نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال سوم، شماره ۱، بهار۱۳۹۵
صفحات٦٤- ٥١

بررسی آلودگی هوای شهر تهران به روش وارونگی بحرانی هافتر

مصطفی کرمپور، استادیار اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه لرستان.
محمد سلیقه، دانشیار آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی،دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
میثم طولابی نژاد، دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی ، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
زهرا زارعی چغابلکی[1]، دانشجوی دکتری اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه لرستان.

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۷/۱۱ پذیرش نهایی :۱۳۹۴/۱۲/۱۹

چکیده

هدف اساسی این تحقیق بررسی ارتفاع لایه آمیخته با استفاده از روش وارونگی بحرانی و نقش آن در آلودگی شهر تهران می باشد. در این راستا از داده‌های سال ۲۰۱۳ مربوط به پیمایش قائم جو برای ایستگاه مهرآباد از پایگاه داده‌های اقلیمی Wyoming استفاده گردید. همچنین داده‌های ساعتی عناصر آلاینده هوا شامل آلاینده‌های گازی CO, N۲O,O۳,SO۲ و ذرات معلق (PM۱۰) از مرکز کنترل کیفیت هوای تهران(AQCC) برای ایستگاه‌های(اقدسیه، ژئوفیزیک، پونک، شهر ری و منطقه ۱۱) دریافت و اقدام به جداسازی روزهایی با غلظت آلودگی بالا و روزهایی با شرایط خوب بگونه‌ای که در تمامی ایستگاه‌های مورد بررسی یکسان باشند، گردید. با ترسیم و تحلیل گراف‌های Skew-T و براساس روش وارونگی بحرانی Heffter، از میان ۱۰۰ روز همراه با وارونگی، ۳۰ روز بحرانی تشخیص داده شد که از این میان ۴ روز در دمای پتانسیل، یعنی ۲ روز آلوده (۶ فوریه و ۱۶ اوت) و ۲ روز پاک(۹ فوریه و ۵ ژوئن) انتخاب گردید. بر اساس نتایج پیمایش‌های قائم جوی در نمونه های آلوده، وارونگی‌ها در ساعات صبحگاهی از نوع تابشی بوده که مشخصه بارز آن ها، ضخامت کم و خیزآهنگ زیاد دمای پتانسیل می‌باشد. در حالی که در ساعات ظهر وارونگی‌ها ناشی از فرونشینی هوا بوده و مهمترین ویژگی آن‌ها، ضخامت زیاد و خیز آهنگ کم دمای پتانسیل می‌باشد. همچنین مشاهده گردید که در نمونه های پاک(فصل گرم و سرد سال) وارونگی ها در ساعات صبح و بعد از ظهر از نوع فرونشینی و شدت خیزآهنگ دمای پتانسیل مساوی بوده است. در نمونه های فصل گرم سال از نوع پاک، وارونگی مشاهده شده در ساعت صبحگاهی از نوع فرونشینی و درساعت بعدازظهر هیچ نوع وارونگی ای مشاهده نشده است.

واژگان کلیدی: آلودگی هوا، وارونگی دمایی، دمای پتانسیل، لایه مرزی، نمودار Ske

[1]- نویسنده مسئول: Email: zzarei۲۹@yahoo.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.1.51]

مقدمه

لایه نازک جو که در مجاورت سطح زمین قرار دارد و عمق آن بسته به زمان و شبانه روز و سال و شرایط همدیدی از چند ده متر تا چند کیلومتر تغییر می‌کند، لایه مرزی جو نامیده می‌شود. توزیع غیر یکنواخت ناهمواری، شار گرمایی و توزیع سرعت باد، لایه مرزی جو را متأثر می‌سازد. در مباحث مربوط به آلودگی هوا، ضخامت لایه مرزی به عمق لایه آمیخته معروف است، زیرا آلودگی که بیشتر در سطح زمین ایجاد می‌شود، از طریق فرایندهای تلاطمی در تمامی این لایه مخلوط می‌شود(احمدی گیوی،۱۰۷:۱۳۸۷). در اکثر اوقات مرز بالای این ناحیه بطور مشخص بر روی شهرهای بزرگ و صنعتی قابل رویت است. عمق لایه آمیخته در میزان غلظت آلودگی هوا دارای تأثیر مهمی است که خود وابسته به شدت و مدت تابش خورشیدی و سرعت باد می‌باشد. معمولاً پس از گذشت ۲ تا ۳ ساعت از زمان بیشینه تابش خورشیدی، دمای هوای نزدیک سطح زمین به مقدار بیشینه خود می‌رسد، در این زمان همرفت‌های گرمایی در هوای مجاور سطح زمین شکل گرفته و باعث انتقال گرما از سطح به ارتفاعات بالاتر می‌شود و این حرکت‌های قائم باعث ایجاد تلاطم‌های جوی و افزایش شدت ناپایداری می‌گردد. این زمانی است که رشد لایه آمیخته به بیشترین مقدار خود می‌رسد. پس از غروب خورشید وارونگی دمایی شبانه در نزدیکی سطح زمین رخ می‌دهد. این وارونگی دما در اثر سرد شدن سریع سطح زمین به وقوع می‌پیوندد. در این حالت لایه هوای سرد در پائین و لایه هوای گرم در بالای آن قرار می‌گیرد و هوا در وضعیت پایدار قرار می‌گیرد. در نتیجه تجمع آلودگی، در صورت وجود چشمه‌های آلاینده، در لایه نزدیک سطح زمین می‌تواند افزایش یابد. اگر در طول روز شرایط پایدار باقی بماند لایه آمیخته رشد چندانی نخواهد داشت و درنتیجه حجم آلودگی در لایه کم عمق مجاورت سطح زمین باعث کاهش تابش خورشیدی می‌گردد. از طرفی میزان آلودگی هوا با سرعت و جهت باد رابطه دارد با افزایش سرعت باد تلاطم و حرکت‌های قائم در لایه آمیخته افزایش می یابد که سبب پخش آلودگی در حجم بیشتر و درنتیجه کاهش غلظت آلودگی می شود. همچنین اگر باداز سمت مناطق آلوده بوزد، باعث افزایش غلظت آلاینده ها می شود. وارونگی دمایی معمولا بسته به فصل و شرایط آب و هوایی دارای شدت های متفاوتی است(استال[۱]،۶۷۰:۱۹۹۸). عمق لایه مرزی با روش‌های متفاوتی قابل محاسبه است. این عمق که ضخامت ناحیه تلاطمی نزدیک سطح را نشان می‌دهد، عمدتاً عمق لایه آمیخته و یا عمق آمیختگی نامیده می‌شود(پانوفسکی و داتون[۲]،۳۹۷:۱۹۸۴). روش هایی که برای تعیین لایه مرزی جو یا عمق لایه آمیخته بکار می‌رود، معمولاً در بررسی آلودگی هوا به کار می‌رود. برآورد کردن عمق لایه آمیخته، یکی از مهمترین پارامترها در مدل پخش آلاینده‌ها است. بیشترین تحلیل‌هایی که برای تشخیص عمق لایه آمیخته صورت می‌گیرد، براساس نمایه قائم دما و یا عدد ریچاردسون بحرانی است. در تعیین عمق لایه آمیخته بر پایه نمایه قائم دما، از ویژگی این لایه که در آن دمای پتانسیلی یکنواخت است، استفاده می‌شود. از سوی دیگر، مدلهای عددی عمدتاً از عدد ریچاردسون بحرانی برای تعیین عمق لایه آمیخته، استفاده می‌کنند.

