PM₁₀، دارای بیشترین همبستگی مثبت با ابرناکی هستند. نتایج حاصل از برازش MLR و GAM برای هریک از آلاینده‌های جوی معیار در شهر تبریز نیز حاکی از عملکرد بهتر GAM در تجزیه و تحلیل روابط موجود میان تمامی آلاینده‌های جوی جز NO₂ و مجموعه متغیرهای مستقل است.

نتیجه گیری: نتایج این پژوهش مبین آن است که میزان تأثیر عناصر جوی بر غلظت آلاینده‌های معیار مورد مطالعه در شهر تبریز بسته به نوع آلاینده و در زمان‌های مختلف متفاوت بوده و می‌توان اذعان کرد که تأثیر یک پارامتر هواشناسی خاص بر آلودگی هوا تغییر پذیر است. با این حال، به نظر می‌رسد که سرعت باد، تابش، دما و فشار هوا مهمترین عناصر هواشناسی مرتبط با غلظت آلاینده‌ها در شهر تبریز هستند. همچنین یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که GAM و MLR هر دو به خوبی می‌توانند تغییرپذیری متغیر پاسخ با استفاده از مجموعه متغیرهای پیشگو را تبیین و روابط خطی و غیرخطی میان آنها را توضیح دهند. با این حال، GAM با در نظر گرفتن رابطه غیرخطی میان غلظت آلاینده‌های جوی و عناصر هواشناسی در مقایسه با MLR، قادر به توجیه درصد بیشتری از تغییرات تمامی آلاینده‌های جوی معیار به جز آلاینده NO₂ است.

واژه‌های کلیدی: آلودگی هوا، تحلیل رگرسیون، تحلیل همبستگی، عناصر جوی، مدل‌های جمعی.

مقدمه

آلودگی هوا یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست محیطی قرن بیست و یکم به شمار می‌رود که به دنبال افزایش مصرف انواع سوخت‌های فسیلی و گسترش مراکز صنعتی در شهرهای بزرگ، سیستم آب و هوایی کره‌ی زمین را تحت تأثیر قرار داده است. بر اساس آخرین داده‌های سازمان بهداشت جهانی، سالانه ۷ میلیون نفر در سراسر جهان جان خود را بر اثر آلودگی هوا از دست می‌دهند (WHO, 2021). گزارش سازمان همکاری و توسعه اقتصادی نیز حاکی از آن است که اگر تا سال ۲۰۵۰ اقدامی صورت نگیرد، آلودگی هوا بزرگترین عامل زیست محیطی مرگ و میر رودرس در سراسر جهان خواهد بود (Kitamori *et al.*, 2012). در ایران نیز آلودگی هوا به عنوان یک معضل زیست محیطی مزمن شناخته می‌شود و همواره نام بسیاری از شهرهای ایران به دلیل انتشار آلاینده‌ها از وسایل نقلیه، پالایشگاه‌ها، نیروگاه‌ها و کارخانه‌ها، در فهرست آلوده‌ترین شهرهای جهان به چشم می‌خورد. علاوه بر سطح انتشار آلاینده‌ها، آلودگی هوا ارتباط تنگاتنگی با عوامل هواشناسی دارد. تأثیر عناصر آب و هوایی به عنوان عوامل کلیدی در تعیین کیفیت هوا و توزیع و پراکندگی آلاینده‌ها در بسیاری از مطالعات داخلی و خارجی تأیید شده است (Zhou and Liang, 2013; Jayamurugan *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2015; He *et al.*, 2016; Oji and Adamu, 2020; Mahanta *et al.*, 2021). با این حال، تأثیر شرایط هواشناسی بر انتشار آلاینده‌ها و کیفیت هوای شهری در مناطق و فصول مختلف، متفاوت است. به عنوان مثال،

غلظت آلاینده‌ها در شهر سیلسیا لهستان در ماه‌های سرد سال (دسامبر، ژانویه و فوریه) به حداکثر مقدار خود رسیده و سرعت باد و دمای هوا مهم‌ترین عوامل مرتبط با آلاینده‌ها هستند (Zyromski *et al.*, 2014). در شهر لینفن چین، آلاینده‌ها دارای همبستگی فصلی متفاوت با عناصر هواشناسی بر اساس دوره‌های گرم و سرد سال بوده بطوریکه همبستگی منفی بین بارش، دمای هوا و ابرناکی با اکثر عوامل آلودگی در دوره گرم سال و همبستگی مثبت بین دمای هوا، رطوبت نسبی و ابرناکی با بیشتر آلاینده‌ها در دوره سرد سال مشاهده می‌شود (Cui *et al.*, 2018). تحلیل ارتباط پارامترهای جوی با آلاینده‌های PM_{10} ، SO_2 و CO در فصول سرد تبریز حاکی از همبستگی معنادار تغییرات غلظت PM_{10} با متغیرهای بیشینه سرعت باد، میانگین سرعت باد و فشار هوا، همبستگی CO با دما و رطوبت نسبی و همچنین همبستگی SO_2 با دما، فشار هوا و بیشینه سرعت باد است (Mohammad Khorshiddoust *et al.*, 2018). بررسی و تحلیل اثرات عناصر آب و هوایی دما، سرعت باد و بارش در مقیاس زمانی ماهانه بر کیفیت هوای تهران نشان از تأثیر با شدت و ضعف مختلف تمامی این متغیرها در کیفیت هوا و نقش بارزتر پارامترهای سرعت باد و دما در تغییر میزان آلاینده‌ها دارد (Ramezani *et al.*, 2018). رابطه همبستگی منفی میان آلاینده‌های گازی هوا (SO_2 و NO_2) و دمای بالا، افزایش سطح غلظت آلاینده‌ها با افزایش رطوبت نسبی و کاهش غلظت NO_2 با افزایش سرعت باد در شهر گوالیور هند مشاهده گردیده است (Dandotiya *et al.*, 2019). نتایج مطالعه بررسی رابطه عوامل جوی و آلاینده‌های هوا در داکا، پایتخت بنگلادش، بیانگر رابطه معکوس اکثر آلاینده‌ها با دمای هوا و رطوبت نسبی، رابطه مثبت غلظت ذرات معلق (PM) با دما و رطوبت نسبی تنها در فصل موسمی و همچنین پاسخ‌های متفاوت آلاینده‌ها به تغییرات فصلی عوامل آب و هوایی است (Kayes *et al.*, 2019). همبستگی غلظت آلاینده NO_2 در شهر تهران با میانگین سالانه عناصر جوی دما، سرعت باد و رطوبت نسبی، منفی و با دمای نقطه شبنم مثبت بوده است (Masoudi *et al.*, 2019). غلظت بیشتر آلاینده‌های هوا در چین تحت تأثیر شرایط جوی قرار داشته و سطح تأثیر بسته به نوع آلاینده‌ها در مناطق مختلف متفاوت بوده است. غلظت آلاینده‌های هوا در اکثر ایستگاه‌ها با سرعت باد، بارندگی و رطوبت نسبی همبستگی منفی معنی‌دار و با فشار جو همبستگی مثبت داشت (Liu *et al.*, 2020). تحلیل ارتباط میان آلاینده‌های گازی هوا (NO ، NO_2 ، SO_2 و CO) و پارامترهای هواشناسی تابش خورشیدی، دما، سرعت باد، رطوبت نسبی و بارش در تبریز حاکی از همبستگی معنادار تمامی آلاینده‌ها با عناصر هواشناسی است (Barzeghar *et al.*, 2022). نتایج تجزیه و تحلیل تغییرات فصلی و جغرافیایی پارامترهای هواشناسی در استان جیانگ سو چین و ارتباط آن با شش آلاینده معیار هوا و شاخص کیفیت هوا (AQI)، نشان از همبستگی منفی AQI با اکثر پارامترهای هواشناسی و همبستگی مثبت آن با فشار هوا در همه شهرها دارد (Johnson, 2022). بنابراین، شفاف سازی عوامل مرتبط مؤثر بر انتشار آلودگی هوا برای هدایت سیاست‌های کاهش دارای اهمیت اساسی است. از

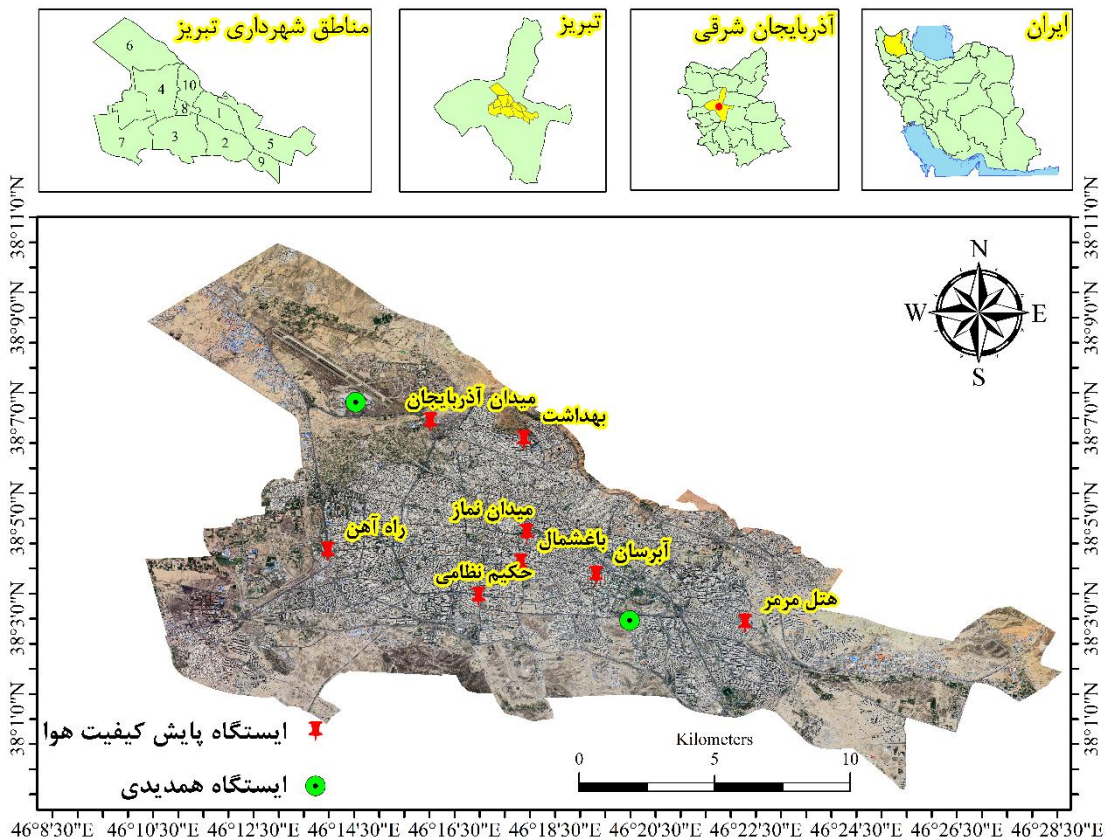
سوی دیگر، روش‌های متعددی برای مطالعه عوامل هواشناسی مؤثر بر غلظت آلاینده‌های جوی در نقاط مختلف جهان استفاده شده است. بسیاری از مطالعات از مدل رگرسیون خطی برای تجزیه و تحلیل روابط موجود میان غلظت آلاینده‌ها و عناصر هواشناسی استفاده کرده‌اند (Zhai et al., 2019; Liu et al., 2020; Birinci et al., 2023). این در حالی است که به نظر می‌رسد مدل‌های آماری غیرخطی بهتر می‌توانند روابط پیچیده میان آلاینده‌های هوا و عوامل هواشناسی را توضیح دهند و مطالعات بسیاری با استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی به کشف روابط و عوامل هواشناسی مؤثر بر غلظت آلاینده‌ها پرداخته‌اند (Ma et al., 2020; Cheng et al., 2021; Rad et al., 2022).

