

تحلیل تغییرپذیری زمانی ازن‌سطحی اندازه‌گیری شده در ایستگاه مؤسسه ژئوفیزیک

دانشگاه تهران

نجمه کفاشزاده^{*} و عباسعلی علی‌اکبری بیدختی^۲

۱. پژوهشگر پسا دکتری، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲. استاد، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۶/۹، پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۱/۳۰)

چکیده

ازن‌سطحی یک آلاینده ثانویه است که عمدتاً از واکنش‌های نورشیمیایی دیگر عناصر در جو تشکیل می‌شود. میدان‌های هواشناختی متعددی نیز در تغییرپذیری و انتقال این آلاینده مؤثر هستند. تمامی این عوامل منجر به تغییرپذیری ازن‌سطحی در مقیاس‌های زمانی متفاوت می‌شود که در این پژوهش سعی شده است با استفاده از تکنیک کلمگرو-زورینکو (KZ) به بررسی تغییرات آن پرداخته شود. بدین‌منظور، سری زمانی ازن‌سطحی اندازه‌گیری شده در ایستگاه مؤسسه ژئوفیزیک در چهار سال متفاوت به کار گرفته شد. این داده‌ها پس از انجام کنترل کیفی با استفاده از تکنیک KZ به پنج مؤلفه طیفی درون روزانه، روزانه، هم‌دیدی، فصلی و روند بلندمدت تفکیک شد. در ادامه تغییرات هر یک از این مؤلفه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و از بین آنها مؤثرترین مؤلفه در این ایستگاه معرفی شد. نتایج نشان می‌دهد بیش از نیمی از تغییرپذیری ازن‌سطحی ناشی از نوسانات مؤلفه روزانه است، درحالیکه مؤلفه درون روزانه و هم‌دیدی حدود پنج درصد از این تغییرات را تشکیل می‌دهند. اگرچه مؤلفه هم‌دیدی مشارکت کمی در تغییرپذیری کل دارد، این مؤلفه قادر به تشدید تغییرات دیگر مؤلفه‌ها از جمله مؤلفه روزانه است. از دیگر نتایج به دست آمده در این پژوهش، تغییرات کاهشی مؤلفه روند بلندمدت از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۹-۲۰۲۰ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ازن‌سطحی، تحلیل مقیاس زمانی، فیلتر KZ، مؤلفه طیفی.

۱. مقدمه

شناخته می‌شود (رئمر و همکاران، ۱۹۹۴؛ شیندل و همکاران، ۲۰۰۶؛ سلمن و همکاران، ۲۰۰۷؛ اینس ورت و همکاران، ۲۰۱۲). از این‌رو، شناخت و چگونگی تغییرپذیری این گاز و عوامل مؤثر بر آن حائز اهمیت است.

فاکتورهای تأثیرگذار بر میزان ازن‌سطحی را می‌توان به دو دسته کلی یعنی واکنش‌های نورشیمیایی و میدان‌های هواشناختی تقسیم‌بندی کرد. از آنجاکه این گاز یک آلاینده ثانویه است از واکنش نورشیمیایی دیگر گازها شامل ترکیبات عالی‌فرار (VOCs)، متان (CH_4)، و مونوکسید کربن (CO) در حضور اکسیدهای نیتروژن (NO_x) تولید می‌شود (جاکب، ۱۹۹۹؛ لیفلد و دنتر، ۲۰۰۰؛ کوپر و همکاران، ۲۰۱۴؛ مانک و همکاران،

ازن نزدیک به سطح زمین (ازن‌سطحی) یکی از آلاینده‌های ثانویه است که سبب اختلال در سیستم سلامت موجودات زنده و تخریب برگ گیاهان و محصولات کشاورزی می‌شود (برنارد و همکاران، ۲۰۰۱؛ بل و همکاران، ۲۰۰۷؛ ملی و همکاران، ۲۰۱۵). این آلاینده در مقادیر بالا، به دلیل سمی بودن، سالانه منجر به مرگ دهها هزار انسان در جهان می‌شود (گری پاریس و همکاران، ۲۰۰۴؛ بل و همکاران، ۲۰۰۶؛ وست و همکاران، ۲۰۱۶؛ سیلو و همکاران، ۲۰۱۷؛ ای ای آ، ۲۰۱۸؛ دمارکو و همکاران، ۲۰۱۹) به طوری که در ایران سبب مرگ‌ومیر حدود ۱۳۶۳ انسان در شهر تهران طی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۶ شده است (هدائی و همکاران، ۲۰۱۷). به علاوه، ازن‌سطحی یکی از گازهای مؤثر در تشدید گرمایش هوا کره‌زمین و تغییر اقلیم

بلندمدت در سری زمانی این آلاینده می‌شود (رائو و همکاران، ۱۹۹۷).

تحلیل مقیاس زمانی به عنوان یک روش در بررسی سری‌های زمانی با فرکانس‌های متفاوت کاربرد دارد. اگرچه روش‌های متعددی از جمله تخمین پارامتر PEST (Parameter estimation) (براک ول و دیوس، ۱۹۹۱)، آنومالی (ویلکس، ۱۹۹۵) و تبدیل موجک (لو و ونگ، ۱۹۹۵) برای تحلیل مقیاس زمانی وجود دارد، اسکریچ و همکاران (۱۹۹۷) در مطالعه‌ای نشان دادند که فیلتر کلمگرو-زورینکو (KZ) (رائو و همکاران، ۱۹۹۷؛ یانگ و زورینکو، ۲۰۱۰؛ لنک و زورینکو، ۲۰۲۰) بر دیگر روش‌ها ارجحیت دارد. نتایج آنها نیز نشان داد که KZ دقت مشابه روش تبدیل موجک دارد و همچنین این روش قابل کاربرد در داده‌های با نقاط خاموش است. از دیگر مزیت‌های KZ بر دیگر روش‌ها، سهولت در استفاده از آن است. از این‌رو، این فیلتر یکی از روش‌های پرکاربرد در تحقیقات جوی به شمار می‌رود و مطالعات متعددی با استفاده از این روش به بررسی میدان‌های هواشناختی شامل دما و آلاینده‌های هوا از جمله ازن‌سطحی انجام شده است که در اینجا به برخی از آنها اشاره می‌شود (هاگرف و همکاران، ۲۰۰۰؛ تاراسو و کارپچک، ۲۰۰۳؛ کنگ و همکاران، ۲۰۱۳؛ سُی و همکاران، ۲۰۱۴؛ یوپدهیا و همکاران، ۲۰۲۰). هاگرف و همکاران (۲۰۰۰) روش KZ را برای مطالعه ازن‌سطحی در ایالت متحده به کار بردن و نشان دادند که نوسانات ازن‌سطحی که در بازه زمانی یک روز و بیشتر از آن رخ می‌دهد از اهمیت خاصی برخوردار هستند. به عنوان مثال، این نوسانات حاوی اطلاعاتی است که می‌توان دوره‌های حاد آلودگی را از غیرحد تشخیص داد. در مطالعه دیگر (تاراسو و کارپچک، ۲۰۰۳) روش KZ، برای بررسی اثرات میدان‌های هواشناختی بر تغییرات ازن‌سطحی در کشور روسیه به کار رفته است که در آن به همبستگی بالای تغییرات همدیدی و پارامترهای هواشناختی اشاره شده است. از دیگر

۲۰۱۵). اکسیدهای نیتروژن توسط منابع انسانی از جمله فرایندهای احتراق نظری و سایل نقلیه، سیستم‌های گرمایشی و نیروگاه‌ها منتشر می‌شود. واکنش‌های بین ازن‌سطحی و اکسیدهای نیتروژن در یک چرخه انجام می‌شود، که در این چرخه ازن توسط نور کافت و یا فوتولیز دی‌اکسید ازت (NO_2) در مدت زمان چند دقیقه تولید می‌شود و سریعاً توسط مونوکسید نیتروژن (NO) از بین می‌رود (واکنش تیترشدن یا تیتراسیون، سیلمن، ۱۹۹۹). اگرچه واکنش بین ازن و دی‌اکسید نیتروژن فقط در اثر تابش نور خورشید انجام می‌شود، واکنش تیترشدن مستقل از نور است (ساینفلد و پندیس، ۱۹۹۸). میدان‌های هواشناختی نیز به طرق متفاوت بر میزان ازن‌سطحی اثرگذار هستند. به عنوان مثال افزایش دما سبب افزایش ازن‌سطحی از طریق تسريع در انجام واکنش‌های نورشیمیایی می‌شود (لیلفلد و کرووتزن، ۱۹۹۰). وزش باد بر میزان پخش و انتقال ازن‌سطحی تأثیر ویژه و دوچانبه‌ای دارد، به طوری که اگرچه باد از سوی منابع آلاینده (مناطق ناسالم) به سمت مناطق پاک باشد سبب افزایش آلودگی در مقصد می‌شود و بر عکس (ونتورث و همکاران، ۲۰۱۵؛ علی‌اکبری بیدختی و همکاران، ۲۰۱۶). بیشتر دوره‌های حاد آلودگی ازن تحت تأثیر سیستم‌های همدیدی پرفسار است که از ویژگی‌های این سیستم، نزول هوا و وزش باد ملایم در لایه مرزی است (استال، ۱۹۸۸) که هردو سبب انتقال ازن از لایه‌های بالاتر و انشاشه شدن آن در نزدیکی سطح زمین می‌شود (علی‌اکبری بیدختی و شرعی‌پور، ۱۳۸۸؛ کالاکاس و همکاران، ۲۰۱۷). همین‌طور انتقال از پوشن‌سپهر به وردسپهر در اثر تاشدگی وردایست، به هنگام سیستم‌های جبهه‌ای بزرگ‌مقیاس، باعث افزایش ازن‌سطحی می‌شود (رلفس و لیلفلد، ۱۹۹۷؛ اشپرنگر و ورن لی، ۲۰۰۳؛ اکریتیدیس و همکاران، ۲۰۱۰؛ زنس و همکاران، ۲۰۱۴). از این‌رو، عوامل گوناگون در مقیاس‌های زمانی متفاوت بر میزان ازن‌سطحی تأثیرگذار می‌باشند که سبب به وجود آمدن نوسانات متعددی از جمله چرخه درون‌روزانه، شبانه‌روزی، فصلی و روند

محیط‌زیست نیز ایستگاه‌هایی را برای اندازه گیری آن در شهرهای بزرگ ایران برپا کرده است. این داده‌ها در بازه زمانی یک ساعته به زمان محلی به تاریخ‌های میلادی و شمسی ثبت شده است. از آنجاکه این داده‌ها به صورت خام، یعنی دریافت داده مستقیم پس از اندازه گیری، دریافت شده است، بدینهی است که گام نخست در استفاده از آنها اجرای کنترل کیفی می‌باشد. در این مطالعه از ابزار AutoQA4Env برای بررسی کنترل کیفی داده‌ها استفاده شده است. این ابزار در دو حالت پایه و پیشرفته برای کنترل کیفی سری زمانی داده‌های جوی توسط کفash زاده و همکاران (۲۰۱۹) در مرکز تحقیقاتی یولیش کشور آلمان توسعه یافته است. این ابزار مشکل از مجموعه‌ای از آزمایش‌های آماری متعدد است که اغلب در سازمان‌های هواشناسی جهانی (WMO) و حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا (EPA) مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمایش‌ها به چندین گروه متعدد از قبیل g_1 و g_2 وغیره همراه با تنظیماتی که توسط کاربر قابل انتخاب است، تقسیم‌بندی شده است. بخشی از ابزار AutoQA4Env در دو حالت پایه و پیشرفته به صورت منع باز در دسترس است (کفash زاده، ۲۰۲۰). شکل ۱ خروجی حاصل از اجرای این ابزار در حالت پایه را برای سری زمانی ازن سطحی نشان می‌دهد. در این شکل داده‌ها به دو دسته یعنی مورد قبول (pass) و غیرقابل قبول (fail) تقسیم‌بندی شده است و به ترتیب با رنگ‌های سبز و قرمز نشان داده شده است. لازمه مورد قبول واقع شدن داده، عبور از تمامی آزمایش‌های آماری اجرا شده در این ابزار می‌باشد. در این جا سه نوع آزمایش آماری از جمله دامنه، اعداد منفی و اعداد ثابت در نظر گرفته شده است. آزمایش دامنه به بررسی محدوده قابل قبول ازن سطحی، بین (ppbv-part per billion of volumes) ۲-۲۰۰ تا ۲۰۰ در این ایستگاه می‌پردازد. دو آزمایش آماری دیگر، به ترتیب به ارقام غیرقابل قبول با مقادیر کمتر از (ppbv) ۲-۲ و تعداد اعداد ثابت بیشتر از ۷۲ تا اشاره دارد. لیست این آزمایش‌ها به همراه خروجی آن در جدول ۱ نشان داده

مطالعات انجام شده با استفاده از این روش می‌توان به بررسی ازن سطحی در کره جنوبی توسط سی و همکاران (۲۰۱۴) اشاره کرد. آنها نشان دادند که اگرچه نوسانات کوتاه‌مدت و فصلی بیشترین سهم مشارکت را در تغییرپذیری ازن سطحی دارند، در ایستگاه‌های ساحلی سهم نوسانات کوتاه‌مدت و در مکان‌های دور از ساحل سهم نوسانات فصلی به مقدار بیشینه می‌رسد. علی‌رغم مطالعات گسترده در این زمینه، در ایران تاکنون هیچ روش تحلیل مقیاس زمانی برای بررسی تغییرپذیری آلاینده‌ها مورد استفاده قرار نگرفته است، هدف از این مطالعه معرفی فیلتر KZ و یک نمونه استفاده از آن برای بررسی تغییرپذیری داده سری زمانی ازن سطحی است.

