

تحلیل وضعیت بلندمدت آلاینده‌های اصلی و تعیین دوره‌های آلودگی هوا در کلان‌شهر تهران

الهام پیشداد^{۱*}، بهلول علیجانی^۲، عباسعلی علی‌اکبری بیدختی^۳ و مهری اکبری^۴

۱. دانشجوی دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲. استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۳. استاد، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۴. استادیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

(دریافت: ۹۸/۹/۵، پذیرش نهایی: ۹۹/۳/۲۰)

چکیده

آلودگی هوا و تغییرات اقلیم دو معضل کنونی جوامع انسانی هستند که از طریق فرآیندهای تابشی، دینامیکی و شیمیایی باهم مرتبط بوده و برهم تأثیر متقابل دارند. افزایش آلاینده‌های اصلی هوا طی واکنش‌های شیمیایی و فتوشیمیایی در جو با برهم‌زدن تعادل انرژی کره‌زمین سبب واداشت تابشی شده و دستاوردهای سریع منفی آب‌وهوایی همچون گرمایش جوی را به‌همراه دارند. با توجه به اهمیت این مسأله و باهدف دست‌یابی به یک رویکرد یکپارچه و مشترک در کاهش آلودگی هوا و تعدیل تغییرات آب‌وهوایی، آگاهی از وضعیت آلاینده‌های اصلی از دیدگاه تغییرات اقلیمی امری ضروری است. در این پژوهش جهت مطالعه وضعیت سالانه، فصلی و ماهانه بلندمدت (۱۳۹۶-۱۳۸۱) شاخص (AQI) و غلظت شش آلاینده ($PM_{2.5}$ ، PM_{10} ، O_3 ، NO_2 ، SO_2 ، CO) از داده‌های شرکت کنترل کیفیت هوای تهران و برای تحلیل آماری از روش آماری برآورد (تخمین) روند خطی سری زمانی، توزیع فراوانی و محاسبه درصد تغییرات استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که سطح غلظت اکثر آلاینده‌ها (به‌استثنا $CO-SO_2$ بهبود یافته) بیش از دو تا ۴ برابر حدود استانداردهای ملی و بین‌المللی است. متوسط شاخص (AQI) سالانه نیز در سال‌های اخیر (۱۳۸۹-۱۳۹۶) با آلاینده معیار ($PM_{2.5}$) رشد نامطلوب ۱۱٪ داشته که این افزایش در زمستان به‌عنوان نامطلوب‌ترین پیک آلودگی فصلی با رشد ۲۴٪ در شاخص کیفی و ۷۰٪ در فراوانی روزهای آلوده همراه بوده و بیشینه ماهانه آن نیز در آذر و دی است. لذا تدوین استراتژی‌های میان‌مدت سخت‌گیرانه‌تر در کاهش گسیل آلاینده‌های جوی نه‌تنها در بهبود آلودگی کلان‌شهر تهران مؤثر است بلکه می‌تواند همسو با تلاش‌های بین‌المللی سیاست‌های بلندمدت در تعدیل تغییرات اقلیمی را پشتیبانی کند.

واژه‌های کلیدی: غلظت، شاخص AQI، آلاینده معیار (CAP)، روند، تغییر اقلیم، تهران.

۱. مقدمه

از حدود استانداردهای ملی و دستورالعمل‌های بین‌المللی به‌ویژه سازمان بهداشت جهانی (WHO AQGs) زندگی می‌کنند (آژانس محیط زیست اروپا (EEA)، ۲۰۱۷). اگرچه بهداشت عمومی جامعه متأثر از آلودگی هوای است اما تشدید بیماری‌های مرتبط با آلودگی هوا همچون تنفسی بیشتر مرتبط با شرایط جوی مؤثر در تجمع و تشدید آلودگی در سطح است (دماتو و همکاران، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴). از طرفی با استناد به گزارش اول هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) عامل ایجاد تغییرات قابل توجه کنونی در شرایط آب‌وهوایی افزایش غلظت انتشار گازهای

شهر، آلودگی هوا و تغییرات آب‌وهوایی از مفاهیم درهم‌تنیده عصر جدید است که به‌دلیل پیامدهای منفی قابل توجه این دو مخاطره به‌عنوان اصلی‌ترین معضلات زیست‌محیطی حال‌حاضر کره زمین شناخته شده‌اند (ACCIONA، ۲۰۱۹). به‌طوری‌که افزایش رشد یک‌درصدی در شهرنشینی، مصرف انرژی و درآمد سرانه، منجر به افزایش آلودگی هوا به‌ترتیب ۱/۳۷٪، ۱/۷۱٪ و ۱/۰۲٪ می‌شود (فطرس و فتحی، ۱۳۹۰) و لذا در حال حاضر ۹۲٪ از جمعیت جهانی ساکن در مناطق شهری در هوای ناسالم با میزان شاخص کیفیت هوا (AQI) فراتر

گلخانه‌ای همچون آلاینده‌های (CO₂)، (O₃) و (CH₄) ناشی از فعالیت‌های مختلف جوامع انسانی است (هگزل و همکاران، ۲۰۰۷؛ پاری و همکاران، ۲۰۰۷). براین اساس مهم‌ترین تأثیر افزایش آلاینده‌های هوا علاوه بر بهداشت و محیط‌زیست، ایجاد تغییرات اساسی در اقلیم و تشدید گرمایش جوی است. بدین صورت که آلاینده‌های شیمیایی موجود در جو همراه با آلاینده‌های منتشره از فعالیت‌های انسانی با تغییر در نسبت ترکیبات سمی جو، سبب واداشت اقلیمی شده و به‌عنوان یک بازخورد برای سیستم اقلیمی عمل می‌کنند (چپکا و پن، ۲۰۰۷؛ فیور و همکاران، ۲۰۱۵). این شرایط با برهم‌زدن تعادل انرژی کره زمین دستاوردهای منفی سریع آب‌وهوایی به‌همراه داشته و درنهایت سبب گرمایش اقلیمی در مقیاس محلی، منطقه‌ای و حتی جهانی می‌شود (کمسیون اروپا، ۲۰۱۰). لذا کیفیت هوا و تغییرات اقلیمی از طریق فرآیندهای تابشی، دینامیکی و شیمیایی باهم مرتبط بوده، برهم تأثیرات متقابل گذاشته و در مقیاس‌های چندگانه عمل می‌کنند (پیلینگ و همکاران، ۲۰۰۷؛ سازمان حفاظت از محیط زیست آمریکا (U.S EPA)، ۲۰۱۹).

آلاینده‌های مؤثر در تغییر شرایط آب‌وهوایی علاوه بر گازهای گلخانه‌ای همچون CO₂ با طول عمر بالا که مسئول تغییرات بلندمدت اقلیمی (دهه‌ها تا قرن‌ها) است، مربوط به دسته دیگری از آلاینده‌های اقلیمی با طول عمر کوتاه (SLCPS) همچون ذرات معلق (کربن سیاه) و آئروسول‌های سولفات (دی‌اکسید گوگرد) و ازن تروپوسفری همراه با پیش‌سازهای مربوطه اکسیدهای نیتروژن، ترکیبات آلی فرار و منوکسید کربن هستند و به سهم خود مانند آلاینده‌های بلندمدت قادر به تغییرات سریع اقلیمی در دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت (روزها تا ماه‌ها) می‌باشند (کمسیون اروپا، ۲۰۱۰؛ اشم‌دینگ و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین برطبق کنوانسیون آلودگی هوای فرامرزی دوربرد (CLRTAP) آلودگی هوا صرفاً یک پدیده محلی نیست و انتقال طولانی مدت و دوربرد این آلاینده‌ها به‌طور مستقیم و غیرمستقیم سبب افزایش

آلودگی با پیامدهای مشابه در سایر مناطق در مقیاس منطقه‌ای و جهانی می‌شود، درحالی‌که اثرات آلودگی عمدتاً در سطح محلی در نظر گرفته می‌شوند (پلایل، ۲۰۰۹؛ کمسیون اقتصادی سازمان ملل متحد برای اروپا (UNECE)، ۲۰۱۹). بنابراین آگاهی از وضعیت آلاینده‌های کوتاه‌مدت تعیین‌کننده کیفیت هوای محیط‌های شهری نه تنها با دیدگاه محلی جهت کنترل شرایط کیفی برای حفظ سلامت عمومی دارای اهمیت است (جاکوب و وینر، ۲۰۰۹) بلکه درک و توجه به ارتباط به‌هم‌پیوسته این آلاینده‌ها با تغییر اقلیم و نقش آنها در ایجاد واداشت‌های تابشی و تولید گازهای گلخانه‌ای یک مسأله اساسی و جدی است. لذا داشتن چنین دیدگاه جامعی سبب کسب آگاهی چندجانبه و ممانعت از تأثیرات منفی متقابل و نیز هوشیاری از حداقل عواقب احتمالی در نتیجه اجرای اقدامات استراتژیکی برای بهبود یک مشکل بر دیگری خواهد شد. به‌همین دلیل مسائل مذکور جامعه علمی را بر آن داشته تا در واکنش به این معضلات جدی، بازنگری بر فرآیندهای اساسی کنترل کیفیت هوا با توجه به مسأله تغییرات آب‌وهوایی داشته باشند.

یکی از اولین و مؤثرترین اقدامات مهم جهت آگاهی از سطح این آلاینده‌ها باهدف کاهش میزان آلودگی تا حدودی که کمترین تأثیرات منفی را داشته باشد (لانزفیم و همکاران، ۲۰۱۵) تعیین میزان واقعی غلظت و کیفیت آنها براساس حدود استانداردها (ناپاک و همکاران، ۲۰۰۵) و شاخص‌های کیفی معینی است که توسط سازمان‌های محیط‌زیست و محققان مختلف در سطوح بین‌المللی و ملی بسط داده‌شده (کنچن و همکاران، ۲۰۱۵) و مطالعات جهانی مختلفی نیز به‌ویژه در کلان‌شهرها براین اساس انجام شده است. به‌طوری‌که برخی نتایج نشان می‌دهد در طی ۴۰ سال اخیر میزان انتشار شش آلاینده اصلی، به‌ویژه SO₂، به‌دلیل اعمال استراتژی‌های سخت‌گیرانه در کاهش آلودگی هوا باهدف جلوگیری از افزایش تغییرات در اقلیم و نیز به‌دنبال اقدامات ملی و

است (روشن و همکاران، ۱۳۸۸). از طرفی به دلیل انتخاب دوره‌های زمانی کوتاه در پژوهش‌ها و یا مطالعه تنها چند آلاینده، نتایج حاصله دیدگاه منسجمی را در خصوص روند تغییرات آلودگی هوا در بلندمدت با عنایت به نوع آلاینده معیار در هر دوره آلودگی ارائه ندادند. بر این اساس از نظر دانش آب‌وهواشناسی به منظور بالابردن آگاهی تخصصی مسئولین ذیربط از چگونگی تدوین استراتژی‌ها و اتخاذ سیاست‌های ضروری برای رسیدن به استانداردهای بین‌المللی جهت بهبود کیفیت هوای شهر باهدف نهایی بالابردن ظرفیت انطباق و تعدیل تغییر اقلیم در سال‌های آتی داشتن چنین دیدگاه جامعی امری ضروری است.

۲. داده‌ها و روش تحقیق

در این پژوهش به منظور ارائه دانش کاربردی در خصوص وضعیت بلندمدت (۱۳۸۱-۱۳۹۶) سالانه، فصلی و ماهانه شاخص (AQI) و غلظت شش آلاینده اصلی (CO_2 , SO_2 , NO_2 , O_3 , PM_{10} , $PM_{2.5}$) مؤثر در تغییر شرایط اقلیمی از داده‌های آماری دوره (۱۳۸۱-۱۳۹۶) کلیه ۲۱ ایستگاه سنجش آلودگی شرکت کنترل کیفیت هوای در مناطق ۲۲ گانه شهر تهران استفاده شده است (شکل ۱).

این آلاینده‌ها که به‌عنوان آلاینده‌های معیار سنجش کیفیت هوا از سوی سازمان (U.S EPA) معرفی شده (شرکت کنترل کیفیت هوای شهر تهران، ۱۳۹۲) از رایج‌ترین آلاینده‌های در حال اندازه‌گیری می‌باشند. همچنین جهت اعلام وضعیت غلظت آلاینده‌های هوا در سراسر جهان از شاخص‌های آلودگی هوا استفاده می‌شود لذا اولین شاخص در این خصوص شاخص (PSI) است که توسط سازمان (U.S EPA) و بر اساس استاندارد (NAAQS) در سال ۱۹۷۶ تصویب و توسط اوت و هانت توسعه یافت که برای چندین سال در سطح بین‌الملل نیز مورد استفاده قرار گرفت (اوت و هانت، ۱۹۷۶).

بین‌المللی مشترک بر طبق کنوانسیون (CLRTAP) به‌طور چشم‌گیری در کشورهای توسعه‌یافته همچون اروپا (۴۰ تا ۸۰٪) و آمریکای شمالی (۳۰ تا ۴۰٪) از سال ۱۹۹۰ به بعد و نیز ژاپن کاهش یافته ولی روند آلودگی هوا در چین، هند و کشورهای خاورمیانه همچون ایران با اقتصاد روبه رشد سریع دارای روند افزایشی نامطلوب است (پلایل، ۲۰۰۹؛ فیور و همکاران، ۲۰۱۵؛ ناسا، ۲۰۱۵؛ U.S EPA، ۲۰۱۸؛ UNECE، ۲۰۱۹).

