

بررسی روند وارونگی‌های دمایی کلان‌شهرهای ایران (تهران، مشهد، و تبریز)

نسرین حسین‌آبادی - دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه سیستان و بلوچستان
تقی طاوسی* - استاد اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه سیستان و بلوچستان
عباس مفیدی - استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد
محمود خسروی - استاد اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۹/۲

چکیده

هدف از این پژوهش بررسی روند وارونگی دمای لایه مرزی کلان‌شهرهای تهران، مشهد، و تبریز است. در این راستا، از داده‌های پیمایش قائم جو سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۱۷ ۲۰ ساعت صفر (۰۰) ایستگاه‌های هواشناسی تهران، مشهد، و تبریز از پایگاه داده‌های اقلیمی وایومینگ استفاده شد. برای تعیین انواع وارونگی دما، نمودارهای تفی‌گرام داده‌های جو بالا با استفاده از نرم‌افزار RAOB ترسیم شد. سه نوع وارونگی تابشی، فرونشستی و جبهه‌ای به‌عنوان سه تیپ اصلی و چهار نوع دیگر به‌عنوان تیپ‌های ترکیبی متشکل از این سه نوع وارونگی مشخص و توزیع زمانی فراوانی و درصد هر یک از ۷ تیپ وارونگی در هر ماه محاسبه شد. روند یازده‌ساله هر یک از تیپ‌های وارونگی با استفاده از روش ناپارامتریک من-کندال و تخمینگر شیب سن تعیین و مقایسه شد. نتایج نشان داد تیپ وارونگی تابشی در همه ایستگاه‌ها کاهش معنادار در سطح اطمینان ۰/۰۱ ($Z > 2.58$) و برعکس وارونگی فرونشستی روند افزایشی معناداری در سطح اطمینان ۰/۰۵ ($z > 1.96$) نشان داده است. از میان تیپ‌های ترکیبی، تیپ تابشی-فرونشستی روند افزایشی معنادار داشت. در مجموع، نوع تیپ‌های وارونگی در دوره ۲۰۰۷-۲۰۱۷ از تیپ‌های وارونگی خالص به تیپ‌های ترکیبی و چندلایه و به‌طور شاخص تیپ تابشی-فرونشستی تغییر یافته است.

واژگان کلیدی: آزمون من-کندال، شدت وارونگی، شیب سن استیمیتور، وارونگی دما.

مقدمه

معمولاً، در تروپوسفر دمای هوا با ازدیاد ارتفاع کاهش می‌یابد، زیرا مقداری از گرما، که از خورشید به‌صورت انرژی تابشی به زمین می‌رسد، جذب خاک و ذخیره می‌شود. بنابراین، با افزایش فاصله از سطح زمین، دمای هوا کمتر خواهد شد (تقریباً ۰/۶ درجه سلسیوس به ازای هر ۱۰۰ متر). اما بررسی‌های روزانه جو نشان می‌دهد در بسیاری از موارد، حالت عکس مشاهده می‌شود که به این حالت وارونگی دما یا اینورژن^۱ گویند (وئوقی و صراف‌زاده، ۱۳۹۰).

پدیده وارونگی با پایداری شدید هوا همراه است؛ بدین معنی که هوای سرد و سنگین در پایین و هوای گرم و سبک در بالا قرار می‌گیرد. بنابراین، امکان مخلوط‌شدن و تهویه هوا میسر نمی‌شود. چرخه روزانه گرم‌کردن روز توسط خورشید و خنک‌شدن در شب باعث ایجاد دوره‌های بی‌ثباتی و ثبات در جو می‌شود. در طول روز، تابش خورشید زمین را گرم می‌کند که به نوبه خود هوا را در نزدیکی سطح زمین گرم می‌کند. چنین هوایی با نیروهای شناوری تا جایی که درجه حرارت آن و از این رو چگالی آن برابر با هوای اطراف شود تمایل به صعود پیدا می‌کند. در هنگام شب، سرمایش گسیل

Email: t.tavousi@gep.usb.ac.ir

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۳۳۰۸۵۱۰۶

1. Inversion

تابش بلند موج سطح زمین نسبت به هوای بالای سر آن بسیار سریع‌تر است. در نتیجه، هوای متراکم و سردی در نزدیکی سطح زمین انباشته می‌شود که می‌تواند لایه مرزی بسیار پایداری به وجود آورد. در این شرایط، زایش جریان‌های تلاطمی و شارهای عمودی به شدت متوقف می‌شود و سطح زمین به صورت مکانیکی از هواسپهر آزاد جدا می‌شود. به‌هرروی، در چنین شرایطی انتقال انرژی تابشی می‌تواند رخ دهد (طاوسی، ۱۳۹۷).

خنک‌شدن سطح زمین دمای هوای نزدیک به زمین را کاهش می‌دهد و افت محیطی دما یا لپس ریت (کاهش دما با افزایش ارتفاع) واقعی را کاهش می‌دهد و در بسیاری از موارد باعث ایجاد یک وارونگی (لایه‌ای از جو که در آن نرخ لپس ریت واقعی منفی است) در هوا با افزایش ارتفاع می‌شود. این عامل، همراه با مدت و میزان تابش خورشید، پستی و بلندی سطح زمین، مراکز کم‌فشار و پُرفشاری که در مناطق مختلف به وجود می‌آید و دیگر عوامل هواشناختی سبب ایجاد پدیده‌های چنان ثابت و مشخصی در سطح زمین و لایه‌های هوای پیرامون آن می‌شود که از دیرباز مبنای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری افراد و گروه‌ها در انتخاب محل سکونت، کشاورزی، و دیگر فعالیت‌های انسانی بوده است.

پارامترهای آب و هوایی، از جمله پدیده وارونگی دما، بر تشدید غلظت آلاینده‌های شهرهای صنعتی تأثیر می‌گذارد و از عوامل مهم آلودگی هواست (چاپلکا و پن، ۲۰۰۷: ۸۶). در نتیجه، با توجه به اهمیت پایداری هوا در بروز مسائل جوی یاد شده، مطالعه انواع وارونگی‌های دمایی و بررسی شدت و روند آنها در کلان‌شهرهای ایران و اقدامات پیشگیرانه از اهمیت بسیاری برخوردار است.

تاکنون، بیشتر مطالعات در زمینه وارونگی دمای هوا و ارتباط آن با کیفیت هوای شهری بوده است. یاسمین (۲۰۱۱) در پژوهشی با نام بررسی تغییرات لایه وارونگی دما طی سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۰۹ و تأثیر آن بر کیفیت هوا در شهر ساحلی کراچی پاکستان نشان داد که بیشترین فراوانی وقوع وارونگی‌های دمایی در فصل مونسون (جولای تا سپتامبر) روی کراچی به وقوع پیوسته است و بیشترین رخدادها در شب و ساعات ۰۰ و ۱۲ گرینویچ اغلب در ماه‌های تابستان و به‌طور عمده در ترازهای ۸۵۰ الی ۹۵۰ هکتوپاسکال بوده است. زنگ و ژانگ (۲۰۱۷) با مطالعه تأثیر عناصر هواشناسی بر تداوم آلودگی‌های شدید در منطقه چنگدو چین نشان دادند که نه تنها فاکتورهای هواشناسی سطحی، بلکه ساختار لایه مرزی و وارونگی‌های دمایی نقش مهمی در انتشار عمودی آلاینده ایفا کرده‌اند. برومرو شولتز (۲۰۱۵) به تجزیه و تحلیل داده‌های هفت‌ساله ایستگاه هواشناسی هامبورگ پرداختند. وارونگی دمای اندازه‌گیری شده در ارتفاع ۲۸۰ متری در این ایستگاه هواشناسی نشان داد که واگرایی جریان تابشی فرایند بسیار مهمی برای تشکیل و انحلال لایه وارونگی دماست. بی و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر شرایط سینوپتیک بر آلودگی هوا در فصل زمستان را در حوضه گان ونگ چین با استفاده از شش مدل برای شش روز از سال ۲۰۱۳ بررسی کردند و تغییرات PM 2.5 را به وارونگی دمای سطح پایین، سرعت باد افقی، سرعت باد عمودی، همگرایی، و وقوع شرایط سینوپتیکی نامساعد در طی فصل زمستان مربوط دانستند. زنگ و ژانگ (۲۰۱۷) با مطالعه تأثیر عناصر هواشناسی بر تداوم آلودگی‌های شدید در منطقه چنگدو چین در جشن بهار سال ۲۰۱۴ نشان دادند که نه تنها فاکتورهای هواشناسی سطحی، بلکه ساختار لایه مرزی و وجود وارونگی‌های دمایی نقش مهمی در انتشار عمودی آلاینده ایفا کرده‌اند. مطالعه تغییر اقلیم و تأثیر آن بر روی وارونگی‌های دمای سطح پایین کالیفرنیا طی سال‌های ۱۹۶۰-۲۰۰۷ نشان داد که همبستگی شدید بین سیستم‌های جوی بزرگ‌مقیاس و وقوع پدیده وارونگی وجود دارد؛ به طوری که وقوع وارونگی شدید همواره با سیستم‌های پُرفشار و وارونگی‌های ضعیف با سیستم‌های کم‌فشار همراه هست (یاکوبلیس، ۲۰۰۹).

بررسی و تحلیل الگوی سینوپتیکی وارونگی‌های شهر تهران در پژوهش هدایت و لشکری (۱۳۸۵) نشان داد که چهار الگوی سینوپتیکی باعث ایجاد وارونگی‌های شدید دمایی در شهر تهران می‌شود. بررسی نقش عوامل جغرافیایی در آلودگی هوای تهران نشان داد که ویژگی‌های طبیعی شهر تأثیر بسیار زیادی در آلودگی آن دارد. فراوانی بالای وارونگی دما به همراه استقرار مداوم سیستم‌های پرفشار در طی سال از ویژگی‌های طبیعی مهم در منطقه‌اند که نمی‌توان آنها را تعدیل کرد یا از بین برد (صفوی و علیجانی، ۱۳۸۵). عظیمی نیز در پژوهشی به ارزیابی تأثیر وارونگی دما بر روند آلودگی هوای شهر اهواز پرداخت و به این نتیجه رسید که بیشینه شدت وارونگی دما دلیل پایداری هوا و تجمع مواد آلاینده در سطح زمین است که در شهر اهواز این پدیده بیشتر در فصل گرم سال رخ می‌دهد (عظیمی، ۱۳۸۷).

تحلیل رابطه بین ضخامت و ارتفاع وارونگی و شدت آلودگی در شهر تهران نشان داد زمانی که ارتفاع لایه وارونه به سطح زمین نزدیک است بر شدت آلودگی هوا افزوده شده است؛ این مسئله در وارونگی‌های انتقالی به‌طور چشم‌گیری بر شدت آلودگی هوا افزوده است. در وارونگی‌هایی با منشأ دینامیکی، شرایط اقلیمی حاکم به‌گونه‌ای بوده که پایداری عمیق در لایه‌های نزدیک سطح زمین ایجاد کرده است (کیخسروی و لشکری، ۱۳۹۳). در پژوهش نوروزیان (۱۳۹۴) ساختار وارونگی دما در کلان‌شهر تهران بررسی شد. در این مطالعه هفت تیپ وارونگی در کلان‌شهر تهران شناسایی شد و نتایج نشان داد که مؤثرترین وارونگی در افزایش غلظت آلاینده CO وارونگی ترکیبی تابشی - فرونشستی است؛ مؤثرترین وارونگی در افزایش غلظت آلاینده NO_2 وارونگی ترکیبی تیپ تابشی - جبهه‌ای است؛ مؤثرترین وارونگی در افزایش غلظت آلاینده SO_2 و O_3 وارونگی ترکیبی تیپ فرونشستی - جبهه‌ای است؛ و مؤثرترین وارونگی در افزایش غلظت آلاینده PM_{10} وارونگی ترکیبی تیپ تابشی - فرونشستی - جبهه‌ای است. کرم‌پور (۱۳۹۵) آلودگی هوای شهر تهران را به روش وارونگی بحرانی هافتر بررسی کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که وارونگی‌ها در ساعات صبح از نوع تابشی‌اند و مشخصه بارز آنها ضخامت کم و اختلاف زیاد دمای پتانسیل است. درحالی‌که وارونگی‌ها در میانه روز ناشی از فرونشستی هواست و مهم‌ترین ویژگی آنها ضخامت زیاد و اختلاف کم دمای پتانسیل است.

