

ارزیابی تغییرات ارتفاع لایه مرزی و تاثیر آن بر کیفیت هوا در شهر اراک

بهرام شاه منصوری^{۱*}، عبدالله فرجی^۲، محسن احدنژاد^۳

۱- دکتری آب و هواشناسی شهری

۲- استادیار اقلیم‌شناسی دانشگاه زنجان

۳- دانشیار برنامه ریزی شهری دانشگاه زنجان

چکیده

یکی از مشکلات شهرهای پرجمعیت آلودگی هوا است. آلودگی هوا در قسمت زیرین و در سطح زمین یعنی لایه مرزی رخ می‌دهد. در این پژوهش تغییرات ارتفاع لایه مرزی شهر اراک در ساعات‌های مختلف شبانه روز با استفاده از آزمون آماری من-کندال و با به کارگیری رگرسیون خطی و غیرخطی بررسی گردید. یافته‌ها نشان داد که ارتفاع لایه مرزی شهر اراک در دوره آماری ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۸ در تمام فصل‌ها بجز فصل پائیز، روندی افزایشی داشته است. میانگین ارتفاع لایه مرزی تمام فصل‌ها در شب هنگام ۸۶ متر و در نیمی از روزهای پائیز و زمستان ۴۲۲ متر است که مستعد برای آلوده شدن است. به منظور بررسی کیفیت هوای شهر، شاخص کیفیت هوا (AQI) برای پنج آلاینده اصلی هوا محاسبه گردید و آلاینده اصلی، در بیشتر روزها، ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون شناخته شد. به منظور بررسی تاثیر تغییرات ارتفاع لایه مرزی در کیفیت هوا، بین داده‌های ارتفاع لایه مرزی و داده‌های پنج آلاینده اصلی هوا در ایستگاه‌های شهر در سال ۲۰۱۶ ضریب همبستگی پیرسون محاسبه شد. نتایج نشان داد که همبستگی ارتفاع لایه مرزی با منواکسید کربن و دی اکسید گوگرد منفی و با ازن و ذرات معلق ۲/۵ و ۱۰ میکرون مثبت است.

کلید واژه‌ها: ارتفاع لایه مرزی، کیفیت هوا، رگرسیون خطی و غیر خطی، شهر اراک.

مقدمه

لایه مرزی به عنوان لایه‌ای از سیال تعریف می‌شود که بلافاصله در مجاورت یک سطح جامد قرار دارد و تبادل معنی‌دار تکانه، گرما، یا جرم بین سطح و سیال رخ می‌دهد. ارتفاع لایه مرزی بصورت گسترده تغییر می‌کند و به مقدار گرمایش یا سرمایش سطح زمین، قدرت بادهای، و خصوصیات توپوگرافی سطح، حرکت عمودی بزرگ مقیاس، فرارفت اقلیمی گرما و رطوبت و عوامل دیگر بستگی دارد. (فلاح قاهری، ۱۳۹۳). لایه مرزی شهری بخشی از لایه مرزی سیاره‌ای را تشکیل می‌دهد که بر فراز لایه سرپوش شهر قرار دارد و اقلیم آن به وسیله بافت شهر در سطح زمین تعیین می‌شود (کاویانی، ۱۳۸۱). ارتفاع و ضخامت لایه مرزی در طی ساعات مختلف شبانه روز تغییر می‌کند و در طی روزهای مختلف سال نیز دچار تغییرات می‌شود. تغییرات روزانه‌ی دما، رطوبت، باد، آلودگی‌ها، تلاطم و ارتفاع لایه مرزی به سبب گرمایش روزانه و سرمایش شبانه‌ی سطح زمین رخ می‌دهد و همیشه یک لایه بسیار پایدار با یک وارونگی دمایی نقش درپوش لایه مرزی را بازی می‌کند (Roland Stul, 2012). مشاهدات دمای سطح خشکی‌ها و گستره‌های آبی جهان، گرمایش جهانی و نیز رخداد پدیده تغییر اقلیم طی دو سده اخیر را تأیید کرده‌است (IPCC, 2007). پدیده‌های گرمایش جهانی و نیز تغییر اقلیم از یک سو و مصرف زیاد انرژی در شهرهای بزرگ و پر جمعیت از سوی دیگر، آلودگی هوای شهری، ایجاد جزیره گرمایی، افزایش دما و تغییرات لایه مرزی را به دنبال دارد به گونه‌ای که تا سال ۲۰۱۲ دمای شهرهای پرجمعیت ۰/۹ درجه سلسیوس افزایش داشته است (IPCC, 2014). طبق گزارش سال ۲۰۱۴ هیات بین‌الدولی تغییر اقلیم روند دمایی مناطق شهری ایران از ۰/۶ تا ۱/۷۵ درجه سلسیوس تا سال ۲۰۱۲ افزایش یافته است (همانجا، ۵۵۲). طبق بررسی (عساکره و شاه‌منصوری، ۱۳۹۵) دمای شهر اراک در همه فصل‌ها بجز فصل پائیز از سال ۱۹۹۱ تا سال ۲۰۱۰ روندی افزایشی داشته است. افزایش دما تاثیر در لایه مرزی را به همراه دارد. شناخت کیفیت هوا به شکل مستقل و نیز در ارتباط با تغییرات لایه مرزی مورد توجه تعدادی از

پژوهشگران ایران و جهان بوده است. در زیر بخشی از این پژوهش‌ها عرضه می‌شود.

ساندرو فیناردی و پلگینی (Sandro Finardi & Umberto Pellegini, 2002)، شرایط هم‌دمایی حاکم بر یک مورد آلودگی بسیار شدید هوای شهری را در دره پو ایتالیا بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که فرا رفت هوای گرم بر روی لایه‌های سرد نزدیک سطح زمین منجر به ایجاد ساختار دمایی پایدار در اتمسفر پایین می‌گردد. ککویلو و اندارد (Ccoyllo & Andrade, 2002) به این نتیجه رسیدند که غلظت آلاینده‌ها در درون سامانه‌های هم‌دمید پرفشار افزایش می‌یابد. هارلی (Hurley, 2007) با بهره‌گیری از روش EDMF، لایه مرزی همرفت خشک را در بعد از ظهر یک روز تابستانی شبیه‌سازی کرد، نتایج حاصل از مقایسه این مدل با آزمایشگاه و مشاهدات در چارچوب مقیاس لایه آمیخته نشان داد که روش EDMF می‌تواند زمینه‌های آشفتنگی در سطوح بالای لایه مرزی را به خوبی نشان دهد. براساس تحقیقات واردولاکیس و کاسومنوس (Vardoulakis & Kassomenos, 2008) که در شهرهای آتن و بیرمنگام انجام گرفت، مشخص شد که در طی فصل سرد سال همبستگی مثبتی بین آلاینده PM_{10} و آلاینده‌های CO وجود دارد. جنسن (Jensen, 2008) مشخص نمود که ارتفاع لایه مرزی یکی از مهم‌ترین مولفه‌های تعیین کننده وسعت آمیزش آلاینده‌ها می‌باشد. پال و همکاران (Pal & et al, 2013) با توجه به توده‌های گرد و غبار و با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی عمق لایه مرزی را تعیین نمودند. هامان و همکاران (Haman & et al, 2014) رابطه بین ارتفاع لایه مرزی و مقدار ازن در هودسن را بررسی نمودند و مشخص شد که هیچ رابطه معنی‌داری بین ارتفاع لایه مرزی و افزایش و یا کاهش مقدار ازن وجود ندارد. پال و همکاران (Pal & et al, 2015) تغییرات ارتفاع لایه مرزی را در یکی از روستاهای فرانسه بررسی نمودند و اثرات آن را در غلظت گاز رادون با ایزوتوپ 222 مشخص کردند و به این نتیجه رسیدند که تعداد گازهای رادون در زمستان که ارتفاع لایه مرزی کم است بیشتر از فصل بهار با ضخامت متوسط است و نیز تعداد گازهای رادون در فصل بهار بیشتر از تابستان می‌باشد. توماس و همکاران (Tomas, 2015) تاثیر موانع در حرکت و پراکندگی آلاینده‌ها را در لایه‌های

مهم‌ترین ویژگی آنها، ضخامت زیاد و خیز آهنگ کم دمای پتانسیل است. نصیری و همکاران (۱۳۹۵) طی بررسی که در لایه مرزی استان خوزستان انجام دادند، نشان دادند که ارتباط مستقیم و معنی‌داری بین شدت گرد و غبار و ضخامت لایه مرزی وجود دارد. کاماسی و همکاران (۱۳۹۶) تغییرات مکانی ارتفاع لایه آمیخته جوی شهر تهران را با استفاده از مدل پیش بینی عددی WRF بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که میان ویژگی‌های سطحی و ارتفاع لایه مرزی وابستگی در خور توجه وجود دارد. شمسی‌پور و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از داده‌های ساعتی و میانگین روزانه مرکز اروپایی، تغییرات سالانه ارتفاع لایه مرزی شهر تهران را بررسی نمودند.

وجود کارگاه‌ها و صنایع متعدد در سطح و اطراف شهر اراک و افزایش روز افزون خودروهای سبک و سنگین در این شهر افزایش آلاینده‌ها در جو را سبب می‌شود و با توجه به اینکه تغییرات ستبرای لایه مرزی تاثیر قابل توجهی در افزایش و یا کاهش غلظت آلاینده‌های هوا دارد، شناخت مقدار ارتفاع لایه مرزی در طی ساعات‌های مختلف فصل‌های سال می‌تواند به مدیریت شهری شهر اراک کمک نماید و کنش و واکنش اقلیمی شهر اراک به‌عنوان یکی از شهرهای صنعتی کشور در ارتباط با پدیده‌های گرمایش جهانی و تغییر اقلیم در بستر اقلیم‌شناسی شهری و نیز از جنبه گرمایش جهانی تغییر اقلیم تاکنون مطالعه نشده‌است. شناخت این رابطه از ضرورت‌های مدیریت و برنامه‌ریزی مبتنی بر اقلیم‌شناسی است. هدف پژوهش حاضر بررسی تغییرات ارتفاع لایه مرزی در ساعات مختلف شبانه‌روز طی ماه‌ها و فصل‌های دوره آماری ۲۰۱۸-۱۹۷۹ در ارتباط با کاهش یا افزایش آلاینده‌ها در شهر اراک است. علت انتخاب شهر اراک برای این مطالعه مسئله کیفیت هوا و صنعتی بودن این شهر است.

