

بررسی نوسان عمق لایه آمیخته جو شهری تهران با استفاده از مدل MM5 و عوامل مؤثر در آن

فرهنگ احمدی گیوی^{۱*}، سمانه ثابت قدم^۲ و عباسعلی علی اکبری بیدختی^۳

^۱استادیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۲دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۳استاد، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۶۳۲۱، پذیرش نهایی: ۸۷۷۲)

چکیده

در این پژوهش، با استفاده از مدل میان‌مقیاس MM5 و با انتخاب طرح‌واره مناسب لایه مرزی، عمق لایه آمیخته جو شهری و تغییرات روزانه آن برای منطقه تهران در ماه‌های اوت و فوریه سال ۲۰۰۵، درحکم نمونه‌ای از دو فصل گرم و سرد سال بررسی شده است. سپس از عوامل مؤثر در عمق‌های کمینه و بیشینه لایه آمیخته در هر یک از دو ماه، شرایط همدیدی مستقر در منطقه مورد نظر، فرارفت گرما، رطوبت، شارهای سطحی گرما و تکانه، حرکت‌های قائم و چینش قائم جهت و تندی باد افقی بررسی شده است. در نتایج مدل، تغییرات فصلی قابل توجهی در عمق لایه آمیخته و دیگر کمیت‌های مورد بررسی به چشم می‌خورد. برای مثال، میانگین ارتفاع لایه آمیخته در فصل تابستان حدود ۳ کیلومتر بوده و نسبت به فصل زمستان تقریباً دو برابر است. نتایج نشان می‌دهد که روند کلی تغییرات ماهانه عمق لایه آمیخته، خصوصاً در فصل تابستان، به علت شرایط آرام جو بوده و مستقیماً از روند تغییرات شارهای سطحی پیروی می‌کند. به علاوه، رشد لایه آمیخته در این فصل بستگی بیشتری به فرارفت گرما، در مقایسه با دیگر عوامل دارد. در حالیکه در زمستان، که تغییرات شارهای سطحی و نوسانات لایه آمیخته چشمگیرتر است، رشد این لایه بیشتر متأثر از ساختارسامانه‌های همدیدی و چینش قائم باد است.

واژه‌های کلیدی: عمق لایه آمیخته، مدل میان‌مقیاس MM5، تغییرات فصلی، شارهای سطحی، فرارفت گرما و چینش قائم باد

Studying the fluctuation of mixed layer height of Tehran, using MM5 modeling system

Ahmadi Givi, F¹., Sabetghadam, S². and Aliakbari-Bidokhti, A. A³.

¹Assistant Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

²M.Sc. student of Meteorology, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

³Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 11 June 2007, Accepted: 23 Sep 2008)

Abstract

Mixed layer is a part of the atmospheric boundary layer in which pollutants are uniformly distributed. It is sensitive to the Earth's surface, controls the flow of heat and momentum between the surface and the free atmosphere, thus playing a key role in atmospheric circulation. Most of atmospheric pollution models require the height of the mixed layer as

an input to determine the depth of atmosphere through which surface emitted pollutants are well mixed. Thus, the study of the depth variation of this layer is important in the spatial and temporal distribution of air pollution. This can be estimated from direct measurement and also from numerical forecasting models (such as MM5) with a proper boundary layer scheme.

In this research, first we study the variations of the depth of the daytime mixed layer for the city of Tehran for two months, August and February 2005 which are representative of warm and cold seasons, respectively. Next, the maximum and minimum depths of the mixed layer for each month are selected. Then the affecting variables concerning these maximum and minimum amounts, such as synoptic conditions, temperature advection, humidity, surface fluxes, vertical motions and vertical wind shears, are examined.

We attempt to compare the results calculated by means of MM5 with the same height derived by radiosonde. Three domains of MM5 are defined using 9, 3 and 1 km resolutions. The smallest domain is centered at the radiosonde position. We use simple-ice for the explicit moisture scheme, cloud radiation for the radiation scheme, and B-M scheme for the cumulus parameterization. Boundary layer processes are calculated using the Medium Range Forecast (MRF) scheme.

In general, the simulated potential temperature, mixed layer depth, and specific humidity by the numerical model are consistent with the variables measured by radiosonde. However, the model is not able to capture the fine structure of the mixed layer. The results display considerable seasonal variability in the mixed layer depth. For instance, the midday mixed layer depth is found to be nearly 3 km in summer for calm weather conditions, and is nearly twice as that of the wintertime. It is also seen that the monthly trend of mixed layer depth variations in the two months are close to those of the surface heat flux. It seems the fluctuations in the depth variations of this layer result mostly from temperature advection in summertime, while in wintertime, the midday depth is mostly affected by weather systems and wind shear rather than other physical processes.

Key words: Mixed layer depth, MM5, Depth variation, Summertime, Wintertime

۱ مقدمه

و نهان بین سطح زمین و جو می‌شود. این شارها که مستقیماً نمی‌توانند به کل جو برسند، به لایه کم عمق نزدیک سطح، به نام لایه مرزی جو محدود می‌شوند (استال، ۲۰۰۰). لایه مرزی جو بخشی از جو است که مستقیماً تحت تأثیر شرایط سطحی است و به واداشتهای سطحی در مقیاس زمانی کوچک پاسخ می‌دهد. فرایندهایی که در این لایه رخ می‌دهند، از جنبه‌های گوناگون مانند دینامیک شارش‌ها و سامانه‌های جوی، تابش سطحی، چرخه آب‌شناسی و تحقیقات آلودگی هوا دارای اهمیت هستند. ضخامت لایه مرزی جو متغیری

لایه آمیخته، بخشی از لایه مرزی جو است که آلاینده‌های جوی به شکل یکنواختی در آن پخش می‌شوند. برآورد عمق این لایه یکی از مهم‌ترین ورودی‌های مدل‌های پخش آلودگی هوا است که براساس آن محدوده قائم آمیختگی آلودگی‌ها مشخص می‌شود. از این رو مطالعه تغییرات روزانه لایه آمیخته جو شهری و عوامل مؤثر بر آن، از نظر توزیع و پخش آلاینده‌ها، به‌خصوص وضعیت آلودگی هوا حائز اهمیت است. چرخه روزانه گرمایش تابشی ناشی از طلوع و غروب خورشید، منجر به چرخه روزانه شارهای گرمای محسوس

در این پژوهش ابتدا با استفاده از مدل میان‌مقیاس Fifth-Generation PSU/NCAR Mesoscale (MM5 Model) عمق لایه آمیخته برای همه روزهای دو ماه از سال ۲۰۰۵، درحکم نماینده فصل‌های سرد و گرم، محاسبه شده است. سپس با استفاده از روند تغییرات یک‌ماهه این عمق، مقادیر بیشینه و کمینه برای هر یک از دو ماه تعیین شده است. در گام بعد، در راستای بررسی نقش عوامل مؤثر در این نوسان‌ها، عواملی چون نوع و ساختار سامانه‌های هم‌دید مؤثر در منطقه مورد بررسی، شارهای سطحی، فرارفت گرما، سرعت قائم و چینش قائم تندی و جهت باد برای مقادیر بیشینه و کمینه هر یک از دو ماه بررسی شده‌اند.