بررسی الگوهای سینوپتیکی اینورژن در مشهد با استفاده از تحلیل عاملی دو الگوی تابستانه، سه الگوی زمستانه، و دو الگوی پاییزی را نشان داد. وارونگی‌های فصول سرد قوی‌تر است، دارای پایداری و تداوم بیشتری است، و الگوی پرفشار از سایر الگوها بیشتر دیده می‌شود و در بین هفت الگوی موجود الگوی پنجم که الگوی زمستانه به‌شمار می‌رود به جهت تداوم بیشتر وارونگی‌ها، قوی‌ترین الگو بوده است (علیجانی و نجفی نیک، ۱۳۸۸). بررسی الگوهای همدید مؤثر بر آلودگی هوا در کلان‌شهر مشهد نشان داد که وجود ناوه در اطراف دریاچه آرال موجب ریزش هوای سرد به منطقه سبیری و شمال شرق ایران می‌شود و این شرایط در سطح زمین موجب قوی‌تر شدن پرفشار سبیری، ورود جریان‌های سرد و خشک از شمال شرق به منطقه، و سرانجام افزایش آلودگی هوای شهری می‌شود (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۲). نتایج بررسی نقش الگوهای گردش مقیاس منطقه‌ای جو بر وقوع روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد بیانگر آن است که روزهای بسیار آلوده شهر مشهد در قالب چهار الگوی گردش اصلی قابل طبقه‌بندی است: الگوی ترکیبی پرفشار سبیری - پشته جنب‌حاره‌ای؛ پرفشار مهاجر؛ پشته جنب‌حاره‌ای؛ و الگوی کم‌فشار برون‌حاره. در الگوی ترکیبی پرفشار سبیری - پشته جنب‌حاره‌ای موجب شکل‌گیری هم‌زمان یک لایه وارونگی دمایی کم‌ضخامت در ترازهای زیرین جو و لایه وارونگی دیگری در وردسپهر میانی می‌شود. در الگوی پرفشار مهاجر، به‌واسطه استقرار پشته‌ای قوی در محدوده کوه‌های اورال - دریای خزر در وردسپهر میانی و شکل‌گیری یک مرکز گردش و اچرخندی در حفاصل دریای خزر تا بخش‌های شمالی خراسان در وردسپهر زیرین، سبب ظهور هم‌زمان چند لایه وارونگی کم‌ضخامت در نیمرخ قائم جو

می‌شود. الگوی پشته جنب‌حاره‌ای الگویی برجسته از تیپ وارونگی فرونشستی را تنها در دوره گرم سال به‌نمایش می‌گذارد. در مقابل، در الگوی کم‌فشار، بروز روزهای بسیار آلوده ناشی از توان جو در برداشت، انتقال، و پخش گردوغبار و ذرات معلق است که به واسطه ناپایداری و صعود گسترده هوا همراه عدم تغذیه رطوبتی مناسب در سامانه‌های چرخندی عبوری حاصل می‌شود (صادقی و همکاران، ۱۳۹۳). در بررسی ساختار وارونگی دما در کلان‌شهر مشهد و ارتباط آن با تغییرات غلظت آلاینده‌های جوی مشخص شد که این شهر در همه ماه‌های سال انواع وارونگی‌های دمایی را تجربه می‌کند. در عین حال، فراوانی وقوع این پدیده به‌طور برجسته‌ای در ساعات شب بیش از ساعات روز است. همچنین، یافته‌ها نشان می‌دهد که وارونگی تابشی، که نقش بسیار مهمی در شکل‌گیری روزهای بسیار آلوده دارد، برخلاف تصورات موجود، فقط به ماه‌های زمستانی سال ختم نمی‌شود و در همه ماه‌های سال از فراوانی چشم‌گیری برخوردار است و در ماه‌های بهار به بالاترین میزان فراوانی خود می‌رسد (اسماعیلی، ۱۳۹۶).

تأثیر پرفشارها در وقوع وارونگی‌های بسیار شدید و تداوم آلودگی هوای شهر تبریز در سال ۲۰۰۸ (جهانبخش اصل و روشنی، ۱۳۹۳) و بررسی شرایط سینوپتیکی حاکم بر وضعیت وارونگی‌های دمای بسیار شدید شهر تبریز نشان داد که عامل اصلی تقویت‌کننده وارونگی‌های دمای بسیار شدید ناشی از تداوم سیستم‌های پرفشار است. سامانه پرفشار سبیری، پرفشار شبه‌جزیره عربستان، و ریزش هوای سرد مدیترانه سامانه‌های عمده‌ای هستند که به وقوع وارونگی دما منجر می‌شوند (جهانبخش اصل و روشنی، ۱۳۹۳). پناهی (۱۳۹۵) نیز با بررسی الگوهای همدیدی دوره‌های بحرانی آلودگی هوا در وارونگی دمایی شدید شهر تبریز به این نتیجه رسید هنگامی که سیستم پرفشاری به‌صورت مداوم در مقطع چندروزه در منطقه متمرکز می‌شود شدت وارونگی دما به اوج خود می‌رسد. عامل اصلی تقویت‌کننده وارونگی‌های دمای بسیار شدید و به تبع آن آلودگی‌های بلندمدت ناشی از تداوم سامانه قدرتمند سبیری هم‌زمان با پرفشار توسعه‌یافته در زاگرس همراه است و نیز با تقویت پشته ارتفاعی تراز میانی جو است که شرایط لازم را برای افزایش پتانسیل آلودگی هوای تبریز فراهم می‌کند. در همه مطالعات انجام‌گرفته به نوعی وارونگی دما، به‌عنوان عاملی مؤثر بر غلظت آلاینده‌ها در محیط شهری، مورد توجه محققان قرار گرفته است. در این راستا، سعی شده است تا ارتباط کلی بین وارونگی دما با سایر فاکتورهای اقلیمی به اثبات رسد. همچنین، در بیشتر مقالات منتشرشده برای شهرهای ایران، فقط تعدادی از روزهای دارای وارونگی دما از سازمان هواشناسی کشور اخذ شده و ارتباط آن با آلودگی هوا ارزیابی کلی شده است. در صورتی که هیچ‌یک از محققان به‌صورت اختصاصی به بررسی وارونگی و ساختار از جمله وضعیت وارونگی‌های سالانه هر شهر، نوع وارونگی‌های اتفاق‌افتاده و معرفی نوع وارونگی غالب در هر شهر، شدت وارونگی‌ها، کاهشی یا افزایشی بودن روند آنها در یک بازه زمانی طولانی حداقل ده‌ساله اساساً نپرداخته‌اند. همین امر سبب شده تا یافته‌های موجود اطلاعات دقیقی از ساختار، شدت و ضعف و تغییرات وارونگی‌ها، و روند وارونگی‌های دما برای کلان‌شهرهای ایران به‌دست ندهند. بر همین اساس، در این پژوهش ابتدا تیپ‌های وارونگی و ساختار آنها (فراوانی، شدت، و ...) برای هر یک از شهرهای مورد مطالعه بررسی خواهد شد. سپس، روند انواع وارونگی‌های حادث‌شده، روند شدت و تعداد لایه‌های وارونگی دما در بازه زمانی (۲۰۰۷-۲۰۱۷) بررسی خواهد شد.

مواد و روش‌ها

نخست برای تعیین انواع وارونگی‌های دمایی، داده‌های رادیوسوند جو بالای ایستگاه هواشناسی مهرآباد، مشهد، و تبریز برای ساعت ۰۰ گریونویچ (۳/۵ محلی) طی سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۱۷ از سایت دانشگاه وایومینگ^۱ اخذ و استفاده شد. در بیشتر

1. <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.htm>

ایستگاه‌ها هواشناسی کشور ثبت این داده‌ها در هر دو ساعت ۰۰ و ۱۲ utc انجام نمی‌گیرد. در حال حاضر، در ایران فقط ایستگاه مهرآباد تهران برای هر دو ساعت ۰۰ و ۱۲ گرینویچ داده رادیوسوند دارد. به دلیل نقص داده‌ها و نبود داده در هر سه ایستگاه تهران، مشهد، و تبریز برای هر دو ساعت، فقط به بررسی داده‌های ساعت ۰۰ اکتفا شد. از مجموع ۴۰۱۵ روز داده دوره آماری برای هر یک از ایستگاه‌ها، در ایستگاه هواشناسی مهرآباد تهران ۴۹۸ روز فاقد داده آماری بود. ایستگاه مشهد از مجموع ۴۰۱۵ روز مورد مطالعه، ۲۲۶ روز داده مفقوده داشت و در ایستگاه هواشناسی تبریز ۶۴۷ روز بدون داده وجود داشت. ذکر این نکته لازم است که در ایستگاه هواشناسی تبریز برای سال ۲۰۱۵ داده رادیوسوند جو بالا ثبت نشده است. برای تعیین انواع وارونگی دما، نخست با بهره‌گیری از نرم‌افزار RAOB و داده‌های جو بالای هر ایستگاه، برای همه روزهای دوره یازده‌ساله تفی‌گرام تولید شد. با بررسی هر یک از نمودارهای تفی‌گرام تعداد کل روزهای همراه با وارونگی دمایی در ایستگاه‌های مورد بحث استخراج شد.

سه نوع وارونگی تابشی^۱، فرونشستی^۲، و جبهه‌ای^۳ به‌عنوان سه تیپ اصلی و چهار نوع دیگر تیپ وارونگی تابشی - فرونشستی - جبهه‌ای، تیپ تابشی - فرونشستی، تیپ وارونگی تابشی - جبهه‌ای، و تیپ وارونگی فرونشستی - جبهه‌ای به‌عنوان تیپ‌های ترکیبی متشکل از این سه نوع وارونگی هستند. فراوانی هر یک از تیپ‌های وارونگی برای ایستگاه‌های مورد مطالعه محاسبه شد. سپس، درصد هر یک از هفت تیپ وارونگی در دوازده ماه سال و فصول مختلف مشخص شد. توزیع زمانی و فراوانی هر یک از تیپ‌های وارونگی به‌صورت روزانه، ماهانه، و سال به سال استخراج شد. در نهایت، روند یازده‌ساله هر یک از تیپ‌های وارونگی با یکدیگر مقایسه شد.

با استفاده از برنامه‌نویسی در محیط متلب، پس از استخراج روزهای دارای وارونگی دمایی متغیرهای مختلفی از جمله ارتفاع پایه وارونگی از سطح زمین به متر (Zbase)، ارتفاع رأس وارونگی از سطح زمین به متر (Ztop)، دما در پایه و رأس لایه وارونگی به درجه سلسیوس (Tbase)، اختلاف دما بین پایه و رأس لایه وارونگی به درجه سلسیوس (DTinv)، عمق لایه وارونگی به متر (DZinv)، میزان فشار هوا در پایه (Pbase)، و رأس لایه وارونگی (Ptop) حداکثر تا ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال استخراج شد. با استفاده از سه پارامتر اختلاف دمای پایه و رأس لایه وارونگی، ضخامت لایه وارونگی و ارتفاع ایستگاه شدت وارونگی‌ها (رابطه ۱) برای همه روزها محاسبه شد:

$$I = \frac{(\Delta\theta)2}{3 + Z(\Delta z)} \quad (1)$$

$\Delta\theta$ اختلاف دمای پتانسیل رأس و پایه وارونگی به کلون است و Δz ضخامت لایه وارونگی به متر و Z ارتفاع ایستگاه به هکتومتر.

