جغرافیا و توسعه شمارهٔ ۵۴ بهار ۱۳۹۸
وصول مقاله : ۹۶/۰۳/۳۰
تأیید نهایی : ۹۷/۰۱/۲۸
صفحات : ۱۸۴-۱۶۳

واکاوی وردایی زمانی- مکانی ارتفاع لایهٔ مرزی ایران مبتنی بر برونداد پایگاه داده مرکز پیش‌بینی میان‌مدت هواسپهر اروپایی (ECMWF)

دکتر محمود احمدی[1]*، عباسعلی داداشی‌رودباری[2]، حمزه احمدی[3]

چکیده

لایهٔ مرزی بخش کوچکی از لایهٔ ورد سپهر است که به‌دلیل فرایندهایی که در داخل آن رخ می‌دهد، برای حیات انسان حائز اهمیت است. مطالعهٔ حاضر با هدف واکاویی وردایی زمانی- مکانی ارتفاع لایهٔ مرزی (BLH) با رویکردی آماری- تحلیلی انجام شد. در این راستا از داده‌های ارتفاع لایهٔ مرزی مرکز پیش‌بینی میان‌مدت هواسپهر اروپایی (ECMWF) نسخهٔ ERA-Interim با تفکیک مکانی ۰/۱۲۵×۰/۱۲۵ درجهٔ قوسی و بازهٔ زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۵ استفاده شد. نتایج نشان داد که ارتفاع لایهٔ مرزی با زمان و مکان تغییر می‌کند و وضعیت توپوگرافی بر ارتفاع لایهٔ مرزی تأثیر جدی می‌گذارد. براساس میانگین بلندمدت، بیشینهٔ همبستگی ارتفاع لایهٔ مرزی ایران با مؤلفهٔ مکانی عرض جغرافیایی است؛ چراکه نقش این مشخصهٔ جغرافیایی با آفتاب‌گیری بسیار بالاست. ازنظر زمانی کمینه و بیشینهٔ ارتفاع لایهٔ مرزی در ایام سرد و گرم سال به‌ترتیب در ماه‌های ژانویه و ژوئن رخ می‌دهد. ازنظر آرایش مکانی، مناطقی با چشم‌انداز مرتفع و ناهموار مانند زاگرس مرتفع و نواحی مجاور دریا، دارای کمترین ضخامت لایهٔ مرزی است و مناطقی با چشم‌انداز هموار و بیابانی مانند نواحی داخلی به‌خصوص جنوب شرق و مرکز ایران، ضخامت لایهٔ مرزی در بالاترین سطح قرار دارد. تغییرات فضایی ارتفاع لایهٔ مرزی در ماه‌های سرد سال منسجم‌تر از ماه‌های گرم سال است. متناسب با تغییرات فصلی دمای هوا، بیشینهٔ ارتفاع لایهٔ مرزی در ماه‌های سرد سال در نواحی جنوب شرق ایران و در ایام گرم سال به‌خصوص ماه‌های ژوئن و ژولای، در نواحی مرکزی ایران مانند مناطق جنوب کرمان و شمال استان هرمزگان رخ می‌دهد. ساختار دمایی ایران متناسب با وضعیت جغرافیایی و توپوگرافیکی، الگوی زمانی- مکانی ارتفاع لایهٔ مرزی را مشخص می‌کند. عامل اصلی وردایی زمانی- مکانی ارتفاع لایهٔ مرزی گرمایش و سرمایش سطح زمین و مؤلفه‌های مکانی و توپوگرافیکی در سطح زمین است.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع لایهٔ مرزی (BLH)، پایگاه ECMWF، نسخهٔ ERA-Interim، ایران.

۱- دانشیار آب و هواشناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران* ma_ahmadi@sbu.ac.ir
۲- دانشجوی دکتری آب و هواشناسی شهری، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران a_dadashiroudbari@sbu.ac.ir
۳- دکتری آب و هواشناسی کشاورزی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران h.ahmadi@hsu.ac.ir

مقدمه

از اولین تنفس ما، بشر بیشترین حیات خود را در لایهٔ نزدیک سطح زمین گذرانده است. ما گرمای ناشی از خورشید روزانه و سرمای شباهنگام را احساس می‌کنیم. اینجا جایی است که فرآورده‌های کشاورزی در آن رشد می‌کنند، سازه‌ها ساخته می‌شوند و تکاپوهای تجاری شکل می‌گیرد. این بخش که به‌عنوان لایهٔ مرزی در خرد آب و هواشناسی شناخته می‌شود، فقط به‌عنوان لایه‌ای در نزدیکی سطح زمین به مانند دیگر بخش‌های شناخته‌شدهٔ هواسپهر نیست، بلکه کارایی تعیین‌کنندهٔ آن به‌عنوان پایین‌ترین لایهٔ هوا دارای اهمیت است (*Stull, 2012: 2*).

لایهٔ مرزی ازنظر چگونگی کیفیت هوا و فرایندهای هوا و آب و هواشناسی از اهمیت بالایی برخوردار است (*Seidel et al, 2010:1*). واژهٔ لایهٔ مرزی از جستار مکانیک سیالات توسط خرد هواشناسان گرفته شده است، یعنی آن دسته از پژوهش‌های که بر روی هواسپهر پایین متمرکز بوده اند. برخی از پژوهشگران توجه خود را بر پژوهش‌های آزمایشی لایهٔ مرزی و دگرگونی آن در سطح زمین متمرکز کرده‌اند. خرد هواشناس‌ها مطالب و فرایندهایی که آب‌وهوای نزدیک سطح زمین را شکل می‌دهند، مورد مطالعه قرار دادند و در مقابل هواشناسان تئوری‌های فیزیکی پایه فرایندهای کارا را بررسی کردند، اما کانون توجه آب و هواشناس‌ها بر روی کاربرد تئوری لایهٔ مرزی برای درک بهترِ مشخصه‌های سطح زمین با لایهٔ مرزی، نحوهٔ ارتباطات و درنهایت شکل‌گیری لایهٔ مرزی است (*Letzel & Raasch, 2003: 2328*).