مطالعاتی در خصوص مدلهای لایه مرزی منطقه شهری برای شرایط مختلف پایدار و ناپایدارانجام گرفته است. از جمله مدل رشد لایه آمیخته روزانه جو شهری است که توسط دیردروف[۳](۱۹۷۴)، انجام و با استفاده از آهنگ تغییر

۱. Stull
۲. Panofsky and Dutton
۳ .Deardroff

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.1.51]

عمق لایه آمیخته، غلظت آلودگی هوا را بررسی نمودند. همچنین فیناردی و پلیگینی[۱](۲۰۰۲)، شرایط همدیدی حاکم بر یک مورد آلودگی بسیار شدید هوای شهری را در دره پو ایتالیا بررسی و به این نتیجه رسیدند که فرارفت هوای گرم بر روی لایه های سرد نزدیک سطح زمین منجر به ایجاد ساختار دمایی پایدار در اتمسفر پایین می گردد. وارونگی ها و یا نمایه های قائم دمای بسیار پایدار در ارتفاعات صفر و دوهزار متری در موارد آلودگی های شدید دیده می شود. در تحقیقی دیگر هارلی[۲](۲۰۰۷)، با بهره گیری از روش EDMF ،لایه مرزی همرفت خشک را در بعداز ظهر یک روز تابستانی شبیه سازی کرد. نتایج حاصل از مقایسه این مدل با آزمایشگاه و مشاهدات در چارچوب مقیاس لایه آمیخته نشان داد که روش EDMF می تواند زمینه های اشفتگی در سطوح بالای لایه مرزی را به خوبی پیش بینی کند. بر اساس نتایج تحقیقات واردولسکی و کاسمنوس[۳](۲۰۰۸)، در دو شهر آتن یونان و بیرمنگام انگلیس مشخص شد که طی فصل سرد، همبستگی مثبتی بین آلاینده $PM_{۱۰}$ و آلاینده های CO و NO_x و تابش خورشیدی و همبستگی منفی بین آلاینده $PM_{۱۰}$ و ازن و سرعت باد و بارش وجود دارد و این همبستگی‌ها در طی فصل گرم ضعیف شده است. همچنین بررسی دوره‌های حاد آلودگی $PM_{۱۰}$ در آن دو شهر نشان داده که اکثر این دوره‌ها در بیرمنگام منشأ فرامحلی و در آتن منشأ محلی داشته است. ین و همکاران[۴](۲۰۱۱)، تأثیر فضای سبز پارک‌ها بر کاهش غلظت آلاینده‌ها در ۶ پارک واقع در شانگهای چین بررسی کرده‌اند. طبق نتایج آن‌ها میزان کاهش در فصول مختلف سال به‌ترتیب برای آلاینده‌های ذرات معلق ۳۵-۲، برای SO۲، ۲۷-۲ و برای NO۲ ۲۱-۱ درصد محاسبه شده است. بنابراین بیش‌ترین اثر کاهشی فضای سبز بر ذرات معلق بوده است.

در ایران یکی از اولین مطالعات انجام گرفته ارائه یک مدل انتگرالی برای پیش یابی غلظت آلاینده های هوای تهران توسط بیدختی و بنی هاشم(۱۳۷۶)، است که بر اساس شبیه سازی لایه آمیخته و قانون بقای جرم استوار است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که غلظت آلاینده ها می تواند در اوایل روز به مقدار بسیار بالایی برسد. احمدی گیوی و همکاران(۱۳۸۷)، در مطالعه‌ای به بررسی نوسان عمق لایه آمیخته جو شهری تهران با استفاده از مدل MM۵ پرداختند نتایج نشان داد که روند کلی تغییرات ماهانه عمق لایه آمیخته، خصوصاً در فصل تابستان به علت شرایط آرام جو بوده و مستقیماً از روندهای تغییرات شارهای سطحی پیروی می کند در حالیکه در زمستان، تغییرات شارهای سطحی و نوسانات لایه آمیخته چشمگیر تر است، رشد این لایه بیشتر متأثر از ساختار سامانه های همدیدی و چینش قائم باد است. همچنین قسامی و همکاران(۱۳۸۹)، به مطالعه تغییرات گرادیان قائم دمای پتانسیل در لایه مرزی برای 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 آلاینده های هوای تهران مانند NOx، ۲SO و CO با تغییرات گرادیان قائم دمای پتانسیل همبستگی خوبی نشان می دهد. این ضریب همبستگی با توجه به حالات بررسی شده دراین مطالعه حدود ۰/۴ می‌باشد. حسین پور(۱۳۹۰)، تحلیل همدیدی آلودگی هوای تهران را با تاکید بر ذرات معلق انجام داد و برای شرایط همزمان آلودگی در سطح زمین از مدل TAPM استفاده کرد. یاوری و سلیقه(۱۳۹۰)

۱ .Finardi and Pellegini
۲ .Hurley
۳ .Vardoulakis and Kassomenos,
٤. Yin et al

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.1.51]