سپس، وارونگی‌های بحرانی به روش هافتر جداسازی شد. روش هافتر از روش‌های مبتنی بر تحلیل پروفایل عمودی دمای پتانسیل است. این روش برای زمان‌هایی موضوعیت پیدا می‌کند که یک وارونگی بحرانی در دمای پتانسیل جو پایین منطقه وجود داشته باشد. دمای پتانسیل یک بسته هوا عبارت است از دمایی که بسته هوا در صورتی که از تراز مربوطه به‌صورت بی‌دررو به تراز ۱۰۰۰ میلی‌باری انتقال داده شود به‌دست خواهد آورد و از رابطه ۲ به‌دست می‌آید:

1. Radiation
2. Subsidence
3. Frontal Inversion

$$\theta = -T \left(\frac{P_0}{P} \right)^{R/c_p} \quad (2)$$

در اینجا، θ دمای پتانسیل بسته هوا برحسب درجه کلوین، T دمای خشک بسته هوا (برحسب کلوین)، P فشار بسته هوا برحسب میلی‌بار، و P_0 نیز فشار استاندارد است که معمولاً برابر با ۱۰۰۰ میلی‌بار در نظر گرفته می‌شود. R نیز ثابت گازهاست و c_p ظرفیت گرمای ویژه هوا در فشار ثابت است که حاصل کل R/c_p ۰/۲۸۶ در نظر گرفته می‌شود. وارونگی بحرانی هافتر با دو شرط زیر مشخص می‌شود:

$$\frac{(\Delta\theta)}{(\Delta z)} > 0/005 \text{ km}^{-1} \quad \text{شرط ۱}$$

$$\theta_t - \theta_b > 2^\circ K \quad \text{شرط ۲}$$

در اینجا، θ دمای پتانسیل، θ_t ، θ_b دمای پتانسیل کف و سقف لایه وارونگی بحرانی است. فقط وارونگی‌هایی که دو شرط فوق را دارا باشند وارونگی بحرانی در نظر گرفته می‌شوند (لین و مایکل، ۲۰۱۰).

پس از مشخص شدن تیپ‌های مختلف وارونگی در هر یک از کلان‌شهرها و محاسبه شدت وارونگی‌ها، در نهایت، روند هر یک از تیپ‌های هفت‌گانه وارونگی به صورت ماهانه، فصلی، و سالانه و همچنین روند شدت وارونگی‌های رخ داده با استفاده از روش ناپارامتریک من- کندال و تخمینگر شیب سن تعیین شد. هدف از آزمون روند این است که وجود یا فقدان سیر صعودی یا نزولی در سری داده‌ها مشخص شود.

دو آزمون من- کندال و تخمینگر شیب سن جزو متداول‌ترین روش‌های ناپارامتری تحلیل روند سری‌های زمانی آب و هواشناسی به‌شمار می‌روند که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. در روش من- کندال دو فرض صفر (H_0) و فرض یک (H_1) در نظر گرفته می‌شود؛ فرض صفر به منزله فقدان روند در داده‌ها و تأیید فرض یک حاکی از وجود روند معنی‌دار در سری داده‌هاست.

فرض صفر در صورتی پذیرفته شد که رابطه $|Z| \leq Z(\alpha/2)$ برقرار باشد. در سطح اطمینان ۹۵ درصد $Z=1/96$ و در سطح اطمینان ۹۹ درصد $Z=2/54$ در نظر گرفته شد. اگر نتایج گویای روند در سری داده‌ها باشد و آماره Z مثبت باشد، روند صعودی است و اگر Z منفی باشد، به منزله روند نزولی تلقی شده است.

در روش تخمین سن نیز همانند روش من- کندال از تحلیل تفاوت بین مشاهدات یک سری زمانی بهره گرفته می‌شود. اساس این روش بر محاسبه یک شیب میانه برای سری زمانی و قضاوت کردن در مورد معنی‌داری شیب به دست آمده در سطوح اعتماد مختلف استوار است. از محاسبه میانه این سری زمانی شیب خط روند (Q_{med}) به دست می‌آید. مقدار مثبت Q_{med} گویای روند صعودی و مقدار منفی آن دال بر نزولی بودن روند است (کاناروزو و همکاران، ۲۰۰۶).

سرانجام، برای تعیین ساختار وارونگی‌های دمایی در کلان‌شهرهای مزبور اطلاعات حاصل از مراحل فوق در قالب جدول‌ها، نمودارها، و اشکال مختلف ارائه و تجزیه و تحلیل شد.

یافته‌های پژوهش

بررسی داده‌های جو بالا ساعت صفر گرینویچ ایستگاه مهرآباد تهران، مشهد، و تبریز در دوره آماری (۲۰۰۷-۲۰۱۷) با بهره‌گیری از نرم‌افزار RAOB سه تیپ اصلی وارونگی شامل وارونگی تابشی (تیپ ۱)، وارونگی فرونشستی (تیپ ۲)، وارونگی جبهه‌ای (تیپ ۳) و چهار تیپ فرعی، که ترکیبی از این سه تیپ اصلی‌اند شامل وارونگی تابشی - فرونشستی - جبهه‌ای (تیپ ۴)، وارونگی تابشی - فرونشستی (تیپ ۵)، وارونگی تابشی - جبهه‌ای (تیپ ۶)، و وارونگی فرونشستی - جبهه‌ای (تیپ ۷) را در هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه مشخص کرد.

برای همه روزها تیپ وارونگی، تعداد لایه‌های وارونگی رخ داده در هر روز، اختلاف دما در پایه و رأس لایه وارونگی، و عمق لایه‌وارونگی برای محاسبه شدت وارونگی‌ها (رابطه ۱) مشخص شد. سپس، درصد هر یک از تیپ‌های وارونگی در هر ماه نیز محاسبه شد.

شکل ۱ فراوانی انواع تیپ‌های هفت‌گانه وارونگی را در سه شهر تهران، مشهد، و تبریز نشان می‌دهد. در تهران در دوره مورد مطالعه بیشترین فراوانی تیپ وارونگی تابشی مربوط به سال ۲۰۰۷ است که ۴۷ درصد روزهای وارونگی (۲۶۱ روز) از نوع تابشی‌اند و کمترین فراوانی وارونگی تابشی در سال ۲۰۱۷ اتفاق افتاده است که سهم وارونگی تابشی فقط ۰٫۲۸ درصد کل وارونگی‌های سالانه (۳۵۹ روز) است. در مشهد بیشترین فراوانی تیپ وارونگی تابشی مربوط به سال ۲۰۰۷ است که این مقدار ۳۰ درصد کل روزهای وارونگی سال ۲۰۰۷ (۲۷۸ روز) است و کمترین فراوانی وارونگی تیپ تابشی در سال ۲۰۱۷ در ایستگاه مشهد مشاهده شده است که سهم آن ۰٫۲۸ درصد کل وارونگی‌های سال ۲۰۱۷ (۳۵۸ روز) است. در ایستگاه تبریز بیشترین فراوانی وارونگی تیپ تابشی مربوط به سال ۲۰۰۹ است که ۴۳ درصد کل روزهای وارونگی (۲۳۱ روز) را شامل می‌شود. کمترین سهم فراوانی این تیپ تابشی در شهر تبریز نیز مانند دو شهر تهران و مشهد در سال ۲۰۱۷ اتفاق افتاده است که این مقدار ۰٫۶۲ درصد کل وارونگی سالانه (۳۲۵ روز) است.

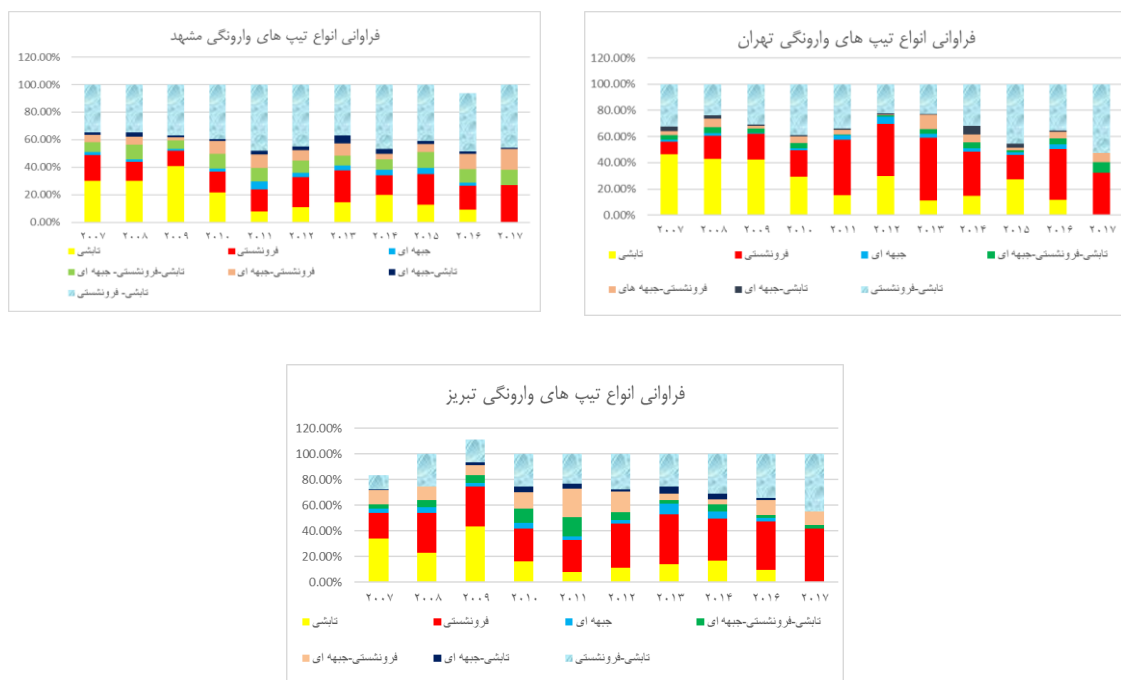
کمترین مقدار فراوانی تیپ فرونشستی در ایستگاه تهران در سال ۲۰۰۷ مشاهده شده که سهم آن ۹ درصد کل وارونگی‌های سالانه است و بیشترین فراوانی وارونگی فرونشستی در سال ۲۰۱۱ با ۴۸ درصد از کل وارونگی‌ها (۲۴۸ روز) مشاهده شده است. در مشهد کمترین و بیشترین فراوانی وارونگی فرونشستی به ترتیب در سال ۲۰۰۸ با ۱۱ درصد از ۲۹۵ روز دارای وارونگی و بیشترین فراوانی در سال ۲۰۱۷ با ۲۷ درصد از ۳۵۸ روز دارای وارونگی است. در تبریز کمترین وارونگی فرونشستی در سال ۲۰۰۷ با مقدار ۲۰ درصد از کل وارونگی‌ها (۲۴۵ روز) و بیشترین فراوانی این تیپ در سال ۲۰۱۷ با سهم ۴۲ درصد از ۳۲۵ روز دارای وارونگی اتفاق افتاده است.

کمترین فراوانی وارونگی تیپ جبهه‌ای در ایستگاه تهران مربوط به سال ۲۰۱۷ است که هیچ وارونگی جبهه‌ای رخ نداده است و بیشترین فراوانی این تیپ در سال ۲۰۱۲ است که ۵ درصد کل روزهای وارونگی (۲۵۵ روز) است. در ایستگاه مشهد هم کمترین فراوانی تیپ جبهه‌ای متعلق به سال ۲۰۱۷ است که هیچ وارونگی جبهه‌ای مشاهده نشده است و بیشترین سهم این تیپ وارونگی با مقدار ۶ درصد در سال ۲۰۱۰ اتفاق افتاده است. در تبریز کمترین وارونگی جبهه‌ای فقط یک مورد از ۳۲۵ روز دارای وارونگی در سال ۲۰۱۷ (۰٫۳۱ درصد) است و بیشترین فراوانی این تیپ در سال ۲۰۱۳ است که ۸ درصد کل وارونگی‌ها (۲۹۸ روز) است.

کمترین و بیشترین فراوانی تیپ ترکیبی تابش - فرونشستی - جبهه‌ای در ایستگاه تهران در سال ۲۰۱۲ با ۰٫۷۸ درصد و در سال ۲۰۱۷ با ۸ درصد است. در مشهد کمترین فراوانی این تیپ در سال ۲۰۰۹ (۶ درصد) و بیشترین فراوانی در

سال ۲۰۱۵ با فراوانی ۱۲ درصد مشاهده شده است. در تبریز نیز مقدار فراوانی این تیپ وارونگی بین ۲ درصد (در سال ۲۰۱۶) و ۱۵ درصد (در سال ۲۰۱۱) بوده است. کمترین و بیشترین فراوانی تیپ وارونگی فرونشستی- جبهه‌ای در ایستگاه تهران ۳ درصد- ۱۱ درصد به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۳ مشاهده شده است. در مشهد کمترین فراوانی تیپ وارونگی فرونشستی- جبهه‌ای در سال ۲۰۰۹ با ۲ درصد و بیشترین فراوانی آن در سال ۲۰۱۷، که ۱۵ درصد کل وارونگی سالانه است، مشاهده شده است. کمترین فراوانی این تیپ وارونگی در تبریز در سال ۲۰۱۴ با ۴ درصد و بیشترین فراوانی در سال ۲۰۱۱، که ۲۲ درصد کل وارونگی سالانه است.

