# بررسی ارتفاع لایه‌آمیخته در ایستگاه فرودگاه مهرآباد

**سامان مرتضی پور*[۱]، محمد مرادی[۲]**

۱- کارشناسی ارشد هواشناسی، کارشناس تحقیقات هواشناسی گیلان

۲- استادیار پژوهشکده هواشناسی

(تاریخ دریافت: ۹۷/۰۲/۲۴، تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۶/۲۷)

## چکیده

در این پژوهش با استفاده از داده‌های صبحگاهی ایستگاه کاوش جو فرودگاه مهرآباد تهران و بیشینه دمای هوا در این ایستگاه، بیشینه ارتفاع لایه‌آمیخته در دوره آماری ۲۰۱۷-۱۹۹۸ به طور روزانه محاسبه شد. میانگین، بیشترین و کمترین مقدار این کمیت در ماه‌های ژانویه و دسامبر به عنوان ماه‌های سرد و ژوئیه و اوت به عنوان ماه‌های گرم برآورد شد و نتایج چند نمونه انتخابی با نمودار ترمودینامیکی **SKEW-T** تحلیل شد. نتایج نشان داد که میانگین بیشینه ارتفاع لایه‌آمیخته در ماه‌های گرم بین ۳ تا ۴ کیلومتر و در ماه‌های سرد بین ۱ تا ۲/۵ کیلومتر تغییر کرده است. همچنین از بررسی نتایج به دست آمده دیده شد که الگوریتم به کار رفته در این پژوهش توان محاسبه بیشینه ارتفاع لایه آمیخته را دارد. بنابراین با در دسترس بودن داده‌های کاوش جو صبحگاهی و تخمین دمای بیشینه آن ایستگاه، بیشینه ارتفاع لایه آمیخته را می‌توان برآورد کرد و از آن برای پیش آگاهی و اهداف کاربردی استفاده کرد.

**کلمات کلیدی:** لایه‌آمیخته، وارونگی‌دما، مهرآباد

## مقدمه

لایه مرزی، لایه نازک نزدیک سطح زمین است که به طور مستقیم تحت تأثیر تغییر کمیت‌های هواشناسی سطح زمین قرار دارد و به واداشت‌های سطحی در مقیاس زمانی کوچک پاسخ می‌دهد. این لایه پایین‌ترین قسمت جو زمین است که فرایندهای درون آن تبادل تکانه، آب و آلاینده‌ها را کنترل می‌کند و جدا کننده سطح زمین از جوآزاد است. ارتفاع لایه مرزی به زمان و مکان بستگی دارد و در خشکی این ارتفاع از چند ده متر تا چندکیلومتر متغیر است و به عوامل مختلفی از جمله نوع سامانه‌های جوی و ساختار آنها، شارهای سطحی، چینش قائم باد و پوشش سطحی بستگی دارد (استال، ۱۹۸۸). از آنجا که آلاینده‌های جوی تقریبا به شکل یکنواختی در این لایه پخش می‌شوند، بررسی لایه‌مرزی در تحقیقات آلودگی دارای اهمیت ویژه‌ای است. چرخه روزانه گرمایش تابشی ناشی از طلوع و غروب خورشید منجر به چرخه روزانه گرمای محسوس و نهان بین سطح زمین و جو می‌شود. این شارها که مستقیما نمی‌توانند به کل جو برسند به لایه مرزی محدود می‌شوند (استال، ۲۰۰۰).

در غیاب سامانه‌های همدیدی، در شب سطح زمین نسبت به هوای بالای آن، با سرعت بیشتری سرد می‌شود و وارونگی دمای شبانه تشکیل می‌شود، به طوری که با افزایش ارتفاع، دما نیز افزایش می‌یابد. این لایه مرزی پایدار شبانه "لایه پایدار خنثی شبانه" نامیده می‌شود. بعد از طلوع خورشید سطح زمین تابش خورشید را جذب کرده و گرم می‌شود و جو بالای آن ناپایدار می‌شود و در نتیجه تلاطم و لایه‌مرزی رو به بالا گسترش پیدا می‌کند. لایه‌مرزی ناپایدار که در طول روز شکل می‌گیرد "لایه مرزی همرفت" یا "لایه‌آمیخته" نامیده می‌شود. از مشخصه‌های لایه‌آمیخته اختلاف زیاد مقدار آلاینده‌ها و پارامترهایی همچون دما و رطوبت در مرز بالایی آن با جوآزاد است که به دلیل وجود ناپایداری و تلاطم در درون لایه آمیخته به وجود می‌آید (هولتون، ۲۰۰۴).

* نگارنده رابط: mortezapoor.saman@yahoo.com

روش‌های زیادی برای محاسبه ارتفاع لایه آمیخته وجود دارد که می‌توان به روش استفاده از نیمرخ قائم نم نسبی و دمای پتانسیل، روش بسته هوا، اندازه‌گیری مستقیم و استفاده از مدل‌های عددی در برآورد این کمیت اشاره کرد. همه این روش‌ها به تنهائی دارای خطای محاسباتی هستند. برخی از این روش‌ها ارتفاع لایه آمیخته را بیشتر و برخی نیز این کمیت را کمتر برآورد می‌کنند. از مزیت‌های روش استفاده از مدل‌های عددی در برآورد عمق لایه آمیخته این است که امکان طراحی آزمایش‌های هدایت‌شده در آن وجود دارد (گرافت، ۱۹۹۲).

از آنجا که غلظت آلودگی به طور معکوس با رشد لایه آمیخته در ارتباط است و برای پیش‌بینی غلظت آلودگی از عمق لایه آمیخته استفاده می‌شود و نیز ورودی بسیاری از مدل‌های پخش آلودگی هوا عمق لایه‌آمیخته است، از این رو برآورد عمق لایه‌آمیخته از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد و برآورد این کمیت همواره مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است.

سیدل و همکاران (۲۰۰۹) ارتفاع لایه‌آمیخته را از هفت روش مختلف محاسبه کردند و نشان دادند که روش استفاده از گرادیان‌های نم نسبی و دمای‌پتانسیل و روش بسته‌های هوا، ارتفاع لایه آمیخته را بطور نسبی به ترتیب بیشتر و کمتر برآورد کردند.

