

تحلیل و پیش‌بینی سناریویی اثرات تغییرات آب‌وهوا در آلودگی هوای کلان‌شهر تهران

نبی‌الله رمضانی - دانشجوی دکتری آب‌وهواشناسی، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

بهلول علیجانی^۱ - استاد، گروه جغرافیا، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

رضا برنا - دانشیار، گروه جغرافیا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۵/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۰

چکیده

برای ارزیابی تغییرات آینده آب‌وهوای کلان‌شهر تهران و روابط آن با کیفیت هوای تهران از روش پیش‌بینی سناریویی استفاده شد. در این روش ابتدا با استفاده از مدل **SDSM** و داده‌های روزانه (دما و بارش) ایستگاه‌های سینوپتیک مستقر در کلان‌شهر تهران که از دوره آماری بیشتری برخوردار بودند به پیش‌بینی سناریویی ایستگاه‌ها تا سال ۲۰۴۷ پرداخته شد. سپس با استفاده از میانگین روزانه داده‌های هواشناسی (مشاهده شده و پیش‌بینی شده) ایستگاه‌های مورد مطالعه و میانگین روزانه داده‌های آلاینده شهر تهران به بررسی همبستگی و روابط رگرسیونی داده‌های میانگین مشاهده شده هواشناسی و آلودگی هوا پرداخته و با توجه به روابط رگرسیونی و دسترسی به داده‌های سناریویی هواشناسی به پیش‌بینی سناریویی و وضعیت آلودگی هوا در سال‌های آینده پرداخته شد. بررسی سناریویی شاخص‌های آلودگی هوای کلان‌شهر تهران در ارتباط با شرایط آب‌وهوا نشان داده که در میان شاخص‌های آلودگی هوا، شاخص‌های **O₃**، **CO₂** و **PM₁₀** با عناصر دمایی در ارتباط بوده و این شاخص‌ها به‌ویژه دی اکسید کربن در ارتباط با شرایط دمایی روند افزایشی یا ثابتی را تا سی سال آینده (۲۰۴۷) تجربه خواهند کرد.

کلیدواژه‌ها: تغییر آب‌وهوا، آلودگی هوا، پیش‌بینی سناریویی، روش **SDSM**، تهران.

۱- مقدمه

تغییر آب‌وهوا یک پدیده پیچیده اتمسفری - اقیانوسی و متأثر از فعالیت‌های انسانی در سطح جهانی و درازمدت است. این پدیده متأثر از عواملی چون فعالیت‌های خورشیدی، آتشفشان‌ها، اتمسفر، اقیانوس‌ها و گازهای گلخانه‌ای (با منشأ طبیعی و انسانی) موجود در اتمسفر می‌باشد که بر یکدیگر اثر متقابل می‌گذارند (منتظری و فهیمی، ۱۳۸۲). آلاینده‌های جوی نیز عناصری هستند که غلظت زیاد آنها سبب صدمه به چرخه‌های زیستی زمین می‌شود (کاویانی، ۲۰۰۲). شهر تهران به‌عنوان بزرگ‌ترین و پر جمعیت‌ترین شهر کشور، دچار معضل آلودگی هواست و عوامل متعددی از جمله عناصر آب‌وهوایی، مصرف سوخت‌های فسیلی ناشی از حمل و نقل، صنایع و مصارف انرژی خانگی و رشد افسارگسیخته جمعیت و توسعه شهری در ایجاد و دوام آلودگی آن نقش دارند.

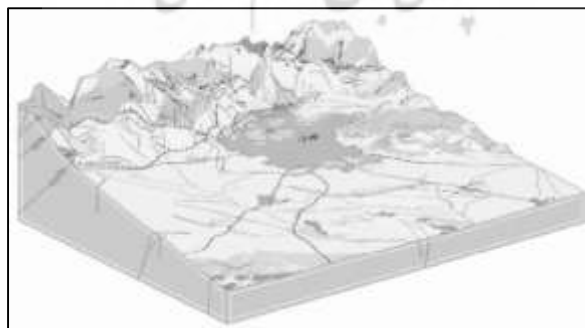
اثر تغییر اقلیم بر آلودگی هوای شهر تهران یکی از مطالعاتی هست که در زمینه آلودگی هوا در شهر تهران انجام شد و بررسی انجام شده نشان داد که اقلیم شهر تهران در دوره آلوده خود از نوسان بیشتری برخوردار بوده و نوسانات اقلیم منطقه در دوره آلوده به‌صورت افزایش دما، افزایش پتانسیل سیلاب خیزی و تغییر اقلیم به‌سوی وضعیتی گرم و مرطوب‌تر بوده است (روشن و همکاران، ۱۳۸۸). بررسی آسیب‌پذیری فضایی و بحران آلودگی هوا در کلان‌شهر تهران نیز نشان داد که نواحی غرب و جنوب شهر تهران به سبب تراکم بالای جمعیت و همچنین منابع آلاینده آسیب‌پذیری بیشتری را نسبت به سایر بخش‌های شهر از خود نمود می‌دهد که می‌تواند زنگ خطری برای سلامت شهروندان ساکن در این بخش از شهر باشد (عیسی‌لو و همکاران، ۱۳۹۰). در همین راستا جاوید در سال ۱۳۹۱ با بررسی و تحلیل توزیع مکانی و تغییرات فصلی نشست آلاینده‌های هوا در ایستگاه‌های هواشناسی انتخابی استان تهران دریافت که شرایط حاد آلودگی معمولاً در شرایطی اتفاق می‌افتد که سرعت باد کمتر است و ذرات به‌راحتی روی سطح نشست پیدا می‌کنند. زبردست و ریاضی (۱۳۹۴) هم در بررسی شاخص‌های محیط انسان ساخت و تأثیرات آن بر آلودگی هوای شهر تهران نشان دادند که غلظت آلاینده‌ها در نواحی مرکزی و غیر مرکزی شهر متفاوت بوده و شاخص‌های محیط انسان ساخت با غلظت آلاینده‌های هوا داری همبستگی می‌باشند. در مطالعه‌ای با موضوع پهنه‌بندی ماهانه میزان آلودگی هوا و بررسی نحوه ارتباط آن با عوامل اقلیمی نشان داده شد که در بیشتر ماه‌ها، بیشترین آلودگی هوا در مرکز شهر با داشتن ترافیک بیشتر و نیز میزان بارش و سرعت باد کمتر و جهت باد موافق مشهود است (اکبری و همکاران ۱۳۹۴). در بررسی ارتباط بین آلاینده‌های شاخص کیفیت هوا و پارامترهای هواشناسی در تهران با رویکرد آنالیز رگرسیون نیز با استفاده از متغیرهای آلاینده‌های شاخص کیفیت هوای تهران و عناصر هواشناسی مشخص شد با توجه به معنی دار بودن ارتباط بین پارامترهای هواشناسی و آلاینده‌ها، پارامترهای هواشناسی می‌توانند در میزان آلودگی هوای شهر تهران مؤثر واقع شوند (جوان‌بخت امیری و خاتمی، ۱۳۹۱). بررسی و پهنه‌بندی آلودگی هوای شهر اصفهان نشان داد فصل پاییز آلوده‌ترین فصل در سال است و سال ۱۳۸۸ آلوده‌ترین