کمترین فراوانی تیپ ترکیبی تابشی- جبهه‌ای تهران در سال ۲۰۱۷ و بیشترین سهم این تیپ در سال ۲۰۱۴ با ۷ درصد اتفاق افتاده است. در مشهد درصد فراوانی این تیپ ترکیبی در سال ۲۰۱۷ کمترین مقدار (۰.۵۶ درصد) و در سال ۲۰۱۳ با ۶ درصد بیشترین مقدار را این تیپ وارونگی داشته است. در تبریز نیز کمترین فراوانی این تیپ وارونگی در سال ۲۰۱۷ و بیشترین سهم آن در سال ۲۰۱۳ (۶ درصد) بوده است. تیپ وارونگی ترکیبی تابشی- فرونشستی بیشترین فراوانی را در بین وارونگی‌های ترکیبی در هر سه ایستگاه مورد مطالعه دارد. کمترین درصد فراوانی این تیپ وارونگی در تهران در سال ۲۰۱۲ با ۲۲ درصد و بیشترین مقدار فراوانی در سال ۲۰۱۷ مشاهده شده است که بیش از نیمی از وارونگی‌ها (۵۳ درصد) را شامل می‌شود. کمترین سهم وارونگی تیپ تابشی- فرونشستی در مشهد ۳۵ درصد در سال ۲۰۰۸ بوده و بیشترین مقدار این تیپ وارونگی در سال ۲۰۱۱ که ۴۸ درصد کل وارونگی‌ها بوده است. در تبریز، در سال ۲۰۰۷، کمترین فراوانی تیپ وارونگی تابشی- فرونشستی ۱۱ درصد و در سال ۲۰۱۷ بیشترین فراوانی ۴۵ درصد بوده است.



شکل ۱. نمودار توزیع فراوانی انواع تیپ‌های هفت‌گانه وارونگی در سه شهر تهران، مشهد، و تبریز

در ادامه برای روندیابی هر یک از تیپ‌های هفت‌گانه وارونگی ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره آماری (۲۰۰۷-۲۰۱۷) با استفاده از روش ناپارامتریک من- کندال و تخمینگر شیب سن نتایج زیر حاصل شد: روند و چگونگی تغییرات تیپ‌های وارونگی ایستگاه تهران در جدول ۱ قابل مشاهده است. نتایج آماره من- کندال

گویای روند کاملاً کاهشی وارونگی‌های تابشی در همه ماه‌ها و روند کاهشی معنی‌دار در سطح اطمینان $(Z > 2.58)$ 0.01 در ماه‌های جولای و اوت در سطح اطمینان $(Z > 1.96)$ 0.05 برای فوریه، آوریل، مه، و ژوئن است. شیب تغییرات فراوانی حاصل از آماره سن نیز در این ماه‌ها کاهشی است. تیپ وارونگی فرونشستی در همه ماه‌ها روند مثبت و افزایشی داشته و این روند در ماه‌های آوریل، اوت، سپتامبر، و نوامبر دارای روند معنادار در سطح اطمینان $(z > 1.96)$ 0.05 بوده است. تیپ وارونگی جبهه‌ای روند معناداری در دوره آماری مورد مطالعه نداشته، ولی در بیشتر ماه‌ها فراوانی آن کاهشی است.

در تیپ ترکیبی وارونگی‌های تابشی - فرونشستی - جبهه‌ای ایستگاه تهران اگرچه نوساناتی در سری زمانی این تیپ در برخی ماه‌ها وجود دارد، این روند در سطح اطمینان تعریف‌شده آزمون من - کندال معنادار نیست. تیپ وارونگی تابشی - فرونشستی در ایستگاه تهران در ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، ژوئیه، و اکتبر دارای روند افزایشی معنادار در سطح اطمینان $(z > 1.96)$ 0.05 و افزایش آن در ماه مه در سطح اطمینان $(Z > 2.58)$ 0.01 معنادار است. وارونگی تابشی - جبهه‌ای در بیشتر ماه‌ها روند کاهشی داشته و این روند کاهشی فقط در مارس در سطح اطمینان $(z > 1.96)$ 0.05 معنادار بوده است.

جدول ۱. نتایج حاصل از آماره ناپارامتریک تیپ‌های هفت‌گانه وارونگی ایستگاه تهران (z آماره من - کندال و Qmed شیب خط سن)

	تیپ تابشی			تیپ فرونشستی			تیپ جبهه‌ای		
	Qmed	Sig	Test Z	Qmed	Sig	Test Z	Qmed	Sig	Test Z
Jan	-۱.۱۱		۱.۱۰	۰.۸۳		-۰.۳۴	۰.۰۰۰		
Feb	-۱.۹۶	*	-۰.۲۶	۰.۲۳		-۰.۵۶	-۰.۰۰۱		
Mar	-۰.۹۵		-۰.۱۴	۱.۴۰		۰.۹۱	۰.۰۰۳		
Apr	-۲.۳۵	*	-۰.۵۶	۱.۹۶	*	۰.۰۰	۰.۰۰۰		
May	-۱.۹۶	*	-۰.۵۶	۰.۶۲		-۰.۱۶	۰.۰۰۰		
Jun	-۲.۱۱	*	-۰.۳۷۵	۱.۰۲		۰.۱۶	۰.۰۰		
Jul	-۲.۶۸	**	-۰.۵۶	۱.۷۱	+	-۰.۲۶	۰.۰۰		
Aug	-۲.۹۶	**	-۰.۴۸	۱.۹۶	*	-۰.۲۷	۰.۰۰		
Sep	-۱.۴۰		-۰.۰۳	۲.۴۲	*	۱.۵۵	۰.۰۰		
Oct	-۲.۰۲	*	-۰.۲۵	۱.۴۸		-۰.۰۹	۰.۰۰		
Nov	-۱.۳۶		-۰.۳۹	۲.۱۸	*	۱.۶۳	۰.۰۰۵		
Dec	-۲.۴۲	*	-۰.۲۷	۰.۹۲		۰.۶۶	۰.۰۰	*	

	تیپ تابشی - فرونشستی - جبهه‌ای			تیپ تابشی - جبهه‌ای			تیپ تابشی - فرونشستی			تیپ فرونشستی - جبهه‌ای		
	Qmed	Sig	Test Z	Qmed	Sig	Test Z	Qmed	Sig	Test Z	Qmed	Sig	Test Z
Jan	-۰.۴۷		-۰.۰۳	۲.۱۸	*	۰.۲۹	-۰.۹۴		۰.۰۰۸	۰.۰۰۰		۰.۰۰۰
Feb	۰.۰۰۰		۱.۹۷	۰.۲۴	*	-۰.۲۷		۰.۰۰	۰.۰۰			۰.۰۰۰
Mar	۱.۱۸		۲.۱۵	۰.۳۵	*	-۰.۹۴		۰.۰۰	۰.۶۶			۰.۰۰۰
Apr	۱.۴۰		-۱.۹۶	-۰.۰۲	*	-۱.۹۶	*	۱.۷۳	+	-۰.۰۲		۰.۰۰۰
May	۱.۳۷		۲.۰۵	۰.۴۲	**	-۱.۴۰		۰.۶۶		۰.۰۰		۰.۰۰۰
Jun	۰.۴۳		۱.۲۵	۰.۲۷		۰.۲۳		۰.۹۶		۰.۰۰		۰.۰۰۰
Jul	-۰.۴۹		۲.۳۳	۰.۳۷	*	۰.۰۰		۰.۱۹		۰.۰۰		۰.۰۰
Aug	-۰.۲۶		۰.۷۰	۰.۲۱		-۰.۷۳		-۰.۴۳		۰.۰۰		۰.۰۰
Sep	۰.۲۰		۰.۲۳	۰.۲۵۰		-۰.۲۳		۰.۴۷		۰.۰۰		۰.۰۰
Oct	۰.۶۰		۱.۹۶	۰.۲۹	*	۰.۰۰		۱.۱۱		۰.۰۰		۰.۰۰
Nov	۱.۱۰		۰.۳۱	۰.۰۷		۰.۰۰		-۰.۱۶		۰.۰۰		۰.۰۰۰
Dec	۱.۳۱		۰.۳۹	۰.۰۷		۰.۲۳		-۰.۳۹		۰.۰۰		-۰.۰۰۳

* - همبستگی در سطح اطمینان ۹۵ درصد

** - همبستگی در سطح اطمینان ۹۹ درصد

*** - همبستگی در سطح اطمینان بالاتر از ۹۹ درصد

بررسی روند تیپ‌های مختلف وارونگی مشهد (جدول ۲) گویای کاهش معنادار وارونگی‌های تابشی در همه ماه‌ها و کاهش معنادار آن در سطح اطمینان ۰/۰۱ ($Z > 2.58$) در اوت است. وارونگی فرونشستی مشهد در همه ماه‌ها روند افزایشی داشت؛ این روند در فوریه، آوریل، و ژوئیه در سطح اطمینان ۰/۰۵ ($Z > 1.96$) و سپتامبر در سطح اطمینان ۰/۰۱ معنادار بود. روند وارونگی‌های جبهه‌ای در سپتامبر در سطح اطمینان ۰/۰۱ ($Z > 2.58$) و در ماه دسامبر در سطح اطمینان ۰/۰۵ ($Z > 1.96$) افزایش معناداری داشته است.

وارونگی‌های ترکیبی تابشی - فرونشستی - جبهه‌ای مشهد فقط در ماه مه و اکتبر روند افزایشی معناداری در سطح اطمینان ۰/۰۵ ($Z > 1.96$) تجربه کرده است. تیپ وارونگی ترکیبی تابشی - فرونشستی در همه ماه‌ها روند افزایشی داشته و این افزایش در ماه‌های فوریه، آوریل، ژوئن، و نوامبر در سطح اطمینان ۰/۰۵ ($Z > 1.96$) معنادار بوده و در سپتامبر و اکتبر سطح معناداری به ۰/۰۱ ($Z > 2.58$) رسیده است. تیپ تابشی - جبهه‌ای به جز نوامبر و دسامبر در بقیه ماه‌ها روند کاهشی داشته و این روند کاهشی در ژوئن و اکتبر در سطح اطمینان ۰/۰۵ ($Z > 1.96$) معنادار بوده است. تیپ وارونگی ترکیبی فرونشستی - جبهه‌ای در برخی ماه‌ها روند افزایشی و در برخی دیگر کاهشی بوده است. در ژوئن و ژوئیه با سطح اطمینان ۰/۰۵ ($Z > 1.96$) روند افزایشی و در اکتبر در سطح اطمینان ۰/۰۱ ($Z > 2.58$) روند معنادار کاهشی داشته است.