۲ داده‌ها و روش کار

* در پژوهش حاضر، نتایج حاصل از اجرای مدل میان‌مقیاس MM5 برای بررسی رشد لایه آمیخته جو شهری تهران با توپوگرافی نسبتاً پیچیده، استفاده شده است. این مدل برای دو دوره یک‌ماهه از سال ۲۰۰۵، یعنی ماه اوت (از فصل گرم) و ماه فوریه (از فصل سرد) اجرا شده است. با توجه به اینکه عمق لایه آمیخته در هنگام بعداز ظهر به بیشینه مقدار خود می‌رسد، نتایج حاصل از اجرای مدل برای ۱۲ ساعت پس از شروع، در ساعت ۱۲ گریونچ (ساعت ۱۵:۳۰ به وقت محلی)، برای به انجام رساندن تحلیل‌ها به کار رفته است. در این تحقیق، مدل MM5 برای شبکه‌های افقی با ۳ حوزه تو در تو با قدرت‌های تفکیک ۹، ۳ و ۱ کیلومتر اجرا شده است (پژوهش‌های مشابه با چنین تفکیک‌هایی را شفرن و همکاران (۲۰۰۰)، آرلانو و ولنگا (۲۰۰۱) و پینو و آرلانو (۲۰۰۴) به کار برده‌اند). بیرونی‌ترین شبکه که از غرب تا شرق ایران را پوشش می‌دهد، دارای تفکیک ۹ کیلومتر و شبکه ۸۷×۸۱ نقطه‌ای است. شبکه بعدی تفکیک افقی ۳ کیلومتر دارد و شامل ۱۲۱×۱۳۳ نقطه شبکه‌ای است.

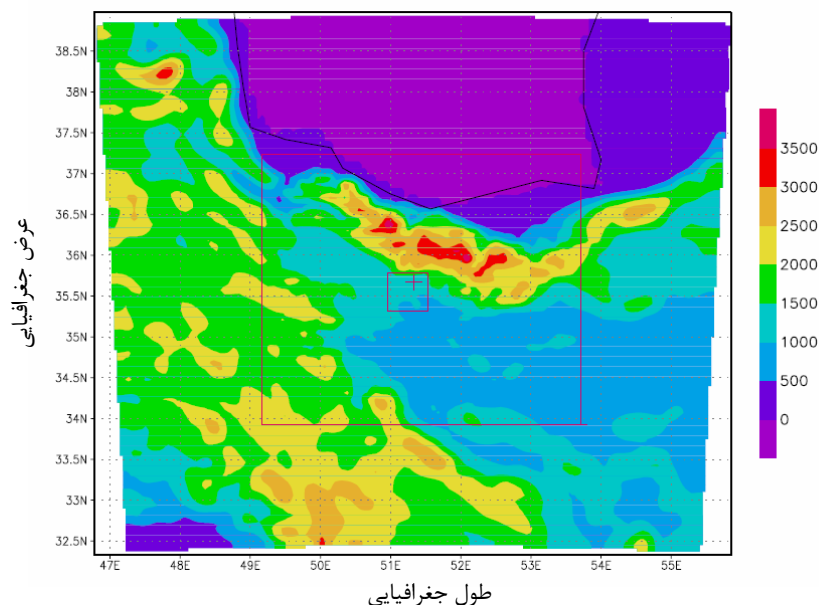
وابسته به زمان و مکان است و اندازه آن در خشکی از چند صد متر تا چند کیلومتر در شرایط مختلف تغییر می‌کند (استال، ۱۹۸۸). این ضخامت به عوامل متعدد از قبیل نوع سامانه‌های جوی و ساختار آنها، شارهای سطحی، چینش قائم تندی و جهت باد و پوشش سطحی بستگی دارد.

علاوه بر مشاهدات و اندازه‌گیری‌های مستقیم در لایه مرزی جو، از جمله روش‌هایی که در بررسی این لایه به کار می‌رود، استفاده از مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی ساختار و رفتار لایه مرزی جو است. در این روش می‌توان آزمایش‌هایی در شرایط هدایت شده و دقیق عملی ساخت که امکان چنین آزمایش‌هایی در مشاهدات میدانی وجود ندارد. در این نوع بررسی‌ها اثرات مربوط به تابش، ترکیبات جو، ابر، کوه، چرخش زمین، اصطکاک سطح و تلاطم در تعیین میدان‌های شبیه‌سازی شده برای باد، دما، رطوبت، فشار و دیگر کمیت‌های هواشناسی در نظر گرفته می‌شود (گرت، ۱۹۹۲).

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 دوتن، ۱۹۸۴). روش‌هایی که برای تعیین ارتفاع لایه مرزی جو یا عمق لایه آمیخته استفاده می‌شود، معمولاً در بررسی آلودگی هوا به کار می‌رود. برآورد کردن عمق لایه آمیخته، یکی از مهم‌ترین پارامترها در مدل‌های پخش آلاینده‌ها است. بیشترین تحلیل‌هایی که برای تشخیص عمق لایه آمیخته صورت می‌گیرد، بر اساس 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 ریچاردسن بحرانی برای تعیین عمق لایه آمیخته، استفاده می‌کنند.

- * استفاده از تصویر نقشه همدیس لامبرت.
- * پارامتره کردن رطوبت با استفاده از طرح‌واره رطوبت صریح یخ ساده.

داخلی‌ترین شبکه نیز با تفکیک افقی ۱ کیلومتر و تعداد نقاط شبکه‌ای 52×52 ، شهر تهران را پوشش می‌دهد (شکل ۱). بررسی نتایج برای نقطه مرکزی کوچک‌ترین شبکه، منطبق بر ایستگاه فرودگاه مهرآباد، صورت گرفته است. در اجزای صورت گرفته، ۲۳ تراز سیگما



شکل ۱. موقعیت مکانی ۳ محدوده مورد استفاده در مدل MM5 در سه شبکه با محدوده‌های افقی ۹، ۳ و ۱ کیلومتر، نقطه مرکزی فرودگاه مهرآباد است. طیف رنگی بیانگر ارتفاع نقطه از سطح دریا است.