سال بوده و ایستگاه احمدآباد آلوده‌ترین ایستگاه‌ها در بین ایستگاه‌های منتخب بوده است (نوروزی و محمدی، ۱۳۹۳). در تبریز نیز با ارزیابی و پهنه‌بندی آلودگی هوای کلان‌شهر تبریز دریافتند که روش کریجینگ جهت پهنه‌بندی آلودگی هوا در کلان‌شهر تبریز از خطای کمتری نسبت به سایر روش‌های تحلیل فضایی داشته و در تبیین وضعیت کیفیت هوای شهر در ایستگاه‌های مورد نظر نقش کاربری‌های اراضی در کاهش یا افزایش آلودگی را مؤثر دانستند (اسماعیل نژاد و دیگران، ۱۳۹۴). طی مطالعه‌ای بررسی روند نوسانات عناصر آب‌وهوای، افزایش دمای کره زمین را با استفاده از تحلیل‌های مربوط به سری‌های زمانی و مدل تابع خطی روند مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس این تحقیق با افزایش ۱ درصدی گاز CO₂ در قرن گذشته، دمای کره زمین به‌طور متوسط به‌اندازه ۱٫۳ درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا کرده است (Allen, 2004). در زمینه روابط آلاینده‌ها و شرایط آب‌وهوایی، فنگر معتقد است علاوه بر منابع آلودگی هوا محلی، فعالیت‌های شهری به میزان قابل توجهی باعث آلودگی‌های مرزی و افزایش غلظت‌های جهانی گازهای گلخانه‌ای می‌شود و تلاش برای حل مشکلات شهری با معرفی فن‌آوری‌های پاکیزه و با کارآمدتر انرژی تأثیرات مثبتی بر این مشکلات بزرگ دارد. از سوی دیگر، تلاش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی شهر با گسترش فعالیت‌ها، ممکن است ترافیک بیشتری را تولید کند و بنابراین اثر متفاوتی داشته باشد (Fenger, 2002). دنیل و دیگران (۲۰۰۹) نیز با مطالعه اثرات تغییر آب‌وهوا در کیفیت هوا نشان دادند که تغییرات آب‌وهوایی به‌تنهایی باعث افزایش سطح ازن فصل تابستان در مناطق آلوده در طول دهه‌های آتی خواهد شد و این افزایش بیشتر در مناطق شهری و در دوره آلودگی رخ خواهد داد. در مطالعه ارتباط آلاینده‌های هوا مانند دی‌اکسید کربن، ازن، اکسید نیترون با عناصر، آب‌وهوایی بارش، رطوبت، دما در شبه‌جزیره کره جنوبی با استفاده از GIS مشخص شد که بین پارامترهای دما و SO₂ و بین سرعت باد و CO₂ و همچنین بین رطوبت نسبی و O₃ ارتباط معنادار معکوسی وجود دارد (park et al, 2012). با بررسی اکسیدهای نیتروژن و ازن و PM_{2.5} به‌منزله آلاینده‌های هوا و تغییر آب‌وهوای مؤثر بر آن‌ها به‌منزله آلاینده‌ها و تغییر آب‌وهوا مؤثر بر آن‌ها دریافت شد که تغییر در دما و الگوی بارش، طول مدت برخورداری از O₃ و شدت آن را تقویت می‌کند (peel et al, 2012). دورتی و دیگران نیز (۲۰۱۳) به بررسی تأثیرات تغییر آب‌وهوا نظیر بارش، رطوبت نسبی و دما بر آلودگی هوا از نظر O₃ در جهان پرداختند و دریافتند که در بین سه مدل بررسی شده بین تغییرات دما و تغییرات آلودگی ارتباط مثبت وجود دارد. مدل‌های گردش عمومی جوی و روش‌های مختلف ریزمقیاس نمایی از ابزارهای مهم در پیش‌بینی سناریویی و بررسی روند تغییرات آب‌وهوایی می‌باشند. بررسی‌های انجام شده در کشور نیز غالباً نشان از روند مثبت تغییرات دمایی را نشان می‌دهد. در بررسی تغییرات زمانی و مکانی بارش سالانه کشور، بر اساس روش SDSM، مشخص گردید به کارگیری داده‌های ریزمقیاس شده حاصل از مدل‌های بزرگ‌مقیاس، جهت بهینه‌سازی داده‌های ادوار آبی، در مقیاس ایستگاهی می‌تواند به‌صورت قابل قبول مورد استفاده قرار گیرد (اعطاف، ۱۳۹۵). نتایج حاصل از پژوهش زولکاریان و دیگران (۲۰۱۴) از دو مدل

SDSM و LARS - WG برای شبیه‌سازی و ریزمقیاس‌نمایی بارش و دما در مالزی (با آب‌وهوا حاره‌ای) نشان داد که خروجی‌های SDSM دارای عملکرد بهتری در مقایسه با LARS-WG می‌باشند. بررسی عدم قطعیت پارامترهای آب‌وهوای دما و بارش شبیه‌سازی شده توسط دو مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS - WG و SDSM نشان داد که مدل LARS - WG در شبیه‌سازی بارش دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل SDSM می‌باشد و در آینده نزدیک کاهش در بارش را نشان می‌دهد. همچنین مدل SDSM در شبیه‌سازی دما دارای عملکرد بهتری بوده و افزایش دما را نشان می‌دهد (Zamani et al, 2014). در ریزمقیاس‌نمایی دما در مناطق مختلف پاکستان که حسین کاظم و دیگران (۲۰۱۴) به بررسی آن پرداختند به این نتیجه رسیدند که خروجی ریزمقیاس‌نمایی با روش SDSM نسبت به روش‌های دیگر ریزمقیاس‌نمایی نتایج بهتری را نشان می‌دهد. اثر تغییر آب‌وهوا را روی روند رواناب نیز با استفاده از مدل SDSM و HMS-HEC مطالعه قرار گرفت و نشان داده شد که مدل SDSM به‌عنوان یک مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری، از کارایی خوبی جهت پیش‌بینی متغیرهای آب‌وهوای برخوردار است (Kabiri et al, 2015). با توجه مرور مطالعات انجام شده در زمینه رخداد تغییر آب‌وهوا در سطوح جهانی و ملی و بروز این تغییرات با شدت و ضعف مختلف در کشور ما، این پژوهش به دنبال مطالعه اثرات تغییر آب‌وهوا بر روند آلاینده‌های کلان‌شهر تهران در سال‌های آتی و دستیابی به روش‌های مناسب و دقیق جهت تحلیل روابط آلودگی هوا (حاصل از فعالیت‌های انسانی) و تغییرات آب‌وهوایی در کلان‌شهر تهران و پیش‌بینی روند آلودگی هوای ناشی از این تغییرات در سال‌های آینده می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه از لحاظ موقعیت مکانی در محدوده کلان‌شهر تهران می‌باشد که بین ۳۵ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۳ دقیقه طول شرقی در کوهپایه‌های جنوبی کوه‌های البرز با مساحتی حدود ۸۰۰ کیلومتر مربع واقع شده است (شکل ۱).



شکل ۱- بلوک دیاگرام ژئومورفولوژی محدوده تهران (اطلس کلان‌شهر تهران، ۸۹)

برای پیش‌بینی و ارزیابی تغییرات آینده آب‌وهوای کلان‌شهر تهران و روابط آن با کیفیت هوای تهران از روش پیش‌بینی سناریویی SDSM استفاده می‌شود سپس با روش همبستگی پیرسون و مدل رگرسیونی به پیش‌بینی و تحلیل روابط آینده آن با کیفیت هوای تهران با استفاده از دو سناریو خوشبینانه RCP 2.6 و بدبینانه RCP 8.5 پرداخته می‌شود. جهت این کار ابتدا اقدام به ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های بزرگ‌مقیاس (GCM) شده است. در این پژوهش جهت تولید داده‌های دما و بارش روزانه از خروجی مدل HADCM3 استفاده شده است. یکی از دلایل انتخاب این مدل، در دسترس بودن متغیرهای آن جهت دریافت و نتایج بهتر آن در مطالعات انجام شده دنیا در مقایسه با سایر مدل‌ها می‌باشد. مدل HADCM3 دارای قدرت تفکیک افقی ۲٫۵ در ۳٫۷۵ درجه عرض و طول جغرافیایی می‌باشد که معادل ۹۶ در ۷۳ نقطه شبکه‌ای در کل کره زمین می‌باشد. تعداد لایه‌های این مدل در راستای قائم جو، ۱۹ لایه است. این مدل طرح‌واره تابشی جدیدی برای مدل‌سازی اثرات گازهای نادر دارد (Edwards&Slingo,1996). مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM برای شبیه‌سازی داده‌های آب‌وهوای در یک ایستگاه خاص در شرایط حال حاضر و در شرایط آینده تحت تأثیر پدیده تغییر آب‌وهوا بکار می‌رود که داده‌های آن به صورت سری‌های زمانی روزانه برای یک سری از متغیرهای آب‌وهوای مانند بارندگی، حداقل و حداکثر دما و سایر پارامترهای جوی می‌باشد (رنجبر، ۱۳۹۵). این مدل اولین بار در سال ۲۰۰۲ توسط ویلی و همکارانش ارائه و توسعه یافت. این مدل از نوع مدل‌های تابع انتقالی (مدل‌های رگرسیونی) می‌باشد و قادر است در هر مرحله اجرا بین ۱ تا ۱۰۰ بار داده‌ها را شبیه‌سازی نماید. در این تحقیق به منظور بررسی میزان کارایی مدل از دو معیار میانگین خطای مطلق استفاده شد (رابطه ۱).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{iob} - x_{ie}| \quad (1)$$