جدول ۲. نتایج حاصل از آماره‌های ناپارامتریک در سطوح ۹۵ و ۹۹ درصد ایستگاه مشهد (z آماره من - کندال و Qmed شیب خط سن)

تیپ تابشی			تیپ فرونشستی			تیپ جبهه‌ای		
Qmed	Sig	Test Z	Qmed	Sig	Test Z	Qmed	Sig	Test Z
-۰/۰۱۷		-۱/۱۸	۰/۰۱۱		۱/۵۶	۰/۰۰۰		
-۰/۰۰۴		-۰/۸۶	۰/۰۳۲	*	۱/۹۷	۰/۰۰۹		
-۰/۰۲۵	*	-۱/۹۶	۰/۰۱۳		۰/۷۰	۰/۰۱۰		
-۰/۰۳۱	*	-۲/۱۱	۰/۰۳۱	*	۲/۳۴	۰/۰۰۰		
-۰/۰۲۹	*	-۲/۱۱	۰/۰۰۶		۰/۳۹	۰/۰۰۰		
-۰/۰۵۰	*	-۲/۰۲	۰/۰۲۴		۱/۶۴	۰/۰۰۰		
-۰/۰۵۰	*	-۲/۳۰	۰/۰۱۷	*	۲/۰۲	۰/۰۰۰		
-۰/۰۳۸	**	-۳/۱۸	۰/۰۱۲		۱/۶۴	۰/۰۰۰		
-۰/۰۲۲	*	-۲/۲۶	۰/۰۳۶	**	۲/۸۹	۰/۰۳۶	**	
-۰/۰۱۹	*	-۱/۹۶	۰/۰۰۶		۱/۳۴	۰/۰۰۰		
-۰/۰۲۹	*	-۲/۳۴	۰/۰۱۰		۰/۷۸	-۰/۰۰۴		
-۰/۰۲۳	*	-۱/۹۷	۰/۰۰۹		۱/۱۰	-۰/۰۰۸	*	

تیپ تابشی - فرونشستی - جبهه‌ای			تیپ تابشی - جبهه‌ای			تیپ تابشی - فرونشستی			تیپ فرونشستی - جبهه‌ای		
Qmed	Sig	Test Z	Qmed	Sig	Test Z	Qmed	Sig	Test Z	Qmed	Sig	Test Z
۰/۰۰۵		۰/۶۲	۰/۰۰۰		-۰/۶۶	۰/۰۰۱		۰/۰۰	۰/۰۱۲		
-۰/۰۰۳		-۰/۴۷۰	۰/۰۰۰		-۰/۲۳	۰/۰۱۸	*	۱/۹۶	۰/۰۰		
۰/۰۰۰		-۰/۳۲	۰/۰۰۰		۰/۴۱	۰/۶۰۰		۱/۵۴	۰/۰۱۲		
۰/۰۰۰		۰/۰۰۰	۰/۰۰۰		۰/۹۴	۰/۰۱۷	*	۲/۱۱	۰/۰۰۹		
*		۲/۴۰	۰/۰۰۰		-۰/۳۴	۰/۰۱۵		۰/۸۶	۰/۰۰۰		
۰/۰۰۰		۰/۳۱	*		-۲/۳۰	۰/۰۲۸	*	۱/۹۷	۰/۰۰۴	*	
۰/۰۰۰		۰/۹۳	۰/۰۰۰		۰/۰۰۰	۰/۰۱۶		۰/۵۵	۰/۰۰۸	*	
۰/۰۰۰		۰/۰۰	۰/۰۰۰		-۰/۲۹	۰/۰۲۰		۱/۲۵	۰/۰۰۰		
-۰/۰۱۱		-۰/۶۲	۰/۰۰۰		۰/۱۷	۰/۰۲۲	**	۳/۰۵	۰/۰۰۰		
*		۲/۵۱	*		-۲/۲۲	۰/۰۱۴	**	۲/۶۹	-۰/۰۲۵	**	
-۰/۰۰۶		-۰/۷۸	۰/۰۰۰		۰/۱۶	۰/۰۲۹	*	۲/۳۴	۰/۰۰۶		
۰/۰۰۲		۰/۲۲	۰/۰۰۲		۱/۵۶	۰/۰۱۳		۰/۵۵	۰/۰۰۶		

در تبریز روند نزولی وارونگی‌های تابشی در فوریه، ژوئن، و نوامبر در سطح اطمینان ۹۵ درصد و در آوریل، مه، ژوئیه، اوت، سپتامبر، اکتبر، و دسامبر در سطح اطمینان ۹۹ درصد روند کاهشی بوده است. وارونگی‌های فرونشستی تبریز در آوریل، مه، سپتامبر، و نوامبر روند افزایشی در سطح اطمینان ۹۹ درصد و در اوت در سطح ۹۵ درصد بوده است. وارونگی‌های جبهه‌ای فقط در مارس و دسامبر روند مثبتی داشته است. در سایر ماه‌ها روند وارونگی‌های جبهه‌ای نزولی بوده و در فوریه روند نزولی در سطح ۹۵ درصد معنادار بوده است.

جدول ۳. نتایج حاصل از آماره‌های ناپارامتریک در سطوح ۹۵ و ۹۹ درصد ایستگاه تبریز (z آماره من- کندال و Qmed شیب خط سن)

	تیپ تابشی			تیپ فرونشستی			تیپ جبهه‌ای		
	Qmed	Sig	Test Z	Qmed	Sig	Test Z	Qmed	Sig	Test Z
Jan	-۱,۰۷		۰,۰۹	۰,۰۰۲		-۱,۳۹	۰,۰۰۰		۰,۰۰۰
Feb	-۱,۹۶	*	-۰,۲۷	-۰,۱۲۵		-۱,۹۶	-۰,۰۱۵	*	-۰,۰۱۵
Mar	-۰,۹۰		۰,۴۵	۰,۲۸۶		۱,۹۶	۰,۰۰۱	*	۰,۰۰۱
Apr	-۳,۰۴	**	۲,۱۸	۱,۶۶۷	**	۰,۰۹	۰,۰۰۰		۰,۰۰۰
May	-۲,۷۸	**	۲,۶۸	۰,۰۴۷	**	-۰,۲۷	۰,۰۰۰		۰,۰۰۰
Jun	-۲,۱۵	*	۰,۵۷	۰,۰۰		-۰,۱۱	۰,۰۰۰		۰,۰۰۰
Jul	-۲,۶۳	**	-۱,۷۹	-۰,۰۴	+	۰,۷۱	۰,۰۰		۰,۰۰
Aug	-۲,۸۶	**	۲,۴۲	۰,۰۴	*	-۰,۸۴	-۰,۰۱		-۰,۰۱
Sep	-۲,۷۳	**	۲,۷۸	۰,۰۷۳	**	-۱,۸۲	-۰,۰۱	+	-۰,۰۱
Oct	-۳,۰۷	**	۰,۰۹	۰,۰۰		-۰,۷۲	۰,۰۰		۰,۰۰
Nov	-۲,۱۶	*	۳,۰۴	۰,۰۳۳	**	-۰,۲۱	۰,۰۰		۰,۰۰
Dec	-۳,۱۴	**	۰,۵۵	۰,۱۷		۰,۳۶	۰,۰۰		۰,۰۰

	تیپ تابشی - فرونشستی - جبهه‌ای			تیپ تابشی - فرونشستی			تیپ تابشی - جبهه‌ای			تیپ فرونشستی - جبهه‌ای		
	Qmed	Sig	Test Z	Qmed	Sig	Test Z	Qmed	Sig	Test Z	Qmed	Sig	Test Z
Jan	-۰,۲۷		۰,۰۰۱	۲,۱۵	*	۰,۰۴۱	۲,۶۱	**	۰,۰۰۸	-۱,۱۸		-۰,۴۴۴
Feb	۱,۰۶		۰,۱۲۵	۲,۲۵	*	۱,۴۰۰	-۰,۹۲		۰,۰۰۰	۰,۰۰۰		۰,۰۰۰
Mar	۱,۶۶	+	۰,۰۰۰	۰,۰۹		۰,۰۰۸	۰,۱۰		۰,۰۰۰	۰,۶۴		۰,۰۰۴
Apr	۰,۰۰		۰,۰۰۰	۱,۲۶		۰,۶۶۷	۰,۰۰		۰,۰۰۰	-۲,۰۳	*	-۰,۰۰۷
May	۰,۳۳		۰,۰۰۰	۰,۰۰		۰,۰۰۰	۰,۵۸		۰,۰۰۰	۰,۳۷		۰,۰۰۰
Jun	-۰,۳۸۴		۰,۰۰	۲,۲۵	*	۰,۰۲۳	-۰,۱۱		۰,۰۰۰	۰,۱۸		۰,۰۰۳
Jul	۰,۹۲		۰,۰۰	۳,۲۶	**	۰,۰۳	۰,۰۰		۰,۰۰	-۰,۱۸		۰,۰۰
Aug	-۰,۹۰		۰,۰۰	۰,۰۰		۰,۰۰	۰,۹۱		۰,۰۰	-۰,۹۰		-۰,۰۱
Sep	-۱,۲۸		-۰,۰۰۱	-۰,۳۶		-۰,۰۰۷	۰,۴۹		۰,۰۰	-۱,۹۶	*	-۰,۰۲۰۲
Oct	-۰,۹۳		-۰,۰۱۵	۲,۵۰	*	۰,۰۵۳	-۲,۱۱	*	-۰,۰۱	-۰,۰۹		۰,۰۰
Nov	-۱,۴۰		-۰,۰۱۲	۲,۸۶	**	۰,۷۷۸	-۰,۸۲		۰,۰۰	-۰,۰۹		۰,۰۰
Dec	-۰,۴۵		-۰,۰۱	۰,۰۰		۰,۰۰	۲,۷۸	**	۰,۰۴	۰,۱۱		۰,۰۰

گرچه نوساناتی در سری زمانی تیپ ترکیبی وارونگی‌های تابشی - فرونشستی - جبهه‌ای نیز در برخی ماه‌ها وجود داشته است، این روند در سطح اطمینان تعریف‌شده‌ی آزمون من- کندال معنادار نیست. وارونگی تابشی - فرونشستی در همه‌ی ماه‌ها جز سپتامبر روند افزایشی داشته است. در ژانویه و دسامبر روند معناداری در سطح اطمینان $(Z > 2.58)$ و در اکتبر روند افزایشی معناداری به سطح اطمینان $(Z > 1.96)$ رسیده است. فراوانی وارونگی‌های تابشی - جبهه‌ای در برخی ماه‌ها افزایشی و در برخی دیگر کاهشی بوده است. در ژانویه و دسامبر روند افزایشی در سطح اطمینان ۹۹ درصد و

اکتبر روند کاهشی در سطح ۹۵ درصد داشته است. روند وارونگی‌های فرونشستی - جبهه‌ای تبریز در بیشتر ماه‌ها کاهشی بوده و در آوریل و سپتامبر این کاهش در سطح ۹۵ درصد معنادار بوده است.

تعداد لایه‌های وارونگی یکی دیگر از فاکتورهایی است که در این پژوهش به آن توجه شده است. تعداد لایه‌های وارونگی در هر روز برای روزهای دارای وارونگی دمایی هر سه شهر تهران، مشهد، و تبریز با بهره‌گیری از نرم‌افزار RAOB محاسبه شد. در دوره آماری مورد مطالعه، در هر سه شهر حداقل لایه وارونگی اتفاق افتاده یک مورد و حداکثر تعداد لایه‌های وارونگی در یک روز در ایستگاه مهرآباد ۸ لایه، مشهد ۱۰ لایه، و تبریز ۹ لایه در یک روز بوده است که بیشتر در نوامبر و دسامبر رخ داده است.

شکل ۱ تعداد لایه‌های وارونگی یک روز خاص در سال ۲۰۰۷ و ۲۰۱۷ را در هر سه ایستگاه شاخص نشان می‌دهد. تعداد لایه‌های وارونگی ایستگاه مهرآباد تهران در روز ۱۶ ژانویه سال ۲۰۰۷ شکل (A) دو لایه وارونگی را نشان می‌دهد. وارونگی تابشی در سطح زمین و وارونگی فرونشستی در سطح ۷۰۰ هکتوپاسکال رخ داده است. تصویر B لایه‌های وارونگی همین روز (۱۶ ژانویه) را در سال ۲۰۱۷ نشان می‌دهد. تعداد لایه‌ها در این روز به ۸ لایه در روز می‌رسد که یک لایه وارونگی تابشی در سطح زمین و ۷ لایه وارونگی فرونشستی در سطوح فوقانی جو مشاهده می‌شود.

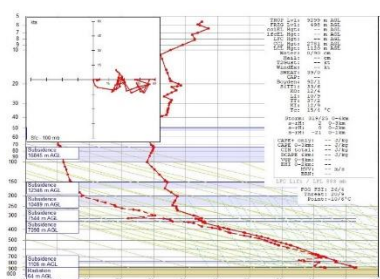
لایه‌های وارونگی روز ۱۲ ژانویه سال ۲۰۰۷ ایستگاه هواشناسی مشهد (تصویر C) یک لایه وارونگی تابشی در سطح زمین و یک لایه وارونگی فرونشستی را در سطح ۵۵۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد. درحالی‌که نمودار اسکویوتی مربوط به همین روز در سال ۲۰۱۷ (تصویر D) ۹ لایه وارونگی فرونشستی را از سطح زمین تا سطوح بالای جو نشان می‌دهد.

