



بررسی نقش کنترلی ارتفاع لایه مرزی آتمسفر در ارتباط با متغیرهای آلودگی در موقعیت‌های شهری استان اصفهان

عبدالعظیم قانقرمه^{۱*}، دلارام شکرالهی^۲

^۱دانشیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه گلستان، گرگان

^۲دانشجوی کارشناسی‌ارشد رشته آب و هواشناسی دانشگاه گلستان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱

چکیده

یکی از مباحث بسیار مهم در میکروکلیمای شهری، نقش کنترلی ارتفاع لایه مرزی آتمسفری است. این بخش از اقلیم از یک طرف متأثر از تغییرات اقلیمی سیاره‌ای و از طرفی دیگر متأثر از دخالت‌ها و فعالیت‌های انسانی در موقعیت‌های شهری است. بطوری‌که با افزایش و کاهش ارتفاع آن بعضی متغیرهای آلوده‌کننده آتمسفری نقش بیشتری از خود نشان می‌دهند از جمله آنها دی‌اکسید نیتروژن (NO₂)، دی‌اکسید گوگرد (SO₂)، شاخص آبروسل (AI) می‌باشد. در این مطالعه برای یک دوره چهار ساله پایش‌های روزانه ماهواره Sentinel-5P را در موقعیت شهرهای استان اصفهان مورد ارزیابی قرار دادیم. در ادامه به منظور شناسایی تاثیر ارتفاع لایه مرزی، فراوانی نسبی متغیرهای فوق را در دو حالت استقرار در بالا و پایین آستانه ۷۵۰ متری لایه مرزی مورد مقایسه قرار دادیم. بطور کلی نتایج حاکی از آن است که شاخص آبروسل (AI) در بالای آستانه ۷۵۰ متری لایه مرزی آتمسفری بیشترین تجمع را بر روی موقعیت‌های شهری استان اصفهان نشان می‌دهند. در حالیکه این نسبت به گازهای دی‌اکسید نیتروژن (NO₂) و دی‌اکسید گوگرد (SO₂) کاملاً متفاوت عمل می‌کند یعنی اینکه کاهش ارتفاع لایه مرزی آتمسفری فراوانی وقوع آنها را بیشتر نشان می‌دهد. البته لازم به ذکر است ارزیابی آماری با ضریب کاپا عدم تطابق درونی فراوانی برای هر سه متغیر فوق در بالا و پایین آستانه ۷۵۰ متری لایه مرزی نشان می‌دهد. همچنین وزن دهی انجام شده نیز در این دو طبقه نیز، تفاوت وزن‌ها را کاملاً آشکار می‌کند.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع لایه مرزی آتمسفری، دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد، شاخص آبروسل، شهرهای استان اصفهان.

مقدمه

شهرنشینی به همراه افزایش جمعیت با سرعت زیادی در حال توسعه و گسترش است. شهرنشینی تأثیر آشکاری بر محیط سطحی دارد. جایگزینی اراضی منابع طبیعی با سیمان و آسفالت در مناطق شهری چرخه طبیعی مواد و انرژی را به شدت تغییر داده و اقلیم و اکوسیستم منطقه را دگرگون کرده است. شواهد قابل توجهی نشان می‌دهد که کاربری گسترده زمین و تغییر پوشش زمین مرتبط با پیشرفت سریع شهرنشینی جهانی تأثیر قابل توجهی بر آب و هوای

منطقه دارد. تأثیر سطح زمین بر جو تا لایه ۱۰ کیلومتر اولیه جو محدود می‌شود. این لایه در قلمرو تروپوسفر قرار دارد. اثر مزبور در طول یک روز به لایه کم عمق تری محدود می‌شود که لایه مرزی جوی (ABL) یا لایه مرزی سیاره ای (PBL) نامیده می‌شود. ویژگی‌های جوی محلی و منطقه ای، به ویژه ساختار لایه مرزی سیاره ای، به طور قابل توجهی تغییر کرده است (Yu et al., 2013). ویژگی اصلی لایه مرزی اختلاط کامل هوا است که از طریق اصطکاک سطوح ناهمواری یا گرمایش سطح زمین ایجاد می‌شود.

² The atmosphere boundary layer (ABL)

نشیم دریا- خشکی نتایج قابل قبولی را نشان دهد. Grossman-Clarke و همکارانش (۲۰۰۸) شبیه سازی لایه مرزی سیاره شهری در یک منطقه شهری خشک (فینیکس-آریزونا) را با استفاده از یک نسخه اصلاح شده مدل میان مقیاس (MM5) انجام دادند. کارایی مدل با دو عملیات میدانی آزمایش شد. Bossioli و همکارانش (۲۰۰۹) نقش پارامترهای لایه مرزی سیاره ای در ارتباط با کیفیت هوای یک منطقه شهری با توپوگرافی پیچیده را در دو شرایط جوی تابستانی و زمستانی تجزیه و تحلیل قرار دادند. یافته‌های آنها نشان داد برای آلاینده‌های اولیه، با یک رویکرد محلی برای نشان دادن حداکثر غلظت‌های مشاهده شده مناسب است. اما در مورد آلاینده‌های ثانویه، اختلاف غلظت بالا، به دلیل رویکردهای مختلف لایه مرزی سیاره ای، یکنواخت تر دیده می شود. Du و همکاران (۲۰۱۳) رابطه ارتفاع لایه مرزی شهری و غلظت جرم ذرات معلق در شیان، چین مرکزی را مطالعه کردند. برای محاسبه ارتفاع لایه مرزی سیاره ای^۳ از سه روش به صورت سالانه، فصلی، روزانه و ساعتی استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که با روشی تحت عنوان Nozaki حداکثر تغییرات ارتفاع لایه مرزی روزانه از ساعت ۱۱ تا ۱۶ به وقت پکن رخ می‌دهد و حداکثر فصل آن نیز در فصل بهار اتفاق می‌افتد. در مقیاس‌های زمانی بین سالانه، سالانه و فصلی با غلظت‌های جرمی PM_{2.5}، PM_{1.0} و PM₁₀ با ارتفاع لایه مرزی همبستگی منفی دارند. Quan و همکارانش (۲۰۱۳) شکل گیری لایه مرزی سیاره ای را تحت شرایط آب و هوایی مختلف و تأثیر آن بر غلظت آئروسول در تیانجین چین از ۹ تا ۳۰ سپتامبر ۲۰۱۰ مطالعه نمودند و مشخص کردند که بین ارتفاع لایه مرزی و غلظت آئروسول در شرایط شفاف و مه آلود همبستگی معکوسی ایجاد می‌شود. Barlow (۲۰۱۴) در مطالعه ای پیشرفت در مشاهده و مدل سازی‌های لایه مرزی شهری را مورد ارزیابی قرار داد و مدعی شد که پیشرفت قابل توجهی در مشاهده و مدل سازی تعادل انرژی سطح شهری حاصل شده است. اما متذکر

شود. بنابراین ارتفاع آن از نظر زمانی ثابت نیست. بر این مبنا استقرار ساختمانها با ابعاد متفاوت در موقعیت‌های شهری تغییراتی در وضعیت تابش، حرارت، رطوبت و خصوصیات آیرودینامیکی محیط می‌شود (Oke, 2002). شارهای گرمای محسوس در طول روز عموماً در سطح نواحی شهری منجر به لایه‌های مرزی شهری عمیق‌تر (UBL) می‌شوند (Barlow et al., 2015). این بخش از اقلیم از یک طرف متاثر از تغییرات اقلیمی سیاره‌ای و از طرفی دیگر متاثر از دخالت‌ها و فعالیت‌های انسانی در موقعیت‌های شهری است. در نتیجه با توجه به انبساط و انقباض لایه مرزی شهری متاثر از تغییرات شارهای گرمایی در محیط‌های شهری امکان تجمع یا تراکم آلودگی‌ها یا فرایندهای مضر فیتوشیمیایی مهیا می‌گردد که به نوبه خود سلامت انسانی را تحت شعاع قرار می‌دهد. بنابراین شناخت دقیق اقلیم در حال شکل‌گیری متاثر از شهرنشینی به منظور آینده نگری سلامت زندگی شهری یکی از ضروریات می‌باشد. مطالعات متعددی در ارتباط با آلاینده‌های اتمسفری محیط‌های شهری در ارتباط ارتفاع لایه مرزی کار شده است. Cooper و همکارش (۱۹۹۴) ساختار اتمسفری لایه مرزی سیاره ای^۱ شهر مکزیکو سیتی را با مشاهدات لیدار و رادپوسوند مورد ارزیابی قرار دادند بطوریکه این ساختارها از نظر فضایی با شرایط دیاباتیکی محلی و تنش باد در ارتباط بوده است. Angevine و همکاران (۲۰۰۳) تضاد شهری و روستایی در ارتباط با لایه اختلاط ارتفاعی اتمسفر و ابرناکی بر فراز شهر نشویل برای سال ۱۹۹۹ مطالعه نمودند. یافته‌های آنها نشان می‌دهد که تضادهای شهری و روستایی پیامدهای مهمی برای کیفیت هوای منطقه دارد. Lin و همکارانش (۲۰۰۸) تغییرات جزیره گرمایی شهری و تأثیر آن بر توسعه لایه مرزی و گردش زمین-دریا در شمال تایوان را با استفاده از مدل WRF-Noah-UCM مطالعه نمودند. نتایج شبیه‌سازی برای پیش‌بینی اثر جزیره گرمایی شهری^۲ بر روی توسعه لایه مرزی و

¹ The planetary boundary layer (PBL)

² The urban heat island (UHI)

³ Planetary Boundary Layer Height (PBLH)

شد که لایه فرعی زبری شهری منطقه مهمی است که نیاز به توجه دارد زیرا فرضیات مربوط به تلاطم آتمسفر در این لایه شکسته می شود و ممکن است به دلیل عمق قابل توجه آن بر جفت شدن سطح به لایه مرزی شهری^۱ غالب باشد. خوش سیما و همکاران (۲۰۱۵) اثر ارتفاع لایه مرزی بر مبنای شاخص سنجش از دور آتمسفر را در ارتباط میزان غلظت ذرات معلق و عمق نوری هواویزها برای شهر زنجان در بازه زمانی دسامبر ۲۰۰۹ تا اکتبر ۲۰۱۰ مطالعه کردند. نتایج آنها نشان داد که اختلاط لایه مرزی و ماکزیمم ارتفاع لایه آمیخته از مهمترین پارامترهای تاثیرگذار بر ارتباط میان AOD و غلظت PM10 بودند. Zhu و همکارانش (۲۰۱۶) اثرات تضادهای شهری و روستایی را از نظر طول زبری حرکت (Z0) و دمای سطح آیرودینامیکی (TSK) بر روی لایه‌های مرزی سیاره‌ای خشک (PBLs) با استفاده از شبیه‌سازی‌های گردابی بزرگ (LES) با مدل WRF بررسی کردند. نتایج نشان دادند که تضادهای شهری-روستایی در Z0 و TSK تأثیرات قابل توجهی اما متفاوتی بر شار حرارتی سطح دارند. Song و همکاران (۲۰۱۶) تغییرات روزانه در محیط لایه مرزی شهری ناشی از سبز شدگی شهری برای فینیکس، آریزونا مطالعه کردند. در نتیجه مشخص شد که بام‌های سبز اثر خنک‌کنندگی نسبتاً یکنواختی متناسب با پوشش منطقه خود دارند. یاراحمدی و همکاران (۱۳۹۵) تغییرات ماهانه ی ارتفاع لایه مرزی در شرایط وارونگی‌های بحرانی را برای ایستگاه مهرآباد تهران مطالعه کردند هدف این تخمین ارتفاع لایه مرزی بر اساس پیمایش قائم جو با استفاده از روش وارونگی بحرانی یا تحلیل نیمرخ عمودی دمای پتانسیل بوده است. بهرامی و همکاران (۲۰۱۷) تعداد بیماری و مرگ منتسب به آلاینده‌های SO₂ و NO₂ را در شهر همدان برای سال ۱۳۹۳ مطالعه نمودند. نتایج حاصله نشان داد که متوسط غلظت سالیانه ی NO₂ و SO₂ به ترتیب ۱/۷ و ۱/۶ برابر استاندارد کشور ایران می باشد و با در نظر گرفتن حد مرکزی خطر نسبی، جزء