که در این رابطه: x_{iob} مقدار مشاهده شده متغیر مورد نظر، x_{ie} مقدار شبیه‌سازی شده متغیر مورد نظر و MAE میانگین خطای مطلق می‌باشد. هر چه مقدار هر MAE کمتر باشد، نشان دهنده این است که مدل متغیر مورد نظر را با دقت بیشتری برآورد نموده است. اگر MAE صفر باشد، بدین معنا است که مدل به طور کامل و دقیق متغیر مورد نظر را شبیه می‌نماید. سناریوهای مورد استفاده جهت پیش‌بینی عناصر آب‌وهوا (حداکثر و حداقل دما و بارش) نیز بر مبنای سناریوی انتشار خوشبینانه RCP 2.6 و بدبینانه RCP 8.5 بوده و با استفاده از این سناریوها نیز به پیش‌بینی سناریویی آلاینده‌های هوا پرداخته شد.

۳- نتایج و بحث

جهت پیش‌بینی و تحلیل سناریویی شاخص‌های آلاینده‌های هوای کلان‌شهر تهران، ابتدا به پیش‌بینی سناریویی شرایط دمای حداقل، حداکثر و بارش روزانه ایستگاه‌های منتخب کلان‌شهر تهران (مهرآباد، ژئوفیزیک و شمیران) پرداخته شده است و سپس با میانگین‌گیری داده‌های (حداکثر دما، حداقل دما و بارش) ایستگاه‌های منتخب به عنوان

داده‌های میانگین شهر تهران و با استفاده از داده‌های میانگین شاخص‌های آلودگی هوای تهران به بررسی و تحلیل روابط همبستگی و رگرسیونی آنها با میانگین شاخص‌های آلودگی هوای تهران پرداخته و رفتار آلاینده‌های هوای تهران در سال‌های آینده از طریق پیش‌بینی سناریویی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۳-۱- پیش‌بینی سناریویی دما و بارش کلان‌شهر تهران

۳-۱-۱- حداقل دمای ایستگاه‌ها

با توجه به روش تحقیق، جهت ریز مقیاس نمایی داده‌های بزرگ‌مقیاس GCM با استفاده از مدل SDSM ابتدا می‌بایست یک رابطه و مدل مناسب بین متغیرهای بزرگ‌مقیاس (NCEP) و داده‌های ایستگاهی دوره حاضر جهت تعمیم به دوره آینده ایجاد نمود. رابطه رگرسیونی بین متغیرهای پیش‌بینی کننده (NCEP) و پیش‌بینی شونده (حداقل دما) برای ایستگاه‌های منتخب شهر تهران نشان داد، دمای حداقل روزانه با متغیرهای ارتفاع سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال و تاوایی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال و تاوایی سطح زمین بیشترین ارتباط را داشته‌اند (جدول ۳). پس از ایجاد معادله رگرسیونی و کالیبره کرده مدل بر روی ایستگاه‌ها در دوره ۱۹۹۱-۲۰۱۰، یک سری زمانی از حداقل دما برای ایستگاه‌های مورد مطالعه برای دوره ۲۰۱۱-۲۰۱۶ جهت صحت سنجی و قابلیت اطمینان مدل تولید شد. نتایج صحت سنجی مدل نشان داد، داده‌های دوره پایه حداقل دما و داده‌های تولید شده در دوره ۲۰۱۱-۲۰۱۶ از لحاظ میانگین و انحراف معیار دارای یک شباهت نسبی بوده و اختلاف کمی دارند (جدول ۱). از طرف دیگر میزان ارتباط بین داده‌های دوره پایه و داده‌های تولید شده با سطح معنی‌داری بسیار مطلوب و با ضریب همبستگی قوی بیانگر قابلیت و توان مدل برای تولید داده‌های حداقل دمای روزانه برای دوره آینده بوده است (شکل ۱).



شکل ۱- ارتباط بین داده‌های حداقل دمای ماهانه دوره پایه و تولید شده در دوره ۱۹۹۱-۲۰۱۶

با توجه به آنالیزهای آماری و نتایج ریز مقیاس نمایی داده‌های مدل HADCM3 میانگین دمای حداقل در تمامی ایستگاه‌های منتخب در دوره زمانی ۲۰۱۷-۲۰۴۷ با افزایش مواجهه بوده است. در دوره پیش‌بینی نیز، میانگین حداقل دمای ایستگاه‌های مورد مطالعه حدود ۱۲.۵ درجه سانتیگراد بوده و نتایج نشان می‌دهد بر اساس دو سناریوی RCP

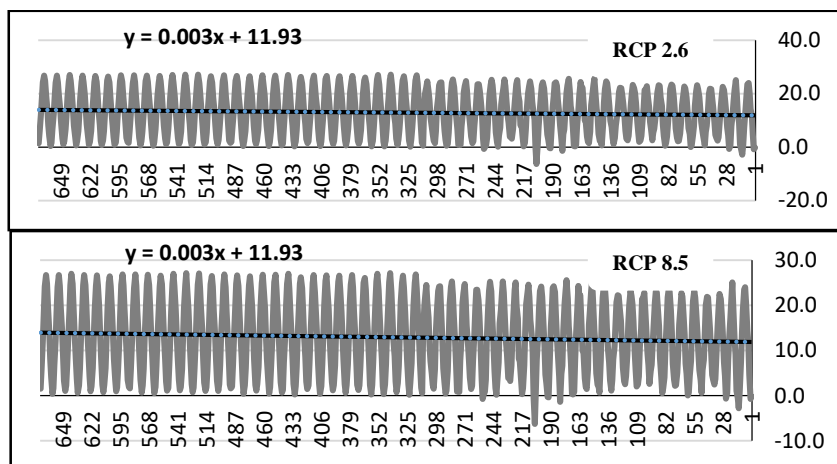
2.6 و RCP8.5 میانگین دمای تهران در دوره ۲۰۱۷-۲۰۴۷ به ترتیب به ۱۳٫۴ و ۱۳٫۸ درجه خواهد رسید. باین وجود سناریوی RCP8.5 نسبت به سناریوی RCP 2.6 شرایط بدبینانه تری را برای هر یک از ایستگاه‌ها به دنبال داشته است. جدول (۲) میانگین دمای حداقل و انحراف معیار آن را برای دوره ۲۰۱۷-۲۰۴۷ نشان می‌دهد و مقدار تغییرات حداقل دما در ایستگاه‌های منتخب در سی سال آینده نشان داد در هر دو سناریوی RCP 2.6 و RCP8.5 افزایش دما نسبت به داده‌های مشاهده شده رخ داده است (شکل ۲).