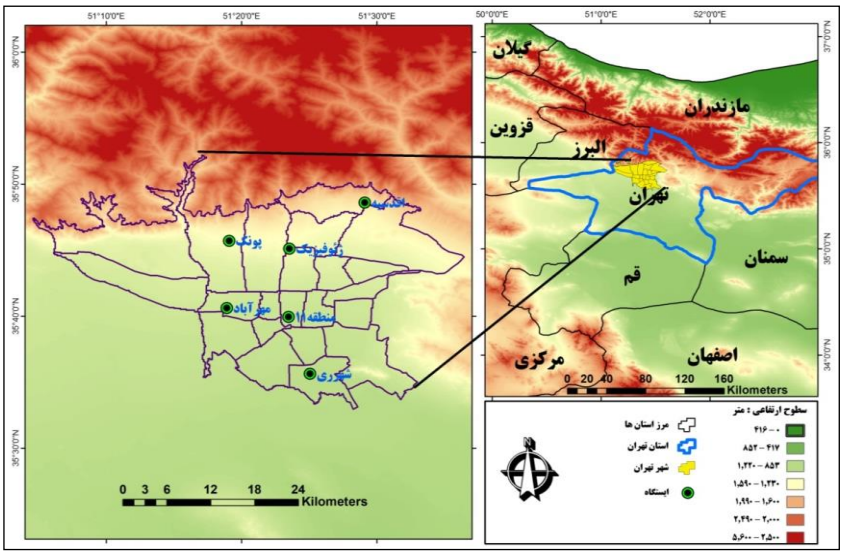
به بررسی سطوح وارونگی در آلودگی های شهر تهران پرداختند. نتایج آنها نشان داد که آلودگی های ایستگاههای تهران در سطح وسیعی ناشی از وارونگی دمایی می باشد که متأثر از سامانه های فشار و تشعشع زیاد سطح زمین است. شمسی پور و همکاران(۱۳۹۲)، با شبیه سازی الگوی پراکنش آلودگی شهر تهران در شرایط باد به این نتیجه رسیدند که در شرایط وزش باد، میزان انرژی جنبشی ناشی از سرعت باد افزایش می یابد و درشرایط ناپایدار جوی، با انتقال افقی آلاینده ها و ایجاد حرکات قائم سبب تعدیل آلودگی می گردد. شرعی پور و بیدختی(۱۳۹۳)، با بررسی توزیع مکانی زمانی آلاینده های هوا در شهر تهران برای ماه های سرد سال های ۲۰۱۳-۲۰۱۱ به این نتیجه رسیدند که توزیع مکانی زمانی میانگین آلاینده ها طی ماه دسامبر۲۰۱۲ نشان می‌دهد که غلظت آلاینده‌های گازی از جنوب به شمال و غلظت آلاینده های ذرات معلق از شمال به جنوب و از شرق به غرب افزایش می‌یابد. مقایسه نقشه‌های توزیع آلاینده CO به‌هنگام ظهر و شب نشان می‌دهد که به‌هنگام ظهرگرادیان شدیدی (شمال جنوبی) بر هم مقدارهای آلاینده CO حاکم است و در شب این گرادیان کاهش یافته و توزیع یکنواخت‌تر می شود. این نشان از انتقال آلاینده های گازی توسط باد آناباتیک (دشت به کوه) به سوی شمال در روز هنگام و بر عکس آن در شب با باد کاتاباتیک (کوه به دشت) کوهستان است که اغلب بر این منطقه، به‌ویژه در فصل سرد، حاکم است. عمق لایه مرزی (افزایشی به سوی جنوب) نیز روی این توزیع ها موثر است. مفیدی و همکاران(۱۳۹۳)، باروش های تحلیل همدید دستی، ردیابی پسگرد ذرات معلق و بررسی شرایط ترمودینامیک جو نقش الگوهای گردش مقیاس منطقه‌ای جو بر وقوع روزهای بسیارآلوده در شهر مشهد را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج آنان بیانگر آن است که روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد در قالب چهار الگوی گردشی اصلی شامل: الگوی ترکیبی پرفشارسیبری- پشته جنب حاره ای، پرفشار مهاجر، پشته جنب حاره‌ای و الگوی کم فشار برون حاره، قابل طبقه‌بندی می‌باشند. سالانه هزاران تن آلاینده های گازی و ذرات معلق در فضای کلانشهر تهران منتشر می شود که با توجه به موقع جغرافیایی و وضعیت اقلیمی تهران، پدیده وارونگی هوا چندان دور از انتظار نیست. با ایجاد لایه وارونگی، این آلاینده ها برای مدت زیادی در مجاورت سطح زمین باقی می مانند که مشکلات قلبی و تنفسی زیادی با خود به همراه می آورد. بنابراین شناسایی ویژه گی این لایه در روزهای آلوده از اهمیت ویژه ای در سلامت ساکنین این کلانشهر برخوردار است.

داده ها و روش کار

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شهر تهرانمی باشد که در کوهپایه‌های جنوبی ارتفاعات البرز و در حد فاصل طـول جغرافیایی ۵۱درجه و ۲ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۶ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجـه و ۵۰ دقیقه شمالی گسترده است. ارتفاع شهر در شمالی‌ترین نقطه به ۱۸۰۰ و تا ۱۲۰۰ متر در مرکـز و ۱۰۵۰ متـر در جنوب می‌رسد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.1.51]



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی شهر تهران و ایستگاه های آلوده سنجی

جهت انجام این تحقیق، ابتدا داده‌های مربوط به وارونگی‌های شامل دما، باد، فشار و رطوبت و داده‌های رادیوسوند پیمایش قائم جو در ایستگاه هواشناسی مهرآباد از ماه ژانویه تا ۲۹ دسامبر سال ۲۰۱۳ میلادی از سازمان هواشناسی کشور اخذ، سپس آمار پیمایش عمودی روزانه جو بالا در ایستگاه سینوپتیک مهرآباد از پایگاه داده‌های اقلیمی دانشگاه وایومینگ[1] دریافت شد. علت انتخاب ایستگاه مهرآباد این است که، از میان ایستگاه های هواشناسی شهر تهران، تنها مهرآباد اقدام به اندازه گیری و ثبت داده های جو بالا می نماید و سایر ایستگاه ها فاقد این نوع داده ها می باشند. همچنین داده‌های ساعتی عناصر آلاینده هوا شامل آلاینده‌های گازی CO, N۲O,O۳,SO۲ و ذرات معلق (PM۱۰) نیز از مرکز کنترل کیفیت هوا(AQCC) برای ایستگاه‌های(اقدسیه، ژئوفیزیک، پونک، شهر ری و منطقه ۱۱) تهیه گردید.

پس از اخذ اطلاعات مربوط به پیمایش قائم جو در ایستگاه مهرآباد طی سال ۲۰۱۳، ، نمودار Skew-T ، شاخص‌ها و اطلاعات نیمرخ شرایط جوی برای شناخت وضعیت دینامیکی و ترمودینامیک جو طی روز های منتخب در محیط نرم افزار RAOB ترسیم شد. همچنین به منظور بررسی دقیق‌تر جو تحتانی تغییرات نمایه قائم دمای پتانسیل، با استفاده از داده‌های روزانه رادیوسوند به رسم منحنی‌های تغییرات دمای پتانسیل بر حسب ارتفاع اقدام گردید. در ادامه جهت بررسی میزان پراکنش آلاینده‌ها، ایستگاه‌ها طوری انتخاب شدند که بتوانند سطح نسبتاً کاملی از منطقه مورد مطالعه را پوشش دهند. سپس به منظور شناسایی روزهای با غلظت آلودگی بالا (وضعیت ناسالم برای گروه های حساس) و روزهایی با شرایط خوب بگونه‌ای که در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه یکسان باشند، بر اساس شاخص استاندارد آلودگی‌هوا (جدول۱)، اقدام گردید. با بررسی داده‌های مربوط به وارونگی‌های رخ داده، در طی ۳۶۵ روز از سال ۲۰۱۳ میلادی، بیش از ۱۰۰ روز وارونگی از انواع مختلف شناسایی گردید. در ادامه با ترسیم نمودارهای

۱-Wyoming

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.1.51]

Skew-T این ۱۰۰ روز، بیش از ۳۰ روز وارونگی بحرانی جداسازی شد که از میان آن‌ها، ۴ روز که دارای شدیدترین وارونگی بحرانی و دو شرط روش هافتر بودند. انتخاب گردید. در پایان ۴ روز همراه با وارونگی بحرانی در دمای پتانسیل، شامل دو روز آلوده (۶ فوریه و ۱۶ اوت) و دو روز پاک(۹ فوریه و ۵ ژوئن) شناسایی؛ سپس براساس روش پیشنهادی هافتر، ارتفاع تقریبی لایه مرزی در این ۴ روز مورد محاسبه قرار گفت.