احمدی‌گیوی و همکاران (۱۳۸۶) با استفاده از مدل میان مقیاس **MM5** و با انتخاب طرح‌واره مناسب لایه‌مرزی، عمق لایه‌آمیخته را برای منطقه تهران در ماه‌های اوت و فوریه ۲۰۰۵ بررسی کردند و نتیجه گرفتند که میانگین ارتفاع لایه‌آمیخته در فصل تابستان حدود ۳ کیلومتر است و این مقدار دو برابر ارتفاع لایه آمیخته در فصل زمستان است. این پژوهشگران نشان دادند که روند کلی تغییرات ماهانه عمق لایه‌آمیخته در فصل تابستان به علت شرایط آرام جو مستقیما از روند تغییرات شارهای سطحی پیروی می‌کند و بستگی بیشتری به فرارفت گرما دارد ولی در زمستان رشد این لایه بیشتر متاثر از ساختار سامانه‌های همدیدی و چینش قائم باد است. شارهای سطحی در تابستان تقریبا بیشتر از دو برابر مقدار زمستان بوده که متناسب با آن عمق لایه‌آمیخته در تابستان نیز تقریبا دو برابر این ارتفاع در زمستان است. همچنین نوسان‌های عمق لایه‌آمیخته در فصل زمستان به دلیل تغییرات بیشتر عوامل موثر، بیشتر است.

عمق لایه‌مرزی با روش‌های متفاوتی محاسبه می‌شود. این عمق که ضخامت ناحیه تلاطمی نزدیک سطح زمین را نشان می‌دهد، عمدتا عمق لایه‌آمیخته یا عمق آمیختگی نامیده می‌شود (پانوفسکی و داتون، ۱۹۸۴).

وانگ و همکاران (۲۰۱۴) برای محاسبه ارتفاع لایه‌آمیخته، روشی مبنی بر استفاده ترکیبی از عامل‌های نم نسبی، نم ویژه، دمای پتانسیل، بسامد شناوری و نیز در نظر گرفتن ابرناکی را ارایه کردند. آنها پیشنهاد کردند که ابرناکی در محاسبه ارتفاع لایه‌آمیخته نقش مهمی دارد. هنگامی که آسمان ابری است، روش نم نسبی ممکن است قله ابر را برای ارتفاع لایه آمیخته محاسبه کند در حالی که استفاده از پارامتر دمای پتانسیل، ارتفاع لایه‌آمیخته را بالاتر از قله ابر که هنوز تلاطم وجود دارد در نظر می‌گیرد. این پژوهشگران در روشی که ارایه کردند، ابتدا ارتفاعی که نقطه بهینه برای بیشینه قدرمطلق گرادیان برای کمیت‌های نم ویژه و نسبی، دمای‌پتانسیل و بسامدشناوری است را به دست آوردند. سپس مرز وجود ابر را با استفاده از داده رطوبت در هر ارتفاع و جدول بیشینه و کمینه رطوبت برای نمایه قائم در آن ارتفاع را مشخص کردند. در محدوده ۹۰ متر پایین تا ۹۰ متر بالای محدوده ابر با فاصله‌های ۳۰ متر، پایداری را بررسی کرده و با ترکیب این دو، ارتفاع لایه آمیخته را مشخص کردند.

نصیری و همکاران (۱۳۹۵) در بررسی تغییرات ارتفاع و ضخامت لایه مرزی در شرایط گردوغباری شهر اهواز نشان دادند که در یک گردوغبار شدید در خوزستان از بیست و هفتم ژانویه تا یکم فوریه ۲۰۱۵، بین شدت گردوخاک و ارتفاع لایه مرزی در خوزستان همبستگی معنی داری وجود دارد.

یار احمدی و همکاران (۱۳۹۵) در بررسی تغییرات ماهانه ارتفاع لایه مرزی در شرایط وارونگی‌های بحرانی در ایستگاه

مهرآباد، در یک دوره آماری ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۴، تغییرات ماهانه ارتفاع لایه مرزی را بررسی کردند و نشان دادند که در این دوره بیشترین ارتفاع لایه مرزی در ماه جولای با مقدار ۱۴۸۲ متر و ماه اوت با مقدار ۱۲۶۸ متر می‌باشد. در این تحقیق از نرم‌افزار **RAOB** استفاده شده است.

هدف از این تحقیق محاسبه و بررسی تغییرات ماهانه میانگین بیشترین ارتفاع لایه آمیخته در دوره آماری ۲۰۱۷-۱۹۹۸ در ایستگاه کاوش جو فرودگاه مهرآباد می‌باشد. در این پژوهش روشی ارایه شده است که با داشتن داده‌های جو بالا و دمای بیشینه، بیشترین ارتفاع لایه‌آمیخته محاسبه می‌شود.

## داده‌ها و روش کار

در این پژوهش از داده‌های کاوش جو ایستگاه فرودگاه مهرآباد تهران در ساعت صفر گرینویچ در دوره آماری ۲۰۱۷-۱۹۹۸ استفاده شد. این داده‌ها از سازمان هواشناسی گرفته شده است. داده‌ها شامل فشار، ارتفاع، دما، دمای نقطه‌شبنم، سمت و سرعت باد در ترازهای فشاری معیار و قابل ملاحظه و نیز دمای بیشینه سطح زمین در آن ایستگاه است. این داده‌ها ابتدا از نظر کیفی به طور چشمی بررسی شد و سپس بر اساس سال، ماه و روز مرتب و مقادیر برحسب واحدهای معیار تبدیل شد. در ادامه بر اساس الگوریتم زیر ارتفاع لایه آمیخته محاسبه شد:

۱- تعیین لایه وارونگی دما در سطح زمین

۱-۱- انتخاب دو تراز فشاری به عنوان کف و سقف لایه وارونگی دما

۱-۲- محاسبه دمای پتانسیل در کف و سقف لایه انتخابی

۱-۳- محاسبه تغییرات دمای پتانسیل با ارتفاع در لایه فوق

۱-۴- محاسبه تغییرات دمای پتانسیل در دو تراز کف و سقف لایه

۱-۵- تعیین یک تراز فشاری بالاتر با بازه یک هکتوپاسکال

۱-۶- تنظیم شرایط برای تعیین سقف لایه وارونه. اگر تراز فشاری انتخابی سقف لایه وارونه موجود نبود، آن گاه با کاهش یک هکتوپاسکال به فشار سقف انتخابی، مجددا مرحله قبل اجرا می‌شود. در غیر این صورت لایه وارونگی دما تعیین می‌شود.