جدول ۱ - مقایسه آماری حداقل دمای ماهانه دوره پایه و تولید شده در دوره ۱۹۹۱-۲۰۱۶

نام ایستگاه	پارامتر	میانگین	انحراف معیار	ضریب همبستگی (R)	سطح معنی داری
مهرآباد	حداقل دما- مشاهداتی	۱۳٫۴	۸٫۷		۰
	حداقل دما- مدل شده	۱۳٫۷	۸٫۶	۰٫۹۹	
شمیران	حداقل دما- مشاهداتی	۱۱٫۱	۸٫۳		۰
	حداقل دما- مدل شده	۱۱٫۴	۸٫۵	۰٫۹۹	
ژئوفیزیک	حداقل دما- مشاهداتی	۱۲٫۵	۸٫۸		۰
	حداقل دما- مدل شده	۱۲٫۹	۸٫۷	۰٫۹۹	
میانگین کل ایستگاه‌ها	حداقل دما- مشاهداتی ۱۹۹۱-۲۰۱۶	۱۲٫۳	۸٫۶		۰
	حداقل دما- مدل شده ۱۹۹۱-۲۰۱۶	۱۲٫۵	۸٫۷	۰٫۹۹	

جدول ۲ - تغییرات حداقل دمای ماهانه داده‌های مشاهده شده و خروجی مدل

نام ایستگاه	پارامتر	دوره ۲۰۱۶-۱۹۹۱		دوره ۲۰۱۷-۲۰۴۷	
		میانگین	انحراف معیار	RCP8.5	RCP2.6
مهرآباد	میانگین حداقل دما	۱۳٫۵	۸٫۶	۱۳٫۹	۱۳٫۶
	انحراف معیار	۸٫۶	۸٫۶	۸٫۹	۹٫۱
شمیران	میانگین حداقل دما	۱۱٫۱	۸٫۴	۱۳٫۲	۱۳٫۱
	انحراف معیار	۸٫۴	۸٫۴	۸٫۹	۸٫۹
ژئوفیزیک	میانگین حداقل دما	۱۲٫۹	۸٫۷	۱۴٫۴	۱۳٫۵
	انحراف معیار	۸٫۷	۸٫۷	۹	۸٫۸
میانگین کل ایستگاه‌ها	میانگین حداقل دما	۱۲٫۵	۸٫۶	۱۳٫۸	۱۳٫۴
	انحراف معیار	۸٫۶	۸٫۶	۸٫۹	۸٫۹



شکل ۲- تغییرات میانگین ماهانه حداقل دمای تهران با سناریوی RCP 2.6 و RCP 8.5 (۱۹۹۱-۲۰۴۷)

۲-۱-۳- حداکثر دما

ارزیابی ارتباط بین متغیرهای بزرگ‌مقیاس (NCEP) و متغیر بیشینه دمای روزانه در ایستگاه‌های منتخب نشان می‌دهد که از بین تمامی متغیرهای موجود، تاوایی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال و ارتفاع سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال بیشترین ارتباط را با بیشینه دما دارند. در واقع نتیجه مدل و ارتباط بین متغیرها بیانگر این مطلب است که افزایش ارتفاع در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال و افزایش میزان تاوایی در این سطح همراه با افزایش دما در تهران می‌باشد. (جدول ۳). با توجه به اینکه برای صحت سنجی مدل ایجاد شده نیاز به تولید سری زمانی دما در دوره مشاهداتی می‌باشد، برای این کار همانند کمینه دما، دوره ۱۹۹۱-۲۰۱۰ به‌عنوان دوره کالیبراسیون و دوره ۲۰۱۱-۲۰۱۶ به‌عنوان دوره واسنجی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج داده‌های تولید شده نشان داد مدل ایجاد شده به‌طور نسبی دارای قابلیت مناسبی برای تولید سری به‌طور نسبی دارای قابلیت مناسبی تولید سری به‌طور نسبی دارای قابلیت مناسبی برای تولید سری داده‌های روزانه برای آینده داشته است (شکل ۳).

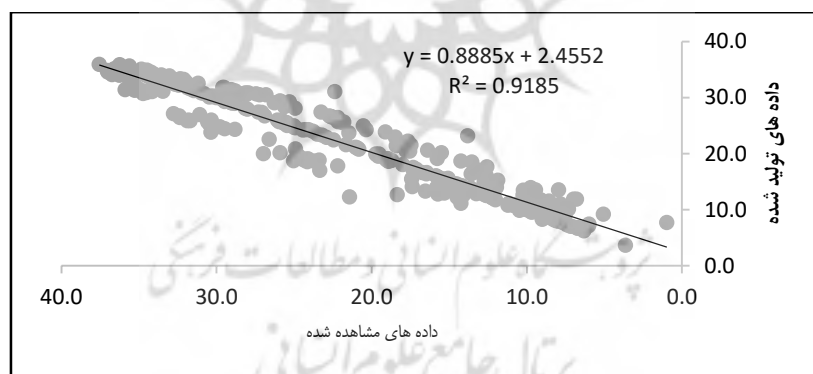
جدول ۳- ارتباط متغیرهای دما و بارش روزانه ایستگاه‌های مورد مطالعه با متغیرهای بزرگ‌مقیاس NCEP.

ردیف	نام متغیر	ایستگاه	ارتفاع سطح hp _{۵۰۰}	تاوایی سطح hp ۵۰۰	تاوایی سطح زمین	رطوبت نسبی سطح ۸۵۰	رطوبت ویژه سطح زمین
۱	حداقل دمای روزانه	فرودگاه مهرآباد	۰٫۸	۰٫۳۸	۰٫۵۶	...	...
۲		ژئوفیزیک	۰٫۴۸	۰٫۳۴	۰٫۷۴	...	...
۳		شمیران	۰٫۸۱	۰٫۴۱	۰٫۴۷	...	...
۴	حداکثر دمای روزانه	فرودگاه مهرآباد	۰٫۸۵	...	۰٫۳۶	...	...
۵		ژئوفیزیک	۰٫۶۴	...	۰٫۳	...	...
۶		شمیران	۰٫۷۱	...	۰٫۲۹	...	...

ادامه جدول ۳

ردیف	نام متغیر	ایستگاه	ارتفاع سطح hp۰۰	تاوایی سطح hp ۰۰۰	تاوایی سطح زمین	رطوبت نسبی سطح ۸۵۰	رطوبت ویژه سطح زمین
۷	بارش روزانه	فرودگاه مهرآباد	۰,۶۴	...	...	۰,۴۸	۰,۳۶
۸		ژئوفیزیک	۰,۵۸	...	...	۰,۳۸	۰,۳۴
۹		شمیران	۰,۶۱	...	...	۰,۴۴	۰,۳۳

جدول ۴ میزان همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و مدل شده در دوره ۲۰۱۱-۲۰۱۶ را نشان می‌دهد. طبق این جدول میزان میانگین دما و انحراف معیار در داده‌های مشاهداتی و داده‌های تولید شده دارای اختلاف قابل ملاحظه نبوده و سطح معنی داری همه داده‌های مشاهده شده نیز با داده‌های مدل شده در سطح ۰,۰۵ بسیار مطلوب بوده است. نتایج ریز مقیاس نمایی حداکثر دما برای ایستگاه‌های منتخب نیز نشان می‌دهد که دمای هوا در دوره ۲۰۱۶-۲۰۴۷ و بر اساس دو سناریوی مورد بررسی، دارای روند افزایشی خواهد بود. ریز مقیاس نمایی حداکثر دما برای ایستگاه‌های مختلف نیز روشن ساخته که دمای هوا در دوره ۲۰۱۶-۲۰۴۷ و بر اساس دو سناریوی مورد بررسی، دارای روند افزایشی خواهد بود (شکل ۴).