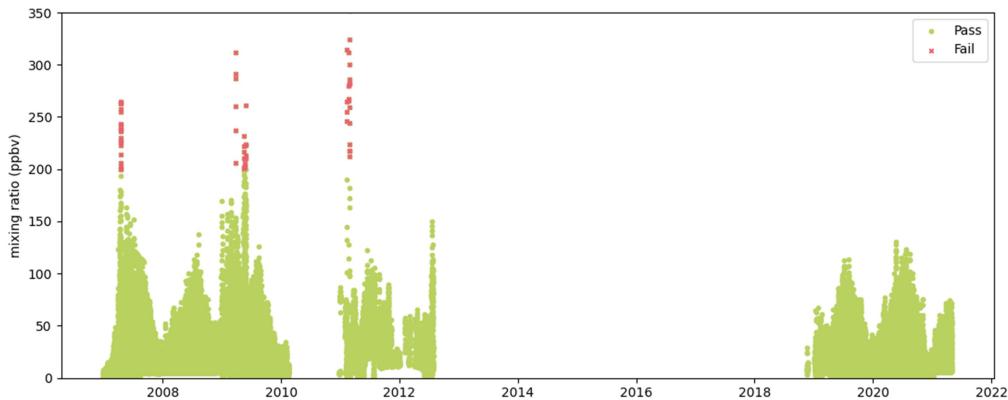
در این پژوهش سعی شده است روش تحلیل مقیاس زمانی KZ بر یک سری زمانی ازن سطحی اندازه گیری شده استفاده شود و مؤلفه‌های طیفی آن مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین به‌منظور دست یافتن به نتایج معتبر، این ارزیابی برای چهار سال متفاوت ۲۰۰۷، ۲۰۰۸، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ در دو دهه مختلف بررسی شده است. ازین‌رو، در بخش ۲ داده‌ها و کنترل کیفی آنها، در بخش ۳ تکنیک به کار رفته در تحلیل مقیاس زمانی، در بخش ۴ نتایج حاصل از اجرای این تکنیک و در بخش آخر بحث و نتیجه گیری‌ها بیان خواهد شد.

۲. داده‌ها

در این بررسی از داده‌های ازن سطحی اندازه گیری شده در ایستگاه مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران به عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۴ دقیقه و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲۳ دقیقه، استفاده شده است. از ویژگی‌های این ایستگاه قرار گیری در ارتفاع ۱۴۱۹ متری در شمال شهر تهران و در معرض بودن بادهای کوه-دشت و دشت-کوه است (شرعی‌پور و علی‌اکبری بیدختی، ۱۳۹۲الف). اندازه گیری این داده‌ها از سال ۲۰۰۷ توسط شرکت کنترل کیفی هوای شهرداری تهران شروع و سپس سازمان حفاظت

بازه‌های زمانی با استفاده از داده‌های بازتحلیل پایگاه NCEP/NCAR آلدگی‌های همدیدی در شهر تهران در بازه زمانی ۲۰۰۷-۲۰۱۷، حاکی از این است که اغلب آلدگی‌ها حد در اثر وجود سامانه‌های جوی در ماههای مهر، آبان، آذر و دی رخ می‌دهند (لشکری و همکاران، ۱۳۹۹). از طرف دیگر، رجوع به تحقیقات پیشین عزیزی و همکاران (۱۳۹۰)، حاکی از وجود یخنیان شدید در روزهای ۱۵-۱۲ آوریل ۲۰۰۹ می‌باشد که این می‌تواند سبب یخ‌زدگی دستگاه و در نتیجه بروز خطای در اندازه‌گیری‌ها شود. لذا تمامی ۱۲۵ اعدادی که توسط ابزار AutoQA4Env به عنوان ارقام غیرقابل قبول شناخته شده است از داده‌ها حذف شد و فقط ارقام مورد قبول در این پژوهش استفاده شده است.

شده است. همان‌گونه که این جدول نشان می‌دهد تعداد ۱۲۵ عدد (۰/۲۵ درصد) به عنوان داده غیرقابل قبول شناخته شده است. یکی از واضح‌ترین ارقام غیرقابل قبول در تاریخ ۱۷ نوامبر ۲۰۱۸ می‌باشد که مقدار ازن در این روز (ppbv) ۶۴۹۳/۲ ثبت شده است که این رقم می‌تواند ناشی از خطای دستگاه به دلیل راهاندازی مجدد پس از مدت‌زمان طولانی باشد. بیشترین بخش داده‌های غیرقابل قبول مربوط به دوره زمانی چند روزه در مارس ۲۰۰۹ است که طی این مدت مقادیر ازن‌سطحی به بیش از ۷۰۰ (ppbv) رسیده است. اگرچه وجود چنین مقادیری می‌تواند ناشی از وجود سیستم‌های همدیدی پرفشار قوی باشد، اما به دلیل عدم وجود چنین سیستم در این دوره زمانی این مستله دور از انتظار وغیرممکن به نظر می‌رسد. الگوهای همدیدی در این



شکل ۱. کنترل کیفی سری زمانی ازن‌سطحی اندازه‌گیری شده در ایستگاه مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران. این شکل خروجی تصویری (در قالب png) حاصل از اجرای ابزار AutoQA4Env در حالت پایه بر روی داده‌ها است. ارقام قابل قبول (Pass) و غیرقابل قبول (Fail) به ترتیب با رنگ سبز و قرمز نشان داده است. برای واضح‌بودن این شکل محور قائم بین صفر و ۳۵۰ (ppbv) محدود شده است، اگرچه در این داده رقم بیشتر از ۶۰۰۰ نیز وجود دارد.

جدول ۱. خلاصه کنترل کیفی داده‌های سری زمانی مشاهده شده در شکل ۱. آزمایش‌های آماری اجرا شده شامل دامنه (g0_range_test) و اعداد ثابت (g1_constant_value_test) و اعداد منفی (g1_negative_value_test) و نتایج آنها (بهصورت تعداد داده قابل قبول و غیرقابل قبول) در جدول لیست شده است. به عنوان مثال تعداد ۱۲۵ تا عدد از ۴۹۶۳۹ عدد در آزمایش دامنه به عنوان ارقام غیرقابل قبول تشخیص داده شده است که این ۰/۲۵ درصد از داده را تشکیل می‌دهد. لازم به ذکر است که جدول زیر نیز بخشی از شکل خروجی ابزار AutoQA4Env است که به دلیل حفظ قالب مجله بهصورت مجزا نشان داده شده است.

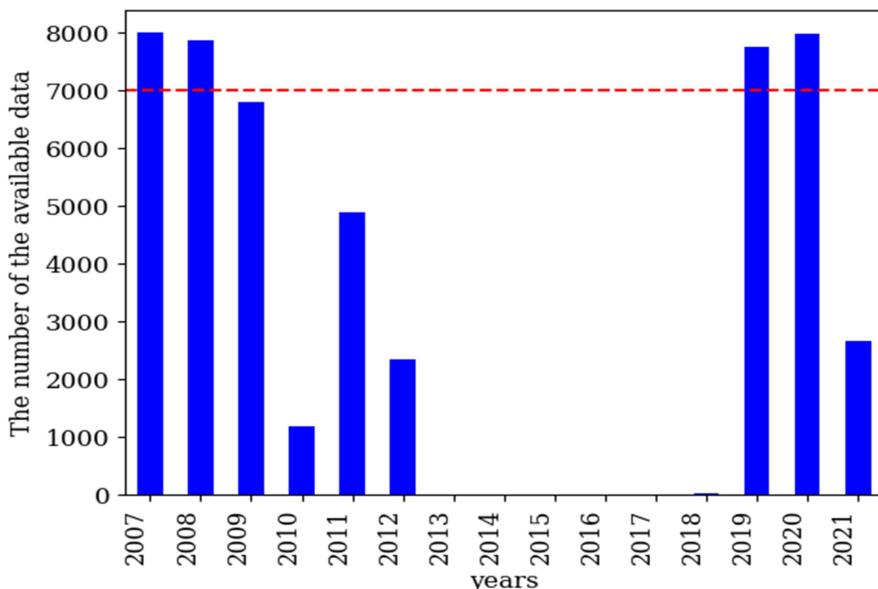
آزمایش‌های اجرا شده	تعداد ارقام قابل قبول	تعداد ارقام غیرقابل قبول
دامنه	۴۹۵۱۴ (۹۹/۷۵ درصد)	۱۲۵ (۰/۲۵ درصد)
اعدا ثابت	۴۹۶۳۹ (۱۰۰ درصد)	۰ (۰ درصد)
اعداد منفی	۴۹۶۳۹ (۱۰۰ درصد)	۰ (۰ درصد)

که برخی از این روش‌ها در مطالعه اسکریچ و همکاران (۱۹۹۷) گردآوری و مقایسه شده است. در این مطالعه از روش فیلتر کلمگرو-زورینکو (KZ) استفاده شده است (زورینکو، ۱۹۸۶؛ رائو و همکاران، ۱۹۹۷). دلیل انتخاب این فیلتر، علاوه بر دقت بالای آن که در حد روش تبدیل موجک (wavelet) است، انعطاف‌پذیری و همچنین قابل کاربرد بودن این تکنیک در صورت وجود نقاط خاموش داده‌ای در سری زمانی است. از دیگر ویژگی‌های این تکنیک، حساسیت بالای آن یعنی توانایی در تشخیص سیگنال‌های ضعیف در مجموعه ای از نویزهای قوی است. از جمله محدودیت‌های روش KZ دقت $\frac{1}{n}$ و تکنیک پذیری $\frac{2}{n}$ آن است که این دو بهتر ترتیب به تشخیص دقیق فرکانس سیگنال و جداسازی دو سیگنال با فرکانس‌های نزدیک به هم اشاره دارد. اگرچه آستانه خاصی برای استواری این تکنیک در حضور نقاط خاموش داده وجود ندارد، ولی مطالعه انجام شده توسط لنک و زورینکو (۲۰۲۰) نشان داد که در حضور ۵۰ درصد نقاط خاموش داده در یک سری زمانی با طول ۵۰۰۰، حساسیت بدون تغییر و دقت به اندازه کمتر از ۰/۰۰۶ از فرکانس واقعی تغییر می‌کند.

علی‌رغم موجودیت داده‌ها برای مدت زمان طولانی مدت، یعنی از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۱، شکاف‌های کوتاه و همچنین طولانی مدت در داده وجود دارد که مانع استفاده از تمامی داده‌ها می‌شود. به همین دلیل یک آستانه در حدود ۸۰ درصدی برای موجودیت داده در یک سال (یعنی تعداد ۷۰۰۶ تا عدد در یک سال) در نظر گرفته شده است. این آستانه در شکل ۲ با خط‌چین قرمزرنگ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تنها در سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۹ داده موجود است. بنابراین در این مطالعه فقط به بررسی داده در این چهار سال که در دو دهه مختلف قرار دارد پرداخته می‌شود.