سطح زمین، یک مرز برای قلمرو هواسپهر محسوب می‌شود. فرایندهای فرارفتی که در این مرز در ارتفاع ۱۰۰ تا ۳۰۰۰ متری هواسپهر دِگرش می‌یابند، لایه‌ای را به‌وجود می‌آورند که به لایهٔ مرزی شهرت دارد. در این منطقه چرخه‌های شبانه‌روزی و چرخندهای عبوری،سازوکارهای واداشتی تعیین‌کننده محسوب می‌شوند (*Stull, 2012: 19*).

به شکل غیرمستقیم کل وردسپهر می‌تواند در پاسخ به شناسه‌های سطح دگرگون شود، اما این واکنش‌ها کمابیش به‌آرامی در بیرون از لایهٔ مرزی رخ می‌دهد؛ ازاین‌رو تعریف ما از لایهٔ مرزی پیمانه‌های زمانی حدود یک ساعت را شامل می‌شود. فرایندهای آشفتگی با فراوانی رخداد در نزدیک سطح زمین، یکی از مشخصه‌هایی است که موجب پراکنده‌شدن لایهٔ مرزی از دیگر بخش‌های هواسپهر می‌شود (*Stull, 2012: 2*).

ارتفاع لایهٔ مرزی، یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های ترازمندی گستردگی آمیزش آلاینده‌ها و کیفیت هوای لایه نزدیک به سطح زمین است. لایهٔ مرزی به‌عنوان لایه‌ای از سیال (آب یا گاز) تعریف می‌شود که بلافاصله در مجاورت یک سطح مادی قرار دارد و تبادل معنی‌دار تکانه، گرما یا جرم بین سطح و سیال رخ می‌دهد. لایهٔ مرزی سیاره‌ای به‌علت اثر متقابل بین هواسپهر و سطح زیر آن (زمین یا آب) در مقیاس‌های زمانی چند ساعت تا یک روز تشکیل می‌شود (*فلاح قالهری، ۱۳۹۳: ۵*). پس بر این اساس، لایهٔ مرزی هواسپهر به پایین‌ترین لایهٔ منطقه‌ای از هواسپهر اشاره دارد که در آن‌جریان به‌شدت تحت‌کارایی مشخصه‌های سطح زمین قرار می‌گیرد. کارایی لایهٔ مرزی برای شرایط آب و هوایی از آنچنان اهمیتی برخوردار است که اخیراً مدل‌های عددی شامل یک لایهٔ مرزی هستند (*Jiang et al, 2006:617; 2008; 592; Smith, 2007: 595; Smith & Skyllingstad, 2009:3147*)، اما این مدل‌ها به شکل بنیادین شکل اصلاح‌شدهٔ تئوری اسکورور[1] (۱۹۴۹) می‌باشند که در آن لایهٔ مرزی به‌عنوان یک سطح اسفنج‌مانند عمل می‌کند.

1-Scorer

نوسانات جغرافیایی می‌توانند جریان لایهٔ مرزی را دگرگون کنند و در برخی از موارد می توانند چرخش‌هایی در ارتباط با چرخه‌های گرمایی شبانه‌روزی تولید کنند. همهٔ جریان‌ها و تکانه‌های متأثر از شرایط جغرافیایی هموار و ناهموار هستند. بادهای سطح زمین، بادهای کوه به درّه و برعکس و نسیم ها همگی نشان‌دهندهٔ اثرپذیری آن‌ها از شرایط جغرافیایی است.

شرایط جغرافیایی هر منطقه با دگرگونی‌هایی که وضعیت میزان تابش دریافتی و برگشتی ازطریق سطوح ناهموار و زاویهٔ تابش را تعیین کی کند موجب دگرگونی در چرخهٔ گرمایش و سرمایشی دمایی می‌شود و به تناسب آن ارتفاع لایهٔ مرزی را در زمان و فضا تغییر می‌دهند (*Stull, 2012: 6*). ساختار و ارتفاع لایهٔ مرزی سیاره‌ای یا هواسپهری متأثر از سطح زمین در مقیاس محلی و چشم‌انداز ناهموار و هموار سطح زمین است. لایهٔ مرزی شدیداً از روز به شب و در وضعیت‌های میان‌مقیاس و همدید تغییر پیدا می‌کند (*Zhang et al, 2013:10071*). طیف وسیعی از مطالعات، لایهٔ مرزی شهر را کانون توجه خود قرار داده‌اند. در مطالعات مربوط به لایهٔ مرزی شهر، مدل‌های توازن انرژی سطحی شهر در مدل‌های هواسپهری بزرگ مقیاس اجرا شده‌اند تا مشخصه‌های آب و هوای محلی ازقبیل جزیرهٔ حرارتی شهر را شبیه‌سازی کنند (*Baklanov et al, 2006: 524*). با این وجود، بیشترین مطالعات به دوره‌های نسبتاً کوتاه محدود شده‌اند تا روی اعتبار و دستیابی به بینش فزاینده نسبت‌به فرایندهای مربوطه تمرکز کنند (*Sarkar, A & De Ridder, 2011:511; Chemel & Sokhi, 2012: 65; Wouters et al, 2013: 8525*).