کلان‌شهر تهران با فعالیت‌های گوناگون اقتصادی، تجاری و صنعتی و با جمعیتی بیش از ۱۲/۵ میلیون نفر در روز و حدود ۹ میلیون نفر در شب (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۷) با ترافیک بالای بیش از ۱۷ میلیون رفت‌وآمد روزانه (نادری و عباسیان، ۱۳۹۶) دارای سهم تولید آلودگی برابر با ۷۲۶ هزار تن در سال است (روشنی و همکاران، ۱۳۹۷) که مهم‌ترین منبع انتشار این آلودگی منابع متحرک موتوری با بیشترین سهم (۸۵٪) در بین سایر منابع است (نورپرور و فیض، ۱۳۹۳). این عامل انسانی در کنار هندسه شهری و تأثیر عوامل طبیعی همچون توپوگرافی شهر و الگوهای اقلیمی غالب بر منطقه همگی سبب شده که هوای تهران سالانه ازهرسه روز یک روز نامطلوب باشد (فلاح و همکاران، ۱۳۹۵) و لذا این شهر به‌عنوان یکی از آلوده‌ترین شهرهای جهان شناخته شده است (هگر و ساراف، ۲۰۱۸). با بررسی پژوهش‌های پیشین در دسترس مشخص شد که در خصوص وضعیت کیفیت هوا به‌ویژه در شهر تهران کارهای متعددی انجام شده اما عمده تمرکز مطالعات در حوزه سلامت و تأثیرات آلودگی بر بهداشت بافت مورد مطالعه بوده است (پیلینگ و همکاران، ۲۰۰۷). لذا آنچه به‌عنوان شکاف دانش موضوعی در این مطالعات قابل‌ملاحظه است، عدم توجه به مقوله بسیارمهم تغییر اقلیم در تحلیل وضعیت آلاینده‌های کوتاه‌مدت مؤثر در این تغییرات است. زیرا بر اساس یافته‌ها در دوره‌هایی که هوای شهر تهران آلوده است اقلیم آن از نوسان بیشتری از نظر بروز افزایش دما و تغییر اقلیم برخوردار



شکل ۱. موقعیت مکانی استقرار کلیه ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا در مناطق ۲۲ گانه شهر تهران (روشنی و همکاران، ۱۳۹۷).

بین‌المللی مربوطه تعیین می‌شود و مقدار گزارش شده بر اساس سطح غلظت آلاینده‌ای است که از حدود این استاندارد فراتر رفته (استیب و همکاران، ۲۰۰۸) و یا منطبق با حدود مطلوب آن است. به منظور محاسبه این شاخص از رابطه ۱ استفاده می‌شود که برای اطلاع از میزان نقاط شکست می‌توان به مرجع (U.S EPA، ۱۹۹۹) مراجعه کرد.

$$I_p = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} (C_p - BP_{Lo}) + I_{Lo} \quad (1)$$

I_p = شاخص (AQI) برای آلاینده (p)

C_p = غلظت اندازه‌گیری شده برای آلاینده (p)

BP_{Hi} = نقطه شکستی که بزرگ‌تر یا مساوی C_p

BP_{Lo} = نقطه شکستی که کوچک‌تر یا مساوی C_p

I_{Hi} = مقدار AQI منطبق با BP_{Hi}

I_{Lo} = مقدار AQI منطبق با BP_{Lo}

در این شاخص مقادیر ($AQI \leq 100$) بیانگر کیفیت مطلوب آلاینده است (جدول ۱). اگرچه شاخص بین ۵۰ تا ۱۰۰ به معنای وضعیت کیفی سالم از نظر بهداشتی است اما از نظر سطح آلودگی، میزان غلظت آلاینده نسبت به

اما این شاخص در سال ۱۹۹۹ توسط سازمان مذکور ارتقاء و به شاخص (AQI) که مقداری است بی‌بعد (شرکت کنترل کیفیت هوای شهر تهران، ۱۳۹۲) تغییر نام یافت که علاوه بر آلاینده‌های شاخص قبلی، سطح کیفی آلاینده‌های ازن و $PM_{2.5}$ را نیز محاسبه می‌کند و الزاماً باید در کلان‌شهرهایی با جمعیت حداقل ۳۵۰ هزار نفر اعلام شود (U.S EPA، ۱۹۹۹). شاخص (AQI) ابزاری کلیدی جهت آگاهی از سطح کیفیت شش آلاینده کوتاه‌مدت هوا، پیش‌بینی وضعیت مناطق و شهروندان هست (ندافی و همکاران، ۱۳۹۰؛ کنچن و همکاران، ۲۰۱۵). لذا به دلیل سادگی در محاسبه، سهولت درک، یکسان بودن آن در کل کشور و نیز به دلیل امکان بهره‌مندی پژوهشگران و مسئولان ذی‌ربط جهت تحلیل روند کیفیت و ارزیابی سناریوی کنونی وضعیت هوا باهدف برنامه‌ریزی کاهش آلودگی، در اکثر پژوهش‌های خارجی و داخلی به‌ویژه در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. این شاخص از مقایسه غلظت هر آلاینده اصلی با آستانه معین استاندارد ملی و یا

خطرناک) هر آلاینده در سه مقیاس زمانی سالانه، فصلی و ماهانه.

(۳) تعیین روند تغییرات بلندمدت متوسط سالانه و فصلی شاخص (AQI) و روند متوسط سالانه غلظت هر آلاینده با استفاده از روش آماری برآورد (تخمین) روند خطی سری زمانی.

(۴) تعیین نمودارهای توزیع فراوانی فصلی و ماهانه رخداد روزهای آلوده و مطلوب هر یک از آلاینده‌ها.

(۵) تعیین سه دوره کلی آلودگی در هوای شهر تهران بر اساس طول مدت تأثیر آلاینده مسئولی که بالاترین درصد فراوانی روزهای آلوده سالانه را نسبت به سایر آلاینده‌ها ثبت کرده است، باهدف شناخت نوع و تعیین آلاینده معیار (Criteria Air Pollutant) کیفیت نامطلوب هوا در هر دوره به‌ویژه در حال حاضر. منظور از آلاینده معیار آلاینده شاخصی است که بزرگ‌ترین مقدار عددی (AQI) را در بین سایر آلاینده‌ها به‌خود اختصاص داده و براساس آستانه استانداردهای معین بین‌المللی کوتاه‌مدت (روزانه) و بلندمدت (سالانه) اعلام می‌شود (طاهری و حسینی، ۱۳۹۷).

(۶) تعیین دو پیک آلودگی فصلی در طول هر سال همراه با پیک‌های ماهانه مربوطه، بر اساس آلاینده‌های معیار فصلی و فراوانی رخداد روزهای آلوده آنها.

(۷) پس از اثبات آماری داده‌ها، نتایج حاصله با تأکید بر نقش و تأثیرات افزایش آلاینده‌های کوتاه‌مدت کیفیت هوا بر تغییرات اقلیمی مورد تحلیل و نیز اثبات علمی قرار گرفت و درنهایت نیز نتیجه‌گیری و پیشنهادها لازم بر این اساس ارائه شده است.

وضعیت پاک افزایش داشته و نشان از آلوده‌تر بودن هوا است. مقادیر شاخص بالای ۱۰۰ بیانگر سطح بالای غلظت آلاینده‌ها و کیفیت نامطلوب هوا است که از نظر بهداشتی در درجه نخست برای گروه‌های حساس مضر است. از طرفی اگر در یک روز شاخص (AQI) دو یا چند آلاینده بیش از ۱۰۰ باشد در این شرایط هوا بسیار آلوده و در سطح بسیار ناسالم برای همه افراد است (U.S EPA، ۲۰۱۴). لذا در مناطق آلوده و باکیفیت هوای نامطلوب دمای هوا دارای افزایش محسوس‌تری است که این افزایش بیانگر رخداد تغییر اقلیم و گرمایش محلی ناشی از تأثیر مستقیم آلودگی هوا است (هارمنس و همکاران، ۲۰۰۷).

پس از حصول اطمینان از صحت داده‌ها، جهت مطالعه تغییرات روند و وضعیت بلندمدت (۱۶ ساله) شاخص (AQI) و غلظت هر یک از آلاینده‌های کوتاه‌مدت کیفیت هوا مراحل اثبات آماری پژوهش به شرح ذیل انجام شده است:

(۱) محاسبه متوسط سالانه غلظت و متوسط سالانه، فصلی و ماهانه شاخص (AQI) هر یک از آلاینده‌های کوتاه‌مدت کیفیت هوا. لازم به ذکر است که متوسط سالانه غلظت دو آلاینده (SO_2 و O_3) به دلیل عدم ثبت داده‌های سالانه در طی سال‌های (۱۳۸۳-۱۳۸۴) در هیچ‌یک از ایستگاه‌های آلودگی، لذا روند مربوطه از سال ۱۳۸۵ محاسبه شده است.

(۲) محاسبه درصد کاهش و یا افزایش میزان سطح کیفیت و تعیین میزان فراوانی و درصد فراوانی رخداد روزهای مطلوب (پاک و سالم) و نامطلوب (ناسالم، بسیار ناسالم و

جدول ۱. سطح آلاینده‌های کوتاه‌مدت کیفیت هوا از نظر بهداشتی و بر اساس استاندارد (U.S EPA، ۲۰۱۴).

شاخص AQI	۰ تا ۵۰	۵۱ تا ۱۰۰	۱۰۱-۱۵۰	۱۵۱-۲۰۰	۲۰۱-۳۰۰	۳۰۱-۵۰۰
سطح سلامت	خوب (پاک)	متوسط (سالم)	ناسالم (گروه‌های حساس)	ناسالم	بسیار ناسالم	خطرناک
رنگ	سبز	زرد	نارنجی	قرمز	بنفش	خرمائی

۳. نتایج و بحث

نتایج تحلیل روند ۱۶ ساله (۱۳۸۱-۱۳۹۶) مقادیر متوسط سالانه غلظت و شاخص (AQI) شش آلاینده کوتاه مدت کیفیت هوای شهر تهران (O_3 ، $PM_{2.5}$ ، PM_{10} ، NO_2 ، CO ، SO_2) که در شکل (۲-الف و ب) و جدول ۲ به طور جامع ارائه شده نشان از تغییرپذیری سالانه در روندهای مربوطه و وجود سه دوره کلی آلودگی بر اساس آلاینده‌های معیار با بیشترین درصد فراوانی روزهای آلوده در این شهر دارد. همچنین با تحلیل مقادیر شاخص کیفیت فصلی و ماهانه این آلاینده‌ها دو پیک آلودگی فصلی همراه با تعیین آلوده‌ترین ماه مربوطه در دوره‌های سرد (زمستان) و گرم (تابستان) مشخص شد که در ادامه به تحلیل آنها پرداخته شده است.

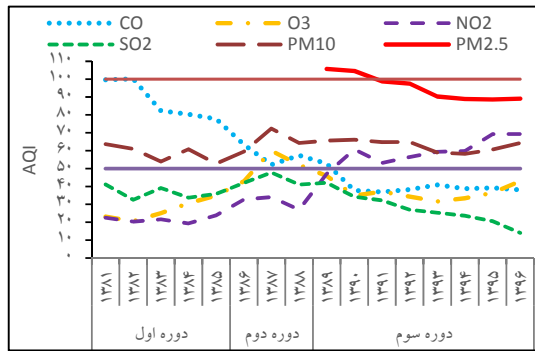
۳-۱. آلاینده معیار دوره اول (۱۳۸۱-۱۳۸۵): منوکسید کربن (CO)

بر اساس نتایج جدول ۲ و شکل‌های (۲) و (۳ الف-ب) در طی دوره اول (۱۳۸۱-۱۳۸۵) مجموع ۵۸۵ روز آلوده ناشی از کیفیت نامطلوب دو آلاینده ($CO-PM_{10}$)

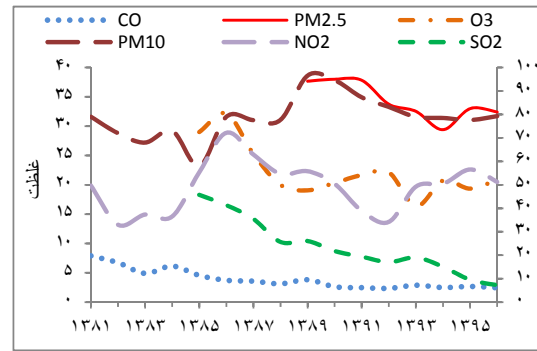
ثبت شده که در ۵۶۵ مورد معادل ۹۷٪ از این روزها آلاینده معیار با بالاترین مقادیر شاخص AQI، CO بوده که کمترین فراوانی روزهای پاک و بیشترین فراوانی روزهای آلوده (۸۹٪) در سطح ناسالم برای گروه‌های حساس و ۱۱٪ در سطح ناسالم و بسیار ناسالم) را به‌ویژه در اوایل این دوره ثبت کرده است. آلاینده منوکسید کربن در کل دوره مطالعاتی با ۴ برابر کاهش در میزان متوسط سالانه غلظت هشت‌ساعته و ۳ برابر افت در متوسط سالانه شاخص (AQI) خود مواجه و لذا روند کاهشی رو به‌بهبود بسیار چشم‌گیری را دنبال کرده است. به‌طوری‌که در دوره میانی (۱۳۸۶-۱۳۸۹) از ۲۵۴ روز آلوده ثبت شده برای آلاینده‌های (O_3 ، PM_{10} ، NO_2 ، CO) تنها در ۲۲ روز (۹٪) منوکسید کربن به‌عنوان آلاینده معیار بوده و از سال ۱۳۹۰ به‌بعد نیز نه تنها هیچ روز آلوده‌ای را ثبت نکرده بلکه شاخص (AQI) آن نسبت به سال‌های قبل در زیر حد استاندارد (۵۰: AQI) قرار گرفته که بیانگر کاهش ۷ برابری در فراوانی روزهای سالم و افزایش ۳ برابری در روزهای پاک آن بوده است.

جدول ۲. مقادیر متوسط سالانه شاخص (AQI) و فراوانی سالانه روزهای آلوده شش آلاینده اصلی هوای شهر تهران در سه دوره آلودگی.