مرور ادبیات موضوعی پژوهش نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات و بویژه مطالعات داخلی تنها با تمرکز بر پارامترهای هواشناسی و یا آلاینده‌های محدود در طول دوره‌های آماری کوتاه مدت و اغلب با استفاده از روش رگرسیون گام به گام انجام گرفته و فاقد تجزیه و تحلیل‌های دقیق در مقیاس‌های زمانی متفاوت هستند (Mohammad Khorshiddoust et al., 2018; Masoudi et al., 2019; Shahmohammadi et al., 2020; Sirithian and Thanatrakolsri, 2022; Birinci et al., 2023). در سال‌های اخیر به دلیل توسعه صنایع و همچنین افزایش تعداد وسایل نقلیه در مناطق شهری، تبریز با مشکلات جدی ناشی از آلودگی هوا به ویژه در فصل زمستان مواجه شده است. آلودگی هوا در تبریز بیشتر تحت تأثیر وارونگی دما در دوره سرد سال بوده و طوفان گرد و غبار خاورمیانه با منشأ حوضه دجله و فرات نیز آلودگی هوای این منطقه در دوره گرم سال را تشدید کرده است. با این حال پژوهش‌های جامع و دقیق اندکی در این زمینه در شهر تبریز صورت گرفته است. مطالعه‌ی حاضر ضمن بررسی وضعیت عناصر آب و هوایی و آلاینده‌های معیار جوی در شهر تبریز در بلند مدت (۲۰۲۱-۲۰۰۴)، به بررسی ارتباط بین آلاینده‌ها و عناصر هواشناسی در مقیاس‌های زمانی ماهانه و فصلی و تأثیر این عناصر بر غلظت آلاینده‌های هوا با استفاده از مدلسازی آماری خطی (مدل رگرسیون خطی چند متغیره) و غیر خطی (مدل جمعی تعمیم یافته) در نرم افزار R 4.3.1 می‌پردازد (R Core Team, 2023). از آنجایی که در رگرسیون خطی گام به گام تمامی مدل‌های ممکن بررسی نمی‌شود و تضمینی در ارائه بهترین مدل وجود ندارد، مطالعه حاضر از روش رگرسیون بهترین زیر مجموعه‌ها برای غلبه بر این ضعف موجود در مطالعات مشابه استفاده می‌کند. نتایج پژوهش حاضر مبنای علمی برای پیشگیری و کنترل آلودگی هوا در تبریز فراهم می‌کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش به لحاظ زمانی، یک دوره‌ی آماری ۱۷ ساله (۲۰۰۳-۰۱ تا ۲۰۲۱-۰۷-۰۱) را پوشش می‌دهد و به لحاظ مکانی، محدود به شهر تبریز است و از نظر موضوعی، بطور کلی به ارتباط آلودگی هوای شهری و وضعیت آب و هوایی توجه دارد. دلیل انتخاب این قلمروی موضوعی، زمانی و مکانی، رشد سریع شهرنشینی و تشدید آلودگی هوا در شهر تبریز در سال‌های اخیر و نقش بارز عناصر آب و هوایی در تعیین کیفیت هوای شهری است. تبریز، چهارمین شهر بزرگ ایران، دومین شهر صنعتی و مرکز استان آذربایجان شرقی، با مساحت حدود ۳۲۴ کیلومتر مربع در محدوده جغرافیایی $38^{\circ} 01' 00''$ تا $38^{\circ} 10' 00''$ عرض شمالی واقع شده و متوسط ارتفاع آن از سطح دریا ۱۳۶۶ متر است. جمعیت تبریز در سال ۱۳۹۵ به عنوان پر جمعیت‌ترین کلان‌شهر در شمال غرب ایران، بالغ بر ۱/۵ میلیون نفر بوده است (<https://www.tabriz.ir/>). تبریز دارای آب و هوای نیمه خشک با زمستان‌های سرد و تابستان‌های مطبوع اما بسیار خشک است. همچنین تبریز به دلیل فعالیت‌های صنعتی گسترده، به عنوان یک کانون آلودگی هوا شناخته می‌شود. این شهر دارای ده ناحیه شهرداری، هشت ایستگاه پایش آلودگی هوا و دو ایستگاه همدیدی است. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های همدیدی و سنجش کیفیت هوای آن در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و توزیع مکانی ایستگاه‌های سینوپتیک و پایش کیفیت هوا

Fig.1- Study area and distribution of synoptic and air quality monitoring stations

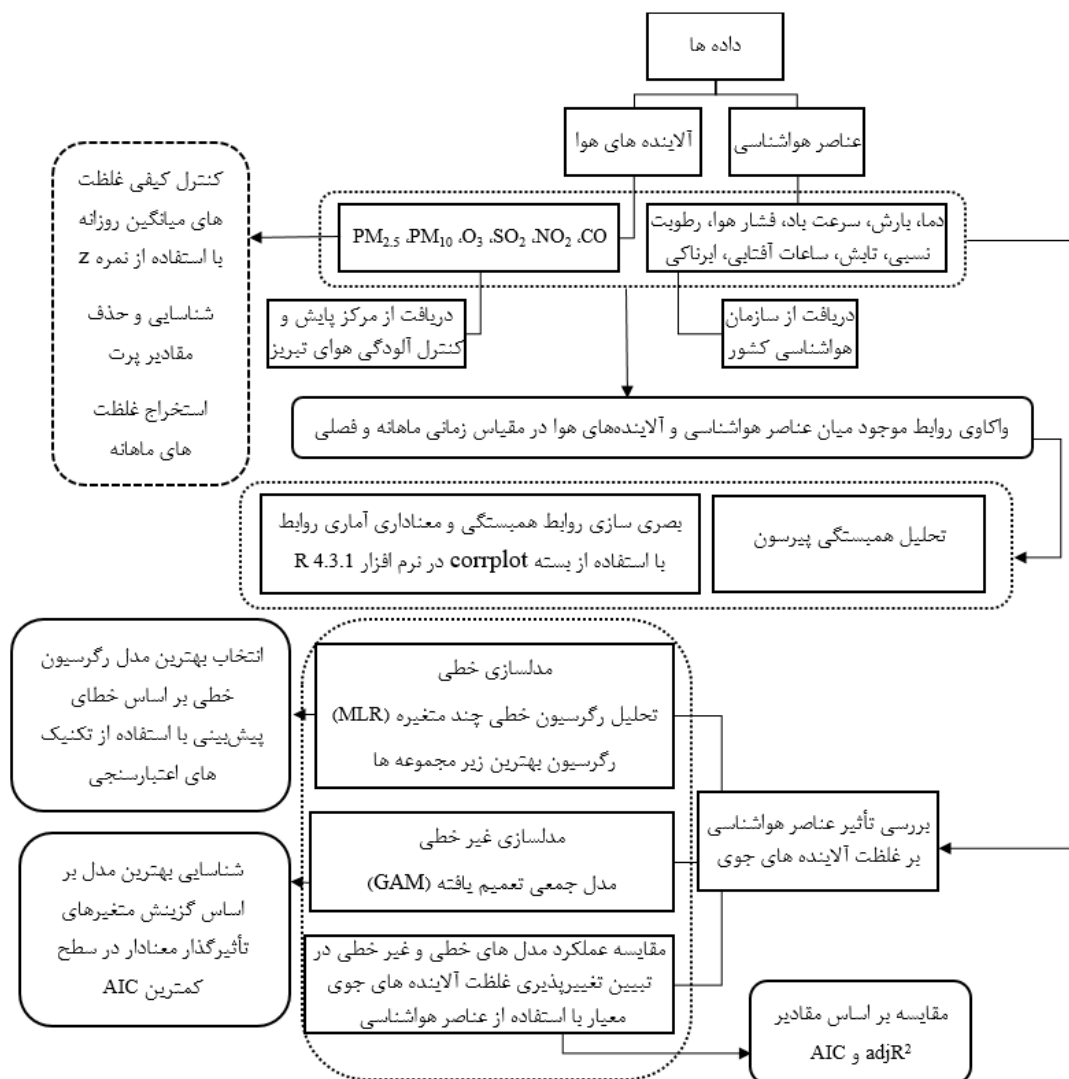
داده‌ها

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل داده‌های روزانه ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا و داده‌های ماهانه ایستگاه‌های هواشناسی مستقر در سطح شهر تبریز در طول دوره آماری مورد مطالعه است. داده‌های مربوط به غلظت آلاینده‌های جوی (کربن مونوکسید (CO)، نیتروژن دی اکسید (NO₂)، گوگرد دی اکسید (SO₂)، ازن (O₃)، ذرات معلق با قطر کمتر از ۱۰ میکرون (PM₁₀) و ذرات معلق با قطر کمتر از ۲/۵ میکرون (PM_{2.5}) از مرکز پایش و کنترل آلودگی هوای شهر تبریز دریافت گردید (<https://as.doe.ir/>). در این مطالعه از روش استاندارد سازی نمره Z برای کنترل کیفیت داده‌های آلودگی هوا استفاده گردید. ابتدا سری‌های زمانی غلظت‌های میانگین روزانه با استفاده از نمره Z استاندارد شدند و سپس نسبت به شناسایی و حذف مقادیر پرت (Outliers) بر اساس معیار دامنه‌ی میان چارکی (IQR) اقدام گردید. در نهایت، میانگین مقادیر ماهانه غلظت آلاینده‌های هوا در ۸ ایستگاه سنجش کیفیت هوا (آبرسان، راه‌آهن، باغشمال، حکیم نظامی، راسته کوچه (میدان نماز)، بهداشت، هتل مرمر و میدان آذربایجان) از مقادیر روزانه غلظت‌ها در سطح منطقه مورد مطالعه استخراج گردید. داده‌های هواشناسی شامل میانگین ماهانه دما (Temperature)، مجموع بارش ماهانه (Precipitation)، میانگین سرعت باد (Wind Speed)، میانگین ماهانه فشار سطح ایستگاه (Air Pressure)، میانگین ماهانه رطوبت نسبی (Relative Humidity)، مجموع ساعات آفتابی در ماه (Sunshine Hours)، میزان تابش کلی در ماه (Radiation) و میانگین ابرناکی (Cloud Cover) از سازمان هواشناسی کشور دریافت گردید که مشاهدات دو ایستگاه همدیدی (تبریز و تبریز- شرق) در منطقه را شامل می‌شود (<https://data.irimo.ir/>). لازم به ذکر است که با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه محدوده شهری است، از میانگین غلظت آلاینده‌های هوا در ۸ ایستگاه پایش آلودگی هوا و میانگین پارامترهای هواشناسی در ۲ ایستگاه همدیدی استفاده گردید.

روش شناسی

در مطالعه حاضر روابط موجود میان عناصر هواشناسی و آلاینده‌های هوا در مقیاس زمانی ماهانه و فصلی با استفاده از آزمون همبستگی پیرسون در سطح اطمینان ۹۵ درصد مورد بررسی قرار گرفت (Pearson, 1895) و نتایج حاصل از برونداد این آزمون، شامل مقادیر ضریب همبستگی و همچنین معناداری آماری آنها با استفاده از بسته corrplot در نرم افزار R 4.3.1 به تصویر کشیده شد (Wei and Simko, 2021). در این مطالعه، ماه‌های دسامبر، ژانویه، فوریه به عنوان

فصل زمستان، ماه‌های مارس، آوریل، مه به عنوان فصل بهار، ماه‌های ژوئن، ژوئیه، اوت به عنوان فصل تابستان و سپتامبر، اکتبر و نوامبر، فصل پاییز در نظر گرفته شد. ضریب همبستگی بر اساس معیارهای: ۱-۰/۹: همبستگی بسیار قوی، ۰/۸۹-۰/۷- همبستگی قوی، ۰/۶۹-۰/۵: همبستگی متوسط، ۰/۴۹-۰/۳: همبستگی ضعیف و ۰/۳<: همبستگی بسیار ضعیف تفسیر گردید (Mukaka, 2012). همچنین در پژوهش حاضر، مطالعه آماری کشف وجود و یا عدم وجود رابطه خطی و غیر خطی میان غلظت آلاینده‌های جوی و عناصر هواشناسی در تبریز و اینکه چگونه تغییر مقدار غلظت آلاینده‌های معیار و عناصر هواشناسی سبب تغییر مقادیر غلظت سایر آلاینده‌ها می‌شود، توسط مدل رگرسیون خطی چندگانه (MLR) و مدل جمعی تعمیم یافته (GAM) انجام گرفت (Chambers, 2017; Wood, 2017). به همین منظور، غلظت هر یک از آلاینده‌ها به عنوان متغیر وابسته (پاسخ) و عناصر هواشناسی و سایر آلاینده‌ها به عنوان مجموعه متغیرهای مستقل (پیشگو) در نظر گرفته شد. سپس معیار تورم واریانس (VIF) برای تشخیص هم خطی (وجود همبستگی بالا بین متغیرهای مستقل) مورد استفاده قرار گرفت و متغیرهای مستقل دارای $VIF > 10$ یعنی مجموع ساعات آفتابی و میانگین ماهانه رطوبت نسبی به ترتیب از مدلسازی کنار گذاشته شد (Fox and Monette, 1992). به منظور ارائه یک تجزیه و تحلیل رگرسیون خطی معتبر، برقراری فرضیات رگرسیون شامل خطی بودن، نرمال بودن، همگنی واریانس و استقلال مشاهدات مورد بررسی و در صورت عدم برقراری هر یک از این مفروضات، معیارهای اصلاحی نظیر حذف مشاهدات به کار گرفته شد. در نهایت، بهترین مدل رگرسیون خطی، با استفاده از روش رگرسیون بهترین زیرمجموعه‌ها در بسته leaps و بر اساس خطای پیش‌بینی محاسبه‌شده بر روی داده‌های آزمایشی جدید با استفاده از تکنیک‌های اعتبارسنجی متقابل (k-fold) در بسته شناسایی گردید (Efron, 1983; Venables and Ripley, 2002; TLboFcbA, 2020). مدل ناپارامتریک جمعی تعمیم یافته نیز با استفاده از بسته mgcv برای هر یک از آلاینده‌های معیار جوی برازش یافت و بهترین مدل بر اساس گزینش متغیرهای تأثیرگذار معنادار در سطح کمترین AIC (معیار اطلاعاتی آکائیک) شناسایی گردید. چکیده تصویری پژوهش در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- چکیده تصویری پژوهش