در طی دهه‌های گذشته، طرحواره‌های عددی با پیچیدگی مختلف توسعه یافته است تا فیزیک سطحی شهر را در مدل‌های هواسپهری نشان دهند. شبیه‌سازی‌ها در پیمانه‌های شهری به تفکیک افقی یک کیلومتر یا بهتر را نیاز دارد و در این تفکیک مکانی، مدل‌های بزرگ‌پیمانه به‌دلیل اینکه محدودیت‌های ثبات عددی بر افزایش زمان تحمیل‌شده، تاحد زیادی کُند می‌شود. دست‌یافتن به پیوستگی مدل‌های طویل مشکل است، مگر اینکه منابع سنجیده‌شدهٔ وسیع موجود باشد. این محدودیت به‌طور جدی مانع استفاده از مدل‌های آب و هوایی بزرگ‌پیمانه در ایجاد پیش‌بینی‌های آب و هوایی بلندمدت شده است؛ به‌خصوص در کشورهایی همچون ایران که تاکنون لایهٔ مرزی آن مورد مطالعه قرار نگرفته است؛ بنابراین کارایی مطالعهٔ بلندمدت و بزرگ‌پیمانه از لایهٔ مرزی می‌تواند رهگشای مسائل بسیاری باشد. با توجه به اهمیت مطالعهٔ لایهٔ مرزی، تاکنون هیچ پژوهشی در کشور انجام نشده است؛ ولی با این حال پژوهش‌های بسیاری در سطح جهان لایهٔ مرزی را مورد مطالعه قرار دادند که به برخی از آن‌ها اشاره خواهد شد.

پژوهش‌هایی که لایهٔ مرزی را مورد توجه قرار داده‌اند می‌توان در دو دستهٔ کلی قرار داد: نخست آن دسته از پژوهش‌هایی که لایهٔ مرزی را در سطح شهری یا پیمونگاه مورد مطالعه قرار داده‌اند و دوم، پژوهش‌های که وردایی زمانی- مکانی لایهٔ مرزی را بررسی کرده‌اند. پژوهش حاضر به‌دلیل روش‌شناسی مطالعات مرورشده در دستهٔ دوم قرار می‌گیرد؛ اما به‌دلیل اهمیت لایهٔ مرزی در همهٔ سطوح مطالعاتی در مرور منابع به مطالعات دستهٔ اول نیز اشاره خواهد شد. دستهٔ اول: ون‌دام و همکاران (۲۰۱۳) در ارزیابی ارتفاع لایهٔ مرزی پیمونگاه سامیت[1] در گریلند به این نتیجه رسیدند که ارتفاع لایهٔ مرزی در این منطقه از گریلند، از گازهای سطوح پایین تأثیر قابل‌توجهی می‌پذیرد (*Van Dam et al, 2013:6575*).

1-Summit

دو و همکــاران[1] (۲۰۱۳) در مطالعــه‌ای بــر روی ارتباط ارتفاع لایهٔ مرزی و غلظـت ذرات معلـق (PM) در شهر شیان[2] چـین، بـا محاسـبهٔ کمینـه و بیشـینهٔ ارتفاع لایهٔ مرزی و دگرگونی روزانـه، فصـلی و سـالانه آن با سه رویکرد طـی ۲۰۰۷ تـا ۲۰۰۹ انجـام دادنـد. نتایج پژوهش آنان نشان داد که ارتفاع لایـهٔ مـرزی بـا غلظت ذرات معلـق ($PM_{2.5}$ و PM_{10}) در مقیـاس‌هـای زمانی سالانه و فصلی همبستگی منفـی دارد و ارتفـاع لایهٔ مرزی تأثیر مهمی در کیفیت هوا دارد (*Du et al, 2013:1598*). بررسـی پیشـرفت‌هـای حاصـل‌شـده در درک لایهٔ مرزی شـهری مطالعـه‌ای اسـت کـه بـارلو[3] (۲۰۱۴) بدان پرداخته اسـت. نتـایج بررسـی‌هـای وی نشـان داده اسـت کـه نتـایج حاصـل از مـدل‌هـای کلاسیک، پیشرفت تئوری در زمینهٔ لایهٔ مرزی شهری پیشرفت حاصل شده و اگرچه فشار برای کاربرد نتـایج به‌دست‌آمده در طراحی شـهری پایـدار و سـالم وجـود دارد، نباید درک تئوری جریانات لایهٔ مـرزی را نادیـده انگاشت (*Barlow, 2014:216*).

نقش دینامیک لایهٔ مرزی در آلودگی شدید هـوای پاریس نیز پژوهشـی اسـت کـه دوپونـت و همکـاران[4] (۲۰۱۶) بدان اهتمام ورزیده‌اند. در نتایج این پـژوهش مشخص شده که توسعهٔ عمودی لایهٔ مرزی بـا چرخـهٔ روزانهٔ $PM_{2.5}$ همبستگی معکوس دارد و دِگرش آن در بزرگی و طی زمان یکنواخت است (*Dupont et al, 2016:571*).

دستهٔ دوم: وان‌انن و تکشاران[5] (۲۰۱۳) در مطالعهٔ ارتفاع لایـهٔ مـرزی سـیاره‌ای بـا اسـتفاده از داده‌هـای ERA-Interim در سطح جهانی به این نتیجه رسیدند که ارتفاع لایهٔ مرزی در سواحل غربی که ابرهای رقیق دارند، کم‌ارتفاع و برعکس در آب و هوای گـرم‌تـر و در مسـیر بادهـای تجـارتی، ارتفـاع لایـهٔ مـرزی رشـد قابـل‌تـوجهی دارد. ارتفـاع لایـهٔ مـرزی در طـول روز می‌تواند به بیش از ۳ کیلومتر نیـز در منـاطق بیابـانی برسد، اگرچه بخـش قابـل تـوجهی از ایـن منـاطق در منطقهٔ ITCZ قرار گرفتـه‌انـد. همچنـین لایـهٔ مـرزی دریایی نیز پایدارتر از لایهٔ مرزی خشکی است (*Von Engeln & Teixeira, 2013: 2356*).