۳. روش تحقیق

همان‌گونه که در بخش مقدمه ذکر شد سری زمانی ازن سطحی شامل نوسانات گوناگون در فرکانس‌های زمانی متعددی ناشی از عوامل متفاوت است. از این‌رو، این گاز دارای تغییرپذیری پیچیده و بررسی آن نیاز به کاربرد روش تحلیل مقیاس زمانی دارد. روش‌های متعددی برای تحلیل مقیاس زمانی وجود دارد



شکل ۲. تعداد داده‌های موجود اندازه‌گیری شده ازن سطحی در هر سال در ایستگاه مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران. خط‌چین قرمزرنگ، نشان‌دهنده ۸۰ درصد وجود داده (یعنی ۷۰۰۶ رقم در یک سال) است. سال‌هایی که در آن میله‌ها از این خط‌چین بالاتر است دارای داده کافی (یعنی بیشتر از ۸۰ درصد) برای انجام این مطالعه می‌باشد.

تغییرپذیری هر یک از مؤلفه‌های طیفی در محدوده متفاوتی روی می‌دهد. به طوری که، مؤلفه درون‌روزانه از (ppbv) ۵۲-۵۰ تا ۶۰ می‌باشد. مؤلفه روزانه از (ppbv) ۱۱۸-۷۱ تا ۵۲، مؤلفه همدیدی از (ppbv) ۵۱-۲۲ تا ۵۷، مؤلفه فصلی از (ppbv) ۲۱-۲۶ تا ۵۲ و مؤلفه روند بلندمدت از (ppbv) ۲۶-۲۱ تا ۲۶ نوسان می‌کند (شکل ۳-ب تا شکل ۳-ج). تمامی نوسانات و تغییرات در این مطالعه نسبت به میانگین بررسی می‌شود. این تغییرات حاکی از تغییرپذیری ازن-سطحی در مقیاس‌های زمانی متفاوت است که هر یک ناشی از عوامل گوناگون از جمله تیتراسیون روزانه، طلوع و غروب خورشید، تغییرات فصلی، سامانه‌های همدیدی و تغییر اقلیم می‌باشد. از دیگر نکات در شکل ۳ نوسانات شدید مؤلفه‌های دورن-روزانه و روزانه است که به تدریج با کاهش فرکانس در دیگر مؤلفه‌ها از مقدار این نوسانات کاسته می‌شود.

۲-۴. مؤلفه درون‌روزانه

همان‌طور که در بخش ۳ اشاره شد، مؤلفه درون‌روزانه شامل تغییرپذیری ازن‌سطحی است که در مدت زمان کمتر از ۱۲ ساعت در طول شباهه روز رخ می‌دهد. به‌منظور بررسی دقیق و واضح‌تر تغییرات و نوسانات مؤلفه درون‌روزانه ازن‌سطحی، مقادیر این مؤلفه در دو روز متولی، که به صورت تصادفی انتخاب، در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که این شکل نشان می‌دهد در این دو روز این مؤلفه بین مقادیر (ppbv) ۱۵-۱۵ تا +۱۵ نوسان دارد. مقادیر مثبت و منفی این مؤلفه به ترتیب حاکی از تغییرپذیری ازن‌سطحی در جهت افزایشی و کاهشی نسبت به میانگین است. به عنوان مثال، در این شکل ازن از ساعات ۰۰ تا ۰۶ دارای نوسانات بسیار اندرکی می‌باشد که این به‌دلیل پایداری لایه‌مرزی شباهه است (پگافر و همکاران، ۱۳۹۱). پس از آن در صبحگاه با شروع ترافیک و انتشار تازه گازهای اکسید ازت واکنش‌های تیتراسیون آغاز شده که سبب کاسته شدن ازن در این ساعت می‌شود. سپس با طلوع آفتاب و شروع واکنش‌های نورشیمیابی مقادیر ازن افزایش یافته است که این روند تا ساعت ۱۲ به وقت محلی ادامه دارد. با شروع ترافیک در

تکنیک KZ یک فیلتر پایین گذر مشکل از تکرار میانگین‌متحرک است که در آن میانگین S به صورت:

$$S(t) = \frac{1}{m} \sum_{j=(m-1)/2}^{(m-1)/2} ORG(t+j) \quad (1)$$

که در آن ORG و t نشان‌دهنده سری زمانی اصلی و بازه زمانی داده (در اینجا یک ساعت) است. در این رابطه S به سری زمانی ورودی برای هر تکرار اشاره دارد.

$$KZ_{m,k} = R_{i=1}^k \left\{ J_{p=1}^{W_i} [S(t_i)_p] \right\} \quad (2)$$

در اینجا m طول پنج‌رخه متحرک و k مقدار تکرار را نشان می‌دهد که این دو کمیت معیاری برای تعیین فرکانس است. در رابطه (۲) R و J به ترتیب نشانگر تکرار و میانگین‌متحرک است. از دیگر پارامترهای به کار رفته در این رابطه W است که از رابطه L_{i-m+1} محاسبه می‌شود که در اینجا L طول سری زمانی S است. در این پژوهش با توجه به تحلیل دوره‌نگار ازن‌سطحی، سری زمانی به پنج مؤلفه طیفی تقسیم شده است:

$$ORG(t) = ID(t_{<12h}) + DU(t_{12h-2.5d}) + SY(t_{2.5d-21d}) + SE(t_{21d-365d}) + BL(t_{>365d}) \quad (3)$$

که ID مخفف واژه intraday است که اشاره به نوسانات درون‌روزانه، که در کمتر از ۱۲ ساعت در طول شباهه روز انجام می‌شود، دارد. به‌همین ترتیب (diurnal) DU به چرخه روزانه بین ۱۲ ساعت و ۲/۵ روز، همدیدی (synoptic) SY به نوسانات بین ۲/۵ و ۲۱ روز، فصلی (seasonal) SE به نوسانات بین ۲۱ تا ۳۶۵ روز و (baseline) BL به نوسانات بین ۳۶۵ روز اشاره دارد.

۴. نتایج

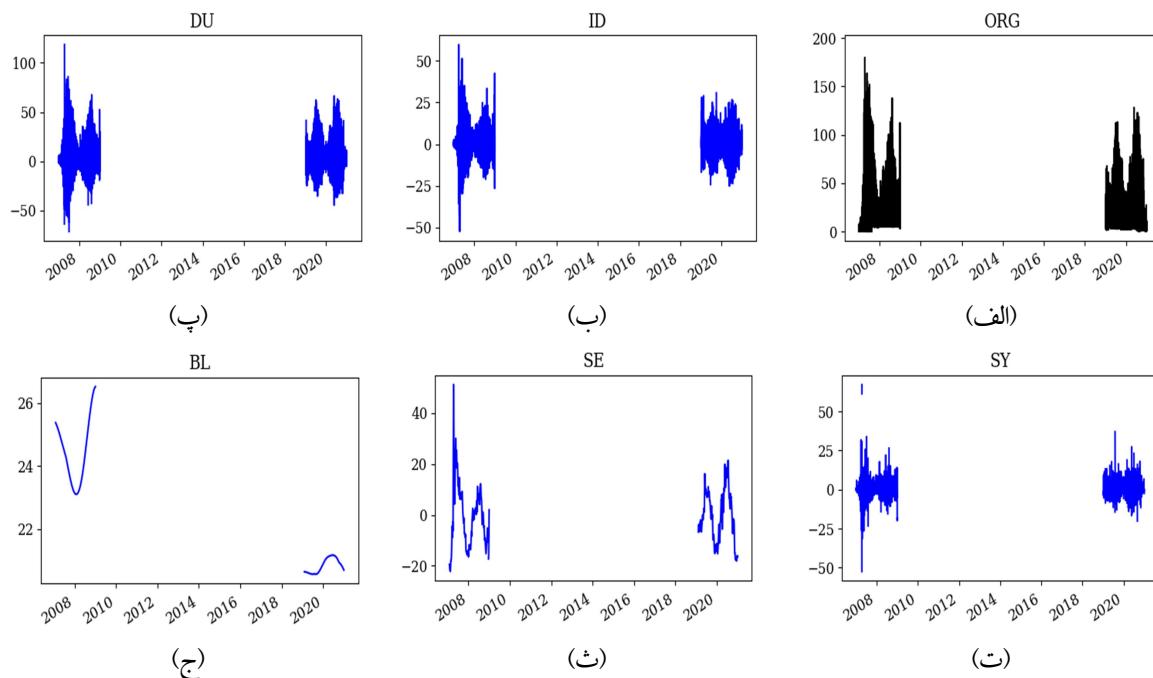
سری زمانی ازن‌سطحی مطابق با تکنیک KZ شرح داده شده در بخش قبل، به پنج مؤلفه طیفی تقسیک شد. در این بخش هر یک از مؤلفه‌ها به‌طور جداگانه نشان داده و مورد بحث قرار گرفته می‌شود.

۴-۱. مؤلفه‌های طیفی ازن‌سطحی اندازه‌گیری شده

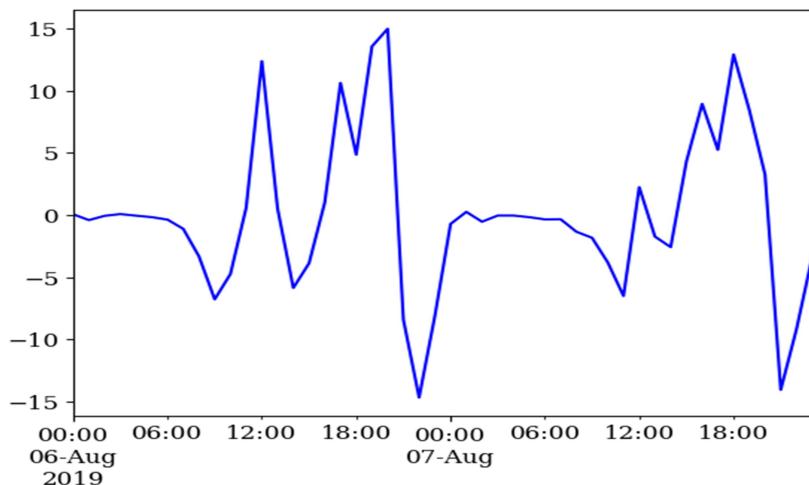
سری زمانی ازن‌سطحی به همراه پنج مؤلفه طیفی آن در شکل ۳ نشان داده شده است. اگرچه تغییرات ازن‌سطحی در شکل ۳-الف محدود به مقادیر بین صفر تا (ppbv) ۱۹۳ است،

ازن‌سطحی به بیشینه مقدار خود رسید. با غروب آفتاب و عدم فعالیت واکنش‌های نورشیمیابی از میزان ازن‌سطحی کاسته می‌شود و این مقدار در ساعت پایانی روز (۲۱–۲۳ شب) به مقدار کمینه می‌رسد.

ساعت بعد از ظهر و انتشار مجدد گازهای اکسید ازت، میزان ازن به تدریج کاهش یافته و پس از آن شاهد افزایش تدریجی ازن در نتیجه ادامه واکنش‌های نورشیمیابی می‌باشیم. در نهایت در ساعت ۱۸ به وقت محلی میزان



شکل ۳. (الف) سری زمانی تغییرات ازن‌سطحی اندازه‌گیری شده (ppbv) در ایستگاه مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و مؤلفه‌های طیفی این سری زمانی نسبت به میانگین یعنی (ب) درون روزانه (ID)، (ب) روزانه (DU)، (ت) هم‌دیدی (SY)، (ج) فصلی (SE) و (ث) روند بلندمدت (BL) پس از اجرای تکنیک KZ جمع همه مؤلفه‌های طیفی برابر با مقدار ازن‌سطحی کل (ORG) است. واحد محور قائم در تمام این شکل‌ها (ppbv) است.