منتسب برای کل مرگ منتسب به آلاینده‌های NO₂ و SO₂ به ترتیب برابر با ۱/۷۴ و ۰/۹۲ درصد برآورد شد که بیانگر به ترتیب ۵۱/۹ و ۲۷/۳ نفر مرگ در طی سال ۱۳۹۳ می‌باشند. کماسی و همکاران (۱۳۹۶) توزیع مکانی عمق لایه آمیخته جو شهری تهران را مطالعه کردند و نتایج بیان گر وابستگی قابل توجه میان ویژگی‌های سطحی و ارتفاع لایه مرزی هستند. یاراحمدی و همکاران (۲۰۱۸) به منظور آشکار سازی تاثیرگذاری کاربری شهری در تغییر پذیری زمانی-مکانی سالانه ارتفاع لایه مرزی شهر کرمانشاه را مطالعه نمودند. نتایج تحلیل همبستگی آنها نشان داد تاثیر میکرو اقلیمی گسترش کاربری شهری، بر تغییرات لایه مرزی در زمستان مشهودتر از تابستان است. Liu و همکاران (۲۰۱۸) مکانیسم بازخورد مثبت بین هواشناسی لایه مرزی و تشکیل آئروسول ثانویه در طول رویدادهای مه شدید که طی آن ذرات معلق^۲ با سرعت از ده‌ها تا صدها میکروگرم در متر مکعب در ۱ تا ۲ روز افزایش می یابد را در چین بررسی کردند. نتایج نشان داد که کاهش لایه مرزی سیاره ای مرتبط با افزایش PM باعث افزایش رطوبت نسبی با تضعیف انتقال عمودی بخار آب می شود. افزایش RH به نوبه خود تشکیل PM ثانویه را از طریق واکنش‌های آبی ناهمگن افزایش می دهد، که باعث افزایش بیشتر PM، تضعیف تابش خورشیدی و کاهش ارتفاع PBL می شود. Song و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر منطقه‌ای استراتژی‌های کاهش گرمای شهری بر دینامیک لایه‌های مرزی سیاره‌ای در یک شهر نیمه خشک (فینیکس آریزونا) را مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه، از مدل تحقیق و پیش‌بینی آب و هوا (WRF) با پویایی واقعی شهری برای ارزیابی اثرات دو استراتژی محوطه‌سازی شهری برای کاهش گرمای شهری (یعنی بام‌های سبز و بام‌های سفید) بر پویایی PBL برای تابستان گرم استفاده کردند. نتایج نشان داد که اثرات بام‌های سبز و بام‌های سفید بر دینامیک لایه مرزی سیاره ای به‌طور قابل توجهی در طول روز و شب متفاوت است. Chen و

² Particulate matter (PM)

¹ The urban boundary layer (UBL)

شبانه جنوبی از دشت شمال چین به شن یانگ منتقل شدند. مهدیان و همکاران (۲۰۲۰) تغییرات سالانه ارتفاع لایه مرزی شهر تهران را مطالعه نمودند نتایج نشان داد که متوسط ارتفاع لایه^۳ مرزی شهر تهران در حدود ۸۵۰ متر از سطح زمین قرار دارد و در حالت شبانه به‌طور متوسط تا حدود ۸۰ متری می‌رسد. Guimarães و همکاران (۲۰۲۰) پروفایل‌های عمودی شبانه ازن، ذرات PM2.5 و PM10، مونوکسید کربن، دما و رطوبت را توسط یک هواپیمای بدون سرنشین بر فراز شهر مانائوس، برزیل، در مرکز آمازون در طول فصل خشک سال ۲۰۱۸ برای درک ساختار آلودگی در لایه مرزی شبانه شهری^۳ ارزیابی کردند. غلظت بالای ازن، دما و رطوبت در اکثر شب‌ها بین ارتفاع ۲۲۵ تا ۳۵۰ متر واقع می‌شود که نشان دهنده انحراف بالای NBL شهری است. Arruda Moreira و همکارانش (۲۰۲۰) ارتفاع لایه مرزی سیاره ای در محیط شهری را با استفاده از ترکیب رادیومتر مایکروویو و ceilometers برای منطقه شهری عرض جغرافیایی میانی گرانادا (اسپانیا) مطالعه کردند. تجزیه و تحلیل مطالعه آماری ارتفاع لایه مرزی سیاره ای تا حدودی مطابقت با سایر مطالعات انجام شده در ارتباط با ارتفاع لایه مرزی سیاره ای مانند الگوی روزانه و چرخه سالانه را نشان می‌دهد. در کل رفتار ارتفاع لایه مرزی برای توضیح چرخه روزانه غلظت کربن سیاه (BC) که به عنوان ردیاب انتشار آلاینده‌های مرتبط با ترافیک قابل استفاده است. میرعلیزاده فرد و همکاران (۲۰۲۱) رابطه میزان غلظت روزانه و ماهانه آلاینده هوای شهری با عمق لایه اختلاط در ایستگاه پونک را با استفاده از مدل AERMOD مطالعه نمودند. در این مطالعه میزان انتشار آلاینده‌های O₃، SO₂، PM10، CO، NO₂ و PM2.5 در مقایسه با مقادیر ارتفاع لایه مرزی همرفتی و ارتفاع لایه مرزی مکانیکی (عمق) اختلاط انجام شد. Miao و همکاران (۲۰۲۱) رابطه بین آلودگی PM2.5 و O₃ همزمان در تابستان را با ارتفاع لایه مرزی در شهرهای پکن و شانگهای، چین مورد مقایسه قرار دادند. یافته‌ها نشان داد که در شهر

همکارانش (۲۰۱۸) اثرات شهرنشینی و کاهش جزایر حرارتی شهری بر هواشناسی لایه مرزی و کیفیت هوا در پکن تحت شرایط آب و هوایی مختلف مدلسازی کردند. براین اساس مشخص شد تعدیل کاربری اراضی روستایی در دمای ۲ متری داخل شهری و ارتفاع لایه مرزی سیاره ای را افزایش می‌دهد، اما رطوبت نسبی ۲ متری (RH2) و سرعت باد ۱۰ متری (WS10) را در پکن شهری کاهش می‌دهد. در نتیجه به افزایش غلظت O₃ لایه سطحی و همچنین کاهش غلظت PM2.5 در تابستان و زمستان منجر می‌شود. Luan و همکارانش (۲۰۱۸) رابطه بین غلظت PM2.5، دید و ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای در شهر پکن برای رویدادهای اختلاط غبار^۱ و غبار-مه مطالعه نمودند نتایج کار آنها نشان می‌دهد که یک تابع نمایی منفی بین دید و غلظت جرم PM2.5 برای رویدادهای اختلاط غبار و غبار-مه (با R² 0.80) وجود دارد. Pan و همکارانش (۲۰۱۹) با اندازه‌گیری بلندمدت ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای و برهمکنش با PM2.5 برای دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵ با استفاده از یک میکرو پالس لیدار (MPL)^۲ مطالعه ای را انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که هیچ روند بلند مدت قابل توجهی در ارتفاع لایه مرزی سیاره ای در شانگهای چین در طول دوره ۶ ساله وجود ندارد، اما تغییرپذیری ارتفاع PBL نسبت به تابش خورشیدی و گرادیان دمای عمودی حساس‌تر بوده است. Miao و همکارانش (۲۰۱۹) در مروری به مطالعات انجام شده بر تعامل بین لایه مرزی سیاره ای و آلودگی PM2.5 در شهرهای بزرگ در چین پرداختند. مدعی شدند که PBL برای شکل‌گیری آلودگی PM2.5 شهری در مقیاس‌های زمانی متعدد، از تغییرات روزانه تا تغییرات فصلی، حیاتی است. Li و همکاران (۲۰۱۹) اثر ساختار لایه مرزی سیاره‌ای بر شکل‌گیری و تکامل قسمت‌های آلودگی هوا در شمال شرقی چین را در طول پاییز و زمستان ۲۰۱۶ بررسی کردند. مشاهدات و نتایج مدل‌سازی نشان داد که مقدار زیادی از آلاینده‌ها توسط جت‌های سطح پایین

¹ Haze² A Micro Pulse Lidar (MPL)³Nighttime boundary layer (NBL)

یافت. Miao و همکاران (2022) تنش گرمایی شهر پکن را در ارتباط با ساختار لایه مرزی و آلودگی هوا مطالعه نمودند. در این مطالعه با استفاده از یک شاخص حرارتی که حاصل ترکیب دما و رطوبت است نتیجه گرفتند که خطر گرمای بالا در پکن اغلب با ارتفاع لایه مرزی پایین و کیفیت پایین هوا مرتبط است. باقر آبادی (۲۰۲۲) روند تغییرات NO_2 تروپوسفری شهر کرمانشاه با استفاده از سنجنده OMI و ارتباط آن با پارامترهای هواشناسی مطالعه نمودند. نتایج کار ایشان نشان می دهد که غلظت ماهانه بیشترین مقدار دی اکسید نیتروژن در فصل زمستان و کمترین مقدار در تابستان اتفاق می افتد. همچنین رابطه غلظت دی اکسید نیتروژن تروپوسفری با پارامترهای هواشناسی نشان داد که با باد و دمای سطحی به ترتیب رابطه معکوسی دارد در حالی که با بارش رابطه مستقیمی نشان می دهد. در نهایت با توجه به یافته‌های محققین مشخص می گردد یکی از مهمترین بخش اقلیم شهری، لایه مرزی و نقش کنترلی آن در زمینه متغیرهای آلوده کننده چه به صورت ذرات آبروسلی و چه به صورت فرایندهای فیتوشیمیایی می باشد. در حال حاضر سرعت گسترش شهری، توسعه حمل و نقل شهری، فعالیت‌های صنعتی در حواشی تعدادی زیادی از شهرهای استان اصفهان و استفاده از سوخت‌های فسیلی و از همه مهمتر بیابانی بودن این استان سبب شده است، در مقابله با آلودگی هوا بسیار شکننده باشد. از طرف دیگر، یکی از عوامل مهم اقلیمی کنترل آلودگی هوا لایه مرزی آتمسفر است. بر این اساس هدف از این تحقیق مشخص نمودن نقش لایه مرزی آتمسفری در محدوده‌های شهری استان اصفهان به عنوان یک عامل کنترل کننده متغیرهای آلودگی است.