در ایستگاه هواشناسی تبریز، تعداد لایه‌های وارونگی در روز ۱۵ مه ۲۰۰۷ (تصویر E) و روز ۱۵ مه ۲۰۱۷ (تصویر F) با هم مقایسه شد. در این روز در سال ۲۰۰۷ فقط یک لایه وارونگی تابشی در سطح زمین دیده می‌شود. درحالی‌که در سال ۲۰۱۷ در این روز تعداد لایه‌های وارونگی به ۹ لایه وارونگی می‌رسد که شامل یک لایه وارونگی جبهه‌ای در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال و ۸ لایه وارونگی فرونشستی در سطوح بالاتر جو ایستگاه هواشناسی تبریز است. شکل ۲ تفاوت تعداد لایه‌های وارونگی دما در ایستگاه مهرآباد تهران، ایستگاه هواشناسی مشهد، و ایستگاه هواشناسی تبریز را نشان می‌دهد. سپس، با استفاده از آزمون‌های ناپارامتریک من - کندال و روش تخمین سن روند تعداد لایه‌های وارونگی روزانه در دوره آماری (۲۰۰۷-۲۰۱۷) بررسی شد.

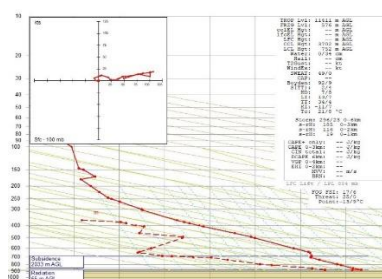
جدول ۴. نتایج حاصل از آماره‌های ناپارامتریک در سطوح ۹۵ و ۹۹ درصد لایه‌های وارونگی ایستگاه‌های تهران، مشهد، و تبریز

	تهران			مشهد			تبریز		
	تعداد لایه‌ها			تعداد لایه‌ها			تعداد لایه‌ها		
	Qmed	Sig	Test Z	Qmed	Sig	Test Z	Qmed	Sig	Test Z
Jan	۰,۳۳۳	*	۲,۱۵	۰,۲۹	*	۱,۹۶	۰,۲۵۰	*	۲,۱۴
Feb	۰,۲۰۰		۱,۴۶	۰,۰۱		۰,۶۸	۰,۳۷۵	*	۱,۹۶
Mar	۰,۳۳۳	*	۱,۹۶	۰,۱۱		۰,۸۱	۰,۲۰۰		۱,۲۹
Apr	۰,۳۳۳	*	۱,۸۶	۰,۲۲		۰,۸۸	۰,۰۰۰۱		۰,۰۰۱
May	۰,۲۸۶	*	۱,۸۶	۰,۱۳		۱,۵۶	۰,۴۰۰	**	۲,۶۱
Jun	۰,۲۵۰	*	۱,۹۵	۰,۱۴	*	۲,۰۹	۰,۰۰۱		۰,۸۷
Jul	۰,۰۰۲		۱,۱۸	۰,۲۰	*	۱,۹۸	۰,۰۰۱		۰,۸۲
Aug	۰,۰۰۱		۰,۱۷	۰,۲۲	*	۲,۱۷	۰,۳۳۳	***	۳,۳۰
Sep	۰,۰۰۱		۰,۱۷	۰,۲۵	*	۲,۱۱	۰,۳۳۳	*	۲,۲۴
Oct	۰,۲۲۲	*	۱,۸۶	۰,۰۲	*	۲,۰۰	۰,۲۸۶	**	۲,۹۵
Nov	۰,۲۰۰	*	۱,۶۵	۰,۳۳	*	۲,۳۵	۰,۲۵۰	*	۲,۳۱
Dec	۰,۲۵۰	*	۲,۴۸	۰,۴۲۹	*	۲,۲۲	۰,۲۵۰	*	۲,۰۴

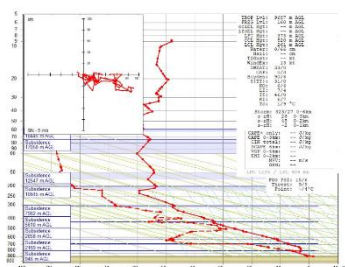
در هر سه شهر در همه ماه‌های سال در دوره آماری (۲۰۰۷-۲۰۱۷) تعداد لایه‌های وارونگی روندی مثبت و افزایشی را نشان داد. در ژانویه فراوانی لایه‌های وارونگی روند معناداری در سطح ۹۵ درصد داشت. در فوریه تعداد لایه‌های وارونگی فقط در شهر تبریز در سطح ۹۵ درصد معنادار بود. در عین حال، در دو شهر تهران و مشهد نیز تعداد لایه‌های وارونگی روند افزایشی داشت. مثبت بودن شیب سن مؤید این مطلب است. در مارس روند سری زمانی لایه‌های وارونگی در تهران در سطح ۹۵ درصد معنادار بود و در دو شهر مشهد و تبریز نیز در این ماه فراوانی لایه‌های وارونگی روند افزایشی (مثبت بودن شیب سن) داشته است. در آوریل روند سری زمانی لایه‌های وارونگی در تهران در سطح ۹۵ درصد معنادار بوده و مشهد و تبریز در این ماه فراوانی لایه‌های وارونگی شیب مثبتی داشته‌اند. در ماه مه روند لایه‌های وارونگی در تهران و تبریز روند معناداری در سطوح ۹۵ و ۹۹ درصد داشته و در مشهد هم شیب روند مثبت بوده است. در ژوئن نیز روند لایه‌های وارونگی تهران و مشهد در سطح ۹۵ درصد معنادار بوده و مثبت بودن شیب سن گواهِ افزایشی بودن روند لایه‌های وارونگی شهر تبریز در ژوئن است.



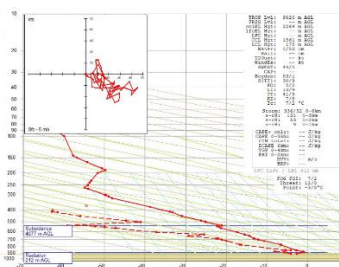
(B)



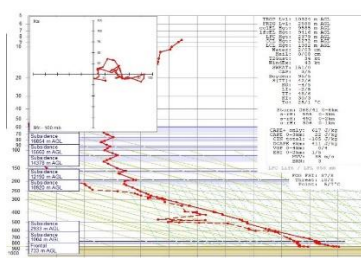
(A)



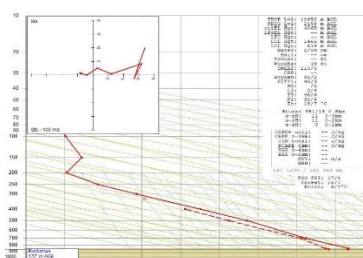
(D)



(C)



(F)



(E)

شکل ۲. تفاوت تعداد لایه‌های وارونگی دما در دوره آماری (۲۰۰۷-۲۰۱۷) در ایستگاه مهرآباد تهران (A و B)، ایستگاه هواشناسی مشهد (C و D)، و ایستگاه هواشناسی تبریز (E و F)

در ژوئیه روند لایه‌ها فقط در مشهد در سطح ۹۵ درصد معنادار بوده و در دو شهر تهران و مشهد نیز شیب روند مثبت بوده است. در اوت روند افزایشی لایه‌های وارونگی در تبریز در سطح اطمینان بالاتر از ۹۹ درصد معنادار بوده و در دو شهر تبریز و مشهد روند شیب مثبت و افزایشی بوده است. در سپتامبر سطح معناداری فراوانی لایه‌های وارونگی در مشهد و تبریز در ۹۵ درصد و در تهران هم روند لایه‌ها افزایشی (مثبت بودن شیب سن) بوده است. در اکتبر، نوامبر، و دسامبر روند افزایش لایه‌های وارونگی در هر سه شهر در سطوح ۹۵ و ۹۹ درصد معنادار بوده است.

در منابع مختلف از پارامتر اختلاف دمای پایه و رأس لایه وارونگی برای محاسبه شدت وارونگی‌ها و طبقه‌بندی شدت وارونگی دمایی استفاده شده است. در این مطالعه از رابطه ۱ و اختلاف دمای لایه وارونگی، ضخامت لایه وارونگی، و ارتفاع ایستگاه برای محاسبه شدت وارونگی‌های دمایی استفاده شد. از میان همه وارونگی‌های رخ داده، فقط برای وارونگی‌های سطح زمین تا سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال با استفاده از رابطه ۱ شدت وارونگی‌ها محاسبه شد. سپس، با اعمال دو شرط هافتر وارونگی‌های بحرانی از مجموع وارونگی‌های رخ داده جداسازی و روند شدت وارونگی‌ها بررسی شد. نتایج اعمال آزمون من- کندال و تخمینگر شیب سن بر سری داده‌های شدت وارونگی‌های بحرانی در ماه‌های مختلف سال (جدول ۵) نشان می‌دهد که نوع روند مشاهده شده به جز اکتبر، نوامبر، و دسامبر در ایستگاه مهرآباد- که روند شدت وارونگی‌های بحرانی در سطح ۹۵ درصد معنادار بوده- در سایر ماه‌ها روند شدت وارونگی‌های بحرانی افزایشی بوده، ولی در هیچ یک از سطوح اطمینان معنی‌دار نیست. در فوریه در هر سه شهر روند شدت وارونگی‌ها کاهشی است. در ماه مه، به جز شهر مشهد، که روند مثبتی داشته، در دو شهر تهران و تبریز شدت وارونگی‌ها کاهشی بوده است.

جدول ۵. نتایج حاصل از آماره‌های ناپارامتریک در سطوح ۹۵ و ۹۹ درصد شدت لایه‌های وارونگی ایستگاه‌های تهران، مشهد، و تبریز (Z آماره من- کندال و Qmed شیب خط سن)

تبریز			مشهد			تهران			
شدت وارونگی‌ها			شدت وارونگی‌ها			شدت وارونگی‌ها			
Qmed	Sig	Test Z	Qmed	Sig	Test Z	Qmed	Sig	Test Z	
۰/۰۰۰		۰/۰۰	۰/۰۰۱		۰/۱۶	۰/۰۰۰		۱/۰۹	Jan
۰/۰۰۰		-۰/۴۷	-۰/۰۰۱		-۱/۲۵	۰/۰۰۰		-۰/۱۶	Feb
۰/۰۰۰		۰/۰۰	۰/۰۰۰		۰/۰۰	۰/۰۰۰۲		۰/۷۸	Mar
۰/۰۰۰		-۱/۰۹	۰/۰۰۱	*	۲/۰۲	۰/۰۰۰		۰/۰۰	Apr
۰/۰۰۰		-۰/۱۶	۰/۰۰۰		۰/۶۲	۰-/۰۰۱		-۱/۵۵	May
۰/۰۰۰		۰/۷۸	۰/۰۰۰		۰/۳۱	۰/۰۰۰		۰/۰۰	Jun
۰/۰۰۰		۰/۴۷	۰/۰۰۱		۰/۷۸	۰/۰۰۰		۰/۴۷	Jul
۰/۰۰۰		۰/۶۲	۰/۰۰۱		۰/۷۸	۰/۰۰۰		۰/۶۲	Aug
۰/۰۰۰		۰/۶۲	۰/۰۰۲		۰/۹۳	۰/۰۹۰	*	۲/۱۸	Sep
۰/۰۰۱		۱/۲۵	۰/۰۰۱		۱/۴۰	۰/۰۲۴۸۹	*	۱/۹۷	Oct
۰/۰۰۱		۰/۴۷	۰/۰۰۰		۰/۱۶	۰/۰۵۰۳	*	۱/۹۶	Nov
۰/۰۰۱		۱/۰۸	۰/۰۰۵		۰/۹۳	۰/۰۰۰		۱/۰۹	Dec

بررسی فراوانی سالانه وارونگی‌های رخ داده از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۷ نشان داد که در ایستگاه هواشناسی مهرآباد تهران کمترین وارونگی‌ها در سال ۲۰۰۸ با ۲۴۵ روز دارای وارونگی، ۶۱ روز بدون داده (داده مفقوده)، و ۵۹ روز بدون وارونگی

مشاهده شده است؛ در حالی که سال ۲۰۰۷ با داشتن داده‌ی رادیوسوند بیشتر از سال ۲۰۰۸ دارای ۲۶۱ روز دارای وارونگی دمایی، ۳۳ روز بدون داده، و ۷۱ روز بدون وارونگی دمایی است که با توجه به داده‌های موجود کمترین مقدار وارونگی و بیشترین روز بدون وارونگی را در دوره‌ی مورد مطالعه داشته است. در سال ۲۰۱۷ با ۳۵۹ روز دارای وارونگی، ۶ روز بدون داده، بیشترین فراوانی روزهای وارونگی دمایی در مهرآباد تهران رخ داده است.