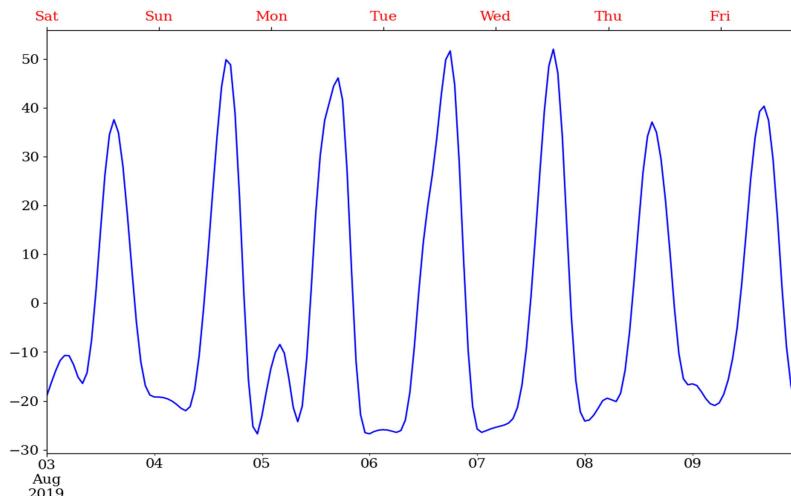


شکل ۴. تغییرات مؤلفه درون روزانه ازن‌سطحی (ppbv) در دو روز متولی ۶-۷ ماه اوت ۲۰۱۹. محور قائم نشان‌دهنده اندازه این مؤلفه بر حسب واحد (ppbv) است. مقادیر مثبت و منفی به ترتیب اشاره به روند افزایشی و کاهشی این مؤلفه (نسبت به میانگین) در اثر تغییرات فیزیکی و شیمیابی در مقیاس‌های زمانی کوتاه دارد. به عنوان مثال، در اینجا شاهد تغییرات کاهشی این مؤلفه از ساعت ۲۰ به وقت محلی در روز ۶ هستیم که در ساعت ۲۲ به مقدار کمینه (۱۴/۶۶) می‌رسد. این تغییرات می‌تواند ناشی از فعل بودن واکنش‌های تیتراسیون ازن‌سطحی توسط اکسید ازت باشد.

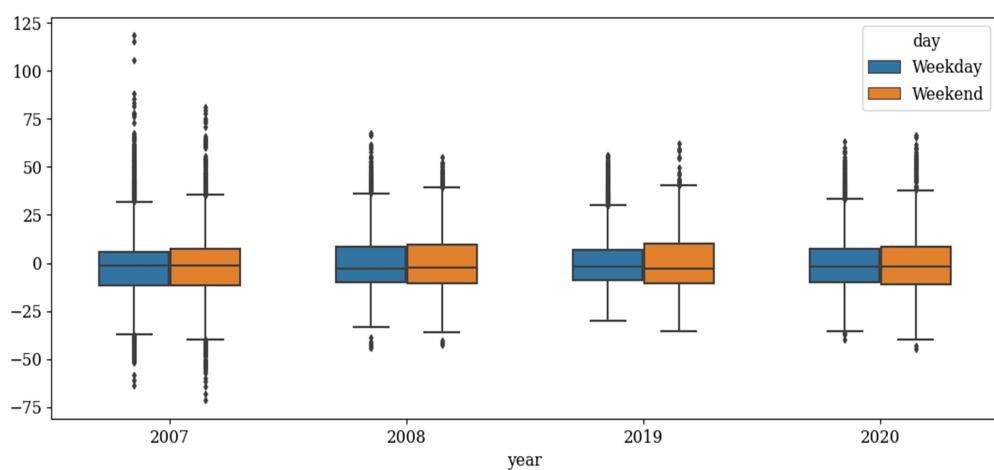
۴-۳. مؤلفه روزانه

روزهای پایانی هفته بیشتر از روزهای کاری است (اثر آخر هفته، شکل ۶). از طرف دیگر، علاوه بر تأثیر نوسانات دمایی شباه روزی بر مقدار مؤلفه روزانه، سیستم‌های هواشناسی خرد مقیاس و هم‌دیدی نیز بر این مؤلفه تأثیرگذار هستند. از این مورد می‌توان به نوسان کوتاه‌مدت ازن‌سطحی در ساعت‌های نیمه شب پنجم ماه اوت در شکل ۵ اشاره کرد که در بخش بعد به آن اشاره خواهد شد. از این‌رو، کاهش نوسانات ازن‌سطحی در روزهای پایانی هفته در شکل ۵ از موارد نادری است که میزان ازن‌سطحی تحت تأثیر سیستم‌های هم‌دیدی پر فشار فعال در روزهای کاری افزایش یافته و منجر به کم‌رنگ‌تر شدن اثر آخر هفته در این شکل شده است.

با طلوع و غروب خورشید و در نتیجه انجام و عدم فعالیت واکنش‌های نورشیمیابی در این ساعت‌ها، مقادیر این مؤلفه از ۳۰ در ساعت‌های اولیه روز تا (ppbv) ۵۰ در ساعت‌های پایانی شب نوسان دارد (شکل ۵). در مقایسه با روزهای کاری اول هفته (شنبه تا چهارشنبه)، مقادیر این نوسانات در روزهای پایانی هفته کمتر به نظر می‌رسد. این مسئله می‌تواند ناشی از تعطیلات در روزهای پنج شنبه و جمعه و کاهش انتشارگازهای پیش‌ساز در انجام فرایندهای نورشیمیابی باشد. اگرچه این مسئله قابل تعمیم به دیگر زمان‌ها نیست و در اغلب اوقات نوسانات این مؤلفه در



شکل ۵. تغییرات مؤلفه روزانه ازن‌سطحی (ppbv) در یک هفته ۳-۹ ماه اوت ۲۰۱۹. در اینجا مقادیر مثبت و منفی به ترتیب اشاره به نوسانات ازن‌سطحی در جهت افزایشی و کاهشی (نسبت به میانگین) دارد. محور قائم نشان‌دهنده اندازه این مؤلفه بر حسب واحد (ppbv) است.



شکل ۶. تغییرات مؤلفه روزانه ازن‌سطحی (ppbv) در روزهای کاری (شنبه تا چهارشنبه-آبی رنگ) و پایانی هفته (پنج شنبه و جمعه-نارنجی رنگ). محور قائم نشان‌دهنده اندازه این مؤلفه نسبت به میانگین و بر حسب واحد (ppbv) است. در اینجا مقادیر این مؤلفه در بازه زمانی یک ساعته برای کل دوره مورد مطالعه (دوره خاصی انتخاب نشده است) به صورت نمودار جعبه‌ای ترسیم شده است. خط افقی در جعبه نشان‌دهنده میانه و نقاط خارج از جعبه‌ها به مقادیر دورافتاده (بسیار زیادتر از بیشینه و بسیار کمتر از کمینه) این مؤلفه در برخی از ساعت‌های اشاره دارد.

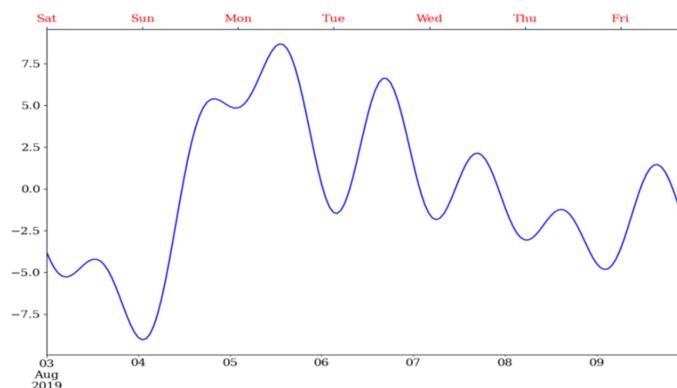
می‌رسد (شکل ۳-ث). نوسانات مؤلفه روند بلندمدت به هردو صورت کاهاشی و افزایشی است اگرچه به طور کلی این مؤلفه، از سال ۲۰۰۷-۲۰۰۸ تا سال ۲۰۱۹-۲۰۲۰ روندی کاهاشی داشته است (شکل ۳-ج).

۴-۵. تغییرات فصلی مؤلفه‌های طیفی

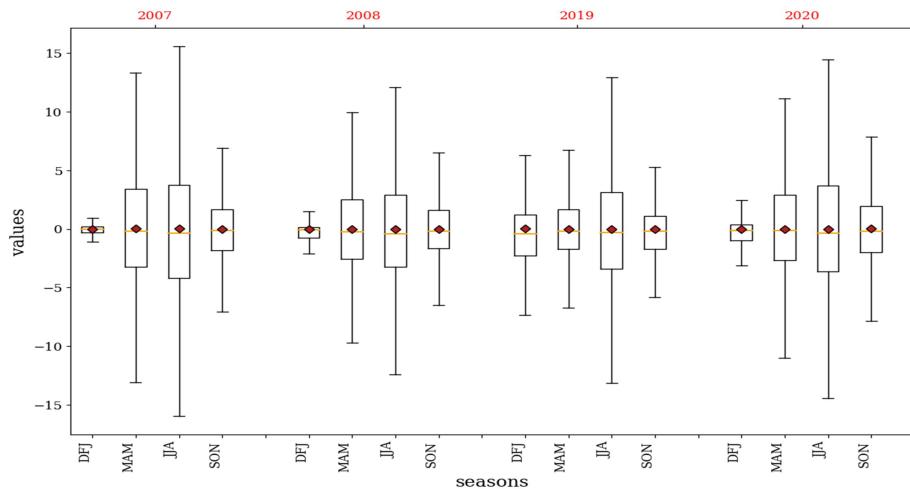
همان‌گونه که در بخش‌های پیشین شرح داده شد عوامل متفاوت در مقیاس‌های زمانی گوناگون بر میزان تغییرپذیری ازن مؤثر است. تأثیر این عوامل بر تغییرپذیری ازن در همه زمان‌ها یکسان نیست و بسته به فاکتورهای متعدد میزان این اثرگذاری تقویت و تضعیف می‌شود. یکی از این فاکتورها تغییرات فصلی و دمایی است که به طور مستقیم بر نوسانات این مؤلفه‌ها اثر می‌گذارد. از این‌رو، در این بخش به بررسی تغییر فصول و میزان تغییرات مؤلفه در هر یک از فصل‌ها پرداخته شده است. شکل ۸ تغییرات مؤلفه درون‌روزانه را در هر یک از فصل‌های سال از جمله زمستان (DJF)، بهار (MAM)، تابستان (JJA) و پاییز (SON) نشان می‌دهد. میزان تغییرات این مؤلفه (ppbv) ± 15 است که در فصل تابستان این نوسانات به پیشینه مقدار خود می‌رسد. بدیهی است که این پدیده ناشی از افزایش طول روز در این فصل و تقویت فرایندهای نورشیمیابی در دمای بالاتر است. در فصل زمستان این تغییرات به کمینه مقدار و به مقادیر کمتر از (ppbv) ± 5 تقلیل می‌باشد. اگرچه در زمستان ۲۰۱۹ این تغییرات افزایش و به (ppbv) ± 7 رسیده است. تغییرات این مؤلفه در فصل بهار نیز کمتر از فصل تابستان ولی بیشتر از فصل زمستان است.

۴-۶. مؤلفه همدیدی، فصلی و روند

در مقایسه با مؤلفه‌های روزانه و درون‌روزانه، این مؤلفه‌ها به دلیل وقوع در بازه‌زمانی طولانی تر دارای نوسانات کندری هستند. به عنوان نمونه، در شکل ۷، مقدار مؤلفه همدیدی طی ۳-۹ ماه اوت ۲۰۱۹ در برخی از ساعت‌های (ppbv) ۹ و در برخی به (ppbv) $+8/68$ می‌رسد. در حالی که تغییرات مؤلفه روزانه به بیش از (ppbv) ۸۰ در طی یک روز می‌رسد. در شکل ۷ شاهد یک بازه کوتاه‌مدت چند روزه در تاریخ چهارم تا ششم می‌باشیم، که در این دوره ازن یک روند افزایشی دارد. این افزایش می‌تواند ناشی از وجود یک سیستم همدیدی پرفشار باشد که با سکون (ایستایی) هوا سبب افزایش ازن می‌شود. این سیستم نیز ممکن است به دلیل یک سیستم همدیدی کم‌فشار باشد که در آن ازن از مناطق دوردست به این ایستگاه انتقال داده شده است. لازم به ذکر است که تعیین سیستم همدیدی در این بازه زمانی نیاز به انجام تحقیقات بیشتر دارد که از حیطه این مطالعه خارج است. تأثیرگذاری مؤلفه همدیدی بر دیگر مؤلفه‌ها از جمله مؤلفه روزانه نیز قابل توجه است که در بخش ۳-۴ نیز به آن اشاره شد (پیک کوتاه در روز پنجم ماه اوت در شکل ۵). از این‌رو، اگرچه مؤلفه همدیدی دارای نوسانات کمتری در طول روز نسبت به دیگر مؤلفه‌ها است ولی این مؤلفه سبب تشدید نوسانات در دیگر مؤلفه می‌شود. مؤلفه فصلی در هر سه سال ۲۰۰۸، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ کم‌وپیش به یک میزان تغییر کرده است، هر چند تغییرات این مؤلفه در سال ۲۰۰۷ متفاوت به نظر