مواد و روش تحقیق

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش چهار متغیر شامل دی اکسید نیتروژن (NO_2)، دی اکسید گوگرد (SO_2)، شاخص آبروسل (AI) و ارتفاع لایه مرزی آتمسفر می باشد که داده‌های سه گانه اولی مربوط به

پکن، آلودگی‌های همزمان شدید معمولاً در روزهایی با UBL کم عمق در بعدازظهر و با بادهای غالب جنوبی/جنوب‌غربی اتفاق می‌افتد. ساری زاده و همکاران (۲۰۲۱) رابطه آلودگی هوای شهری با میزان مرگ بیماران قلبی عروقی و تنفسی شهر اهواز را در بازه زمانی ۱۳۸۷ لغایت ۱۳۹۶ مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که بین میانگین غلظت گازهای آلاینده‌های NO_2 ، CO و SO_2 با میزان مرگ بیماران با تشخیص مشکلات تنفسی و همچنین با تشخیص مشکلات قلبی عروقی ارتباط معنی دار مشاهده گردید. طاوسی و همکار (۱۴۰۰) روند شرایط اینورژنی لایه مرزی هوا را به صورت ماهانه، فصلی و سالانه در شهر شیراز و ارتباط آن با پدیده انسو مطالعه کردند. یافته‌ها نشان دادند که مهر و آبان بیشترین و تیرماه کمترین فراوانی روزهای وارونگی را دارند. بر پایه ریتم تغییرات شاخص اقیانوسی نینوا^۱ نتایج نشان داد که بیشترین فراوانی روزهای همراه با وارونگی دما در شهر شیراز با فاز سرد انسو (لانینا) همسو است. Wang و همکاران (۲۰۲۱) تاثیر تفاوت ارتفاع لایه مرزی بین مناطق شهری و حومه پکن را در ارتباط با آلودگی هوا مطالعه نمودند و به این نتیجه رسیدند که تفاوت‌های قابل توجهی در تغییرات روزانه در لایه مرزی بین مناطق شهری و برون شهری وجود دارد. Sun و همکارانش (۲۰۲۲) برای اولین بار بازخورد^۲ اثرات سلامتی تعامل بین ذرات معلق در هوا با لایه‌های مرزی سیاره ای را در ارتباط با سلامت تنفس و گردش خون مطالعه نمودند. این کار با دو سناریوی غلظت $\text{PM}_{2.5}$ و دمای هوا با / بدون در نظر گرفتن تعامل بین ذرات معلق در هوا با لایه‌های مرزی سیاره ای در ارتباط با مرگ و میر انجام گرفت. نتایج نشان داد که بدون در نظر گرفتن تعامل فوق، سطوح میانگین وزنی مرگ و میر جمعیت با $\text{PM}_{2.5}$ و دما در مقایسه با سطوح متوسط افزایش داد. در حالیکه با در نظر گرفتن تعامل فوق دمای میانگین وزنی مرگ و میر جمعیت کاهش و در حالی که غلظت میانگین وزنی $\text{PM}_{2.5}$ مرگ و میر جمعیت افزایش

¹ Oceanic Niño Index (ONI)

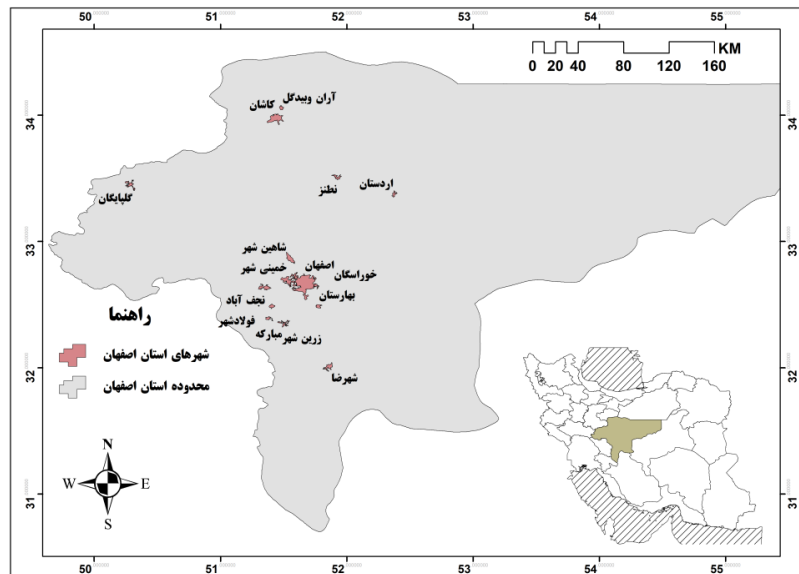
² Feedback

جهانی قابل ردیابی است و همچنین تأثیر آن از آلودگی کوتاه مدت تا اثرات بلند مدت اقلیم دیده می‌شود. تنها حدود ۳۰ درصد از SO_2 منتشر شده از منابع طبیعی می‌آید، در حالیکه اکثریت آنها منشأ فعالیت‌های انسانی دارند. انتشار SO_2 بر سلامت انسان و کیفیت هوا تأثیر منفی می‌گذارد. SO_2 از طریق نیروی تابشی، از طریق تشکیل ذرات معلق سولفات، بر اقلیم تأثیر می‌گذارد (<http://www.tropomi.eu/data-products/sulphur-> dioxide). ذرات آبروسلی بر اساس تغییرات وابسته به طول موج در حالت پخش ریلی در محدوده طیفی UV برای یک جفت طول موج قابل شناسایی است. تفاوت بین بازتاب مشاهده شده و مدل شده در AI حاصل می‌شود. هنگامی که AI مثبت باشد، نشان دهنده وجود ذرات معلق در هوای جاذب UV مانند گرد و غبار و دود است. این متغیر برای ردیابی تکامل توده‌های آبروسل اپیزودیک ناشی از طغیان گرد و غبار، خاکستر آتشفشانی و سوزاندن زیست توده مفید است (<http://www.tropomi.eu/data-products/uv-> aerosol-index). ارتفاع لایه مرزی هوا (BLH) یکی از تولیدات مراکز پیش بینی محیط NCEP تحت عنوان سامانه بازکاوی پیش بینی آب و هوا (CFSR) است که برای دوره ۳۱ ساله از ۱۹۷۹ تا ۲۰۰۹، در ژانویه ۲۰۱۰ تکمیل شد. CFSR به عنوان یک سیستم جهانی جفت شده با وضوح بالا برای حالت جفت شدگی سیستم اتمسفر-اقیانوس-زمین-سطح-یخی دریا طراحی و اجرا شد تا بهترین تخمین از این حالت در این دوره ارائه شود. CFSR فعلی به عنوان یک محصول عملیاتی و بلادرنگ در آینده گسترش خواهد یافت. ویژگی‌های جدید CFSR عبارتند از (۱) جفت شدن جو و اقیانوس برای تخمین ۶ ساعته، (۲) یک مدل تعاملی یخ دریایی و (۳) ادغام طیف ماهواره توسط طرح درون‌یابی آماری شبکه نقطه ای (GSI) در کل دوره می‌باشد. در این بین یکی از خروجی‌های این مدل ارتفاع لایه مرزی اتمسفر (Planetary_Boundary_Layer_Height_surface) می‌باشد (Saha et al. 2010). لازم به ذکر است این

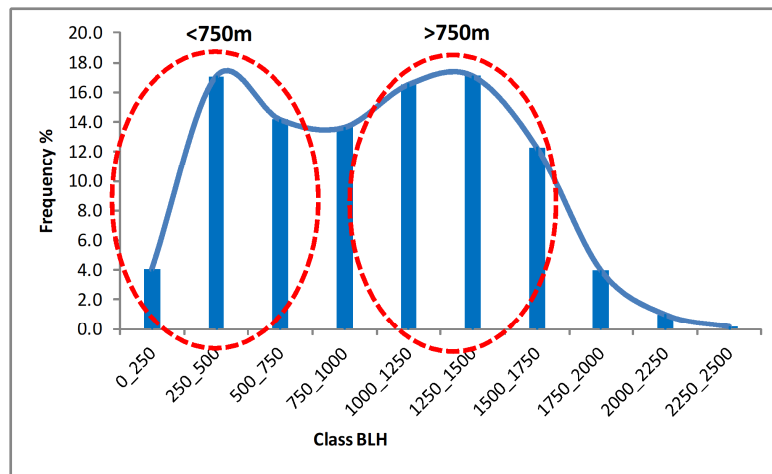
ماهواره سنتینل (Sentinel) و داده چهارم نیز توسط مراکز پیش بینی محیط NCEP تحت عنوان سامانه بازکاوی پیش بینی آب و هوا (CFSR) برای دوره ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۲ دریافت شدند. لازم به توضیح است این داده‌ها از آرشیو داده ای Earth Engine با کد نویسی برای سری زمانی فوق‌الذکر در محدوده‌های گسترش شهری استان اصفهان استخراج شدند. در سالهای اخیر ماهواره سنتینل با فعالیت برنامه کوپرنیک توسط کمیسیون اروپا با مشارکت آژانس فضایی اروپا (ESA) راه اندازی شد. ماهواره سنتینل (Sentinel) از جمله برنامه‌های کوپرنیک است که برای پایش شرایط محیطی، اقلیمی و اقیانوسی می‌باشد. در این مطالعه از داده‌های کیفیت هوا مربوط به Sentinel-5P استفاده نمودیم. ابزار مانیتورینگ تروپوسفریک (TROPOMI) ابزار ماهواره ای بر روی ماهواره کوپرنیک Sentinel-5P پیشرو است. این ابزار یک حسگر چند طیفی است که بازتاب طول موج‌های مهم برای اندازه‌گیری غلظت‌های اتمسفر ازن، متان، فرمالدئید، آبروسل، مونوکسید کربن، اکسید نیتروژن و دی‌اکسید گوگرد و همچنین ویژگی‌های ابر را با وضوح فضایی ۰٫۰۱ درجه قوس ثبت می‌کند. دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) و اکسید نیتروژن (NO) معمولاً با هم به عنوان اکسیدهای نیتروژن ($NO_x = NO + NO_2$) شناخته می‌شوند. این متغیر هم در تروپوسفر و هم در استراتوسفر وجود دارند که در نتیجه فعالیت‌های انسانی (به ویژه احتراق سوخت‌های فسیلی و سوزاندن زیست توده) و فرآیندهای طبیعی (مانند فرآیندهای میکروبیولوژیکی در خاک، آتش سوزی‌های جنگلی و رعد و برق) وارد جو می‌شوند. در طول روز، یعنی در حضور نور خورشید، یک چرخه فتوشیمیایی شامل ازن، NO را به NO_2 (و بالعکس) در مقیاس زمانی چند دقیقه تبدیل می‌کند، به طوری که NO_2 معیاری قوی برای غلظت اکسیدهای نیتروژن است (<http://www.tropomi.eu/data-products/nitrogen-> dioxide). دی‌اکسید گوگرد (SO_2) از طریق فرآیندهای طبیعی و انسانی وارد جو زمین می‌شود. نقش این فرآیند شیمی اتمسفری از مقیاس محلی تا

این نتیجه حاصل شد که مبنای ارتفاع ۷۵۰ متری مطابق شکل ۲ معیار قابل قبولی در تعیین آستانه تشخیص سطح بالا و پایین لایه مرزی در موقعیت‌های شهری این استان می‌تواند باشد. هر چند این الگو می‌تواند در مقیاس کلان تری در نواحی مختلف جغرافیایی متفاوت باشد.

داده‌ها برای شهرهای مختلف استان اصفهان بر اساس گستره پهنه‌های شهری به صورت روزانه از پایگاه مجازی ارث انجین دریافت گردید (شکل ۱). از آنجایی که هدف عمده این پژوهش ارزیابی مولفه‌های آلوده کننده هوای شهری در ارتباط با ارتفاع لایه مرزی می‌باشد. بر این اساس با بررسی توزیع فراوانی تغییرات ارتفاع لایه مرزی در محدوده شهرهای استان اصفهان



شکل ۱: موقعیت شهرهای منتخب شهرهای استان اصفهان.



شکل ۲: توزیع فراوانی وقوع ارتفاع لایه مرزی در موقعیت‌های شهری استان اصفهان (۲۰۱۹-۲۰۲۲).

در ادامه برای منظور شناسایی تاثیر ارتفاع لایه مرزی بر روی مولفه‌های دی اکسید نیتروژن، دی اکسید گوگرد و شاخص آئروسول در حالت استقرار در بالا و پایین آستانه ۷۵۰ متری، فراوانی آنها را در قالب دو نمونه به صورت نسبی مورد مقایسه قرار گرفت. برای این هدف داده‌های شاخص آئروسول در ۱۲ کلاس و برای دو متغیر دیگر نیز ۱۰ کلاس در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که تعداد طبقات کلاس‌ها بر

برای این هدف داده‌های شاخص آئروسول در ۱۲ کلاس و برای دو متغیر دیگر نیز ۱۰ کلاس در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که تعداد طبقات کلاس‌ها بر

توزیع نمونه در حالت کلی مورد استفاده قرار گرفت، در حالی که ضریب کاپا برای نشان دادن توافق یا عدم توافق درونی نمونه‌ها در طبقات مختلف مورد نظر قرار گرفت. در نهایت به منظور مقایسه نمونه بالا و پایین آستانه ۷۵۰ ارتفاع مرزی برای شهرهای مختلف با استفاده از نرخ معکوس شماره کلاس‌ها جمع امتیازهای وزنی برآورد و سپس درجه بندی شدند (جدول ۱).

مبنای فراوانی کل شهرها تنظیم گردید. بنابراین ممکن است فراوانی داده‌ها در تعدادی از کلاس‌ها در شهرهای مختلف متفاوت دیده شوند. در ادامه با استفاده از آماره‌های کای اسکوتر، همبستگی پیرسون، همبستگی اسپیرمن و نسبت توافق کاپا، دو حالت استقرار در بالا و پایین ارتفاع ۷۵۰ متری لایه مرزی مولفه‌های سه گانه مورد آزمون قرار گرفتند. در این مطالعه آماره کای اسکوتر، همبستگی پیرسون و اسپیرمن برای نشان دادن همخوانی و وابستگی دو

جدول ۱: معادلات مورد استفاده شده در پژوهش.