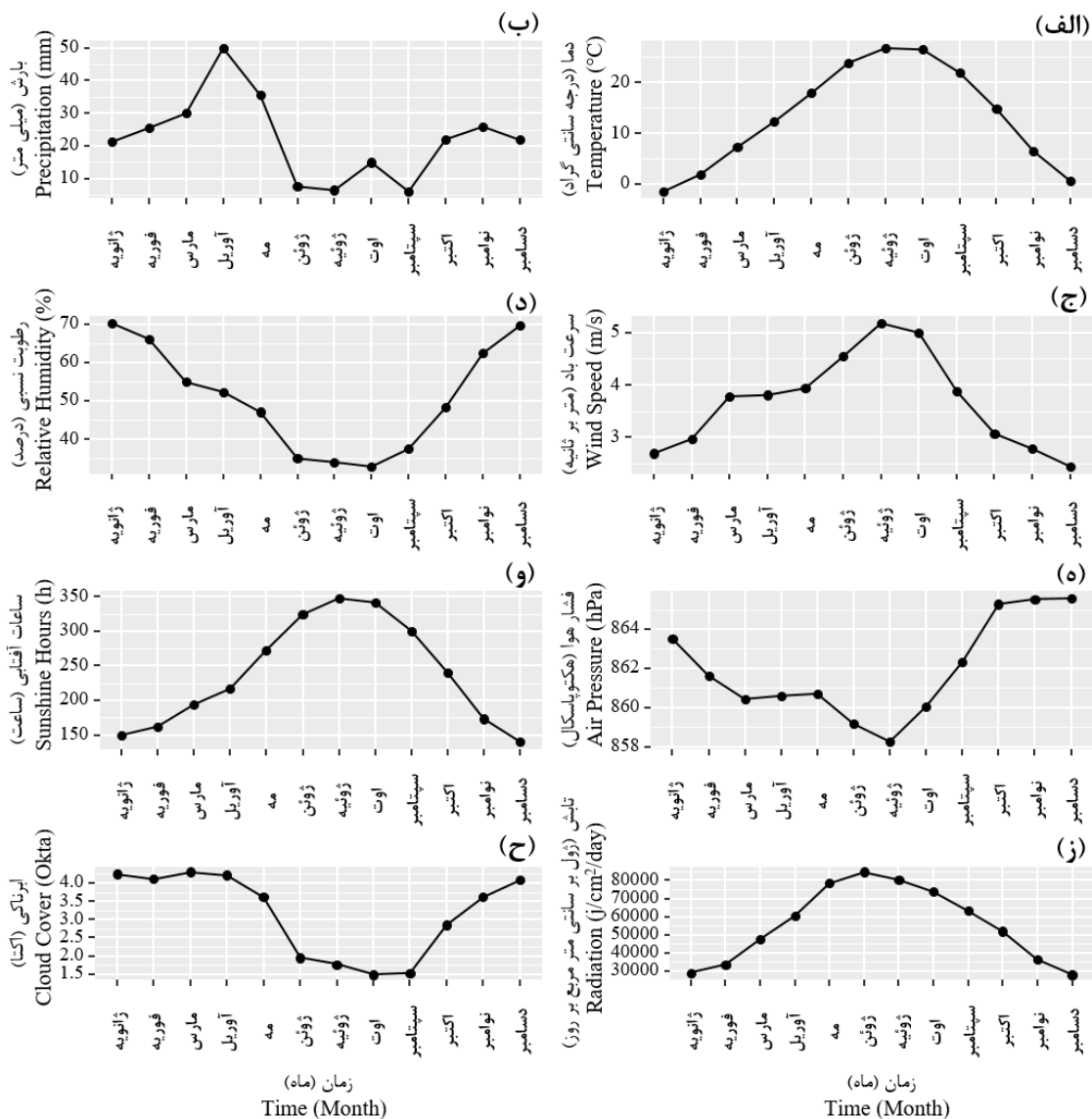
Fig.2- Graphical Abstract of research

نتایج و بحث

وضعیت آب و هوایی در شهر تبریز

نتایج حاصل از تحلیل میانگین آمار سینوپتیک ماهانه در طول دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۰۴ در تبریز حاکی از آن است که در طول سال، دما معمولاً از ۵- تا ۳۳ °C متغیر است. گرم ترین ماه سال در تبریز، ژوئیه با میانگین دمای ۲۶ °C، بیشینه ۳۳ °C و کمینه ۲۰ °C است. سردترین ماه سال در تبریز ماه ژانویه است که میانگین کمینه آن ۵- °C و بیشینه آن ۳ °C است (شکل ۳-الف). مجموع بارش در تبریز دارای تغییرات ماهانه است. پربارش ترین ماه در تبریز ماه آوریل با مجموع بارش ماهانه ۵۰ mm است و کمترین میزان بارندگی در ماه سپتامبر به ثبت رسیده است (شکل ۳-ب). سرعت باد در

هر مکان معین به شدت به توپوگرافی محلی و سایر عوامل وابسته است. میانگین سرعت وزش باد در تبریز در ماه ژوئن به بیشترین مقدار (۵/۱۸ m/s) و در ماه دسامبر به کمترین مقدار خود (۲/۴۴ m/s) می‌رسد (شکل ۳-ج). هوای گرم نسبت به هوای سرد رطوبت بیشتری را جذب می‌کند. ژانویه با میانگین ۷۰٪ و اوت با ۳۲٪ به ترتیب مرطوب‌ترین و خشک‌ترین ماه‌های سال در تبریز هستند (شکل ۳-د). میانگین ماهانه فشار هوا در تبریز در طول سال تغییرات چندانی ندارد. با این حال بطور میانگین دسامبر با ۸۶۵ hPa پرفشارترین و ژوئن با ۸۵۸ hPa کم فشارترین ماه‌های سال در تبریز هستند (شکل ۳-ه). مجموع ساعات آفتابی در ماه به مجموع ساعاتی اشاره دارد که خورشید بدون هیچ گونه مانعی (ابر، مه یا کوه) قابل مشاهده است. ژوئن با مجموع ۳۴۷ ساعت آفتابی و ۸۴۶۷۷ j/cm²/day تابش، دارای بیشترین مجموع ساعات آفتابی و بالاترین میزان تابش کلی در ماه در منطقه تبریز است (شکل ۳-و، ۳-ز). در ماه دسامبر، خورشید کمترین تابش را دارد (۱۳۹ h). در تبریز، میانگین درصد آسمان پوشیده از ابر در طول سال تغییرات ماهانه قابل توجهی را تجربه می‌کند. صاف‌ترین ماه سال در تبریز ماه اوت است که در آن به طور متوسط آسمان در ۹۹ درصد مواقع صاف، اغلب صاف یا نیمه ابری است. ابری‌ترین ماه سال نیز ماه مارس است که در آن به طور متوسط ۴۳ درصد مواقع آسمان ابری یا اغلب ابری است (شکل ۳-ح). بطور کلی می‌توان گفت تابستان‌های تبریز گرم، خشک، بادخیز و صاف و زمستان‌های آن بسیار سرد، مرطوب و نیمه ابری است.



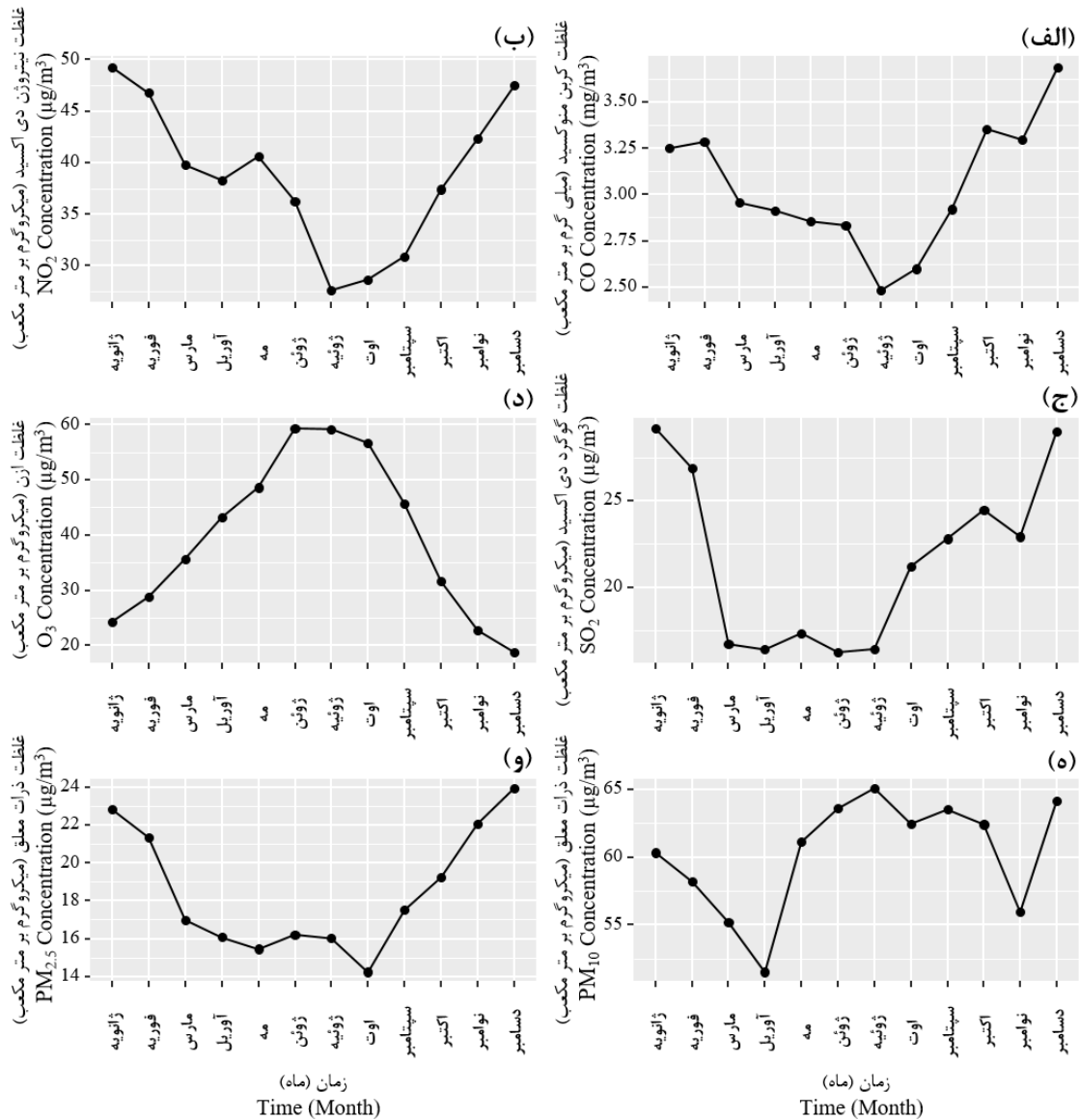
شکل ۳- میانگین ماهانه عناصر هواشناسی در ایستگاه‌های همدیدی تبریز در طول دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۰۴

Fig. 3- Monthly average of meteorological elements in Tabriz synoptic stations during 2004-2021

وضعیت آلاینده‌های جوی معیار در شهر تبریز

میانگین تغییرات ماهانه و فصلی آلاینده‌های معیار هوا در شهر تبریز در طول کل دوره آماری به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد غلظت آلاینده‌های CO ، NO_2 ، SO_2 و $PM_{2.5}$ شکل تقریباً قابل توجهی از نوع U را نشان می‌دهد، بطوریکه مقادیر غلظت‌ها در هر دو انتهای نمودار یعنی ماه‌های سرد سال (ژانویه و دسامبر) بالا و در میانه نمودار یعنی ماه‌های گرم سال (ژوئن و ژوئیه) پایین است (شکل ۴- الف، ب، ج، د-و). در

مقابل، غلظت O_3 نشان دهنده شکلی معکوس از نوع U می‌باشد که در وسط نمودار غلظت بالا و در هر دو انتها پایین است. بیشینه مقدار غلظت این آلاینده در ماه ژوئن و کمینه مقدار آن در ماه دسامبر دیده می‌شود (شکل ۴-د).