داده‌ها و روش

منطقه مورد مطالعه این تحقیق شهر اراک است. موقعیت جغرافیایی شهر اراک در ایران و استان مرکزی و نیز گستره شهر اراک در شکل ۱ ارایه شده است. برای انجام پژوهش حاضر دو مجموعه داده به‌شرح زیر مورد استفاده قرار گرفت:

مرزی خشتی و پایدار بررسی نمودند. دی ویکر و کاسمن (De Wekker & Kossmann, 2015) بیان نمودند که رشد لایه مرزی بر روی سطوح ناهمگن از عوامل زیادی تاثیر می‌پذیرد و در مقایسه با نواحی همگن بسیار پیچیده است. زو و همکاران (Zhu & et al, 2016) تاثیرات کاربری اراضی و ناهمگنی سطوح مختلف را در لایه مرزی بررسی نمودند. روزاتی و همکاران (Rosati & et al, 2016) ویژگی گرد و غبار و رطوبت، در لایه مرزی شمال ایتالیا و هلند را ارزیابی نمودند و نتیجه گرفتند که در قسمت‌های مختلف، گرد و غبار افزایش داشته و نیز در کیلومتر اول هوا، مقدار نترات افزایش داشته است. کافی و همکاران (Kofi & et al, 2016) دینامیک لایه مرزی را با مدل TM5 ارزیابی نمودند. ایزما و همکاران (Eisma & et al, 2018) اثرات مانع روی توزیع آلودگی در لایه مرزی را در مسیر انتقالی شهر و روستا را بررسی نمودند. احمدی‌گیوی و همکاران (۱۳۸۸) در مطالعه‌ای به بررسی نوسان عمق لایه آمیخته جوی شهری تهران با استفاده از مدل MM5 پرداختند، نتایج نشان داد روند کلی تغییرات ماهانه عمق لایه آمیخته به علت شرایط آرام جو بوده و مستقیماً از روندهای شارهای سطحی پیروی می‌کند. قسامی و همکاران (۱۳۸۹) به مطالعه تغییرات گرادبان قائم دمای پتانسیل در لایه مرزی شرایط پایدار شبانه و ناپایدار روزانه در چند دوره بحران آلودگی هوای تهران پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تغییرات مقادیر بیشینه غلظت برخی آلاینده‌های هوای تهران مانند NO_x ، CO و SO_2 با تغییرات شیو قائم دمای پتانسیل همبستگی خوبی نشان می‌دهد. کیخسروی و لشکری (۱۳۹۳) به بررسی رابطه بین ضخامت جو و ارتفاع وارونگی و شدت آلودگی هوا در شهر تهران پرداختند و نشان دادند که در شرایط وارونگی دمایی بردشدت آلودگی هوا افزوده می‌شود. یاراحمدی و همکاران (۱۳۹۵) تغییرات ماهانه‌ی ارتفاع لایه مرزی ایستگاه مهرآباد تهران را از روش وارونگی بحرانی بررسی نمودند. کرپور و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی ارتفاع لایه آمیخته با استفاده از روش وارونگی بحرانی و نقش آن در آلودگی شهر تهران پرداختند و نتیجه گرفتند که وارونگی‌ها در ساعات صبحگاهی از نوع تابشی بوده و مشخصه بارز آنها، ضخامت کم و خیزآهنگ زیاد دمای پتانسیل می‌باشد، در حالی که در ساعات ظهر وارونگی‌ها ناشی از فرونشینی هوا بوده و

۰/۹۲ بدست آمده است که همخوانی قابل قبولی می‌باشد. تحلیل اصلی بر روی داده‌های نقطه A انجام گرفت. داده‌های مورد بحث با فرمت nc در دسترس است. این داده‌ها با استفاده از نرم افزار panoply به فرمت csv تبدیل و در قالب نرم‌افزار اکسل ذخیره‌سازی شد با استفاده از رابطه (۱) در نرم افزار اکسل داده‌های ساعتی تفکیک و در ستون‌های مجزا مرتب شدند و میانگین ماهانه و سالانه محاسبه گردید.

رابطه (۱)

$$=INDEX(\$A\$1:\$A\$r,c*(ROW(A1)-1)+COLUMN(A1))$$

در این رابطه r تعداد سطرهای داده است و c تعداد ستونهای مورد نظر است که در اینجا ۸ ستون برای ساعات ذکر شده می‌باشد.

تغییرات بلندمدت (روند) ارتفاع لایه مرزی شهر اراک در دوره آماری (۱۹۷۹ تا ۲۰۱۸) با استفاده از رگرسیون خطی (رابطه ۲)، غیر خطی (روابط ۳ و ۴) و آزمون آماری من کندال ارزیابی و برآورد گردید.

$$y=a\pm bx+e_i \quad (2)$$

$$y=a\pm b_1x\pm b_2x^2+e_i \quad (3)$$

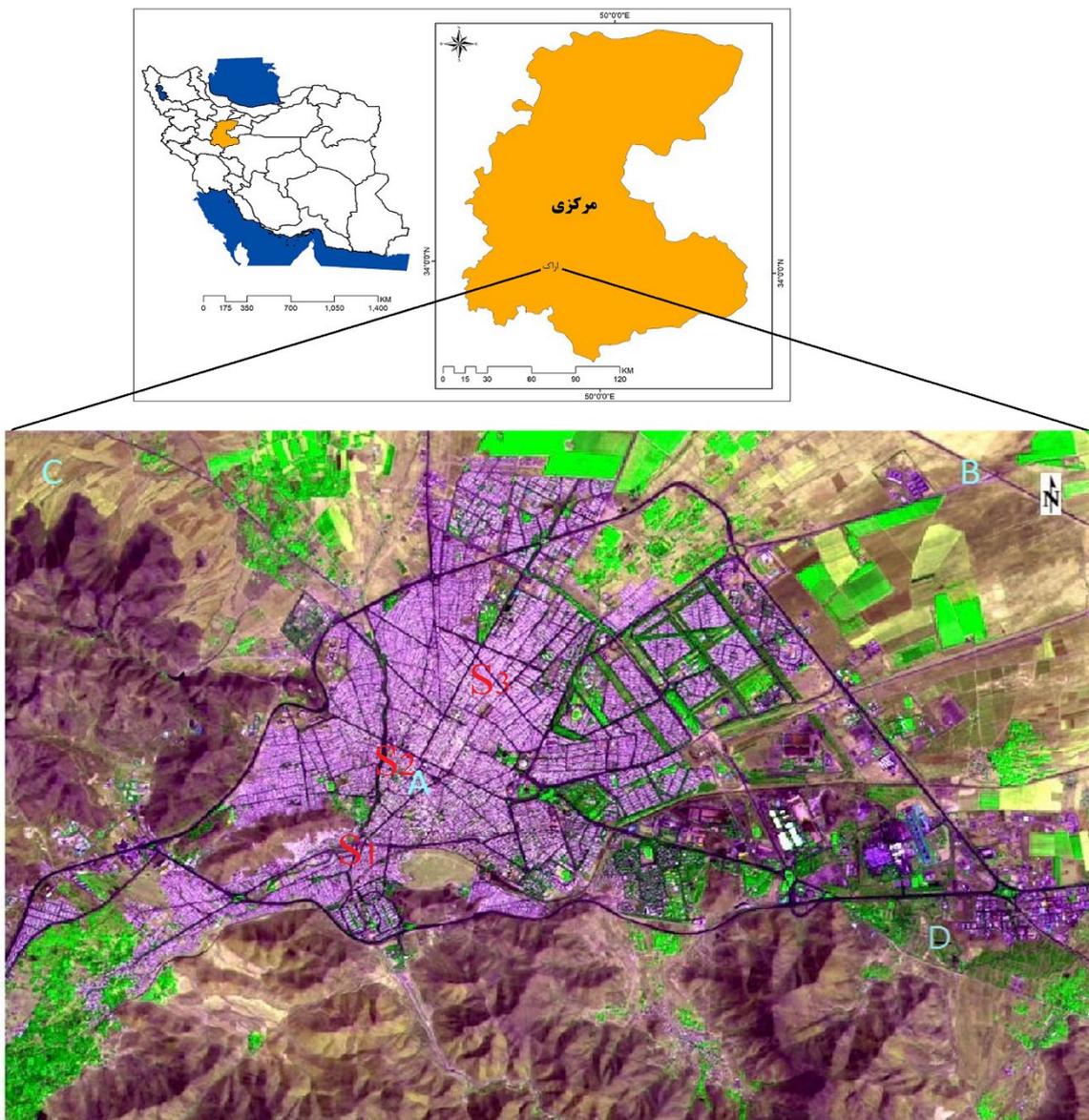
$$y=a\pm b_1x\pm b_2x^2\pm b_3x^3+e_i \quad (4)$$

رابطه ۲ رگرسیون خطی، رابطه ۳ رگرسیون سهمی درجه ۲ و رابطه ۴ رگرسیون سهمی از نوع درجه ۳ می باشد. در روابط فوق y متغییر وابسته، x متغییر مستقل، a عرض از مبدا، b شیب خط و e_i خطای مدل است.

۱- داده‌های مربوط به ارتفاع لایه مرزی شهر اراک برای ساعات‌های، سه، شش، نه، دوازده، پانزده، هجده، بیست و یک و بیست و چهار، به وقت UTC با تفکیک فضایی ۰/۱۲۵ درجه قوسی از سال ۱۹۷۹ تا پایان سال ۲۰۱۸ (۱۶۶۱۰ روز) از پایگاه داده میان برد اروپایی گرفته شد. برای مقایسه و تاثیر سطوح مختلف زمین در تغییرات ارتفاع لایه مرزی، علاوه بر داده‌های ارتفاع لایه مرزی شهر اراک (نقطه A)، داده‌های ارتفاع لایه مرزی چهار نقطه B، C، D و E که در حاشیه و خارج از فضای شهر می‌باشند، اخذ گردید. مختصات و ویژگی این نقاط در جدول شماره ۱ آورده شده است. این نقاط به‌عنوان نقاط کنترل در نظر گرفته شده‌اند. دقت داده‌های پایگاه میان برد اروپایی توسط ثنائی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۸) مورد تائید قرار گرفته است. جهت اطمینان بیشتر از صحت این داده‌ها، بین چهارمتغیر رطوبت نسبی، دمای هوا، دمای نقطه شبنم و فشار هوا ایستگاه اراک و داده‌های پایگاه میان برد اروپایی همبستگی ایجاد شد. ضرایب بدست آمده برای رطوبت نسبی، دمای هوا، دمای نقطه شبنم و فشار هوا به ترتیب ۰/۹۲، ۰/۹۸، ۰/۹۳ و ۰/۹۰ حاصل شد که همخوانی مناسبی را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه ایستگاه اراک فاقد داده‌های بالای جو می‌باشد، برای تائید داده‌های ارتفاع لایه مرزی به یافته‌های شمسی‌پور و همکاران (۱۳۹۹) استناد شد. طبق یافته‌های این پژوهشگران ضریب همبستگی بین میانگین، بیشینه و کمینه ارتفاع لایه مرزی ایستگاه مهرآباد تهران با همین متغیرها از پایگاه میان برد اروپایی به ترتیب ۰/۶۵، ۰/۹۲ و