ردیف	معادله	متغیرها	فرمول
۱	کای اسکوتر	O = فراوانی مشاهده شده E = فراوانی مورد انتظار	$X^2 = \sum \frac{(O - E)^2}{E}$
۲	رگرسیون پیرسون	X = متغیر مستقل Y = متغیر وابسته	$r_p = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$
۳	رگرسیون اسپیرمن	d = تفاضل بین رتبه‌های هر زوج X, Y n = تعداد نمونه	$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^k d_i^2}{n(n^2 - 1)}$
۴	ضریب کاپا	Pr(a) = احتمال توافق Pr(e) = احتمال توافق مورد انتظار	$k = \frac{\text{Pr}(a) - \text{Pr}(e)}{1 - \text{Pr}(e)}$
۵	معادله رتبه بندی	F = فراوانی نسبی Ri-1 = شماره رتبه کلاس Rmax = حداکثر شماره رتبه کلاس	$IWVC = \sum F \frac{R_{i-1}}{R_{\max}}$

دارای کمترین دامنه تغییرات ارتفاع لایه مرزی را به خود اختصاص دادند. همچنین بررسی تغییرپذیری چهار ساله بر مبنای آماره ضریب تغییر پذیری نیز نشان می‌دهد که تغییرپذیری ارتفاع لایه مرزی شهرهای مختلف استان بین ۴۵/۳۲ تا ۴۹ درصد و کمترین تغییر پذیری در شهر اردستان و بالاترین آن در شهرهای کاشان و آران بیدگل دیده شده است. در کل می‌توان گفت که در طی چهار سال دوره آماری دامنه متوسط روزانه ارتفاع لایه مرزی در کل شهرهای استان بین ۳۲ تا ۲۲۲۹ متر بوده است.

یافته‌ها

در این مطالعه سه متغیر آلوده کننده هوا در ارتباط با لایه مرزی مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۲ مشخص می‌کند که ارتفاع متوسط لایه مرزی در شهرهای استان اصفهان بین ۸۱۲/۸۳ تا ۱۱۴۹/۳۴ متر می‌باشد. بالاترین دامنه تغییرات ارتفاعی لایه مرزی در شهرهای گلپایگان، آران و بیدگل، کاشان، خمینی شهر، اردستان و شاهین شهر اتفاق افتاده است. در حالیکه شهرهای خوراسگان، شهرضا، بهارستان، فولاد شهر، مبارکه، نجف آباد و زرین شهر

جدول ۲: آماره‌های توصیفی ارتفاع لایه مرزی (به متر) در موقعیت‌های شهری استان اصفهان (۲۰۲۲-۲۰۱۹).

CV%	Std. deviation	Mean	Maximum	Minimum	Obs. data	نام شهرها
49.00	398.32	812.83	2299.13	23.00	1324	آران و بیدگل
45.32	407.43	898.93	2337.63	23.00	1324	اردستان
48.65	500.36	1028.45	2134.63	23.50	1324	بهارستان
46.09	498.43	1081.41	2193.98	37.61	1324	اصفهان
47.07	482.37	1024.79	2148.75	28.50	1324	فولادشهر
47.83	520.77	1088.69	2332.88	63.56	1324	گلپایگان
49.00	398.32	812.83	2299.13	23.00	1324	کاشان
45.84	515.53	1124.55	2344.10	44.12	1324	خمینی شهر
48.04	493.58	1027.42	2106.94	26.34	1324	خوراسگان
47.07	482.37	1024.79	2148.75	28.50	1324	مبارکه
47.07	482.37	1024.79	2148.75	28.50	1324	نجف آباد
48.06	396.59	825.13	2238.75	22.50	1324	نطنز
45.86	527.06	1149.34	2443.13	48.00	1324	شاهین شهر
47.20	470.60	996.96	2121.75	40.00	1324	شهرضا
47.07	482.37	1024.79	2148.75	28.50	1324	زرین شهر

جدول ۳: آماره‌های توصیفی شاخص آئروسول AI در موقعیت‌های شهری استان اصفهان (۲۰۲۲-۲۰۱۹).

CV%	Std. deviation	Mean	Maximum	Minimum	Obs. data	نام شهرها
87.06	0.691	0.793	3.103	-1.620	1264	آران و بیدگل
95.45	0.631	0.661	2.400	-1.864	1286	اردستان
103.17	0.700	0.678	2.837	-1.863	1287	بهارستان
108.65	0.709	0.653	2.738	-1.823	1292	اصفهان
178.14	0.665	0.373	2.203	-2.198	1287	فولادشهر
235.80	0.654	0.277	2.461	-2.031	1291	گلپایگان
80.64	0.721	0.893	3.015	-1.699	1273	کاشان
127.22	0.672	0.528	2.370	-2.085	1291	خمینی شهر
138.53	0.708	0.511	2.560	-1.708	1290	خوراسگان
128.62	0.640	0.497	2.189	-2.015	1285	مبارکه
95.45	0.674	0.706	2.522	-1.866	1288	نجف آباد
607.08	0.628	0.104	2.241	-2.453	1290	نطنز
95.88	0.683	0.712	2.503	-1.765	1290	شاهین شهر
105.15	0.722	0.686	2.622	-4.012	1289	شهرضا
158.31	0.607	0.384	2.051	-1.888	1285	زرین شهر

شاخص در سطح شهرهای مختلف معادل حداقل ۳/۹۴ در شهر زرین شهر و حداکثر معادل ۶/۶۳ در شهرضا مشاهده شده است. همچنین آماره ضریب تغییر پذیری در شهرهای کاشان، آران و بیدگل، اردستان، نجف آباد و شاهین شهر تغییر پذیری بین ۸۰ تا ۱۰۰ درصد و در شهرهای بهارستان، شهرضا،

خصوصیات توصیفی شاخص آئروسول (AI) شهرهای استان نیز نشان می‌دهد در طی چهار سال به طور متوسط در ۹۷ درصد روزها پایش ماهواره ای انجام شده است. این شاخص در شهرهای مختلف استان اصفهان دارای دامنه‌های بین ۴/۰۱- تا ۳/۱۰ ثبت شده است. لازم به ذکر است دامنه تغییرات این

اصفهان، خمینی شهر، مبارکه، خوراسگان، زرین شهر و فولادشهر بین ۱۰۳ تا ۱۷۸ درصد است، در حالی که شهرهای گلپایگان و نطنز معادل ۲۳۵ و ۶۰۷ درصد تغییر پذیری را در طی چهار سال تجربه کرده است (جدول ۳).

در این مطالعه برای نشان دادن دامنه عددی متغیرهای دی اکسید نیتروژن و دی اکسید گوگرد از ضریب ۱۰۰۰۰ استفاده نمودیم. بنابراین منبسط واحد متغیرهای فوق به صورت $(\text{mol}/\text{m}^2 \cdot 10^{-4})$ خواهد بود. بر این اساس دی اکسید نیتروژن (NO_2) نیز مطابق با جدول ۴ نشان می‌دهد که در طی چهار سال دوره آماری ۹۷ درصد از روزهای مورد نظر پایش ماهواره ای انجام شد. دامنه حداکثر و حداقل آن در محدوده‌های شهری بین ۰ تا $۱۳/۱۷ (\text{mol}/\text{m}^2 \cdot 10^{-4})$ بوده است همچنین مقدار متوسط آن نیز در محدوده‌های شهری معادل $۲/۰۴$ می‌باشد اما مقایسه مقدار میانگین بین شهرهای مختلف نشان می‌دهد که بیشترین مقدار آن در شهر اصفهان $۴/۰۷$ و کمترین در نطنز معادل $۰/۷۸$ بوده است. دامنه بین آماره متوسط با حداکثر آن نشان می‌دهد که شهرهای گلپایگان، شهرضا و اردستان در پایین‌ترین حد و شهرهای اصفهان، خمینی شهر، خوراسگان، شاهین شهر، بهارستان و فولادشهر در بالاترین سطح خود قرار داد. همچنین بررسی ضریب تغییر پذیری ۴ ساله نیز حاکی از آن است که دامنه آن بین ۱۹ تا $۷۴/۴$ درصد در تغییر بوده که بالاترین آن مربوط به شهر بهارستان و پایین‌ترین نیز به شهر گلپایگان اختصاص دارد.

مطابق با جدول ۵ نیز مشخص می‌گردد که دامنه حداکثر و حداقل دی اکسید گوگرد (SO_2) بر اساس سنجش‌های ماهواره‌های بین منفی $۱۲/۷۸$ تا $۶۱/۷۷ (\text{mol}/\text{m}^2 \cdot 10^{-4})$ بوده است. متوسط آن در بین شهرهای استان اصفهان معادل $۱/۹۷$ می‌باشد که بالاترین مقدار مربوط به شهر شاهین شهر و پایین‌ترین آن نیز به شهر گلپایگان اختصاص دارد. همچنین مقایسه نسبت حداکثر به مقدار متوسط حاکی از آن

است که بیشترین دامنه مربوط به شهرهای بهارستان و زرین شهر و کمترین نیز به شهر شهرضا اختصاص دارد. بررسی ضریب تغییر پذیری نیز حاکی از آن است که بالاترین درصد تغییر پذیری به شهر گلپایگان و کمترین آن نیز به شهر شاهین شهر اختصاص دارد. در کل درصد تغییر پذیری در کل شهرهای استان بالای ۱۶۵ درصد است.

مقایسه‌ای شاخص آئروسول در بالا و پایین آستانه

۷۵۰ متری ارتفاع لایه مرزی: شکل ۳ فراوانی شاخص آئروسول را در بالا و پایین آستانه ۷۵۰ متری ارتفاع لایه مرزی در موقعیت‌های شهری استان اصفهان نشان می‌دهد همانطور که ملاحظه می‌گردد درصد فراوانی نسبی آئروسول در بخش مرکزی نمودارها در بالا و پایین آستانه فوق متفاوت است. بدین صورت که در نمونه پایین تر از آستانه، حداکثر فراوانی نسبی شاخص آئروسول در طبقه $۰-۰/۵$ و در نمونه بالاتر از آستانه نیز در طبقه $۱-۰/۵$ دیده می‌شود. بدین مفهوم که همزمان با بالا رفتن ارتفاع لایه مرزی در موقعیت‌های شهری، تراکم آئروسول افزایش می‌یابد و در حالیکه با کم شدن ارتفاع لایه مرزی از میزان تراکم آئروسول در آتمسفر کاسته می‌شود. بر این اساس به منظور ارزیابی همخوانی یا عدم همخوانی بین دو نمونه بالا و پایین آستانه ۷۵۰ متری لایه مرزی، از آزمون‌های آماری کای اسکوئر، همبستگی پیرسون، اسپیرمن و ضریب کاپا استفاده شد. بطوری که مطابق جدول ۶ ملاحظه می‌گردد، آماره کای اسکوئر بین دو نمونه بالا و پایین آستانه فوق در تمامی شهرها تفاوت معنی‌داری را نشان نمی‌دهد و توزیع نمونه‌های فوق در دو هر نمونه برای تمامی شهرها از همخوانی معنی‌داری پیروی می‌کند. همچنین آماره پیرسون و اسپیرمن نیز همبستگی نمونه‌ها را در سطح معنی‌داری تایید می‌کند، اما برآورد انجام شده برای ضریب کاپا به منظور نشان دادن وابستگی درونی دو نمونه کاملاً عدم توافق نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۴: آماره‌های توصیفی دی اکسید نیتروژن (NO_2) (10^{-4} mol/m^2) در موقعیت‌های شهری استان اصفهان (۲۰۱۹-۲۰۲۲).