- * پارامتره کردن تابش توسط طرح‌واره تابش ابر.
- * پارامتره کردن همرفت با استفاده از طرح‌واره بتس-میلر.
- * پارامتره کردن لایه مرزی توسط طرح‌واره MRF.
- * استفاده از مدل دمای خاک چندلایه‌ای که به صورت جفت شده با طرح‌واره لایه مرزی MRF به کار می‌رود.
- * سپیدی برابر با ۰/۱۵ که معادل با کاربری زمین از نوع پوشش شهری است.
- از آنجا که هدف اصلی این پژوهش، بررسی فرایندهای لایه مرزی است، لذا به طرح‌واره‌ای مناسب

در راستای قائم در نظر گرفته شده است. ترازهای قائم از سطح زمین آغاز می‌شود و تا تراز فشاری ۱۰۰ میلی‌باری امتداد دارد.

از مهمترین خصوصیات مدل MM5، انتخاب گزینه‌های درونی گوناگون و شرایط فیزیکی خاص از کاربر است. این گزینه‌های درونی شامل نوع طرح‌واره‌های مربوط به لایه مرزی، همرفت، تابش و رطوبت است. گزینه‌ها و خصوصیات فیزیکی که در شبیه‌سازی‌های این پژوهش از آنها استفاده شده است، به قرار زیر هستند (به نشانی اینترنتی موجود در انتهای منابع مراجعه شود):

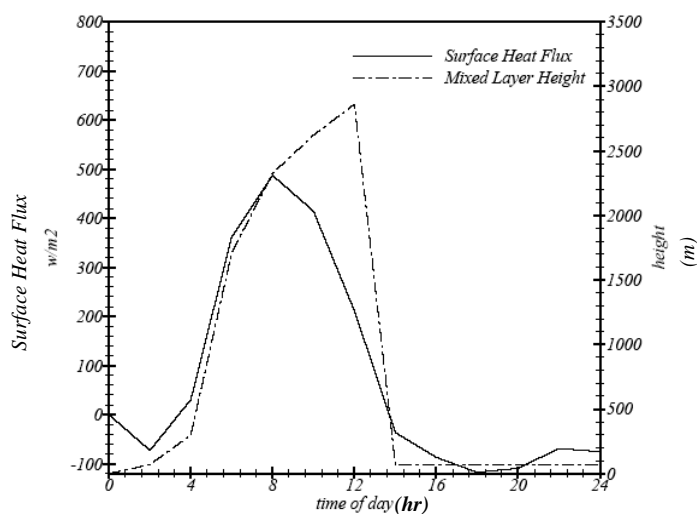
به دست می آیند. داده های مورد نظر از مرکز ملی پیش بینی های محیطی امریکا (NCEP, National Center for Environment Predictions) که بایگانی گسترده ای از داده های جوی دارد، فراهم شده است. شرایط مرزی و اولیه هر ۳ ساعت یکبار با اطلاعات به دست آمده از این مرکز به روزرسانی می شود. برای داده های توپوگرافی، مدل از بانک داده های کاربری زمین با دقت ۲ دقیقه (۴ کیلومتر) استفاده می کند. متغیرهای خروجی پیش بینی شده در مدل، شامل مؤلفه های قائم و افقی باد، دما، رطوبت، دمای پتانسیلی، ارتفاع لایه مرزی، شارهای سطحی، فرارفت دما و غیره است که هر دو ساعت یکبار ذخیره می شود.

۳ تحلیل نتایج

چرخه تغییرات روزانه عمق لایه آمیخته، همراه با شارهای سطحی که مجموع شار گرمای محسوس و شار گرمای نهان سطحی است، در حکم نمونه برای روز سوم ماه اوت با شرایط جوی آرام و پایدار، در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، شار سطحی در حدود ساعت ۸:۳۰ صبح به وقت گرینویچ (ساعت ۱۲

برای پارامتره کردن این فرایندها نیاز است. طرحواره ای که در این بررسی برای پارامتره کردن فرایندهای لایه مرزی از آن استفاده شده است، طرحواره MRF (duimeM Forecasting Range) است که طرحواره ای غیرمحملی با بستار درجه ۱ از نوع لایه مرزی است. در این طرحواره، ضریب پخش قائم پیچکی از فرمول بندی هنگ و پن (۱۹۹۶) تعیین و عمق لایه مرزی نیز با استفاده از روش عدد ریچاردسن حجمی محاسبه می شود. در تحقیقی که به منظور بررسی حساسیت مدل MM5 در استفاده از طرحواره های MRF (به مثابه نمونه ای از طرحواره های غیرمحملی) و ETA (به مثابه نمونه ای از طرحواره های محلی) صورت گرفته، روشن شده است که مقادیر شبیه سازی شده کمیت هایی از قبیل دما، رطوبت، تندی باد و عمق لایه آمیخته برای منطقه شهری تهران با طرحواره MRF با مشاهدات، همخوانی بیشتری دارد (احمدی گیوی و ثابت قدم، ۱۳۸۵).

داده های هواشناختی متفاوتی در حکم ورودی به مدل پیش بینی عددی وضع هوا داده می شود. این داده ها شامل فشار، ارتفاع ژئوپتانسیلی، دما، باد و رطوبت در سطح زمین و سطوح بالای جو هستند که از مدل های جهانی



شکل ۲. چرخه روزانه رشد لایه آمیخته به وقت گرینویچ (منحنی خط چین) همراه با شار گرمای سطحی (منحنی تو پر) برای روز سوم ماه

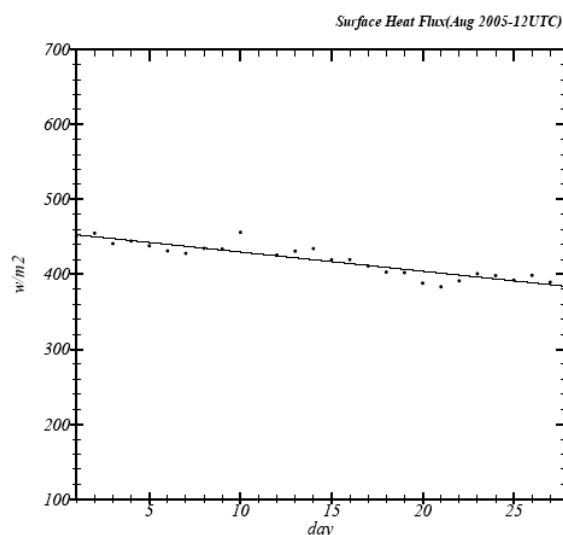
ظهر به وقت محلی) به بیشینه مقدار خود رسیده و سه الی چهار ساعت بعد از آن (تقریباً در ساعت ۳ بعد از ظهر به وقت محلی)، عمق لایه آمیخته بیشینه شده است. این تأخیر زمانی بیانگر آن است که مدتی طول می کشد تا گرمایش ناشی از سطح که منجر به ایجاد فرایندهای تلاطمی می شود، تأثیر خود را در رشد لایه بگذارد و یا به عبارت دیگر، مدت زمانی است که طی آن لایه به این فرایندهای سطحی پاسخ می دهد. از این رو بررسی های لایه آمیخته در ساعت ۱۲ گرینویچ صورت گرفته است، که در این ساعت لایه رشد کاملی داشته است.