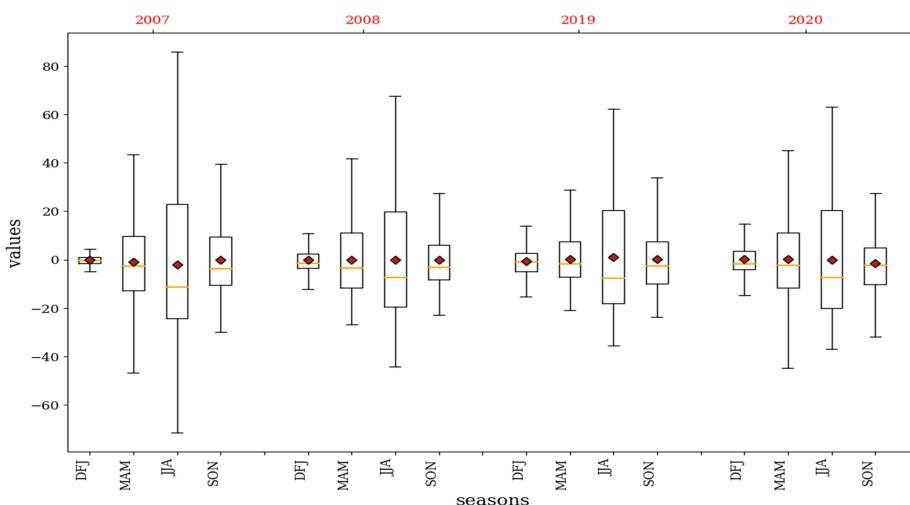
شکل ۷. مؤلفه همدیدی تغییرات ازن‌سطحی (ppbv) در یک هفته ۳-۹ ماه اوت ۲۰۱۹. محور قائم نشان‌دهنده اندازه این مؤلفه نسبت به میانگین و بر حسب واحد (ppbv) است.



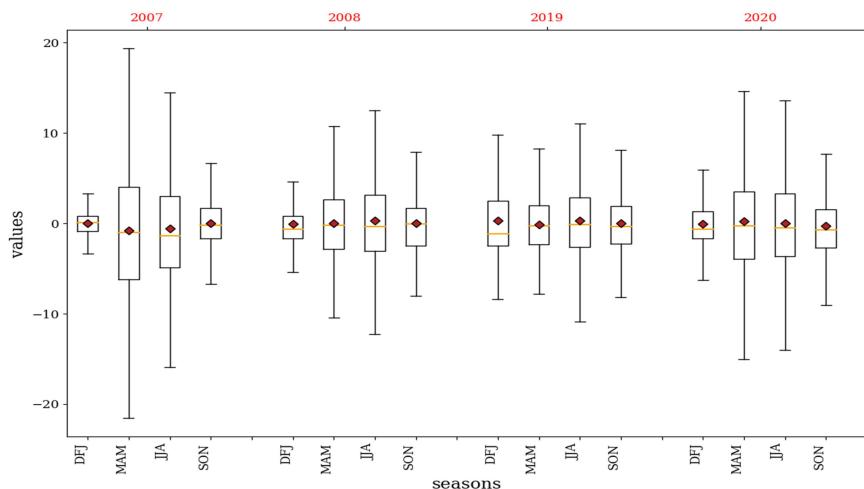
شکل ۸. تغییرات فصلی مؤلفه درونروزانه ازن‌سطحی (ppbv) در هر یک از فصل‌های سال شامل زمستان (DJF)، بهار (MAM)، تابستان (JJA) و پاییز (SON) برای هر چهار سال ۲۰۰۷، ۲۰۰۸، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰. در اینجا مقادیر این مؤلفه در بازه‌زمانی یک ساعت به صورت نمودار جعبه‌ای ترسیم شده است. خط نارنجی‌رنگ و نشانگر قرمزنگ به ترتیب مقادیر میانه و میانگین هر جعبه را نشان می‌دهد. بهمنظور وضوح بیشتر شکل، نقاط خارج از جعبه‌ها که به مقادیر بسیار زیاد و بسیار کم این مؤلفه در برخی از ساعات اشاره دارد، نشان داده نشده است.

رفتار این مؤلفه در این سال نسبت به دیگر سال‌ها شده است که در بخش قبل نیز به آن اشاره شد. از طرف دیگر تغییرات این مؤلفه در تمامی فصول سال ۲۰۱۹ کم و بیش یکسان به نظر می‌رسد که این ممکن است ناشی از وفور فعالیت سامانه‌های بارشی در طی این سال باشد (مرادی و رنجبر سعادت‌آبادی، ۱۳۹۸؛ علیجانی و همکاران، ۱۳۹۸).

مشابه با تغییرات فصلی مؤلفه درونروزانه، بیشینه و کمینه تغییرات مؤلفه روزانه به ترتیب در فصل تابستان و زمستان است (شکل ۹). در شکل ۱۰ مؤلفه همدیدی دارای تغییرات فصلی اندک است که در مقایسه با تغییرات فصلی مؤلفه درونروزانه و روزانه متفاوت به نظر می‌رسد. بیشینه و کمینه تغییرات این مؤلفه به ترتیب در بهار و زمستان ۲۰۰۷ است که این نیز سبب متمایزبودن



شکل ۹. تغییرات فصلی مؤلفه روزانه ازن‌سطحی (ppbv) در هر یک از فصل‌های سال شامل زمستان (DJF)، بهار (MAM) و پاییز (SON) برای هر چهار سال ۲۰۰۷، ۲۰۰۸، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰. در اینجا مقادیر این مؤلفه در بازه‌زمانی یک ساعت به صورت نمودار جعبه‌ای ترسیم شده است. خط نارنجی‌رنگ و نشانگر قرمزنگ به ترتیب مقادیر میانه و میانگین هر جعبه را نشان می‌دهد. بهمنظور وضوح بیشتر شکل، نقاط خارج از جعبه‌ها که به مقادیر بسیار زیاد و بسیار کم این مؤلفه در برخی از ساعات اشاره دارد، نشان داده نشده است.

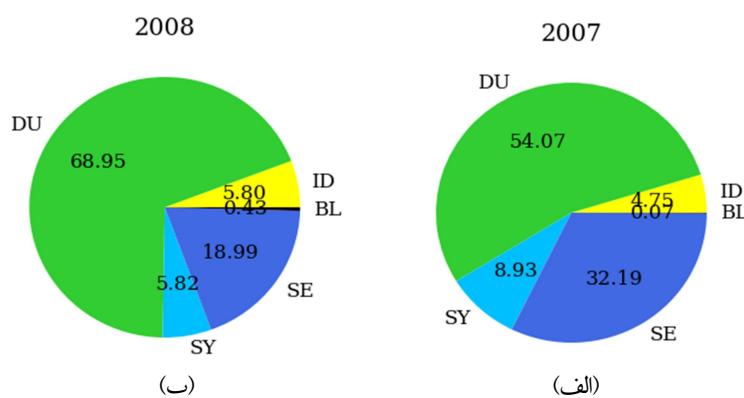


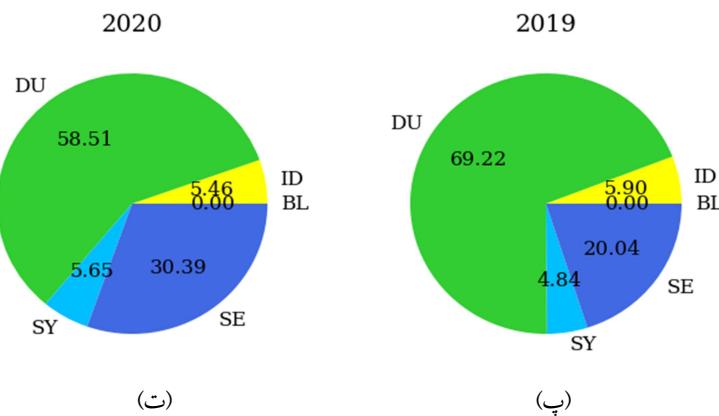
شکل ۱۰. تغییرات فصلی مؤلفه همدیدی ازن‌سطحی (ppbv) در هر یک از فصل‌های سال شامل سمتان (DJF)، بهار (MAM)، تابستان (JJA) و پاییز (SON) برای هر چهار سال ۲۰۰۷، ۲۰۰۸، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰. در اینجا مقدار این مؤلفه در بازه‌زمانی یک ساعت به صورت نمودار جمعهای ترسیم شده است. خط نارنجی رنگ و نشانگر قرمزرنگ به ترتیب مقدار میانه و میانگین هر جعبه را نشان می‌دهد. به‌منظور وضوح بیشتر شکل، نقاط خارج از جعبه‌ها که به مقدار بسیار زیاد و بسیار کم این مؤلفه در برخی از ساعت‌های اشاره دارد، نشان داده نشده است.

۳۲/۱۹ درصد بسته به سال تغییر می‌کند. مؤلفه همدیدی نیز از لحاظ مشارکت نسبی در جایگاه سوم و گاهی چهارم قرار دارد. به عنوان مثال، نوسانات این مؤلفه در سال ۲۰۰۷ (شکل ۱۱-الف) ۸/۹۳ درصد و در سال ۲۰۱۹ (شکل ۱۱-پ) ۴/۸۴ درصد تغییرات ازن‌سطحی را تشکیل می‌دهد. حدود پنج درصد تغییرات کلی ازن نیز ناشی از نوسانات درون‌روزانه است. اگرچه مؤلفه درون‌روز سهم کمی در تغییرپذیری ازن‌سطحی دارد، ولی نوسانات آن حائز اهمیت است. به عنوان مثال، تغییرات این مؤلفه می‌تواند حاکی از میزان اثربخشی برنامه‌های کاهش انتشار آلاینده‌ها بر مقدار ازن‌سطحی باشد. از این‌رو، این تحلیل در برنامه‌های کنترل کیفی هوا کاربردی است.

۴-۶. مشارکت نسبی مؤلفه‌های طیفی در تغییرپذیری کلی ازن‌سطحی

هر یک از مؤلفه‌های طیفی سهم معینی را در ایجاد نوسانات ازن‌سطحی ایفا می‌کنند. بررسی سهم هر یک از این مؤلفه‌ها منجر به شناخت بیشتر تغییرپذیری ازن‌سطحی می‌شود. به‌همین منظور در اینجا سهم نسبی هر یک از این مؤلفه‌ها به صورت نمودار دایره‌ای در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که بیش از نیمی از تغییرپذیری کل ازن ناشی از نوسانات مؤلفه روزانه می‌باشد که این بیشترین سهم را در تغییرپذیری ازن ایفا می‌کند. پس از آن، مؤلفه فصلی سهم حداکثری را در تغییرات کل ازن‌سطحی دارد که این مقدار از ۱۸/۹۹ تا





شکل ۱۱. مشارکت نسبی هر یک از مؤلفه‌های طیفی در درصد تغییرپذیری کل ازن‌سطحی در سال‌های (الف) ۲۰۰۷، (ب) ۲۰۰۸ و (ت) ۲۰۱۹ و (پ) ۲۰۲۰.

سال متفاوت ۲۰۰۷، ۲۰۰۸، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ در این پژوهش به کار گرفته شد. با استفاده از تکنیک KZ این سری زمانی به پنج مؤلفه طیفی یعنی درون‌روزانه، روزانه، همدیدی، فصلی و روند بلندمدت تفکیک شد.