CV%	Std. deviation	Mean	Maximum	Minimum	Obs. data	نام شهرها
52.91	0.64	1.21	5.46	0.24	1265	آران و بیدگل
29.55	0.49	1.64	5.24	1.01	1287	اردستان
74.40	1.24	1.67	10.31	0.00	1288	بهارستان
41.15	1.68	4.07	13.17	1.75	1293	اصفهان
64.20	1.25	1.95	8.22	0.43	1288	فولادشهر
19.06	0.16	0.85	2.83	0.44	1292	گلپایگان
38.76	0.77	2.00	6.10	0.98	1274	کاشان
40.82	1.41	3.46	12.09	1.42	1292	خمینی شهر
48.06	1.49	3.10	11.22	0.86	1291	خوراسگان
33.87	0.71	2.08	5.78	0.81	1286	مبارکه
60.46	1.06	1.75	7.98	0.35	1289	نجف آباد
45.44	0.36	0.78	4.12	0.03	1291	نطنز
41.09	1.35	3.29	10.34	1.08	1291	شاهین شهر
24.59	0.29	1.17	2.94	0.41	1290	شهرضا
51.98	0.86	1.65	7.90	0.38	1286	زرین شهر

جدول ۵: آماره‌های توصیفی دی اکسید گوگرد (SO_2) (10^{-4} mol/m^2) در موقعیت‌های شهری استان اصفهان (۲۰۱۹-۲۰۲۲).

CV%	Std. deviation	Mean	Maximum	Minimum	Obs. data	نام شهرها
246.31	5.57	2.26	54.66	-9.33	1052	آران و بیدگل
187.53	4.99	2.66	39.19	-8.36	1062	اردستان
297.19	5.71	1.92	61.77	-9.56	1092	بهارستان
257.87	4.18	1.62	45.37	-6.48	1147	اصفهان
222.03	6.23	2.81	55.21	-9.70	1077	فولادشهر
-729.78	4.91	-0.67	40.02	-12.78	998	گلپایگان
346.97	5.65	1.63	55.68	-9.58	1063	کاشان
268.60	4.68	1.74	53.23	-8.41	1111	خمینی شهر
382.47	5.93	1.55	50.48	-10.13	1091	خوراسگان
187.33	4.94	2.64	53.10	-7.42	1107	مبارکه
175.89	4.78	2.72	48.69	-8.61	1094	نجف آباد
256.82	5.08	1.98	40.31	-9.46	1029	نطنز
165.30	5.05	3.05	48.03	-8.73	1083	شاهین شهر
306.32	4.25	1.39	26.47	-9.17	1091	شهرضا
258.95	5.68	2.19	57.63	-10.32	1085	زرین شهر

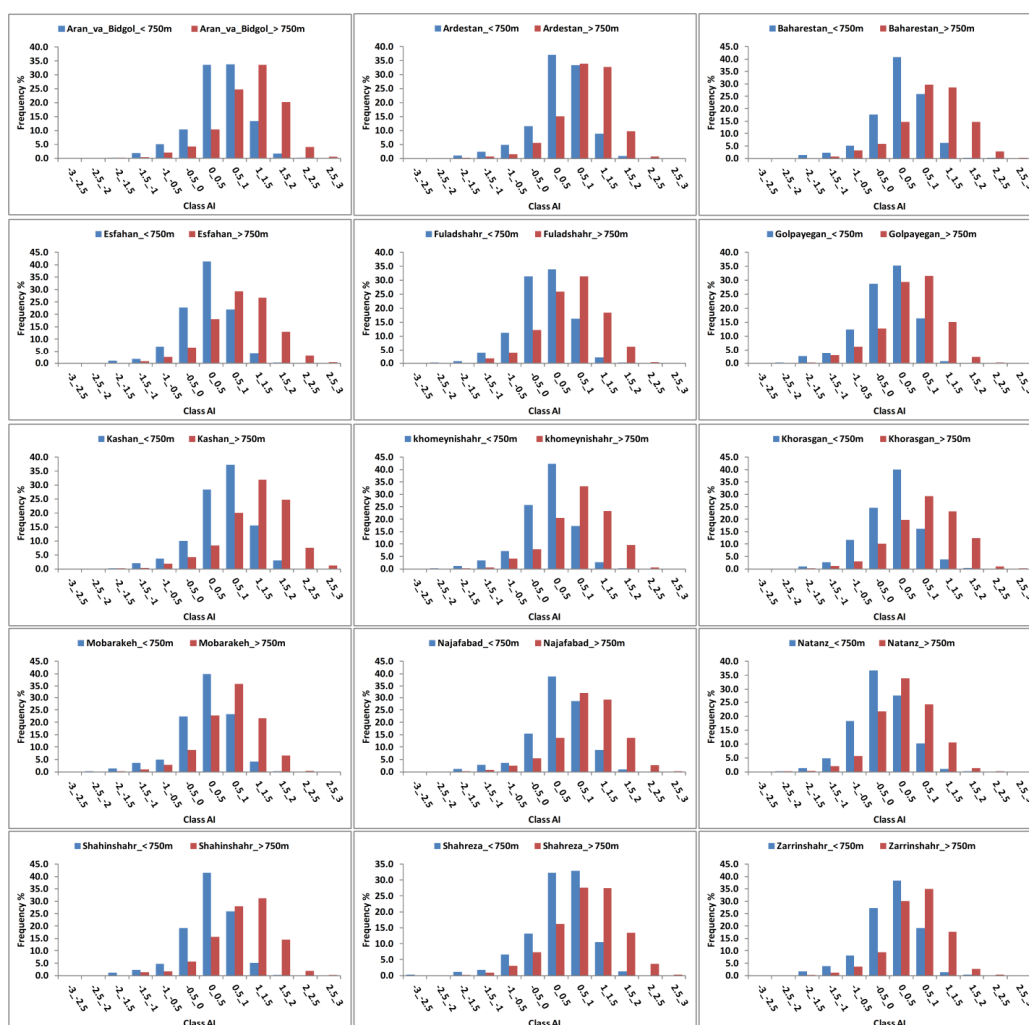
تراکم آئروسل‌ها در موقعیت‌های شهری افزوده می‌شود و این حالت معمولاً در دوره گرم سال همزمان با کاهش شدید رطوبت محیطی بیشتر خود نمایی می‌کند و از طرف دیگر همزمان با افزایش لایه مرزی میزان گنجایش آتمسفری در پذیرش آئروسل نیز افزوده می‌شود. در حالیکه کاهش ارتفاع لایه مرزی

بدین مفهوم که توافق معنی داری در بین دو نمونه فوق دیده نمی‌شود. بنابراین می‌توان اینگونه نتیجه گیری نمود که در دو نمونه بالا و پایین از آستانه ۷۵۰ متری لایه مرزی، توزیع فراوانی وقوع شاخص آئروسل کاملاً متفاوت حادث می‌شوند، بطوریکه همزمان با افزایش ارتفاع لایه مرزی به میزان

بیدگل، اردستان و شهرضا با رتبه ۱ تا ۴ و با نمونه بالای آستانه نیز شهرهای کاشان و آران و بیدگل از نظر رتبه یکسان هستند، در حالیکه اردستان و شهرضا متفاوت دیده می‌شود. در کل شهرهای کاشان، آران و بیدگل، خمینی شهر و نطنز با رتبه یکسان، بهارستان، اصفهان، فولادشهر و زرین شهر با یک رتبه اختلاف، شهرهای خوراسگان، مبارکه، نجف آباد و شهرضا با دو رتبه اختلاف، شاهین شهر با سه رتبه اختلاف و در نهایت اردستان با پنج رتبه اختلاف دیده می‌شود. بر این اساس مشخص می‌گردد از نظر رتبه بندی نیز بین نمونه‌های بالا و پایین آستانه در تعدادی از شهرهای اختلاف دیده می‌شود.

معمولاً در دوره سرد سال اتفاق می‌افتد، به اینگونه که کاهش ارتفاع لایه مرزی ظرفیت پذیرش آئروسولی در محیط‌های شهری را به حداقل خود می‌رساند.

در ادامه با مقایسه شهرهای استان اصفهان، از نظر شدت شاخص آئروسول در بالا و پایین آستانه ۷۵۰ متری ارتفاع لایه مرزی با وزن دهی و رتبه بندی انجام شده، مطابق با جدول شماره ۷ مشخص می‌گردد که از نظر وزنی تمامی شهرها در نمونه بالای آستانه نسبت به نمونه پایین آن بیش از ۱۳ درصد اختلاف وزنی دارند و بیشترین آن در شهر اصفهان با ۲۰ درصد و کمترین نیز در شهر اردستان با ۱۳٫۶ درصد می‌شود. همچنین در نمونه پایین آستانه ۷۵۰ متری شهرهای کاشان، آران و



شکل ۳: مقایسه فراوانی وقوع شاخص آئروسول AI همزمان با ارتفاع لایه مرزی پایین تر و بالاتر از آستانه ۷۵۰ متری.

جدول ۶: آزمون‌های مقایسه‌ای فراوانی وقوع شاخص آتروسول AI همزمان با ارتفاع لایه مرزی پایین تر و بالاتر از آستانه ۷۵۰ متری.

Measure of Agreement		Ordinal by Ordinal		Interval by Interval		Pearson			نام شهرها	ردیف
Sig. (2-sided)	Kappa	Sig. (2-sided)	Spearman Correlation	Sig. (2-sided)	Pearson's R	Sig. (2-sided)	d f	Chi-Square		
NaN	0.000	0.000	0.478	0.000	0.456	0.000	9	49.431 ^a	آران و بیدگل	1
NaN	0.000	0.000	0.413	0.000	0.389	0.000	8	37.396 ^a	اردستان	2
NaN	0.000	0.000	0.363	0.000	0.351	0.000	9	31.384 ^a	بهارستان	3
NaN	0.000	0.000	0.419	0.000	0.408	0.000	9	37.983 ^a	اصفهان	4
NaN	0.000	0.000	0.505	0.000	0.487	0.000	9	55.636 ^a	فولادشهر	5
NaN	0.000	0.000	0.481	0.000	0.455	0.000	9	53.272 ^a	گلپایگان	6
NaN	0.000	0.000	0.418	0.000	0.406	0.000	8	38.022 ^a	کاشان	7
NaN	0.000	0.000	0.372	0.000	0.361	0.000	10	32.573 ^a	خمینی شهر	8
NaN	0.000	0.000	0.499	0.000	0.475	0.000	9	55.886 ^a	خوراسگان	9
NaN	0.000	0.000	0.367	0.000	0.366	0.001	9	27.996 ^a	مبارکه	10
NaN	0.000	0.000	0.448	0.000	0.422	0.000	9	43.933 ^a	نجف آباد	11
NaN	0.000	0.000	0.402	0.000	0.388	0.000	9	35.648 ^a	نطنز	12
NaN	0.000	0.000	0.481	0.000	0.472	0.000	9	50.606 ^a	شاهین شهر	13
NaN	0.000	0.000	0.474	0.000	0.454	0.000	9	50.837 ^a	شهرضا	14
NaN	0.000	0.000	0.488	0.000	0.464	0.000	9	53.038 ^a	زرین شهر	15

اسکوئر به غیر از شهر گلپایگان، در دو نمونه بالا و پایین آستانه ۷۵۰ متری لایه مرزی، تمامی شهرها توزیع شدت فراوانی‌ها همخوان دیده می‌شود، علاوه بر این بر مبنای آماره همبستگی پیرسون و اسپیرمن نیز به غیر از شهر گلپایگان، در سایر شهرها دو نمونه بالا و پایین آستانه ۷۵۰ متری از همبستگی معنی داری برخوردار شدند. در حالیکه بر مبنای آماره ضریب کاپا در شهرهای اردستان، گلپایگان، فولادشهر، اصفهان، نجف آباد و خمینی شهر عدم توافق بین دو نمونه فوق‌الذکر دیده می‌شود، در حالیکه در سایر شهرها بین دو نمونه توافق حاکم شده است. می‌توان اینگونه توجیه نمود که همزمان با کاهش و افزایش ارتفاع لایه مرزی در تعداد بیشتری از شهرهای استان اصفهان، تغییرات دی‌اکسید نیتروژن یکسان عمل می‌کند در حالیکه در تعدادی دیگر از شهرها متفاوت است. بر این اساس با توجه به وزندهی و رتبه بندی فراوانی روزانه شدت دی‌اکسید نیتروژن در دو نمونه بالا و پایین آستانه ۷۵۰ متری لایه مرزی مطابق با جدول شماره ۹ مشخص می‌گردد که وزن نمونه