در بخش های بعد، پس از نشان دادن ویژگی های کلی عمق لایه آمیخته در دو ماه اوت و فوریه، نتایج مربوط به نقش عوامل مؤثر در عمق لایه آمیخته برای حالت های بیشینه و کمینه هریک از دو ماه ارائه می شود.

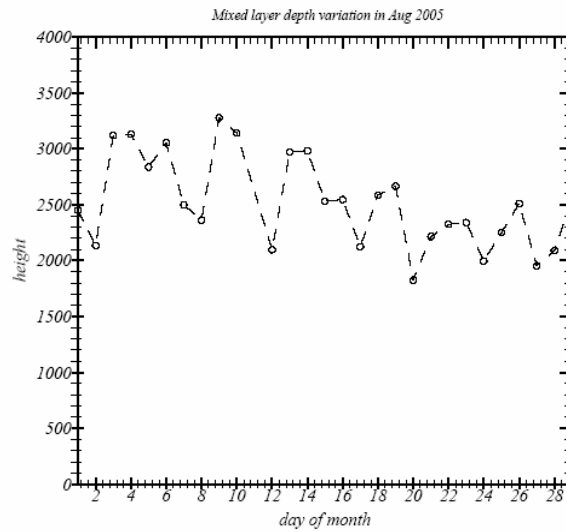
۱-۳ ساختار و نوسان های عمق لایه آمیخته در ماه اوت ۲۰۰۵

تغییرات شار سطحی، یعنی مجموع شار گرمای نهان

و شار گرمای محسوس، شبیه سازی شده با مدل در ساعت ۱۲ UTC برای روزهای متفاوت ماه اوت در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، این شار روندی نزولی در طول ماه را نشان می دهد؛ به طوری که با نزدیک شدن به روزهای آخر ماه که تقریباً با کاهش نسبی گرمای هوا همراه است، شار سطحی نیز کاهش می یابد. رفتار مشابهی در عمق لایه آمیخته شبیه سازی شده در طول این ماه نیز مشاهده می شود (شکل ۴). با توجه به اینکه شار سطحی در ساعت ۱۲ UTC هر روز دارای تغییرات محسوس و قابل توجهی نیست، بنابراین می توان تأثیر این شارها در نوسان های عمق لایه آمیخته را ناچیز فرض کرد و به بررسی دیگر عوامل تأثیر گذار در این نوسان ها پرداخت. در بررسی های ماه اوت، دو روز از ماه، روزهای نهم و بیستم اوت، که به ترتیب دارای بیشترین و کمترین عمق لایه آمیخته شبیه سازی شده بوده اند، مورد تحلیل دقیق قرار گرفته است.



شکل ۳. شار گرمای سطحی شبیه سازی شده با مدل در ساعت ۱۲ UTC برای همه روزهای ماه اوت ۲۰۰۵.



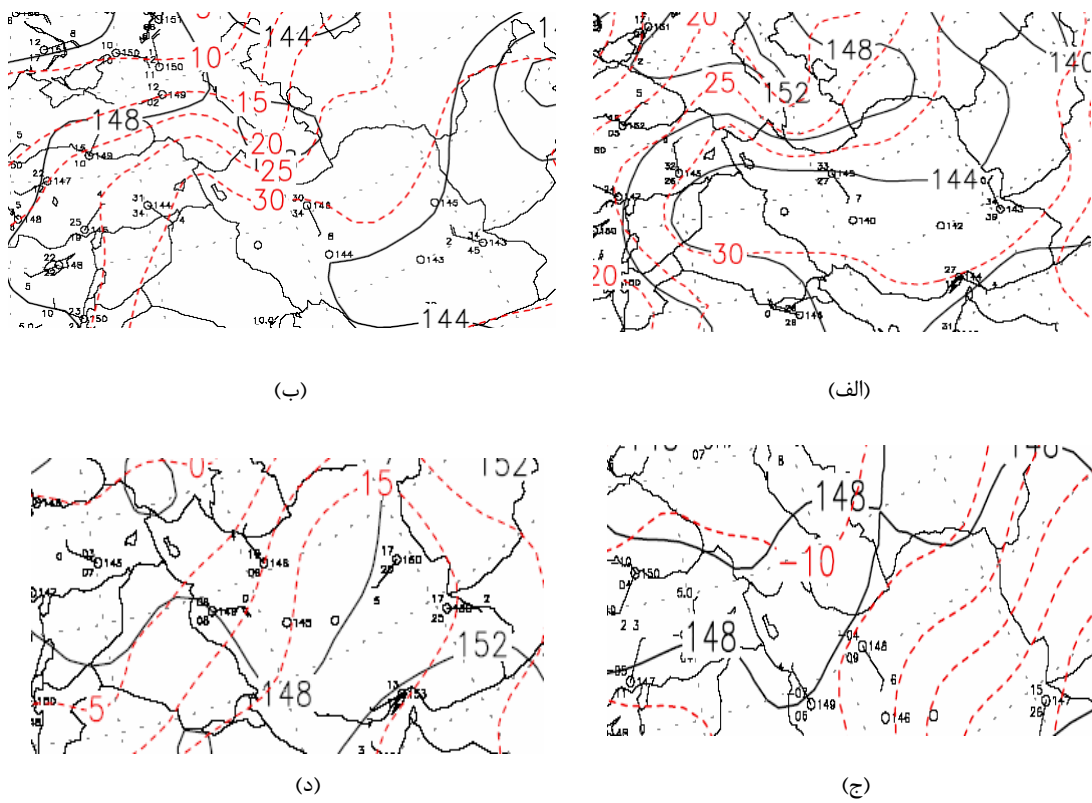
شکل ۴. تغییرات روزانه عمق لایه آمیخته در ساعت ۱۲ UTC در ماه اوت ۲۰۰۵.

ضحامت ستون هوا و در نتیجه بیشتر شدن عمق لایه آمیخته می‌شود.