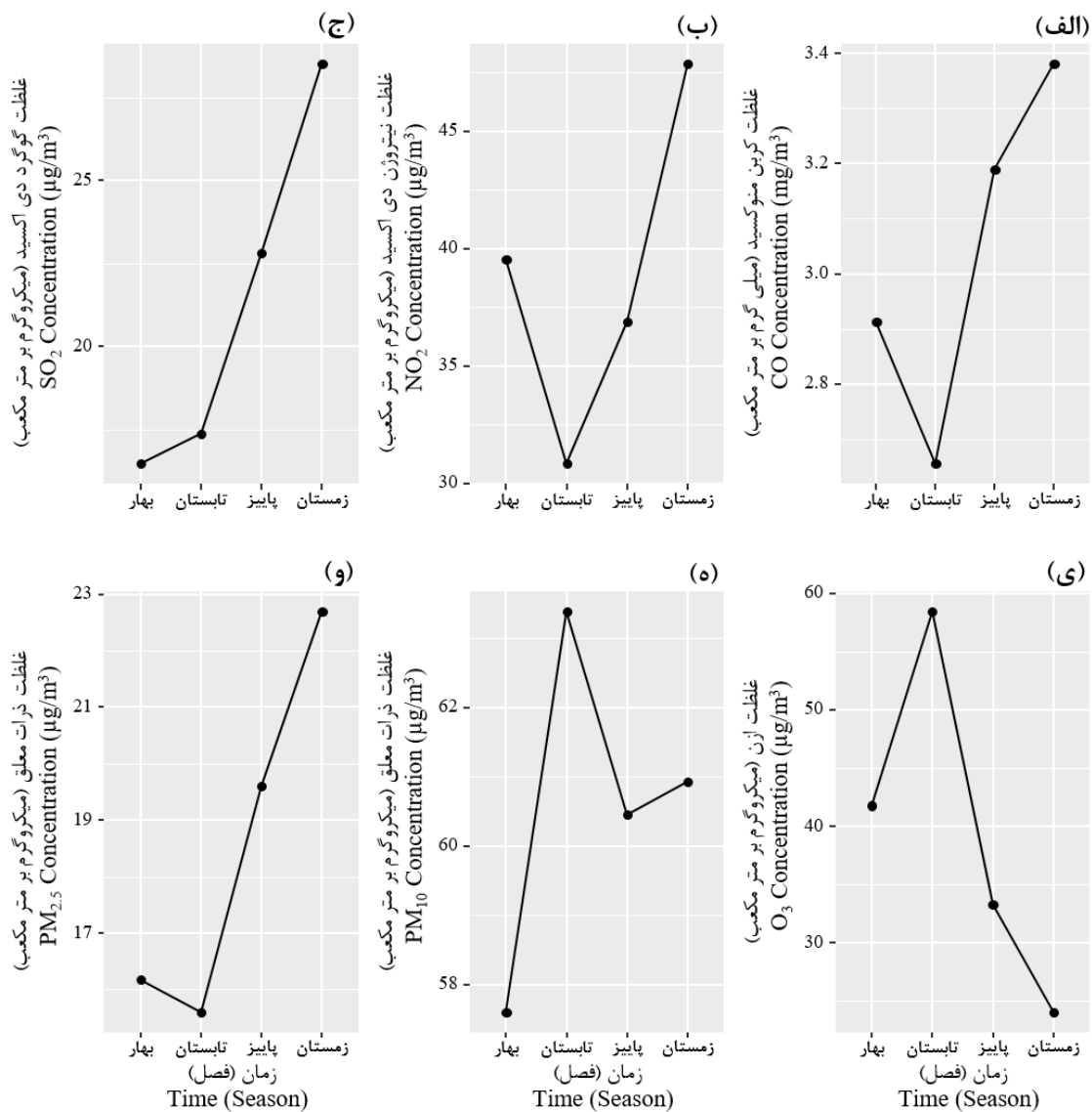


شکل ۴- مقادیر میانگین ماهانه غلظت آلاینده‌های معیار هوا در تبریز در طول دوره آماری ۲۰۰۴-۲۰۲۱

Fig. 4- Average monthly concentrations of criteria air pollutants in Tabriz during 2004-2021

تغییرات فصلی غلظت آلاینده‌های CO ، NO_2 ، SO_2 و $\text{PM}_{2.5}$ نیز اساساً مشابه بوده و سطح غلظت آنها در فصل زمستان زیاد و در فصل تابستان کم است. این آلاینده‌ها در فصول بهار و پاییز دارای مقادیر غلظتی در محدوده بین مقادیر تابستانه و زمستانه خود هستند. تغییرات فصلی در غلظت CO نشان می‌دهد که غلظت این آلاینده در زمستان به بالاترین مقدار

($3/38 \text{ mg/m}^3$) و در تابستان به کمترین مقدار میانگین خود ($2/66 \text{ mg/m}^3$) در طول دوره آماری می‌رسد (شکل ۵-الف). در تابستان به دلیل دماهای بالا و تابش شدید خورشید، راندمان تبدیل CO در واکنش‌های فتوشیمیایی بیشتر از سایر فصول است و در نتیجه این تبدیل بیشتر، غلظت آن کاهش می‌یابد (Wu et al., 2017). تغییرات فصلی در غلظت آلاینده NO_2 نمایانگر مقادیر بالای غلظت این آلاینده در فصل زمستان و مقادیر پایین در فصل تابستان است (شکل ۵-ب). اگر غلظت NO_2 در زمستان به بیشینه مقدار خود برسد، انتشار دارای منشأ انسانی غالب و اگر بیشترین غلظت این آلاینده در تابستان رخ دهد، انتشار دارای منبع طبیعی غالب است (Zhang et al., 2012). بنابراین می‌توان گفت آلودگی ناشی از NO_2 در تبریز تحت سلطه انتشارات دارای منشأ انسانی است. تغییرات SO_2 در مقیاس زمانی فصلی در جهت نزولی زمستان ($28/52 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) < پاییز ($22/82 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) < تابستان ($17/38 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) < بهار ($16/47 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) است (شکل ۵-ج). در تابستان به دلیل دمای بالا و اکسیداسیون قوی، SO_2 به راحتی به سولفات تبدیل می‌شود و اثر پاک‌کنندگی بارش در بهار باعث کاهش غلظت آن در این فصل می‌شود. شایان ذکر است که تغییرات فصلی O_3 در مقایسه با سایر آلاینده‌ها رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد. بطوریکه غلظت این آلاینده در تابستان به بیشینه مقدار خود ($\mu\text{g/m}^3$) $58/39$ و در زمستان به کمینه مقدار میانگین خود در طول دوره آماری می‌رسد ($24/05 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) (شکل ۵-د). علت این رفتار عمدتاً تابش خورشیدی قوی در تابستان است که با تسریع واکنش‌های فتوشیمیایی تبدیل NO_2 به O_3 ، به افزایش غلظت O_3 و در مقابل کاهش غلظت NO_2 می‌انجامد. تغییرات فصلی غلظت PM_{10} بیانگر تغییرات آن در جهت نزولی تابستان ($63/38 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) < زمستان ($60/93 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) < پاییز ($61/45 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) < بهار ($57/60 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) است (شکل ۵-ه). در مقایسه رفتار فصلی آلاینده ذرات معلق PM ($\text{PM}_{2.5}$ و PM_{10}) ملاحظه می‌گردد که PM_{10} بر خلاف $\text{PM}_{2.5}$ ، در فصل تابستان و سپس زمستان به حداکثر مقدار خود می‌رسد. اگرچه وسایل نقلیه به عنوان منبع اصلی انتشار ذرات معلق (بوئیه $\text{PM}_{2.5}$) شناخته می‌شوند، با این حال نمی‌توان سهم گرد و غبار در PM_{10} تولید شده در فصل تابستان در تبریز را نادیده گرفت. میانگین تغییرات سالانه آلاینده‌های معیار در تبریز نیز نشان می‌دهد که تمامی آلاینده‌ها به جز NO_2 شاهد یک روند کاهشی در طول دوره آماری بوده‌اند.



شکل ۵- مقادیر میانگین فصلی غلظت آلاینده‌های معیار هوا در تبریز در طول دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۰۴

Fig. 4- Average seasonally concentrations of criteria air pollutants in Tabriz during 2004-2021

برهمکنش‌های آلاینده‌های جوی و عناصر هواشناسی

به منظور تعیین رابطه میان غلظت آلاینده‌های جوی معیار و همچنین رابطه میان پارامترهای مختلف هواشناسی و غلظت آلاینده‌ها بر اساس داده‌های میانگین ماهانه و فصلی از ۸ ایستگاه پایش کیفیت هوا و ۲ ایستگاه سینوپتیک در سطح شهر تبریز، ضرایب همبستگی پیرسون محاسبه و در شکل ۶ ارائه شده است. لازم به ذکر است که تحلیل‌های همبستگی بر مبنای معناداری آماری صورت گرفته و متغیرها و آلاینده‌هایی که همبستگی آنها از نظر آماری معنادار نمی‌باشد (0.05).

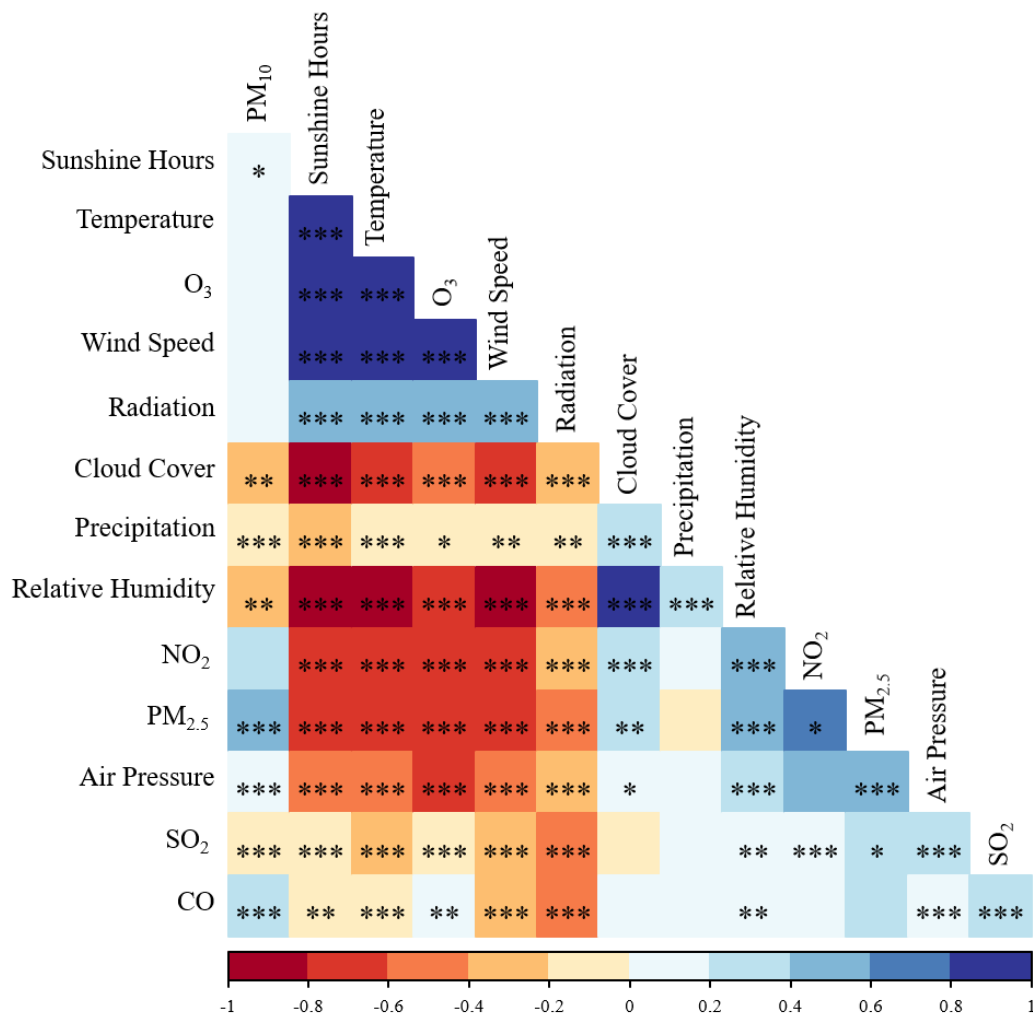
> p-value)، مورد بحث قرار نگرفته است. تحلیل ضرایب همبستگی پیرسون میان آلاینده‌های معیار در مقیاس زمانی ماهانه حاکی از وجود رابطه همبستگی مثبت ضعیف تا بسیار ضعیفی میان CO با آلاینده‌های SO₂، PM₁₀ و O₃ است. همبستگی مثبت CO با PM₁₀ در تبریز، در پاییز به بیشترین مقدار خود می‌رسد. آلاینده NO₂ بیشترین همبستگی مثبت و منفی معنادار را به ترتیب با آلاینده‌های PM_{2.5} و O₃ دارد. PM₁₀ دارای رابطه همبستگی منفی بسیار ضعیف با SO₂، بیشترین همبستگی مثبت با PM_{2.5} و همبستگی مثبت بسیار ضعیف تا ضعیف به ترتیب با CO و O₃ است. در مقیاس فصلی نیز آلاینده PM₁₀ تنها دارای رابطه همبستگی مثبت بسیار ضعیف با CO در فصل زمستان است. آلاینده PM_{2.5} نیز دارای همبستگی مثبت با بیشتر آلاینده‌ها به جز ازن است. بیشترین مقدار همبستگی مثبت این ذرات به ترتیب با NO₂ و PM₁₀ و کمترین همبستگی معنادار آن با SO₂ است. همچنین همبستگی منفی این آلاینده با ازن در سطح اطمینان ۹۵ درصد، قوی است. همانطور که ملاحظه می‌گردد آلاینده O₃ نیز دارای همبستگی منفی معناداری با تمامی آلاینده‌های جوی به جز CO در مقیاس زمانی ماهانه است. از آنجایی که CO یک پیش‌ساز برای آلاینده ازن محسوب می‌شود، همبستگی مثبت آن با غلظت این آلاینده می‌تواند بیانگر تولید فتوشیمیایی O₃ از این پیش‌ساز خود در منطقه مورد مطالعه باشد. ازن بیشترین همبستگی منفی را با PM_{2.5} (قوی) و NO₂ (متوسط) و کمترین همبستگی را با SO₂ (بسیار ضعیف) دارد. همبستگی منفی O₃ با NO₂، تبدیل NO₂ به O₃ از طریق واکنش‌های فتوشیمیایی را تأیید می‌کند. همبستگی منفی قوی O₃ با PM_{2.5} را نیز می‌توان با کاهش تابش خورشیدی ناشی از ذرات و تأثیر آن بر سطح واکنش‌های فتوشیمیایی و تغییر مقادیر ازن تبدیل یافته از NO₂ مرتبط دانست. نتایج مطالعات محققین حاکی از وجود همبستگی میان آلاینده‌های ناشی از عوامل مشابه است. اگر آلاینده‌ها همبستگی بالایی از خود نشان دهند، می‌توان گفت که دارای منابع انتشار و الگوهای تغییر در آلودگی هوا مشابهی هستند و احتمالاً از الگوهای انتقال و تبدیل یکسانی پیروی می‌کنند. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل همبستگی در شهر تبریز نیز آلاینده‌های NO₂، PM_{2.5} و SO₂، PM_{2.5} و همچنین آلاینده‌های PM₁₀ و PM_{2.5} همبستگی مثبت معنادار قابل توجهی را به صورت جفتی نشان داده‌اند بنابراین به نظر می‌رسد که منابع آلودگی مؤثر بر غلظت جرمی این آلاینده‌ها دارای همبستگی قوی هستند (Meng et al., 2017). در واقع، پیش‌سازهایی چون NO₂ و SO₂ که از منابع مختلفی از جمله نیروگاه‌ها، صنایع و وسایل نقلیه منتشر می‌شوند، به تشکیل ذرات ثانویه ریز (نیترات‌ها و سولفات‌ها) در جو از طریق واکنش‌های شیمیایی پیچیده می‌انجامند.