سال / AQI	دوره اول					دوره دوم			دوره سوم							
	۸۱	۸۲	۸۳	۸۴	۸۵	۸۶	۸۷	۸۸	۸۹	۹۰	۹۱	۹۲	۹۳	۹۴	۹۵	۹۶
CO	۱۰۰	۱۰۰	۸۲	۸۰	۷۸	۶۳	۵۲	۵۷	۵۳	۳۸	۳۷	۳۸	۴۱	۳۹	۳۹	۳۸
روز آلوده	۱۶۳	۱۵۹	۸۵	۸۶	۷۲	۷	۷	۴	۴	*	*	*	*	*	*	*
O3	۲۳	۲۱	۲۵	۳۱	۳۵	۴۳	۶۰	۵۲	۴۶	۳۵	۳۷	۳۴	۳۲	۳۳	۳۶	۴۳
روز آلوده	*	*	*	*	*	*	۱۴	۱۷	۸	*	*	*	*	*	۱	۷
NO2	۲۳	۲۰	۲۲	۱۹	۲۴	۳۳	۳۴	۲۷	۲۷	۶۱	۵۳	۵۶	۵۹	۶۰	۶۹	۶۹
روز آلوده	*	*	*	*	*	*	*	*	۱۵	*	*	*	*	*	۳	۳
SO2	۴۱	۳۳	۳۹	۳۴	۳۶	۴۲	۴۸	۴۱	۴۲	۳۴	۳۲	۲۷	۲۵	۲۴	۲۱	۱۴
روز آلوده	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
PM10	۶۴	۶۱	۵۴	۶۱	۵۳	۶۰	۷۲	۶۴	۶۶	۶۶	۶۵	۶۵	۵۹	۵۸	۶۱	۶۴
روز آلوده	۱۱	۱۱	۳	۹	۳	۱۰	۴۳	۲۲	۲۰	۱۲	۱۰	۱۰	۹	۱۱	۶	۷
PM2.5	*	*	*	*	*	*	*	*	۱۰۶	۱۰۵	۹۹	۹۸	۹۰	۸۹	۸۹	۸۹
روز آلوده	*	*	*	*	*	*	*	*	۸۳	۲۱۸	۱۴۷	۱۶۰	۱۱۶	۱۱۱	۸۸	۱۰۱

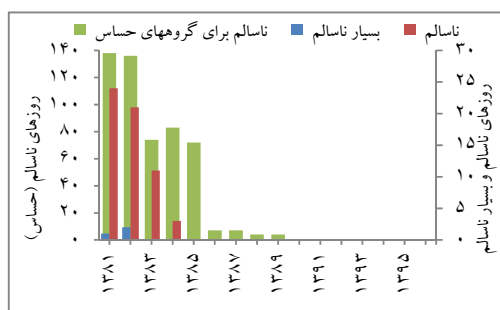


(ب)

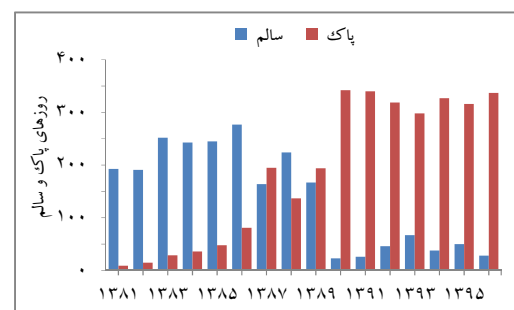


(الف)

شکل ۲. (الف) روند متوسط سالانه غلظت و (ب) متوسط سالانه شاخص AQI شش آلاینده اصلی هوای شهر تهران (۱۳۹۶-۱۳۸۱).



(ب)



(الف)

شکل ۳. (الف) فراوانی سالانه روزهای مطلوب و (ب) نامطلوب آلاینده CO (۱۳۹۶-۱۳۸۱).

سوخت مصرفی و استفاده از سوخت (LNC) در خودروها و سیستم گرمایش منازل، کاهش خودروهای کاربراتوری و فرسوده و تعمیر و نگهداری صحیح خودروها است (میر عابدینی و همکاران، ۱۳۹۸). لذا روند این آلاینده در شهر تهران همسو با روند جهانی غلظت این آلاینده است که از دهه ۱۹۹۰ به بعد به دنبال اجرای سیاست‌های مشابه همچون استفاده گسترده از مبدل‌های کاتالیزوری در خودروها به طور قابل توجهی کاهش یافته است. با این حال این کاهش در برابر افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن و اکسیدهای نیتروژن که اغلب از یک سوئیچ به مبدل‌های کاتالیزوری حاصل می‌شود باید متعادل شود (ری، ۲۰۰۶). به عنوان نمونه روند ۳۸ ساله (۱۹۸۰-۲۰۱۸) میانگین سالانه حداکثر غلظت هشت‌ساعته CO در سطح ملی ایالات متحده آمریکا با افت چشم‌گیر (۸۳٪) بسیار مطلوب ارزیابی شده است (U.S EPA، ۲۰۱۸).

توجه به اثرات سمی منوکسیدکربن علاوه بر اهمیت در

با توجه به بهبود چشم‌گیر غلظت آلاینده CO، در سال‌های اخیر بیشترین مقادیر متوسط فصلی و ماهانه شاخص AQI آن در فصول زمستان (دی‌ماه) و سپس پاییز (آذر) تا حداکثر سطح کیفی سالم مشاهده شده است. دلیل افزایش دوره سرد این آلاینده علاوه بر متأثر شدن عملکرد سیستم کنترل انتشار خودروها و احتراق ناقص سوخت از سرمایه‌های هوا، نتیجه تأثیر شرایط اقلیمی در این موقع از سال همچون رخداد پایدارهای جوی، وارونگی دمای سطحی و کاهش عمق لایه‌مرزی است که سبب تجمع آلاینده‌ها در سطح و تشدید غلظت آنها می‌شود (احدی و همکاران، ۱۳۹۱؛ شرعی پور و علی‌اکبری بیدختی، ۱۳۹۳؛ طاهری و حسینی، ۱۳۹۷؛ U.S EPA، ۲۰۱۴).

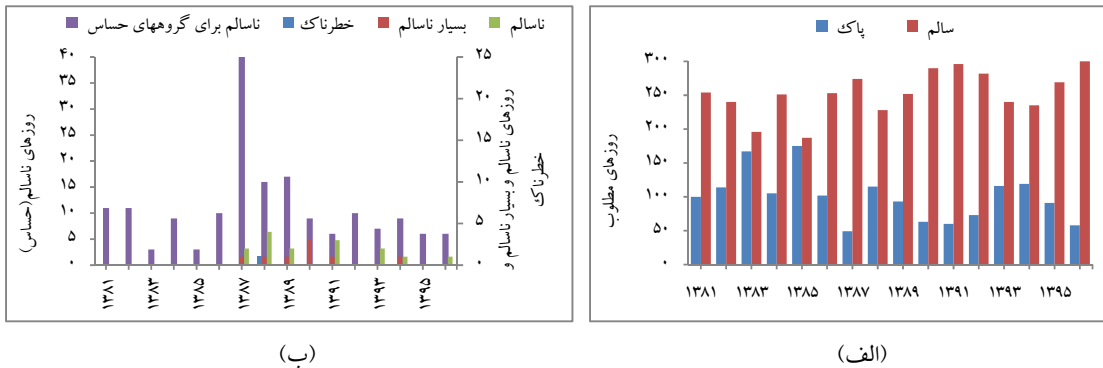
مهم‌ترین عامل تولید و گسیل آلاینده CO وسایل نقلیه موتوری است لذا دلیل این روند بهبودیافته اجرای سیاست‌های فنی همچون ارتقاء کیفیت فناوری ساخت و

حوزه سلامت، از نظر شرایط اقلیمی نیز به دلیل تأثیرات اکسیدکنندگی جوی بسیار حائز اهمیت است. به طوری که این آلاینده به عنوان یک گاز گلخانه‌ای با مدت ماندگاری حداقل یک ماه در جو، قادر است پس از انتشار از طریق واکنش‌های شیمیایی بر غلظت گازهای گلخانه‌ای متان، دی‌اکسید کربن و ازن تروپوسفری تأثیر نامطلوب گذاشته و در پتانسیل گرمایش جوی و تغییر اقلیم نقش اساسی داشته باشد (شیندل و همکاران، ۲۰۰۶). همچنین این آلاینده به عنوان یک آلاینده فرامرزی شناخته شده که علاوه بر آلوده کردن هوای مناطق دور و نزدیک، به دلیل ماندگاری قادر است بر اقلیم این مناطق نیز تأثیر گذارد که به طور نمونه می‌توان به گسترش نامطلوب شمال غربی جنوب شرقی آلاینده CO بر اثر آتش‌سوزی منطقه آمازون برزیل در اوت ۲۰۱۹ اشاره کرد (ناسا، ۲۰۱۹). لذا علی‌رغم روند رو به بهبود این آلاینده اما به دلیل دارا بودن پتانسیل تأثیرات غیرمستقیم بر گرمایش جوی، کنترل انتشار آن با هدف کاهش گازهای گلخانه‌ای به ویژه ازن سطحی باید ادامه یافته و مورد توجه ویژه قرار گیرد.

۳-۲. آلاینده معیار دوره دوم (۱۳۸۶-۱۳۸۸): ذرات معلق کمتر از ۱۰ میکرون (PM_{10})

بر اساس نتایج جدول ۲ و اشکال (۲ و ۴ الف-ب)، در طی دوره دوم (۱۳۸۶-۱۳۸۸) مجموعاً ۱۲۴ روز آلوده برای آلاینده‌های (PM_{10} ، O_3 ، CO) ثبت شده که در ۶۱٪ از موارد (۷۵ روز) آلاینده معیار PM_{10} بوده که از نظر کیفی در ۸۸٪ روزها در سطح ناسالم برای گروه‌های حساس و در ۱۲٪ روزها در سطح ناسالم، بسیار ناسالم و حتی خطرناک (سال ۱۳۸۸) بوده است. اما نتایج برخی مطالعات کیفیت این آلاینده را در فاصله سال‌های (۱۳۷۹-۱۳۸۸) با روند کاهشی، مطلوب ارزیابی کرده‌اند (احمدی مقدم و محمودی، ۱۳۹۲؛ نجف پور و همکاران، ۱۳۹۴). با توجه به شکل ۲ روند غلظت و کیفیت این آلاینده در طی ۱۶ سال مطالعاتی هرچند متأثر از نوسانات

سالانه قابل توجه آن بوده اما به طور کلی دارای شیب افزایشی نامطلوب است. به طوری که علی‌رغم کاهش (۳۶٪-) در متوسط سالانه غلظت و (۲۱٪-) در شاخص کیفیت دوره اول (۱۳۸۵-۱۳۸۱) با ثبت ۳۷ روز ناسالم برای گروه‌های حساس ولی در دوره دوم (۱۳۸۶-۱۳۸۸) روند مربوطه رشد ۲۵٪ داشته و در این دوره به بیشینه مقادیر کیفی و بالاترین فراوانی روزهای نامطلوب خود (۴۳ روز آلوده با $AQI: 72$ در سال ۱۳۸۷) در تمام دوره مطالعاتی رسیده که این شرایط نامطلوب تا اوایل دوره سوم (۱۳۸۹-۱۳۹۶) مشاهده شده است. در دوره سوم نیز با وجود کاهش (۲۲٪-) در میزان غلظت و (۳۲٪-) در فراوانی روزهای آلوده این آلاینده نسبت به مجموع دو دوره قبل اما میزان شاخص کیفی این دوره رشد ۳٪ را همراه با کاهش (۳۸٪-) در تعداد روزهای پاک و افزایش (۱۳٪) در فراوانی روزهای سالم نشان داده است که این افزایش در سال‌های اخیر (۱۳۹۵-۱۳۹۶) بیشتر بوده است. نتایج استاندارد (NOWCAST) نیز تأییدی بر کاهش سهم ساعات پاک و افزایش ساعات سالم و به ویژه ناسالم در مناطق دارای پیک این آلاینده در جنوب و جنوب غربی تهران دارد (طاهری و حسینی، ۱۳۹۷). همچنین با مقایسه متوسط غلظت سالانه این آلاینده با آخرین حدود استاندارد سالانه ملی ($20 \mu g/m^3$) و بین‌المللی (WHO) و نیز مشخص شد که علی‌رغم تغییرپذیری‌های دوره‌ای اما میزان غلظت آن همچنان چهار برابر حد استاندارد مذکور است و در هیچ دوره‌ای نیز در حدود کیفی پاک قرار نگرفته است. گزارش (۲۰۱۶) این سازمان نیز با تأکید بر این نتایج، تهران را از نظر وضعیت PM_{10} در رده دوازدهم رتبه‌بندی جهانی قرار داده است (هگر و ساراف، ۲۰۱۸). در حالی که روند ۲۸ ساله این آلاینده در کشورهای پیشرفته‌ای همچون ایالات متحده آمریکا به دلیل تلاش‌ها ملی و اجرای استراتژی‌های کنترل آلودگی با کاهش ۲۶٪ مواجه و در فاصله حدود دو برابری استاندارد سالانه سازمان (WHO) قرار گرفته است (U.S EPA، ۲۰۱۸).



شکل ۴. (الف) فراوانی سالانه روزهای مطلوب و (ب) نامطلوب آلاینده PM_{10} (۱۳۸۱-۱۳۹۶).

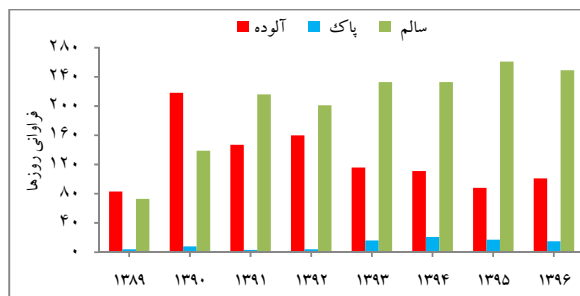
۲۱۸) و بیشترین تعداد روزهای آلوده (۱۰۶، ۱۰۵: AQI) روز معادل ۷ ماه) در سال‌های (۱۳۸۹-۱۳۹۰) بوده است (شکل ۵). نتایج استاندارد (NOWCAST) نیز با تأکیدی بر این یافته‌ها نشان می‌دهد در سه سال اخیر از تعداد ساعات پاک این آلاینده کاسته و میانگین آن با توجه به استاندارد (EPA) به ۸/۶٪ رسیده است و در مقابل ساعات بسیار ناسالم آن (سال ۱۳۹۶) رشد چشم‌گیری داشته است.