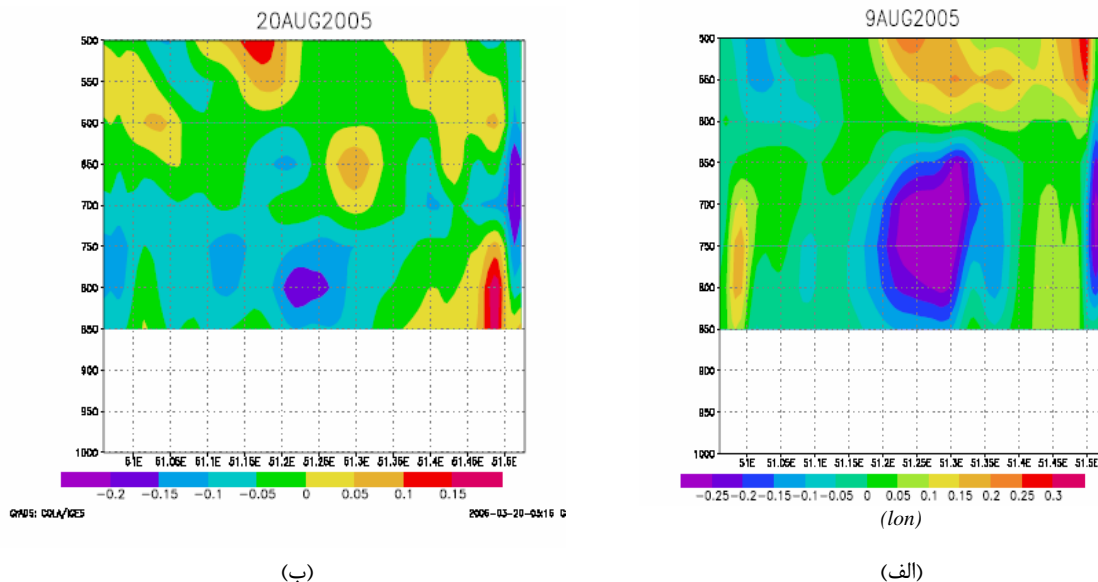
علاوه بر شار گرما که پیش از این به اثر آن اشاره شد، شار تکانه سطحی نیز می‌تواند در عمق لایه آمیخته مؤثر باشد. مقدار شار تکانه سطحی شبیه‌سازی شده با مدل در این روز $0.53 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ برآورد شده است که از مقدار میانگین ماهانه آن ($0.51 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) اندکی بیشتر است. این تفاوت در افزایش عمق لایه آمیخته تأثیر مستقیم دارد. عامل دیگر که اثر آن نیز در رشد لایه آمیخته بررسی شده است، چینش قائم باد است. نمایه قائم سرعت افقی باد در مکان ایستگاه در شکل ۷- الف ارائه شده است. مشاهده می‌شود که چینش باد، به‌خصوص در پایین و ردسپهر، مقدار کمی داشته و تقریباً ثابت است. از این رو لایه آمیخته می‌تواند به آسانی رشد کند. از سوی دیگر، جهت باد شبیه‌سازی شده در قله و کف لایه آمیخته، حدود ۱۸۰ درجه تفاوت دارد که این تفاوت می‌تواند به افزایش تلاطم و رشد بیشتر لایه منجر شود (استال، ۱۹۸۸).

۳-۱-۱ ویژگی‌های بیشینه عمق لایه آمیخته (نهم اوت)

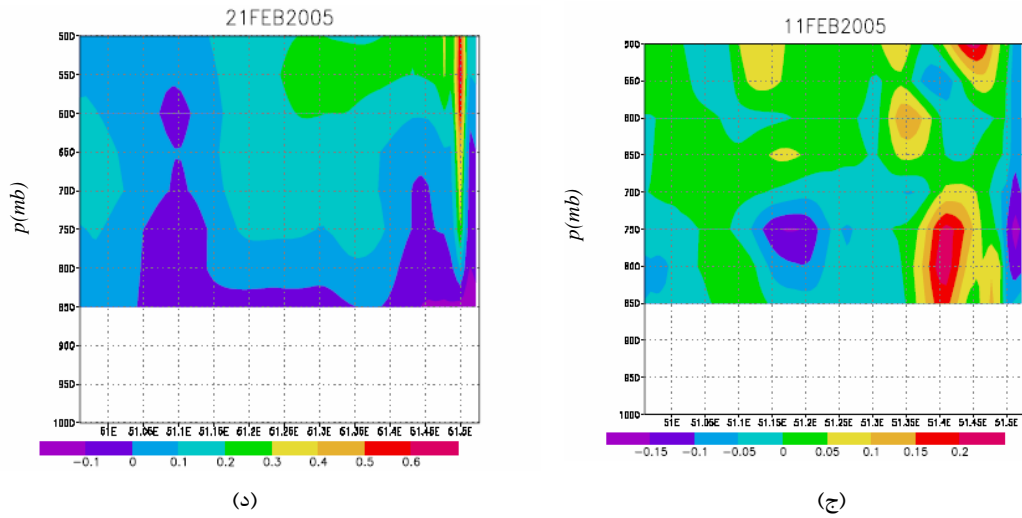
در این قسمت عوامل احتمالی مؤثر در بیشینه عمق لایه آمیخته بررسی می‌شود. از جمله شرایط همدیدی این روز می‌توان به استقرار سامانه کم‌فشار در مرکز ایران اشاره کرد (شکل ۵- الف). در این روز رطوبت نسبی تقریباً ۲۰ درصد از اطلاعات رادیو سوند به‌دست آمده است. حرکات بالاسوی ناشی از این سامانه می‌تواند یکی از عواملی باشد که در بیشتر شدن عمق لایه نقش داشته است. شکل ۶- الف وجود حرکات بالاسو بر فراز ایستگاه در برش قائم سرعت‌های قائم شبیه‌سازی شده با مدل را نشان می‌دهد. در این شکل، مقادیر منفی متناظر با حرکات بالاسو و مقادیر مثبت، بیانگر حرکات پایین‌سو است. به علاوه، وزش باد از سمت جنوب (شکل ۵- الف) که سبب فرارفت هوای گرم به سمت نقطه مرکزی شبکه است، می‌تواند در حکم دیگر عامل تأثیرگذار در بیشینه شدن عمق لایه آمیخته در این روز به شمار رود. فرارفت هوای گرم باعث افزایش