نتایج حاصل از تحلیل همبستگی پیرسون میان عناصر مختلف هواشناسی و آلاینده‌های جوی نشان می‌دهد که میزان تأثیر این عناصر بر ۶ آلاینده معیار مورد مطالعه در شهر تبریز در زمان‌های مختلف یکسان نیست. بنابراین، نمی‌توان ادعا کرد که تأثیر یک پارامتر هواشناسی خاص بر آلودگی هوا تغییر ناپذیر است. در ادامه اثرات عوامل هواشناسی بر غلظت

آلاینده‌ها در تبریز مورد بحث قرار گرفته است. در مقیاس زمانی ماهانه در طول کل دوره آماری، همبستگی منفی متوسط معناداری میان آلاینده ذرات معلق ($PM_{2.5}$) و دمای هوا در سطح اطمینان ۹۵ درصد وجود دارد. این همبستگی منفی بدان معناست که با افزایش دما، پراکندگی ذرات به دلیل جریانات همرفتی در جو پدیده غالبی است. همبستگی منفی بسیار ضعیفی میان بارش و غلظت ذرات (PM_{10}) در مقیاس زمانی ماهانه مشاهده می‌شود. همبستگی منفی مجموع بارش ماهانه و غلظت ذرات نشان می‌دهد که افزایش تعداد روزهای بارانی با کاهش غلظت ذرات در جو همراه است. در مطالعه حاضر رطوبت نسبی به ترتیب دارای همبستگی منفی بسیار ضعیف و مثبت متوسط با PM_{10} و $PM_{2.5}$ است. همبستگی رطوبت نسبی و غلظت ذرات در فصل بهار برای $PM_{2.5}$ منفی و بسیار قوی و در زمستان برای PM_{10} متوسط منفی است. به طور کلی، رطوبت با تنظیم حرکت ذرات، می‌تواند ذرات را وادار به فرو رفتن در سطح کند. در نتیجه، با افزایش رطوبت نسبی، غلظت ذرات کاهش می‌یابد. یافته‌های پژوهش مبین وجود رابطه‌ای معکوس میان سرعت باد و غلظت ذرات ($PM_{2.5}$) در شهر تبریز است. این رابطه معکوس در فصل تابستان که میانگین سرعت باد در تبریز به بیشینه مقدار خود می‌رسد، برای PM_{10} نیز قابل مشاهده است. در واقع، باد با دور کردن آلاینده‌ها از منابع انتشار، باعث پراکندگی آنها می‌شود. به طور کلی هر چه سرعت باد بیشتر باشد، آلاینده‌ها بیشتر پراکنده و غلظت آنها کمتر می‌شود. در تبریز فشار هوا در مقیاس زمانی ماهانه و همچنین در فصول بهار، تابستان و پاییز دارای همبستگی مثبت بسیار قوی تا ضعیف با غلظت ذرات (PM_{10} و $PM_{2.5}$) است. همبستگی مثبت فشار هوا با غلظت ذرات معلق به معنای افزایش غلظت ذرات در جو با افزایش فشار هواست. در واقع، با افزایش فشار، سرعت باد کاهش می‌یابد و با تسهیل تشکیل لایه‌های وارونگی حرارتی و در نتیجه دشوارسازی فرآیند رقیق سازی ذرات، به تجمع ذرات در سطح زمین می‌انجامد. پارامترهای میزان تابش کلی و مجموع ساعات آفتابی در ماه نیز به ترتیب دارای همبستگی منفی ضعیف و متوسط با آلاینده ذرات ($PM_{2.5}$) است. رابطه مجموع ساعات آفتابی و غلظت ذرات در فصل زمستان مثبت و ضعیف است. در طول دوره آماری در مقیاس زمانی ماهانه ابرناکی دارای همبستگی مثبت ضعیف با $PM_{2.5}$ و همبستگی منفی بسیار ضعیف با PM_{10} است.

از آنجایی که دما مؤلفه‌ای ضروری در ایجاد ازن شهری است، همبستگی مثبت قوی معناداری میان غلظت O_3 و پارامتر میانگین دما در مقیاس زمانی ماهانه در تبریز وجود دارد. دمای بالا نه تنها بر واکنش‌های فتوشیمیایی تأثیر می‌گذارد، بلکه با افزایش نرخ انتشار پیش‌سازهای ازن می‌تواند منجر به افزایش غلظت این آلاینده در جو شود. مشابه دما، عناصر ساعات آفتابی و تابش، به ترتیب دارای همبستگی مثبت قوی و ضعیف با ازن در مقیاس ماهانه بوده که نشان دهنده افزایش تشکیل ازن شهری با افزایش تابش و ساعات آفتابی است. رابطه این دو پارامتر با غلظت O_3 در فصول بهار (تابش) و پاییز (ساعات آفتابی) به رابطه‌ای معکوس تغییر می‌یابد. بر اساس ضرایب همبستگی ماهانه بین O_3 و میانگین سرعت

باد، همبستگی مثبت قوی و معناداری وجود دارد. با افزایش سرعت باد، ارتفاع لایه مرزی جوی افزایش می‌یابد و با تقویت انتقال حرکت عمودی، O_3 در تروپوسفر به لایه زمین منتقل می‌شود و در نهایت، انتشار افقی O_3 افزایش خواهد یافت. رابطه مثبت غلظت ازن و سرعت باد در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است (Liu *et al.*, 2020; Tian *et al.*, 2021). همبستگی میان O_3 و رطوبت نسبی و O_3 و بارش در مقیاس زمانی ماهانه منفی و به ترتیب قوی و بسیار ضعیف است.



مقادیر دارای ***, **, * و * به ترتیب دارای معناداری آماری در سطوح ۰/۰۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۰۵ بر اساس آزمون همبستگی پیرسون می‌باشند.

شکل ۶- ضریب همبستگی پیرسون میان عناصر هواشناسی و آلاینده‌های جوی معیار در مقیاس زمانی ماهانه در

شهر تبریز (۲۰۲۱-۲۰۰۴)

Figure. 6- Pearson's correlation coefficient between meteorological elements and criteria air pollutants in the monthly time scale in Tabriz during 2004- 2021

رطوبت می‌تواند با کاهش فعالیت فتوشیمیایی ناشی از کاهش تابش خورشیدی، یک اثر بازدارنده در تشکیل ازن در هوای محیط داشته باشد. این نتایج با یافته‌های حاصل از مطالعات محققین دیگر مطابقت دارد (Horne and Dabdub, 2016; Radaideh, 2017). فشار هوا نیز رابطه منفی متوسطی با O_3 در مقیاس ماهانه نشان داد که با نتایج حاصل از مطالعات دیگر همخوانی دارد (Liu et al., 2020; Johnson, 2022). رابطه میان غلظت O_3 و پارامتر ابرناکی در مقیاس ماهانه منفی و متوسط و در فصل پاییز مثبت و قوی است. در واقع، ابرناکی با تأثیر بر میزان تابش خورشیدی که به سطح زمین می‌رسد، تشکیل آلاینده‌های فتوشیمیایی بویژه ازن تروپوسفری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین در حضور ابرها، تابش خورشیدی کمتری به سطح رسیده و تولید این آلاینده کاهش می‌یابد. همبستگی میان غلظت آلاینده NO_2 و پارامترهای میانگین دما، مجموع ساعات آفتابی و میزان تابش کلی، منفی و به ترتیب متوسط ($r=0/63$)، متوسط ($r=0/60$) و ضعیف ($r=0/31$) است. روابط منفی مشابهی توسط مطالعات دیگر نیز گزارش شده است (Gorai et al., 2015; Gasmi et al., 2017). این رابطه منفی را می‌توان با تشکیل ازن مرتبط دانست زیرا دما و NO_2 الزامات ضروری برای تشکیل O_3 هستند (Kenty et al., 2007). غلظت NO_2 دارای یک ارتباط منفی و قوی با میانگین سرعت وزش باد در مقیاس ماهانه و همبستگی میان NO_2 و رطوبت نسبی، مثبت و متوسط ($r=0/54$) است. همبستگی مثبت NO_2 با رطوبت را می‌توان با رابطه معکوس موجود میان NO_2 و ازن و تابش توضیح داد، زیرا با افزایش رطوبت نسبی، تبدیل NO_2 به ازن کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، وجود همبستگی مثبت میان رطوبت نسبی و غلظت آلاینده‌های جوی نشان می‌دهد که افزایش رطوبت با به دام انداختن آلاینده‌ها در نزدیکی سطح زمین و پیشگیری از پخش آنها در جو، افزایش غلظت آلاینده‌ها در جو بویژه در هوای مناطق شهری را به دنبال دارد. رابطه میان ابرناکی و غلظت آلاینده NO_2 در تبریز مثبت و ضعیف است.

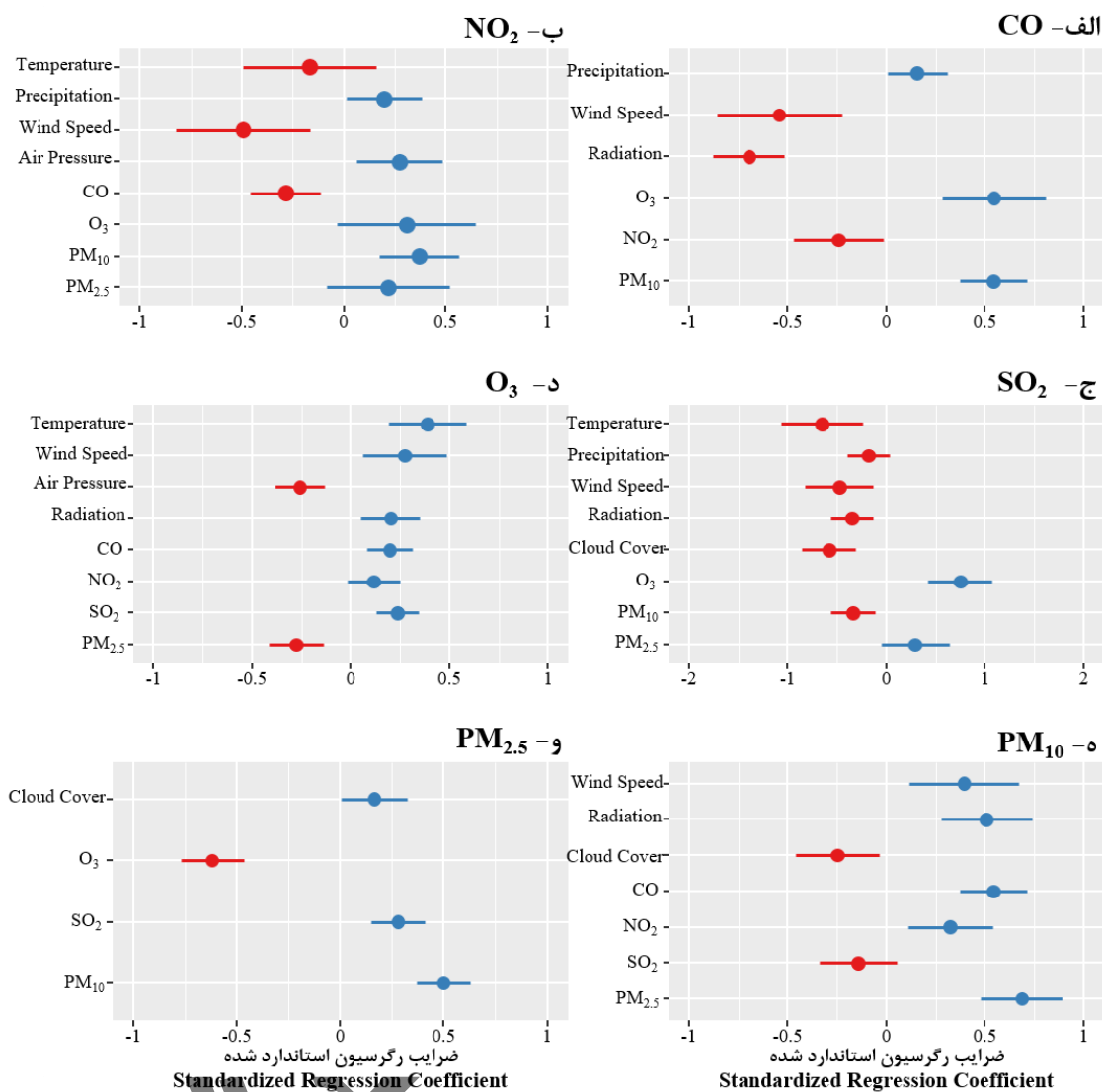
همبستگی منفی بسیار ضعیفی میان غلظت SO_2 و پارامترهای میانگین دما و مجموع ساعات آفتابی و همبستگی منفی متوسطی میان غلظت این آلاینده و میزان تابش کلی در مقیاس زمانی ماهانه وجود دارد. رابطه منفی میان SO_2 و تابش در فصل تابستان قوی است. این همبستگی منفی نشان دهنده کاهش غلظت SO_2 است و می‌تواند به اختلاط عمودی افزایش یافته آلاینده‌ها نسبت داده شود. رابطه میان سرعت باد و غلظت SO_2 در مقیاس ماهانه معکوس و بسیار ضعیف دیده می‌شود. شدت این رابطه معکوس در فصول بهار و زمستان بیشتر است. ضریب همبستگی ماهانه میان SO_2 و رطوبت نسبی، مثبت و بسیار ضعیف است. همبستگی SO_2 با فشار هوا نیز در مقیاس ماهانه مثبت و ضعیف است که نشان دهنده افزایش منابع انسانی انتشار این آلاینده در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