۲- محاسبه ارتفاع لایه آمیخته

۲-۱- محاسبه دمای پتانسیل با استفاده از دمای بیشینه روزانه

۲-۲- تعیین محل برخورد دمای پتانسیل بند ۲-۱ با دمای پتانسیل سقف لایه وارونه

۲-۳- محاسبه ارتفاع محل برخورد بند قبل

مراحل محاسباتی به‌کارگرفته شده در این تحقیق با استفاده از زبان برنامه نویسی افزار فرترن انجام شده است. در هر روز، دمای بیشینه سطح زمین و مقادیر دما و فشار در هر ارتفاع در دسترس است. برای داشتن نقاط بیشتر در نمایه قائم بین هر دو نقطه فشاری، روند تغییرات دما و ارتفاع برحسب فشار خطی در نظر گرفته شده است. این کار بنا به توصیه‌های سازمان هواشناسی مجاز است زیرا در غیر این صورت داده‌ها در ترازهای قابل ملاحظه باید گزارش می‌شد. به این ترتیب بین هر دو نقطه فشاری قابل ملاحظه ثبت شده در داده‌های جو بالا می‌توان به تعداد مورد نیاز نقاط فشاری با دما و ارتفاع مربوط به آن را از رابطه زیر به دست آورد (مرادی و همکاران، ۱۳۸۰) :

$$\frac{P-P_1}{P_2-P_1}=\frac{T-T_1}{T_2-T_1} \qquad (۱)$$

که در آن **P** فشار بر حسب هکتوپاسکال، **T** دما بر حسب کلوین در سطح فشاری بین دو تراز است و پانویس‌های ۲ و ۱ به ترتیب به ترازهای فشاری بالا و پایین اشاره دارند. از اولین فشار اندازه‌گیری شده اطلاعات جو بالا به شکل مرحله‌ای هر بار یک واحد از فشار کم کرده و به ازای فشار به دست‌آمده با فرض خطی بودن تغییرات دما و ارتفاع نسبت به فشار، دما و ارتفاع به دست آمد. همچنین بسته هوای فرضی در دمای بیشینه در سطح زمین را در نظر گرفته و دمای پتانسیل برای آن به‌دست آمد. وقتی بسته هوا به شکل فرایند بی‌دررو بالا می‌رود دمای پتانسیل ثابت است بنابراین با داشتن دمای پتانسیل سطح زمین

برای بسته هوا و فرض صعود بی‌دررو، در هر مرحله از کاهش یک واحدی فشار، دمای بسته هوا از رابطه زیر به دست می‌آید (مرادی، ۱۳۹۰) :

$$\theta = T\left(P_s / P\right)^{R/C_P} \qquad (۲)$$

در این رابطه **Θ** دمای پتانسیل، **$P_s$** فشار ۱۰۰۰ هکتوپاسکال، **R** ثابت ویژه گازها و **$C_p$** ظرفیت گرمایی ویژه گازها در فشار ثابت می‌باشد. برای بررسی ارتفاع لایه‌آمیخته در فصل‌های گرم و سرد دو ماه ژانویه و دسامبر برای ماه‌های سرد و دو ماه ژوئیه و اوت برای ماه‌های گرم درنظرگرفته شد.

## بحث و بررسی نتایج

پس از محاسبه بیشینه ارتفاع لایه‌آمیخته برای هر روز در دوره آماری انتخابی، این کمیت بطور ماهانه تحلیل شد. میانگین عمق لایه‌آمیخته به تفکیک ماه در جدول ۱ آورده شده است. از این جدول دیده می‌شود که کمترین مقدار میانگین بیشینه ارتفاع لایه‌آمیخته به ماه‌های سرد و بیشترین مقدار آن به ماه‌های گرم اختصاص یافته است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که میانگین بیشینه ارتفاع لایه‌آمیخته در فصل‌های گرم بین ۳ تا ۴ کیلومتر و در فصل‌های سرد بین ۱ تا ۲,۵ کیلومتر است. مقدار تقریبا دو برابری این ارتفاع در فصل‌های گرم ناشی از این است که شارهای سطحی در ماه‌های گرم تقریبا بیشتر از دو برابر مقدار ماه‌های سرد بوده که متناسب با آن عمق لایه-آمیخته در تابستان نیز تقریبا دو برابر این ارتفاع در زمستان است. روند کلی تغییرات ماهانه عمق لایه‌آمیخته در فصل تابستان به علت شرایط آرام جو مستقیما از روند تغییرات شارهای سطحی پیروی می‌کند و بستگی بیشتری به فرارفت گرما دارد ولی در زمستان رشد این لایه بیشتر متاثر از ساختار سامانه‌های همدیدی و چینش قائم باد است. این نتیجه با مطالعات احمدی گیوی و همکاران (۱۳۸۶) مطابقت دارد.

برای ماه‌های ژانویه و دسامبر سه نمونه کمترین ارتفاع‌های به‌دست آمده و برای ماه‌های ژوئیه و اوت سه نمونه بیشترین ارتفاع‌های بدست آمده نیز انتخاب و شرایط آنها بررسی شد. نمونه‌های انتخاب شده هر ماه در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. از این جدول‌ها دیده می‌شود که کمترین مقدار بیشینه ارتفاع لایه آمیخته با مقدار ۹,۲ و ۹,۳ متر به ترتیب در تاریخ‌های سوم ژانویه ۲۰۰۴ و دهم دسامبر ۱۹۹۹ برآورد شده است. همچنین بیشترین مقدار بیشینه لایه آمیخته به مقدار ۶۰۹۴ متر در تاریخ دوم ژوئیه ۲۰۱۲ محاسبه شده است.