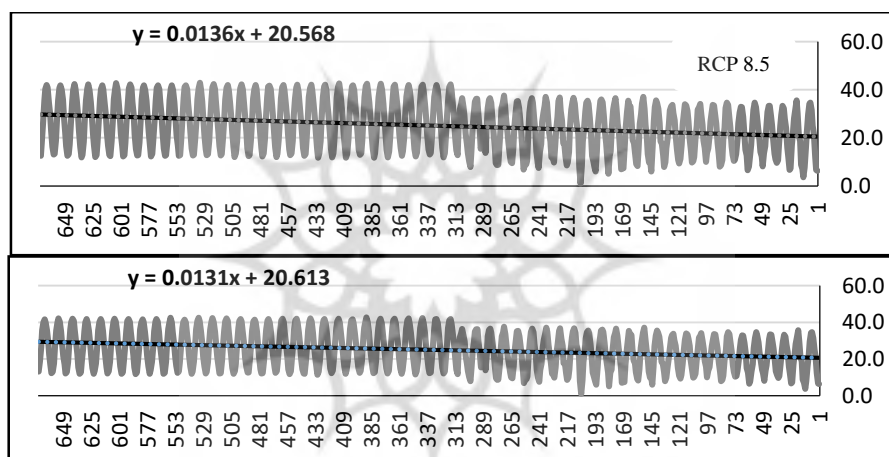
شکل ۳- ارتباط حداکثر دمای ماهانه مشاهداتی و تولید شده دوره ۱۹۹۱-۲۰۱۶

جدول ۴ - مقایسه آماری حداکثر دمای ماهانه دوره پایه و تولید شده در دوره ۱۹۹۱-۲۰۱۶

سطح معنی داری (۰,۰۵)	ضریب همبستگی	انحراف معیار	میانگین	پارامتر	نام ایستگاه
	(R)				
.		۱۰,۱	۲۳,۶	حداکثر دما- مشاهداتی	مهرآباد
	۰,۹۲	۱۰,۵	۲۳	حداکثر دما- مدل شده	

ادامه جدول ۴

نام ایستگاه	پارامتر	میانگین	انحراف معیار	ضریب همبستگی	سطح معنی‌داری (۰,۰۵)
				(R)	
شمیران	حداکثر دما- مشاهداتی	۲۲,۲	۱۰,۲	۰,۹۲	
	حداکثر دما- مدل شده	۲۲,۶	۱۰,۲		
ژئوفیزیک	حداکثر دما- مشاهداتی	۲۳,۴	۱۰,۵	۰,۹۳	
	حداکثر دما- مدل شده	۲۲,۸	۱۰,۴		
میانگین کل ایستگاه‌ها	حداکثر دما- مشاهداتی ۱۹۹۱-۲۰۱۶	۲۳	۹,۶	۰,۹۲	
	حداکثر دما- مدل شده ۱۹۹۱-۲۰۱۶	۲۱	۸,۹		



شکل ۴ - تغییرات میانگین ماهانه حداکثر دمای شهر تهران با سناریوی RCP 2.6 و RCP 8.5 از سال ۱۹۹۱-

۳-۱-۳- بارش ایستگاه‌ها

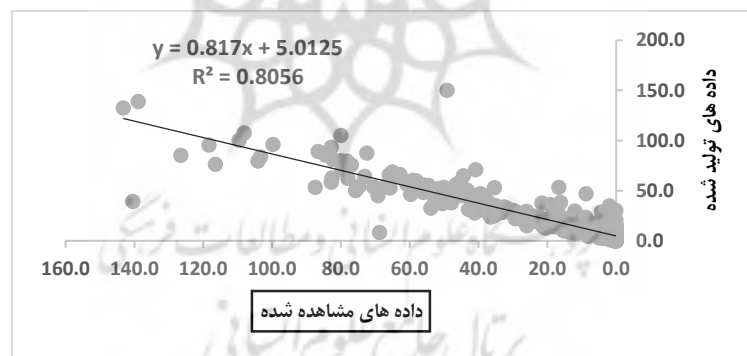
با توجه به رابطه بین داده‌های بارش روزانه در دوره مشاهداتی و داده‌های روزانه (NCEP)، بیشترین ارتباط متغیرهای بزرگ‌مقیاس (پیش‌بینی‌کننده) با بارش روزانه (پیش‌بینی شونده) مربوط به تاوایی سطح ۵۰۰، رطوبت سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال و رطوبت نسبی سطح ۸۵۰ می‌باشد (جدول ۵). با این ویژگی‌ها، مدل مورد نظر برای ایجاد داده‌های بارش روزانه در دهه‌های آینده و همچنین دوره صحت‌سنجی تحت تأثیر متغیرهای فوق خواهد بود. در مجموع میزان ارتباط متغیرهای بزرگ‌مقیاس با داده‌های روزانه بارش در دوره ۱۹۹۱-۲۰۱۶ به‌طور قابل ملاحظه کمتر از میزان ارتباط آنها با داده‌های روزانه دما در ایستگاه‌های مورد مطالعه بوده است. این امر می‌تواند میزان دقت در تولید داده‌های بارش روزانه آینده را تحت تأثیر قرار دهد. برای صحت‌سنجی مدل ایجاد شده، داده‌های بارش دوره ۲۰۱۱-

۲۰۱۶ به عنوان دوره صحت سنجی انتخاب و با توجه به مدل رگرسیونی داده‌های مشاهده شده با متغیرهای بزرگ مقیاس جدول فوق، داده‌های روزانه بارش تولید شد (شکل ۵). بر اساس این شکل، ارتباط داده‌های مشاهده شده و تولید شده مطلوب بوده و میزان ضریب کنترل این داده‌ها

جدول ۵ - مقدار همبستگی جزئی بین بارش روزانه و متغیرهای بزرگ مقیاس (NCEP)

ردیف	ایستگاه	ارتفاع سطح hp500	رطوبت نسبی سطح ۸۵۰	رطوبت ویژه سطح زمین
۱	فرودگاه مهرآباد	۰,۶۴	۰,۴۸	۰,۳۶
۲	ژئوفیزیک	۰,۵۸	۰,۳۸	۰,۳۴
۳	شمیران	۰,۶۱	۰,۴۴	۰,۳۳

حدود $R=0,80$ بوده است. همچنین میانگین روزانه و انحراف معیار داده‌های بارش روزانه مشاهداتی و تولید شده را نشان می‌دهد. بر اساس جدول ۶ نیز میانگین بارش ماهانه برای دوره مشاهداتی حدود ۲۶,۷ میلی‌متر و برای داده‌های تولید شده حدود ۲۶,۴ میلی‌متر می‌باشد. این مقادیر به همراه مقادیر انحراف معیار بارش مشاهداتی و تولید شده نشان می‌دهد، مدل مورد نظر به طور مطلوب کارایی و توانایی بازسازی داده‌های روزانه بارش را برای دوره آینده دارا می‌باشد.



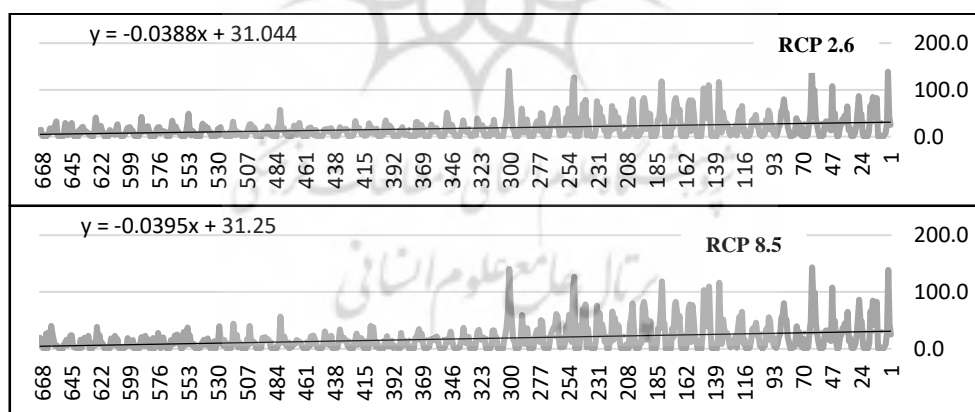
شکل ۵ - ارتباط بین داده‌های بارش ماهانه دوره پایه و تولید شده در دوره ۱۹۹۱-۲۰۱۶

نتایج ریزمقیاس نمایی بارش روزانه ایستگاه‌های مورد مطالعه برای دوره ۲۰۱۷-۲۰۴۷ نشانگر تغییرات در مقادیر بارش بوده و بر اساس خروجی سناریوهای مورد نظر، همه ایستگاه‌ها مورد مطالعه با کاهش بارش در سال‌های آینده رو به رو خواهد بود (شکل ۶).