بر این اساس آلاینده مسئول بخش قابل‌توجهی از روزهای نامطلوب شهر تهران در سال‌های اخیر $PM_{2.5}$ است که در مقایسه با سایر آلاینده‌های این دوره (PM_{10} ، O_3 ، NO_2) از وضعیت بسیار نامطلوب‌تر و درصد فراوانی روزهای آلوده بیشتری برخوردار است. نتایج این آلاینده با مطالعات بسیاری از شهرهای در حال توسعه آسیایی به استثناء ژاپن (بالداسانو و همکاران، ۲۰۰۳) همسو اما مغایر با نتایج کشورهای توسعه‌یافته‌ای همچون ایالات متحده است که سطح غلظت این آلاینده را در طی ۱۸ سال اخیر با ۳۹٪ کاهش به زیر حدود استاندارد سالانه ملی رسانده است (U.S EPA، ۲۰۱۸).

۳-۳. آلاینده معیار دوره سوم (۱۳۸۹-۱۳۹۶): ذرات

معلق کمتر از ۲/۵ میکرون ($PM_{2.5}$)

با شروع سنجش غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ از نیمه دوم (مهرماه) سال ۱۳۸۹ در ایستگاه‌های پایش کیفیت هوای تهران، دوره سومی با تغییرات فاحش نسبت به دو دوره قبل برای وضعیت کیفیت هوای غالب این شهر و آلاینده مسئول در این شرایط رقم خورد. با توجه به (شکل ۲-الف و ب) علی‌رغم این که روند کلی متوسط سالانه غلظت آلاینده مذکور در طی این دوره (۱۶٪-) و شاخص AQI آن (۱۹٪-) کاهش داشته، اما همچنان حداقل سطح کیفی آن ۴۴٪ بیشتر از سطح استاندارد (AQI:۵۰) و میزان متوسط غلظت سالانه آن حدود دو الی سه برابر حدود استاندارد ملی ($12 \mu g/m^3$) و نیز بین‌المللی (WHO، U.S EPA، ژاپن) است (طاهری و حسینی، ۱۳۹۷). به طوری که فراوانی روزهای پاک آن تنها ۳٪ از کل روزهای این دوره را شامل شده و در مقابل تقریباً در ۳۸٪ از روزها، به طور میانگین برابر با ۱۲۰ روز (تقریباً یک‌سوم از سال)، در وضعیت نامطلوب بوده که در ۹۳٪ موارد در سطح ناسالم برای گروه‌های حساس، (۷٪) موارد ناسالم و در دو روز نیز بسیار ناسالم و خطرناک با بالاترین شاخص

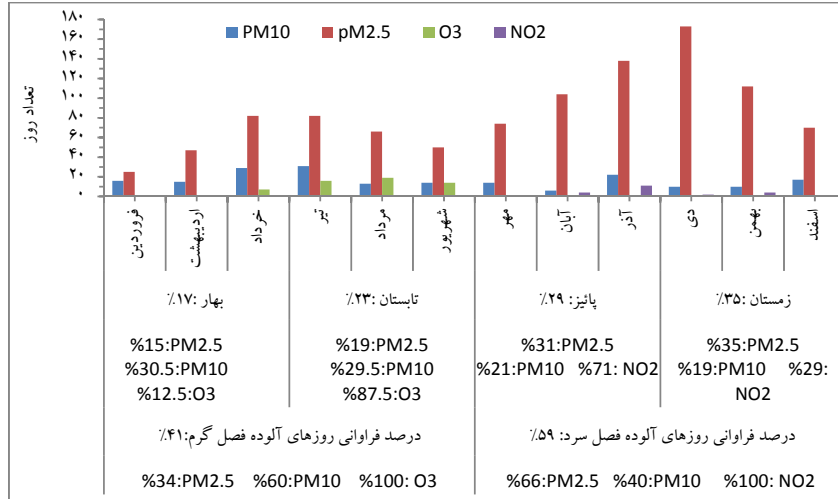


شکل ۵. فراوانی سالانه روزهای مطلوب و نامطلوب آلاینده $PM_{2.5}$ (۱۳۸۹-۱۳۹۶).

در مقابل ذرات معلق سفید (سولفات‌های ثانویه)، نیترات و آئروسول‌های آلی با اعمال واداشت تابشی منفی سبب خنک‌کنندگی در جو می‌شوند. همچنین این ذرات به‌عنوان هسته‌های تراکم مؤثر در شکل‌گیری و بقاء ابرها و تعدیل خواص ابری عمل کرده و در نتیجه موجب تغییرات در اقلیم از طریق تغییر دما، تبخیر، بارش و الگوهای گردش جوی می‌شوند (پیلینگ و همکاران، ۲۰۰۷؛ کمیسیون اروپا، ۲۰۱۰؛ فیور و همکاران، ۲۰۱۵؛ U.S EPA، ۲۰۱۹). بر این اساس هر نوع اقدام برای تعدیل انتشار این آلاینده‌ها از نظر کاهش کربن سیاه در مقیاس‌های شهری و منطقه‌ای به دلیل تأثیر بر کاهش گرمایش جوی بسیار مهم و ضروری است زیرا امکان دست‌یابی به اهداف نهایی تغییر اقلیم را تسهیل می‌کند.

۳-۴. آلاینده‌های شاخص پیک‌های فصلی آلودگی هوا با توجه به نتایج شکل ۶ در طی ۱۶ سال مطالعاتی مجموعاً ۱۲۹۷ روز آلوده ثبت شده که ۴۱٪ از این روزها (۵۲۶ روز) در دوره گرم سال به‌ویژه در فصل تابستان (۲۳٪) و ۵۹٪ موارد (۷۷۱ روز) در دوره سرد سال به‌ویژه در زمستان (۳۵٪) رخ داده که بر این اساس بیشترین فراوانی روزهای آلوده شهر تهران در دوره سرد و به‌ویژه در زمستان قابل مشاهده که به تحلیل هر دوره پرداخته شده است.

آلاینده ذرات معلق با طول ماندگاری چندروزه در جو علاوه بر تأثیرات منفی بسیار قابل توجه بر بهداشت جامعه به‌ویژه مرگ‌ومیر زودرس و نامطلوب کردن هوا از نظر رخداد گردوغبار و کاهش دید افقی محیطی (طاهری و حسینی، ۱۳۹۷؛ پیلینگ و همکاران، ۲۰۰۷؛ علی‌اکبری بیدختی و همکاران، ۲۰۱۶) دارای تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم چشم‌گیری بر شرایط اقلیمی نیز هستند؛ که با برهم‌زدن تعادل انرژی بین اتمسفر و سطح زمین و نیز ایجاد تغییر در عناصر و پدیده‌های آب‌وهوایی به‌عنوان یک واداشت اقلیمی عمل کرده و سبب تغییرات در اقلیم می‌شوند (اشمدینگ و همکاران، ۲۰۱۹). بیشترین سهم انتشار (۷۵٪) آلاینده $PM_{2.5}$ در تهران مربوط به وسایل نقلیه موتوری با حداکثر سهم برای وسایل نقلیه سنگین (۸۵٪) و در درجه دوم مربوط به موتورسیکلت‌های کاربراتوری، به دلیل کیفیت پایین احتراق و تولید ترکیبات کربنی و سپس منابع طبیعی با سهم ۲۵٪ است که بیشترین غلظت‌ها نیز در جنوب و جنوب غرب شهر مشاهده شده است (نادیان و همکاران، ۱۳۹۶؛ نادری و عباسیان، ۱۳۹۶؛ روفیگر حقیقت و همکاران، ۱۳۹۶). لذا ذرات معلق حاصل از منابع احتراقی و به‌ویژه خودروهای دیزلی همچون ذرات معلق سیاه (کربن سیاه BC و دوده سیاه BS) که از اجزای اصلی $PM_{2.5}$ و PM_{10} و جزء آلاینده‌های مقیاس محلی و شهری محسوب می‌شوند با اعمال واداشت تابشی مثبت سبب تشدید گرمایش جوی و



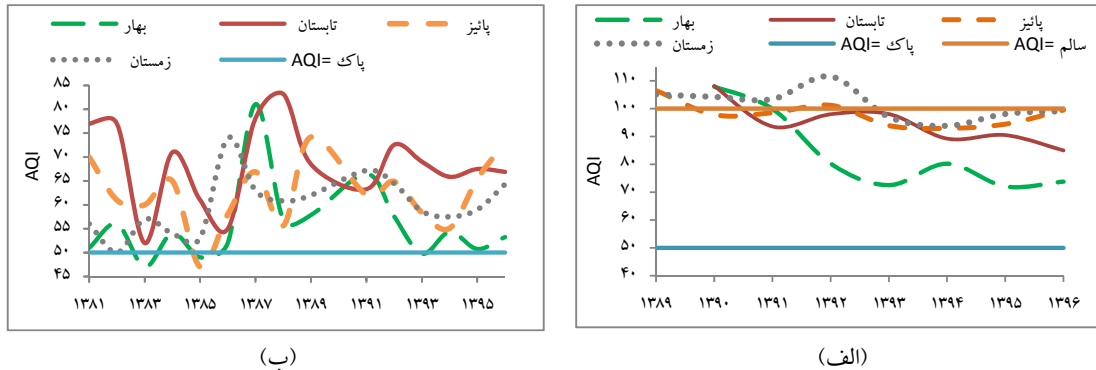
شکل ۶. مجموع فراوانی و درصد فراوانی فصلی و ماهانه روزهای آلوده آلاینده‌های شاخص بیک‌های آلودگی هوای شهر تهران (۱۳۹۶-۱۳۸۱).

اواسط دوره بوده باین‌وجود شاخص فصلی $PM_{2.5}$ بین ۴۰٪ (بهار) تا ۴۷٪ (تابستان) و شاخص PM_{10} بین ۱۱٪ (بهار) تا ۲۸٪ (تابستان) بیشتر از استاندارد (AQI:۵۰) بوده است (شکل ۷-الف و ب). علت وضعیت نامطلوب ذرات معلق در دوره گرم با بیشینه ۵۶٪ به دلیل عوامل طبیعی همچون رخداد طوفان‌های گردوغبار از چشمه‌های دور و نزدیک منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای از بیابان‌های اطراف تهران، عراق و سوریه و نیز ناشی از فعالیت‌های عمرانی و صنعتی است (علیچانی و صفوی، ۱۳۸۵؛ نادری و عباسیان، ۱۳۹۶؛ ام دی یوسح و همکاران، ۲۰۰۸) که این گردوغبار بیشترین سهم را با میانگین ۳۵٪ نسبت به سایر ذرات آلی و معدنی و یون‌های غیر آلی در جرم این ذرات دارند (ارحامی و همکاران، ۱۳۹۵). بیشینه ماهانه آلوده فصل بهار هر دو آلاینده نیز در خردادماه مشاهده شده که برای $PM_{2.5}$ ، ۸۲ روز آلوده (۵۳٪) با ۹۰٪ موارد در سطح ناسالم برای گروه‌های حساس و در ۱۰٪ موارد تا سطح بسیار ناسالم و برای PM_{10} نیز ۲۹ روز آلوده تا سطح بسیار ناسالم ثبت شده است. بیشینه ماهانه تابستانه هر دو آلاینده نیز در تیرماه با ۸۲ روز (۴۱٪) ناسالم برای گروه‌های حساس برای $PM_{2.5}$ که در طی این سال‌ها نیز هیچ روز پاکی را در این فصل ثبت نکرده و برای PM_{10} نیز همراه با (۳۱) روز آلوده تا سطح خطرناک بوده است.

۳-۴-۱. آلاینده‌های شاخص دوره گرم: ($PM_{2.5}$ ، PM_{10} ، O_3)

در طی ۱۶ سال مطالعاتی در دوره گرم مجموعاً ۵۲۶ روز آلوده ثبت شده که مسئول کیفیت نامطلوب هوا در این دوره براساس بیشینه شاخص (AQI) و بالاترین درصد فراوانی روزهای آلوده به ترتیب آلاینده‌های $PM_{2.5}$ (۷۰٪)، PM_{10} (۲۷٪) و O_3 (۳٪) می‌باشند. علی‌رغم این‌که $PM_{2.5}$ در بیشتر روزهای دوره گرم آلاینده معیار درجه اول بوده اما تنها ۳۴٪ از فراوانی روزهای آلوده خود را در این دوره به‌ویژه در تابستان (۱۹٪) ثبت کرده است. علت وضعیت کیفی بهتر این آلاینده در بهار با بیشترین درصد فراوانی روزهای پاک (۴۷٪)، حضور سامانه‌های همدید فعال و وزش باد مؤثر بیش از ۶ متر بر ثانیه (اشرفی و همکاران، ۱۳۹۱) که بالاتر از حد آستانه شهر و مطلوب برای تهویه هوا است (لندزبرگ، ۱۹۸۱) می‌باشد. در مقابل، بیشترین درصد فراوانی روزهای آلوده PM_{10} (۶۰٪) در دوره گرم (با ۳۰/۵٪ در بهار و ۲۹/۵٪ در تابستان) و بدترین شرایط کیفی (خطرناک) آن در تابستان است (شکل ۶).