جدول شماره ۱ مختصات و ویژگی نقطه‌های کنترل لایه مرزی

نقطه	عرض جغرافی	طول جغرافی	ارتفاع	ویژگی
A	۳۴، ۰۵'، ۱۱''	۴۹، ۴۱'، ۲۱''	۱۷۵۵	مرکز تجاری شهر اراک
B	۳۴، ۰۷'، ۳۶''	۴۹، ۴۵'، ۵۳''	۱۶۷۹	خارج از شهر در محدوده زمین‌های زراعی
C	۳۴، ۰۷'، ۳۳''	۴۹، ۳۸'، ۰۲''	۱۷۸۴	خارج از شهر در دامنه کوهستان با مراتع ضعیف
D	۳۴، ۰۴'، ۱۰''	۴۹، ۴۵'، ۳۷''	۱۷۱۰	در حاشیه شهر و در مجاورت صنایع و و جاده اصلی اراک به تهران
E	۳۳، ۵۲'، ۴۸''	۴۹، ۱۸'، ۴۷''	۲۱۳۴	در فاصله ۴۰ کیلومتری اراک، منطقه‌ای کوهستانی با کاربری کشاورزی



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی شهر اراک و گستره آن از چشم‌تصویر ماهواره‌ای

(استانداردی) درج شده است. پس از اخذ داده‌های اولیه با استفاده از رابطه (۵) شاخص کیفیت هوا (AQI) برای پنج آلاینده اصلی هوا یعنی ذرات معلق، دی‌اکسید نیتروژن، ازن سطح زمین، مونوکسید کربن و دی‌اکسید گوگرد محاسبه گردید و آلاینده‌ای که AQI آن از سایر آلاینده‌ها بیشتر است، مشخص شد.

$$I_p = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} (C_p - BP_{Lo}) + I_{Lo} \quad (5)$$

در این رابطه :

I_p شاخص کیفیت هوا (AQI) برای آلاینده P است. C_p غلظت اندازه‌گیری شده برای آلاینده p است، BP_{Hi} نقطه

با توجه به این‌که روش‌شناسی آزمون آماری من‌کنندال در تحقیقات متعدد از جمله (علی‌جانی، ۱۳۹۰)، (عزیزی، ۱۳۸۷) و (سبزی‌پرور، ۱۳۹۲) بیان شده است، از ذکر آن در این نوشتار خودداری می‌شود. کلیه عملیات آماری-ترسیمی این بخش با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS و MATLAB انجام گرفت.

۲- داده‌های خام آلاینده‌های هوا، مربوط به سه ایستگاه سنجش آلاینده هوا در سطح شهر اراک از اداره کل محیط زیست استان مرکزی اخذ شد. موقعیت ایستگاه‌ها در شکل ۱ با نماد S1 (شریعتی)، S2 (مخابرات) و S3

یافته ها و بحث

الف) مشخصات توصیفی و تحلیل روند ارتفاع لایه مرزی شهر اراک

ارتفاع لایه مرزی شهر اراک در طی دوره آماری با نوسانهای روندی افزایشی داشته است. جدول شماره ۲ نتایج آزمون آماره من کندال برای ارتفاع لایه مرزی شهر اراک از ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۸ را به تفکیک ماه برای ساعاتهای ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۱ و ۲۴ به وقت UTC نشان می‌دهد. با توجه به این نتایج مشخص می‌شود که به غیر از سه ماه اکتبر، نوامبر و دسامبر میانگین روزانه ارتفاع لایه مرزی روند افزایشی دارد. در ماههای ژانویه، فوریه و جون در تمام ساعاتهای شبانه روز ارتفاع لایه مرزی افزایش داشته است، در ماه مارس، بجز ساعت ۲۱ و ۲۴، در بقیه ساعاتها ارتفاع لایه مرزی افزایش یافته است. در ماههای آوریل، می، آگوست و سپتامبر در طی روز ارتفاع لایه مرزی افزایش داشته و در طول شب روند افزایشی لایه مرزی معنی‌دار نمی‌باشد. در ماههای اکتبر و نوامبر، ارتفاع لایه مرزی در هیچ ساعتی تغییر معنی‌داری نداشته است و در ماه دسامبر ارتفاع لایه مرزی در ساعت ۹ و ۱۲ افزایش یافته است و در بقیه ساعاتها تغییر معنی‌دار نداشته است. در مجموع، ارتفاع لایه مرزی در فصل‌های بهار، تابستان و زمستان افزایش یافته است و در فصل پاییز ارتفاع لایه مرزی تغییر معنی‌داری نداشته است. تغییرات معنی‌دار لایه مرزی شهر اراک در ساعاتهای شب و در ساعاتهای روز متفاوت و بدین شرح است که ارتفاع لایه مرزی در ساعت ۳، در پنج ماه از سال تغییر معنی‌دار داشته و در ساعاتهای ۱۸، ۲۱ و ۲۴، در چهار ماه از سال تغییر معنی‌دار داشته‌اند. ارتفاع لایه مرزی در ساعاتهای ۶، ۱۲ و ۱۵ در نه ماه از سال و در ساعت ۹ در ده ماه از سال تغییر معنی‌دار داشته‌است. همان‌گونه که در تمامی گزارش‌های هیات بین‌الدولی تغییر اقلیم (IPCC, 2007, 2014) آمده‌است، و در دیگر منابع، عساکره و شادمان (۱۳۹۵) و میروسوی و صبوری (۱۳۹۳) که نشان داده‌اند روند تغییرات عناصر اقلیمی در محل‌ها و زمان‌های مختلف، متفاوت است. طبق تحلیل داده‌های موجود و با توجه به شکل‌های ۲ و ۳ تغییرات ارتفاع لایه مرزی ده ساله چهارم (۲۰۰۹-۲۰۱۸) نسبت به میانگین کل دوره (۱۹۷۹-۲۰۱۸) به شرح ذیل

شکستی که بزرگتر یا مساوی C_p است، BP_{Lo} نقطه شکستی که کوچک‌تر یا مساوی C_p است، I_{Hi} مقدار AQI منطبق با BP_{Hi} و I_{Lo} مقدار AQI منطبق با BP_{Lo} می‌باشد. مقدار نقطه شکست از جدول نقاط شکست برای AQI بدست می‌آید. (ندافی و همکاران ۱۳۹۰: ۱۲) به‌طور کلی AQI شاخصی جهت گزارش روزانه کیفیت هوا است. این شاخص مردم را از کیفیت هوا یعنی پاک بودن و آلوده بودن آگاه می‌سازد و اثرات سلامتی مرتبط با آن را ارائه می‌کند. محاسبه و گزارش AQI برای یک شهر با برآورد غلظت آلاینده‌های اصلی توسط ایستگاه‌های سنسجس موجود در سطح شهر آغاز می‌شود. سپس داده‌های خام حاصل از سنسجس مربوط به هر ایستگاه با استفاده از رابطه ۵ به مقادیر AQI جداگانه برای هر آلاینده تبدیل می‌شود. در مرحله بعد بالاترین مقدار AQI محاسبه شده در هر ایستگاه به عنوان مقدار AQI آن ایستگاه گزارش می‌گردد. سپس بالاترین مقادیر AQI تمامی ایستگاه‌ها با همدیگر مقایسه می‌شوند و بالاترین مقدار در بین تمامی ایستگاه‌ها به عنوان مقدار AQI آن شهر گزارش می‌شود.

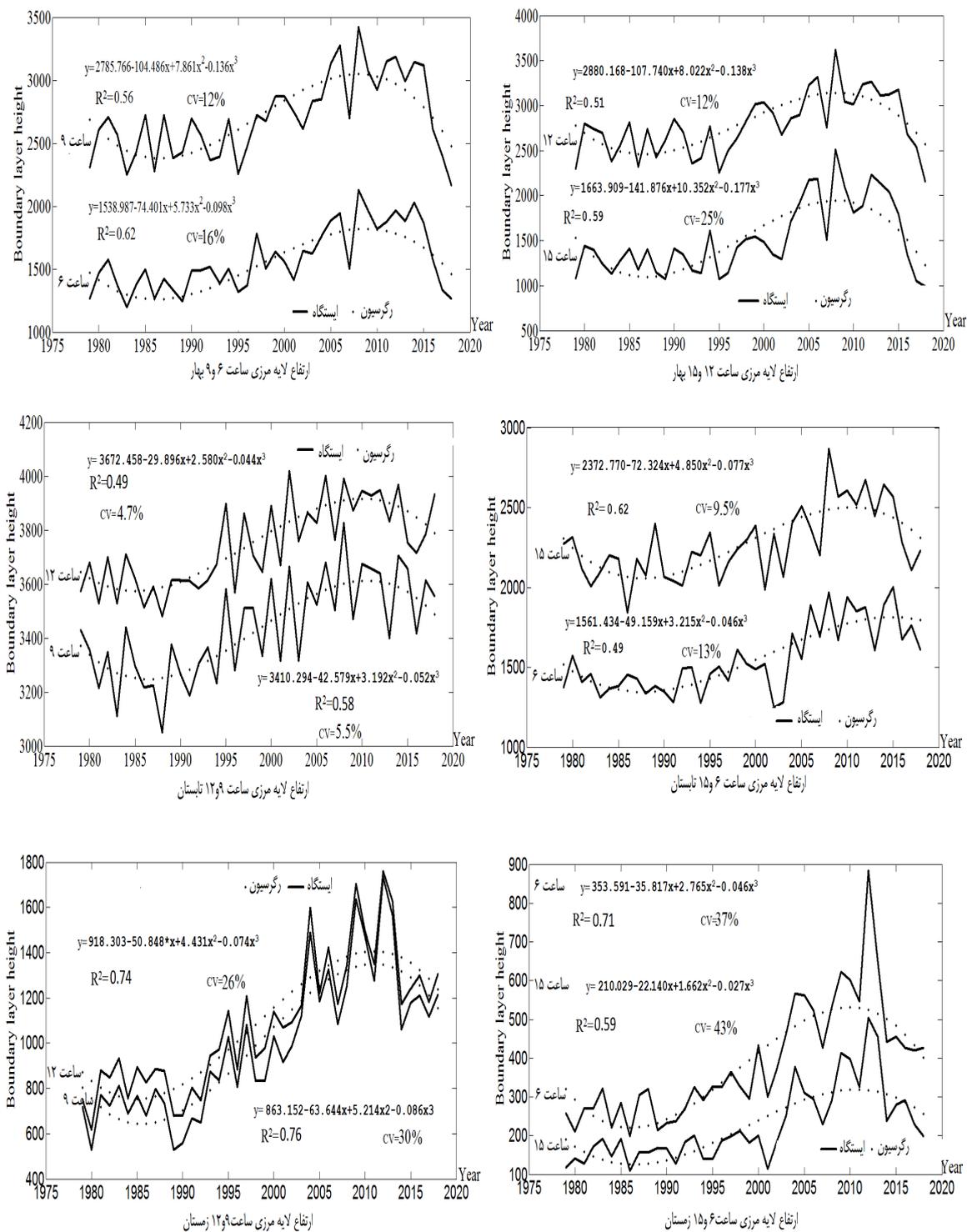
برای مشخص نمودن تاثیر تغییرات ارتفاع لایه مرزی بر کیفیت هوا بین داده‌های ارتفاع لایه مرزی و داده‌های پنج آلاینده اصلی هوا یعنی ذرات معلق، دی اکسید نیتروژن، ازن سطح زمین، منواکسید کربن و دی اکسید گوگرد همبستگی از نوع پیرسون ایجاد شد. این همبستگی بین میانگین روزانه ارتفاع لایه مرزی سال ۲۰۱۶ با داده‌های آلاینده‌های اصلی همین سال محاسبه و برآورد شد. سال ۲۰۱۶ به دلیل این که کامل‌ترین ثبت داده در طی دوره آماری در آن انجام شده‌است و نیز به این دلیل که تولید آلودگی از منابع آلاینده در یک سال نسبتاً ثابت است، اختیار شد. توضیح این که چون شهر اراک در طی چند دهه اخیر رشد و گسترش زیادی داشته است مقدار تولید آلاینده‌ها توسط خودروها، صنایع و ... در سال‌های مختلف یکسان نیست. همچنین به دلیل این که هدف از نگارش این نوشته تاثیر تغییرات ارتفاع لایه مرزی بر غلظت آلاینده‌ها می‌باشد، منطقی و ضروری است که این همبستگی برای یک سال انجام پذیرد.