همبستگی ماهانه آلاینده CO با عناصر هواشناسی دما و ساعات آفتابی در تبریز منفی و بسیار ضعیف مشاهده شد. CO با میزان تابش کلی در ماه همبستگی منفی متوسطی را نشان می‌دهد و این همبستگی منفی در تابستان ($r=0/79$) قوی‌تر است. کاهش غلظت CO در هوا با افزایش پارامترهای مذکور می‌تواند به دلیل همرفت ناشی از حرارت باشد که منجر به پراکندگی سریع و ارتباط آن با تشکیل ازن شهری می‌شود. رابطه CO و مجموع بارش در فصل تابستان مثبت و بسیار قوی دیده می‌شود. رابطه سرعت باد و غلظت CO در مقیاس ماهانه منفی و بسیار ضعیف و در فصل پاییز مثبت و قوی مشاهده شد. همبستگی CO با فشار هوا در مقیاس زمانی ماهانه و در فصل پاییز مثبت و بسیار ضعیف است.

تأثیر عناصر هواشناسی بر غلظت آلاینده‌های جوی

بهترین مدل رگرسیون خطی چندگانه برازش یافته برای هر یک از آلاینده‌های جوی معیار در تبریز و ضرایب رگرسیون استاندارد شده مجموعه متغیرهای مستقل منتخب بر اساس محاسبه میانگین خطای اعتبارسنجی متقابل k-fold به عنوان خطای پیش‌بینی مدل در شکل ۷ به تصویر کشیده شده است. در شکل ۸ نیز اهمیت نسبی متغیرهای پیشگو در تبیین تغییرپذیری متغیرهای پاسخ برآورد گردیده است. نتایج حاکی از آن است که بهترین مدل خطی دارای کمترین خطای پیش‌بینی جهت مطالعه روابط بین متغیر وابسته CO و مجموعه متغیرهای مستقل مدلی است که با گزینش متغیرهای بارش، سرعت باد، تابش، O_3 ، NO_2 و PM_{10} برازش یافته است (شکل ۷-الف). از میان عناصر هواشناسی، پارامترهای تابش و سرعت باد به ترتیب بیشترین تأثیر منفی و از میان آلاینده‌ها، PM_{10} و O_3 بیشترین تأثیر مثبت را بر غلظت این آلاینده داشته‌اند (شکل ۸-الف). این بدان معناست که میانگین پاسخ CO با یک واحد افزایش در غلظت آلاینده PM_{10} و یا O_3 با فرض ثابت نگه داشتن سایر متغیرهای مستقل منتخب، به اندازه ضریب رگرسیون معادل آنها افزایش و میانگین پاسخ CO با یک واحد افزایش در مقدار میزان تابش کلی و یا سرعت وزش باد با فرض ثابت نگه داشتن سایر متغیرهای مستقل منتخب، به اندازه ضریب رگرسیون معادل آنها کاهش می‌یابد.

بهترین مدل جهت نمایان سازی روابط موجود بین متغیر پاسخ NO_2 و مجموعه متغیرهای پیشگو مدلی است که ترکیبی از اثرات متغیرهای دما، بارش، سرعت باد، فشار هوا، CO، O_3 ، PM_{10} و $PM_{2.5}$ را در نظر می‌گیرد (شکل ۷-ب). بر همین اساس، پارامترهای سرعت باد، $PM_{2.5}$ ، فشار هوا، دما و PM_{10} به ترتیب بیشترین تأثیر را در تغییرپذیری متغیر پاسخ NO_2 ایفا می‌کنند (شکل ۸-ب).



شکل ۷- بهترین مدل رگرسیون خطی چند متغیره برازش یافته برای آلاینده‌های جوی معیار با استفاده از روش بهترین زیرمجموعه‌ها

Fig. 7- The best fitted multiple linear regression model for criteria air pollutants using the best subsets regression

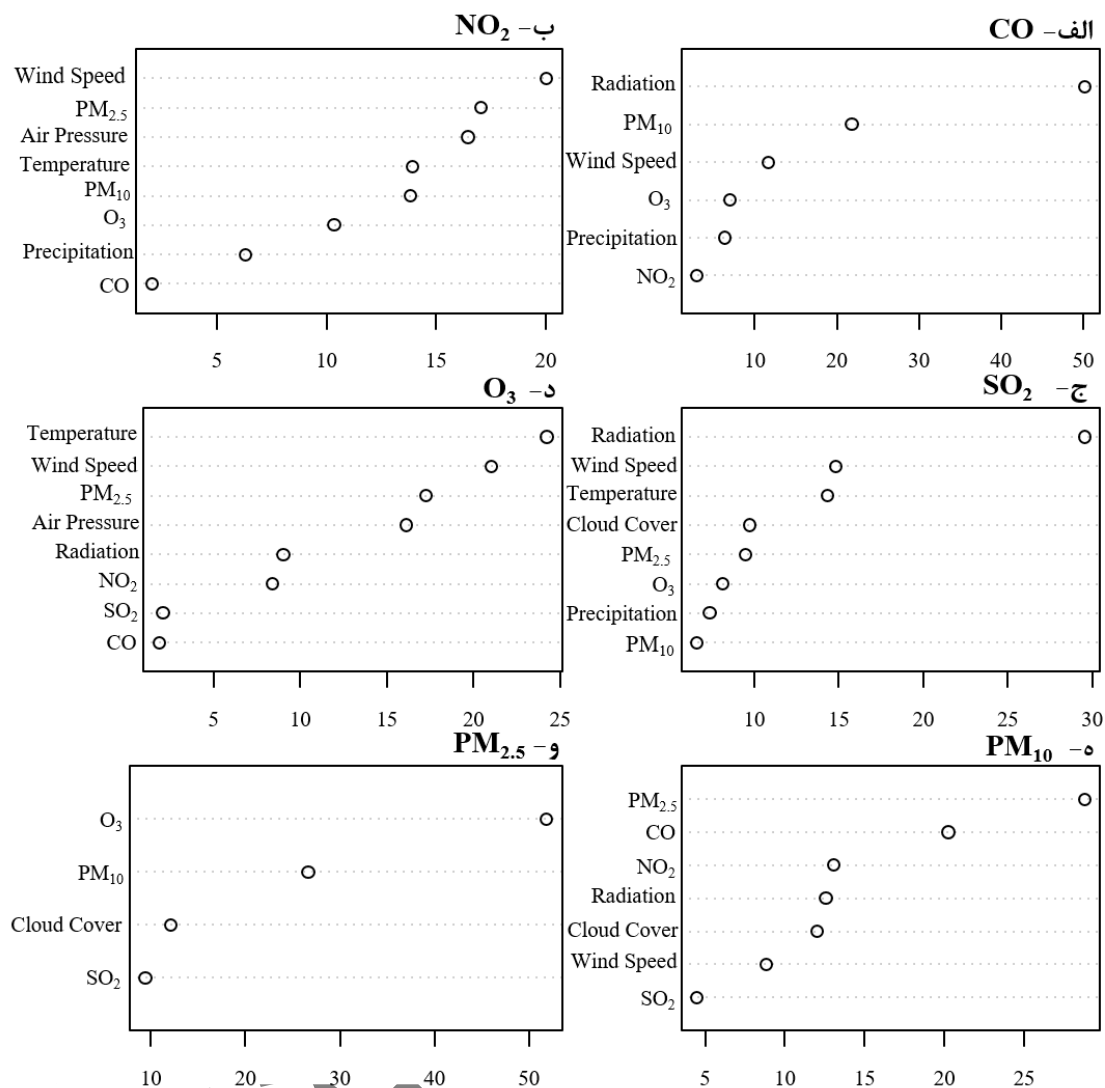
ترکیب خطی از ۸ متغیر مستقل دما، بارش، سرعت باد، تابش، ابرناکی، O₃، PM₁₀ و PM_{2.5}، بهترین مدل رگرسیون چند متغیره در تبیین تغییرپذیری متغیر وابسته SO₂ در شهر تبریز را به دست می‌دهد (شکل ۷-ج). در این میان، متغیرهای O₃ و PM_{2.5} با تأثیر مثبت و سایر متغیرها با تأثیر منفی بر متغیر پاسخ همراه هستند. از میان عناصر هواشناسی، تابش،

سرعت باد و دما و از میان آلاینده‌های جوی آلاینده $PM_{2.5}$ بیشترین تأثیر را در تغییرپذیری SO_2 ایفا می‌کنند (شکل ۸-ج).

مدل خطی چندمتغیره برازش یافته از متغیرهای دما، سرعت باد، فشار هوا، تابش، CO ، NO_2 ، SO_2 و $PM_{2.5}$ ، خطای پیش‌بینی متغیر پاسخ O_3 را به کمترین مقدار ممکن می‌رساند. جز متغیرهای فشار هوا و $PM_{2.5}$ ، سایر متغیرها تغییرپذیری O_3 را در جهت مثبت تحت تأثیر قرار داده و میانگین پاسخ O_3 با یک واحد افزایش در مقدار هر یک از این متغیرها با فرض ثابت نگه داشتن سایر متغیرهای مستقل منتخب، به اندازه ضریب رگرسیون معادل آن‌ها افزایش می‌یابد (شکل ۷-د). از میان متغیرهای پیشگو، متغیرهای دما، سرعت باد، $PM_{2.5}$ و فشار هوا به ترتیب بیشترین نقش را در تغییرات غلظت آلاینده از این ایفا می‌کنند (شکل ۸-د).

مدل رگرسیون خطی برازش یافته از متغیرهای مستقل سرعت باد، تابش، ابرناکی، CO ، NO_2 ، SO_2 و $PM_{2.5}$ قادر به محاسبه و توجیه 0.693 از تغییرات متغیر PM_{10} است (شکل ۷-ه) و از میان مجموعه متغیرهای مستقل، $PM_{2.5}$ ، CO و NO_2 به ترتیب با بیشترین میزان تأثیر بر تغییرات آلاینده PM_{10} همراه هستند (شکل ۸-ه).

بهترین مدلی که رابطه خطی میان آلاینده $PM_{2.5}$ و عناصر هواشناسی و سایر آلاینده‌های جوی معیار را با تبیین $76/5\%$ تغییرپذیری متغیر پاسخ به دست می‌دهد، مدلی چند متغیره متشکل از متغیرهای ابرناکی، O_3 ، SO_2 و PM_{10} است که تمامی متغیرها جز O_3 ، به تغییرپذیری متغیر پاسخ در جهت مثبت می‌انجامند (شکل ۷-و) و متغیرهای مستقل O_3 و PM_{10} به ترتیب دارای بیشترین تأثیر در تغییرات غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ هستند (شکل ۸-و). بطور کلی می‌توان گفت نتایج حاصل از برازش مدل رگرسیون خطی چندمتغیره با استفاده از روش بهترین زیرمجموعه‌ها حاکی از آن است که از میان پارامترهای هواشناسی مورد بررسی، پارامتر سرعت باد و پس از آن تابش و از میان آلاینده‌های جوی معیار، آلاینده ذرات معلق ($PM_{2.5}$ و PM_{10}) و سپس ازن به عنوان مؤثرترین متغیرهای معنادار در تبیین تغییرپذیری متغیرهای پاسخ در هر برازش مدل شناخته می‌شوند.