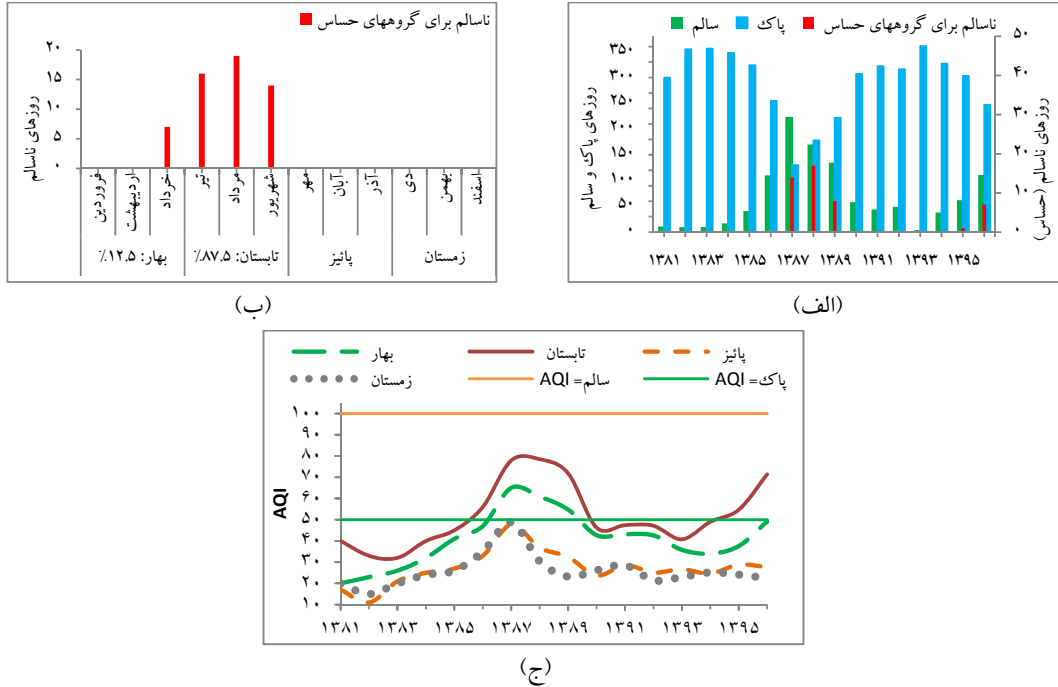
اگرچه روند بلندمدت متوسط فصلی دوره گرم شاخص (AQI) آلاینده $PM_{2.5}$ (-۳۷٪) کاهش داشته و آلاینده PM_{10} نیز دارای تغییرپذیری سالانه قابل توجه به‌ویژه در



شکل ۷. روند بلندمدت متوسط فصلی شاخص AQI آلاینده‌های $PM_{2.5}$ و PM_{10} (ب) و (الف)

ازن تروپسفری با وجود تغییرپذیری سالانه قابل توجه در روند متوسط غلظت هشت‌ساعته و شاخص کیفی خود در طی دوره مطالعاتی اما از اواسط دوره با ثبت روزهای آلوده به‌عنوان سومین آلاینده فصلی مسئول کیفیت نامطلوب هوای شهر تهران در دوره گرم سال تعیین‌شده که پیک آلودگی فصلی آن از اواخر بهار (۱۲/۵٪) در خرداد شروع و تا اواخر تابستان (۸۷/۵٪) در شهریور ادامه داشته و بیشینه ماهانه آن در تیر و مرداد با سطح ناسالم برای گروه‌های حساس بوده است (شکل ۲ و ۸-الف، ب و ج، جدول ۲). درحالی‌که این آلاینده در دوره سرد با بیش از ۹۴٪ روزهای پاک، مطلوب بوده است. با توجه به این‌که بیشینه‌های غلظت ازن سطحی در دوره دوم آلودگی ثبت‌شده لذا روند شاخص (AQI) مربوطه نیز تا این دوره (۱۳۸۸-۱۳۸۱) رشد چشم‌گیر ۶۲٪ را با بیشترین درصد افزایش (۵۸٪) در دوره گرم با ثبت ۳۱ روز آلوده تا سطح ناسالم برای گروه‌های حساس داشته است. سپس تا سال (۱۳۹۳) با (۲۲٪-) کاهش به حداقل متوسط غلظت (۱۶ ppb) و (۶۴٪-) کاهش به حداقل شاخص کیفی سالانه خود (AQI=۳۲) با بیشترین روزهای پاک (۳۶۱ روز؛ ۹۹٪) در کل دوره رسیده است. اما مجدد در سال‌های اخیر با افزایش (۲۲٪) در غلظت و (۲۶٪) در شاخص کیفی، روند نامطلوبی را به‌ویژه در تابستان

و سپس بهار (۲۷٪) با مجموع ۱۶ روز ناسالم برای گروه‌های حساس طی کرده است. ازن دارای حد استاندارد سالانه نیست اما نتایج استاندارد ساعتی (NOWCAST) آن در دو سال اخیر با افزایش تعداد ساعات ناسالم و به‌ویژه بسیار ناسالم (سال ۱۳۹۶) و حتی خطرناک (ایستگاه گلبرگ) بیانگر کیفیت نامطلوب آن است (طاهری و حسینی، ۱۳۹۷). درحالی‌که روند ۳۸ ساله غلظت آن در آمریکا با کاهش (۳۱٪) به سطح استاندارد (NAAQS: ۷۰ ppb) رسیده است (U.S.EPA، ۲۰۱۸). عامل مهم در تشدید غلظت و کیفیت نامطلوب آلاینده ازن سطحی وابستگی شدید این آلاینده به مؤلفه‌های اقلیمی همچون افزایش دما و خشکی هوا، پایداری‌های تابستانه و لایه اختلاط محدود، طولانی شدن ساعات روز و تشدید تابش خورشیدی به‌ویژه در ساعات بعدازظهر تا عصرگاهی تابستانه و حضور جزیره گرمایی شهری است که همگی زمینه واکنش‌های پیچیده فتوشیمیایی در جو و در نتیجه تولید آلاینده ثانویه ازن تروپسفری را فراهم می‌کنند (زندنیا پور و همکاران، ۱۳۵۳؛ شرعی پور و علی‌اکبری بیدختی، ۱۳۹۲؛ نجف پور و همکاران، ۱۳۹۴؛ هلبرگ و سولبرگ، ۲۰۰۲؛ هگرتی و همکاران، ۲۰۰۷؛ پلایل، ۲۰۰۹؛ U.S EPA، ۲۰۱۴؛ علی‌اکبری بیدختی و همکاران، ۲۰۱۶).



شکل ۸. (الف) فراوانی سالانه و (ب) فصلی روزهای نامطلوب و (ج) روند متوسط فصلی شاخص AQI آلاینده O_3 (۱۳۸۱-۱۳۹۶).

۳-۴-۲. آلاینده‌های شاخص دوره سرد: $PM_{2.5}$ ، NO_2 ، PM_{10}

در طی ۱۶ سال مطالعاتی دوره سرد سال مجموعاً ۷۷۱ روز آلوده برابر با (۵۹٪) از کل روزهای آلوده سالانه ثبت شده که ۲۹٪ از این روزها در فصل پاییز و ۳۵٪ در فصل زمستان رخ داده و لذا در مقایسه با دوره گرم با ۳۱٪ افزایش در فراوانی روزهای آلوده از کیفیت هوای نامطلوب‌تری به‌ویژه در زمستان برخوردار است. دلیل این شرایط از یک طرف عامل انسانی مسئول افزایش انتشار آلاینده‌ها به‌واسطه افزایش مصرف سوخت در منابع گرمایشی و حرارتی و احتراق ناقص سوخت در وسایل نقلیه موتوری به‌ویژه سنگین در نتیجه متأثر شدن عملکرد سیستم کنترل انتشار خودروها از سرمایش هوا است. از طرف دیگر تأثیر شرایط اقلیمی همچون کمبود سامانه‌های همدید فعال، افزایش پایداری‌های جوی و کاهش تابش و سرعت باد و نیز افزایش وارونگی دمایی سطحی مؤثر در کاهش عمق لایه اختلاط که سبب کاهش میزان همرفت هوا در راستای قائم و پخش آلاینده‌ها در راستای افقی جو

بر این اساس ازن سطحی به‌عنوان یکی از آلاینده‌های کوتاه‌مدت با طول ماندگاری حداقل یک ماه در جو، علاوه بر این که به‌عنوان یک آلاینده فرامرزی دارای تأثیرات محلی، منطقه‌ای و قاره‌ای با اثرات سمی نامطلوب بر کیفیت هوا، تضعیف سلامت افراد، کاهش رشد گیاهان و محصولات زراعی، مؤثر در شیمی جو و تشکیل مه دود فتوشیمیایی، کاهش ظرفیت پاک‌سازی و اکسیدکنندگی جوی است، به‌عنوان سومین گاز گلخانه‌ای مهم در رتبه‌بندی IPCC پس از دی‌اکسیدکربن و متان نیز با به‌هم‌زدن تعادل انرژی زمین سبب واداشت تابشی و در نتیجه تغییر اقلیم و تشدید گرمایش جهانی می‌شود (پیلینگ و همکاران، ۲۰۰۷؛ پلایل، ۲۰۰۹؛ کمیسیون اروپا، ۲۰۱۰). لذا هر نوع اقدام برای کاهش آلاینده‌های پیش‌ساز مستقیم و غیرمستقیم مربوطه (NO_x ، VOC ، CO ، CH_4) جهت جلوگیری از زمینه‌های تولید ازن تروپوسفری و در نتیجه کاهش سهم این آلاینده در تغییرات اقلیمی سبب کسب منافع برای تعدیل تغییر اقلیم خواهد شد.

درصد افزایش در روند فصلی مربوطه را در دوره سرد (۲۱٪ در پاییز و ۴۹٪ در زمستان) نشان داده است (شکل ۹-ب). پیک دوره سرد آلاینده PM₁₀ مجموعاً (۴۰٪) از کل فراوانی روزهای آلوده سالانه آن با کمترین درصد فراوانی (۱۹٪) در زمستان نسبت به سایر فصول شامل می‌شود که دلیل آن افزایش میزان رطوبت، وزش باد و بارش مؤثر بیش از ۵ میلی‌متر در پاک‌سازی و تهویه مناسب هوا است (علیچانی و صفوی، ۱۳۸۵؛ ثقفی و علی‌اکبری بیدختی، ۱۳۹۳). حداکثر پیک ماهانه دوره سرد آلاینده مذکور نیز در اواخر پاییز (آذرماه) و اواخر زمستان (اسفندماه) تا سطح کیفی ناسالم برای گروه‌های حساس و گاهی ناسالم مشاهده شده است (شکل ۶).

آلاینده دی‌اکسید نیتروژن (NO₂) از دوره سوم آلودگی هوا (۱۳۸۹-۱۳۹۶) با ثبت روزهای آلوده، به‌عنوان سومین آلاینده شاخص هوای شهر تهران در فصول سرد سال شناخته می‌شود (شکل ۶، جدول ۲). روند این آلاینده در طی دوره مطالعاتی هم از نظر غلظت و هم شاخص کیفیت علی‌رغم نوسانات سالانه اما به‌طور کلی دارای شیب افزایشی است و تقریباً در ۶۳٪ از سال‌های مطالعاتی میزان غلظت این آلاینده بسیار نزدیک و یا فراتر از حدود استاندارد سالانه ملی و نیز بین‌المللی آمریکا (۵۳ ppb) بوده است. به‌طوری‌که شیب‌خط روند کیفی این آلاینده در دوره سوم با (۶۱٪) و متوسط سالانه شاخص کیفی آن نسبت به مجموع دو دوره قبل با (۵۸٪) افزایش نشان از کیفیت نامطلوب آن دارد. دلیل این شرایط علاوه بر اتخاذ تدابیر سخت‌گیرانه‌تر در استاندارد مربوطه از اواسط سال ۱۳۸۹ (احدی و همکاران، ۱۳۹۱)، ناشی از ادامه افزایش (۳۳٪) در روند غلظت این آلاینده از سال ۱۳۹۲ به‌بعد با وجود نوسانات سالانه و دوره‌ای است که نتیجه این شرایط کاهش پنج برابری در فراوانی روزهای پاک و افزایش ۲۸٪ در فراوانی روزهای سالم در کنار ثبت روزهای آلوده مربوطه است (شکل ۹-الف). لذا با توجه به (شکل ۱۰-الف و ب) از سال ۱۳۸۹ به‌بعد فراوانی روزهای پاک این آلاینده در دوره سرد سال نسبت به

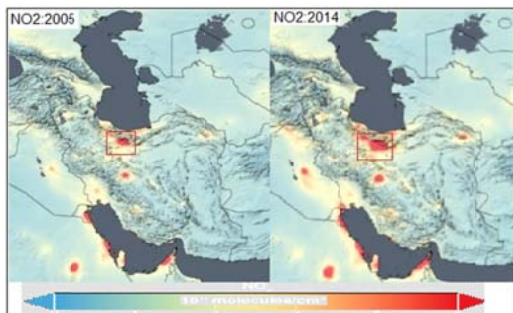
و در نتیجه تضعیف ضریب تهویه هوا و افزایش تجمع و تشدید غلظت آلاینده‌ها در سطح می‌شود (شرعی پور، ۱۳۸۸؛ ثقفی و علی‌اکبری بیدختی، ۱۳۹۳؛ شرعی پور و علی‌اکبری بیدختی، ۱۳۹۳؛ نادری و عباسیان، ۱۳۹۶؛ نادیان و همکاران، ۱۳۹۶). لذا آلاینده‌های مسئول کیفیت نامطلوب هوا در دوره سرد در تهران به‌ترتیب PM_{2.5} (۸۷٪)، PM₁₀ (۱۰٪) و NO₂ (۳٪) می‌باشند (شکل ۶) و با توجه به این‌که در این موقع از سال طوفان گردوغبار به‌ندرت می‌وزد لذا بیشترین درصد ذرات PM موجود در جو مربوط به آلاینده‌های ثانویه‌ای حاصل از افزایش غلظت آلاینده‌های پیش‌ساز منتشره از احتراق وسایل نقلیه دیزلی و گرمایشی همچون اکسیدهای نیتروژن (دی‌اکسید نیتروژن) و سولفور (دی‌اکسید گوگرد) و رخداد واکنش‌های شیمیایی جوی است (U.S. EPA، ۲۰۱۹؛ علی‌اکبری بیدختی و همکاران، ۲۰۱۶).