شکل ۲ نمودارهای تغییرات ارتفاع لایه مرزی شهر اراک در ساعت‌های روز و شکل ۳ نمودارهای تغییرات ارتفاع لایه مرزی شب هنگام این شهر در فصل‌های بهار، تابستان و زمستان را نشان می‌دهند. هر نمودار روند تغییرات ارتفاع لایه مرزی دو ساعت همراه با رگرسیون که بهترین برازش را دارند را مشخص می‌کند. معادله، ضریب تعیین و ضریب تغییرات در کنار نمودارها درج گردیده است. با دقت در این نمودارها معلوم می‌گردد که اولاً، ارتفاع لایه مرزی در تمام ساعت‌های شبانه‌روز فصل‌های بهار، تابستان و زمستان افزایش یافته است. ثانیاً میانگین ارتفاع لایه مرزی در ساعت‌های ۳، ۱۸، ۲۱ و ۲۴ به وقت UT برای دوره آماری ۲۰۰۸-۲۰۱۸ به ترتیب ۸۶، ۱۳۸، ۹۸ و ۸۶ متر است که با این ارتفاع هوا در مدت کوتاهی می‌تواند آلوده شود. نمودارهای شکل ۳ وضعیت و روند ارتفاع لایه مرزی را در شب هنگام به خوبی نشان می‌دهند.

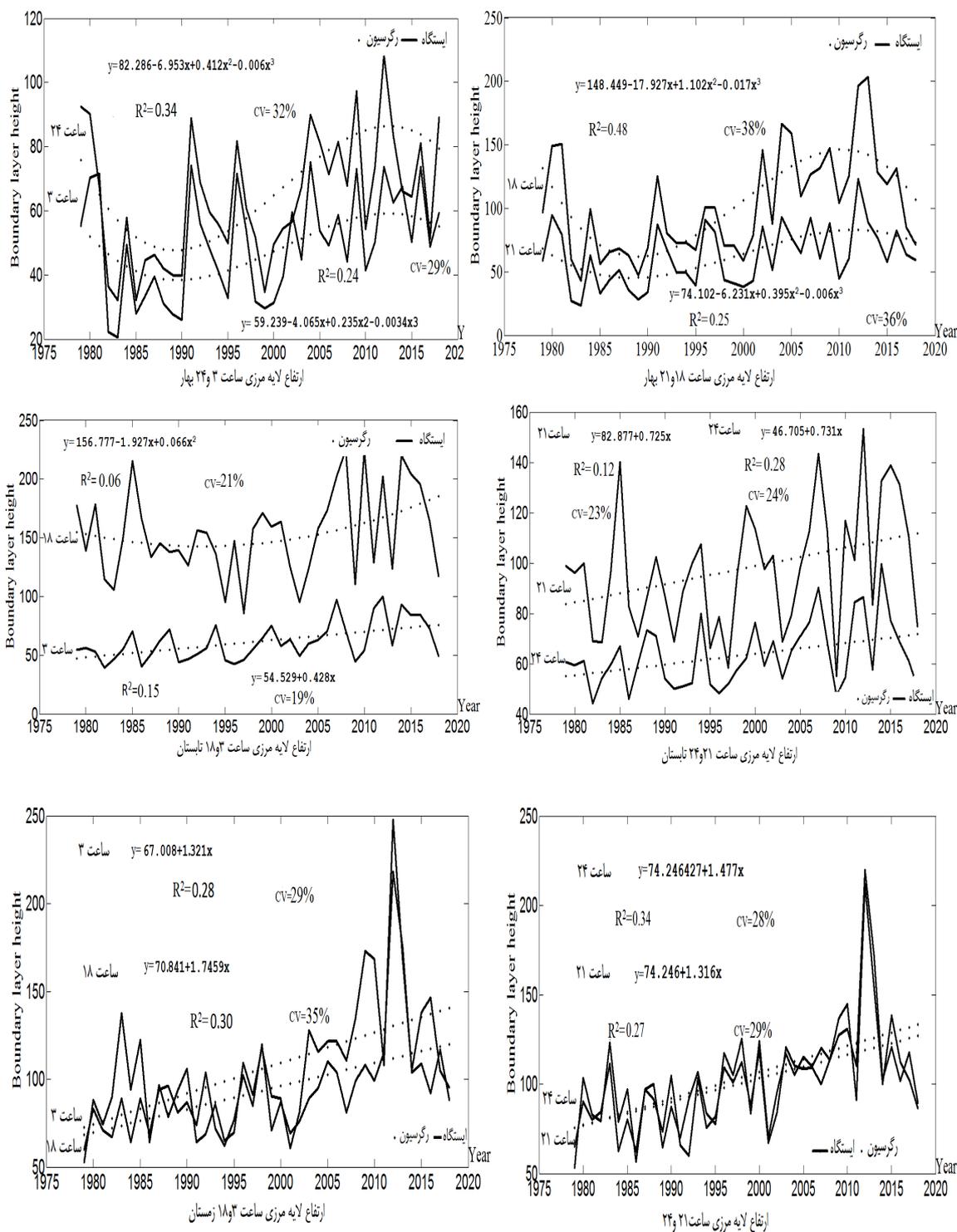
است. در فصل بهار به طور میانگین ارتفاع لایه مرزی ۹ درصد افزایش داشته که بیشترین افزایش مربوط به ساعت ۱۸ است. در این فصل ارتفاع لایه مرزی در ساعت‌های شب نسبت به ساعت‌های روز افزایش بیشتری داشته است. در فصل تابستان به طور میانگین ارتفاع لایه مرزی ۶ درصد افزایش داشته که بیشترین افزایش در ساعت ۲۴ و کمترین افزایش در ساعت ۱۲ رخ داده است. در این فصل هم ارتفاع لایه مرزی در ساعت‌های شب نسبت به ساعت‌های روز افزایش بیشتری داشته است. در فصل پاییز ارتفاع لایه مرزی تغییر معنی‌داری نداشته است. بیشترین افزایش ارتفاع لایه مرزی در فصل زمستان رخ داده است، در این فصل به طور میانگین ارتفاع لایه مرزی ۳۴ درصد افزایش داشته که بیشترین افزایش مربوط به ساعت ۱۵ با ۴۸ درصد است. در زمستان ارتفاع لایه مرزی بر خلاف دو فصل بهار و تابستان در طی روز نسبت به شب افزایش بیشتری داشته است.

جدول ۲- نتایج آزمون آماره من کندال برای ارتفاع لایه مرزی شهر اراک از ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۸