جدول ۱: طبقات غلظت آلاینده ها جهت محاسبه شاخص استاندارد آلودگی هوا (USEPA،۱۹۹۸)

وضعیت سلامتی	PM۱۰ (g/m۳)۲۴hr	SO۲ (ppb)۲۴hr	NO۲ (ppb)۱hr	O۳ (ppb)۱hr	CO(ppm) ۸hr
خوب	۰-۷۵	۰-۳۰	۰-۱۵۰	۰-۶۰	۰-۴/۵
متوسط	۷۰-۱۵۰	۳۰-۱۴۰	۱۵۰-۳۰۰	۶۰-۱۲۰	۴/۵-۹
ناسالم(گروه حساس)	۱۵۰-۳۷۵	۱۴۰-۳۰۰	۳۰۰-۶۰۰	۱۲۰-۲۰۰	۹-۱۵
ناسالم	۳۷۵-۶۲۵	۳۰۰-۶۰۰	۶۰۰-۱۲۰۰	۲۰۰-۴۰۰	۱۵-۳۰
بسیار ناسالم	۶۲۵-۸۷۵	۶۰۰-۸۰۰	۱۲۰۰-۱۶۰۰	۴۰۰-۵۰۰	۳۰-۴۰
خطرناک	۸۷۵-۱۰۰۰	۸۰۰-۱۰۰۰	۱۶۰۰-۲۰۰۰	۵۰۰-۶۰۰	۴۰-۵۰

روش هافتر از روش‌های مبتنی بر تحلیل پروفایل عمودی دمای پتانسیل می‌باشد. دمای پتانسیل یک بسته هوا، عبارت است از دمایی که بسته هوا در صورتی که از تراز مربوطه به صورت بی دررو، به تراز ۱۰۰۰میلی باری انتقال داده شود به دست خواهد آورد و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\theta = T\left(\frac{P_0}{P}\right)^{R/Cp}$$

که در آن θ دمای پتانسیل بسته هوا برحسب درجه کلوین،T دمای خشک بسته هوا(برحسب کلوین)، P فشار بسته هوا برحسب میلی‌بار، و P۰ نیز فشار استاندارد بوده که معمولا برابر ۱۰۰۰میلیبار در نظر گرفته می‌شود، R نیز ثابت گازها بوده و cp نیز ظرفیت گرمای ویژه هوا در فشار ثابت می‌باشد. که حاصل کل R/cp تقریباً برای هوا برابر ۰/۲۸۶ درنظر گرفته می‌شود(پسنسون[۱]، ۲۰۰۲ و هافتر[۲]، ۱۹۸۰).

وارونگی بحرانی دمای پتانسیل با دو شرط زیر مشخص می شود:

شرط ۱)

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta z} \geq 0.005\,K\,m^{-1}$$

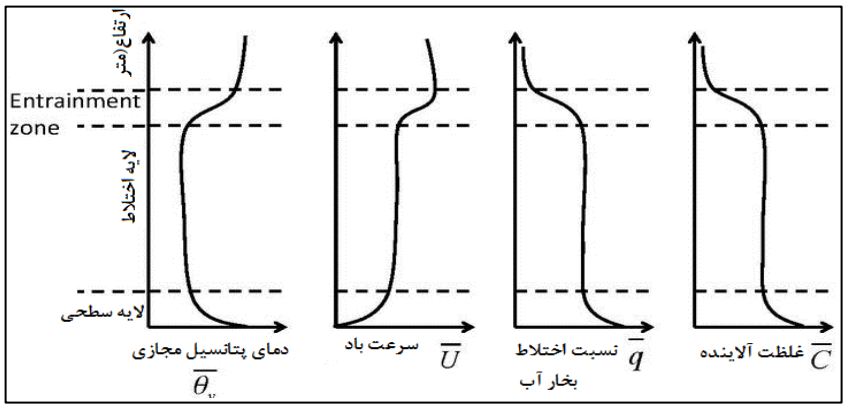
شرط ۲)

$$\theta_t - \theta_b > 2\,K$$

۱. Pesenson
۲. Heffter

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.1.51]

که در آن θ عبارت است از دمای پتانسیل. θ_b و θ_t به ترتیب دمای پتانسیل کف و سقف لایه وارونگی بحرانی هستند. و $\frac{\Delta\theta}{\Delta z}$ نیز میزان خیز اهنگ دمای پتانسیل نسبت به ارتفاع یا شیب ارتفاعی دمای پتانسیل در لایه وارونگی می‌باشد(برحسب درجه کلوین در متر). بنابراین تنها وارونگی‌هایی که دو شرط مذکور درمورد آن‌ها تأیید شود به عنوان وارونگی بحرانی در نظر گرفته شوند(لین و مایکل[1]،۲۰۱۰:۵۵). از آنجا که می‌دانیم در لایه مرزی که تاحد زیادی منطبق بر لایه آمیخته می‌باشد، به دلیل وجود آمیختگی، خیز اهنگ یا تغییر دمای پتانسیل نسبت به ارتفاع تقریباً ثابت یا بسیار کوچک است(وینگارد و ریچارد[2]،۱۹۸۳:۱۰۴).



شکل ۲: پروفایل قائم برخی عناصر هواشناسی در بخش‌های مختلف لایه مرزی (stull, ۱۹۹۳)

شرح و تفسیر نتایج

با بررسی داده‌های مربوط به وارونگی‌های رخ داده، طی سال ۲۰۱۳ میلادی، بیش از ۱۰۰ روز وارونگی از انواع مختلف شناسایی گردید. در ادامه با ترسیم نمودارهای Skew-T این ۱۰۰ روز، بیش از ۳۰ روز وارونگی بحرانی جداسازی شد که از میان آن‌ها، تنها ۴ روز که دارای شدیدترین وارونگی بحرانی و دو شرط روش هافتر بودند یافت شد(جدول ۲). فاکتورهای ترمودینامیکی مربوط به وارونگی روزهای ذکر شده با توجه به نمودارهای Skew-T در جدول ۲ ارائه شده اند.