بررسی این مؤلفه‌های طیفی نشان داد که مؤلفه درون‌روزانه دارای نوسانات سریعی است که طی مدت کوتاه در کمتر از ۱۲ ساعت رخ می‌دهد. از جمله جریان‌های اتمسفری تأثیرگذار بر نوسانات این مؤلفه می‌توان به اختلاط عمودی و تیتراسیون توسط مونوکسید ازت اشاره کرد که هردو در مقیاس‌های زمانی بسیار کوتاه (کمتر از یک ساعت) رخ می‌دهد. به علاوه، تغییرات سرعت باد که در این بازه زمانی رخ می‌دهد از دیگر عوامل تأثیرگذار بر میزان نوسانات این مؤلفه است (هاگرف و همکاران، ۲۰۰۰). تنهای‌ترین و بزرگ‌ترین فرکانس واداشتی در سری زمانی ازن‌سطحی با بازه زمانی یک ساعت مربوط به نوسانات ۲۴ ساعته است (راوث و همکاران، ۱۹۹۷؛ هاگرف و همکاران، ۲۰۰۰). به همین دلیل ییش از نیمی از تغییرپذیری ازن‌سطحی مشکل از تغییرات مؤلفه روزانه ناشی از نوسانات دمایی و تابشی در نتیجه طلوع و غروب خورشید است. از این‌رو، جداسازی این مؤلفه از دیگر مؤلفه‌ها در بررسی تغییرپذیری ازن‌سطحی بهویژه مؤلفه روند بلندمدت امری اجتناب‌ناپذیر است. نوسانات این مؤلفه در روزهای پایانی هفت‌ههای روزهای کاری هفت‌ههای پیشتر است که این نتیجه سازگار با یافته‌های فریدی و همکاران (۲۰۱۸) است که در آن به افزایش ازن‌سطحی بهدلیل کاهش انتشار گازهای اکسید ازت در روزهای پایانی هفت‌ههای اشاره شده است. هر چند در اینجا موارد استثنای وجود دارد که در

۵. بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش از داده‌های سری زمانی ازن‌سطحی اندازه گیری شده در ایستگاه مؤسسه ژئوفیزیک استفاده شد. اگرچه این داده‌ها از سال ۲۰۰۷ و برای مدت زمان طولانی اندازه گیری شده است، ولی دارای شکاف‌های طولانی و سال‌های متوالی بدون داده بود. خوشبختانه این داده‌ها به همین صورت ثبت شده و بهروش دلخواه پر نشده بود. از آنجاکه داده‌ها به صورت خام دریافت شده بود، مواردی همچون عدم رعایت استانداردهای جهانی در این داده‌ها به چشم می‌خورد. از آن جمله می‌توان به عدم ثبت داده‌ها به واحدهای بین‌المللی برای مثال تاریخ میلادی و ساعت UTC اشاره نمود که در اینجا داده‌ها به هردو صورت میلادی و شمسی و به زمان محلی ثبت شده بود. از دیگر موارد استفاده از رسم الخط‌های فارسی و انگلیسی و عدم توضیحات کافی و به کار بردن یک شکل (فرمت) خاص برای نوشتن این توضیحات بود. امیدواریم این موضوع و اهمیت آن به سمع افراد مسئول و کاربران داده جهت آگاهی رسیده و شیوه صحیح و استاندارد ثبت داده به آنها آموزش داده شود. با این وجود، این سری زمانی از لحظه کیفیت داده در سطح قابل قبولی بود و استفاده از ابزار AutoQA4Env در حالت پایه برای بررسی و کنترل کیفی آن کفایت نمود. مقدار ۰/۲۵ درصد داده به عنوان داده‌ها غیرقابل قبول شناخته شد که این ارقام از مجموعه داده‌ها حذف شد. اگرچه داده‌های غیرقابل قبول درصد ناچیزی (کمتر از یک درصد) از داده‌ها را تشکیل می‌دهند ولی آنها تأثیر زیادی بر تمام محاسبات آماری و نتایج دارد. در نهایت داده‌ها برای چهار

فصلی را دارد که این می‌تواند ناشی از ریزش و یا شارش بهاری ازن از پوشن‌سپهر به وردسپهر در این ایستگاه باشد (شرعی‌پور و علی‌اکبری بیدختی، ۱۳۹۲). اگرچه، در برخی از سال‌ها از جمله ۲۰۱۹ شاهد تغییرات فصلی اندک این مؤلفه بودیم که این ممکن است به تعداد و پراکندگی سامانه‌ها و سیستم‌های همدیدی در هر یک از فصول بستگی دارد. بنابراین توجه به این نکات در برنامه‌ریزی کاوش این آلینده امری اختناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد. این پژوهش به عنوان گام نخست در بررسی آماری تغییرپذیری ازن سطحی به روش تحلیل مقیاس KZ در ایران است. این تکنیک قابل گسترش به دیگر آلینده‌ها به ویژه ریزگردها است. از دیگر موارد قابل استفاده از این روش در ارزیابی و بهبود مدل‌ها است، به ویژه مدل‌هایی که قادر به شبیه‌سازی نوسانات روزانه و فصلی ناشی از تابش خورشیدی هستند. نمایان شدن برخی از عوامل مؤثر بر تغییرپذیری ازن از جمله واکنش تیتراسیون در مؤلفه درون‌روزانه از دیگر نتایج این تحقیق است که از این ویژگی می‌توان در برنامه‌های کنترل آلودگی هوا استفاده کرد. به کار بستن این روش برای مطالعه ازن سطحی و دیگر میدان‌های هواشناختی اندازه‌گیری شده در سطح کشور از برنامه‌های آتی نگارندگان این تحقیق است.

تشکر و قدردانی

در اینجا لازم می‌دانیم از معاونت محترم علمی و فناوری ریاست جمهوری برای حمایت مالی در انجام این پژوهش و از همکاران محترم در مؤسسه ژئوفیزیک به ویژه سرکار خانم زهرا شرعی‌پور برای در اختیار قرار دادن داده‌های مورد نیاز، تشکر فراوان بهجا آوریم.

مراجع

- پگاه‌فر، ن.، علی‌اکبری بیدختی، ع.ع.، و زوار رضا، پ.، ۱۳۹۱، بررسی پارامترسازی عمق لایه پایدار شبانه و تأثیر آن در آلودگی هوای یک منطقه شهری با توبوگرافی پیچیده (تهران)، مجله فیزیک زمین و فضاء، ۴(۳۸)، ۱۸۹-۲۰۶.

آن نوسانات مؤلفه در روزهای پایانی هفته کمتر از روزهای کاری به نظر می‌رسد. این امر ناشی از وجود سیستم‌های همدیدی پر فشار در روزهای کاری و در برخی موارد ناشی از موقعیت جغرافیایی ایستگاه اندازه‌گیری به عنوان مثال ایستگاه‌های ساحلی است (مار و هارلی، ۲۰۰۲). یکی از مؤلفه‌های تأثیرگذار در روند کوتاه‌مدت آلودگی هوا مؤلفه همدیدی است که این مؤلفه به طور مستقیم و غیرمستقیم (از طریق اثرگذاری بر دیگر مؤلفه‌ها) در تغییرپذیری ازن نقش مهمی را ایجاد می‌کند. تغییرات این مؤلفه به سبب تغییر شرایط جوی از جمله حضور سیستم‌های همدیدی پر فشار و یا عبور سیستم‌های جبهه‌ای است. این سیستم‌ها نیز سبب تغییر در ارتفاع‌آمیختگی و تشکیل و ازین رفتن ابر نیز می‌شوند (هاگرف و همکاران، ۲۰۰۰). از این ویژگی نیز می‌توان در هشدارهای چند روزه آلودگی هوا استفاده کرد. تأثیر فعلیت سامانه‌ها و سیستم‌های همدیدی بر مقدار مؤلفه روزانه نیز از دیگر نکات حائز اهمیت است که در بخش ۳-۴ به آن اشاره شد که این امر می‌تواند ناشی از کواریانس بین مؤلفه روزانه و همدیدی باشد. در اینجا لازم به ذکر است که در حالت ایده‌آل، تمامی مؤلفه‌ها در تجزیه طیفی از یکدیگر مستقل و کواریانس بین آنها صفر است ولی این امر در عمل امکان‌پذیر نیست و اندک کواریانس بین آنها وجود دارد (رائو و همکاران، ۱۹۹۷؛ کنگ و همکاران، ۲۰۱۳). تأثیر مؤلفه همدیدی بر مؤلفه روزانه ناشی از بیشتر بودن کواریانس در مؤلفه‌های طیفی مجاور نسبت به مؤلفه‌های غیرهمجاور است (کفاشزاده، ۲۰۱۸). نوسانات مؤلفه فصلی ناشی از تغییرات فصلی و الگوهای جوی بزرگ مقیاس است. در حالی که، مؤلفه روند بلندمدت با کمترین نوسانات به دلیل تغییرات تدریجی اقلیم و مقدار نهشت ازن با توجه به تغییر در خواص سطح در دوران خشکسالی است.

بررسی تغییرات فصلی هر یک از مؤلفه‌ها نشان داد که بیشترین و کمترین تغییرات مؤلفه‌های درون‌روزانه و روزانه به ترتیب متعلق به فصل تابستان و زمستان است، که این به طور مستقیم ناشی از تغییرات دمایی به عنوان مؤثرترین عامل هواشناختی بر میزان ازن سطحی است (رائو و زورینکو، ۱۹۹۴؛ عبدالهاب و همکاران، ۲۰۰۵؛ رسموسن و همکاران، ۲۰۱۲؛ علی‌اکبری بیدختی و شرعی‌پور، ۱۳۸۶). مؤلفه همدیدی در فصل بهار بیشینه تغییرات

علی‌اکبری بیدختی، ع. ع. و شرعی‌پور، ز.، ۱۳۸۸، شرایط هواشناختی جو بالا و وضعیت حاد آلودگی هوا (مطالعه موردی: شهر تهران)، نشریه محیط‌شناسی، ۵۲، ۱-۱۴.

علیجانی، ب.، میرزایی، ن. و جاهدی، آ.، ۱۳۹۸، واکاوی همدید بارش‌های حدی و سیل‌آسای کشور مطالعه موردی: ۳۱-۱۶ مارس ۲۰۱۹، دگرگونی‌ها و مخاطرات آب و هوایی، ۱۳(۲)، ۷۰-۱۱۴.

لشکری، ح.، کیخرسروی، ق. و کریمیان، ن.، ۱۳۹۹ بررسی الگوهای همدیدی آلودگی‌های شدید هوا، در لایه وردسپهر زیرین کلانشهر تهران، جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۳۵، ۱-۲۰.

مرادی، م. و رنجبر سعادت‌آبادی، ع.، ۱۳۹۸، بررسی موردي بارش‌های سیل‌آسای ایران در ماه مارس ۲۰۱۹، مجله علمی و ترویجی نیوار، ۱۰۵-۱۰۴-۷۲.

۸۷

عزیزی، ق.، حنفی، ع.، سلطانی، م. و آفاجانی، م.، ۱۳۹۰ تحلیل سینوپتیک یخbandان شدید، دیره‌نگام و فراگیر فروردین‌ماه ۱۳۸۸، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۱، ۱-۱۴.

شرعی‌پور، ز. و علی‌اکبری بیدختی، ع. ع. ۱۳۹۲ تغییرات دید جوی و عوامل مؤثر بر آن در ایستگاه ژئوفیزیک طی دوره ده ساله ۲۰۰۱-۲۰۱۱، مجله ژئوفیزیک ایران، ۷، ۲، ۱۴۱-۱۲۸.

شرعی‌پور، ز. و علی‌اکبری بیدختی، ع. ع. ۱۳۹۲ ب، بررسی آلاینده ازن‌سطحی در شهر تهران طی دوره سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۱۱، مجله فیزیک زمین و فضاء، ۳۹(۳)، ۱۹۱-۲۰۶.

علی‌اکبری بیدختی، ع. ع. و شرعی‌پور، ز.، ۱۳۸۶ بررسی تغییرات ازن‌سطحی در محدوده ایستگاه سینوپتیک (هواشناسی) مؤسسه ژئوفیزیک برای سال ۲۰۰۲ نشریه محیط‌شناسی، ۴۲، ۷۴-۶۳.

Abdul-Wahab, S. A., Bakheit, C. S. and Al-Alawi, S. M., 2005, Principal component and multiple regression analysis in modelling of ground-level ozone and factors affecting its concentrations, *Environmental Modelling and Software*, 20(10), 1263-1271.

Ainsworth, E. A., Yendrek, C. R., Sitch, S., Colluns, W. J. and Emberson, L. D., 2012, The effects of tropospheric ozone on net primary productivity and implications for climate change, *Annual Review of Plant Biology*, 63(1), 637-661.

Akratidis, D., Zanis, P., Pytharoulis, I., Mavrakis, A. and Kara-costas, Th., 2010, A deep stratospheric intrusion event down to the earth's surface of the megacity of Athens, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 109, 9-18.

Aliakbari Bidokhti, A. A., Shareipour, Z. and Sehatkashani, S., 2016, Some resilient aspects of urban areas to air pollution and climate change, case study: Tehran, Iran, *Scientica Iranica*, 23, 5, 1994-2004.

Bell, M. L., Goldberg, R., Hogrefe, C., Kinney, P. L., Knowlton, K., Lynn, B., Rosenthal, J., Rosenzweig, C. and Patz., J. A., 2007, Climate change, ambient ozone, and health in 50 US cities, *Clim. Change*, 82, 61-76.