ساعت UTC ماه و فصل	۳	۶	۹	۱۲	۱۵	۱۸	۲۱	۲۴	میانگین
ژانویه	۰/۲۸۵**	۰/۵۲۱**	۰/۵۲۸**	۰/۴۹۷**	۰/۳۰۸**	۰/۲۸۲*	۰/۲۳۸*	۰/۲۷۷*	۰/۵۱۳**
فوریه	۰/۳۱۸**	۰/۴۵۶**	۰/۵۵۹**	۰/۵۷۷**	۰/۴۷۹**	۰/۲۸۲*	۰/۲۸۷**	۰/۳۴۱**	۰/۵۶۴**
مارس	۰/۲۷۴*	۰/۵۱۸**	۰/۵۰۸**	۰/۵۰۵**	۰/۵۳۳**	۰/۳۲۶**	/۱۹۱	۰/۱۹۵	۰/۵۳۳**
آوریل	/۰۹۶	۰/۳۵۵**	۰/۲۵۰**	۰/۲۰۱	۰/۳۶۶**	۰/۱۷۳	۰/۱۹۴	۰/۱۲۲	۰/۳۰۷**
می	۰/۱۵۰	۰/۳۵۰**	۰/۳۵۳**	۰/۳۳۰**	۰/۲۸۱*	۰/۱۷۱	۰/۱۵۸	۰/۱۷۱	۰/۳۶۶**
ژوئن	۰/۳۴۸**	۰/۳۴۸**	۰/۳۸۴**	۰/۳۶۳**	۰/۳۵۳**	۰/۲۸۶**	۰/۳۱۹**	۰/۳۳۷**	۰/۴۱۴**
ژولای	۰/۲۲۸*	۰/۲۶۹*	۰/۳۰۸**	۰/۳۶۴**	۰/۲۲۳*	۰/۰۱۰	۰/۱۴۴	۰/۳۱۰**	۰/۳۴۴**
آگوست	۰/۰۲۱	۰/۴۷۲**	۰/۴۱۰**	۰/۴۰۵**	۰/۴۴۴**	۰/۰۹۲	۰/۱۲۶	۰/۱۷۴	۰/۴۹۷**
سپتامبر	۰/۰۶۷	۰/۳۶۲**	۰/۲۸۷**	۰/۲۹۷**	۰/۲۸۷**	/۱۷۲	۰/۲۸۳*	۰/۲۱۰	۰/۴۵۴**
اکتبر	۰/۱۲۸	۰/۱۷۹	۰/۱۰۳	۰/۰۶۲	۰/۰۷۷	/۱۶۷	۰/۲۱۰	۰/۱۹۰	۰/۱۵۶
نوامبر	۰/۰۴۹	۰/۰۶۴	-۰/۱۰۸	-۰/۱۳۱	۰/۰۶۴	۰/۰۶۴	۰/۰۱۰	-۰/۰۴۶	-۰/۰۸۷
دسامبر	-۰/۱۸	۰/۰۹۷	۰/۲۴۶*	۰/۲۷۴*	۰/۰۱۳	۰/۰۳۶	-۰/۰۶۴	-۰/۰۰۸	۰/۱۵۶
بهار	۰/۲۷۹*	۰/۴۵۹**	۰/۳۹۵**	۳۶۹.**	۳۳۸.**	۰/۳۵۴**	۰/۲۵۹*	۰/۲۷۲*	۰/۴۰۵**
تابستان	۰/۲۳۶*	۰/۵۰۸**	۰/۴۶۷**	۰/۴۸۷**	۰/۳۷۷**	۰/۱۳۳	۰/۲۴۴*	۰/۳۴۴**	۰/۵۲۸**
پائیز	۰/۰۴۹	۰/۱۸۷	۰/۱۳۳	۰/۱۲۱	۰/۰۶۲	۰/۰۹۰	۰/۰۵۶	۰/۰۳۶	/۱۶۴
زمستان	۰/۴۴۱**	۰/۶۲۳**	۰/۶۳۶**	۰/۶۵۴**	۰/۵۵۹**	۰/۳۸۲**	۰/۳۶۷**	۰/۴۴۶**	۰/۶۴۹**
* معنی داری در سطح ۹۵ درصد ** معنی داری در سطح ۹۹ درصد									



شکل (۲) روند تغییرات ارتفاع لایه مرزی فصل‌های بهار، تابستان و زمستان در روزهایگام (ساعت‌ها به وقت UT می‌باشد)



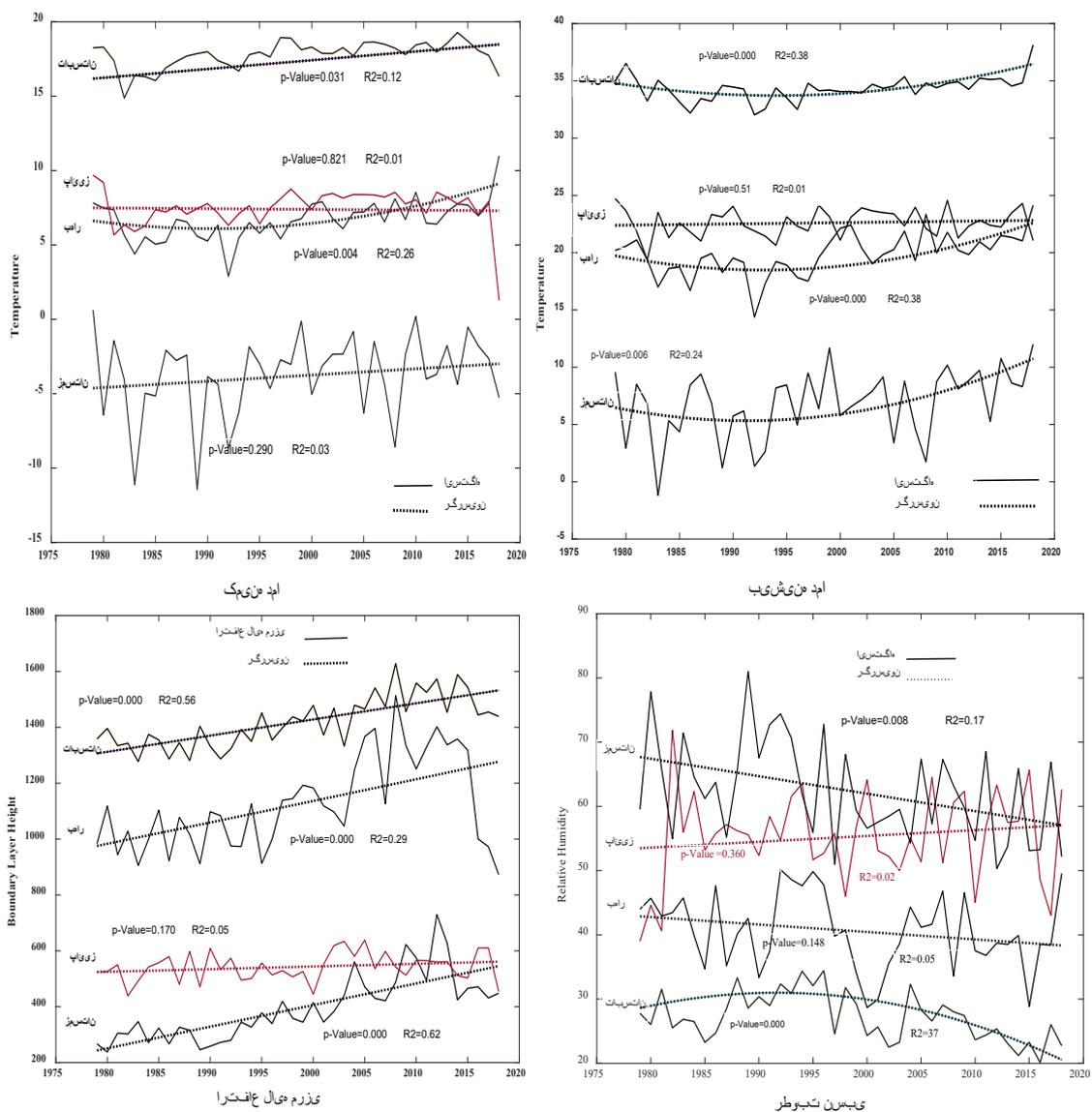
شکل (۳) روند تغییرات ارتفاع لایه مرزی فصل‌های بهار، تابستان و زمستان در شب‌هنگام (ساعت‌ها به وقت UT می‌باشد)

جدول شماره (۳) مقایسه تغییرات میانگین دهساله ارتفاع لایه مرزی شهر اراک با چهار نقطه دیگر

موقعیت		A	B	C	D	E
فصل	دوره					
بهار	۱۹۸۸-۱۹۷۹	۹۹۴/۸	۱۰۰۹/۹	۱۰۱۶/۸	۱۰۴۰/۵	۱۰۰۱/۳
	۱۹۹۸-۱۹۸۹	۱۰۱۴/۷	۱۰۳۶/۳	۱۰۲۷/۵	۱۰۵۳/۳	۱۰۱۱/۶
	۲۰۰۸-۱۹۹۹	۱۲۱۷/۶	۱۲۲۸/۹	۱۲۰۵/۱	۱۲۳۱/۳	۱۱۶۳/۲
	۲۰۱۸-۲۰۰۹	۱۲۰۷/۱	۱۲۱۷/۶	۱۲۱۳/۴	۱۲۳۵/۵	۱۲۰۱/۶
	افزایش دهه چهارم به میانگین	٪۸/۹	٪۸/۴	٪۸/۸	٪۸/۳	٪۹/۸
تابستان	۱۹۸۸-۱۹۷۹	۱۳۴۴/۱	۱۳۳۵	۱۳۰۰/۷	۱۳۰۵/۶	۱۲۹۶/۵
	۱۹۹۸-۱۹۸۹	۱۳۷۰/۱	۱۳۷۲/۸	۱۳۱۹/۸	۱۳۲۸/۳	۱۳۰۵/۵
	۲۰۰۸-۱۹۹۹	۱۴۶۳/۹	۱۴۶۶/۱	۱۴۱۱/۵	۱۴۱۷/۲	۱۳۹۲/۳
	۲۰۱۸-۲۰۰۹	۱۵۱۵	۱۵۰۳/۵	۱۴۷۱/۷	۱۴۷۷	۱۴۱۸/۳
	افزایش دهه چهارم به میانگین	٪۶/۵	٪۵/۹	٪۷	٪۶/۹	٪۴/۸
پاییز	۱۹۸۸-۱۹۷۹	۵۲۴/۶	۵۲۹	۵۸۰/۹	۵۸۵/۹	۵۶۵/۸
	۱۹۹۸-۱۹۸۹	۵۲۹/۵	۵۲۸/۹	۵۷۹/۹	۵۸۵	۵۶۲/۳
	۲۰۰۸-۱۹۹۹	۵۳۵/۵	۵۶۷	۶۲۴/۱	۶۲۸	۶۰۴/۷
	۲۰۱۸-۲۰۰۹	۵۴۵/۳	۵۴۵/۵	۶۰۰/۱	۶۰۴/۹	۵۸۹/۳
	افزایش دهه چهارم به میانگین	٪۰/۰۷	٪۰/۰۵	٪۰/۰۷	٪۰/۰۷	٪۱/۵
زمستان	۱۹۸۸-۱۹۷۹	۲۸۸/۱	۲۹۶/۵	۳۱۴/۶	۳۲۰/۶	۲۹۵/۵
	۱۹۹۸-۱۹۸۹	۳۱۳	۳۲۲/۵	۳۴۰/۱	۳۴۶/۹	۳۲۵/۸
	۲۰۰۸-۱۹۹۹	۴۲۹/۳	۴۲۹/۷	۴۶۷/۴	۴۷۲/۲	۴۴۳/۶
	۲۰۱۸-۲۰۰۹	۵۲۰/۸	۵۲۹	۵۵۶	۵۶۳/۹	۵۴۳/۹
	افزایش دهه چهارم به میانگین	٪۳۴/۴	٪۳۴/۳	٪۳۲/۵	٪۳۲/۴	٪۳۵/۲
سالانه	۱۹۸۸-۱۹۷۹	۷۸۷/۹	۷۹۲/۶	۸۰۳/۲	۸۱۳/۲	۷۸۹/۸
	۱۹۹۸-۱۹۸۹	۸۰۶/۸	۸۱۵/۲	۸۱۶/۸	۸۲۸/۴	۸۰۱/۳
	۲۰۰۸-۱۹۹۹	۹۱۹/۱	۹۲۲/۹	۹۲۷	۹۳۷/۱	۹۰۰/۹
	۲۰۱۸-۲۰۰۹	۹۴۷	۹۴۸/۹	۹۶۰/۳	۹۷۰/۳	۹۳۸/۳
	افزایش دهه چهارم به میانگین	٪۹/۵	٪۹/۱	٪۹/۵	٪۹/۴	٪۹/۴

دستی و کشاورزی واقع شده، و نقطه‌های C و E که در منطقه کوهستانی قرار دارند، و نقطه D که در حاشیه شهر واقع شده، هم افزایش داشته است. ارتفاع لایه مرزی فصل تابستان در شهر اراک در همه سالها بیشتر نقاط کنترل است و ارتفاع لایه مرزی این شهر در فصل زمستان و پائیز کم‌تر از نقاط کنترل است. در فصل بهار ارتفاع لایه مرزی شهر اراک از نواحی پیرامونی کمتر و از نقطه E که یک منطقه کوهستانی با کاربری کشاورزی می باشد و در فاصله ۴۱ کیلومتری این شهر واقع شده است، بیشتر است.