۱ .Lin and Michael
۲. Wyngaard and Richard

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.1.51]

جدول۲: مشخصات ۴ روز دارای شرایط وارونگی بحرانی

تاریخ	زمان	ارتفاع کف	ارتفاع بالا	دمای پتانسیل کف	دمای پتانسیل بالا	نوع وارونگی	اختلاف دمای پتانسیل کف و سقف لایه وارونگی	اختلاف ارتفاع کف و سقف لایه وارونگی (متر)	خیز آهنگ دمای پتانسیل در لایه وارونگی بحرانی (کلوین)
۶ فوریه	صبح	۱۱۹۱	۱۲۱۹	۲۸۸/۹	۲۹۱/۷	تابشی	۲/۸	۲۸	۰/۱
	شب	۱۸۵۵	۱۹۷۷	۲۹۷/۸	۳۰۰/۵	فرونشینی	۲/۷	۱۲۲	۰/۰۲
۱۶ اوت	صبح	۱۱۹۱	۱۲۳۱	۳۱۰/۴	۳۱۱/۸	تابشی	۱/۴	۴۰	۰/۰۳
	شب	۵۸۸۳	۶۱۱۹	۳۲۲/۸	۳۲۶/۲	فرونشینی	۳/۴	۲۳۶	۰/۰۱
۹فوریه	صبح	۲۰۳۶	۲۱۸۱	۲۹۷/۵	۲۹۹/۲	فرونشینی	۱/۷	۱۱۸	۰/۰۱
	شب	۲۵۵۰	۲۶۶۹	۲۹۹	۳۰۰/۹	فرونشینی	۱/۹	۱۱۹	۰/۰۱
۵ ژوئن	صبح	۵۳۱۶	۵۳۶۱	۳۱۹/۱	۳۲۱	فرونشینی	۱/۹	۴۵	۰/۰۴
	شب	وارونگی ای در ساعت ظهر مشاهده نشد							

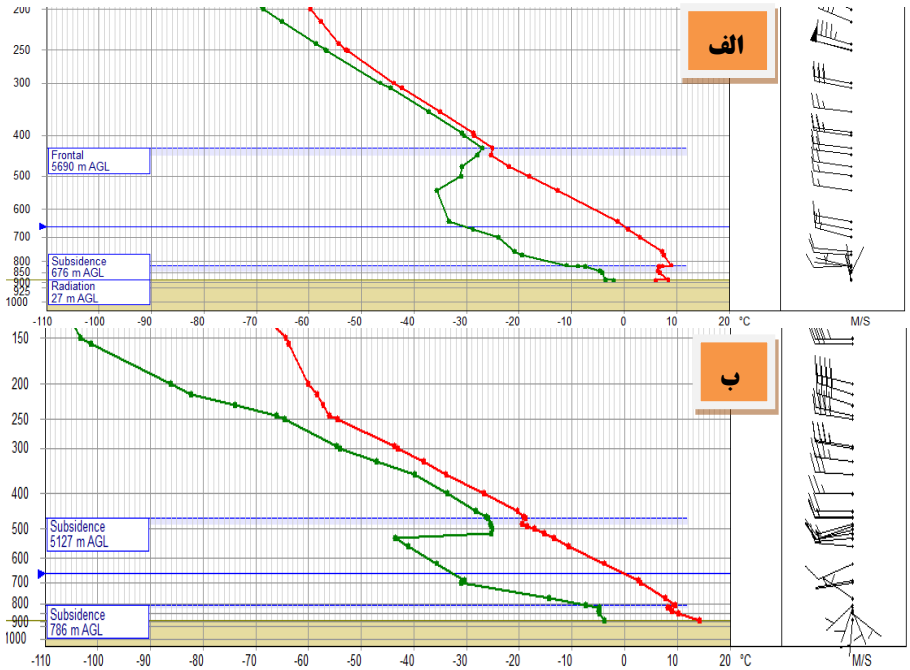
- **نمونه‌های آلوده**

در روش هافتر پیشنهاد می‌شود که سقف لایه وارونگی بحرانی دمای پتانسیل، به عنوان سقف تقریبی لایه مرزی در نظر گرفته شود. همانطور که در جدول مشاهده می‌گردد، روز ۶ فوریه ۲۰۱۳ به عنوان نماینده آلوده فصل سرد سال که درآن وارنگی بحرانی مشاهده گردید انتخاب شد، در این روز اولین وارونگی بحرانی دمای پتانسیل در ساعت صبح همانطور که در نمودار Skew_T (شکل ۳ الف) نیز مشاهده می‌گردد، در ارتفاع، ۱۱۹۱متری مشاهده گردید(کف لایه وارونگی بحرانی) سقف این وارونگی در ارتفاع ۱۲۱۹متری بوده و ضخامت آن ۲۸متر می‌باشد. همانطور که در جدول، اشاره شده است، دمای پتانسیل کف و سقف این وارونگی، به ترتیب برابر ۲۸۸/۹ و ۲۹۱/۷ درجه کلوین می‌باشد یعنی ۲/۸ درجه کلوین اختلاف دمای سقف و کف لایه وارونگی بوده، با اعمال رابطه شماره ۱ هافتر، میزان خیز آهنگ دمای پتانسیل که به طور ضمنی نمایه پایداری هوا نیز می‌باشد، برابر ۰/۱ درجه کلوین در متر بوده که بزرگتر از آستانه تعیین شده روش هافتر بوده است. لازم به ذکر است که وارونگی مشاهده شده در این ساعت از نوع تابشی می باشد.

میزان خیزآهنگ دمای پتانسیل در این لایه وارونگی بالاتر از همه ماه ها می باشد که نشان از شدت پایداری هوا در این لایه دارد. در اواخر بعداز ظهر (۳ ب)، در این روز اولین وارونگی بحرانی دمای پتانسیل در ارتفاع، ۱۸۵۵متری مشاهده گردید که از نوع فرونشینی می باشد و سقف این وارونگی در ارتفاع ۱۹۷۷ متری بوده که ضخامت آن به ۱۲۲ متر رسیده است. همانطور که در جدول، اشاره شده است؛ دمای پتانسیل در کف و سقف این وارونگی، به ترتیب برابر ۲۹۷/۸ و ۳۰۰/۵ درجه کلوین می‌باشد، یعنی۲/۷ درجه کلوین اختلاف دمای سقف و کف لایه وارونگی بوده است.