هم‌سنجی کاربرد داده‌های CALIPSO[6] و داده‌های باز تحلیـل‌شـدهٔ ECMWF (ERA-Interim) بـر فـراز چین نیز نشان داد (*Liu et al, 2015: 103*) که برآورد عمق لایهٔ مرزی در شرایط متفاوت پوشش زمین بیش از اقیـانوس و سـطح جنگـل بـیش از ERA-Interim اســت؛ در حــالی کــه در بهــار و تابســتان، عمــق به‌دست‌آمده از ERA-Interim بـر فـراز چمـن‌زارهـا و اراضی بایر (لخت)[7] بیش از CALIPSO است. گـائو[8] و همکاران (۲۰۱۶) ارتفاع لایهٔ مـرزی را بـا اسـتفاده از داده‌های رادیوسوند و ECMWF بر فراز چین مطالعـه کردند؛ نتایج آن‌ها نشان داد که داده‌های رادیوسـوند و ERA-Interim همخوانی دارند، ارتفاع لایـهٔ مـرزی در بهار و تابستان بیش از پاییز و زمستان است و به‌دلیـل تأثیر فشار، سرعت باد، دما و ابر بر توسعهٔ لایهٔ مـرزی، هواشناسی نقش مهمی در فرایندهای لایهٔ مـرزی ایفـا می‌کند (*Guo et al, 2016: 13*).

به‌طور معمول وقتی بر روی کیفیت هـوا، وضـعیت آلودگی و آلاینده‌های هوا و مسافرت‌های هوایی تمرکز می‌شود، به‌نحوی موضـوع لایـهٔ مـرزی نیـز بـه میـان می‌آید؛ اما در واقع این لایه به‌عنوان بخشی تأثیرپـذیر و تأثیرگذار بر حیات بشری بسیار حائز اهمیـت اسـت. خیلی از رخدادهای کارساز در لایهٔ مرزی کـه مـرتبط بـا حیـات بشـر اسـت، رخ مـی‌دهـد. لایـهٔ مـرزی بـا سازوکاری ترکیبی، بـا مخلـوط‌کـردن و تبـادلات هـوا به‌عنوان یک سیال، موجبـات حیـات بشـری را فـراهم می‌سازد. هـر آنچـه کـه در نزدیـک سـطح زمـین رخ

1-Du
2-Xi'an
3-Barlow
4-Dupont et al
5-Von Engeln &Teixeira

6-Cloud–Aerosol Lidar&Infrared Pathfinder Satellite Observation
7-Bare Land
8-Guo et al

می‌دهد، در برنامه‌ریزها و کاربردهای آب و هواشناسی بیشتر اهمیت دارد. مطالعات ارتفاع لایهٔ مرزی برای شناخت بیشتر این بخش از هواسپهر برای کاربردهای آب و هواشناسی در زمینهٔ مدیریت آلودگی‌های شهری، کاربری زمین و آسایش بشری کاربرد فراوانی دارد. مطالعهٔ حاضر با رهیاتی آماری- تحلیلی سعی دارد دگرگونی زمانی- مکانی ارتفاع لایهٔ مرزی را در گسترهٔ ایران براساس برونداد پایگاه دادهٔ مرکز پیش‌بینی میان‌مدت هواسپهر اروپایی (ECMWF) نسخهٔERA Interim مورد واکاوی قرار دهد.

روش تحقیق

در این پژوهش به‌منظور ارزیابی ارتفاع لایهٔ مرزی (BLH[1]) بر فراز ایران، از داده‌های مرکز پیش‌بینی میان‌مدت هواسپهر اروپایی (ECMWF[2]) نسخهٔ ERA-Interim استفاده شده است. داده‌های این پایگاه از سال ۱۹۷۹ شروع شده که هر ماه کامل‌تر می‌شود، به‌طوری که در زمان نگارش این پژوهش تا ژانویهٔ ۲۰۱۷ آن عرضه و آمادهٔ بارگیری شده است. مرکز پیش‌بینی میان‌مدت هواسپهر اروپا، سازمان بین‌المللی مستقلی است که با عضویت کشورهای مختلف جهان شکل گرفته است. داده‌های باز واکاوی‌شدهٔ مرکز ECMWF نتیجهٔ برهمکنش پیچیده‌ای میان داده‌های موجود و نتایج الگوهای هواسپهری بوده که به‌صورت داده‌های یاخته‌ای عرضه شده است *(دارند و زند کریمی، ۱۳۹۴:۶۵۵)*.

نسخهٔ ERA-Interim به‌روزترین نسخهٔ این پایگاه داده است. این نسخه درحقیقت درجهت بهبود ارتقاء نسخهٔ ERA-40 این مجموعه بوده که تولید آن از سال ۲۰۰۶ آغاز شده است. سال آغازین این پایگاه، ۱۹۷۹ بوده که به شکل مستمر درحال به‌روزرسانی است.

مهم‌ترین اهداف این پروژه نیز چرخهٔ هیدرولوژیکی، گردش‌های هواسپهری پوش‌سپهر و کاهش مقدار اریب و خطای نسخه‌های پیشین بوده است *(دارند و زند کریمی، ۱۳۹۴: ۶۵۵)*.

با توجه به حجم بالا و پیچیدگی محاسباتی ارتفاع لایهٔ مرزی از یک طرف و همچنین از آنجا که پژوهش حاضر از داده‌های محاسبه‌شدهٔ این پایگاه استفاده کرده است، از ارائهٔ این مطالب به‌دلیل کاهش حجم پژوهش پرهیز شده است، ازاین‌رو آن دسته از پژوهشگرانی که علاقه‌مند به نحوهٔ محاسباتی این روش هستند، می‌توانند به پژوهش‌های (*Ahlgrimm & Randall, 2006:998; Köhler et al, 2011:43; Ahlgrimm & Forbes, 2014:668*) مراجعه کنند.