برای مشخص شدن، نقش سوخت‌های فسیلی و تغییر کاربری زمین شهر اراک بر افزایش ارتفاع لایه مرزی و نیز نقش گرمایش جهانی و تغییر اقلیم بر تغییر و افزایش لایه مرزی شهرها از جمله شهر اراک، ارتفاع لایه مرزی چهار نقطه کنترل بررسی و در جدول شماره ۳ ارایه شد. در این جدول تغییرات میانگین دهساله ارتفاع لایه مرزی شهر اراک، با چهار نقطه دیگر مقایسه می‌شود. همان‌گونه که از این جدول پیداست میزان افزایش ارتفاع لایه مرزی شهر اراک (نقطه A) با سایر نقاط تفاوت زیادی ندارد، یعنی در طی چهل سال دوره آماری به همان میزانی که ارتفاع لایه مرزی شهر اراک افزایش یافته است در نقطه B که در یک منطقه



شکل (۴) مقایسه روند تغییرات ارتفاع لایه مرزی با بیشینه دما، کمینه دما و رطوبت نسبی ایستگاه اراک

نمودارهای شکل ۴ آمده، رابطه تغییرات ارتفاع لایه مرزی با بیشینه و کمینه دما مثبت و با رطوبت نسبی منفی است. دلیل اصلی تغییر در ارتفاع لایه مرزی شهر اراک تغییر در دمای این شهر است. به نظر می‌رسد تغییرات دما، رطوبت نسبی، ارتفاع لایه مرزی و دیگر عناصر اقلیمی شهر اراک بیشتر متأثر از گرمایش جهانی و سامانه‌های کلان اقلیمی است. سامانه‌های اقلیمی که گستره ایران زمین، از جمله استان مرکزی و شهر اراک را تحت تاثیر قرار می‌دهند، در فصل‌های مختلف سال متفاوت است. سامانه کم فشار مدیترانه‌ای در فصل پائیز و زمستان و اوایل فصل بهار وارد

برای بیان تحلیل تغییرات ارتفاع لایه مرزی در فصل‌های بهار، تابستان و زمستان و عدم تغییر ارتفاع لایه مرزی در فصل پائیز، شکل ۴ ترسیم و تدوین گردید. این شکل روند تغییرات ارتفاع لایه مرزی را با تغییرات بیشینه دما، کمینه دما و رطوبت نسبی ایستگاه اراک، در فصل‌های مختلف سال مقایسه می‌کند. با توجه به این شکل، بیشینه دما در همه فصل‌ها بجز پائیز افزایش معنی‌دار دارد. کمینه دما در دو فصل بهار و تابستان افزایش معنی‌دار دارد ولی در فصل زمستان افزایش آن معنی‌دار نمی‌باشد، رطوبت نسبی در همه فصل‌ها بجز فصل پائیز کاهش یافته است. همان‌گونه که در

ب) تاثیر تغییر ارتفاع لایه مرزی بر تراکم آلاینده‌ها در شهر اراک همان‌گونه که در قسمت داده‌ها و روش‌ها بیان شد، با استفاده از رابطه ۵ شاخص کیفیت هوا (AQI) برای پنج آلاینده اصلی هوا یعنی ذرات معلق، دی اکسید نیتروژن، ازن، سطح زمین، منواکسید کربن و دی اکسید گوگرد محاسبه گردید و آلاینده مسئول در هر روز برای هر ایستگاه مشخص شد. تعداد روزها و درصد هر یک از آلاینده‌ها به‌عنوان آلاینده مسئول در جدول شماره ۴ درج شده است. با توجه به جدول شماره ۴ در همه ایستگاه‌های سطح شهر اراک، آلاینده مسئول در بیشتر روزها، ذرات معلق است. در ایستگاه شریعتی از مجموع روزهای که آلاینده‌ها ثبت گردیده‌اند ۱۰۸۶ روز Pm_{10} و ۷۷۹ روز $Pm_{2.5}$ آلاینده مسئول است که ۸۳ درصد از کل روزها را شامل می‌شود. در دو ایستگاه مخابرات و استانداری از کل روزهای که آلاینده‌ها ثبت گردیده‌اند، به ترتیب ۷۸ و ۴۸ درصد ذرات معلق $Pm_{2.5}$ آلاینده مسئول شناخته شده است.

کشور می‌شود (علیچانی، ۱۳۷۹). بر فشار سیبری از میانه‌ی مهر تا میانه‌ی فروردین برآسیا حاکم است و به سبب گستردگی زیاد از بازیگران اصلی اقلیم کشور در نیمه سرد سال است. (مسعودیان، ۱۳۹۱: ۲۰) فرود دریای سرخ سامانه‌ی همدید کم ضخامت است که از ۴ آبان تا ۲۴ بهمن به مدت ۸۸ روز فعال است. این فرود زبانه‌ای از کم فشار سودان است. (مسعودیان، ۱۳۹۱: ۲۹) فرود دریای سرخ در فصل پاییز و زمستان شهر اراک را تحت تاثیر قرار می‌دهد. پرفشار جنب حاره‌ای آزور در دوره گرم سال بر روی ایران استقرار می‌یابد. (همانجا) بدین ترتیب می‌توان استنباط نمود که کاربری زمین تاثیر کمتری نسبت به گرمایش جهانی بر تفاوت ضخامت و ارتفاع لایه مرزی در طی فصل‌های مختلف سال داشته است.

جدول شماره (۴) تعداد روزها و درصد هر یک از آلاینده‌ها بعنوان آلاینده مسئول در ایستگاه‌های شهر اراک

استانداری	مخابرات	شریعتی	ایستگاه	
			آلاینده	
۲۰	۵۹	۱۰۹	تعداد روز	Co
			درصد	
۵/۴	۴/۱	۴/۹	تعداد روز	No ₂
			درصد	
۷۸	۲۵۱	۱۷	تعداد روز	O ₃
			درصد	
-	-	۹۶	تعداد روز	Pm ₁₀
			درصد	
-	-	۱۰۸۶	تعداد روز	Pm _{2.5}
			درصد	
۱۷۷	۱۱۳۶	۷۷۹	تعداد روز	So ₂
			درصد	
۴۸/۱	۷۸/۶	۳۴/۸	تعداد روز	-
			درصد	
۹۳	-	۱۴۸	تعداد روز	-
			درصد	
۲۵/۳	-	۶/۶	درصد	-
فاقد داده : -				

جدول شماره (۵) نتاج همبستگی پیرسون بین میانگین روزانه ارتفاع لایه مرزی با آلاینده‌ها

So ₂ ppb	Pm _{2.5} Mg.m ³	Pm ₁₀ Mg.m ³	O ₃ ppb	No ₂ ppb	Co ppm	آلاینده ایستگاه	
						r	بهار
-۰/۰۴۹	۰/۳۰۴**	۰/۶۰۸**	-۰/۱۴۴	۰/۰۱۵۶	-۰/۲۶۵*	r	بهار
۰/۶۳۹	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰	۰/۲۱۲	۰/۱۳۴	۰/۰۱۳	p-Value	بهار
-۰/۲۴۴*	۰/۰۰۰	۰/۲۱۶	-۰/۱۹۳	۰/۱۰۵	-۰/۱۸۸	r	تابستان
۰/۰۳۰	۰/۹۹۸	۰/۰۵۶	۰/۸۸	۰/۳۵۹	۰/۰۹۸	p-Value	تابستان
-۰/۲۲۶*	۰/۲۴۹**	۰/۳۰۷**	۰/۳۹۵**	-۰/۲۱۶*	-۰/۱۱۱	r	پاییز
۰/۰۳۲	۰/۰۱۸	۰/۰۱۰	۰/۰۰۰	۰/۰۴۱	۰/۲۹۹	p-Value	پاییز
-۰/۶۰۳**	۰/۱۶۴	-۰/۲۱۳	۰/۳۶۳**	-۰/۳۱۰*	-۰/۰۷۹	r	زمستان
۰/۰۰۰	۰/۲۰۴	۰/۱۰	۰/۰۱۰	۰/۰۱۴	۰/۵۴۰	p-Value	زمستان
-۰/۲۱۴**	۰/۴۲۷**	۰/۳۳۰**	۰/۱۵۳**	۰/۳۲۹**	-۰/۲۸۱**	r	سالانه
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	p-Value	سالانه
-	۰/۵۶۵**	-	-	۰/۵۴۱**	-۰/۷۳۳**	r	بهار
-	۰/۰۰۰	-	-	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	p-Value	بهار
-	۰/۱۰۶	-	-	۰/۱۶۷	-۰/۴۴۵**	r	تابستان
-	۰/۳۵۳	-	-	۰/۱۰۸	۰/۰۰۰	p-Value	تابستان
-	۰/۲۳۰	-	-	۰/۵۲۹**	۰/۴۰۸**	r	پاییز
-	۰/۱۷۷	-	-	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	p-Value	پاییز
-	-۰/۳۰۶**	-	-	-۰/۵۲۵**	-۰/۲۳۸*	r	زمستان
-	۰/۰۰۵	-	-	۰/۰۰۰	۰/۰۳۱	p-Value	زمستان
-	۰/۳۸۴**	-	-	۰/۳۷۶**	-۰/۴۸۷**	همبستگی p	سالانه
-	۰/۰۰۰	-	-	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰		سالانه
۰/۰۵۶	۰/۳۴۶	-	-	-۰/۳۴۱**	-۰/۴۶۶**	r	بهار
۰/۶۲۸	۰/۰۷۱	-	-	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰	p-Value	بهار
-۰/۳۶۲**	۰/۰۵۳	-	-	۰/۳۴۸*	-۰/۱۰۱	r	تابستان
۰/۰۰۱	۰/۶۸۶	-	-	۰/۰۲۱	۰/۳۶۶	p-Value	تابستان
-۰/۳۱۲**	۰/۴۴۲**	-	-	-۰/۲۳۶*	۰/۰۳۱	r	پاییز
۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	-	-	۰/۰۳۲	۰/۷۷۷	p-Value	پاییز
۰/۲۴۰	۰/۳۲۴	-	-	-۰/۰۶۵	-۰/۳۶۰*	r	زمستان
۰/۱۸۶	۰/۱۱۵	-	-	۰/۷۳۹	۰/۰۴۳	p-Value	زمستان
-۰/۱۹۹**	۰/۴۹۹**	-	-	-۰/۱۶۲*	-۰/۲۶۸**	r	سالانه
۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	-	-	۰/۰۱۵	۰/۰۰۰	p-Value	سالانه