Bernard, S. M., Samet, J. M., Grambsch, A., Ebi, K. L. and Romieu, I., 2001, The potential impacts of climate variability and change on air pollution-related health effects in the

United States, *Env. Health Persp.*, 109, 199-209.

Bell, M. L., Peng, R. D. and Domenici, F., 2006, The exposure-response curve for ozone and risk of mortality and the adequacy of current ozone regulations. *Environmental Health Perspectives*, 114, 532-536.

Brockwell, P. and Davis R., 1991, Time series analysis, Springer-verlag, 577 p.

Cooper, O. R., Parrish, D. D., Ziemke, J., Balashov, N. V., Cupeiro, M., Galbally, I. E., Gilge, S., Horowitz, L., Jensen, N. R., Lamarque, J. F., Naik, V. and Oltmans, S. J., 2014, Global distribution and trends of tropospheric ozone: an observation-based review, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2, 1-29.

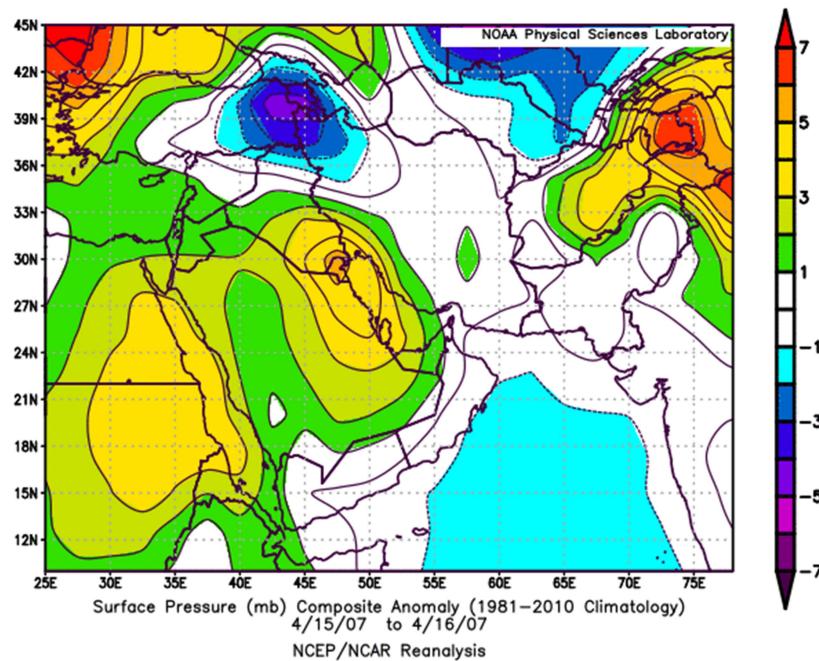
De Marco, A., Proietti, C., Anav, A., Ciancarella, L., D'Elia, I., Fares, S., Fornasier, M. F., Fusaro, L., Gualtieri, M., Manes, F., Marchetto, A., Mircea, M., Paoletti, E., Piersanti, A., Rogora, M., Salvati, L., Salvatori, E., Scrpanti, A., Vialeto, G., Vitale, M. and Leonardi, C., 2019, Impacts of air pollution on human and ecosystem health, and implications for the National Emission Ceilings Directive: Insights from Italy, *Environment International*, 125, 320-333.

EEA (European Environment Agency), 2018, Air quality in Europe, report number 12, <https://doi.org/10.2800/777411>, 88 p.

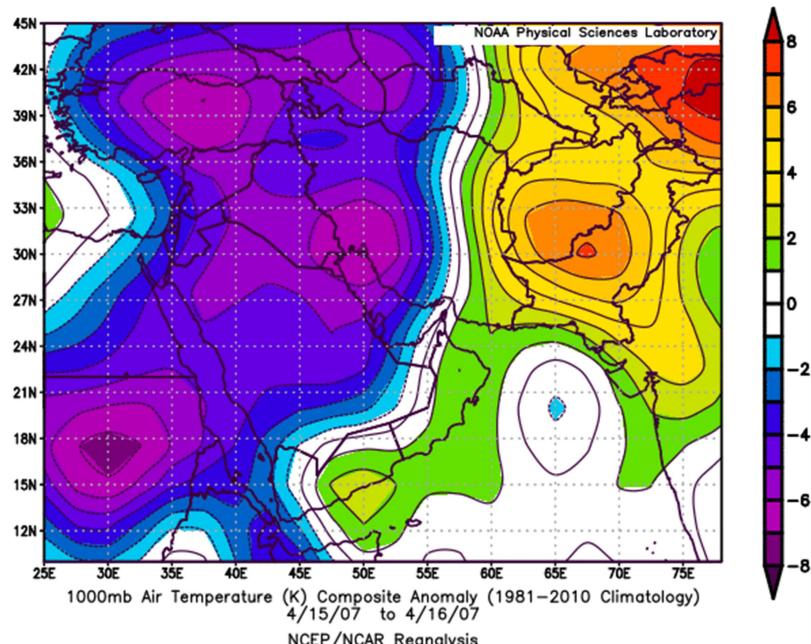
- Eskridge, R. E., Jia Yeong Ku, J. Y., Rao, S. T., Porter, P. S. and Zurbanek, I. G., 1997, Separating different Scales of motion in time series of meteorological variables, *Bulletin of the American Meteorology Society*, 78, 1473-1483.
- Faridi, S., Shamsipour, M., Krzyzanowski, M., Kuenzli, N., Amini, H., Azimi, F., Malkawi, M., Momeniha, F., Gholampour, A., Hassanvand, M. S. and Naddafi, K., 2018, Long-term trends and health impact of PM_{2.5} and O₃ in Tehran, Iran, 2006–2015, *Env. Int.* J., 114, 1547, 37–49.
- Gryparis, A., Forsberg, B., Katsouyanni, K., Analitis, A., Touloumi, G., Schwartz, J., Samoli, E., Medina, S., Anderson, H. R., Niciu, E. M., Wichmann, H. E., Kriz, B., Kosnik, M., Skorkovsky, J., Vonk, J. M. and Dortsbudak, Z., 2004, Acute effects of ozone on mortality from the “Air pollution and health: a European approach” project, *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 170, 1080–1087.
- Hadei, M., Hopke, P. K., Hashemi Nazari, S. S., Yarahmadi, M., Shahsavani, A. and Alipour, M. R., 2017, Estimation of mortality and hospital admissions attributed to criteria air pollutants in Tehran metropolis, Iran (2013–2016), *Aerosol Air Qual. Res.*, 17, 2474–2481.
- Hogrefe, C., Rao, S. T., Zurbanek, I. G. and Porter, P. S., 2000, Interpreting the information in ozone observations and model predictions relevant to regulatory policies in the eastern United States, *Bulletin of the American Meteorology Society*, 81(9), 2083–2106.
- Jacob, D. J., 1999, *Introduction to atmospheric chemistry*, Princeton, Princeton University Press, 266 p.
- Kaffashzadeh, N., 2018, A statistical analysis of surface ozone variability over the Mediterranean region during summer, Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Kaffashzadeh, N., Kleinert, F. and Schultz, M. G., 2019, A new tool for automated quality control of environmental time series (AutoQC4Env) in open web services, BIS workshop, Lecture notes in Business Information Processing, Springer 373, ISBN 978-3-030-36690-2, 513-518.
- Kaffashzadeh, N., 2020, AutoQA4Env, <http://b2find.eudat.eu/dataset/895a5264-076f-57fa-8616-40406d5c7e5d>.
- Kalabokas, P., Hjorth, J., Foret, G., Dufour, G., Eremenko, M., Siour, G., Cuesta, J. and Beekmann, M., 2017, An investigation on the origin of regional springtime ozone episodes in the western Mediterranean, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 3905–3928.
- Kang, D., Hogrefe, C., Foley, K. L., Napelenok, S. L., Mathur, R. and Rao, S. T., 2013, Application of the Kolmogorov-Zurbanek filter and the decoupled direct 3D method for the dynamic evaluation of a regional air quality model, *Atmospheric Environment*, 80, 58–69.
- Lau, K. M. and Weng, H., 1995, Climate signal detection using wavelet transform: how to make a time series sing, *Bulletin of the American Meteorology Society*, 76, 2391–2402.
- Lelieveld, J. and Crutzen, P. J., 1990, Influence of cloud and photochemical processes on tropospheric ozone, *Nature*, 343, 227–233.
- Lelieveld, J. and Dentener, F. J., 2000, What controls tropospheric ozone?, *Journal of Geophysical Research*, 105, 3531-3551.
- Loneck, B. and Zurbanek, I., 2020, Theoretical and Practical Limits of Kolmogorov-Zurbanek Periodograms with DiRienzo-Zurbanek Algorithm Smoothing in the Spectral Analysis of Time Series Data, <https://arxiv.org/abs/2007.03031>, 28 p.
- Malley, C. S., Heal, M. R., Mills, G. and Braban, C. F., 2015, Trends and drivers of ozone human health and vegetation impact metrics from UK EMEP supersite measurements (1990–2013), *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 4025–4042.
- Marr, L. C. and Harley, R. A., 2002, Spectral analysis of weekday–weekend differences in ambient ozone, nitrogen oxide, and non-methane hydrocarbon time series in California, *Atmospheric Environment*, 36, 2327–2335.
- Monks, P. S., Archibald, A. T., Colette, A., Cooper, O., Coyle, M., Derwent, R., Fowler, D., Granier, C., Law, K. S., Mills, G. E., Stevenson, D. S., Tarasova, O., Thouret, V., von Schneidemesser, E., Sommariva, R., Wild, O. and Williams, M. L., 2015, Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 8889–8973.
- Rao, S. T. and Zurbanek, I. G., 1994, Detecting and tracking changes in ozone air quality, *Air. And Waste Manage. Assoc.*, 44, 1089-1092.
- Rao, S. T., Zurbanek, I. G., Neagu, R., Porter, P. S., Ku, J. Y. and Henry, R. F., 1997, Space and time scales in ambient ozone data, *Bulletin of the American Meteorology Society*, 78(10), 2153-2166.
- Rasmussen, D. J., Fiore, A. M., Naik, V., Horowitz, L. W., McGinnis, S. J. and Schultz, M. G., 2012, Surface ozone-temperature relationships in the Eastern US: a monthly

- climatology for evaluating chemistry-climate models, *Atmospheric Environment*, 47, 142-153.
- Roelofs, G. J. and Lelieveld, J., 1997, Model study of the influence of cross-tropopause O₃ transports on tropospheric O₃ levels, *Tellus B*, 49, 38-55.
- Roemer, M., van den Hout, D. and Builjet, P., 1994, Tropospheric ozone and the greenhouse effect, Springer, Dordrecht, https://doi.org/10.1007/978-94-011-0982-6_34, 301-309.
- Seinfeld, J. H. and Pandis, S. N., 1998, Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change, 2nd ed., New York, John Wiley, 1152 p.
- Seo, J., Youn, D., Kim, J. Y. and Lee, H., 2014, Extensive spatiotemporal analyses of surface ozone and related meteorological variables in South Korea for the period 1999–2010, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 6395–6415.
- Shindell, D., Faluvegi, G., Lacis, A., Hansen, J., Ruedy, R. and Aguilar, E., 2006, Role of tropospheric ozone increases in 20th-century climate change, *Journal of Geophysical Research*, 111, 1-11.
- Sillman, S., 1999, The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments, *Atmospheric Environment*, 33, 1821- 1845.
- Silva, R. A., West, J. J., Lamarque, J. F., Shindell, D. T., Collins, W. J., Faluvegi, G., Folberth, G. A., Horowitz, L. W., Nagashima, T., Naik, V., Rumbold, S. T., Sudo, K., Takemura, T., Bergmann, D., Cameron-Smith, P., Doherty, R.M., Josse, B., MacKenzie, I.A., Stevenson, D.S. and Zeng, G., 2017, Future global mortality from changes in air pollution attributable to climate change, *Nature Climate Change*, 7, 647–651.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. and Miller, H. L., 2007, IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007, the physical scientific basis: contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1007 p.
- Sprenger, M. and Wernli, H., 2003, A northern hemispheric climatology of cross-tropopause exchange for the ERA15 time period (1979–1993), *Journal of Geophysical Research*, 108, 8521.
- Stull, R. B., 1988, An introduction to boundary layer meteorology, Dordrecht, Kluwer Acad, 670 p.
- Tarasova, O. A. and Karpetchko, A. Y., 2003, Accounting for local meteorological effects in the ozone time-series of Lovozerovo (Kola Peninsula), *Atmos. Chem. Phys.*, 3, 941–949.
- Upadhyaya, P., Du, H. and Kommalapati, R. R., 2020, Meteorological detrending of ozone at three sites in the Dallas-Fort Worth area: application of KZ filter method, *Atmosphere*, 11, 1-23.
- Wentworth, G. R., Murphy, J. G. and Sills, D. M. L., 2015, Impact of lake breezes on ozone and nitrogen oxides in the greater Toronto area, *Atmospheric Environment*, 109, 52-60.
- West, J. J., Cohen, A., Dentener, F., Brunekreef, B., Zhu, T., Armstrong, B., Bell, M. L., Brauer, M., Carmichael, G., Costa, D. L., Dockery, D. W., Kleeman, M., Krzyzanowski, M., Künzli, N., Lioussse, C., Candice Lung, S. C., V. Martin, R., Pöschl, U., Arden Pope, C., M. Roberts, J., Russell, A. G. and Wiedinmyer C., 2016, What we breathe impacts our health: improving understanding of the link between air pollution and health, *Environmental Science and Technology*, 50 (10), 4895-4904.
- Wilks, D. S., 1995, Statistical methods in atmospheric sciences. International Geophysics Series, USA, Academic Press, 648 p.
- Yang, W. and Zurbenko, I., 2010, Kolmogorov-Zurbenko filters. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 2. 340 - 351.
- Zanis, P., Hadjinicolaou, P., Pozzer, A., Tyrlis, E., Dafka, S., Mihalopoulos, N. and Lelieveld, J., 2014, Summertime free-tropospheric ozone pool over the eastern Mediterranean/Middle East, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 115–132.
- Zurbenko, I. G., 1986, The spectral analysis of time series, North Holland, 241 p.