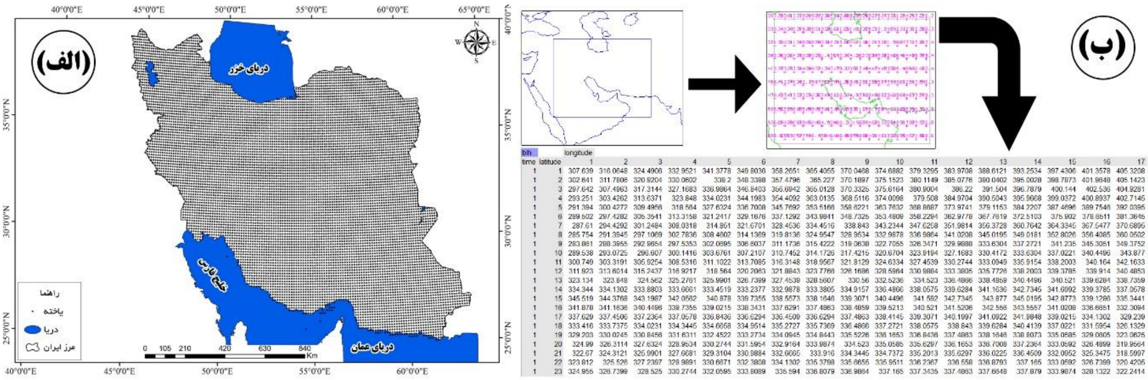
همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، به‌منظور واکاوی ارتفاع لایهٔ مرزی از نسخهٔ ERA-Interim پایگاه دادهٔ ECMWF استفاده شده است. داده‌های BLH برای محدودهٔ ایران به شکل ماهیانه از سال ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۵ با تفکیک مکانی ۰/۱۲۵×۰/۱۲۵ درجه قوسی از تارنمای پایگاه مربوط با فرمت *NC*. بارگیری شد. در ادامه با استفاده از نرم‌افزار NcDump داده‌های مربوط رمزگشایی شدند که آرایه‌ای به ابعاد ۹۹۶۶×۴۴۴ به‌دست آمده است (شکل ۱-ب). در این آرایه، ۹۹۶۶ معرف یاخته‌های ۰/۱۲۵×۰/۱۲۵ درجه قوسی و ۴۴۴ نمایندهٔ ماه‌های سال هستند (جدول و شکل ۱- الف). درنهایت داده‌های ارتفاع لایهٔ مرزی با استفاده از روش زمین‌آمار کریجینگ (معمولی) به‌واسطهٔ مقدار کمترین مقدار مربع خطا در محیط نرم‌افزار ARCGIS پهنه‌بندی شدند.

1-Boundary Layer Height (BLH)
2-European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)

جدول ۱ : مشخصات داده‌های مورد استفاده از در پژوهش

ردیف	نام محصول	نسخه مورد استفادهٔ پایگاه	دورهٔ زمانی	تفکیک مکانی (درجهٔ قوسی)
۱	ارتفاع لایهٔ مرزی (BLH)	ERA-Interim	۱۹۷۹-۲۰۱۵	۰/۱۲۵×۰/۱۲۵

ماخذ:مطالعات نگارندگان، ۱۳۹۶



شکل ۱: الف) یاخته‌های ۰/۱۲۵×۰/۱۲۵ درجهٔ قوسی مرکز پیش‌بینی میان‌مدت هواسپهر اروپایی (ECMWF) نسخهٔ ERA-Interim؛ ب) نمونه‌ای از مقادیر رمزگشایی‌شده و مراحل آن به شکل شماتیک

تهیه و ترسیم : مطالعات نگارندگان، ۱۳۹۶

کنترل کیفی داده‌های باز واکاوی‌شدهٔ پایگاه ECMWF نسخهٔ ERA-Interim توسط سیمونز و همکاران[1] (۲۰۱۰) انجام شده است *(Simmons et al, 2010: 6)*. در کشور نیز صحت داده‌های بارش این پایگاه توسط دارند و زند کریمی (۱۳۹۴) انجام شده است *(دارند و زندکریمی، ۱۳۹۴: ۶۶۴)*. صحت داده‌های ارتفاع لایهٔ مرزی، پیش‌تر توسط وان انن و تکشاران[2] (۲۰۱۳) که این پارامتر را در سطح جهانی مورد مطالعه قرار دادند، مورد تأیید قرار گرفته است *(Von Engeln & Teixeira, 2013: 6581)*. آنان با استفاده از داده‌های اخذ شدهٔ رادیوسوند و AWI[3] از عرض‌های جغرافیایی مختلف صحت این داده‌ها را مورد تأیید قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که ارتفاع لایهٔ مرزی ارائه‌شده در پایگاه ECMWF نسخهٔ ERA-Interim، با ارتفاع لایهٔ مرزی محاسبه‌شده از رادیو سوند تنها چند متر اختلاف دارد. همچنین همبستگی بین داده‌های پایگاه AWI با ECMWF بالای ۰/۸۰ به‌دست آمده است که مبیّن دقت مناسب داده‌های ECMWF است.

داده‌های AWI که در یک مطالعهٔ مشابه *Von (Engeln & Teixeira, 2004: 1)* برای داده‌های نسخهٔ ERA-40 پایگاه ECMWF انجام شده، نتایج مطالعه وان انن و تکشاران (۲۰۱۳) را تأیید می‌کند. صحت‌سنجی داده‌های ارتفاع لایهٔ مرزی به‌دلیل توسعهٔ روزانهٔ آن نیز در مقدار میانگین ماهیانه برای مناطق خشک و کوهستانی همچون ایران شاید کمی مناقشه‌برانگیز باشد، به‌طوری که مطالعات بسیاری دگرگونی خطای نمونه‌گیری را بسته به زمان و مکان محلی متفاوت دانسته‌اند. مقایسهٔ ارتفاع لایهٔ مرزی مبتنی‌بر برونداد پایگاه ECMWF با مطالعات لیو و لیانگ[4] (۲۰۱۰) که با استفاده از داده‌های طولانی‌مدت برنامهٔ اندازه‌گیری تابش هواسپهری (ARM[5]) برای مقاطع زمانی سه ساعته به‌دست آورده‌اند، نشان داده است که ارتفاع لایهٔ مرزی پایگاه ECMWF یک عدم‌قطعیت ۶درصدی را نسبت‌به داده‌های مشاهداتی دارد *(Liu & Liang, 2010: 5806)*؛ بنابراین مبتنی‌بر پژوهش‌های انجام‌شده در

1-Simmons et al
2-Von Engeln &Teixeira
3-Alfred Wegener Institute (AWI)
4-Liu and Liang
5-Atmospheric Radiation Measurement Program (ARM)

سطح جهانی دقت داده‌های ارتفاع لایـهٔ مـرزی پایگـاه ECMWF نسخهٔ ERA-Interim در سطح قابـل‌قبـولی است و نتایج آن را می‌توان برای مطالعات منطقه‌ای با اطمینان بالایی به‌کار بست.