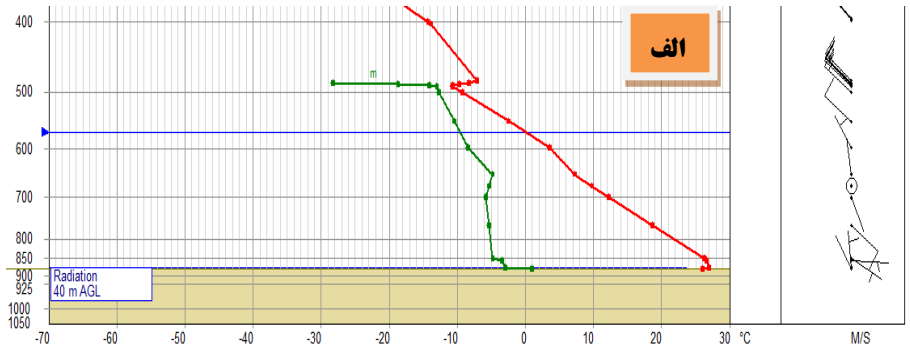
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.1.51]



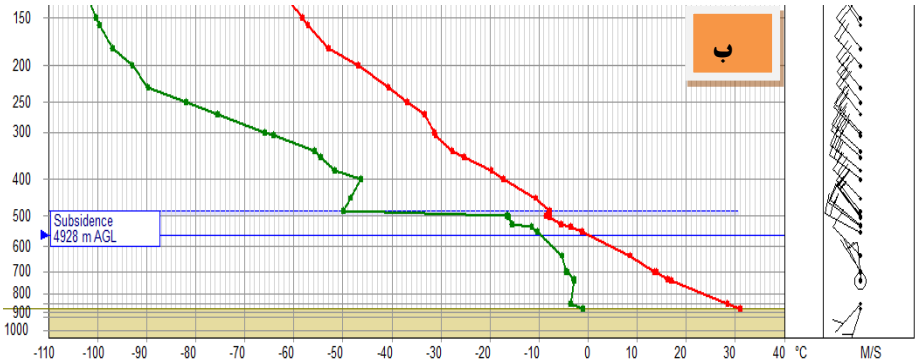
شکل ۳. پیمایش های قائم جو(SKEW-T) برای روز ۶ فوریه ۲۰۱۳ صبح (الف) و بعدازظهر (ب)

با اعمال رابطه شماره ۱ هافتر، میزان خیز آهنگ دمای پتانسیل برابر ۰/۰۲ درجه کلوین در متر بوده که بزرگتر از آستانه تعیین شده روش هافتر بوده است که در مقایسه با ساعت صبحگاهی نسبتاً کمتر مـی باشـد. در مـاه اوت نیـز وارونگی بحرانی آشکار شده در ساعات صبح از نوع تابشی بوده است(شکل ۴ الف). ضخامت این لایه وارونگی برابر ۴۰ متر و ارتفاع سقف وارونگی از سطح زمین برابر ۱۱۹۱ متر بوده است. همچنین میزان خیزآهنـگ دمـای پتانسـیل در این لایه برابر با ۰/۰۳ درجه کلوین در هر متر بوده که ۰/۰۱ درجه کلوین بیشتر از ساعات ظهر در این روز می باشـد. در ساعات شب در این روز برخلاف ماه قبل ارتفاع کف وارونگی بحرانی آشکار شده، بسیار بالاتر و برابر بـا ۵۸۸۳ متـر می‌باشد و سقف آن نیز در ارتفاع ۶۱۱۹ متری واقع شده است. میزان خیزاهنگ دمای پتانسیل در این لایـه برابـر بـا ۰/۰۱ درجه کلوین بر متر می‌باشد. لازم به ذکر است نوع وارونگی بحرانی آشکار شده این ماه همانند ماه فوریه از نوع فرونشینی یا سوبسیدانس هوای سرد بوده است(شکل ۴ ب).



[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

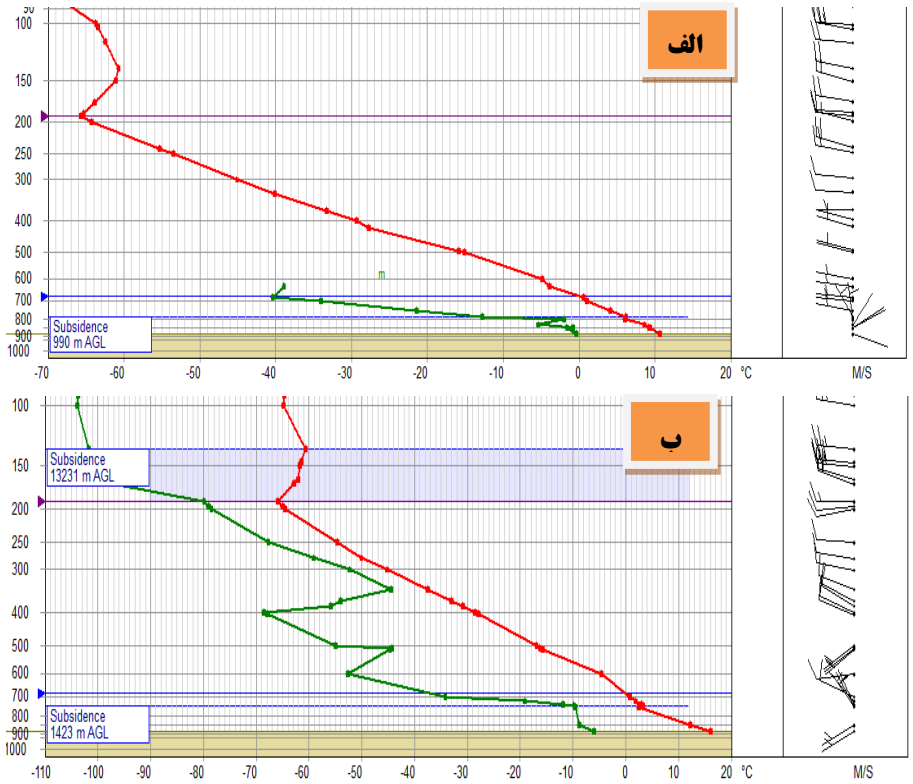
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.1.51]



شکل ۴. پیمایش های قائم جو(SKEW-T) برای روز ۱۶ اوت ۲۰۱۳ صبح (الف) و بعدازظهر (ب)