جدول ۶ - مقایسه آماری بارش ماهانه دوره پایه و تولید شده در دوره ۱۹۹۱-۲۰۱۶

نام ایستگاه	پارامتر	میانگین	انحراف معیار	ضریب همبستگی (R)	سطح معنی‌داری
مهرآباد	بارش - مشاهداتی	۱۷,۱	۱۹,۶	۰,۸۲	۰,۰۳
	بارش - مدل شده	۱۶,۶	۱۹,۴		
شمیران	بارش - مشاهداتی	۳۳,۵	۳۳,۴	۰,۷۸	۰,۰۵
	بارش - مدل شده	۳۲,۹	۳۳,۴		
ژئوفیزیک	بارش - مشاهداتی	۲۹,۶	۴۹,۹	۰,۷۹	۰,۰۴
	بارش - مدل شده	۲۹,۹	۵۰,۹		
میانگین کل ایستگاه‌ها	بارش - مشاهداتی ۱۹۹۱-۲۰۱۶	۲۷,۷	۲۹,۷	۰,۸۰	۰,۰۴
	بارش - مدل شده ۱۹۹۱-۲۰۱۶	۲۶,۴	۲۶,۸		

اساس خروجی مدل SDSM حاصل از ریز مقیاس نمایی داده‌های مدل HADCM3، میانگین بارش ماهانه ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره ۲۰۱۷-۲۰۴۷ تحت سناریوی RCP8.5 (شرایط بدبینانه) حدود ۲۰,۹ میلی‌متر، تحت سناریوی RCP 2.6 (شرایط خوش بینانه) حدود ۲۲,۱ میلی‌متر می‌باشد. این در حالی است که میانگین بارش ماهانه در دوره مشاهداتی ۱۹۹۱-۲۰۱۶ حدود ۲۵,۵ میلی‌متر بوده که با توجه شکل‌های زیر روند نزولی را طی سالیان آینده نشان می‌دهد.



شکل ۶ - تغییرات میانگین ماهانه بارش شهر تهران با سناریوی RCP 2.6 و RCP 8.5 از سال ۱۹۹۱-۲۰۴۷

برای ارزیابی و تحلیل سناریوی آلاینده‌های هوای شهر تهران، با توجه به نتایج این بررسی‌ها و میانگین داده‌های سناریوی این عناصر و استفاده از میزان روابط و همبستگی و معادلات رگرسیونی به تولید داده‌های سناریوی متغیرهای وابسته یعنی شاخص‌های متوسط آلودگی هوای تهران به تحلیل و ارزیابی سناریوی این متغیرها پرداخته

شد. برای بررسی این موضوع، با توجه به پایه آماری شاخص‌های آلودگی که از سال ۲۰۰۶ و داده‌ها روزانه بوده، پارامترهای هواشناسی نیز بر همین مبنا انتخاب و روابط آن‌ها مورد تحلیل قرار گرفته است.

۲-۳- پیش‌بینی سناریویی آلودگی هوای کلان‌شهر تهران

روابط بین پارامترهای ثبت شده و موجود هواشناسی و آلودگی هوا نشان می‌دهد (جدول ۷) که بیشتر شاخص‌های آلودگی هوا با متغیرهای حداقل و حداکثر دما ارتباط معناداری داشته‌اند. به طوری که روابط شاخص CO_2 با متغیرهای متوسط حداقل و حداکثر دمای هوا نشان از همبستگی مطلوب بوده که سطح معنی‌داری آن به ترتیب 0.003 و 0.009 بوده است. در خصوص شاخص آلودگی O_3 نیز روابط این پارامتر با متغیرهای هواشناسی نشان از ارتباط آن با متوسط حداقل و حداکثر دما هوا (با سطح معنی‌داری 0.02 و 0.025) بوده است. در بین شاخص‌های مختلف آلودگی، شاخص‌های NO_2 و $PM_{2.5}$ هیچ گونه رابطه و همبستگی با متغیرهای هواشناسی نداشتند. در مورد شاخص آلودگی هوا PM_{10} نیز این شاخص با حداقل و حداکثر دما هوای ارتباط مناسبی نشان داده است که سطح معنی‌داری آن نیز زیر 0.05 بوده است.

جدول ۷ - روابط متغیرهای آلودگی و هواشناسی تهران در بازه زمانی ۲۰۰۶-۲۰۱۶

شاخص‌ها	متوسط حداقل دما	متوسط حداکثر دما	متوسط مجموع بارندگی
CO₂	Pearson Correlation	۰,۲۵۹	۰,۱۶۷-
	Sig. (2-tailed)	۰,۰۰۳	۰,۰۵۹
	N	۴۰۱۸	۴۰۱۸
O₃	Pearson Correlation	۰,۱۹۸	۰,۱۳۸-
	Sig. (2-tailed)	۰,۰۲۳	۰,۱۱۶
	N	۴۰۱۸	۴۰۱۸
NO₂	Pearson Correlation	۰,۰۶۴	۰,۰۹۴-
	Sig. (2-tailed)	۰,۴۶۵	۰,۲۸۴
	N	۴۰۱۸	۴۰۱۸
SO₂	Pearson Correlation	۰,۰۹۵	۰,۰۶۹-
	Sig. (2-tailed)	۰,۹۷۸	۰,۴۳۴
	N	۴۰۱۸	۴۰۱۸
PM₁₀	Pearson Correlation	۰,۲۴۷	۰,۱۹۷-
	Sig. (2-tailed)	.004	.064
	N	۴۰۱۸	۴۰۱۸

باتوجه به کیفیت روابط و همبستگی شاخص‌های آلودگی هوای تهران با متغیرهای هواشناسی منتخب، مشخص شد که تنها شاخص‌های آلودگی CO_2 ، O_3 و PM_{10} با متغیرهای هواشناسی ارتباط داشته‌اند. بنابراین با کمک داده‌های سناریویی و تولید شده متغیرهای هواشناسی تهران در دوره زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۴۷ تحت سناریوهای خوش بینانه RCP 8.5 و بدبینانه RCP 2.6، ابتدا به تحلیل رگرسیون داده‌های موجود شاخص‌های آلودگی هوا و پارامترهای هواشناسی پرداخته و با توجه به معادلات رگرسیونی بدست آمده به تولید داده‌های آلودگی هوا و تحلیل سناریویی هریک از آنها پرداخته شد.

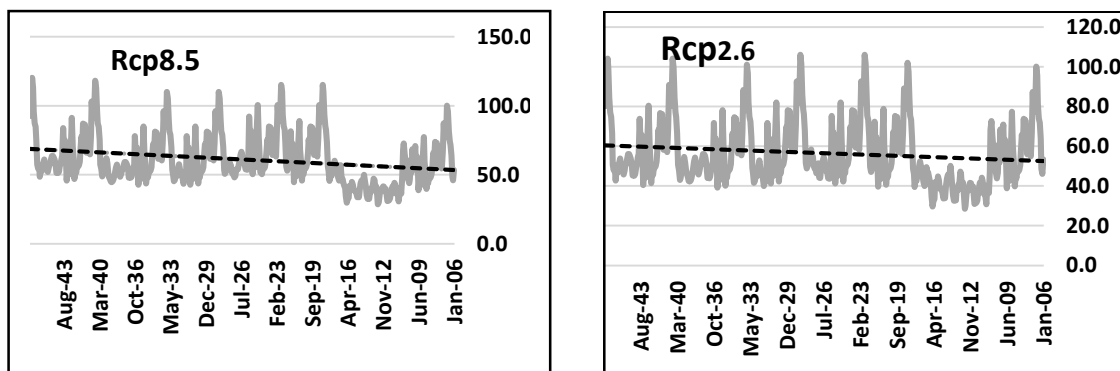
شاخص CO_2 : با توجه به همبستگی این شاخص با متوسط حداقل و حداکثر دمای هوا و ضرایب بدست آمده در جدول ضرایب رگرسیونی این شاخص (جدول ۸) معادله رگرسیونی زیر برای تولید داده‌های CO_2 برای دوره زمان ۲۰۱۷ تا ۲۰۴۷ استفاده شد:

$$Y = 52.9 + 1.74_{mindama} - 1.13_{maxdama} \quad (\text{رابطه ۱})$$

جدول ۸ - ضرایب رگرسیونی شاخص‌های آلودگی

سطح معنی داری	t	ضرایب استاندارد نشده		شاخص	
		Beta	Std. Error	B	
۰	8.779		۶,۰۲۶	۵۲,۹۰۹	(Constant)
۰,۰۰۲	۲,۲۵۶	۱,۰۱۱	۰,۷۷۳	۱,۷۴۴	حداقل دما
۰,۰۰۹	-۱,۷۰۹	-۰,۷۶۶	۰,۶۶۴	-۱,۱۳۴	حداکثر دما
۰	۵,۱۹۸		۶,۷۶	۳۵,۱۶	(Constant)
۰,۲۳	۰,۳۵۱	۰,۱۶۱	۰,۸۶	۰,۳۰۴	حداقل دما
۰,۰۲۵	۰,۰۸۱	۰,۰۳۷	۰,۷۴۵	۰,۰۶	حداکثر دما
۰	۱۳,۱۵۱		۴,۵۵۶	۵۹,۹۲	(Constant)
۰,۰۰۴	۰,۸۷۲	۰,۳۹۷	۰,۵۸۴	۰,۵۱	حداقل دما
۰,۰۰۶	-۰,۳۳۴	-۰,۱۵۲	۰,۵۰۲	-۰,۱۶۸	حداکثر دما