**جدول ۱**- میانگین بیشینه ارتفاع لایه‌آمیخته برای هر ماه در بازه زمانی ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۷ در ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد تهران

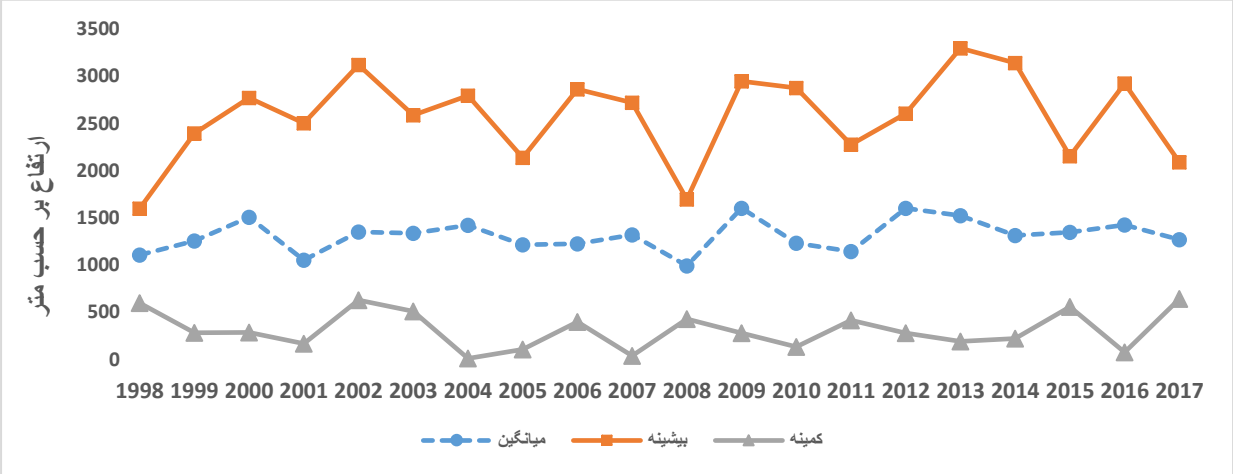
| ماه | ژانویه | فوریه | مارس | آوریل | مه | ژوئن | ژوئیه | اوت | سپتامبر | اکتبر | نوامبر | دسامبر |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| میانگین بیشینه ارتفاع لایه آمیخته (متر) | ۱۳۲۵ | ۱۷۷۴ | ۲۴۹۴ | ۳۰۴۸ | ۳۵۹۶ | ۳۸۵۵ | ۳۸۶۵ | ۳۷۵۳ | ۳۳۲۲ | ۲۶۴۸ | ۱۵۸۶ | ۱۰۸۲ |

**جدول ۲**- نمونه‌های کمترین مقادیر برای بیشینه ارتفاع لایه‌آمیخته برای ماه‌های ژانویه و دسامبر در بازه زمانی ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۷ در ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد تهران

| نمونه‌های کمترین مقادیر برای بیشینه ارتفاع لایه آمیخته | | ارتفاع لایه آمیخته (متر) | تاریخ |
|---|---|---|---|
| ژانویه | نمونه ۱ | ۹,۲ | ۲۰۰۴/۱/۳ |
| | نمونه ۲ | ۳۸ | ۲۰۰۷/۱/۳۱ |
| | نمونه ۳ | ۷۶ | ۲۰۱۶/۱/۹ |
| دسامبر | نمونه ۱ | ۹,۳ | ۱۹۹۹/۱۲/۱۰ |
| | نمونه ۲ | ۱۸,۷ | ۲۰۱۴/۱۲/۷ |
| | نمونه ۳ | ۲۸ | ۲۰۰۳/۱۲/۴ |

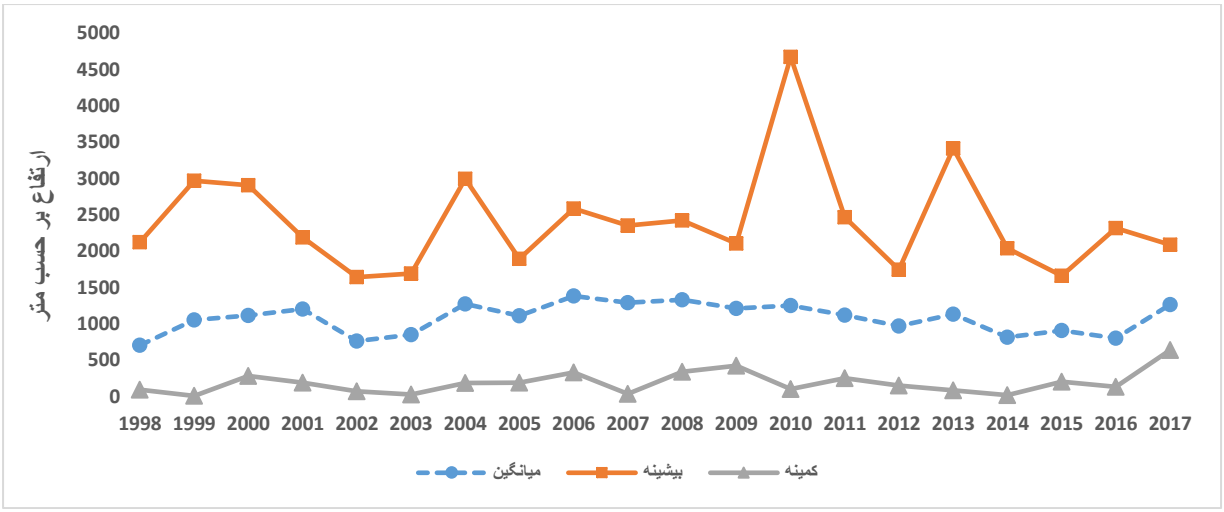
**جدول ۳**- نمونه‌های بیشترین مقادیر برای بیشینه ارتفاع لایه‌آمیخته برای ماه‌های ژوئیه و اوت در بازه زمانی ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۷ در ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد تهران

| نمونه‌های بیشترین مقادیر برای بیشینه ارتفاع لایه آمیخته | | ارتفاع لایه آمیخته (متر) | تاریخ |
|---|---|---|---|
| ژوئیه | نمونه ۱ | ۶۰۹۴ | ۲۰۱۲/۷/۲ |
| | نمونه ۲ | ۶۰۹۳ | ۲۰۱۳/۷/۳۱ |
| | نمونه ۳ | ۵۷۱۰ | ۲۰۰۳/۷/۱۸ |
| اوت | نمونه ۱ | ۶۰۴۹ | ۲۰۰۶/۸/۳۰ |
| | نمونه ۲ | ۵۸۷۰ | ۱۹۹۹/۸/۶ |
| | نمونه ۳ | ۵۷۷۱ | ۲۰۱۴/۸/۱۱ |