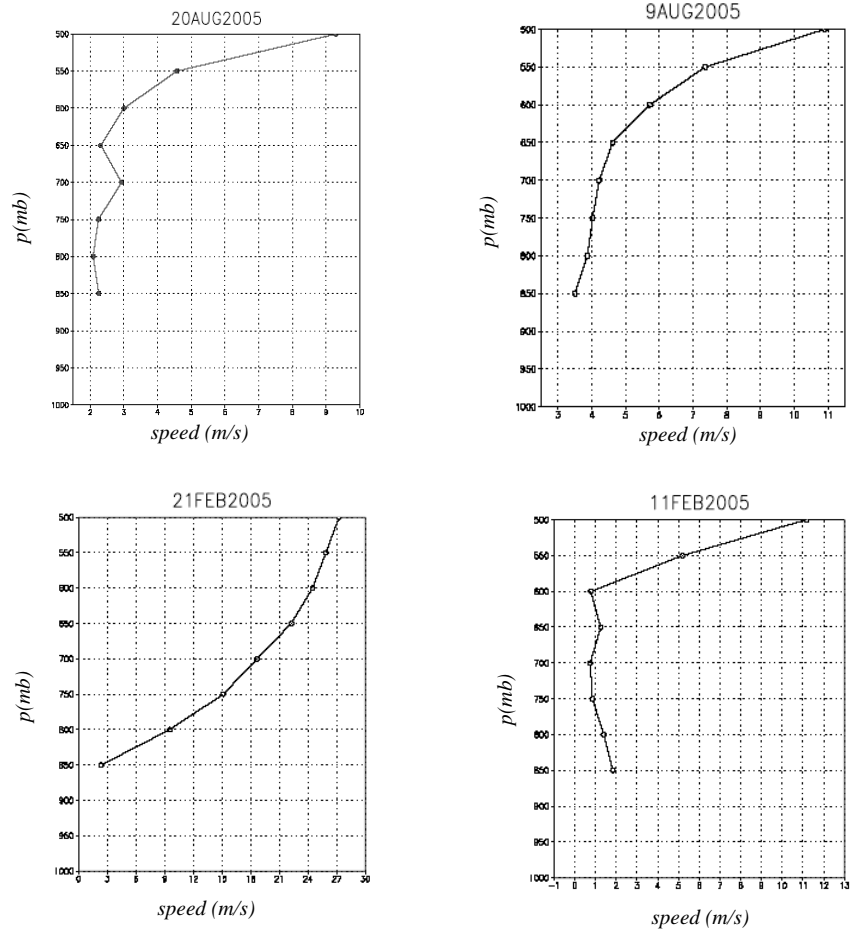
شکل ۵. نقشه ارتفاع ژئوپتانسیلی سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال (خطوط پر به فاصله ۴ دکامتر) برای منطقه‌ای شامل ایران در روزهای نهم (الف) و بیستم (ب) اوت و یازدهم (ج) و بیست و یکم (د) فوریه ۲۰۰۵. خطوط خطچین نشانگر پربندهای هم‌دما به فاصله ۵°C هستند.



شکل ۶. سطح مقطع قائم حرکت‌های قائم شبیه‌سازی‌شده با مدل در روزهای نهم (الف) و بیستم (ب) اوت و یازدهم (ج) و بیست و یکم (د) فوریه ۲۰۰۵ برای محدوده کوچک میانی. مقادیر منفی و مثبت (برحسب Pa/s) به ترتیب نشانگر حرکت‌های صعودی و نزولی هستند (طول جغرافیایی تهران برابر ۵۱.۳۳ درجه است).



ادامه شکل ۶.



شکل ۷. نمایه قائم تندی باد افقی (برحسب m/s) در مکان ایستگاه فرودگاه مهرآباد در روز نهم (الف) و بیستم (ب) اوت و یازدهم (ج) و بیست و یکم (د) فوریه ۲۰۰۵.

۳-۱-۲ ویژگی‌های کمینه عمق لایه آمیخته (بیستم اوت)

کمترین عمق لایه آمیخته در ماه اوت، در روز بیستم رخ داده و این عمق در ساعت ۱۲ ظهر، حدود ۱۸۰۰ متر برآورد شده است. باید توجه داشت که به طور کلی این عمق، مقدار قابل توجهی برای ارتفاع لایه آمیخته است؛ اما در مقایسه با دیگر روزهای ماه اوت، کمترین عمق شبیه‌سازی شده در طول این ماه است.

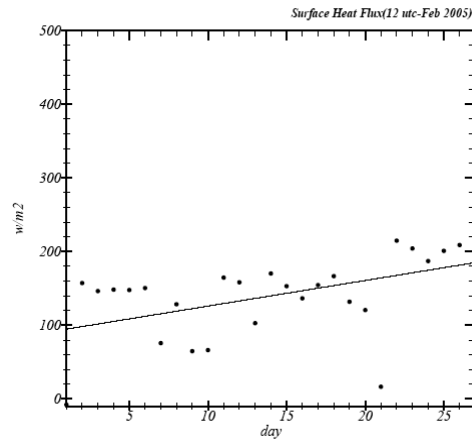
شرایط همیدی این روز در منطقه مورد بررسی، در شکل ۵- ب نشان داده شده است. استقرار یک سامانه پرفشار در شمال دریای خزر، شرایط مساعدی را برای شکل‌گیری لایه مرزی فراهم کرده است. از سوی دیگر وزش باد جنوبی در ایستگاه (۲۱۰ درجه) همراه با فرارفت هوای گرم است، که با توجه به زاویه‌ای که جهت باد با خطوط هم‌دما می‌سازد، مقدار آن کم است. برای بررسی نقش سرعت‌های قائم در رشد لایه آمیخته، سطح مقطع قائم این سرعت‌ها در شکل ۶- ب ارائه شده است. با توجه به شکل، تا ارتفاع ۱۲۰۰ متری، حرکات صعودی ضعیف در حدود ۰/۰۵ تا ۰/۱ پاسکال بر ثانیه مشاهده می‌شود. پس از این ارتفاع تا حدود ۱۸۰۰ متری که عمق شبیه‌سازی شده لایه آمیخته است، سرعت‌های قائم بسیار ضعیف (بین ۰ تا ۰/۰۵ متر بر ثانیه) هستند. بنابراین سرعت‌های قائم بسیار کم در این روز، نقش چندانی در عمق لایه آمیخته نداشته‌اند.

نقش چینش قائم باد در کمینه شدن ارتفاع در این روز را می‌توان در نمایه قائم باد که در شکل ۷- ب ارائه شده است، مشاهده کرد. وجود چینش باد قابل ملاحظه در ارتفاعات زیرین، نشانگر تأثیر منفی این عامل است که مانع رشد لایه آمیخته می‌شود. همچنین شار تکانه سطحی $0/48 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$ که کمتر از مقدار میانگین ماهانه آن است ($0/51 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$) و چینش قائم جهت باد (حدود ۵۰ درجه)، نقش چندانی در رشد لایه آمیخته ندارند.

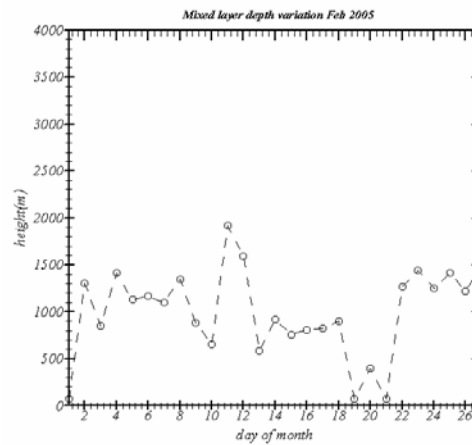
مقایسه نتایج مدل برای دو عمق کمینه و بیشینه در ماه اوت نشان می‌دهد که نقش عوامل گوناگون در تعیین عمق لایه آمیخته متفاوت است و از نظر علامت و مقدار تغییر می‌کند. در نتایج حاصل، دیده می‌شود که در بیشینه عمق لایه آمیخته همه عوامل نقش مثبت دارند؛ در حالی که در کمینه عمق در این ماه، چینش قائم باد نقش اساسی دارد.