با توجه به معادله رگرسیونی بدست آمده و تولید داده‌ها به صورت ماهانه تا سال ۲۰۴۷، شکل روند این شاخص در حالت‌های خوش بینانه RCP 8.5 و بدبینانه RCP 2.6 ترسیم شد (شکل ۷) که نشان داد در سناریوی RCP 2.6، روند این شاخص در ارتباط با حداقل و حداکثر دما دارای سیر بطنی افزایشی بوده و از معنا داری خاصی هم برخوردار نیست. در حالی که در سناریوی بدبینانه یعنی RCP 2.6 این روند نمود بیشتری داشته به طوری که نشان دهنده سیر صعودی مقدار CO_2 در سی سال آینده می‌باشد.



شکل ۷- روند ماهانه شاخص CO2 در سناریوی RCP 2.6 و RCP 8.5 در دوره ۲۰۰۷-۲۰۴۷

شاخص O3: با توجه به همبستگی این شاخص با متوسط حداقل و حداکثر دمای هوا و ضرایب بدست آمده در جدول ضرایب رگرسیونی این شاخص (جدول ۸) برای تولید داده‌ها برای دوره زمان ۲۰۱۷ تا ۲۰۴۷ به صورت زیر می‌باشد:

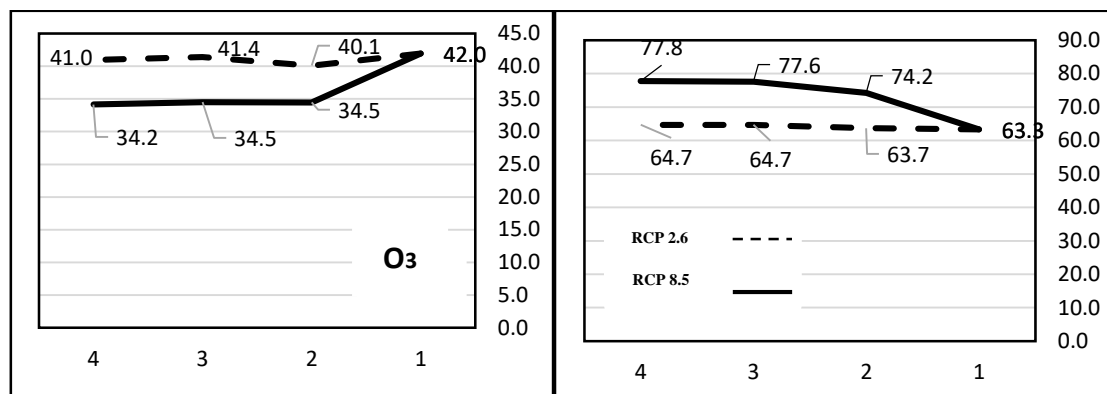
$$Y = 35.16 + 0.304mindama + 0.06maxdama \quad (\text{رابطه ۲})$$

با توجه به این معادله رگرسیونی و تولید داده‌ها به صورت ماهانه تا سال ۲۰۴۷ به بررسی سناریوهای خوش بینانه RCP 8.5 و بدبینانه RCP 2.6 پرداخته شد. همانطور که در شکل دهه‌ای این پارامتر (شکل ۸) مشاهده می‌شود، در سناریوی RCP 8.5 روند این شاخص در ارتباط با حداقل و حداکثر دما دارای سیر آرام کاهشی بوده و از نمود واضحی هم برخوردار نیست. در حالی که در سناریوی بدبینانه یعنی RCP 2.6 این روند بدون تغییر را در سال‌های آتی نشان داده است.

شاخص PM10: با توجه به ارتباط و همبستگی شاخص PM10 با متوسط حداقل و حداکثر دمای هوا و ضرایب رگرسیونی محاسبه شده در جدول (۴-۳۳)، معادله رگرسیونی زیر برای تولید داده‌ها برای دوره زمان ۲۰۱۷ تا ۲۰۴۷ بدست آمد:

$$Y = 59.92 + 0.51mindama - 0.168maxdama \quad (\text{رابطه ۳})$$

با معادله رگرسیونی بدست آمده و تولید داده‌ها به صورت ماهانه تا سال ۲۰۴۷، مشخص شد که در سناریوی بدبینانه RCP 8.5 روند این شاخص در ارتباط با حداقل و حداکثر دما دارای سیر کاهشی در دهه اول و سپس روند ثابت در دهه‌های بعد را نشان داده است ولی در سناریوی خوشبینانه یعنی RCP 2.6 نیز شکل خطی و روند کلی شاخص تقریباً بدون تغییر و سیر بدون نوسان خاصی را برای سالیان بعد نشان داده است (شکل ۸).



شکل ۸ - روند دهه‌ای شاخص O₃ و PM₁₀ در سناریوی RCP 2.6 و RCP 8.5 در دوره ۲۰۰۷-۲۰۴۷

۴- جمع‌بندی

تحلیل سناریویی داده‌های هواشناسی کلان‌شهر تهران با ریز مقیاس‌نمایی داده‌های مدل HADCM3 و روش آماری SDSM روی داده‌های روزانه حداقل دما، حداکثر دما و مجموع روزانه بارندگی در ایستگاه‌های منتخب یعنی فرودگاه مهرآباد، شمیران و ژئوفیزیک تحت دو سناریوی خوشبینانه و بدبینانه RCP 2.6 و RCP 8.5 انجام شد. در ادامه با کمک پیش‌بینی‌های سناریویی انجام شده از متغیرهای هواشناسی به تحلیل سناریویی آلاینده‌های هوای تهران به روش‌های همبستگی و رگرسیونی پرداخته شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد اولاً روند دمای هوای (حداقل دما و حداکثر دما) در سالیان آینده روند افزایشی (بطئی و نسبی) داشته و نشان از گرم‌تر شدن کلی هوای تهران در هر دو سناریوی RCP 2.6 و RCP 8.5 می‌دهد و در مورد بارندگی نیز با توجه به سیر نزولی مقدار بارندگی در سناریوهای فوق، تهران افزایش خشکی هوا و کاهش نزولات جوی در سال‌های آینده را تجربه خواهد کرد. ثانیاً از بین همه شاخص‌های آلودگی هوا، شاخص‌های CO₂، O₃ و PM₁₀، با عناصر آب‌وهوایی ارتباط معناداری داشته و نتایج بررسی این موضوع نیز نشان داده که تنها شاخص CO₂ در هر دو سناریو به‌ویژه سناریوی RCP 8.5 در سال‌های آتی روند افزایشی خواهد داشت و در شاخص‌های O₃ و PM₁₀ نیز مقدار آنها در سناریوهای خوشبینانه و بدبینانه تغییرات محسوس افزایشی یا کاهش‌ی نشان نداده است.