است. جدول شماره ۵ نتاج همبستگی پیرسون بین میانگین روزانه ارتفاع لایه مرزی با داده‌های منواکسیدکربن، دی‌اکسید نیتروژن، ازن سطح زمین، ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون، ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون و دی‌اکسیدگوگرد در سال ۲۰۱۶ را در طی فصل‌های بهار، تابستان، پاییز، زمستان و سالانه نمایش می‌دهد. طبق جدول

در ایستگاه شریعتی پس از ذرات معلق، به ترتیب دی‌اکسید گوگرد، منواکسیدکربن و ازن قرار دارند. در ایستگاه مخابرات پس از ذرات معلق دی‌اکسید نیتروژن و منواکسیدکربن آلاینده مسئول شناخته شده است. در ایستگاه استاندارد نیز پس از ذرات معلق به ترتیب دی‌اکسید گوگرد، دی‌اکسید نیتروژن و منواکسیدکربن آلاینده مسئول

روز می‌باشد و در فصل زمستان نسبت افزایش لایه مرزی در ساعات‌های روز بیشتر از ساعات‌های شب است. در فصل‌های بهار، تابستان و زمستان بیشترین افزایش ارتفاع لایه مرزی به ترتیب در ساعات‌های ۱۸، ۱۴ و ۱۵ به وقت UT رخ داده است. تغییرات ارتفاع لایه مرزی شهر اراک با تغییرات دمایی و رطوبت نسبی این شهر همخوانی دارد، طبق بررسی (عساکره و شاه‌منصوری، ۱۳۹۵) همه متغیرهای دمایی شهر اراک در تمام فصول بجز فصل پائیز در طی دو دهه اخیر روندی افزایشی داشته اند. طبق همین بررسی کمینه دمای فصل تابستان روندی افزایشی را نشان می‌دهد، و یا به عبارتی شب‌های تابستان در حال گرم شدن است و بیشینه مطلق فصل زمستان در دو دهه اخیر به شدت افزایش یافته اند. لذا می‌توان قضاوت نمود، که دلیل افزایش ارتفاع لایه مرزی شهر اراک افزایش دمای این شهر می‌باشد. احمدی و همکاران (۱۳۹۸) الگوی تغییرات زمانی ارتفاع لایه مرزی را متأثر از وضعیت گرمایش هوا و سطح زمین در فصول مختلف دانسته‌اند. گزارش (IPCC, 2014) افزایش دما برای شهرهای ایران را تأیید می‌نماید. همچنین تباین زمانی - مکانی تغییرات مولفه‌های اقلیمی در بسیاری مطالعات پیشین مشاهده شده است. از این رو اختلاف در نرخ تغییرات فصل‌ها از این قاعده تبعیت می‌کند. از آنجا که تبیین این ویژگی در اراک فراتر از موضوع مطالعه حاضر است، برای مطالعات بعدی پیشنهاد می‌شود.

-افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی و تغییر کاربری شهر اراک تاثیر جزئی در تغییر ارتفاع لایه مرزی برخی ساعات در فصل‌های مختلف دارد. بنابراین تغییرات رخ داده را می‌توان به گرمایش جهانی، استمرار و فراوانی سامانه‌های اقلیمی در فصل‌های مختلف سال و رویدادهای بزرگ مقیاس اقلیمی نسبت داد.

-آلاینده مسئول در شهر اراک در ۸۳ درصد از روزها ذرات معلق است، منشاء این ذرات سوخت خودروها، صنایع موجود در داخل و اطراف شهر و ذرات گرد و غبار می‌باشد. در فصل‌های که توده‌های گرد و غبار وارد شهر نمی‌شوند، رابطه ارتفاع لایه مرزی با ذرات معلق منفی است و در فصل‌های که توده‌های گرد و غبار وارد شهر می‌شوند رابطه ارتفاع لایه مرزی مثبت و معنی‌دار است. در دو فصل

شماره ۵ مشخص می‌شود که در هر سه ایستگاه، بین منواکسید کربن و ارتفاع لایه مرزی بجز فصل پائیز رابطه معنی‌دار معکوس وجود دارد و با افزایش ارتفاع لایه مرزی از غلظت منواکسید کربن کاسته می‌شود. همبستگی ارتفاع لایه مرزی با دی‌اکسید نیتروژن در فصل زمستان در هر سه ایستگاه معکوس است. همبستگی ارتفاع لایه مرزی با ذرات معلق در فصل پائیز در دو ایستگاه شریعتی و استانداری منفی است. همبستگی ارتفاع لایه مرزی با ذرات معلق در فصل تابستان در سه ایستگاه، مثبت ولی فقط در ایستگاه استانداری این همبستگی معنی‌دار است. همبستگی ارتفاع لایه مرزی با ذرات معلق در فصل بهار در سه ایستگاه مثبت است. همبستگی ازن با ارتفاع لایه مرزی در دو فصل بهار و تابستان معنی‌دار نیست ولی در دو فصل پائیز و زمستان ازن با ارتفاع لایه مرزی همبستگی مثبت و معنی‌دار دارد. در مجموع سالانه همبستگی ارتفاع لایه مرزی با ازن مثبت و معنی‌دار است. همبستگی بین ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون با ارتفاع لایه مرزی در دو فصل بهار و پائیز مثبت و معنی‌دار است. بین ذرات کوچکتر از ۲/۵ میکرون با ارتفاع لایه مرزی در همه ایستگاه‌ها در فصل بهار و در دو ایستگاه شریعتی و استانداری در فصل پائیز رابطه مثبت و معنی‌داری وجود دارد. در مجموع سالانه نیز در همه ایستگاه‌ها بین ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون با ارتفاع لایه مرزی همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد. رابطه بین دی‌اکسید گوگرد با ارتفاع لایه مرزی در مجموع سالانه و فصل‌های تابستان، پائیز و زمستان در ایستگاه شریعتی و ایستگاه استانداری منفی و معنی‌دار می‌باشد.

نتیجه گیری

-ارتفاع لایه مرزی شهر اراک در تمام فصل‌ها بجز فصل پائیز افزایش معنی‌داری داشته است، مقدار این افزایش برای فصل‌های بهار، تابستان و زمستان به ترتیب ۹، ۶ و ۳۴ درصد می‌باشد. این افزایش در طی ساعات‌های شبانه روز و ماه‌های سال یکسان نبوده است، به گونه‌ای که بیشترین نسبت افزایش مربوط به فصل زمستان است. در دو فصل بهار و تابستان نسبت افزایش ارتفاع لایه مرزی در شب‌ها بیشتر از

برای بررسی و تحلیل دقیق‌تر لازم است که آلاینده‌ها در ایستگاه‌های بیشتر، به‌طور کامل و با دقت ثبت و در اختیار پژوهشگران قرار گیرد.

شهر اراک در حال رشد و گسترش است و تولید آلاینده‌ها هر روز افزایش می‌یابد. تغییر اقلیم نیز در حال رخ دادن است و همان‌گونه که در گزارش پنجم هیات بین‌الدول تغییر اقلیم در بخش شهری به کرات به سازگاری و انطباق تاکید شده است (IPCC, 2014)، انتظار می‌رود که مسئولین و برنامه ریزان با توجه به ویژگی‌های طبیعی و اقلیمی و انطباق و سازگاری با تغییر اقلیم برنامه‌های توسعه شهری را تدوین و اجرا نمایند.

منابع

- Ahmadi Givi, F. Sabetghadam, S. Aliakbari-Bidokhti, A. A. (2009), Studying the fluctuation of mixed layer height of Tehran, using MM5 modeling system; Journal of the Earth and space physics; volum.35; ser. 2; 105-117.
- Ahmadi, M; Dadashiroudbari, A; Ahmadi, H. (2019), Analysis of Spatio-Temporal Changes of the Boundary Layer Height Based on Output European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) in Iran; Geography and Development; No. 54. PP.163-184.
- Alijani, B. (2000). Iranian Climatology, fourth edition, Payame Noor Publications.
- Alijani, B. Mahmoudi, P. Salighe, M. Rigichahi, A. (2011). Study of annual maximum and minimum temperatures changes in Iran, Geography Research Quarterly, No. 102, PP. 101-122.
- Asakereh, H. (2011). Fundamentals of Statistical Climatology, Zanjan University.
- Asakereh, H. Shadman, H. (2017). Statistical Analysis of the Frequency and Temperature Changes in Hot Days in Iran, the Journal of "Geographical Data (SEPEHR), Volume 25, Issue 100, Pages 147-156.
- Asakereh, H. Shahmansori, B. (2016). Investigation and prediction of the temperature changes of Arak station based on statistical downscaling model, Physical Geography Research Quarterly, Vol. 48, No. 2, p.193-212.
- Azizi, G. Miri, M. Shamsipour, Al. (2014). Identity summer and winter patterns on arrival dust to the West Iran, Geography

بهار و پائیز به خاطر ورود توده‌های گردوغبار به شهر اراک رابطه ارتفاع لایه مرزی با شهر اراک مثبت و معنی‌دار است. عزیزی و همکاران (۱۳۹۳) در پژوهشی که در جنوب غرب ایران انجام دادند به این نتیجه رسیدند که بیشترین رخ داد گرد و غبار در فصل بهار رخ می‌دهد. یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که افزایش ارتفاع لایه مرزی باعث کاهش غلظت آلاینده‌های منواکسید کربن و دی اکسید گوگرد در بستر ایام سال می‌گردد. تنها ایستگاه اندازه‌گیری ازن در شهر اراک ایستگاه شریعتی است. در این ایستگاه در دو فصل پائیز و زمستان رابطه ارتفاع لایه مرزی با غلظت ازن مثبت و معنی‌دار است که به فرایند تشکیل ازن در سطح زمین ارتباط دارد.