روند متوسط فصلی شاخص کیفی دوره سرد آلاینده PM_{2.5} (شکل ۹-الف) علی‌رغم شیب کلی ملایم منفی (۷٪-) اما در سال‌های اخیر (۱۳۹۶-۱۳۹۴) دارای رشد نامطلوب ۵٪ در زمستان و ۷٪ در پاییز بوده و پیک دوره سرد این آلاینده از مقادیر شاخص (AQI) و درصد فراوانی روزهای آلوده بیشتری (۶۷۱ روز آلوده، ۶۶٪) به‌ویژه در زمستان، نسبت به دوره گرم (۳۴٪) برخوردار است (شکل ۶). به‌طوری‌که ۳۱٪ (۳۱۶ روز) از فراوانی روزهای آلوده این آلاینده در پاییز با حداکثر ماهانه در آذرماه (۴۴٪، ۱۳۸ روز) با سطح کیفی ناسالم برای گروه‌های حساس (۸۳٪) و ناسالم (۱۷٪) بوده و ۳۵٪ درصد از فراوانی این روزها (۳۵۵ روز آلوده) نیز در فصل زمستان با حداکثر ماهانه در دی‌ماه (۴۸٪) رخ داده که بعد از تابستان دارای کمترین تعداد روزهای پاک (۲ روز) و سالم (۶۴ روز) و بیشترین فراوانی روزهای آلوده (۱۷۳ روز) با (۷۸٪) موارد در سطح ناسالم برای گروه‌های حساس و در (۱۳٪) موارد ناسالم بوده است. میزان شاخص (AQI) فصلی آلاینده PM₁₀ نیز علی‌رغم این‌که در دوره گرم سال دارای بیشترین مقادیر ثبت شده بود اما بیشترین

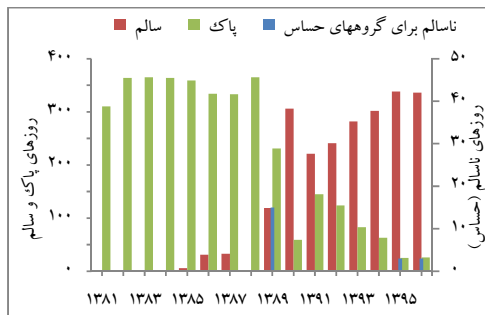
دستورالعمل (WHO) می باشد؛ به طوری که در ایالات متحده آمریکا با ۶۱٪ کاهش تا زیر حد استاندارد روزانه ملی (۱۰۰ ppb) مطلوب و منطبق با حد استاندارد سالانه سازمان مذکور قرار گرفته است (U.S EPA، ۲۰۱۸).

اکسیدهای نیتروژن علاوه بر این که دارای اثرات سمی همچون تضعیف سلامت جامعه، رخداد بارش‌های اسیدی، نهشت اسیدی و اسیدی کردن اکوسیستم‌ها هستند خود به عنوان یک گاز گلخانه‌ای کوتاه مدت بسیار قوی توان جذب گرما در جو و تشدید گرمایش جوی را تا بیش از ۳۰۰ برابر دی‌اکسید کربن داشته و به طور غیرمستقیم نیز سبب افزایش غلظت گاز گلخانه‌ای متان (CH₄) می‌شوند.

دوره گرم به‌ویژه (۸۶٪-) کاهش و روزهای سالم آن ۱۳٪ افزایش و همچنین ۲۱ روز آلوده تا سطح ناسالم برای گروه‌های حساس را ثبت کرده است. پیک آلودگی این دوره نیز از اواسط پاییز (آبان ماه) تا اواسط زمستان (بهمن‌ماه) با بیشینه ماهانه در آذرماه مشاهده شده است. طبق نتایج مطالعات ناسا (ناسا، ۲۰۱۵) و نقشه‌های ماهواره‌ای جهانی (Aura) به دست آمده با وضوح بالا از شاخص کیفیت هوا در ۱۵۳ شهر دنیا نیز روند آلاینده تهران همچون سایر شهرهای بزرگ در حال توسعه افزایشی و نامطلوب ارزیابی شده است (شکل ۹-ب). در حالی که طبق یافته‌های (EPA) وضعیت غلظت این آلاینده در برخی از شهرهای جهان روبه بهبود و نزدیک به

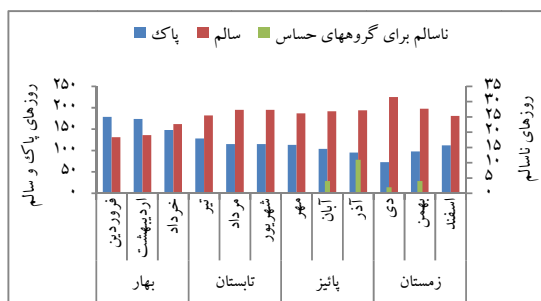


(ب)

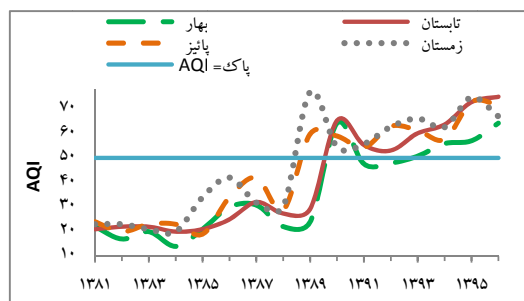


(الف)

شکل ۹. (الف) فراوانی سالانه روزهای مطلوب و نامطلوب (۱۳۸۱-۱۳۹۶) (ب) غلظت آلاینده NO₂ تهران (۲۰۱۴-۲۰۰۵) (ناسا، ۲۰۱۵).



(ب)



(الف)

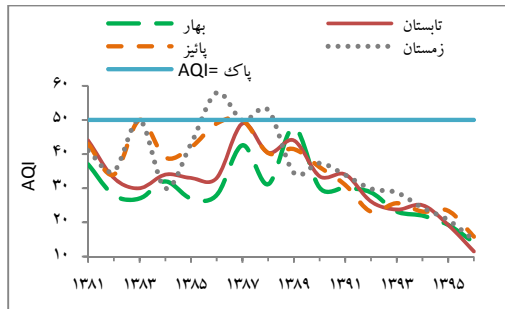
شکل ۱۰. (الف) روند متوسط فصلی شاخص AQI و (ب) فراوانی ماهانه روزهای مطلوب و نامطلوب آلاینده NO₂ (۱۳۸۱-۱۳۹۶).

همچنین آلاینده کوتاه‌مدت دی‌اکسید نیتروژن به‌عنوان مؤلفه مهمی از این آلاینده با طول ماندگاری چندروزه در جو، هم به‌صورت منفرد و هم در واکنش نسبت به سایر ترکیبات شیمیایی موجود در جو سبب تشکیل آلاینده‌های ثانویه همچون ذرات معلق (آئروسول‌های نیترات) و ازن سطحی شده و در واداشت اقلیمی نقش مهمی دارند (پیلینگ و همکاران، ۲۰۰۷؛ U.S EPA، ۲۰۱۹؛ سازمان حفاظت از محیط زیست نیوجرسی (NJDEP)، ۲۰۱۸؛ ناسا، ۲۰۱۹؛ UNECE، ۲۰۱۹). لذا انجام اقدامات اساسی برای کنترل انتشارات (NOXs) باهدف کاهش ازن سطحی برای تعدیل گرمایش جهانی امری ضروری است.

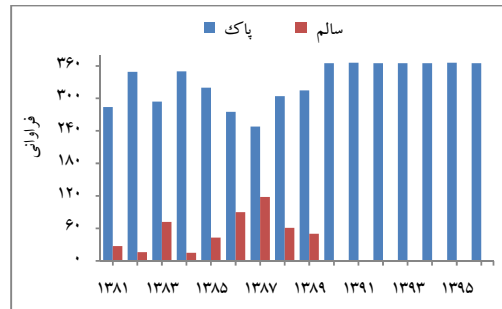
۳-۵. آلاینده کاهشی هوای شهر تهران: دی‌اکسید گوگرد (SO₂)

علاوه بر روند روبه بهبود و وضعیت مطلوب آلاینده (CO)، آلاینده (SO₂) نیز در کل دوره مطالعاتی شرایط قابل‌قبولی داشته است. به‌طوری‌که بر اساس حدود استاندارد روزانه این آلاینده، فراوانی روزهای با غلظت بالاتر از (۱۴۴ μg/m³) آن نباید بیش از یک روز در سال ثبت شود، لذا با توجه به نتایج (جدول ۲) در هر سه دوره آلودگی هیچ روز ناسالمی برای این آلاینده مشاهده نشده و متوسط سالانه و فصلی شاخص کیفی آن نیز به‌استثناء فصل زمستان در دوره میانی که تا سطح کیفی سالم افزایش یافته، در سایر موارد در زیر حد استاندارد هوای پاک قرار داشته است (شکل ۳ و ۱۱-ب). این آلاینده در سال‌های ابتدایی دوره مطالعاتی (۱۳۸۱-۱۳۸۵) با (۵۹٪) افزایش در روند متوسط غلظت سالانه خود به حداکثر مقدار مربوطه (۴۶ ppb) رسیده و در سال‌های میانی بیشترین مقادیر شاخص کیفی خود (AQI:۴۸) را با

بیشترین فراوانی روزهای سالم به‌ثبت رسانده است. اما از دوره دوم آلودگی به‌بعد با تقریباً ۷ برابر افت (۵۵۷٪) در میزان غلظت و ۳ برابر افت (۲۴۳٪) در شاخص کیفی خود روند کاهشی چشم‌گیر را طی و به آخرین حد استاندارد غلظت سالانه ملی مربوطه (۷ ppb) و حداقل شاخص کیفی (AQI:۱۴) در سال ۱۳۹۶ رسیده که در تمام این دوره نیز در سطح کیفی پاک قرار داشته است (شکل ۲-الف و ب، ۱۱-الف). دلیل این اتفاق بهبود کیفیت سوخت به‌ویژه سوخت دیزل در خودروهای سنگین با حداقل غلظت گوگرد و سولفور و محدودیت استفاده از سوخت‌های با گوگرد بالا عنوان شده که در سال‌های اخیر در گازوئیل مصرفی شهری نیز کاهش یافته است و در صورت کاهش در سوخت خودروهای سنگین و اتوبوس‌های بین‌شهری در سایر نقاط نیز افت این روند همچنان ادامه خواهد داشت (روشنی و همکاران، ۱۳۹۷). پیک غلظت جهانی این آلاینده (۱۳۱ مگاتون) نیز در سال ۱۹۷۲ مشاهده شد که به‌دلیل تلاش‌های جهانی برای کاهش باران‌های اسیدی به‌ویژه در ژاپن، اروپا و ایالات متحده (ال وارد، ۲۰۰۹) و نیز اجرای قانون هوای پاک آمریکا در سال‌های (۱۹۶۳، ۱۹۷۹، ۱۹۹۰) منجر به کاهش قابل‌توجه سطح آن شد. به‌طوری‌که روند بلندمدت سالانه غلظت یک‌ساعته این آلاینده در ایالات متحده آمریکا با افت چشم‌گیر (۹۱٪) کاملاً به زیر سطح استاندارد ملی (۷۵ ppb) رسیده (U.S EPA، ۲۰۱۸) است و لذا وضعیت این آلاینده در تهران با روند مطلوب جهانی همسو است. از نظر فصلی و ماهانه نیز کمترین مقادیر شاخص (AQI) آلاینده SO₂ در دوره گرم به‌ویژه در فصل بهار (اردیبهشت) و بالاترین شاخص در دوره سرد و به‌ویژه در زمستان با پیک ماهانه در آذر و دی به‌دلیل تأثیر شرایط اقلیمی خاص دوره سرد سال است.



(ب)



(الف)

شکل ۱۱. (الف) فراوانی سالانه روزهای مطلوب و (ب) روند متوسط فصلی شاخص AQI آلاینده SO_2 (۱۳۸۱-۱۳۹۶).

آلاینده کوتاه‌مدت SO_2 نیز همچون سایر آلاینده‌ها به دلیل ماندگاری چندروزه در جو علاوه بر تأثیرات منفی بر بهداشت جامعه، رخداد بارانهای اسیدی، مه دود شیمیایی، کاهش وضوح دید، نهشت اسیدی و اسیدی کردن اکوسیستم‌ها (پلایل، ۲۰۰۹؛ ال وارد، ۲۰۰۹) در تغییرات اقلیمی نیز نقش دارد. این آلاینده در دوره سرد به‌ویژه در شرایط اقلیمی مرطوب همراه با سایر اکسیدهای سولفور با واکنش شیمیایی نسبت به ترکیبات جو منجر به تشکیل ذرات آئروسول سولفات ثانویه‌شده و لذا با بازتابش انرژی ورودی سبب واداشت تابشی منفی می‌شود. از طرف دیگر با تغییر در غلظت هسته‌های چگالش ابری (CCN) منجر به تغییر آلبدو ابرها می‌شود و در نتیجه به‌عنوان یک عامل خنک‌کننده جوی سبب کاهش دما و خنثی کردن گرمایش اقلیمی شده و در بلندمدت سرمایه‌ش را به‌همراه دارد. لذا کاهش بیشتر انتشار دی‌اکسید گوگرد منجر به کاهش خنک‌کنندگی جو و احتمالاً کمک به افزایش گرمایش هوا است و در نتیجه امکان دستیابی به اهداف تعدیل تغییر اقلیم را به تعویق خواهد انداخت. به‌همین دلیل در کنترل انتشار این آلاینده باید با تعادل و الویت بیشتر به سایر آلاینده‌های مؤثر در تشدید گرمایش هوا عمل کرد (وینگلی، ۱۹۸۹؛ پیلینگ و همکاران، ۲۰۰۷؛ U.S EPA، ۲۰۱۹).