۳-۲ ساختار و نوسان‌های عمق لایه آمیخته در ماه فوریه ۲۰۰۵

ابتدا به بررسی نقش شارهای سطحی در نوسان‌های عمق لایه آمیخته در ماه فوریه پرداخته می‌شود. شکل ۸ شار سطحی شبیه‌سازی شده با مدل را که مجموع شار گرمای نهان و شار گرمای محسوس است، در طول ماه فوریه نشان می‌دهد. از مقایسه این شکل با شکل ۳ مربوط به ماه اوت، مشاهده می‌شود که در ماه فوریه نوسان‌های بیشتری در شارهای سطحی وجود دارد. همچنین با نزدیک شدن به روزهای آخر ماه که هوا رو به گرم‌تر شدن دارد، شارهای سطحی روند صعودی یافته‌اند. تغییرات روزانه در کل ماه فوریه عمق شبیه‌سازی شده برای لایه آمیخته در شکل ۹ نشان داده شده است. همانند روند رشد صعودی در شارهای سطحی، در تغییرات عمق لایه آمیخته نیز روند صعودی به چشم می‌خورد که در مقایسه با شارهای سطحی به خوبی آشکار نیست. با توجه به اینکه در فصل زمستان ناپایداری‌های جوی بیشتر است و عبور سامانه‌های متفاوت، منطقه مورد بررسی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، نظم خاصی در این تغییرات دیده نمی‌شود؛ به طوری که برای دو روز متوالی، عمق لایه دارای تغییر بیش از ۱ کیلومتر است. در بررسی‌های این ماه نیز، روزهای یازدهم و بیست و یکم فوریه که به ترتیب دارای بیشترین و کمترین عمق لایه آمیخته بوده‌اند، مورد تحلیل دقیق قرار گرفته است.



شکل ۸. شار گرمای سطحی شبیه‌سازی‌شده با مدل در ساعت ۱۲ UTC برای روزهای ماه فوریه ۲۰۰۵.



شکل ۹. تغییرات روزانه عمق لایه آمیخته در ساعت ۱۲ UTC در ماه فوریه ۲۰۰۵.

بیشتر شدن عمق لایه آمیخته از حالت معمول شود. برای بررسی نقش سرعت قائم در عمق لایه آمیخته، سطح مقطع قائم آن در شکل ۶-ج ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، سرعت‌های قائم دارای مقادیر اندک‌اند که این مقادیر تا ارتفاع تقریباً ۲ کیلومتری (که ارتفاع لایه آمیخته در این روز است) کشیده شده‌اند. از این ارتفاع بالاتر، حرکات نزولی به چشم می‌خورد.

شار تکانه سطحی در روز یازدهم، $0.43 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$ برآورد شده است که به میزان قابل توجهی از مقدار متوسط ماهانه آن ($0.53 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$) کمتر است. برای مشاهده نقش چیش قائم باد در رشد لایه مرزی، نمایه قائم سرعت

۳-۲-۱ ویژگی‌های بیشینه عمق لایه آمیخته (یازدهم فوریه)

در روز یازدهم فوریه که بیشترین عمق لایه آمیخته در این ماه برآورد شده است، وضعیت همدیدی قابل ذکر، استقرار سامانه پرفشار در شمال ایران است (شکل ۵-ج). از سوی دیگر، به علت واقع شدن منطقه مورد بررسی در جلوی محور ناوه، انتظار حرکات صعودی می‌رود که احتمالاً این حرکات در بیشینه کردن عمق لایه تأثیر داشته است. همچنین وزش باد جنوبی سبب فرارفت نسبتاً قوی شده و هوای گرم‌تر عرض‌های پایین را به محل ایستگاه منتقل کرده است. این فرارفت هوای گرم می‌تواند منجر به

افقی باد در مکان ایستگاه در شکل ۷-ج نشان داده شده است. مؤلفه افقی سرعت باد در ارتفاعات متفاوت، تغییرات چشمگیری ندارد که این نبود حضور چینش باد می تواند سبب رشد بیشتر لایه آمیخته شود.

۲-۲-۳ ویژگی های کمینه عمق لایه آمیخته (بیست و یکم فوریه)

در روز بیست و یکم فوریه، کمترین عمق لایه آمیخته برآورد شده است. در واقع در این روز، لایه آمیخته اصلاً رشد نداشته و مقدار شبیه سازی شده با مدل بسیار کم است (حدود ۶۰ متر). بررسی این مورد از آن جهت اهمیت دارد که به واسطه آن می توان به اثر عواملی پی برد که در حضور آنها، لایه آمیخته شکل نگرفته است.

نقشه همدیدی در سطح ۸۵۰ هکتو پاسکال (شکل ۵-د)، استقرار سامانه کم فشار در غرب ایران و کشیده شدن زبانه آن به منطقه مورد بررسی را نشان می دهد. به علت رطوبت نسبتاً بالایی که در این روز وجود دارد (رطوبت نسبی ۸۲ درصد)، حرکات صعودی با تشکیل ابر و بارش همراه بوده اند (ایستگاه همدیدی مهرآباد بارش قابل توجهی برای این روز گزارش داده است). در اثر خارج شدن بارش از ابر و ورود به هوای غیر اشباع زیر ابر، حرکات پایین سو ایجاد می شود که از این حرکات پایین سو می توان در حکم عاملی بازدارنده نام برد که مانع رشد لایه آمیخته در این روز شده است. شکل ۶-د سطح مقطع قائم حرکت های قائم شبیه سازی شده با مدل را نشان می دهد. با توجه به شکل، حرکات پایین سو مانع رشد لایه آمیخته و حرکات تلاطمی و جابه جایی قائم پیچک ها شده است. وجود بادهای شمال غربی (با زاویه ۳۳۰ درجه) موجب فرارفت هوای سرد به ایستگاه شده که احتمالاً این فرارفت نیز در کاهش عمق لایه آمیخته مؤثر بوده است (شکل نشان داده نشده است). عامل دیگر که می تواند در نبود رشد لایه آمیخته مؤثر باشد، چینش قائم باد افقی

است که در شکل ۷-د ارائه شده است. مطابق شکل، در ارتفاعات زیرین چینش قائم قابل توجه به چشم می خورد که به نظر می رسد این عامل نیز در جلوگیری از رشد لایه آمیخته نقش داشته است. به علاوه، شار تکانه سطحی شبیه سازی شده در این روز $0.12 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$ تخمین شده است که بسیار کمتر از مقدار میانگین ماهانه آن است $(0.53 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2})$.