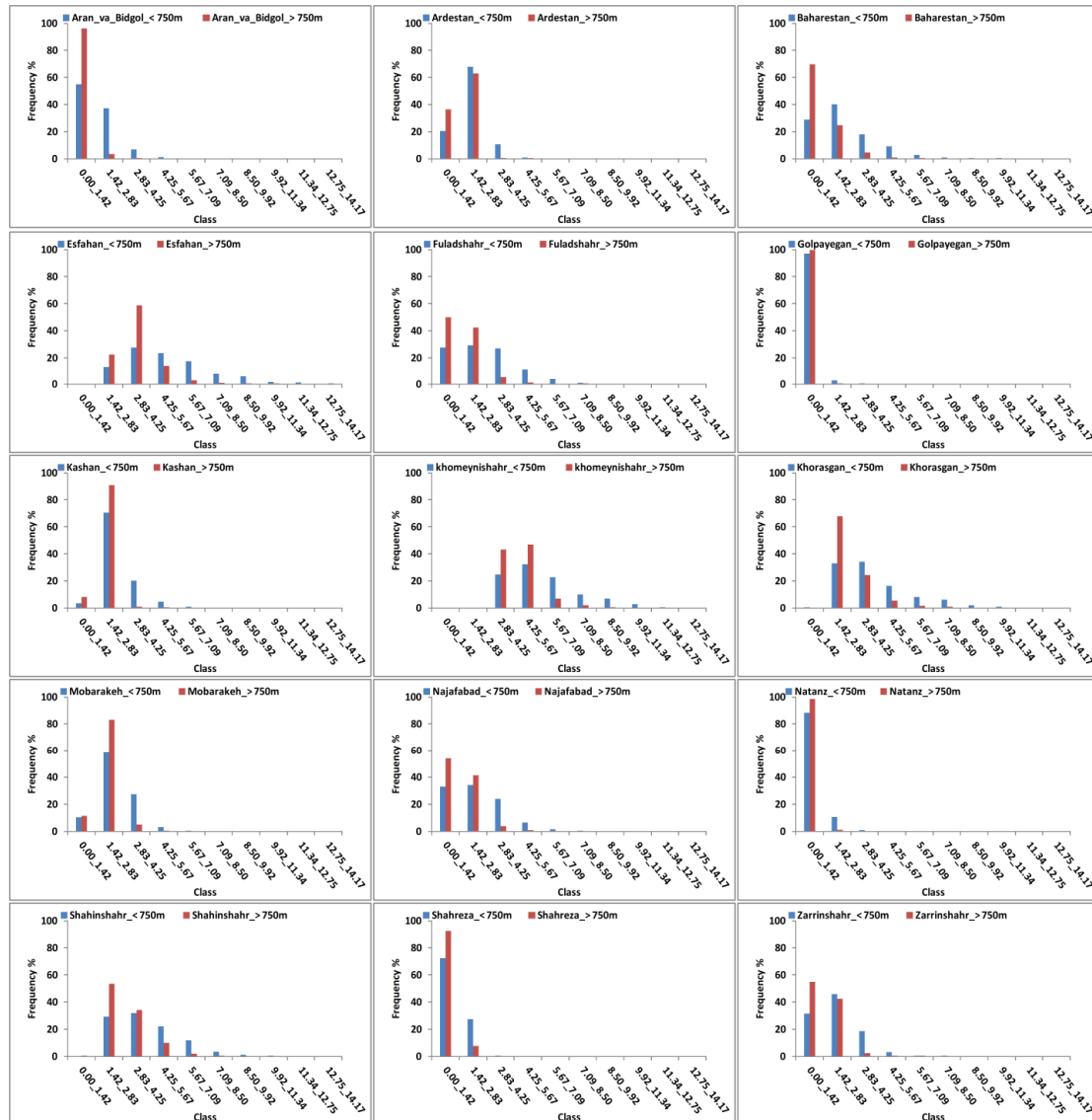
مقایسه‌ای دی‌اکسید نیتروژن NO_2 در بالا و پایین آستانه ۷۵۰ متری ارتفاع لایه مرزی: شکل ۴ حالت مقایسه‌ای دی‌اکسید نیتروژن را در دو نمونه بالا و پایین آستانه ۷۵۰ متری لایه مرزی در موقعیت‌های شهری استان اصفهان را نشان می‌دهد، همانطور که ملاحظه می‌گردد نمودارهای این شکل بر مبنای فراوانی روزانه شدت دی‌اکسید نیتروژن را در ۱۰ طبقه برای پایش چهار ساله ماهواره ای نشان داده شده است. براین اساس فراوانی روزانه شدت دی‌اکسید نیتروژن در شهرهای استان در دو نمونه بالا و پایین آستانه ۷۵۰ متری لایه مرزی، در طبقات مختلفی توزین شده اند. نکته قابل توجهی که در اینجا حایز اهمیت است توزین فراوانی روزانه شدت دی‌اکسید نیتروژن در پایین آستانه ۷۵۰ متری لایه مرزی، در اکثر شهرهای در طبقات بیشتری توزین و از طرف دیگر در بالاتر از آستانه فوق‌بیشترین فراوانی روزانه شدت دی‌اکسید نیتروژن در طبقات پایین و محدودتری متمرکز شدند. همچنین با توجه به جدول شماره ۸ نیز دیده می‌شود بر مبنای آماری کای

آتمسفر با تراکم مولکول‌ها در مجاور سطح زمین و همچنین با کاهش جریانات عمودی بیشتر می‌شوند. اما از نظر رتبه بندی شهرهای مختلف در نمونه بالا و پایین آستانه ۷۵۰ متری لایه مرزی نیز مشخص می‌کند که در شهرهای خمینی شهر، اصفهان، شاهین شهر، خوراسگان، کاشان، نجف آباد، زرین شهر، نطنز و گلپایگان دارای رتبه ی یکسان و در حالیکه از نظر وزن متفاوت هستند، در حالیکه در سایر شهرها اختلاف رتبه دیده می‌شود و بالاترین اختلاف مرتبه مربوط به شهرهای اردستان و بهارستان است.

پایین آستانه ۷۵۰ متری لایه مرزی در تمامی شهرها بیشتر از نمونه بالا آستانه فوق بوده است. به طوری که بالاترین اختلاف وزن در شهرهای اصفهان، بهارستان، خوراسگان، خمینی شهر، فولادشهر، شاهین شهر و نجف آباد بیشتر از ۶ و در حالی که در سایر شهرهای این مقدار کمتر حد عدد فوق می‌باشد. در واقع حتی در شهر گلپایگان و نطنز به کمتر از ۲ نیز می‌رسد. بنابراین می‌توان گفت که با کاهش ارتفاع لایه مرزی تمرکز دی اکسید نیتروژن در هوای مجاور سطح زمین بیشتر می‌شود یا به عبارتی فعالیت‌های فیتوشیمیایی

جدول ۷: وزندهی و رتبه بندی شهرهای استان اصفهان بر مبنای شاخص AI.

AI Rating				نام شهرها
>750m		<750m		
rank	Weight	rank	Weight	
2	71.8	2	61.6	آران و بیدگل
8	68.3	3	60.1	اردستان
5	69.0	6	58.3	بهارستان
7	68.5	8	57.1	اصفهان
12	63.6	13	54.3	فولادشهر
14	61.2	14	53.5	گلپایگان
1	73.7	1	62.7	کاشان
10	66.1	10	55.6	خمینی شهر
9	66.4	11	55.5	خوراسگان
11	65.2	9	56.9	مبارکه
3	69.1	5	59.5	نجف آباد
15	59.1	15	51.6	نطنز
4	69.1	7	58.1	شاهین شهر
6	68.6	4	60.0	شهرضا
13	63.3	12	55.2	زرین شهر



شکل ۴: مقایسه فراوانی وقوع شدت دی اکسید نیتروژن NO2 همزمان با ارتفاع لایه مرزی پایین تر و بالاتر از ۷۵۰ متری.

مقایسه‌ای دی اکسید گوگرد SO₂ در بالا و پایین آستانه ۷۵۰ متری ارتفاع لایه مرزی: شکل ۵
 شدت فراوانی روزانه دی اکسید گوگرد را در طبقات مختلف برای شهرهای استان اصفهان نشان می‌دهد همانگونه که ملاحظه می‌گردد در هر دو نمونه بالا و پایین آستانه ۷۵۰ متری لایه مرزی بیشترین فراوانی در طبقه ۴/۸_۳/۴- ملاحظه می‌شود. با این تفاوت که بیشترین شدت در این طبقه در نمونه بالای آستانه ۷۵۰ متری و در حالی که در نمونه پایین آستانه فوق شدت فراوانی روزانه در طبقات با درجات بالاتری توزیع شدند یا به عبارت دیگر می‌توان گفت که نمونه

پایین آستانه شدت فراوانی روزانه دی اکسید گوگرد را در طبقات بیشتری توزین کرده است، در حالی که در نمونه بالای آستانه بیشترین شدت فراوانی روزانه دی اکسید گوگرد در طبقات محدودتری متمرکز شدند. در کل می‌توان گفت که همزمان با بالا رفتن لایه مرزی تراکم دی اکسید گوگرد کاسته می‌شود، در حالی که با کاهش ارتفاع لایه مرزی تمرکز گاز مورد نظر افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که تمرکز ملکولی آتمسفر در حالت پایدار آتمسفری با حضور فعالیت‌های انسانی فرایندهای فیتوشیمیایی جو را بیشتر می‌کند که یکی از پیامدهای آن بالا رفتن

هرچند که آماره‌های کای اسکوتر، همبستگی پیرسون و اسپیرمن نمی‌توانند وجود این تفاوت را با توجه به همخوانی و همبستگی بالا نشان دهند.

تمرکز دی اکسید گوگرد است. با توجه به جدول شماره ۱۰ مشخص می‌کند که بر مبنای آماره ضریب کاپا عدم توافق توزیع شدت فراوانی روزانه دی اکسید گوگرد در بالا و پایین آستانه کاملا آشکار می‌شود

جدول ۸: آزمون‌های مقایسه‌ای فراوانی وقوع دی اکسید نیتروژن NO₂ همزمان با ارتفاع لایه مرزی پایین تر و بالاتر از ۷۵۰ متری.