نتایج و بحث

مشخصه‌های رایج آماری بـرای ارتفـاع لایـهٔ مـرزی ایران در جدول (۲) ارائه شده اسـت. بیشـینهٔ میـانگین ارتفاع لایهٔ مرزی در ماه ژوئن و کمینـهٔ آن در دسـامبر اتفاق می‌افتد. ژانویه دارای کمینهٔ ارتفاع لایهٔ مـرزی در فصل زمستان با متوسط ۴۰۳/۲۷ متر اسـت. پـراکنش نگار ژانویه که به‌عنوان نمایندهٔ فصل زمستان در شـکل (۲-الف) ارائه شده، به‌خوبی نمایـانگر ایـن امـر اسـت و بخش اعظم یاخته‌های ایران دارای ارتفاع بین ۲۵۰ تـا ۶۰۰ متر در کشور هستند. چـارک اول و سـوم کـه در جدول نیز ارائه شده است، همین امر را تأیید می‌کنند؛ به‌طوری که در ژانویه تنها یک‌چهارم از مساحت ایـران، ارتفاع لایهٔ مرزیشـان کمتـر از ۲۹۶ متـر اسـت. از مـاه فوریه به بعد میانگین ارتفاع لایهٔ مـرزی ایـران افـزایش می‌یابد، به‌طـوری‌کـه در مـاه مـارس بـه ۷۸۸/۶۶ متـر می‌رسد که نسبت‌به میانگین فصل زمستان، ۲۰۵ متـر افزوده شده است. کشیدگی تمام ماه‌های فصل زمستان منفی است، چون که هرچه به انتهای فصل نزدیـک‌تـر می‌شویم، بر مقدار آن نیز افزوده خواهد شد، کشـیدگی منفـی گویـای کشـیدگی بیشـتر و توزیـع همـوار داده‌هاست. چولگی همهٔ مـاه‌هـای فصـل زمسـتان نیـز منفی است و با نزدیک‌تر شدن بـه انتهـای فصـل، ایـن مقدار نیز کاهش می‌یابد. چولگی مثبت به‌خوبی نشـان می‌دهد که مناطق با ارتفاع لایهٔ مـرزی، بیشـینهٔ سـهم کمتری را از توزیع آماری ارتفاع لایهٔ مرزی در کشور را دارند. مهم‌ترین عاملی که در تکوین لایهٔ مرزی دخالت دارد، تفاوت دمای هوا و سطح زمین اسـت؛ ازایـن‌رو در فصل زمستان که دمـای سـطح زمـین بـه‌خصـوص در شب‌هنگام سردتر از دمای هواست، لایـهٔ مـرزی پایـدار تشکیل می‌شود. از آنجا که لایهٔ مرزی‌های پایدار بسیار پیچیده هستند، این احتمال بسیار قوی خواهد بود کـه تلاطم دوره‌ای باشد و به‌تبع آن نیز پیوند هوا با سطح زمین نیز بسیار ضعیف شود. از طرف دیگر، بـا توجـه به شکل‌شناسی پیچیده و جهـت‌گیـری دامنـه‌هـا در ایران، در لایهٔ مرزی پایدار دما با دو الگـو خـودنمـایی خواهد کرد؛ در صورت اول، در دو طـرف دامنـه‌هـای البـرز و زاگـرس مـی‌تـوان شـاهد آن بـود کـه بادهـا کوهستانی هستند؛ چراکه هوای سرد به‌سـمت پـایین دامنه‌ها می‌لغزند. از طرف دیگر اگر لایهٔ مرزی پایـدار تلاطم بی‌وقفه و سطح زمین صاف و باد خفیف باشـد، باید شاهد شـکل‌گیـری نیمـرخ دمـای بـالقوهٔ تقریبـاً پایدار باشیم که شکل‌گیری این پدیده در دشـت‌هـای داخلی دور از انتظار نخواهد بود.

در دورهٔ گرم سال به‌دلیل اسـتقرار پرفشـار آزور و به تعبیت از آن گرمایش بی‌دررو از یک سو و پایداری هوا و افزایش موج‌های کوتاه تابشـی، دریـافتی دمـای نسبی ایران به‌تدریج افزایش مـی‌یابـد. بـه‌طـوری کـه میانگین ارتفاع لایهٔ مرزی ایران در آوریـل بـه ۱۱۲۴ متر و در ماه مِی به ۱۳۸۶ متر و ژوئن به اوج خود بـا ۱۴۳۶ متر خواهد رسید. کمینـهٔ ارتفـاع لایـهٔ مـرزی ماه‌های می و ژوئن در فصل بهـار کمتـر از ۱۰۰ متـر خواهـد بـود کـه بخـش اعظـم ایـن یاختـه‌هـا در پسکرانه‌های خلیج فارس قرار دارنـد. بیشـینهٔ ارتفـاع لایهٔ مرزی ایران نیز در بهار رخ می‌دهد، به‌طوری کـه ژوئن با میانگین ارتفاع ۱۴۳۶/۴۰ متر، بیشینهٔ ارتفـاع لایهٔ مرزی را دارد. ارتفاع لایهٔ مرزی در هـر سـه مـاه فصـل بهـار و همچنـین در همـهٔ مـاه‌هـای سـال در جنوب‌شرق ایران، بیشینه خواهد بود. همان‌طـور کـه پراکنش‌نگار ماه ژوئن به‌عنوان نمایندهٔ فصل بهار آمده است (۲-ب)، بخش اعظم یاختـه‌هـای ایـران، ارتفـاع لایهٔ مـرزی بـالایی را بـرای ایـن مـاه از سـال دارنـد؛ به‌طوری که تنها یـک چهـارم از مسـاحت کـل ایـران ارتفـاع لایـهٔ مـرزی کمتـر از ۱۲۴۲ متـری خواهنـد داشت، بیشینهٔ ارتفاع لایهٔ مرزی فصل بهار ۱۶۹۱ متر در ماه مِی رخ می‌دهد. همان‌طور که در پراکنش‌نگـار نمایندهٔ فصل به‌روشنی آمده است، تنهـا کمتـر از ۴۰