در شهر مشهد کمترین فراوانی وارونگی سالانه مربوط به سال ۲۰۰۹ با ۲۳۹ روز وارونگی است. این در حالی است که این سال بیشترین آمار داده‌ی مفقوده (۶۰ روز) را دارد و در سال ۲۰۰۷ با ۲۷۸ روز وارونگی، ۱۴ روز بدون داده، و ۷۳ روز بدون وارونگی دمایی آمار کمترین تعداد روزهای وارونگی دمایی و بیشترین روزهای بدون وارونگی (۷۳ روز) رخ داده است. در شهر تبریز در دوره‌ی مورد مطالعه سال ۲۰۰۹ با ۲۳۱ روز دارای وارونگی دمایی و بیشترین داده‌ی مفقوده (۶۱ روز) کمترین تعداد وارونگی دمایی ثبت شده است. بعد از آن، سال ۲۰۰۷ با ۲۴۵ روز وارونگی، ۱۵ روز بدون داده، و ۱۰۴ روز بدون وارونگی آمار واقعی تری از کمترین روز وارونگی و بیشترین روز بدون وارونگی را دارد و سال ۲۰۱۲ با ۳۳۲ روز دارای وارونگی، ۹ روز بدون داده، و ۲۴ روز بدون وارونگی و بعد از آن سال ۲۰۱۷ با ۳۲۵ روز دارای وارونگی، ۲۷ روز بدون داده، و ۱۳ روز بدون وارونگی بالاترین فراوانی روزهای دارای وارونگی و کمترین روزهای بدون وارونگی ایستگاه تبریز را دارد (در تبریز در سال ۲۰۱۵ هیچ داده‌ی رادیوسوندی ثبت نشده است). با اعمال آزمون من-کندال و تخمینگر شیب سن بر سری داده‌های فراوانی سالانه‌ی وارونگی در سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۱۷ نتایج زیر حاصل شد:

جدول ۶. نتایج حاصل از آماره‌های ناپارامتریک در سطوح ۹۵ و ۹۹ درصد فراوانی وارونگی‌های سالانه‌ی ایستگاه‌های تهران، مشهد، و

تبریز

	تبریز			مشهد			تهران		
	Qmed	Sig	Test Z	Qmed	Sig	Test Z	Qmed	Sig	Test Z
روزهای وارونگی	۶	*	۱٫۹۶	۷٫۸۷	*	۲٫۴۲	۱۲٫۶۶	**	۲٫۹۶
روزهای بدون وارونگی	-۷٫۰۰	**	-۲٫۶۸	-۴٫۶۶	*	-۲٫۱۱	-۶٫۵۰	*	-۲٫۴۹

تحلیل روند تغییرات سالانه‌ی فراوانی روزهای دارای وارونگی دمایی در مهرآباد تهران روند افزایشی معناداری در سطح اطمینان ۹۹ درصد ($Z > 2.58$) دارد. روند افزایش سالانه‌ی روزهای دارای وارونگی دمایی در مشهد و تبریز نیز در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($Z > 1.96$) روند افزایشی معناداری داشت.

روزهای بدون وارونگی نیز روند کاهشی معناداری در سطح اطمینان ۹۹ درصد ($Z > 2.58$) برای تبریز داشت و این روند کاهشی برای روزهای بدون وارونگی در تهران و مشهد در سطح ۹۵ درصد معنادار است.

در مجموع، بررسی نتایج فوق بر روی ایستگاه‌های شاخص گویای این است که از مجموع هفت تیپ وارونگی مشاهده‌شده تیپ وارونگی تابشی در هر سه شهر مورد مطالعه در همه‌ی ماه‌های سال روند کاملاً کاهشی و معنادار در سطوح ۹۵ و ۹۹ درصد داشت. وارونگی فرونشستی در هر سه شهر در بیشتر ماه‌های سال روند مثبت و در پاره‌ای از ماه‌ها روند معناداری را در سطوح ۹۵ و ۹۹ درصد نشان داده است.

روند وارونگی‌های جبهه‌ای در بیشتر ماه‌ها کاهشی بوده (منفی بودن آماره‌ی Z و شیب سن)، به‌جز سپتامبر که در مشهد روند وارونگی جبهه‌ای در سطح ۹۹ درصد افزایشی و در دسامبر این روند در سطح اطمینان ۹۵ درصد کاهشی بوده است. در بقیه‌ی ماه‌ها مقدار آماره‌ی Z و شیب سن منفی بوده و روند وارونگی‌های جبهه‌ای در سطوح اطمینان مورد نظر معنی‌دار

نیست. وارونگی جبهه‌های تهران فاقد روند معناداری بوده و در بیشتر ماه‌ها مقدار آماره Z و شیب سن منفی است. در ماه فوریه، در تبریز روند وارونگی جبهه‌های در سطح ۹۵ درصد کاهش و در مارس روند این تیپ وارونگی در سطح ۹۵ درصد افزایشی بوده است؛ در بقیه ماه‌های سال مقادیر آماره Z و شیب سن اکثراً منفی است. تیپ وارونگی ترکیبی تابشی-فرونشستی-جبهه‌ای در دوره مورد مطالعه در تهران نظم خاصی نداشته و در تبریز به جز روند افزایشی ضعیف در مارس در بقیه ماه‌ها فاقد روند معنادار بوده، اما روند این تیپ ترکیبی در مشهد در مه و اکتبر در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار بوده و در بقیه ماه‌ها نیز اکثراً روند شیب سن و آماره Z مثبت است. از میان تیپ‌های هفت‌گانه مشاهده شده، تیپ ترکیبی تابشی-فرونشستی بیشترین روند معناداری و افزایشی را در هر سه ایستگاه دارد؛ به طوری که در هر سه شهر ۶ ماه از سال روند افزایش فراوانی تیپ تابشی-فرونشستی در سطوح اطمینان ۹۵ و ۹۹ درصد معنادار بوده است و بیشترین افزایش فراوانی این تیپ وارونگی در فصول زمستان و پاییز اتفاق افتاده است. روند تیپ ترکیبی وارونگی‌های تابشی-جبهه‌ای در ایستگاه تهران در بیشتر ماه‌ها منفی بوده و در ماه مارس این تیپ روند کاهش معناداری در سطح اطمینان ۹۵ درصد با شیب سن منفی داشته است. در مشهد هم روند این تیپ وارونگی در بیشتر ماه‌ها منفی بود. این روند کاهش در ژوئن و اکتبر در سطح اطمینان ۹۵ درصد با شیب سن منفی معنادار است. روند تیپ تابشی-جبهه‌ای در تبریز شرایط متفاوتی با دو شهر تهران و مشهد دارد. در ژانویه و دسامبر روند فراوانی این تیپ وارونگی در سطح اطمینان ۹۵ درصد افزایشی بوده و فقط در اکتبر این تیپ وارونگی روند کاهش معنادار در سطح اطمینان ۹۵ درصد دارد.

تیپ ترکیبی وارونگی فرونشستی-جبهه‌ای در تهران در آوریل روند افزایشی ضعیفی داشت و به جز دسامبر، که مقدار آماره Z و شیب سن منفی بود، در سایر ماه‌ها روند معنادار نداشت. در مشهد وارونگی فرونشستی-جبهه‌ای نسبت به تهران روند افزایشی معنادارتری داشت و این معناداری در مارس و ژوئیه به سطح اطمینان ۹۵ درصد رسید و فقط در اکتبر در مشهد روند این وارونگی در سطح اطمینان ۹۹ درصد کاهش معناداری داشت. در تبریز نیز تیپ وارونگی فرونشستی-جبهه‌ای اکثراً روند کاهش داشته و در آوریل و سپتامبر این روند کاهش در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار شده است.

نتایج بررسی روند تعداد لایه‌های وارونگی شهرهای مورد مطالعه (جدول ۴) نشان داد که در هر سه شهر در همه ماه‌های سال فراوانی تعداد لایه‌های وارونگی افزایش چشم‌گیری داشته است. افزایش معنادار فراوانی لایه‌های وارونگی در سطح اطمینان ۹۹ و ۹۵ درصد فصل پاییز (اکتبر، نوامبر، و دسامبر) و همچنین ژانویه در هر سه شهر مشاهده می‌شود. در سایر ماه‌ها نیز معناداری افزایش تعداد لایه‌های وارونگی در سطوح اطمینان ۹۹ و ۹۵ درصد قابل توجه است.

بررسی سال به سال فراوانی روزهای وارونگی در هر سه شهر تهران، مشهد، و تبریز (جدول ۶) گویای وجود روند افزایشی معنادار در مقیاس سالانه است؛ به طوری که این افزایش فراوانی سالانه روزهای وارونگی شهر تهران را در سطح ۹۹ درصد معنادار نشان می‌دهد. این معناداری در مشهد و تبریز به ۹۵ درصد می‌رسد. تعداد روزهای بدون وارونگی هم در هر سه شهر روند کاهش معناداری در سطوح ۹۵ و ۹۹ درصد داشت.

نتیجه‌گیری

پایداری هوای ناشی از وارونگی دما بستر و زمینه مناسبی برای افزایش آلودگی هوا به خصوص در کلان‌شهرها فراهم می‌کند. در شرایط وارونگی دما، هوای مجاور سطح زمین سردتر از سطوح بالایی است. در نتیجه، جابه‌جایی عمودی هوا مختل می‌شود و هوای لایه مرزی در حالت پایدار قرار می‌گیرد. بررسی داده‌های رادیوسوند جو بالای ایستگاه‌های

هواشناسی شهرهای تهران (مهرآباد)، مشهد، و تبریز در ساعت صفر گرینویچ گویای رخداد انواع وارونگی‌های دمایی در طول سال در هر سه شهر است. نتایج نشان داد میانگین فراوانی روزهای همراه با وارونگی دما در شهر مشهد حدود ۳۲۰ روز، تهران حدود ۲۷۰ روز، و تبریز حدود ۲۶۰ روز است. این نتایج در مقایسه با پژوهش‌های نوروزیان (۱۳۹۴)، که میانگین روزهای وارونگی دمای تهران را ۲۲۳ روز بیان کرده، و در مقایسه با پژوهش جهانی بخش اصل و روشنی (۱۳۹۲)، که میانگین وارونگی دما در تبریز را ۱۹۱ روز برآورد کرده است، اندکی متفاوت است. دلیل این اختلاف از تفاوت دوره آماری ناشی می‌شود و گویای این واقعیت است که افزایش دوره آماری در این پژوهش و در نتیجه افزایش فراوانی روزهای همراه با وارونگی دما خود بیانگر روند صعودی فراوانی روزهای همراه با وارونگی دما در کلان‌شهرهای مورد مطالعه است.

بررسی روند فراوانی روزهای دارای وارونگی دمایی در بازه زمانی مورد مطالعه نتایج کم و بیش ناهمگونی برای تیپ‌های مختلف وارونگی به دست می‌دهد؛ درحالی‌که از نظر مکانی میان سه کلان‌شهر مورد بررسی تفاوت چندانی مشهود نیست. به هرروی، به ازای کاهش روزهای بدون وارونگی دمایی، فراوانی انواع وارونگی‌های دمای هوا در مقیاس سالانه در شهرهای تهران، مشهد، و تبریز روند افزایشی داشتند.

نتایج نشان داد از میان هفت نوع تیپ وارونگی بررسی شده، فقط وارونگی تابشی است که در هر سه کلان‌شهر (تهران، مشهد، و تبریز) دارای روند کاهشی معناداری در همه ماه‌های سال بوده است. علت کاهش وارونگی تابشی می‌تواند ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای و نیز آلودگی هوا در کلان‌شهرهای مورد مطالعه باشد که تابش امواج بلند فروسرخ گسیل شده از سطح زمین را در زیر چتر آلوده کلان‌شهرها به دام می‌اندازد و، ضمن توسعه جزیره گرمایی شهر، مقدار تابش برگشتی امواج بلند فروسرخ به سوی سطح زمین را افزایش می‌دهد و در نتیجه تراز انرژی لایه مرزی سطحی^۱ را به سوی مقادیر بالاتر سوق می‌دهد و مقدار سرمای تابشی شبانه^۲ را تعدیل می‌کند (طاوسی، ۱۳۹۷).