شکل ۸- اهمیت نسبی متغیرهای پیشگو در تبیین تغییرپذیری هر یک از آلاینده‌های جوی معیار در تبریز

Fig. 8- The relative importance of predictor variables in explaining the variability of each criteria air pollutants in Tabriz

نتایج حاصل از برازش مدل‌های ناپارامتریک غیرخطی جمعی تعمیم یافته برای هر یک از آلاینده‌های معیار در جدول ۱ ارائه شده است. در این مطالعه بهترین GAM برای هر آلاینده با محدود کردن درجه مدل به ۳ و صرفاً بر اساس متغیرهای معنادار و کمترین مقدار اطلاعاتی AIC برازش یافت. به همین دلیل گزینش متغیر در مدل‌های جمعی برازش یافته با بخش قبل اندکی متفاوت است. با این حال، مدل‌های جمعی نیز نقش مؤثر عناصر جوی بویژه سرعت باد، تابش، فشار هوا و دما در تغییر غلظت آلاینده‌های هوا در تبریز را به خوبی آشکار می‌سازند. نتایج مقایسه عملکرد دو مدل برازش یافته بر اساس مقادیر ضریب تبیین تعدیل شده ($adjR^2$) و معیار اطلاعاتی آکائیک (AIC) برای هر یک از آلاینده‌ها در

جدول ۲ ارائه شده است. $adjR^2$ نشان دهنده نسبتی از کل تغییرات است که بوسیله مدل توجیه یا بیان می‌شود و هرچه مقدار آن بالاتر باشد، مدل بهتر است. AIC نیز از مطمئن‌ترین معیارها برای مقایسه مدل‌ها با تعداد پارامترهای مختلف می‌باشد که هرچه مقدار آن کمتر باشد، مدل بهتر است.

جدول ۱- نتایج برازش مدل جمعی تعمیم یافته برای هریک از آلاینده‌های جوی بر اساس کمترین مقدار AIC

Table 1- The results of fitting the generalized additive model for each of the air pollutants based on the lowest AIC value

متغیر وابسته	متغیرهای مستقل تأثیرگذار معنادار
dependent variable	Significant influencing independent variables
کربن مونوکسید CO	سرعت باد*، فشار هوا**، تابش***، O_3 ** و PM_{10} ***
نیترژن دی اکسید NO ₂	سرعت باد***، فشار هوا**، CO**، PM_{10} *** و $PM_{2.5}$ *
گوگرد دی اکسید SO ₂	دما***، سرعت باد*، تابش***، ابرناکی***، O_3 **، PM_{10} ** و $PM_{2.5}$ *
اوزن O ₃	دما***، سرعت باد*، فشار هوا**، تابش***، CO**، NO ₂ **، SO ₂ **، PM_{10} *** و $PM_{2.5}$ *
ذرات معلق با قطر کمتر از ۱۰ میکرون PM ₁₀	سرعت باد***، تابش***، CO**، NO ₂ ** و $PM_{2.5}$ **
ذرات معلق با قطر کمتر از ۲/۵ میکرون PM _{2.5}	دما*، CO**، NO ₂ **، SO ₂ **، O_3 ** و PM_{10} ***

مقادیر دارای **، ***، * و * به ترتیب دارای معناداری آماری در سطوح ۰/۰۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۰۵ می‌باشند.

جدول ۲- مقایسه عملکرد مدل‌های خطی و غیر خطی برازش یافته برای هر یک از آلاینده‌های جوی

Table 2- Comparison of the performance of fitted linear and non-linear models for pollutants

مدل جمعی تعمیم یافته		مدل رگرسیون خطی چندگانه		آلاینده Pollutant
Generalized Additive Model		Multiple Linear Regression Model		
معیار اطلاعاتی آکائیک	ضریب تبیین تعدیل شده	معیار اطلاعاتی آکائیک	ضریب تبیین تعدیل شده	
AIC	adj R ²	AIC	adj R ²	
78.88	0.715	86.621	0.661	کربن مونوکسید CO
304.68	0.706	291.114	0.892	نیتروژن دی اکسید NO ₂
253.03	0.78	278.598	0.646	گوگرد دی اکسید SO ₂
273.19	0.929	291.114	0.892	اوزن O ₃
410.21	0.772	426.274	0.693	ذرات معلق PM ₁₀
262.83	0.845	283.695	0.765	ذرات معلق PM _{2.5}

همانطور که ملاحظه می‌گردد GAM با در نظر گرفتن رابطه غیر خطی میان غلظت آلاینده‌های جوی و عناصر هواشناسی در مقایسه با MLR، قادر به محاسبه و توجیه درصد بیشتری از تغییرات تمامی آلاینده‌های جوی معیار به جز آلاینده NO₂ است. به نظر می‌رسد مدل رگرسیون خطی در تجزیه و تحلیل روابط موجود میان متغیر وابسته NO₂ و مجموعه متغیرهای مستقل دارای عملکرد بهتری است.

نتیجه‌گیری

یافته‌های پژوهش حاضر حاکی از آن است که به جز آلاینده O₃، سطح غلظت آلاینده‌های CO، NO₂، SO₂ و PM_{2.5} در دوره سرد سال، تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی، حاکمیت هوای بسیار سرد و مرطوب، وقوع پدیده وارونگی دما و در نتیجه تجمع آلاینده‌ها در نزدیکی سطح زمین بالاتر از دوره گرم سال است. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل همبستگی پیرسون در سطح اطمینان ۹۵ درصد در شهر تبریز، همبستگی مثبت معنادار میان آلاینده‌های NO₂ و PM_{2.5}، SO₂ و PM_{2.5} و همچنین آلاینده‌های PM_{2.5} و PM₁₀، نشان از نقش بارز پیش‌سازهای NO₂ و SO₂ در تشکیل ذرات ثانویه سولفات و

نیترات به عنوان اجزای مهم ذرات معلق در جو و انتشار این آلاینده‌ها از منابع مشابه دارد. این نتایج با یافته‌های حاصل از مطالعه Song *et al.* (2016) در جیانگسو چین مطابقت دارد. همچنین یافته‌های مطالعه حاضر نشان می‌دهد که سطح غلظت آلاینده‌های هوا در تبریز در طول ۲۰۲۱-۲۰۰۴ تحت تأثیر شرایط جوی قرار داشته و میزان تأثیر بسته به نوع آلاینده و زمان متفاوت است. با این حال در طول کل دوره آماری در مقیاس زمانی ماهانه، آلاینده‌های NO_2 ، $\text{PM}_{2.5}$ ، CO و SO_2 دارای همبستگی منفی معنادار و در مقابل، آلاینده O_3 دارای همبستگی مثبت قوی معناداری با پارامتر میانگین دما به عنوان یک مؤثر در شیمی آلاینده‌ها و انتشار آنها است. همبستگی منفی معنادار مشاهده شده میان بارش و سطح غلظت آلاینده‌های O_3 و ذرات معلق (PM_{10}) حاکی از کاهش میزان آلاینده‌ها با افزایش بارش است و تأثیر این عنصر هواشناسی بر پراکندگی آلاینده‌ها و در نتیجه بهبود کیفیت هوا در تبریز را به تصویر می‌کشد. همبستگی منفی بارش با غلظت آلاینده‌ها در مقیاس ماهانه در چین توسط Liu *et al.* (2020) و در دوره گرم سال در لینفن نیز توسط Cui *et al.* (2018) گزارش شده است. همبستگی پارامتر میانگین سرعت باد با غلظت آلاینده‌های NO_2 ، $\text{PM}_{2.5}$ ، CO و SO_2 منفی و با O_3 و PM_{10} مثبت است که بیانگر نقش بسزای متغیر باد در تغییر کیفیت هوا از طریق پراکنش یا تجمع آلاینده‌ها در یک منطقه جغرافیایی بسته به شدت و جهت آن است. همبستگی منفی میان غلظت آلاینده‌های NO_2 ، PM_{10} ، $\text{PM}_{2.5}$ ، CO و SO_2 و سرعت باد، همبستگی مثبت میان غلظت O_3 و سرعت وزش باد توسط Liu *et al.* (2020)، Cui *et al.* (2018) و همبستگی مثبت میان PM_{10} و سرعت باد توسط Mohammad Khorshiddoust *et al.* (2018) نیز تأیید شده است. جز آلاینده‌های O_3 و PM_{10} ، تمامی آلاینده‌های مورد مطالعه دارای همبستگی مثبت با میانگین ماهانه رطوبت نسبی هستند که این همبستگی مثبت تأیید کننده تأثیر رطوبت نسبی در به دام انداختن آلاینده‌ها در نزدیکی سطح زمین و جلوگیری از پخش شدن آنها در جو است. افزایش سطح غلظت آلاینده‌ها با افزایش رطوبت نسبی توسط Dandotiya *et al.* (2018) و Cui *et al.* (2018) و کاهش غلظت آلاینده‌ها با افزایش رطوبت نسبی در مطالعات دیگر گزارش شده است (Kayes *et al.*, 2019; Masoudi *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2020). رابطه مستقیم متغیر فشار هوا با غلظت آلاینده‌های NO_2 ، $\text{PM}_{2.5}$ ، CO ، SO_2 و PM_{10} و رابطه معکوس آن با سطح غلظت O_3 در تبریز، به ترتیب با تأثیر این پارامتر در افزایش میزان آلاینده‌ها و کاهش کیفیت هوا از طریق استقرار آلاینده‌ها در شرایط پر فشار و پایداری هوا و همچنین نقش آن در کاهش میزان آلاینده‌ها و در نتیجه بهبود کیفیت هوا بواسطه پخش آلاینده‌ها در شرایط کم فشار و تلاطم نسبتاً قوی هوا مطابقت دارد. این نتایج با یافته‌های حاصل از مطالعات محققین دیگر همخوانی دارد (Liu *et al.*, 2020). همانند پارامتر دما، عناصر مجموع ساعات آفتابی و میزان تابش کلی در ماه همبستگی منفی معنادار متوسط تا ضعیف و بسیار ضعیفی با آلاینده‌های جوی به جز O_3 و PM_{10} دارند. پارامتر ابرناکی نیز دارای

همبستگی مثبت ضعیف با آلاینده‌های NO_2 و $\text{PM}_{2.5}$ و همبستگی مثبت بسیار ضعیف با CO و همبستگی منفی متوسط با O_3 و همبستگی منفی بسیار ضعیف با PM_{10} است. به طور کلی می‌توان گفت سطح غلظت آلاینده‌های NO_2 ، $\text{PM}_{2.5}$ ، CO و SO_2 در تبریز در طول ۱۷ سال مورد مطالعه دارای همبستگی منفی با عناصر دما، سرعت باد، مجموع ساعات آفتابی، میزان تابش کلی و در مقابل دارای همبستگی مثبت با رطوبت نسبی و فشار هوا است. این در حالی است که غلظت آلاینده O_3 دارای همبستگی مثبت قابل توجه با متغیرهای دما، ساعات آفتابی، سرعت باد، تابش و همبستگی منفی با رطوبت نسبی، فشار هوا، ابرناکی و بارش است. نتایج حاصل از برازش مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه (MLR) و جمعی تعمیم یافته (GAM) برای هریک از آلاینده‌های جوی معیار در شهر تبریز نیز حاکی از آن است که هر دوی این مدل‌ها می‌توانند بطور مؤثری به تبیین تغییرپذیری غلظت آلاینده‌های جوی به عنوان متغیرهای پاسخ با استفاده از پارامترهای هواشناسی و سایر آلاینده‌ها به عنوان مجموعه متغیرهای مستقل بپردازند و روابط خطی و غیرخطی میان متغیر پاسخ و متغیرهای پیشگو را توضیح دهند. با این حال، به نظر می‌رسد که GAM در مقایسه با MLR، در تحلیل روابط میان غلظت آلاینده‌های جوی و عناصر هواشناسی، انعطاف‌پذیرتر، آزادتر و مناسب‌تر عمل می‌کند و قادر به توجیه درصد بیشتری از تغییرات تمامی آلاینده‌های جوی معیار به جز آلاینده NO_2 است. بر مبنای خروجی مدل‌های MLR و GAM، به نظر می‌رسد که از میان عناصر هواشناسی، پارامترهای سرعت باد، تابش، دما و فشار هوا مهمترین عوامل جوی مرتبط با غلظت آلاینده‌ها و از میان آلاینده‌های جوی مورد مطالعه، آلاینده‌های ذرات معلق (PM_{10} و $\text{PM}_{2.5}$) و سپس ازن مهمترین عوامل آلودگی مرتبط با غلظت آلاینده‌ها در تبریز هستند. نقش مؤثرتر پارامترهای بیشینه سرعت باد، دما و فشار هوا در میزان غلظت آلاینده‌های CO ، SO_2 و PM_{10} در دوره‌ی سرد سال در تبریز توسط Mohammad Khorshiddoust *et al.* (2018) و اثرات قوی‌تر متغیرهای هواشناسی سرعت باد و دما در تهران نیز در مطالعه‌ای دیگر تأیید شده است (Ramezani *et al.*, 2018).

سپاسگزاری

این مقاله از رساله دکتری مصوب در دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی تهران استخراج شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از سازمان هواشناسی کشور و اداره کل حفاظت محیط زیست استان آذربایجان شرقی که ما را در انجام این پژوهش یاری دادند، اعلام کنند. لازم به ذکر است که در انجام این پژوهش از هیچ سازمان یا نهادی کمک مالی دریافت نگردیده است.