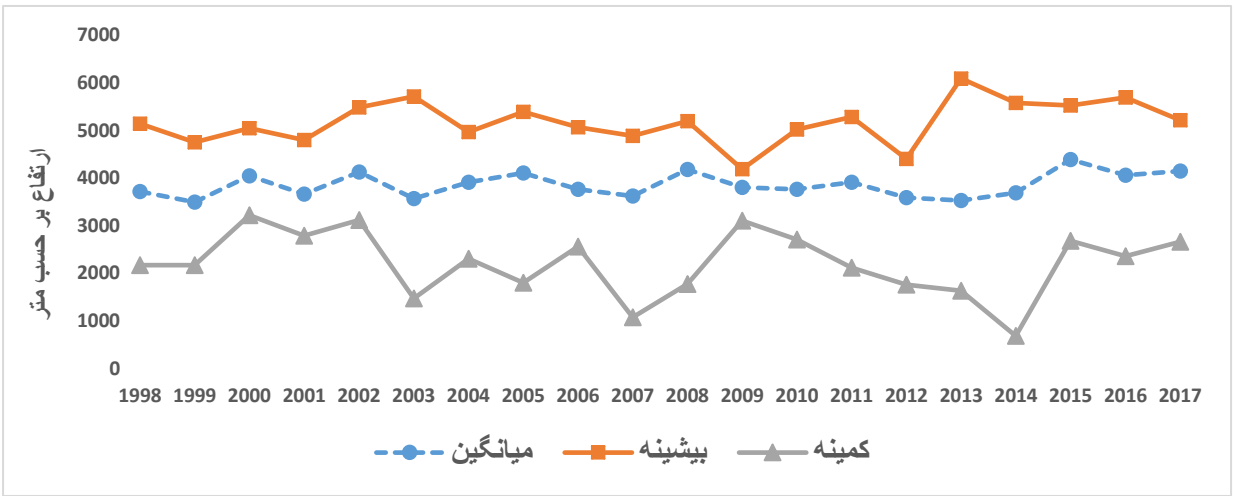

**شکل ۱**- تغییرات بیشینه، کمینه و میانگین بیشینه ارتفاع لایه‌آمیخته در دوره زمانی ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۷ برای ماه ژانویه در ایستگاه مهرآباد تهران

در شکل‌های ۱ و ۲ تغییرات سالانه بیشینه، کمینه و میانگین بیشینه ارتفاع لایه آمیخته در دوره آماری انتخابی در ماه‌های به ترتیب ژانویه و دسامبر نشان داده شده است. از این شکلها دیده می‌شود که بیشترین مقدار در ماه دسامبر و کمترین مقدار در هر دو ماه برآورد شده است. بررسی‌های سینوپتیکی نشان داد که در دسامبر سال ۲۰۱۰ فراوانی عبور سامانه‌های همدیدی در ایران کاهش داشته است. بنابراین به نظر می‌رسد که تعداد روزهای با وارونگی دما در این ماه در تهران افزایش یافته است ودر یکی از روزهای این ماه، عمق لایه وارونگی دما و نیز دمای بیشینه آن روز به شدت افزایش یافته باشد.

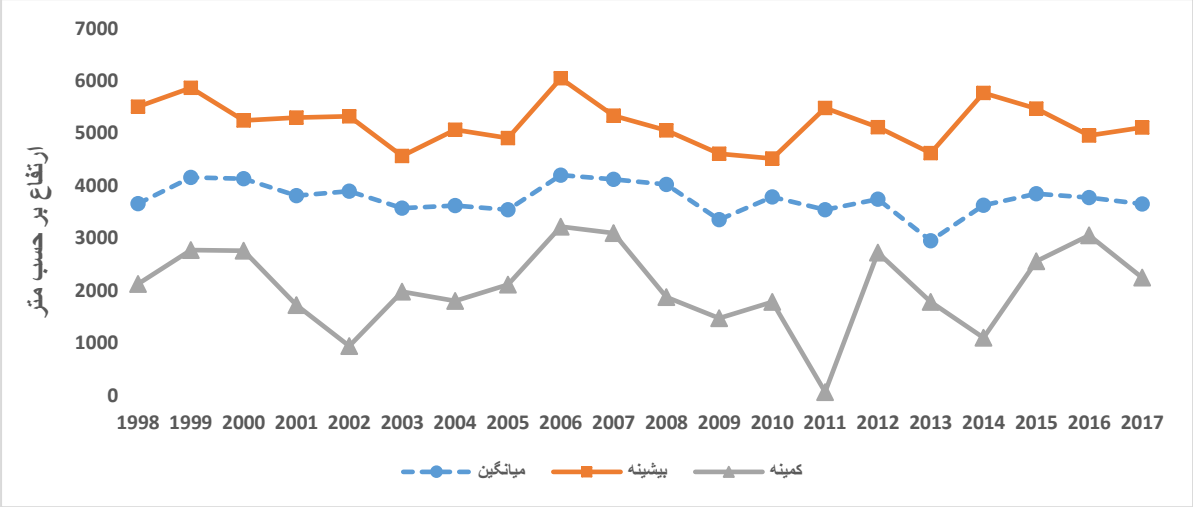



**شکل ۲**- تغییرات بیشینه، کمینه و میانگین بیشینه ارتفاع لایه‌آمیخته در دوره زمانی ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۷ برای ماه دسامبر در ایستگاه مهرآباد تهران

در شکل‌های ۳ و ۴ تغییرات سالانهٔ بیشینه، کمینه و میانگین بیشینه ارتفاع لایه آمیخته در دوره آماری انتخابی در ماه‌های به ترتیب ژوئیه و اوت نشان داده شده است. از این شکل‌ها دیده می‌شود که بیشترین مقدار این کمیت در ماه ژوئیه برآورد شده است. این ارتفاع در سال ۲۰۱۳ به ۶۰۹۳ متر رسیده است. شایان ذکر است که کمترین مقدار به میزان ۷۰ متر نیز در اوت سال ۲۰۱۱ برآورد شده است. همان‌طور که در شکل‌ها و جداول فوق نشان داده شده است کمینه مقدار بیشینه ارتفاع لایه‌آمیخته برای ماه ژانویه از ۹ تا ۷۶ متر و برای ماه دسامبر از ۹ تا ۲۸ متر محاسبه شده است. برای ماه‌های ژوئیه و اوت بیشینه مقدار برای بیشینه ارتفاع لایه آمیخته بین ۵ تا ۶ کیلومتر است.