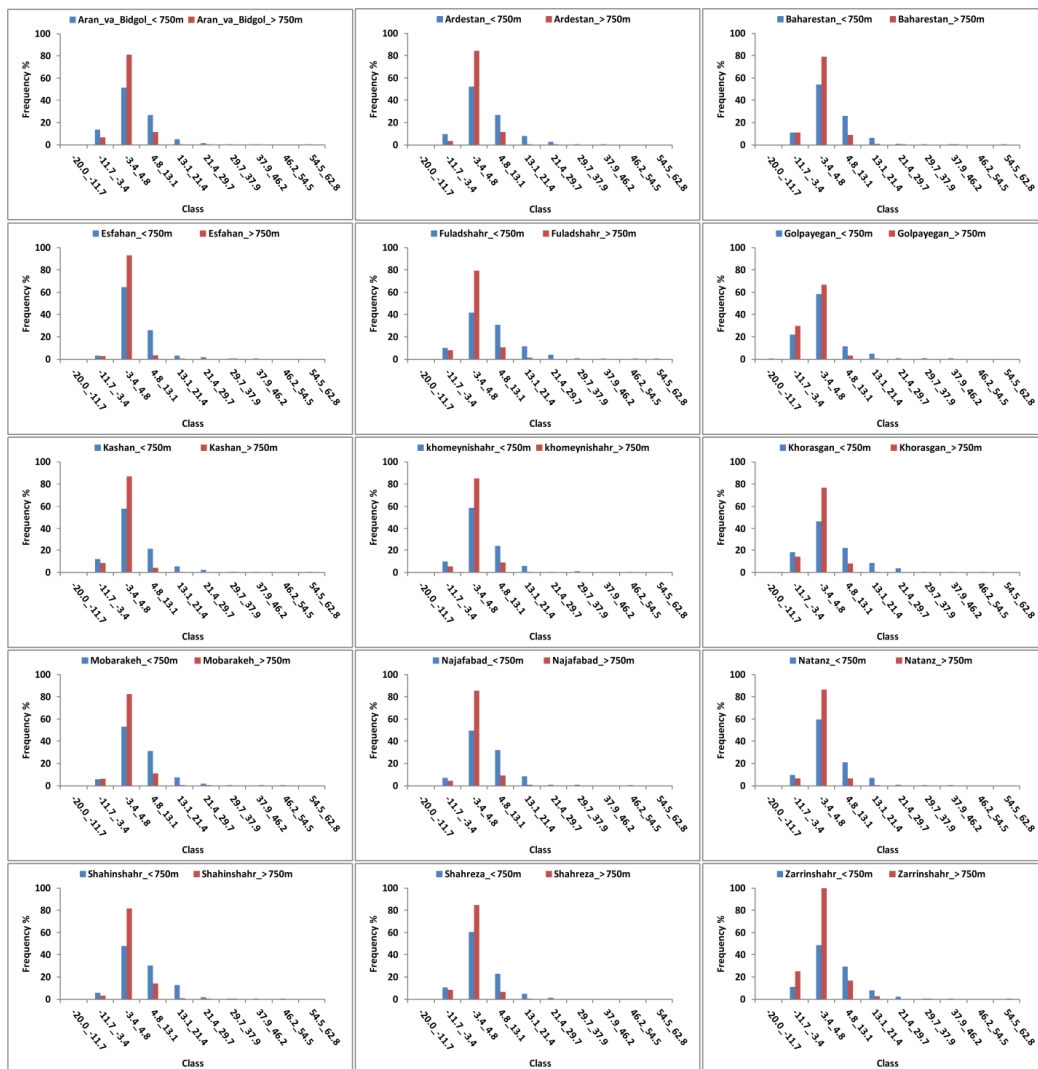
Measure of Agreement		Ordinal by Ordinal		Interval by Interval		Pearson			نام شهرها	رتبه
Sig. (2-sided)	Kappa	Sig. (2-sided)	Spearman Correlation	Sig. (2-sided)	Pearson's R	Sig. (2-sided)	df	Chi-Square		
0.000	-0.356	.000 ^c	-0.478	.000 ^c	-0.452	0.000	3	45.693 ^a	آران و بیدگل	1
0.122	-0.092	.001 ^c	-0.228	.001 ^c	-0.240	0.004	3	13.467 ^a	اردستان	2
0.081	-0.030	.082 ^c	-0.123	.082 ^c	-0.123	0.218	2	3.046 ^a	بهارستان	3
0.513	-0.032	.000 ^c	-0.360	.000 ^c	-0.385	0.000	5	35.624 ^a	اصفهان	4
0.100	0.025	.000 ^c	-0.389	.000 ^c	-0.403	0.000	8	39.232 ^a	فولادشهر	5
0.000	-0.234	.000 ^c	-0.434	.000 ^c	-0.417	0.000	7	38.185 ^a	گلپایگان	6
0.041	-0.121	.000 ^c	-0.308	.000 ^c	-0.329	0.000	5	23.556 ^a	کاشان	7
0.000	-0.200	.000 ^c	-0.260	.000 ^c	-0.260	0.001	2	13.550 ^a	خمینی شهر	8
0.001	0.075	.000 ^c	-0.313	.000 ^c	-0.321	0.003	7	21.528 ^a	خوراسگان	9
0.002	-0.104	.001 ^c	-0.223	.002 ^c	-0.219	0.007	2	9.980 ^a	مبارکه	10
0.270	-0.059	.000 ^c	-0.308	.000 ^c	-0.332	0.000	5	26.508 ^a	نجف آباد	11
0.022	0.093	.000 ^c	-0.271	.000 ^c	-0.271	0.000	4	23.268 ^a	نطنز	12
0.000	0.115	.000 ^c	-0.374	.000 ^c	-0.358	0.000	7	28.565 ^a	شاهین شهر	13
NaN	0.000	.000 ^c	-0.334	.000 ^c	-0.353	0.000	6	29.975 ^a	شهرضا	14
0.034	0.073	.000 ^c	-0.337	.000 ^c	-0.328	0.000	4	26.989 ^a	زرین شهر	15

جدول ۹: وزن دهی و رتبه‌بندی شهرهای استان اصفهان بر مبنای دی اکسید نیتروژن NO₂.

NO ₂ Rating				نام شهرها
>750m		<750m		
rank	Weight	rank	Weight	
13	10.4	12	15.4	آران و بیدگل
7	16.5	11	19.2	اردستان
11	13.7	8	22.2	بهارستان
2	30.4	2	41.1	اصفهان
8	15.9	5	23.7	فولادشهر
15	10.0	15	10.3	گلپایگان
6	19.4	6	22.9	کاشان
1	36.9	1	45.1	خمینی شهر
4	24.3	4	32.7	خوراسگان
5	19.4	7	22.5	مبارکه
9	15.1	9	21.1	نجف آباد
14	10.1	14	11.2	نطنز
3	26.2	3	33.3	شاهین شهر
12	10.8	13	12.8	شهرضا
10	14.8	10	19.6	زرین شهر

افزاده است به طوری که با ارزیابی اختلاف نمونه بالا و پایین آستانه مشخص می گردد که بیشترین اختلاف در دو نمونه مربوط به فولادشهر و کمترین آن نیز به آران و بیدگل اختصاص دارد. در کل رتبه بندی شهرهای مختلف و مقایسه بین نمونه های بالا و پایین آستانه نشان می دهد که شهرهای نجف آباد، مبارکه، بهارستان، نطنز، گلپایگان و کاشان دارای رتبه های یکسان و در شهرهای شاهین شهر و اصفهان با رتبه اختلاف، در حالی که تعدادی از شهرها از جمله فولاد شهر، زرین شهر، اردستان، آران و بیدگل و خمینی شهر به بیش از چهار رتبه به نیز می رسد.

در نهایت با توجه به جدول ۱۱ وزن ها و رتبه های هر کدام از شهرهای استان اصفهان در دو نمونه بالا و پایین آستانه ۷۵۰ متری لایه مرزی حاکی از آن است که در نمونه پایین آستانه از ۷۵۰ متری بالاترین وزن مربوط به فولادشهر و پایین ترین آن به شهرضا اختصاص دارد. در حالی که در نمونه بالای آستانه فوق الذکر بالاترین وزن مربوط به شاهین شهر و پایین ترین نیز به خوراسگان تعلق پیدا کرده است. اختلاف وزن ها در نمونه بالا و پایین آستانه نیز نشان می دهد که بیشترین وزن شدت فراوانی تراکم دی اکسید گوگرد در نمونه پایین ۷۵۰ متری لایه مرزی اتفاق



شکل ۵: مقایسه فراوانی وقوع دی اکسید گوگرد SO₂ همزمان در بالا و پایین آستانه ۷۵۰ متری ارتفاع لایه مرزی.

جدول ۱۰: آزمون‌های مقایسه ای فراوانی وقوع دی اکسید گوگرد SO₂ همزمان با ارتفاع لایه مرزی پایین تر و بالاتر از ۷۵۰ متری.

Measure of Agreement		Ordinal by Ordinal		Interval by Interval		Pearson			نام شهرها	رتبه
Sig. (2-sided)	Kappa	Sig. (2-sided)	Spearman Correlation	Sig. (2-sided)	Pearson's R	Sig. (2-sided)	d f	Chi-Square		
0.106	-0.018	.018 ^c	-0.167	.006 ^c	-0.192	0.002	7	22.921 ^a	آران و بیدگل	1
0.100	-0.015	.001 ^c	-0.229	.000 ^c	-0.248	0.000	6	27.833 ^a	اردستان	2
0.197	0.023	.004 ^c	-0.201	.001 ^c	-0.237	0.033	7	15.279 ^a	بهارستان	3
0.621	-0.005	.000 ^c	-0.327	.000 ^c	-0.329	0.000	8	35.915 ^a	اصفهان	4
1.000	0.000	.000 ^c	-0.334	.000 ^c	-0.312	0.000	6	27.095 ^a	فولادشهر	5
0.980	0.000	.001 ^c	-0.229	.001 ^c	-0.226	0.010	7	18.523 ^a	گلپایگان	6
0.977	0.000	.000 ^c	-0.281	.000 ^c	-0.300	0.000	7	47.777 ^a	کاشان	7
0.484	-0.008	.005 ^c	-0.196	.003 ^c	-0.211	0.001	4	18.948 ^a	خمینی شهر	8
0.299	-0.008	.000 ^c	-0.296	.000 ^c	-0.303	0.000	7	27.992 ^a	خوراسگان	9
0.447	-0.008	.002 ^c	-0.222	.001 ^c	-0.241	0.001	6	22.489 ^a	مبارکه	10
0.361	-0.008	.000 ^c	-0.311	.000 ^c	-0.302	0.000	6	31.190 ^a	نجف آباد	11
0.986	0.000	.000 ^c	-0.308	.000 ^c	-0.311	0.001	7	25.749 ^a	نطنز	12
0.459	-0.010	.004 ^c	-0.203	.000 ^c	-0.244	0.001	7	25.732 ^a	شاهین شهر	13
0.297	-0.010	.006 ^c	-0.194	.003 ^c	-0.209	0.003	6	19.513 ^a	شهرضا	14
0.346	-0.011	.002 ^c	-0.219	.001 ^c	-0.240	0.000	7	26.160 ^a	زرین شهر	15

جدول ۱۱: وزن‌دهی و رتبه‌بندی شهرهای استان اصفهان بر مبنای دی اکسید گوگرد SO₂.

SO ₂ Rating				
>750m		<750m		نام شهرها
rank	Weight	rank	Weight	
5	30.6	11	33.4	آران و بیدگل
2	30.9	6	34.3	اردستان
9	30.1	9	33.7	بهارستان
8	30.1	7	33.9	اصفهان
6	30.6	1	36.5	فولادشهر
15	27.4	15	31.0	گلپایگان
13	29.8	13	33.3	کاشان
7	30.4	12	33.3	خمینی شهر
14	29.6	8	33.8	خوراسگان
4	30.7	4	34.8	مبارکه
3	30.7	3	35.0	نجف آباد
10	30.0	10	33.5	نطنز
1	31.4	2	36.1	شاهین شهر
12	29.9	14	32.6	شهرضا
11	30.0	5	34.4	زرین شهر

نتیجه گیری و بحث

یکی از مباحث بسیار مهم در اقلیم شهری لایه مرزی آتمسفری است که پیچیده ترین بخش مقیاس میکروکلیمای شهری را به خود اختصاص داده است. بنابراین هدف از این تحقیق آشکار نمودن نقش لایه مرزی آتمسفری در محدوده‌های شهری استان اصفهان به عنوان یک عامل کنترل کننده متغیرهای آلودگی است. با توجه به اینکه در این مطالعه فراوانی وقوع سه متغیر آلوده کننده شامل دی اکسید نیتروژن (NO_2)، دی اکسید گوگرد (SO_2)، شاخص آبروسل (AI) در ارتباط با ارتفاع لایه مرزی آتمسفری مورد ارزیابی قرار گرفت. بطور کلی نتایج حاکی از آن است که شاخص آبروسل (AI) در بالای آستانه ۷۵۰ متری لایه مرزی آتمسفری بیشترین تجمع را بر روی موقعیت‌های شهری استان اصفهان نشان می‌دهند و از آنجایی که ارتفاعات بالای لایه مرزی در دوره گرم سال اتفاق می‌افتد، بنابراین بیشترین فراوانی وقوع در همین دوره خواهد بود در حالی که با کم شدن ارتفاع لایه مرزی یا به عبارت دیگر در پایین تر از آستانه ۷۵۰ متری، از میزان این شاخص شدت کاهش می‌یابد یعنی اینکه لایه مرزی گنجایش کمتری نسبت به آبروسل از خود نشان می‌دهد. البته لازم به ذکر است ارزیابی آماری با ضریب کاپا عدم تطابق درونی فراوانی آبروسل را در بالا و پایین آستانه ۷۵۰ متری لایه مرزی نشان می‌دهد. وزن دهی انجام شده نیز در این دو طبقه نیز، تفاوت وزن‌ها را کاملاً آشکار می‌کند. رتبه بندی انجام شده بین شهرهای مختلف حاکی از آن است که شهرهای کاشان، آران و بیدگل، خمینی شهر و نطنز بالاترین رتبه شاخص آبروسل (AI) در هر دو طبقه به خود اختصاص دادند. این نتایج با یافته‌های Angevine و همکاران (۲۰۰۳)، Bossioli و همکارانش (۲۰۰۹)، Quan و همکارانش (۲۰۱۳)، خوش سیمما و همکاران (۲۰۱۵)، Liu و همکاران (۲۰۱۸)، Miao و همکارانش (۲۰۱۹)، Li و همکاران (۲۰۱۹) و Miao و همکاران (۲۰۲۱) و Wang و همکاران (۲۰۲۱) همخوانی دارد.