- **نمونه های پاک**

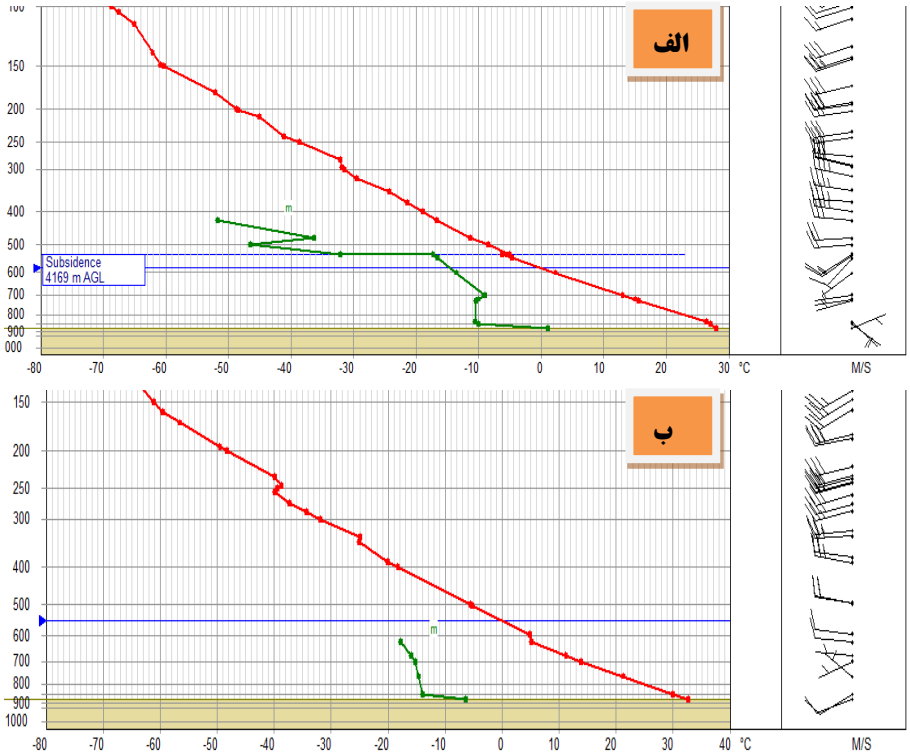
در نمونه های پاک نماینده فصل سرد سال، روز ۹ فوریه ۲۰۱۳ انتخاب گردید، وارونگی بحرانی آشکار شده دراین روز، از نوع فرونشینی بوده (شکل۵ الف) که بسیار مرتفعتر از ماه‌های قبلی بوده است، در این ماه ارتفاع سقف لایه وارونگی به ۲۱۸۱متر رسیده و ضخامت آن برابر، ۱۱۸متر بوده است. میزان خیزآهنگ دمای پتانسیل دراین لایه وارونگی و برابر ۰/۰۱درجه کلوین در متر بوده، در ساعت بعداز ظهر این روز، وارونگی بحرانی آشکارشده از نوع، فرونشینی بوده و ارتفاع سقف آن برابر، ۲۶۶۹ متر بوده و ضخامت آن نیز برابر ۱۱۹ متر بوده است. میزان خیزآهنگ دمای پتانسیل در این لایه وارونگی برابر برابر ۰/۰۱درجه کلوین در متر می‌باشد(شکل ۵ ب).



شکل ۵. پیمایش های قائم جو(SKEW-T) برای روز ۹ فوریه ۲۰۱۳ صبح (الف) و بعدازظهر (ب)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.1.51]

در روز ۵ ژوئن ۲۰۱۳ که به عنوان نماینده فصل گرم سال انتخاب شد، بر اساس نمودار Skew-T مربوطه در ساعات صبحگاهی وارونگی بحرانی از نوع فرونشینی آشکار گردید(شکل۶ الف). سقف این وارونگی در ارتفاع ۵۳۶۱ متری از سطح زمین بوده و ضخامت آن برابر ۴۵ متر می‌باشد. میزان خیزآهنگ دمای پتانسیل در این لایه وارونگی نیز برابر با ۰/۰۴ درجه کلوین درمتر بوده است. در ساعت بعد از ظهر در این روز هیچ نوع وارونگی ای مشاهده نشده است(شکل۶ ب).



شکل ۶. پیمایش های قائم جو(SKEW-T) برای روز ۵ ژوئن ۲۰۱۳ صبح (الف) و بعدازظهر (ب)

همانگونه که مشاهده گردید، در نمونه های آلوده وارونگی‌های آشکار شده بر اساس پیمایش‌های قائم جوی، در ساعات صبحگاهی از نوع تابشی بوده که مشخصه بارز آن‌ها همانطور که در جدول ۱ مشاهده گردید، ضخامت کم و خیزآهنگ دمای پتانسیل زیاد می‌باشد، در حالی که در ساعات بعداز ظهر وارونگی‌ها ناشی از فرونشینی هوا بوده و مهمترین ویژگی آن‌ها، ضخامت زیاد و خیز آهنگ پتانسیل کم می‌باشد. از آنجا که خیزآهنگ دمای پتانسیل را می‌توان به عنوان شاخصی برای سنجش شدت پایداری هوا نیز در نظر گرفت، باید گفت که در نمونه های آلوده ساعات صبح (فصل گرم و سرد سال) که همراه با وارونگی‌های تابشی بوده‌اند و خیزآهنگ دمای پتانسیل درآن‌ها بسیار بالا بوده و هوا در لایه وارونگی دارای پایداری بالایی می باشد. همچنین لایه وارونگی به عنوان یک درپوش قوی برای جلوگیری از گسترش و رشد لایه اختلاط عملکرده و با اطمینان بالاتری می‌توان گفت که سقف لایه وارونگی سقف لایه مرزی است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.1.51]

در نمونه های پاک (فصل سرد سال) وارونگی ها در ساعات صبح و بعدازظهر از نوع فرونشینی بوده و شدت خیزآهنگ دمای پتانسیل مساوی می باشد. در نمونه فصل گرم سال از نوع پاک، وارونگی مشاهده شده در ساعت صبحگاهی از نوع فرونشینی بوده و درساعات بعداز ظهر هیچ نوع وارونگی ای مشاهده نشده است. بنابراین ممکن است سقف لایه مرزی دقیقاً منطبق بر سقف وارونگی بحرانی نباشد.

نتیجه گیری

در این تحقیق که با هدف ارزیابی ارتفاع لایه مرزی با استفاده از روش هافتر که مبتنی بر تحلیل پروفایل عمودی دمای پتانسیل بود، مشاهده گردید که ارتفاع لایه مرزی در نمونه آلوده فصل سرد و گرم سال در ساعت صبحگاهی به ۱۲۰۰متر رسیده در حالی که در ساعات بعداز ظهر در نمونه سرد تا ۱۹۰۰ متری رشد کرده و در ماه های گرم این ارتفاع براساس ارتفاع سقف لایه وارونگی‌های بحرانی روزهای نماینده انتحاب شده، به بیش از ۶۰۰۰ متر رسیده است. در نمونه های پاک فصل گرم و سرد سال میزان ارتفاع لایه مرزی رشد قابل توجهی داشته تا جائیکه در نمونه سرد سال در ساعت صبح به ۲۱۰۰ متری رسیده و در ساعات بعداز ظهر به ۲۶۰۰ متر می رسد. در روز ۵ ژوئن که بعنوان نماینده فصل گرم پاک در نظر گرفته شده است میزان ارتفاع لایه مرزی در ساعت صبحگاهی به ۵۳۰۰ متری رسید که در مقایسه با نمونه آلوده خود، ۴۰۰۰ متر افزایش داشته است. نکته‌ای که باید ذکر شود این است از آنجا که خیزآهنگ دمای پتانسیل را می‌توان به عنوان معیاری برای پایداری هوا در نظر گرفت، در وارونگی‌های بحرانی نمونه های آلوده ساعات صبح که همراه با وارونگی‌های تابشی بوده‌اند، خیزآهنگ دمای پتانسیل درآن‌ها بسیار بالا بوده است. لذا در روزهای همراه با وارونگی تابشی(روزهای آلوده) می‌توان با اطمینان بیشتری گفت که مرز لایه مرزی منطبق بر سقف لایه وراونه بوده است و روش به کارگرفته شده در این نوع وارونگی‌ها کارایی بیشتری برای تعیین ارتفاع لایه مرزی دارد. همچنین بر اساس روش وارونگی بحرانی هافتر مشخص شد که عمده وارونگی دمایی که منجر به آلودگی هوای تهران می شوند، از نوع فرونشینی یا سوبسیدانس می باشد.