**شکل ۳**- تغییرات بیشینه، کمینه و میانگین بیشینه ارتفاع لایه‌آمیخته در دوره زمانی ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۷ برای ماه ژوئیه در ایستگاه مهرآباد تهران

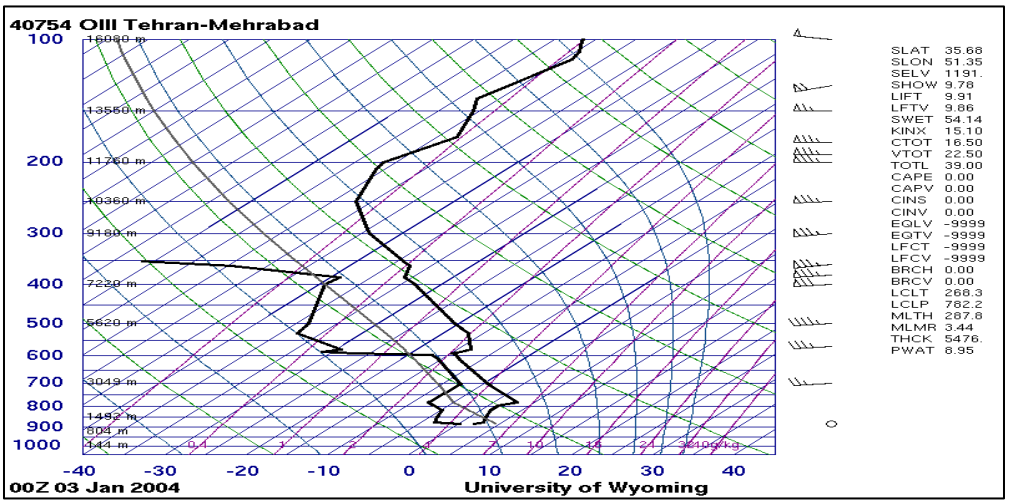



**شکل ٤**- تغییرات بیشینه، کمینه و میانگین بیشینه ارتفاع لایه‌آمیخته در دوره زمانی ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۷ برای ماه اوت در ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد تهران

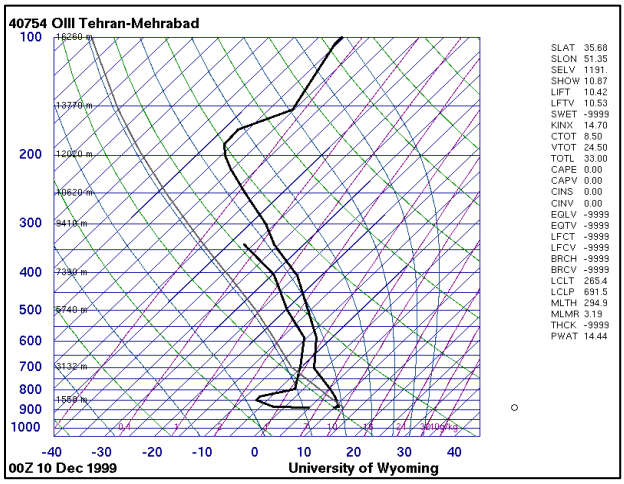
## بررسی ارتفاع لایه‌آمیخته در روز سوم ژانویه ۲۰۰٤

در روز سوم ژانویه ۲۰۰۴ کمترین مقدار برای بیشینه ارتفاع لایه‌آمیخته در دوره آماری، ۹,۲ متر برآورد شده است. نمودار ترمودینامیکی اسکیوتی مربوط به داده‌های جوبالای این روز در شکل ۵ نشان داده شده است. شاخص ناپایداری شولتر برای این روز ۹,۷۸ درجه سلسیوس برآورد شده است که نشان دهنده پایداری جو می‌باشد. در این روز همچنین بقیه شاخص‌های پایداری نیز بیانگر عدم وجود همرفت هستند.

از شکل ۵ دیده می‌شود که لایه کم عمق وارونگی دما در سطح زمین قرار گرفته است و معرف وجود عمق کم لایه‌آمیخته است. نمایه تغییرات قائم دما با ارتفاع، گویای وارونگی دما در دو لایه از جو می‌باشد که اولی از سطح زمین تا ارتفاع فشاری حدود ۷۸۰ هکتوپاسکال است که به دلیل تابش شبانه از سطح زمین و کاهش دما رخ داده است. در این لایه به دلیل پایداری هوا و نزدیک بودن دما و دمای نقطه شبنم و استنباط نم نسبی بالای ۸۰ درصد در سطح زمین، پدیده مه و دید کم وجود داشته است. وارونگی دوم در تراز فشاری ۶۰۰ تا حدود ۵۸۰ هکتوپاسکال است که بیانگر فرونشست هوا به دلیل حاکمیت پشته ضعیفی است که در حال گذر در سطوح میانی جو است. از لایه ۷۰۰ تا ۶۰۰ هکتوپاسکال نم نسبی حدود ۸۰ درصد وجود دارد که می‌توان منشا آن را ناشی از بخار آب خود منطقه و عدم صعود آن به دلیل فرونشست هوا در زیر لایه ۶۰۰ هکتوپاسکال و وجود بادهای ضعیف غربی در این لایه دانست. از تراز ۶۰۰ هکتوپاسکال به بالا عدم وجود ابرناکی دیده می‌شود که از این موضوع و با توجه به شاخص‌های اسکیوتی نتیجه می‌شود که در طی ساعات آینده شرایط بارشی از سامانه‌های همدیدی انتظار نمی‌رود. از نمایه قائم سرعت و جهت باد درج شده در شکل مشخص می‌شود که موقعیت جت در تراز فشاری ۲۵۰ هکتوپاسکال با سرعت ۷۵ نات است.