در حالی که این نسبت به گازهای دی اکسید نیتروژن (NO_2) و دی اکسید گوگرد (SO_2) کاملاً متفاوت عمل می‌کند یعنی اینکه کاهش ارتفاع لایه مرزی آتمسفری بخصوص در دوره سرد فراوانی وقوع آنها را بیشتر نشان می‌دهد در حالیکه که در دوره گرم سال با بالا رفتن ارتفاع لایه مرزی از میزان تراکم آنها کاسته می‌شود. به عبارتی می‌توان اینگونه توجیه نمود که فرایندهای فیتوشیمیایی آتمسفر با کاهش ارتفاع لایه مرزی در بخش محدودی از آتمسفر بیشتر متراکم می‌شود یعنی اینکه در واحد زمانی کوتاهی فرایندهای فیتوشیمیایی سبب شکل گیری این گازها می‌شود هرچند که منابع اصلی (چه به صورت فعالیت‌های انسانی یا طبیعی) در طی سال از چرخه زمانی خاصی برخوردار نیست. اما با بالا رفتن ارتفاع لایه مرزی فرایندهای هواشناختی در ضخامت بیشتری اتفاق می‌افتد و در نتیجه فرصت زمانی برای فرایندهای فیتوشیمیایی آتمسفر زیاد می‌گردد. در کل دی اکسید نیتروژن (NO_2) بر مبنای آماره ضریب کاپا در شهرهای اردستان، گلپایگان، فولادشهر، اصفهان، نجف آباد و خمینی شهر عدم توافق بین دو نمونه فوق الذکر دیده می‌شود، در حالیکه در سایر شهرها بین دو نمونه توافق حاکم شده است. بر این مبنای مشخص می‌گردد شدت فراوانی این گاز در تراز بالا و پایین آستانه ۷۵۰ متری لایه مرزی متفاوت عمل می‌کند. اما از بعد وزندهی انجام شده، پایین آستانه ۷۵۰ متری لایه مرزی در تمامی شهرها بیشتر از نمونه بالا آستانه فوق بوده است. اما از نظر رتبه بندی شهرهای مختلف در نمونه بالا و پایین آستانه ۷۵۰ متری لایه مرزی نیز مشخص می‌کند که در شهرهای خمینی شهر، اصفهان، شاهین شهر، خوراسگان، کاشان، نجف آباد، زرین شهر، نطنز و گلپایگان دارای رتبه ی یکسان و در حالیکه از نظر وزن متفاوت هستند. این نتایج نیز با یافته‌های Miao و همکاران (2022)، باقر آبادی (۲۰۲۲) و Moreira Arruda و همکارانش (۲۰۲۰) همخوانی را نشان می‌دهد.

منابع

1. Arruda Moreira, G., Guerrero Rascado, J.L., Bravo Aranda, J.A., Foyo Moreno, I., Cazorla, A., Alados-Arboledas, I., ... and Alados Arboledas, L. (2020). Study of the planetary boundary layer height in an urban environment using a combination of microwave radiometer and ceilometer.
2. Angevine, W. M., White, A.B., Senff, C.J., Trainer, M., Banta, R.M., and Ayoub, M.A. (2003). Urban-rural contrasts in mixing height and cloudiness over Nashville in 1999. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D3).
3. Baghrabadi (2022). Investigating the trend of tropospheric NO₂ changes in Kermanshah using the OMI sensor and its relationship with meteorological parameters. *Environmental Research and Technology*, 9(9).
4. Bahrami Asl, Farshad, Molimmoudi, Mohammad, and Selahshor Arin. (2017). Estimation of the number of diseases and deaths attributed to SO₂ and NO₂ pollutants using the AirQ model in Hamadan city. *Avicenna Journal of Clinical Medicine*, 23(4), 314-322
5. Barlow, J.F. (2014). Progress in observing and modelling the urban boundary layer. *Urban Climate*, 10, 216-240.
6. Barlow, J.F., Halios, C.H., Lane, S.E., and Wood, C.R. (2015). Observations of urban boundary layer structure during a strong urban heat island event. *Environmental Fluid Mechanics*, 15(2), 373-398.
7. Bossioli, E., Tombrou, M., Dandou, A., Athanopoulou, E., and Varotsos, K.V. (2009). The role of planetary boundary-layer parameterizations in the air quality of an urban area with complex topography. *Boundary - layer meteorology*, 131(1), 53-72.
8. Chen, L., Zhang, M., Zhu, J., Wang, Y., and Skorokhod, A. (2018). Modeling impacts of urbanization and urban heat island mitigation on boundary layer meteorology and air quality in Beijing under different weather conditions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(8), 4323-4344.
9. Cooper, D.I., and Eichinger, W.E. (1994). Structure of the atmosphere in an urban planetary boundary layer from lidar and radiosonde observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D11), 22937-22948.
10. Du, C., Liu, S., Yu, X., Li, X., Chen, C., Peng, Y., ... and Wang, F. (2013). Urban boundary layer height characteristics and relationship with particulate matter mass concentrations in Xi'an, central China. *Aerosol and Air Quality Research*, 13(5), 1598-1607.
11. Grossman-Clarke, S., Liu, Y., Zehnder, J.A., and Fast, J.D. (2008). Simulations of the urban planetary boundary layer in an arid metropolitan area. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(3), 752-768.
12. Guimarães, P., Ye, J., Batista, C., Barbosa, R., Ribeiro, I., Medeiros, A., and T. Martin, S. (2020). Vertical profiles of atmospheric species concentrations and nighttime boundary layer structure in the dry season over an urban environment in central Amazon collected by an unmanned aerial vehicle. *Atmosphere*, 11(12), 1371.
13. Kamasi Fatemeh, Ali Akbari Bidakhti, Abbas Ali, and Thabet Kadam Samaneh. (2016). Spatial Distribution of The Atmospheric Mixed-layer depth over Tehran Using Numerical Simulations. *Journal of Earth and Space Physics*. Volume 43, Number 3. Pages 553-568.
14. Khosh Sima, Massoud, Thabit Kadam, Ahmadi Givi, Farhang, & Ali Akbari Bidakhti. (2015). The role of atmospheric boundary Layer Height on Remote Sensing Indices: Relationship between PM10 Concentration and Aerosol Optical Depth. *Climatology Research*, 2014(21), 8-1
15. Li, X., Hu, X. M., Ma, Y., Wang, Y., Li, L., and Zhao, Z. (2019). Impact of planetary boundary layer structure on the formation and evolution of air-pollution episodes in Shenyang,

- Northeast China. *Atmospheric Environment*, 214, 116850.
16. Lin, C.Y., Chen, F., Huang, J.C., Chen, W.C., Liou, Y.A., Chen, W.N., and Liu, S.C. (2008). Urban heat island effect and its impact on boundary layer development and land-sea circulation over northern Taiwan. *Atmospheric Environment*, 42(22), 5635-5649.
 17. Liu, Q., Jia, X., Quan, J., Li, J., Li, X., Wu, Y., ... and Liu, Y. (2018). New positive feedback mechanism between boundary layer meteorology and secondary aerosol formation during severe haze events. *Scientific reports*, 8(1), 1-8.
 18. Luan, T., Guo, X., Guo, L., and Zhang, T. (2018). Quantifying the relationship between PM 2.5 concentration, visibility and planetary boundary layer height for long-lasting haze and fog-haze mixed events in Beijing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(1), 203-225.
 19. Mehdian Mahfrozi, Shamsipour, Ahmadabad Karimi, Zavarreza, & Peyman. (2020). Annual changes in the height of the boundary layer of Tehran city. *Natural Geography Research*, 52(1), 37-50.
 20. Miao, Y., Che, H., Liu, S., & Zhang, X. (2022). Heat stress in Beijing and its relationship with boundary layer structure and air pollution. *Atmospheric Environment*, 119159.
 21. Miao, Y., Che, H., Zhang, X., and Liu, S. (2021). Relationship between summertime concurring PM2. 5 and O3 pollution and boundary layer height differs between Beijing and Shanghai, China. *Environmental Pollution*, 268, 115775.
 22. Miao, Y., Li, J., Miao, S., Che, H., Wang, Y., Zhang, X., ... and Liu, S. (2019). Interaction between planetary boundary layer and PM2. 5 pollution in megacities in China: a review. *Current Pollution Reports*, 5(4), 261-271.
 23. Mir Alizadeh Fard, Khorram Nejadian, and Rashidi. (2021). Investigating the relationship between daily and monthly concentrations of urban air pollutants with the mixing depth in Poonak station by Using AERMOD model. *Environmental Science Studies*, 6(2), 3587-3595
 24. Oke, T.R. (2002). *Boundary layer climates*. Routledge. P 272
 25. Pan, L., Xu, J., Tie, X., Mao, X., Gao, W., and Chang, L. (2019). Long-term measurements of planetary boundary layer height and interactions with PM2. 5 in Shanghai, China. *Atmospheric Pollution Research*, 10(3), 989-996.
 26. Quan, J., Gao, Y., Zhang, Q., Tie, X., Cao, J., Han, S., ... and Zhao, D. (2013). Evolution of planetary boundary layer under different weather conditions, and its impact on aerosol concentrations. *Particuology*, 11(1), 34-40.
 27. Sarizadeh, Jafarzadeh, Nemat Elah, Moatar, Mohammadi Rozbahani, & Tahmasabi. (2021). Correlation measurement of changes in urban air pollution with the death rate of cardiovascular and respiratory patients "A case study of Ahvaz city between 2017 and 2018". *Jundishapour Scientific Journal of Medicine*, 19(6), 501-514.
 28. Song, J., and Wang, Z. H. (2016). Diurnal changes in urban boundary layer environment induced by urban greening. *Environmental Research Letters*, 11(11), 114018.
 29. Song, J., Wang, Z.H., and Wang, C. (2018). The regional impact of urban heat mitigation strategies on planetary boundary layer dynamics over a semiarid city. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(12), 6410-6422.
 30. Sun, Z., Han, L., Ding, A., Liu, H., & Zhao, X. (2022). The health impacts of aerosol-planetary boundary layer interactions on respiratory and circulatory mortality. *Atmospheric Environment*, 276, 119050.
 31. Tausi, Kefayat Molatl, and Omidreza. (1400). Analysis of the trend of the inversion conditions of the air boundary layer in the cities of mountainous regions and its relationship with the Enso phenomenon (case study: Shiraz). *Quarterly Journal of Geographical Studies of Mountainous Regions*, 1-17
 32. Wang, M., Tang, G., Liu, Y., Ma, M., Yu, M., Hu, B., ... and Wang, Y. (2021).

- The difference in the boundary layer height between urban and suburban areas in Beijing and its implications for air pollution. *Atmospheric Environment*, 260, 118552.
33. Yarahamdi Dariush, Halimi Mansour, & Zarei Chaghabaki Zahra. (2015). Investigating the monthly changes of the boundary layer height in the conditions of critical inversions (case study: Mehrabad station, Tehran).
34. Yarahamdi, Zarei - Chaghabaki, & Halimi. (2018). Revealing the impact of urban use on the annual temporal-spatial variability of the height of the studied boundary layer: Kermanshah city. *Spatial analysis of environmental hazards*, 19(5), 53-66.
35. Yu, M., Liu, Y., Dai, Y., and Yang, A. (2013). Impact of urbanization on boundary layer structure in Beijing. *Climatic Change*, 120(1), 123-136.
36. Zhu, X., Ni, G., Cong, Z., Sun, T., & Li, D. (2016). Impacts of surface heterogeneity on dry planetary boundary layers in an urban-rural setting. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(20), 12-164.
37. Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., ... and Goldberg, M. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8), 1015-1058.