پیوست



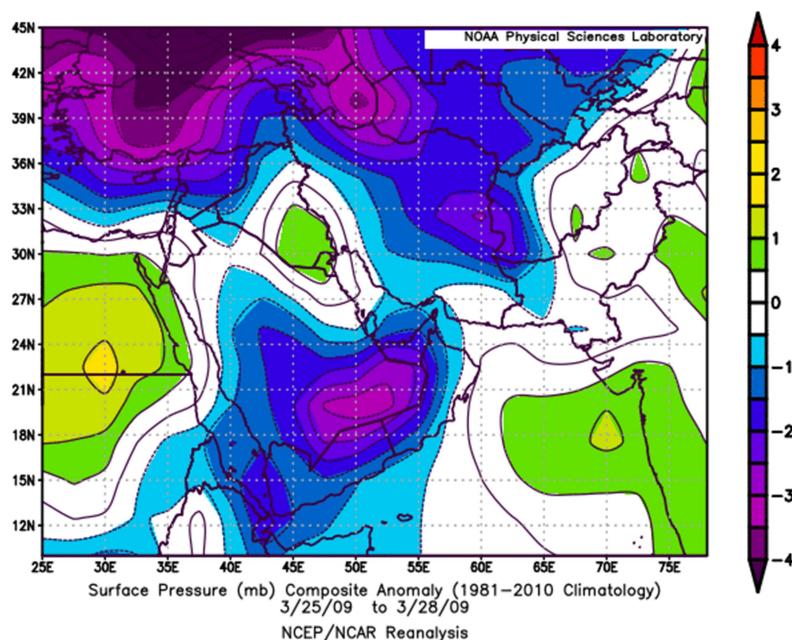
(الف)



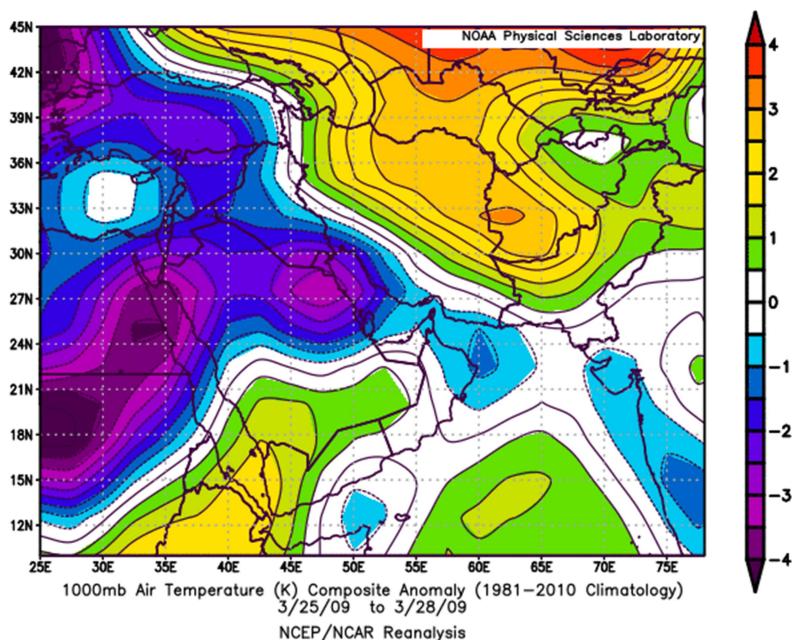
(ب)

شکل ۱. نقشه ناهمواری (الف) فشار و (ب) دمای هوا، در سطح ۱۰۰۰ آربیل ۲۰۰۷. در دوره ۱۵-۱۶ آوریل

پیوست



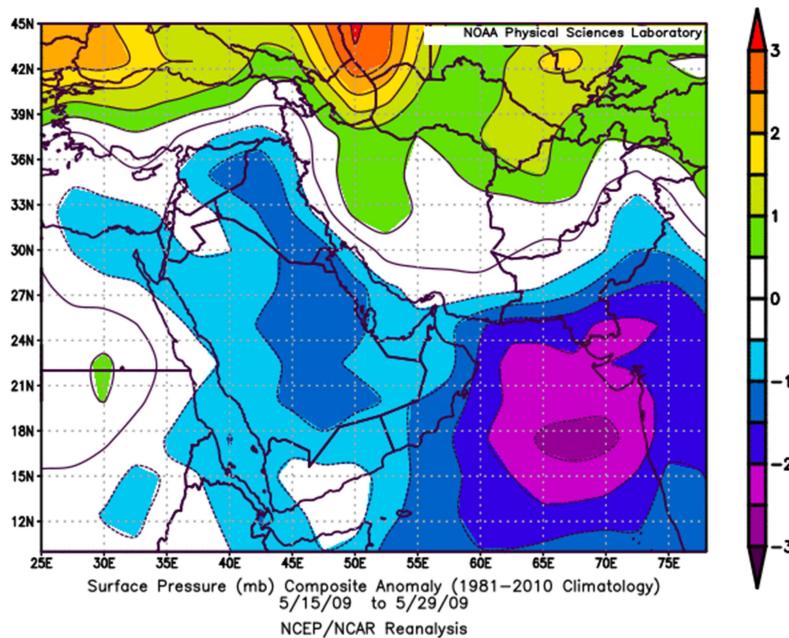
(الف)



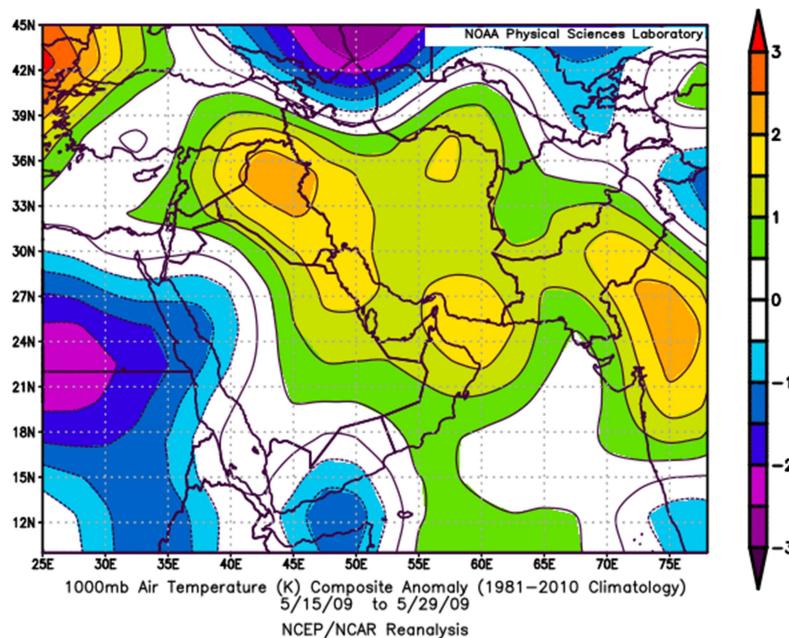
(ب)

شکل ۲. نقشه ناهنجاری (الف) فشار و (ب) دمای هوا، در سطح ۱۰۰۰ hpa در دوره ۲۵–۲۸ مارس ۲۰۰۹.

پیوست



(الف)



(ب)

شکل ۳. نقشه ناهمجاري (الف) فشار و (ب) دماي هوا، در سطح ۱۰۰۰ hpa در دوره ۱۵-۲۹ می ۱۴۰۹.

Temporal variability analysis of measured surface ozone at the Geophysics Institute Station of the University of Tehran

Kaffashzadeh, N.^{1*} and Aliakbari-Bidokhti, A. A.²

1. Post-Doc Researcher, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran
2. Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 31 Aug 2021, Accepted: 19 April 2022)

Summary

Near surface zone (O_3^{surf}), or tropospheric ozone at the ground level, is a secondary air pollutant that deteriorates human health and plants via damaging respiratory systems. This species is also one of the main greenhouse gases associated with global warming and climate change. Despite many efforts to study and to make policy control program, this gas is still increasing and is a recent serious threat for human. So, a comprehensive understanding of its variation and controlling factors is necessary for having a precise plan for its regulation.

Here, a measured time series of O_3^{surf} at one of the air quality monitoring sites in Iran, i.e. Geophysics Institute of the University of Tehran, is selected to assess the O_3^{surf} variation in more detail. Although this time series has been measured since 2007, there are many gaps in the data and a few years without data. Nevertheless, the data possess a high quality which is discussed in this paper. The series was prepared for the period of four years, i.e. 2007-2008 and 2019-2020. The data series was decomposed in to five spectral components, i.e. intraday (ID), diurnal (DU), synoptic (SY), seasonal (SE), and baseline (BL), by applying Kolmogorov-Zurbenko (KZ) filter. This filter was introduced by Kolmogorov and later was formalized by Zurbenko in 1997. Theoretically, the KZ filter is a technique consists of iterative running moving average (MA), in which a simple MA of m points is computed by: $S(t) = \frac{1}{m} \sum_{j=-(m-1)/2}^{(m-1)/2} ORG(t+j)$ where ORG and t represent the original time series and its time steps, respectively, and S is the input for each iteration. Therefore, the filter can be express as: $KZ_{m,k} = R_{i=1}^k \left\{ J_{p=1}^{w_i} [S(t_p)] \right\}$

Here m and k are window length and number of iterations, respectively. R and J represent iteration and running window, respectively, and w_i is defined as: $W_i = L_i - m + 1$ where L_i is the length of $S(t_i)$. $KZ_{m,k}$ is a low pass filter in which high frequency (short time period) variation are removed from the time series. The band of frequency and the level of suppression in this filter are controlled by m and k , respectively. Here, the ozone time series is decomposed to five spectral components as:

$$ORG(t) = ID(t_{<12h}) + DU(t_{12h-2.5d}) + SY(t_{2.5d-21d}) + SE(t_{21d-365d}) + BL(t_{>365d})$$

The results indicate that the contribution of each component to the O_3^{surf} variability is different as such that the DU component constitutes more than 50% of the ozone variability. In fact, this component makes most of the ozone variability which attributes to light variation (daytime-nighttime). The SE component has the second largest contribution to the O_3^{surf} variability. The contribution of the SY component is different and that depends on the year in which it is considered. As an example, the relative contribution of this component in 2007 is 8.93% and in 2019 is 4.84%. Only 5% of the total O_3^{surf} variability makes by the variation of the ID component. This implies that the contribution of each component to the total O_3^{surf} variability is different and such finding should be considered in ozone control strategies.

Keywords: Surface ozone time series, spectral components, KZ filter, temporal variability.

* Corresponding author:

najmeh.kaffashzadeh@gmail.com