**شکل ۵**– نمودار اسکیوتی ساعت صفر گرینویچ تاریخ سوم ژانویه ۲۰۰۴ ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد تهران




**شکل ٦**– نمودار اسکیوتی برای ساعت صفر گرینویچ تاریخ دهم دسامبر ۱۹۹۹ ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد تهران

## بررسی ارتفاع لایه‌آمیخته در روز دهم دسامبر ۱۹۹۹

کمترین مقدار برای بیشینه ارتفاع روزانه لایه‌آمیخته برای ماه دسامبر دردوره مورد بررسی، مربوط به روز دهم دسامبر سال ۱۹۹۹ و برابر مقدار ۹٫۳ متر است. نمودار اسکیوتی مربوط به داده‌های جوبالای این روز در شکل ۶ نشان داده شده است. شاخص شولتر برای این روز برابر ۱۰٫۸۷ درجه سلسیوس است که نشان دهنده پایداری جو است، بقیه شاخص‌های پایداری بیانگر عدم وجود همرفت در این روز است.

در شکل ۶ نیز دیده می‌شود که در سطح زمین وارونگی کم‌عمقی وجود دارد اما در ارتفاعات بالا وارونگی‌دمای قابل توجهی وجود ندارد. در سطح زمین نم نسبی نسبتا زیاد بوده ولی بلافاصله با ارتفاع گرفتن از سطح زمین نم نسبی بطور قابل توجهی با ارتفاع کاهش می‌یابد. مجدداً از تراز فشاری ۸۰۰ هکتوپاسکال به بالا نم نسبی زیاد می‌شود و تقریباً تا سطوح بالای جو این مقدار را حفظ می‌کند. از شاخص‌های اسکیوتی نتیجه می‌شود که در طی ساعات آینده آسمانی صاف و جوی آرامی بر تهران حاکم است و این پایداری منجر به کم بودن ارتفاع لایه‌آمیخته شده است.

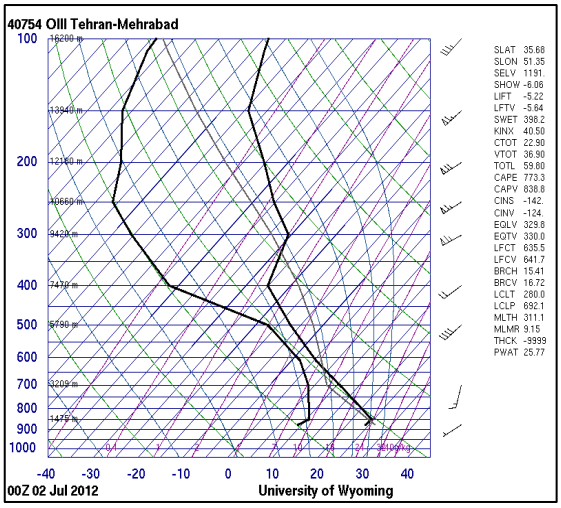
## بررسی ارتفاع لایه‌آمیخته در روز دوم ژوئیه ۲۰۱۲

برای ماه‌های ژوئیه کل دوره مورد مطالعه، دوم ژوئیه ۲۰۱۲ دارای بیشترین مقدار برای بیشینه ارتفاع روزانه لایه‌آمیخته است که برابر با ۶۰۹۴ متر می‌باشد. نمودار اسکیوتی مربوط به داده‌های جو بالای این روز در شکل ۷ نشان داده شده است. شاخص شولتر برای این نمودار برابر ۶٫۰۶- است که نشان دهنده ناپایداری شدید جو می‌باشد، بقیه شاخص‌های پایداری نیز بیانگر پتانسیل زیاد همرفت است و نشان می‌دهند که در این روز احتمال رخداد طوفان‌های پراکنده زیاد می‌باشد. بقیه شاخص‌ها نیز وجود ناپایداری زیاد در جو را نشان می‌دهند. بررسی‌ها نشان داد که در این روز تلاطم در نزدیکی سطح زمین افزایش یافته و سبب شده است تا لایه آمیخته به بالاترین موقعیت خود برسد.

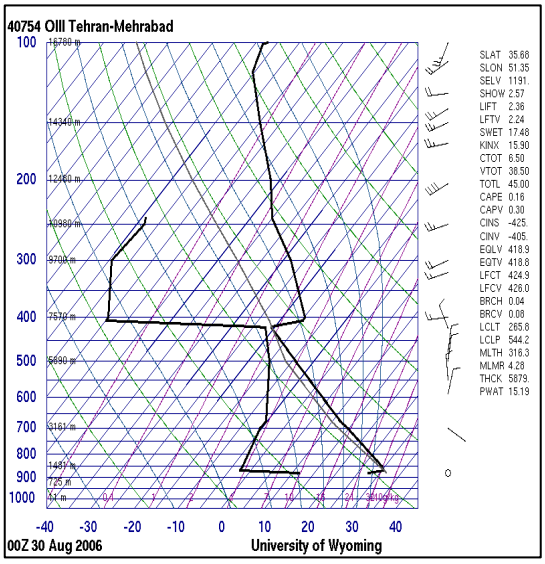
## بررسی ارتفاع لایه‌آمیخته در روز سی‌ام ژوئیه ۲۰۰۶

در روز سی‌ام اوت ۲۰۰۶ بیشترین مقدار برای بیشینه ارتفاع روزانه لایه آمیخته ۶۰۴۹ متر برآورد شده است. نمودار اسکیوتی مربوط به داده‌های جوبالای این روز در شکل ۸ نشان داده شده است. شاخص شولتر برای این نمودار برابر ۲٫۵۷ است که نشان دهنده ناپایداری ضعیف جو است، بقیه شاخص ها نیز بیانگر عدم وجود همرفت یا همرفت بسیار ضعیف هستند.

در شکل ۸ دیده می‌شود که نمایه تغییرات قائم دما با ارتفاع گویای وارونگی دما در دو لایه از جو می‌باشد که اولی در لایه کم عمقی نزدیک سطح زمین به دلیل تابش شبانه رخ داده است. وارونگی دوم در تراز فشاری ۴۲۰ تا ۴۰۰ هکتوپاسکالی است و رطوبت با روندی سریع کم می‌شود. از تراز ۴۰۰ هکتوپاسکال به بالا عدم وجود ابرناکی دیده می‌شود که از این موضوع و با توجه به شاخص‌های اسکیوتی نتیجه می‌شود که در طی ساعات آینده شرایط بارشی از سامانه‌های همدیدی انتظار نمی‌رود.