یاخته ارتفاع لایۀ مرزی آن‌ها کمتر از ۵۰۰ متـر اسـت که بخش اعظم آن‌ها در کرانه‌هـای خلـیج فـارس قـرار دارند. چولگی و کشیدگی تمامی ماه‌های فصل بهار نیـز منفی خواهد بود و با گرم‌تر شدن هوا و افـزایش دمـای سطح زمین، شاهد افزایش دامنۀ تغییـرات ارتفـاع لایـۀ مرزی در کشور خواهیم بود، به‌طوری که بیشینۀ ارتفاع لایۀ مرزی ایران نیز در ماه ژوئن بـا ۱۹۸۵ متـر اتفـاق می‌افتد و مسلّم است که بیشینۀ دامنۀ تغییرات بر روی نواحی بیابانی رخ می‌دهد؛ بنـابراین طبیعـی اسـت کـه مناطق کویری داخلـی و جنـوب شـرق ایـران بیشـینۀ دامنۀ تغییرات درون‌سالی، ارتفاع لایۀ مـرزی را داشـته باشند. درخصوص لایۀ مـرزی بایـد توجـه داشـت کـه تشکیل لایۀ مرزی وابسته بـه پایـداری ایستاسـت کـه طبیعتاً نمیرخ‌هـای دمـا و بـاد نیـز بـه همـین کمّیـت وابستگی دارنـد و چـون گرمـایش و سـرمایش تابشـی دارای چرخـۀ درون‌سـالی و در مقیـاس خردتـر روزانـه است؛ ازاین‌رو می‌توان به این نتیجه رسید که پایـداری ایستا در لایۀ مرزی نیز دارای چرخه‌هایی بـا دوره‌هـای منظم است.

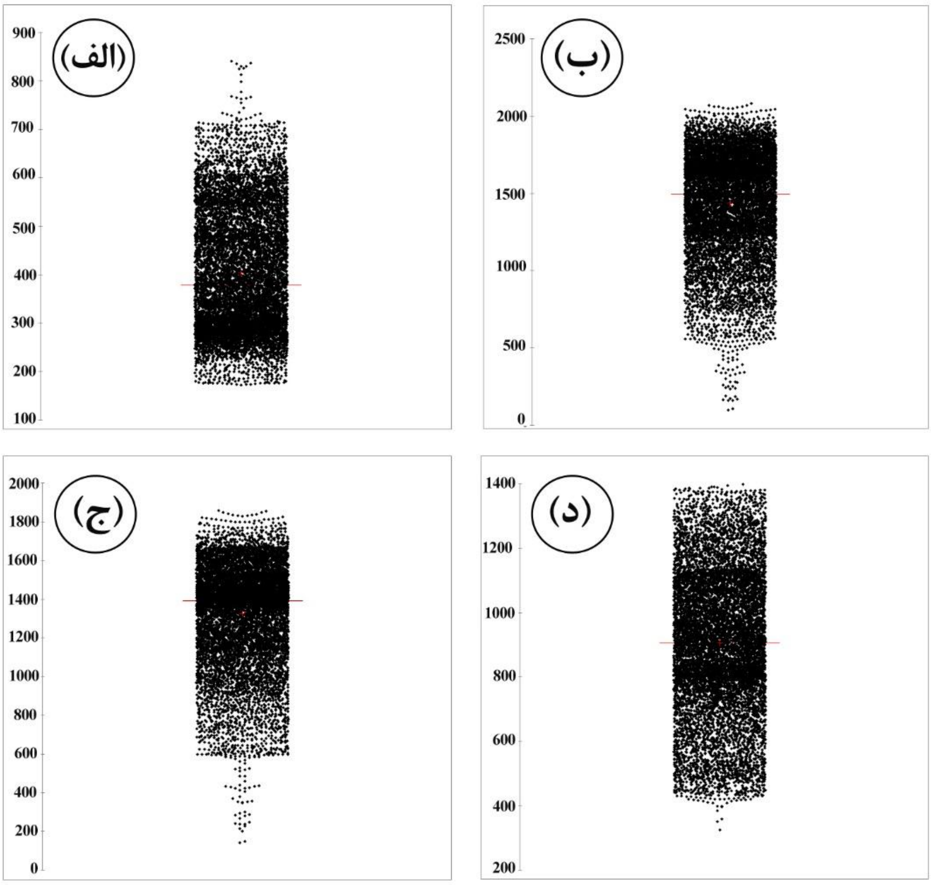
میانگین ارتفاع لایۀ مرزی ایران در فصـل تابسـتان به‌طور متوسـط، ۱۲۸۰ متـر اسـت کـه بیشـینۀ آن در فصل ژولای با ۱۳۸۸ متر و کمینۀ آن با ۱۱۲۶ متـر در سپتامبر اتفاق می‌افتد. دامنۀ تغییرات ارتفاع لایۀ مرزی در همۀ ماه‌های فصل تابستان بیش از ۱۴۰۰ متر است. انحراف معیار نمایندۀ خوبی برای معدل انحرافات فردی از میـانگین اسـت. همـان طـور کـه در جـدول (۲) مشخص‌شده است، با کاهش میانگین ارتفاع لایۀ مرزی در فصل تابستان، مقدار انحـراف از معیـار نیـز کـاهش یافته است. در همۀ ماه‌های فصل تابستان همانند سایر ماه‌های سال، ارتفاع لایۀ مرزی دارای یک توزیع چولـه است که ایـن امـر مـی‌توانـد از منطبـق‌نبـودن مقـادیر میانگین، میانه و مد باشد. چولگی همۀ مـاه‌هـای سـال به‌همراه کشیدگی ماه سـپتامبر مقـدار منفـی را نشـان داده است که پیش‌تر نیـز مـورد بحـث و بررسـی قـرار گرفته‌اند. پراکنش نگار ماه آگوست به‌عنـوان نماینـدۀ فصـل تابسـتان در شـکل (۲-ج) ارائـه شـده اسـت. همان‌طور که مشخص شده، بخش اعظم مناطق ایران ارتفاع لایۀ مرزی آن‌ها بین ۶۰۰ تا ۱۸۰۰ متـر اسـت که در این بین مناطق با ارتفاع ۱۰۰۰ تـا ۱۷۰۰ متـر از فراوانی بیشتری برخوردار می‌باشند. سـه چهـارم از مساحت کل ایران ارتفاع لایـۀ مـرزی آن‌هـا بـیش از ۱۰۰۰ متر است. چارک سوم ارتفاع لایۀ مرزی ایـران در هیچ‌یک از ماه‌های فصل تابسـتان کمتـر از ۱۲۰۰ متر رخ نخواهد داد. نکتۀ قابل‌توجه درخصوص کمینه و بیشینۀ ارتفاع لایۀ مرزی در فصل تابستان است کـه کمینه و بیشینۀ ارتفاع لایۀ مـرزی در مـاه ژولای رخ داده است.