افزایش ارتفاع لایه مرزی در شهر اراک اثر قابل توجهی بر کاهش غلظت آلاینده‌های این شهر نداشته است؛ زیرا اولاً افزایش لایه مرزی در برخی از فصول با افزایش ازن و ذرات معلق رابطه مثبت دارد. ثانیاً میانگین ارتفاع لایه مرزی در فصل زمستان و پائیز و شب‌هنگام سایر فصول بسیار کم و به‌طور طبیعی قابلیت آلوده شدن در مدت کوتاهی را دارد. با توجه به بررسی داده‌ها، که ارتفاع لایه مرزی در نیمی از روزهای فصل پائیز و زمستان در ساعات ۹ و ۱۲ به وقت UT اندکی افزایش و در بقیه ایام شبانه روز کاهش می‌یابد، می‌توان استنباط نمود که حداقل در نیمی از فصل‌های پائیز و زمستان شهر اراک، کیفیت هوا نامطلوب است. میانگین سبترای لایه مرزی شهر اراک برای تمامی شب‌ها در فصل‌های بهار، تابستان، پائیز و زمستان به ترتیب ۶۹، ۱۰۴، ۷۹ و ۱۰۱ متر است، این در حالی است که در ۸۷ درصد موارد یعنی ۸۰ شب در هر فصل برای فصل‌های بهار، تابستان، پائیز و زمستان به ترتیب ۳۷، ۶۱، ۲۸ و ۳۸ متر و در ۵۰ درصد موارد یعنی ۴۵ شب به ترتیب ۲۰، ۲۵، ۱۳ و ۱۴ متر می‌باشد. ارقام مذکور گویای این واقعیت است که در مدت کوتاهی هوا می‌تواند آلوده گردد. نواحی صنعتی شهر و نواحی از شهر که در مجاورت راه‌های ترانزیتی قرار دارند، در اغلب شب‌ها و بطور خاص در ساعات اولیه روز آلوده می‌گردند.

داده‌های آلاینده‌ها در شهر اراک ناقص می‌باشد و به دلایل مختلف این داده‌ها در بسیاری از روزها ثبت نگردیده‌اند،

19. Jensen, M. (2008). "Investigation of Regional and Seasonal Variations in Marine Boundary Properties from MODIS Observations". *Journal of Climate* 21: 4995-4973.
20. Karampour, M; Saligheh, M; Toulabinejad, M; Zarei choghabalki, Z; 2015, Evaluation of air pollution in Tehran city by Hefter's critical Inversion method, *Journal of spatial Analysis Environmental Hazard*, No.1, P.51-64.
21. Kaviani, M, R. (2009), *Microclimatology*, Samt, Tehran.
22. Keykhosrowi, Q. Lashkari, H.(2014). Analysis of the Relationship between the Thickness and Height of the Inversion and the Severity of Air Pollution in Tehran, *journal of Geography and planning*, Volume 18, Issue 49, p.231-257.
23. Koffi, E. N. Bergamaschi, P. Karstens, U. Karstens, U. Krol, M. Segers, A. Schmidt, M. Levin, I. Vermeulen, A. T; Fisher, R. E.; Kazan, V; Klein Baltink, H; Lowry, D; Manca, G; Meijer, H. A. J; Moncrieff, J; Pal, S; Ramonet, M; Scheeren, H. A; Williams, G. (2016), Evaluation of the boundary layer dynamics of the TM5 model over Europe, *Geosci. Model Dev.*, 9, 3137-3160
24. Komasi, F; Ali Akbar- Bidokhti, A. A; Sabetghadam, S. (2017). Spatial distribution of the atmospheric mixed-layer depth over Tehran using numerical simulations: Two case studies, *Journal of the Earth and space physics*, Volume 43, Issue 3; p.553-568.
25. Nadafi, K; Uonesian, M; Nabizadeh, R; Jabari, H; Rastkari, N. Hasanvand, M.S. Kolami, S.R; Malekafali, S; Kambarian, M; Elahi, T; Modiri, F.K; Yagobi, L; Izadpna, F. (2011), *A Guide to Calculation, Determination and Announcement of Air Quality Index*, Institute for Environmental Research, Tehran University of Medical Sciences, pp,1-35.
26. Nasiri, B; Zareei Chaghabalaki, Z; Halimi, M; Rostami Fath Abadi, M; 2014, Studing the Condition of Atmospheric Boundary Layer Height of Khuzestan in the Dusty Days, *Journal of spatial Analysis Environmental Hazard*, Volume 3, Issue 2 (5-2016).
27. Masoudian, S.A; *Iran Climate* ;(2012); Sharieyetus.
28. Mirmousavi, S.H. and Saboor, L. (2014). Study of snow precipitation changes trend in North West of Iran, *Quarterly Geography and Environmental Planning*, 28(3): 119-136.
9. Azizi, G. Roushani, M. (2008). Investigation of Change of Some Climatic Elements in North Coast of Persian Gulf Using Kendal Test, *Geography Rese Quarterly*, No.64, pp.13-28.
10. Ccoyllo, S. O. R. Andrade, M. F. (2002). The influence of meteorological conditions on the behavior of pollutants concentrations in Sao Paulo, Brazil; *Environmental Pollution*, 116, Issue 2, 257-263.
11. De Wekker, S. F. and Kossmann, M. (2015). Convective boundary layer heights over mountainous terrain a review of concepts. *Frontiers in Earth Science*, 3, p.77.
12. Eisma, H. E. Tomas, J. M. Pourquie, M. J. B. M., Elsinga, G. E., Jonker, H. J. J., & Westerweel, J. (2018). Effects of a fence on pollutant dispersion in a boundary layer exposed to a rural-to-urban transition. *Boundary-Layer Meteorology*, 169(2), 185-208.
13. Ghalhari, G, A. (2014). *Boundary Layer Climate*, Hakim Sabzevari University, Sabzevar.
14. Ghassami, T. Ali Akbar- Bidokhti, A. A. Sedaghat Kerdar, A. Sahraian, F.(2009) Study of vertical potential temperature gradient during a few acute air pollution episode in Tehran, *Journal of Environmental science and technology*, No.12,13-24.
15. Haman, C. L.E. Couzo, J. H. Flynn, W. Vizuete, B. Heffron, and B. L. (2014). Relationship between boundary layer heights and growth rates with ground-level ozone in Houston, Texas, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 6230-6245.
16. Hurley, P. (2007). Modelling mean and turbulence fields in the dry convective boundary layer with the eddy diffusivity/mass-flux approach, *Boundary-Layer Meteorology*, 521:525-536.
17. IPCC. (2014). *Climate Change Impacts Adaptation and Vulnerability*, Part A: Global and Sectoral Aspects, Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Edited by, Christopher B. Field, Vicente R Barros, David Jon Dokken, Katharine J. Mach, Michael D. Mastrandrea, pp. 544-563.
18. IPCC. (2007). *Climate Change The Physical Science Basis*, Susan Solomon, Martin Manning, Melinda Marquis, Kristen Averyt, Melinda M.B. Tignor, Henry LeRoy Miller, Jr, Zhenlin Chen, pp, 536

38. Tomas, J.M; Pourquie, M.J.B.M; Jonker, H.J.J. (2015). The influence of an obstacle on flow and pollutant dispersion in neutral and stable boundary layers; *Atmospheric Environment*; 113,236-246.
39. Vardoulakis, S.; Kassomenos, P. 2008. Sources and factors affecting PM10 levels in two European cities: Implications for local air quality management, *Atmospheric Environment*, 22 (51): 3949-3963
40. Yarahmadi,D;Halimi, M;Chogabelki,Z;2015; Analysis of the monthly change in the boundary layer height using the vertical temperature profile models , Case study: Tehran's Mehrabad station; Volume 6, Issue 21; Pages 115-12.
41. Zhu, X., G. Ni, Z. Cong, T. Sun, and D. Li (2016), Impacts of surface heterogeneity on dry planetary boundary layers in an urban-rural setting, *J. Geophys. Res Atmos.*, 121, 12,164–12,179.
29. Pal, S. Haeffelin, M. Batchvarova, E. (2013). Exploring a geophysical process-based attribution technique for the determination of the atmospheric boundary layer depth using aerosol lidar and near-surface meteorological measurements, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: ATMOSPHERES*, VOL. 118, 9277–9295.
30. Pal, S. M. Lopez, M. Schmidt, M. Ramonet, F. Gibert, I. Xueref-Remy, and P. Ciais (2015), Investigation of the atmospheric boundary layer depth variability and its impact on the ²²²Rn concentration at a rural site in France, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 623–643.
31. Roland Stul, B., (2012), *Meteorology*, Translate, Masoudian, S. A, Mohammadi, B, Darand, M, Esfahan University.
32. Rosati, B. Gysel, M. Rubach, F; Mentel, F; Goger, B; Poulain, L; Schlag, P; Miettinen, P; Pajunoja, A; Virtanen, A; Baltink, H. K; Bas Henzing, J. S; Gobbi, G. P; Wiedensohler, A; Kiendler-Scharr, S; Decesari Facchini, S; Weingartner, M.C; Baltensperger, U. (2016). Vertical profiling of aerosol hygroscopic properties in the planetary boundary layer during the PEGASOS campaigns, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 7295–7315.
33. Sabziparvar, A. Seif, Z., Ghiami, F. (2012). Analysis of Temperature changes Trend in Arid and Semiarid Regions, *Geography and Development*, No, 30, PP.117-138.
34. Shamsipour, A; Mahdian Mahforouzi, M; Karimi, M; Zavarreza, P; (2020). Annual Variation of the Urban Boundary Layer Height of Tehran; *Physical Geography Research Quarterly*, Vol. 52, No. 1, p.37-50.
35. Sanaei Nejad, s. h; Arabi Yazdi, A; Mofidi, A;(2020). Evaluation of Grid reanalysis products of the European Center for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) in Different Climatic Regions of iran, *Journal of Climate Research*, volume 38; p 63-76.
36. SandroFinardi and Umberto Pellegini. (2002). Systematic snalysis of meteorological conditions causing severe urban air pollution episodes in the central PO Valley. ARIANETviaGilino 9220128 Milano, Italia.
37. Tomas, J. M., Eisma, H. E., Pourquie, M. J. B. M., Elsinga, G. E., Jonker, H. J. J., & Westerweel, J. (2017). Pollutant dispersion in boundary layers exposed to rural-to-urban transitions: Varying the spanwise length scale of the roughness. *Boundary-Layer Meteorology: an international journal of physical and biological processes in the atmospheric boundary layer*, 163(2), 225-251.