۴. نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل روند بلندمدت

(۱۳۸۱-۱۳۹۶) متوسط سالانه غلظت و شاخص (AQI) و نیز وضعیت کیفیت فصلی و ماهانه شش آلاینده کوتاه‌مدت هوای شهر تهران مشخص شد که علی‌رغم بهبود قابل توجه در وضعیت دو آلاینده (SO_2, CO) تا سطح استانداردهای ملی و بین‌المللی به دلیل اجرای سیاست‌های ارتقاء کیفی فناوری ساخت و سوخت مصرفی در وسایل نقلیه موتوری، اما در خصوص سایر آلاینده‌ها وضع به این منوال نیست. به‌طوری‌که میزان سطح غلظت آنها، علی‌رغم برخی روندهای سالانه کاهش $(PM_{2.5})$ ، اما همچنان بالاتر از حدود استانداردهای روزانه و سالانه معین‌شده مربوطه است. از طرفی به دلیل تأثیرات شرایط خاص اقلیمی بر تجمع و تشدید غلظت آلاینده‌ها در سطح، میزان شاخص (AQI) روزانه آلاینده‌ها نیز در هر دوره از سال افزایش چشم‌گیر داشته و لذا با رخداد روزهای آلوده در فصول مختلف سال مواجه هستیم که این شرایط در سال‌های اخیر قابل توجه‌تر بوده است. به‌طوری‌که در طی ۱۶ سال مطالعاتی با توجه به بالاترین مقادیر نامطلوب شاخص (AQI) و بیشترین درصد فراوانی رخداد روزهای آلوده آلاینده‌ها، سه دوره کلی آلودگی $(CO: 1381-1385)$ ، $(PM_{10}: 1386-1388)$ ، $(PM_{2.5}: 1389-1396)$ در هوای شهر تهران تعیین شد. بر این اساس دوره سوم با ۱۱٪ رشد نامطلوب در متوسط شاخص (AQI) سالانه و کاهش (۱۹٪-) در مجموع فراوانی روزهای مطلوب (پاک ۱۸۴٪-)، سالم (۱۳٪-) و افزایش (۳۳٪) در مجموع روزهای نامطلوب به‌ویژه ناسالم

اوایل زمستان ثبت شده که نسبت به دو دوره قبل از رشد نامطلوبی بخصوص در زمستان (۷۰٪) برخوردار بوده است.

بر طبق مطالعات انجام شده آنچه در افزایش و تشدید غلظت آلاینده‌ها در دوره‌های آلودگی فصلی بسیار مؤثر بوده، تأثیر شرایط اقلیمی به واسطه کاهش سامانه‌های همدید فعال جوی، رخداد پایداری‌ها، وارونگی دمای سطحی، افزایش دما و تابش، کاهش باران و باد مؤثر و عمق لایه اختلاط و فراهم شدن زمینه برای واکنش‌های شیمیایی و فتوشیمیایی مؤثر در تشکیل آلاینده‌های ثانویه بوده است. لذا به دلیل وجود رابطه متقابل معنی‌دار بین آلودگی هوا و شرایط اقلیمی این افزایش غلظت در آلاینده‌های اصلی هوا همچون ذرات معلق به‌ویژه کربن سیاه، گاز گلخانه‌ای ازن سطحی و آلاینده‌های پیش‌ساز مربوطه، نه تنها بر سطح بهداشت و اقتصاد جوامع تأثیر نامطلوب دارد بلکه به دلیل امکان ماندگاری در جو، تأثیرات فرامرزی و داشتن پتانسیل تأثیر بر شرایط اقلیمی، توان ایجاد تغییرات سریع در شرایط آب‌وهوایی را از طریق تعاملات پیچیده فیزیکی و شیمیایی جوی دارا بوده و با برهم زدن تعادل انرژی تابشی بین جو و سطح زمین سبب واداشت‌های به‌ویژه مثبت اقلیمی و در نهایت رخداد و تشدید گرمایش ناشی از تغییر اقلیم در مقیاس محلی، منطقه‌ای و جهانی می‌شوند. بنابراین به دلیل تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم آلاینده‌های کوتاه‌مدت کیفیت هوا در تشدید تغییرات آب‌وهوایی و به‌منظور دستیابی به اهداف تعدیل تغییر اقلیم علاوه بر نیاز به کاهش بیشتر گازهای گلخانه‌ای بلندمدت، کنترل و کاهش سخت‌گیرانه‌تر انتشار این آلاینده‌ها در محیط‌های شهری نیز باید مورد توجه ویژه قرار گیرند. زیرا تلاش‌های میان‌مدت مؤثر در کاهش آلودگی هوا می‌تواند استراتژی‌های بلندمدتی را که در نهایت سبب کنترل تغییرات آب‌وهوایی می‌شود پشتیبانی کند. به‌طوری‌که اقدام برای ایجاد هوای پاک باهدف تنزل انتشار آلاینده‌هایی که منجر به تولید گازهای گلخانه‌ای و

برای گروه‌های حساس (۳۵٪) نسبت به دو دوره پیشین، به‌عنوان آلوده‌ترین دوره تعیین شد که آلاینده معیار سالانه حال حاضر نیز ($PM_{2.5}$) است. دلیل این اتفاق علاوه بر شروع سنجش غلظت $PM_{2.5}$ و سخت‌گیرانه‌تر شدن حدود استاندارد روزانه NO_2 از اواسط سال ۱۳۸۹ به بعد باهدف کنترل بیشتر آلودگی و بهبود شرایط کیفی هوا، متأثر از افزایش غلظت آلاینده دی‌اکسید نیتروژن و ازن ثانویه همراه با ثبت روزهای آلوده مربوطه در این دوره در کنار وضعیت نامطلوب ذرات معلق است. همچنین از نظر فصلی به دلیل تأثیر شرایط جوی خاص هر فصل بر افزایش و تشدید غلظت آلاینده‌ها، دو پیک آلودگی در دوره‌های سرد و گرم سال معین شد. بر این اساس کیفیت نامطلوب هوا در فصل گرم با ثبت (۴۱٪) از کل فراوانی روزهای آلوده سالانه به‌ویژه در تابستان (۲۳٪)، ناشی از غلظت‌های بالای آلاینده‌های ($PM_{2.5}$ (۷۰٪)، PM_{10} (۲۷٪) و O_3 (۳٪) با پیک ماهانه در خرداد، تیر و مرداد است. هرچند میزان درصد فراوانی روزهای آلوده فصل تابستان در دوره سوم از نظر ذرات معلق به‌ویژه $PM_{2.5}$ نسبت به دوره‌های قبل (۳۵٪) در ماه‌های مرداد و به‌ویژه شهریورماه کاهش داشته اما در تیرماه افزایشی بوده است. پیک آلودگی دوره سرد نیز با ثبت (۵۹٪) از فراوانی روزهای نامطلوب سالانه به‌ویژه در زمستان (۳۱٪)، به دلیل غلظت‌های بالای آلاینده‌های ($PM_{2.5}$ (۸۷٪)، PM_{10} (۱۰٪) و NO_2 (۳٪)) با پیک ماهانه در آذر و دی بوده است. لذا بر اساس یافته‌های این پژوهش وضعیت کیفیت نامطلوب هوای شهر تهران در مقیاس‌های زمانی مختلف سالانه، فصلی و ماهانه به دلیل غلظت‌های بیش از دو تا ۴ برابر حدود استانداردهای ملی و بین‌المللی اکثر آلاینده‌های کوتاه‌مدت هوا مورد اثبات آماری قرار گرفت. به‌طوری‌که از دوره سوم آلودگی به بعد کیفیت هوای این شهر تنها در حدود (۲٪) از روزهای سال در سطح پاک و در مقابل در یک‌سوم از روزهای سال (۳۶٪) آلوده بوده که بیشترین درصد فراوانی روزهای نامطلوب نیز در دوره سرد سال به‌ویژه از اواخر پاییز تا

لی، ا.، ۱۳۹۵، آنالیز شیمیایی ذرات معلق ($PM_{2.5}$) هوای شهر تهران به‌منظور مطالعات منشایی اسفند ۹۲-بهمن ۹۳، شرکت کنترل کیفیت هوا.

اشرفی، خ.، معجری، م.، انواری، ا. و علی فیض. س. م.، ۱۳۹۱، تأثیر شرایط هواشناسی بر غلظت آلاینده ذرات معلق کمتر از 2.5 میکرون در سطح شهر تهران، اولین کنفرانس مدیریت آلودگی هوا و صدا، تهران، دانشگاه صنعتی شریف.

ثقفی، م.ع. و علی‌اکبری بیدختی، ع.، ۱۳۹۳، بررسی تغییرات شبانه‌روزی و فصلی باد و دمای هوا و آلاینده‌های $CO-PM_{10}$ در لایه سطحی جو شهر تهران، م. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۱، ۱۷-۳۴.

روشن، غ.، خوش‌اخلاق، ف.، ننگهبان، س. و میرکتولی، ج.، ۱۳۸۸، تأثیر آلودگی هوا بر نوسانات اقلیمی شهر تهران، م. علوم محیطی، (۱)۷، ۱۷۳-۱۹۲.

روشنی، م.، عباسیان، م.، نادر، م.، شهبازی، ح.، تربیتان، س.، کریمی، ا. و ناکاتا، ش.، ۱۳۹۷، گزارش کیفیت هوای شهر تهران در سال ۱۳۹۶، شرکت کنترل کیفیت هوای شهر تهران.

روفیگر حقیقت، ن.، ارحامی، م.، حسینی، و. و لی، ا.، ۱۳۹۶، تعیین غلظت ترکیبات کربنی ذرات معلق ریز ($PM_{2.5}$) و بررسی روند تغییرات فصلی آنها در شهر تهران، ششمین همایش ملی مدیریت آلودگی هوا و صدا، تهران.

زندنی‌پور، ا.، برنجی، ف. و شریفی، م.، ۱۳۵۳، اندازه‌گیری ازن تولیدشده در اثر آلودگی هوا در تهران، م. محیط‌شناسی، (۱)۱، ۱۲۹-۱۳۲.

شرعی پور، ز. و علی‌اکبری بیدختی، ع.ع.، ۱۳۹۲، بررسی آلاینده ازن سطحی در شهر تهران طی دوره سال‌های (۲۰۰۸-۲۰۱۱)، م. فیزیک زمین و فضا، ۳۹(۳)، ۱۹۱-۲۰۶.

شرعی پور، ز. و علی‌اکبری بیدختی، ع.ع.، ۱۳۹۳، بررسی توزیع مکانی زمانی آلاینده‌های هوا در شهر تهران

در نتیجه گرمایش جوی می‌شود مزایای قابل‌توجهی را برای تعدیل تغییرات اقلیم به ارمغان خواهند آورد و در مقابل کاهش تغییرات اقلیمی نیز زمینه را برای تغییرات شرایط جوی و در نتیجه کاهش آلودگی هوا مهیا خواهد کرد. بنابراین ادغام سیاست‌های ترکیبی و استراتژی‌های یکپارچه‌شده برای مقابله همزمان با تغییر اقلیم و آلودگی هوا دارای منافع مشترک بوده و به‌عنوان مؤثرترین رویکرد و موقعیتی برد برد در بهبود شرایط خواهد بود. درحالی‌که تدوین و اجرای هر نوع استراتژی جداگانه جهت کاهش آلودگی هوا بدون توجه جدی به تأثیرات آلاینده‌ها بر شرایط نامطلوب اقلیمی نه‌تنها در بهبود مناسب کیفیت هوای محلی چندان کارآمد نخواهد بود بلکه ما را در دستیابی به اهداف تغییر اقلیم که خود عاملی در تشدید آلودگی هوا است نزدیک نخواهد کرد. بنابراین جهت جلوگیری از اتخاذ تصمیمات نادرست و یک‌جانبه مسئولین و متولیان امر در تدوین و اجرای سیاست‌های ارتقاء کیفیت هوای محلی و نیز کاهش گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه در سطح ملی و ایجاد تحولات اساسی در بخش‌های مؤثر در آلودگی هوا باید به این روابط و تأثیرات توجه ویژه شود تا مناسب‌ترین روش برای داشتن یک رویکرد جامع به‌منظور توسعه سیاست‌های مشترک و اجرای استراتژی‌های کارآمد برای مقابله با تغییر اقلیم همسو با تلاش‌های بین‌المللی اتخاذ شود.

مراجع

احمدی، س.، نجفی، م.ع. و روشنی، م.، ۱۳۹۱، گزارش سالانه کیفیت هوای تهران در سال ۱۳۹۲، گزارش فنی شرکت کنترل کیفیت هوا.

احمدی مقدم، م. و محمودی، پ.، ۱۳۹۲، تحلیل داده‌های آلودگی هوای تهران در دهه اخیر (۱۳۸۸-۱۳۷۹)، م. سلامت و محیط‌زیست، (۱)۶، ۳۳-۴۴.