در مقابل، وارونگی از نوع فرونشستی روند افزایشی مثبت و معناداری را برای این سه شهر به‌ویژه در ساعات پایانی شب به وقت محلی و در ساعت (۰۰) رقم زده است. درست عکس رخداد کاهش سرمای تابشی شبانه در سطح شهرها و در زیر گنبد آلوده شهر، در قله‌ها و ارتفاعات پیرامونی، که معمولاً بالاتر از چتر آلودگی هوای شهری قرار دارند و در مقابل گسیل امواج بلند از سطح زمین بی‌حفاظاند، سرمای تابشی شبانه شدیدتر است. این امر موجب ریزش هوای سرد از نواحی کوهستانی و دامنه‌های پیرامونی شهر به‌ویژه در اوج رخداد سرمای تابشی شبانه (ساعات پایانی شب به وقت محلی) به سرزمین‌های پست‌تر و کم‌ارتفاع‌تر به‌خصوص در قلمرو جزیره گرمایی شهر می‌شود. در نتیجه، هوای گرم‌تر شهر به بالا رانده می‌شود و هوای سرازیر شده جای آن را می‌گیرد و وارونگی دمای فرونشستی رخ می‌دهد. روند افزایشی وارونگی فرونشستی می‌تواند پیامد تشدید گنبد هوای آلوده کلان‌شهرهای تهران، مشهد، و تبریز و توسعه جزیره گرمایی در این سه شهر باشد. این پدیده در هنگام حاکمیت سامانه پرفشار بر فراز شهرها تشدید می‌شود.

در بررسی ساختار وارونگی‌ها، نتایج کاملاً گویای تغییر تیپ وارونگی‌ها از وارونگی‌های خالص به وارونگی‌های ترکیبی و چندلایه بود؛ به‌طوری‌که در هر سه کلان‌شهر مزبور، تعداد لایه‌های وارونگی اتفاق افتاده در هر روز روند افزایشی و معناداری را در فصول پاییز و زمستان داشته است. افزایش وارونگی‌های فرونشستی و ترکیب شدن آن با وارونگی‌های تابشی، بروز وارونگی‌های چندلایه در آسمان این سه کلان‌شهر را سبب شده است. وارونگی‌های چندلایه سبب پایداری عمیق هوا در

1. Surface Boundary Layer

2. Nighttime Radiational Cooling

لایه‌های نزدیک سطح زمین می‌شوند. به نظر می‌رسد معناداری روند این تیپ وارونگی می‌تواند دلیل این رخداد باشد. نتایج مطالعه شدت وارونگی‌ها نشان داد که نوع وارونگی ترکیبی تابشی-فرونشستی و نیز تعداد لایه‌های وارونگی دما روند افزایش معناداری داشت. به هر روی، به رغم اینکه شدت وارونگی‌ها در بیشتر ماه‌های سال دارای شیب مثبتی بودند، به جز فصل پاییز در کلان‌شهر تهران، باید گفت روند افزایشی شدت وارونگی‌ها معنادار نیست.

به طور کلی، نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها گویای این موضوع است که از بین تیپ‌های ترکیبی، فراوانی رخداد روزهای همراه با وارونگی تابشی-فرونشستی روند مثبت و معناداری در هر سه کلان‌شهر داشت. افزایش وارونگی‌های تابشی-فرونشستی می‌تواند از نیروزایی واگرایی هوا در سطوح میانی هواسپهر و سرمایه‌ش تابشی شبانه سطح زمین منتج شود که پیامد آن پایداری بسیار شدید هواست.

منابع

- اسماعیلی، ر. (۱۳۹۶). بررسی ساختار وارونگی دمایی شهر مشهد، پایان نامه کارشناسی ارشد آب و هواشناسی شهری، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد.
- پناهی، ع. (۱۳۹۵). بررسی الگوهای همدیدی براساس دوره های بحرانی آلودگی هوا در وارونگی دمایی شدید شهر تبریز، پژوهش های جغرافیای طبیعی، ۴: ۶۰۷-۶۲۵.
- جهان بخش اصل، س. و روشنی، ر. (۱۳۹۲). بررسی وضعیت و شدت وارونگی های سطح پایین شهر تبریز طی دوره ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۸، فصل نامه تحقیقات جغرافیایی، ۴: ۴۵-۵۴.
- جهان بخش اصل، س. و روشنی، ر. (۱۳۹۳). بررسی شرایط الگوی سینوپتیکی حاکم بر وضعیت وارونگی دمای بسیار شدید شهر تبریز، نشریه جغرافیا و برنامه ریزی، ۴۸: ۸۱-۹۶.
- حسین زاده، س.ر.؛ دوستان، ر. و حقیقت ضیابری، س.م. (۱۳۹۲). بررسی الگوهای همدید مؤثر بر آلودگی هوا در کلان شهر مشهد، مجله جغرافیا و توسعه ناحیه ای، ۱۱: ۸۱-۱۰۱.
- صادقی، س.؛ مفیدی، ع.؛ جهانگیری، م. و دوستان، ر. (۱۳۹۳). نقش الگوهای گردش منطقه ای جو بر وقوع روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد، جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۰: ۱-۳۵.
- صفوی، ی. و علیجانی، ب. (۱۳۸۵). بررسی عوامل جغرافیایی در آلودگی هوای تهران، پژوهش های جغرافیایی، ۵۸: ۹۹-۱۱۲.
- طاوسی، ت. (۱۳۹۷). آب و هواشناسی فیزیکی، انتشارات دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- عظیمی، ف. (۱۳۸۷). ارزیابی تأثیر وارونگی دما بر روند آلودگی هوای شهر اهواز؛ فصل نامه جغرافیایی سرزمین، ۱۹: ۱۰۵-۱۱۲.
- علیجانی، ب. و نجفی نیک، ز. (۱۳۸۸). بررسی الگوهای سینوپتیکی اینورژن در مشهد با استفاده از تحلیل عاملی جغرافیا و توسعه ناحیه ای، ۷(۱۲): ۱-۱۱.
- کرم پور، م.؛ سلیقه، م.؛ طولابی نژاد، م. و زارعی چغابلی، ز. (۱۳۹۵). بررسی آلودگی هوای شهر تهران به روش وارونگی بحرانی هافتر، تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۱: ۵۱-۶۴.
- کیخسروی، ق. و لشکری، ح. (۱۳۹۳). تحلیل رابطه بین ضخامت ارتفاع وارونگی و شدت آلودگی هوا در شهر تهران، جغرافیا و برنامه ریزی، ۴۹: ۲۳۱-۲۵۷.
- نوروزیان، م. (۱۳۹۴). بررسی ساختار وارونگی دما در کلان شهر تهران، پایان نامه کارشناسی ارشد جغرافیای طبیعی، دانشگاه فردوسی مشهد.
- وثوقی، ا. و صراف زاده، م.ح. (۱۳۹۰). مطالعه و بررسی پدیده وارونگی هوا و اثر آن روی آلودگی کلان شهرها، اولین همایش فناوری های پالایش در محیط زیست، تهران، دانشگاه شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت.
- هدایت، پ. و لشکری، ح. (۱۳۸۵). تحلیل الگوی سینوپتیکی اینورژن های شدید شهر تهران، پژوهش های جغرافیایی، ۵۶: ۶۵-۸۲.
- Alijani, B. and Najafi Nik, Z. (2009). Investigation of Inverted Synergistic Patterns in Mashhad Using Geographic Factor Analysis and Regional Development, 7(12): 1-11.
- Azimi, F. (2008). Assessing the Impact of Temperature Inversion on Air Pollution Trends in Ahvaz City, Geographical Journal of Territory, 19: 105-112.

- Bei, N.; Li, G.; Huang, R.; Cao, J.; Meng, N.; Feng, T.; Liu, S.; Zhang, T.; Zhang, Q. and Molina, L.T. (2016). Typical synoptic situations and their impacts on the wintertime air pollution in the Guanzhong basin, China, *Journal Atmospheric Chemistry and Physics*, NO. 0: 1-34.
- Brümmer, B. and Schultze, M. (2015). Analysis of a 7-year low-level temperature inversion data set measured at the 280 m high Hamburg weather mast, *Meteorologische Zeitschrift*, 24(5): 481-494.
- Cannarozzo, M.; Noto, L.V. and Viola, F. (2006). Spatial Distribution of Rainfall Trends in Sicily, *Journal of Physics and Chemistry of the Earth*, 31: 1201-1211.
- Chappelka, H. and Pan, S. (2007). Influence of ozone pollution and climate variability on net Primary productivity and carbon storage in China's grassland ecosystems from 1961 to 2000, *Environmental Pollution*, 149: 85-94.
- Hedayat, P. and Lashkari, H. (2006). Synoptic pattern of very intense inversions in Tehran, *Geographical studies*, 56: 65-82.
- HosseinZadeh, S.; Dostan, R.; Hagigat Ziyabari, S.M. and Hagigat Ziyabari, S.M. (2013). Investigating the synoptic patterns affecting air pollution in the metropolis of Mashhad, *Journal of Geography and Regional Development*, 11(21): 81-101.
- Iacobellis, S.F.; Norris, J.R.; Kanamitsu, M.; Tyree, M. and Cayan, D.C. (2009). Climate Variability and California Low-level Temperature Inversions, *California Climate Change Center*, 1- 47.
- Ismaili, R. (2017). *Investigation of the Structure of Temperature Inversion in Mashhad*, M.Sc. in Urban Meteorology, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad.
- JahanBakhsh ASL, S. and Rohsnai, R. (2014). Synoptic pattern of very intense inversion in Tabriz, Iran, *Journal of Geography and planning*, 96: 81-96.
- JahanBakhshasl, S. and Rohsnai, R. (2013). Low-level inversion and intensity in Tabriz, Iran from 2004 to 2008, *Seasonal Journal of Geographical Studies*, 4: 45-54.
- Karampour, M.; Saligheh, M.; Toulabinejad, M. and Zarei Choghabaki, Z. (2016). Evaluation of air pollution in Tehran city by Hefter's critical Inversion method, *Jsaeh*, 3(1): 51-64.
- Keykhosrowi, GH. and Hasan 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*, 18(49): 231-257.
- Lin, J. and Michael B.M. (2010). Impacts of boundary layer mixing on pollutant vertical profiles in the lower troposphere: Implications to satellite remote sensing, *Atmospheric Environment*, 44: 1726-1739. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2010.02.009.
- Nowruzian, M. (2015). *Investigation of Temperature Inversion Structure in Tehran Metropolis*, M.Sc. in Natural Geography, Ferdowsi University of Mashhad.
- Panahi, AS. (2016). Investigation of Synoptic Patterns Based on Critical Periods of Air Pollution in Severe Temperature Inversion in Tabriz, *Geography Research*, 4: 625-607.
- Sadegi, R.; Mofidi, A.; Jahanshiri, M. and Dostan, R. (2014). Investigating the role of regional scale atmospheric circulation patterns on heavily polluted days in the city of Mashhad, *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 3(10): 1-35.
- Safavi, Y. and Alijani, B. (2006). Effective geographical factors in Tehran air pollution, *Geographical studies*, 58: 99-112.
- Tavousi, T. (2018). *Physical Climatology*, Sistan and Baluchestan University Press.

- Vosoughi, A. and Sarrafzadeh, M.H. (2011). Investigation of air inversion phenomenon and its effect on metropolitan pollution Case study, *First Conference on Environmental Purification Technologies*, Tehran, Sharif University, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering.
- Yasmeen, Z. (2011). Inversion Layer and its Environmental Impact over Karachi, *Pakistan Journal of Meteorology*, 7: 53-62.
- Zeng, S. and Zhang, Y. (2017). The Effect of Meteorological Elements on Continuing Heavy Air Pollution, A Case Study in the Chengdu Area during the 2014 Spring Festival, *Atmosphere*, 8(4): 85-94.