منابع

احمدی گیوی، فرهنگ؛ سمانه ثابت قدم ؛ عباسعلی علی اکبری بیدختی. ۱۳۸۷. بررسی نوسان عمق لایه آمیخته جو شهری تهران با استفاده از مدلMM۵ و عوامل موثر در آن، *مجله فیزیک زمین و فضا*، **۳۵(۲)** : ۱۰۵- ۱۱۷.

عباسعلی بیدختی علی اکبری، ؛ تاج الدین بنی هاشم. ۱۳۷۶. لایه آمیخته شهری و آلودگی هوا، *مجله محیط شناسی*، **۲۰** : ۵۱-۶۱.

حسین پور، زینب . ۱۳۸۹. تحلیل سینوپتیکی آلودگی هوا در تهران (تاکید بر ذرات معلق -۱۰PM)، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه جغرافیا، دانشگاه تهران.

شرعی پور ، زهرا؛ عباسعلی بیدختی علی اکبری. ۱۳۹۳. بررسی توزیع مکانی زمانی آلاینده های هوا در شهر تهران برای ماه های سرد سال های ۲۰۱۳-۲۰۱۱ ، *علوم و تکنولوژی محیط زیست* ، **۱۶(۱)**: ۱۴۹-۱۶۶ .

شمسی پور، علی اکبر؛ فهیمه نجیب زاد، ؛ زینب حسین پور .۱۳۹۱. شبیه سازی الگوی پراکنش آلودگی هوای تهران در شرایط باد، *فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی*، **۴**: ۱۹-۳۶.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.1.51]

صادقی، سلیمان؛ عباس مفیدی؛ مهین جهانشیری ؛ رضا دوستان .۱۳۹۳. عنوان مقاله نقش الگوهای گردش مقیاس منطقه‌ای جو بر وقوع روزهای بسیارآلوده در شهر مشهد، *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، **۳(۱۰)**: ۱-۳۶.

قسامی، طاهره ؛ عباسعلی بیدختی علی اکبری ؛ عبدالله صداقت کردار ؛ فاطمه صحرائیان .۱۳۸۹. بررسی تغییرات قائم دمای پتانسیل در چند دوره بحرانی آلودگی هوای تهران، *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، **۱۲(۳)**: ۱۳-۲۴.

۸-یاوری، حسین؛ محمد سلیقه. ۱۳۹۰. سطوح وارونگی در آلودگی های شهر تهران، *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، **۱۷(۲۰)**: ۸۹-۱۰۵.

Deardroff, J.W .۱۹۷٤. Three dimensional numerical study of the height and mean structure of heated planetary boundary layer , Boundary-Layer Meteorology, **۷**: ۸۱-۱۰٦. DOI:۱۰.۱۰۰۷/BF۰۰۲۲٤۹۷٤.

Finardi, S; Pellegini, U .۲۰۰۲. Systematic snalysis of meteorological conditions causing severe urban air pollution episodes in the central PO Valley ,ARIANET,viaGilino ۹,۲۰۱۲۸ Milano,Italia.

Heffter,J.L .۱۹۸۰. Transport Layer Depth Calculations, Second Joint Conference on Applications of Air pollution Meteorology,NewOrleans,LA.

Hurley, P .۲۰۰۷. Modelling mean and turbulence fields in the dry convective boundary layer with the eddy-diffusivity/mass-flux approach, Boundary-Layer Meteorol, **۱۲۵**:۵۲۵–۵۳۶. DOI:۱۰.۱۰۰۷/s۱۰۵۴۶-۰۰۷-۹۲۰۳-۸.

Lin, J.; Michael B. M .۲۰۱۰. Impacts of boundary layer mixing on pollutant vertical profiles in the lower troposphere: Implications to satellite remote sensing, Atmospheric Environment, **۴۴**: ۱۷۲۶–۱۷۳۹. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.atmosenv.۲۰۱۰.۰۲.۰۰۹.

Panofsky H.A., Dutton J A. ۱۹۸۴. Atmospheric eturbulence, NewYourk,Willey&Sons,Inc ,۳۹۷ pp.

Pesenson, I .۲۰۰۲. Implementation and evaluation of the Heffter Method to calculate the height of the planetary boundary layer above a southern Great Plains site, http://escholarship.org/uc/item/۶pp۱d۹۳m.

Stull,R, B. ۱۹۹۳. An Introduction to Boundary Layer Meteology,Kluwer Academic publishers .

Stull,R, B .۱۹۸۸. An Introduction to Boundary Layer Meteorology.Dordrecht, Kluwer Academic publishers.p۶۷۰.

Wyngaard, D. A.; Kaimal, J. C.; Haugen, O. R.; Coté, Y.; Izumi, S. J.; Caughey, and C. J. Readings .۱۹۷۶. Turbulence Structure in the Convective Boundary Layer, Journal of the atmospheric sciences, **۳۳**, ۲۱۵۲–۲۱۶۹. DOI: ۱۰.۱۱۷۵/۱۵۲۰-۰۴۶۹(۱۹۷۶)۰۳۳<۲۱۵۲:TSITCB>۲.۰.CO;۲

Wyngaard, J; Richard B .۱۹۸۳. Top-down and bottom-up Diffusion of a scalar in the convective boundary layer, Journal of the atmospheric sciences. **۴۱**: ۱۰۲–۱۱۲.

DOI: ۱۰.۱۱۷۵/۱۵۲۰-۰۴۶۹(۱۹۸۴)۰۴۱<۰۱۰۲:TDABUD>۲.۰.CO;۲.

USPEA,۱۹۹۸,Guidelin for Reporting of Daily Air Quality-Pollutant Standards Index –(PSI) Environmental Protection Agency,Washangton, DC.

Vardoulakis, S.; Kassomenos, P. ۲۰۰۸. Sources and factors affecting PM۱۰ levels in two European cities: Implications for local air quality management, Atmospheric Environment, **٤۲** (۱۷): ۳۹٤۹-۳۹٦۳, DOI: ۱۰.۱۰۱٦/j.atmosenv.۲۰۰٦.۱۲.۰۲۱.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.1.51]

Yin, S.; Shen, Z.; Zhou, P.; Zou, X.; Che, S.; Wang, W .۲۰۱۱. Quantifying air pollution attenuation within urban parks: An experimental approach in Shanghai, China, Environmental Pollution, ۱۵۹(۸-۹): ۲۱۵۵-۲۱٦۳, DOI: ۱۰.۱۰۱٦/j.envpol.۲۰۱۱.۰۳.۰۰۹.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.1.51]