ارحامی، م.، زارع شحنه، م.، روفیگر حقیقت، ن.، حسنجانی، ح.، نجفی، م.ع.، حسینی، و.، شاور، ج. و

- و شهرستان، <https://www.amar.org.ir>
- نادری، م. و عباسیان، م.، ۱۳۹۶، گزارش بانک جهانی درخصوص آلودگی هوای تهران، گزارش بانک جهانی و شرکت کنترل کیفیت هوا.
- نادیان، م.، میرزایی، ر. و سلطانی محمدی، س.، ۱۳۹۶، تحلیل مکانی-زمانی آلاینده PM_{2.5} هوای شهر تهران در سال ۱۳۹۴، چهارمین کنفرانس بین‌المللی برنامه‌ریزی و مدیریت محیط‌زیست.
- نجف پور، ع.ا.، جنیدی جعفری، ا. و دوستی، س.، ۱۳۹۴، تحلیل روند تغییرات غلظت پنج آلاینده شاخص کیفیت هوا، م. بهداشت در عرصه، ۳(۲)، ۱۷-۲۶.
- ندافی، ک.، یونسیان، م.، نبی زاده، ر.، جباری، ح.، رستکاری، ن.، حسونمند، م.ص.، غلامی، س.ر.، ملک افضلی، ش.، قنبریان، م.، الهی، ط.، کتابون مدیری، ف.، یعقوبی، ل. و ایزدپناه، ف.، ۱۳۹۰، راهنمای محاسبه، تعیین و اعلام شاخص کیفیت هوا، الزامات، دستورالعمل‌ها و رهنمودهای تخصصی مرکز سلامت محیط و کار، پژوهشکده محیط‌زیست دانشگاه علوم پزشکی تهران.
- نورپرور، ع. و فیض، س. م. ع.، ۱۳۹۳، تعیین تغییرات مکانی و زمانی آلاینده‌های گوگرد دی‌اکسید، نیتروژن دی‌اکسید و انواع ذرات معلق با استفاده از تکنیک‌های GIS در تهران، م. محیط‌شناسی، ۴۰(۳)، ۷۳۸-۷۲۳.
- ACCIONA, 2019, The link between climate change and air pollution, Retrieved from <https://www.activesustainability.com>.
- Baldasano, J. M., Valera, E. and Jimenez, P., 2003, Air quality data from large cities, Science of the Total Environment, 307(1-3), 141-165.
- Bidokhti, A. A., Shariepour, Z. and Sehatkashani, S., 2016, Some resilient aspects of urban areas to air pollution and climate change, case study: Tehran, Iran, Scientia Iranica, 23(5), 1994-2004.
- Chappelka, H. and 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, 149:85-94.
- برای ماه‌های سرد سال (۲۰۱۱-۲۰۱۳)، م. علوم و فناوری محیط‌زیست، ۱۶(۹۳)، ۱۳۴-۱۴۷.
- طاهری، ا. و حسینی، و.، ۱۳۹۷، بررسی کیفیت هوای سه‌ساله شهر تهران براساس استانداردهای رایج جهانی، گزارش فنی شرکت کنترل کیفیت هوا.
- علیجانی، ب. و صفوی، س. ی.، ۱۳۸۵، بررسی عوامل جغرافیایی در آلودگی هوای تهران، م. پژوهش‌های جغرافیایی، ۵۸، ۹۹-۱۱۲.
- فطرس، م. ح. و فتحی، ا.، ۱۳۹۰، شهرنشینی و آلودگی هوا در ایران، اولین کنفرانس اقتصاد شهری، مشهد، دانشگاه فردوسی.
- فلاح، م.، میرزا حسینی، س.، طاهری، پ. و اکبریان، م.، ۱۳۹۵، ریشه‌یابی عوامل مؤثر بر آلودگی هوای تهران و اولویت‌بندی راهکارهای ارائه‌شده با استفاده از روش TOPS، سومین همایش ملی پژوهش‌های مهندسی صنایع، تهران، گروه پژوهشی بوعلی.
- شرکت کنترل کیفیت هوای شهر تهران، ۱۳۹۲، گزارش سالانه کیفیت هوای تهران در سال ۱۳۹۱.
- شرعی پور، ز.، ۱۳۸۸، بررسی تغییرات فصلی و روزانه آلاینده‌های هوا و ارتباط آن با پارامترهای هواشناسی، م. فیزیک زمین و فضا، ۳۵(۲)، ۱۳۷-۱۱۹.
- مرکز آمار ایران، ۱۳۹۷، سرشماری عمومی نفوس و مسکن ۱۳۹۵، جدول جمعیت و خانوار به ترتیب استان
- D'Amato, G., Baena-Cagnani, C. E., Cecchi, L., Annesi-Maesano, I., Nunes, C., Ansotegui, I., D'Amato, M., Liccardi, G., Sofia, M. and Canonica, W. G., 2013, Climate change, air pollution and extreme events leading to the increasing prevalence of allergic respiratory diseases, Multi-disciplinary Respiratory Medicine, 8(1).
- D'Amato, G., Bergmann, K. C., Cecchi, L., Annesi-Maesano, I., Sanduzzi, A., Liccardi, G., Vitale, C., Stanzola, A. and D'Amato, M., 2014, Climate change and air pollution: Effects on pollen allergy and other allergic respiratory diseases, Allergo. J., Int., 23(1), 17-23.
- EEA, 2017, Air quality in Europe-2017 report, Copenhagen: European Environment Agency,

- Report. No., 13/2017.
- European Commission, 2010, Air Pollution and Climate Change, Science for Environment Policy, DG Environment News Alert Service. Is., 24, 12.
- Fiore, A.M., Naik, V. and Leibensperger, E.M., 2015, Air Quality and Climate Connections, Journal of the Air & Waste Management Association, 65(6), 645-685
- Harmens, H., Mills, G., Emberson, L.D. and Ashmore, M.R., 2007, Implications of climate change for the stomatal flux of ozone: a case study for winter wheat, Environmental Pollution, 146 (3), 763-770.
- Hegarty, J., Mao, H. and Talbot, R., 2007, Synoptic controls on summertime surface ozone in the northeastern United States, Geophys. Res. Atmos., 112.
- Heger, M. and Sarraf, M., 2018, Air Pollution in Tehran: Health Costs, Sources, and Policies, The World Bank Group. Environment and Natural Resources Global Practice Discussion Paper, 06, 38.
- Hegerl, G. C., Zwiers, F. W., Braconnot, P., Gillett, N. P., Luo, Y. and Marengo, J. A., 2007, Understanding and attributing climate change, Climate change 2007: the physical science basis, Contribution of the Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Edited by: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB. 2007, Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press, 663-746.
- Hjellbrekke, A. G. and Solberg, S., 2002, Ozone measurements 2000. Norway: Norwegian Institute for Air Research, Report.No., EMEP/CCC-Report 5/2002.
- Jacob, D. J. and Winner, D. A., 2009, Effect of climate change on air quality, Atmospheric Environment, 43(1), 51-63.
- Kanchan, K., Gorai, A. K. and Goyal, P., 2015, A Review on Air Quality Indexing System. Atmospheric Environment, 9, 101-113.
- Landsberg, H. E., 1981, The Urban Climate: Academic Press. International Geophysics., 28, 275
- Lanzafame, R., Monforte, P., Patan, G. and Strano, S., 2015, Trend analysis of Air Quality Index in Catania from 2010 to 2014. Energy Procedia, 82, 708-715.
- L. Ward, P., 2009, Sulfur dioxide initiates global climate change in four ways. Thin Solid Films, 517, 3188-3203.
- Reay, D., 2006, Other Indirect Greenhouse Gases- Carbon monoxide, Retrieved from <http://www.ghgonline.org/otherco.htm>.
- Md Yusoh, N. F. F., Ghazali, N. A., Ramli, N., Yahaya, A. S., Sansuddin, N. and Al Madhoun, W., 2008, Correlation of PM10 concentration and weather parameters in conjunction with haze event in Seberang Perai, Penang. Proceedings International Conference on Construction and Building Technology., D (20), 211-220.
- NASA, 2015, GMS: NASA Images Show Human Fingerprint on Global Air Quality – Release Materials, Retrieved from <https://svs.gsfc.nasa.gov>
- NASA, 2019, NASA's AIRS Maps Carbon Monoxide from. Brazil Fires, Retrieved from <https://climate.nasa.gov>
- Nayak, P., Sudheer, K. P., Rangan, D. M. and Ramasastri, K. S., 2005, Short-term flood forecasting with a neuro fuzzy model. Water Resources Research, 41(4), 1-16.
- NJDEP., 2018, NJ Air Quality Report (October 30). New 2017 Jersey Department of Environmental Protection. Bureau of Air Monitoring.
- Ott, W. R. and Hunt, W. F., 1976, A Quantitative Evaluation of the Pollutant Standards Index. The Air Pollution Control Association, 26, 1050-1054.
- Parry, M. L., Canziana, O., Palutikof, J. P., Van Der Linden, P. and Hanson, E. C., 2007, Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Working Group II Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Pleijel, H., 2009, Air Pollution and Climate Change: Two Sides of the Same Coin?. Swedish Environmental Protection Agency, 168.
- Pilling, M., Apsimon, H., Carruthers, D., Carslaw, D., Colvile, R., OBE, D. D., Dorling, S., Fisher, B., OBE, R. H., Heal, M., Laxen, D., Lindley, S., McCrae, I. and Stedman, J., 2007, Air Quality and Climate Change: A UK Perspective. The third report produced by the Air Quality Expert Group., 317. Retrieved from <http://www.airquality.co.uk>.
- Schmedding, R., Ma, M., Zhang, Y., Farrell, S., Pye, H., Chen, Y., Wang, C., Rasool, Q., Budisulistiorini, S., Ault, A., Surratt, J. and Vizuete, W., 2019, α -Pinene-Derived organic coatings on acidic sulfate aerosol impacts secondary organic aerosol formation from isoprene in a box model. Atmospheric Environment, 213:456-462.
- Shindell, D. T., Faluvegi, G., Stevenson, D. S., Krol, M. C., Emmons, L. K., Lamarque, J. F., Pétron, G., Dentener, F. J., Ellingsen, K., Schultz, M. G., Wild, O., Amann, M., Atherton, C. S., Bergmann, D. J., Bey, I., Butler, T., Cofala, J., Collins, W. J., Derwent, R. G., Doherty, R. M., Drevet, J., Eskes, H.

- J., Fiore, A. M., Gauss, M., Hauglustaine, D. A., Horowitz, L. W., Isaksen, I. S. A., Lawrence, M. G., Montanaro, V., Müller, J. F., Pitari, G., Prather, M. J., Pyle, J. A., Rast, S., Rodriguez, J. M., Sanderson, M. G., Savage, N. H., Strahan, S. E., Sudo, K., Szopa, S., Unger, N., van Noije, T. P. C. and Zeng, G., 2006, Multi-model simulations of carbon monoxide: Comparison with observations and projected near-future changes *Geophys. J., Res.*, 111, D19306.
- Stieb, D. M., Burnett, R. T., Smith-Doiron, M., Brion, O., Shin, H. H. and Economou, V., 2008, A new multipollutant, nothreshold air quality health index based on short-term associations observed in daily time-series analyses, *Air & Waste Management Association J.*, 58(3), 435-450.
- UNECE, 2019, Improving air quality while fighting climate change, Retrieved from <https://www.unece.org/>.
- U.S EPA, 1999, Guideline for reporting of daily air quality – air quality index (AQI), U.S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC.
- U.S EPA, 2014, Air quality index (AQI), A Guide to air quality and your health. U.S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC.
- U.S EPA, 2018, Air Quality Trends. U.S. Environmental Protection Agency, Retrieved from <https://epa.gov/>.
- U.S EPA, 2019, Air Quality and Climate Change Research. Retrieved from <https://www.epa.gov/>.
- Wigley, T. M. L., 1989, Possible climate change due to SO₂-derived cloud condensation nuclei. *Nature J.*, 339, 365-367. Retrieved from <https://www.nature.com>.

Long Term Status Analysis of Major Air Pollutants and Determination of Air Pollution Periods in Tehran Metropolis

Pishdad, E.^{1*}, Alijani, B.², Aliakbari-Bidokhti, A. A.³ and Akbari, M.⁴

1. Ph.D. Student, Department of Natural Geography, Faculty of Geography, Kharazmi University, Tehran, Iran

2. Professor, Department of Natural Geography, Faculty of Geography, Kharazmi University, Tehran, Iran

3. Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

4. Assistant Professor, Department of Natural Geography, Faculty of Geography, Kharazmi University, Tehran, Iran

(Received: 26 Nov 2019, Accepted: 9 June 2020)

Summary

Air pollution and climate change are two of the most serious problems facing human societies which interact with each other through radiation, dynamic and chemical processes. Increasing air pollutants some as greenhouse gases in addition to adverse effects on health, economic and social sectors of societies, during chemical and photochemical reactions in the atmosphere, disrupt the Earth's energy balance and cause radiation forcing and rapid negative climate gains, such as global warming. With the recent climate change the quality of life of urban communities is also facing a serious threat. With the importance of this issue and with the aim of achieving a unified approach to reducing air pollution and mitigating climate change, it is essential to know the quality of major air pollutants in the face of recent climate change. In this study, long-term data (2002-2017) of Tehran Air Quality Control Company were used for analysis of annual, seasonal and monthly air quality conditions and changes of trends of air pollutants concentrations and the air quality index (AQI) of six major air pollutants (CO, SO₂, NO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2.5}). Also, for the statistical analysis, linear regression model, frequency distribution and calculation of variation percentage were used. According to the results, the air quality of Tehran is in a poor condition due to concentrations of more than two to four times the national and international standards of most pollutants (except CO and SO₂ which have improved). So that during 16 years of study according to the highest values of AQI and the highest frequency of contaminated days, three general air pollution periods (2002-2006:CO), (2007-2009: PM₁₀), (2010-2017: PM_{2.5}) were determined for Tehran. Accordingly, the third period with an (11%) unfavorable growth in average annual AQI and a decrease (-19%) in total frequency of desirable days (-184% clean, -13 healthy) and increase (33%) in total adverse days, especially unhealthy days for sensitive groups (35%) was the most affected period compared to that of the other previous two periods. In the third period of air pollution only about (2%) of the days of the year were at the clean level and more than one third of the days (36%) with the criteria air pollutant (PM_{2.5}) contaminated. Also, seasonally due to the influence of the specific weather conditions of each season on the exacerbation of adverse pollutants status, two peak of pollution in cold and hot periods of the year were determined. In hot seasons, (41%) of the annual contaminated days were recorded, especially in summer (%23) due to high concentrations of pollutants (PM_{2.5} (70%), PM₁₀ (27%) and O₃ (3%)). The monthly pollution peaks of this period are also in June, July and August respectively. The peak of pollution in cold period of the year was designated as the most polluted peak. During this period, 59% of the frequency of adverse annual days, especially in winter (31%), was recorded due to high concentrations of pollutants (PM_{2.5} (87%), PM₁₀ (10%) and NO₂ (3%)) have been in December, January and February respectively. Also, in recent years (2010-2017), the winter pollution peak has been associated with a (24%) increase in the quality index and 70% in the frequency of contaminated days. Therefore, due to the direct and indirect effects of air quality pollutants in the face of aggravating climate change, in addition to the need to further reduce long-term greenhouse gas emissions in related policies, formulating stricter strategies to reduce pollutants emission in urban areas as Tehran should be improvised.

Keywords: Concentration, AQI Index, Criterion Air Pollutant (CAP), Trend, Climate Change, Tehran.

* Corresponding author:

epishdad@ymail.com