در نهایت بررسی روند آلودگی هوای تهران و تناسب آن با عناصر آب‌وهوایی با استفاده از مدل SDSM و تحت دو سناریوی خوشبینانه و بدبینانه RCP 2.6 و RCP 8.5، نشان داد که روند دمای هوای (حداقل دما و حداکثر ماه) در سالیان آینده روند افزایشی (بطئی یا نسبی) داشته و این امر نشان از گرم‌تر شدن کلی هوای تهران در هر دو سناریوی RCP 2.6 و RCP 8.5 در سال‌های آتی می‌دهد. در مورد بارندگی نیز با توجه به سیر نزولی مقدار بارندگی در سناریوهای فوق، میزان افزایش خشکی هوا و کاهش نزولات جوی در سال‌های آینده محتمل خواهد بود. تحلیل سناریویی آلاینده‌های هوای تهران نیز نشان داده که تنها برخی از آلاینده‌های هوا (یعنی شاخص‌های CO₂، O₃ و

PM10) با متغیرهای هواشناسی (حداقل و حداکثر دمای روزانه) ارتباط معناداری داشته که بررسی رگرسیونی و پیش بینی سناریوی این شاخص ها نشان داده که شاخص CO2 در هر دو سناریو به ویژه سناریوی RCP 2.6 در سال های آتی روند افزایشی خواهد داشت ولی در شاخص های O3 و PM10، مقدار آنها در سناریوهای خوشبینانه و بدبینانه تغییرات محسوس افزایشی یا کاهشی را در سال های بعد نشان نداده است.

بنابراین با توجه به رخداد علائم تغییر شرایط آب و هوایی به ویژه تغییرات مثبت دمایی در کلان شهر تهران و ارتباط مثبت تغییر شرایط آب و هوایی به ویژه پارامترهای دمایی با شاخص های آلودگی هوا در نتیجه پیش بینی های سناریوی باید گفت، آلاینده های هوای تهران، در سال های آینده تغییر افزایشی یا ثابتی خواهند داشت و باید موضوع تغییر آب و هوا و آلودگی هوای تهران و تبعات زیست محیطی، اجتماعی، اقتصادی و سیاسی آن را به عنوان یک موضوع مهم و حیاتی برای زندگی شهروندان تهران در برنامه ریزی های کلان شهر تهران به عنوان پایتخت ایران در نظر گرفت.

کتابنامه

- اسماعیل نژاد، مرتضی؛ اسکندری ثانی، محمد؛ بارزمان، سپیده؛ ۱۳۹۴. ارزیابی و پهنه بندی آلودگی هوای کلان شهر تبریز. فصلنامه برنامه ریزی منطقه ای. دوره. شماره ۱۹. ص ۱۷۳.
- اعطاف، سمیه سادات؛ ۱۳۹۵. بررسی تغییرات زمانی و مکانی بارش سالانه کشور بر اساس مدل گردش عمومی جو و SDSM. پایان نامه کارشناسی ارشد. مهندسی کشاورزی. دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی. دانشگاه ملایر. ص ۸
- اکبری، الهه؛ فاخری، معصومه؛ پورغلامحسین، غفت؛ اکبری، زهرا؛ ۱۳۹۴. پهنه بندی ماهانه میزان آلودگی هوا و بررسی نحوه ارتباط آن با عوامل اقلیمی (مطالعه موردی: شهر مشهد). محیط زیست طبیعی (منابع طبیعی ایران). شماره. دوره ۶۸. ص ۵۳۳.
- جاوید، معصومه؛ ۱۳۹۱. توزیع مکانی و تغییرات فصلی نشست آلاینده های هوا در ایستگاه های هواشناسی انتخابی استان تهران. پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی کشاورزی. دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی. دانشگاه تربیت مدرس.
- جوانبخت امیری، ستاره؛ خاتمی، سید هادی؛ ۱۳۹۱. بررسی ارتباط بین آلاینده های شاخص کیفیت هوا و پارامترهای هواشناسی در تهران با رویکرد آنالیز رگرسیون. فصلنامه انسان و محیط زیست. شماره ۲۰. ص ۲۰.
- رنجبر، فریبرز؛ ۱۳۹۵. شبیه سازی روند شاخص های حدی دما و بارش ایران. پایان نامه دوره دکتری آب و هواشناسی. دانشکده جغرافیا. دانشگاه تهران. ص ۱۱.
- روشن، غلامرضا؛ خوش اخلاق، فرامرز؛ نگهبانی، سعید؛ میرکتولی، جعفر؛ ۱۳۸۸. تأثیر آلودگی هوا بر نوسانات اقلیمی شهر تهران. علوم محیطی. دوره ۷. شماره ۱. ص ۱۷۳.
- زبردست، اسفندیار؛ ریاضی، حسین؛ ۱۳۹۴. شاخص های محیط انسان ساخت و تأثیرات آن بر آلودگی هوا (مطالعه موردی: محدوده پیرامونی چهارده ایستگاه سنجش کیفیت هوا در شهر تهران). هنرهای زیبا- معماری و شهرسازی. دوره ۲۰. شماره ۱. ص ۵۵.

شهرداری تهران؛ ۱۳۸۹. اطلس کلان‌شهر تهران (<http://atlas.tehran.ir/>)
 عیسی لو، علی اصغر؛ شاهمرادی، بهزاد؛ بهرامی، سیروان؛ سادات آقامیری، معصومه؛ ۱۳۹۰. آسیب‌پذیری فضایی و بحران
 آلودگی هوا در کلان‌شهر تهران. تهران: سومین همایش ملی عمران شهری. ص ۱۲۶.
 کاویانی، محمدرضا؛ ۱۳۹۱. میکروکلیماتولوژی. تهران: انتشارات سمت. ص ۱۲۲.
 منتظری، مریم؛ فهمی، هدایت؛ ۱۳۸۲. اثرات تغییر آب‌وهوا بر منابع آب کشور. تهران: مجموعه مقالات سومین کنفرانس
 منطقه‌ای تغییر آب‌وهوا. ص ۲۸.
 نوروزی، اصغر؛ محمدی؛ ۱۳۹۳. پهنه‌بندی آلودگی هوای شهر اصفهان با استفاده از نرم افزار GIS و شاخص کیفیت
 هوا (AQI). اولین همایش ملی محیط‌زیست. دانشگاه پیام نور واحد دهقان. ص ۶۹.

- Allen, M.R., 2004. Observational Constraints on Future Climate, Robust from model dependent statement of uncertainty in climate forecasting, Contribution to the IPCC workshop on communicating uncertainty and risk: 6.
- Daniel J. Jacob a, Darrell A. Winner., 2009. Effect of climate change on air quality, Atmospheric Environment, vol 43:51.
- Edwards, J.M. and Slingo A., 1996. Studies with a flexible new radiation code 1: Choosing a configuration for a large-scale model. Q.J.R. Met. Soc., 122: 689-719.
- Fenger, J., 2002, Urban air quality, Developments in Environmental Science, Vol 1:8.
- Gemmer, M., ischer, T., 2014. Statistical downscaling and future scenario generation of temperatures for Pakistan Region. Theor Appl Climatol. DOI 10.1007/s00704-014-1176-1.
- Kabiri, R., Ramani Bai, V., Chan, A., 2015. Assessment of hydrologic impacts of climate change on the runoff trend in Klang Watershed. Environmental Earth Science Journal, Vol 73:27.
- Kazemi, D.H., Jianping Li, J., Rasul, G., Jiang Tong, J. Ali, G., Cheema S.B., Lulu Liu, L., Park, D.H., Han, K.B., and Kang, I.J., 2012. The Visualization by Analyzing the Relationship between the Air Pollutants and Climatic Factors using GIS. Proceedings of International conference on disaster management. <http://iiir.ualgary.ca/>. Kumamoto, Japan. August- 2017 - 26.
- Peel, J. L., Haeuber, R. Garcia, V. Russel, A. G. Neas, L., 2012. Impact of nitrogen and climate change interactions on ambient air pollution and human health. Biogeochemistry. Open access at pringerlink.com. DOI 10.1007/s10533-012-9782-4.
- Zamani Nuri, A. Farzaneh, M. Espanayi, K., 2014. Assessment of climatic parameters uncertainty under effect of different downscaling techniques. International Research Journal of Applied and Basic Sciences. Vol 8. No 9:1316.
- Zulkarnain, H., Shamsudin, S. Sobri, H., 2014. Application of SDSM and LARS-WG for simulating and downscaling of rainfall and temperature, Theor. Appl. Climatol. Vol 116:243.