**شکل ۷**- نمودار اسکیوتی برای ساعت صفر گرینویچ تاریخ دوم ژوئیه ۲۰۱۲ ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد تهران




**شکل ۸**- نمودار اسکیوتی برای ساعت صفر گرینویچ تاریخ سی‌ام اوت ۲۰۰۶ ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد تهران

## جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش با به کارگیری یک الگوریتم مناسب، بیشینه ارتفاع لایه آمیخته در فرودگاه مهرآباد تهران محاسبه و بررسی شد. برای این کار از داده‌های جوبالای فرودگاه مهرآباد تهران در ساعت صفر گرینویچ و بیشینه دمای این ایستگاه در دوره آماری ۲۰۱۷-۱۹۹۸ استفاده شد. نتایج به دست آمده به طور مطلوبی بیشینه ارتفاع لایه آمیخته را برآورد کرد که با پژوهش

پیشینیان نیز انطباق مناسبی داشت.

مقدار میانگین عمق لایه‌آمیخته به تفکیک ماه در طول دوره مورد مطالعه محاسبه شد و همچنین برای ماه‌های ژانویه، دسامبر، ژوئیه و اوت به عنوان نماینده ماه‌های سرد و گرم مقدار بیشینه، کمینه و میانگین بیشینه ارتفاع لایه‌آمیخته برای هر سال به‌دست آمد. در ماه‌های ژانویه و دسامبر سه نمونه کمترین مقدار بیشینه ارتفاع لایه آمیخته به‌دست آمد. برای ماه‌های ژوئیه و اوت نیز سه نمونه بیشترین مقدار بیشینه ارتفاع لایه آمیخته محاسبه شد. برای تحلیل این حالت‌های موردی از نمودارهای اسکیوتی و تحلیل شاخص‌های مربوط به هر نمونه استفاده شد.

نتایج نشان می‌دهند که میانگین ارتفاع بیشینه لایه‌آمیخته در فصل‌های گرم بین ۳ تا ۴ کیلومتر و در فصل‌های سرد بین ۱ تا ۲,۵ کیلومتر است. مقدار تقریبا دو برابری این ارتفاع در فصل-های گرم ناشی از این است که شارهای سطحی در ماه‌های گرم تقریبا بیشتر از دو برابر مقدار ماه‌های سرد بوده که متناسب با آن عمق لایه‌آمیخته در تابستان نیز تقریبا دو برابر این ارتفاع در زمستان است. روند کلی تغییرات ماهانه عمق لایه‌آمیخته در فصل تابستان به علت شرایط آرام جو مستقیماً از روند تغییرات شارهای سطحی پیروی می‌کند و بستگی بیشتری به فرارفت گرما دارد ولی در زمستان رشد این لایه بیشتر متاثر از ساختار سامانه‌های همدیدی و چینش قائم باد است.

از آنجا که برای داده‌های جو بالا و دمای بیشینه در دوره مورد بررسی ارتفاع لایه‌آمیخته با دقت مطلوبی در کل دوره محاسبه گردید بنابراین با داشتن داده‌های جو بالای ساعت صفر برای روز معین و برای ایستگاه مشخص و همچنین برآورد دمای بیشینه آن روز به صورت پیش‌بینی، عمق لایه‌آمیخته آن روز را می‌توان به شکل پیش‌بینی تخمین زد و در محدوده مشخص و مناسب برای اهداف کاربردی و علمی و پیش‌آگاهی به کار گرفت. بررسی و ادامه تحقیق با استفاده از داده‌های جوبالای ایستگاه‌های دیگر و همچنین استفاده از روش‌های دیگر و کامل‌تر در محاسبه ارتفاع لایه‌آمیخته می‌تواند برای این منظور بسیار مفید باشد. همچنین با استفاده از دمای‌کمینه و دمای-میانگین امکان برآورد کمینه و میانگین ارتفاع لایه‌آمیخته وجود دارد و می‌توان آن را بررسی کرد.

## مراجع

۱) احمدی گیوی، ف. ، ثابت قدم، س. و علی اکبری بیدختی، ع.ع. ، ۱۳۸۸: بررسی نوسان عمق لایه آمیخته جو شهری تهران با استفاده از مدل و عوامل موثر در آن. مجله فیزیک زمین و فضا، (۲) ۳۵، ۱۰۵-۱۱۷.

۲) مرادی، م. ، پرهیزکار، د. و رضازاده، پ. ، ۱۳۸۰: اسکیوتی و محاسبه چند کمیت ترمودینامیکی. اولین کارگاه پیش‌بینی عددی وضع هوا، تهران، ۱۳۸۰.

۳) مرادی، م.، ۱۳۹۰: مقدمه‌ای بر هواشناسی دینامیکی ۱. انتشارات سید باقر حسینی.

۴) یار احمدی، د. ، حلبی، م. و زارعی، ز. ، ۱۳۹۵: بررسی تغییرات ماهانه ارتفاع لایه مرزی در شرایط وارونگی بحرانی، مطالعه موردی ایستگاه مهرآباد تهران. آمایش جغرافیائی فضا، سال ششم، شماره ۲۱۲ صص ۱۲۴-۱۱۵.

۵) نصیری، ب. ، زارعی، ز. ، حلبی، م. و رستمی، م. ، ۱۳۹۵: بررسی تغییرات ارتفاع لایه آمیخته و ضخامت لایه مرزی در شرایط گردوغباری شهر اهواز. تحلیل فضائی مخاطرات محیطی، سال سوم، شماره ۲. صص ۶۴-۵۱.

6) Garratt, A. J., 1992: The atmospheric boundary layer. Cambridge University Press, 335 pp.

7) Holton, J. R., 2004: An Introduction to Dynamic Meteorology, Fourth Edition. PP.

8) Panofsky, H. A., and Dutton, J. A., 1984: Atmospheric turbulence. New York, Wiley& Sons, 397 pp.

9) Seidel, D. J., Ao, C. O., and Li, K., 2010: Estimating climatological planetary boundary layer heights from radiosonde observations: Comparison of methods and uncertainty analysis, J. Geophys. Res., 115, D16113, doi: 10. 1029/2009JD013680.

10) Stull, R. B., 1988: An Introduction to boundary layer meteorology. Dordrecht, Kluwer

11) Academic Publishers, 670 pp.

12) Stull, R. B., 2000: Meteorology for scientists and engineers. Brooks/Cole, 502 pp.

13) Wang, X. Y. and Wang, K. C., 2014: Estimation of atmospheric mixing layer height from radiosonde data, Atmos. Meas. Tech., 7, 1701–1709.