بررسی نتایج مدل برای دو عمق کمینه و بیشینه در ماه فوریه، نشان می دهد که مشابه ماه اوت، عوامل متفاوتی در تعیین عمق لایه آمیخته تأثیر داشته و مقدار و علامت آنها متغیر است. در نتایج حاصل، دیده می شود که در بیشینه عمق لایه آمیخته، نبود چینش باد، فرارفت شدید گرما و حرکات های صعودی جلوی محور ناوه، نقش اساسی دارند. از سوی دیگر، در کمینه عمق لایه آمیخته در این ماه، چینش قائم شدید باد و فرارفت هوای سرد و بارش حائز اهمیت بیشتری هستند (با توجه به اینکه در مورد کمینه عمق لایه آمیخته، بارش موجود بوده که مانع شکل گیری لایه آمیخته شده است، در پژوهش های بعدی موارد دیگری که همراه با بارش نباشد، مورد بررسی قرار خواهند گرفت).

۴ نتیجه گیری

در این مقاله نتایج حاصل از شبیه سازی عمق لایه آمیخته جو شهری و تغییرات روزانه آن برای منطقه تهران در ماه های اوت و فوریه سال ۲۰۰۵ با استفاده از مدل MM5، مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا عوامل مؤثر در عمق های کمینه و بیشینه لایه آمیخته در هر یک از دو ماه، از جمله وضعیت همدیدی موجود در منطقه مورد تحقیق، فرارفت گرما، رطوبت، شارهای سطحی و چینش قائم جهت و تندی باد افقی بررسی شده است.

نتایج اجرای مدل در ماه اوت نشانگر نوسان های عمق لایه آمیخته در طول ماه است و عمق لایه مقادیری بین

عمق لایه آمیخته شده است (شکل ۶).

مقایسه نتایج به دست آمده برای دو ماه نشان می‌دهد که مقدار شارهای سطحی در ماه اوت (از فصل تابستان) تقریباً بیش از دو برابر مقدار ماه فوریه (از فصل زمستان) است که در نتیجه آن، عمق متوسط لایه در ماه اوت نیز بیش از دو برابر عمق متوسط در ماه فوریه است. همچنین از آنجا که عوامل مؤثر در نوسان‌های عمق لایه در فصل زمستان دارای تغییرات بیشتری نسبت به فصل تابستان است، نوسان‌های عمق لایه آمیخته در فصل زمستان نیز چشمگیرتر هستند.

منابع

احمدی گیوی، ف.، و ثابت قدم، س.، ۱۳۸۵، بررسی حساسیت مدل میان‌مقیاس MM5 در استفاده از طرح‌واره‌های MRF و Eta-Mellor-Yamada برای تخمین عمق لایه آمیخته جو شهری. مجموعه مقالات ششمین همایش پیش‌بینی عددی وضع هوا، ۱۰۸-۱۱۶.

- Arellano, J. & Vellenga, 2001: Observational evaluation of PBL parametrizations modeled by MM5: The Eleventh PSU/NCAR Mesoscale Model Users Workshop, 25-27 June 2001, Boulder, Colorado.
- Garratt, A. J., 1992, The atmospheric boundary layer. Cambridge University Press, 335 pp.
- Hong, S. Y., Pan, H. L., 1996, Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon. Weather. Rev.*, **124**, 2322-2339.
- Panofsky, H. A., and Dutton, J. A., 1984: Atmospheric turbulence. New Yourk, Wiley & Sons, Inc, 397 pp.
- Pino, d. & Arellano, 2004: The boundary layer Growth in an Urban Area, *Science of the total Environment*, 334 pp
- Shafran, P.C, Seaman, N.L, Gayno, G. A., 2000: Evaluation of numerical predictions of boundary layer structure during the Lake Michigan Ozone Study. *J. Appl. Meteorol.* **39** (3), 412-426.
- Stull, R. B., 2000: Meteorology for scientists and engineers. Brooks/Cole, 502 pp.
- Stull, R. B., 1988: An Introduction to boundary layer meteorology. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 670 pp.

۱۹۰۰ تا ۳۲۰۰ متر داشته که با روندی نزولی همراه است. در شارهای سطحی شبیه‌سازی شده نیز این روند نزولی وجود دارد و مطابقت نزدیکی به چشم می‌خورد. از این رو می‌توان گفت که روند کلی تغییرات لایه آمیخته مستقیماً از روند تغییرات شارهای سطحی پیروی می‌کند. مقدار شار سطحی در ماه اوت بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ وات بر متر مربع محاسبه شده که دارای نوسان قابل توجهی نیست، حال آنکه عمق لایه آمیخته دارای نوسان روزانه زیاد است. لذا نوسان‌های عمق لایه آمیخته را می‌توان به عوامل دیگر پیش‌گفته نسبت داد. از بررسی نتایج مدل، دیده می‌شود که فرارفت دما، چینش قائم باد و نوع سامانه‌های همدیدی حاکم بر منطقه مورد بررسی، به‌طور مستقیم و در همه موارد در رشد یا تضعیف لایه دخالت داشته‌اند. به‌علاوه، سرعت‌های قائم نیز می‌تواند در رشد لایه مؤثر باشد؛ به‌طوری‌که مقایسه نتایج روزهای دارای بیشترین و کمترین عمق نشان می‌دهد که مقادیر این سرعت‌ها در روزهایی که عمق لایه بیشینه بوده به‌طور قابل توجهی بیشتر از روزهای دارای عمق کمتر است.

مدل در شبیه‌سازی‌های ماه فوریه، عمق لایه آمیخته را حدود ۶۰ تا ۲۰۰۰ متر نشان می‌دهد (شکل ۹) و در طول ماه، نوسان‌های چشمگیری در مقادیر عمق لایه مشاهده می‌شود. در شبیه‌سازی شارهای سطحی در این ماه، روند صعودی وجود داشته که این روند در شبیه‌سازی عمق لایه به‌خوبی دیده نمی‌شود. مقدار شارهای سطحی بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ وات بر متر مربع است (شکل ۸) که نسبت به ماه اوت، مقادیر کمتری هستند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که کم بودن عمق لایه در این ماه عمدتاً ناشی از مقادیر کمتر شارهای سطحی است. مشابه ماه اوت، فرارفت دما، چینش قائم باد و سامانه‌های همدیدی در تغییرات عمق لایه در ماه فوریه تأثیر داشته‌اند. از سوی دیگر، کم بودن مقدار سرعت قائم شبیه‌سازی شده در این ماه و همچنین حضور سامانه‌های بارش‌زا منجر به کاهش