- Barzeghar, V., Hassanvand, M.S., Faridi, S., Abbasi, S. and Gholampour, A., 2022. Long-term trends in ambient air pollutants and the effect of meteorological parameters in Tabriz, Iran. *Urban Climate*. 42, 101119.
- Birinci, E., Deniz, A. and Özdemir, E.T., 2023. The relationship between PM10 and meteorological variables in the mega city Istanbul. *Environmental Monitoring and Assessment*. 195(2), 304.
- Chambers, J.M., 2017. Linear models. In: *Statistical Models in S*. Routledge Press, Abingdon, Oxfordshire, pp. 95-144.
- Cui, H., Ma, R. and Gao, F., 2018. Relationship between meteorological factors and diffusion of atmospheric pollutants. *Chemical Engineering Transactions*. 71, 1417-1422.
- Dandotiya, B., Jadon, N. and Sharma, H.K., 2019. Effects of meteorological parameters on gaseous air pollutant concentrations in urban area of Gwalior City, India. *Environmental Claims Journal*. 31(1), 32-43.
- Efron, B., 1983. Estimating the error rate of a prediction rule: improvement on cross-validation. *Journal of the American statistical association*. 78(382), 316-331.
- Fox, J. and Monette, G., 1992. Generalized collinearity diagnostics. *Journal of the American Statistical Association*. 87(417), 178-183.
- Gasmi, K., Aljalal, A., Al-Basheer, W. and Abdulahi, M., 2017. Analysis of NO_x, NO and NO₂ ambient levels as a function of meteorological parameters in Dhahran, Saudi Arabia. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 211, 77-86.
- Gorai, A.K., Tuluri, F., Tchounwou, P.B. and Ambinakudige, S., 2015. Influence of local meteorology and NO₂ conditions on ground-level ozone concentrations in the eastern part of Texas, USA. *Air Quality, Atmosphere and Health*. 8, 81-96.
- He, J.J., Yu, Y., Liu, N., Zhao, S.P., Chen, J.B. and Yu, L.J., 2016. Impact of meteorological conditions and pollutant emissions on winter air quality in Lanzhou. *Plateau Meteor*. 35(6), 1577-1583.
- Horne, J.R. and Dabdub, D., 2017. Impact of global climate change on ozone, particulate matter, and secondary organic aerosol concentrations in California: A model perturbation analysis. *Atmospheric environment*. 153, 1-17.
- Jayamurugan, R., Kumaravel, B., Palanivelraja, S. and Chockalingam, M.P., 2013. Influence of temperature, relative humidity and seasonal variability on ambient air quality in a coastal urban area. *International Journal of Atmospheric Sciences*. 9, 1-7.
- Johnson, A.C., 2022. Correlation Study of Meteorological Parameters and Criteria Air Pollutants in Jiangsu Province, China. *Pollution*. 8(1), 341-354.
- Kayes, I., Shahriar, S.A., Hasan, K., Akhter, M., Kabir, M.M. and Salam, M.A., 2019. The relationships between meteorological parameters and air pollutants in an urban environment. *Global Journal of Environmental Science and Management*. 5(3), 265-278.
- Kenty, K.L., Poor, N.D., Kronmiller, K.G., McClenny, W., King, C., Atkeson, T. and Campbell, S.W., 2007. Application of CALINE4 to roadside NO/NO₂ transformations. *Atmospheric Environment*. 41(20), 4270-4280.

- Kitamori, K., Manders, T., Dellink, R. and Tabeau, A.A., 2012. OECD environmental outlook to 2050: the consequences of inaction. OECD.
- Liu, Y., Zhou, Y. & Lu, J. 2020. Exploring the relationship between air pollution and meteorological conditions in China under environmental governance. *Scientific reports*. 10(1), 14518.
- Ma, Y., Yang, S., Zhou, J., Yu, Z. and Zhou, J., 2018. Effect of ambient air pollution on emergency room admissions for respiratory diseases in Beijing, China. *Atmospheric Environment*. 191, 320-327.
- Mahanta, S.K., Panda, B.S., Pati, S.S., Mallik, M.R., Mahanta, B., Biswas, K. and Sahu, R., 2021. Influence of Meteorological Variables on Ambient Air Pollutants of a Coastal District in Eastern India. *Oriental Journal of Chemistry*. 37(1), 194-203.
- Masoudi, M., Behzadi, F. and Sakhaei, M., 2019. Assessment of NO₂ levels as an air pollutant and its statistical modeling using meteorological parameters in Tehran, Iran. *Caspian Journal of Environmental Sciences*. 17(3), 227-236.
- Meng, K., Cheng, X., Xu, X., Qu, X., Ma, C., Zhao, Y., Li, Y., Yang, Y., Zhang, W. and Ding, G., 2017. Spatial-temporal variations of pollutant emission sources inverted by adaptive nudging scheme over Beijing-Tianjin-Hebei region based on the CMAQ model. *Acta Scientiae Circumstantiae*. 37(1), 52-60.
- Mohammad Khorshiddoust, A., Mohammadi, G.H., Aghlmand, F. and Hosseini Sadr, A., 2018. Descriptive-statistical Analysis of the Relationship between Atmospheric Conditions and Urban Pollution in Tabriz. *Environmental Management Hazards*. 5(2), 217-230. (In Persian with English abstract).
- Mukaka, M.M., 2012. A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. *Malawi medical journal*. 24(3), 69-71.
- Oji, S. and Adamu, H., 2020. Correlation between air pollutants concentration and meteorological factors on seasonal air quality variation. *Journal of air pollution and health*. 5(1), 11-32.
- Pearson, K., 1895. Notes on Regression and Inheritance in the Case of Two Parents. *Proceedings of the Royal Society of London*. 58, 240-242.
- R Core Team, R., 2023. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org>
- Rad, A.K, Shamshiri, R.R., Naghipour, A., Razmi, S.O., Shariati, M., Golkar, F. and Balasundram, S.K., 2022. Machine Learning for Determining Interactions between Air Pollutants and Environmental Parameters in Three Cities of Iran. *Sustainability*. 14(13), 8027.
- Radaideh, J.A., 2017. Effect of meteorological variables on air pollutants variation in arid climates. *J. Environ. Anal. Toxicol*. 7(4), 1000478.
- Ramezani, R., Alijani, B. and Borna, R., 2018. Explaining the Effects of Climate Elements in Tehran's Metropolis Air Quality. *Geographical Researches*. 33(3), 154-169. (In Persian with English abstract).
- Shahmohammadi, A., Bayat, A. and Mashhadizadeh Maleki, S., 2020. Investigation of nitrogen dioxide behavior in Mashhad and its relationship with Meteorological Parameters. *Journal of Applied researches in Geographical Sciences*. 20(58), 71-85. (In Persian with English abstract).
- Sirithian, D. and Thanatrakolsri, P., 2022. Relationships between Meteorological and Particulate Matter Concentrations (PM_{2.5} and PM₁₀) during the Haze Period in Urban and Rural Areas, Northern Thailand. *Air, Soil and Water Research*. 15, 1-15.

- Song, R., Yang, L., Liu, M., Li, C. and Yang, Y., 2019. Spatiotemporal distribution of air pollution characteristics in Jiangsu Province, China. *Advances in Meteorology*. 2019, 1-14.
- Tian, J., Fang, C., Qiu, J. and Wang, J., 2021. Analysis of Ozone pollution characteristics and influencing factors in Northeast economic cooperation region, China. *Atmosphere*. 12(7), 843.
- TLboFcbA, M., 2020. leaps: Regression Subset Selection. R package version 3.1, <https://CRAN.R-project.org/package=leaps>.
- Venables, W.N. and Ripley, B.D., 2002. *Modern Applied Statistics with S*, Fourth ed. Springer.
- Wei, T., Simko, V. and Package 'corrplot, R., 2022.': Visualization of a Correlation Matrix. (Version 0.92).
- WHO., 2021. Air pollution and health: Summary. Retrieved March 27, 2021, from <https://www.who.int/airpollution/ambient/about/en/>
- Wood, S.N., 2017. *Generalized Additive Models: An Introduction with R*, Second ed. Chapman and Hall/CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Wu, Y., Zhou, B., Zhao, A., Chen, D., Wang, X., and Yan, X., 2017. Characteristics of atmospheric pollutant concentration in urban area of Baoji and their relationship with meteorological factors. *Acta Agriculturae Jiangxi*. 29(6), 100-104.
www.Tabriz.ir.
- Zhai, S., Jacob, D.J., Wang, X., Shen, L., Li, K., Zhang, Y., Gui, K., Zhao, T. and Liao, H., 2019. Fine particulate matter (PM_{2.5}) trends in China, 2013–2018: separating contributions from anthropogenic emissions and meteorology. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 19(16), 11031-11041.
- Zhang, H., Wang, Y., Hu, J., Ying, Q. and Hu, X.M., 2015. Relationships between meteorological parameters and criteria air pollutants in three megacities in China. *Environmental research*. 140, 242-254.
- Zhang, Q., Geng, G., Wang, S., Richter, A. and He, K., 2012. Satellite remote sensing of changes in NO_x emissions over China during 1996–2010. *Chinese Science Bulletin*. 57(22), 2857–2864.
- Zhou, W. and Liang, P., 2013. The Possible Effect of Climate Change on Air Quality During Autumn in Shanghai. *Resour. Sci*. 35(5), 1044-1050.
- Żyromski, A., Biniak-Pieróg, M., Burszta-Adamiak, E. and Zamiar, Z., 2014. Evaluation of relationship between air pollutant concentration and meteorological elements in winter months. *Journal of Water and Land Development*. 22(1), 25-32.

Analyzing the relationship between meteorological elements and criteria atmospheric pollutants in Tabriz using statistical modeling

Parisa Kahrari,¹ Shahriar Khaledi,^{1*} Ghasem Keikhosravi¹ and Seyed Jalil Alavi²

¹ Department of Natural Geography, Faculty of Earth Sciences, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran

² Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Tarbiat Modarres, Mazandaran, Iran

Introduction: The rapid increase in population, growth of urbanization and industrialization in recent years, which is generally associated with an increase in demand and energy consumption, and as a result, an increase in pollutant emission sources, has exacerbated air pollution as one of the biggest current crises of urban societies and consequently health risks and related social inequalities in terms of time and space. On the other hand, meteorological parameters directly affect the amount of pollutants as well as the duration of their presence in the atmosphere, and the present research was conducted in order to investigate this effect and discover the relationships between criteria air pollutants and atmospheric elements.

Material and methods: Besides investigating the status of meteorological elements (temperature, precipitation, wind speed, relative humidity, radiation, sunshine hours and cloudiness) and criteria air pollutants (carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO₂), sulfur dioxide (SO₂), ozone (O₃) and particulate matters with aerodynamic diameters less than 10 microns and 2.5 microns (PM₁₀ and PM_{2.5})) in Tabriz city during 2004-2021, the present study has explored the relationships between pollutants and meteorological parameters in monthly and seasonal time scales using Pearson's correlation test at the 95% confidence level and the effect of these elements on the concentration of pollutants using Multiple Linear Regression (MLR) and Generalized Additive Model (GAM) in R 4.3.1 statistical software.

Results and discussion: Based on the results of Pearson correlation analysis, NO₂ and PM_{2.5}, SO₂ and PM_{2.5} pollutants and PM_{2.5} and PM₁₀ pollutants have shown significant positive correlation in pairs, so it seems that these pollutants have similar emission sources. Also, the results of this research demonstrate that the concentration of criteria air pollutants in Tabriz was affected by weather conditions during the entire statistical period in the monthly and seasonal time scales and NO₂ and PM_{2.5} pollutants have the most negative monthly correlation with the parameters of temperature, wind speed and sunshine hours and the most positive correlation with relative humidity; PM_{2.5} has the most positive correlation with pressure; CO and SO₂ have the most negative correlation with radiation; O₃ has a strong positive correlation with temperature, wind speed and sunny hours and the most negative correlation with pressure, relative humidity and cloudiness; and NO₂ and PM₁₀ pollutants have the most positive correlation with cloudiness. The results

* Corresponding Author: *Email Address.* shahriar_khaledi6@yahoo.com

of fitting Multiple Linear Regression (MLR) and Generalized Additive Model (GAM) for each criteria air pollutant in Tabriz city indicate the better performance of GAM in analyzing the relationships between all air pollutants and the set of independent variables except NO₂.

Conclusion: The results of this research indicate that the effect of atmospheric elements on the concentration of criteria pollutants in Tabriz city is different depending on the type of pollutant and at different times, and it can be acknowledged that the effect of a specific meteorological parameter on air pollution is uncertain. However, wind speed, radiation, temperature and air pressure are the most important meteorological elements related to the concentration of pollutants in Tabriz city. Also, the consequences of the research suggest that both MLR and GAM can describe the variability of the response variable by a set of predictor variables and explain the linear and non-linear relationships between them. However, considering the non-linear relationship between the concentration of atmospheric pollutants and meteorological elements, GAM is able to justify a higher percentage of changes in all criteria atmospheric pollutants except NO₂.

Keywords: Additive Models, Air Pollution, Atmospheric Elements, Correlation Analysis, regression analysis