با شروع فصل پاییز ارتفاع لایـۀ مـرزی ایـران نیـز شروع به مقدار کاهش می‌کند، به‌طوری کـه میـانگین ارتفاع لایۀ مرزی در اکتبر ۹۰۵ متر، نوامبر ۵۸۲ متـر و دسامبر ۳۹۰ متر مـی‌رسـد. دامنـۀ تغییـرات فصـل پاییز به کمترین مقدار در بین فصول خواهـد رسـید، به‌گونه‌ای که دسامبر با ۲۵۱ متر کمینۀ مقدار دامنـۀ تغییرات لایۀ مرزی را همانند میـانگین آن در کشـور دارد. توزیع ارتفاع لایۀ مـرزی در فصـل پـاییز تقریبـاً هموار اسـت کـه بـه‌خـوبی مـی‌تـوان آن را از مقـدار کشیدگی تشـخیص داد. بـه‌غیـر از مـاه اکتبـر، سـایر ماه‌های سال، بیشینۀ ارتفاع لایۀ مرزی آن‌ها کمتـر از ۱۰۰۰ متر است. همچنین کمینۀ ارتفاع لایـۀ مـرزی در هیچ‌یک از ماه‌های سال بیشتر از ۳۲۵ متر نخواهد شد. پراکنش‌نگار ماه اکتبـر بـه‌عنـوان نماینـدۀ فصـل پـاییز (شـکل ۲-د) نشـان از یـک نظـم نسـبی و یک‌دستی ارتفاع لایۀ مرزی در کشور دارد و تنها سـه یاخته ارتفاع لایۀ مرزی آن‌ها کمتر از ۴۰۰ متر است. بیشینۀ یاخته‌های مورد مطالعه در ایـن مـاه از سـال، ارتفاع لایۀ مرزی آن‌ها بین ۸۰۰ تا ۱۱۰۰ متر اسـت. سایر ویژگی‌های آماری به تفصـیل در جـدول شـمارۀ (۲) ارائه شده است.

جدول ۲: مشخصات آماری میانگین ارتفاع لایهٔ مرزی ایران مبتنی‌بر برونداد پایگاه دادهٔ مرکز پیش‌بینی میان‌مدت هواسپهر اروپایی (ECMWF) نسخهٔ ERA Interim (متر)

مشخصه‌های آماری		ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن
نمایه‌های مرکزی	میانگین	۴۰۳/۲۷	۵۵۷/۰۹	۷۸۸/۶۶	۱۱۲۴/۹۵	۱۳۸۶/۳۴	۱۴۳۶/۴۰
	میانه	۳۷۸/۵۸	۵۳۸/۹۲	۷۷۴/۷۵	۱۱۴۱/۱۵	۱۴۳۶/۲۹	۱۴۹۴/۸۳
	مد	۲۷۶/۶۶	۳۵۳/۳۹	۶۳۲/۸۲	۷۴۱/۵۰	۱۲۷۳/۷۹	۷۶۴/۱۲
نمایه‌های پراکندگی	دامنهٔ تغییرات	۶۶۸/۳۹	۶۲۸/۵۷	۹۷۵/۷۶	۱۶۲۲/۰۳	۱۹۲۵/۸۱	۱۹۸۵/۴۸
	واریانس	۱۵۴۳۹/۴۱	۲۶۹۵۶/۶۳	۴۷۴۰۱/۷۰	۹۷۱۳۲/۹۵	۱۲۶۰۵۰/۱۲	۱۰۷۳۵۵/۹۸
	انحراف معیار	۱۲۴/۲۶	۱۶۴/۱۸	۲۱۷/۷۲	۳۱۱/۶۶	۳۵۵/۰۴	۳۲۷/۶۵
نمایه‌های شکل توزیع	کشیدگی	-۰/۷۴	-۱/۳۲	-۱/۳۵	-۱/۱۹	-۰/۶۰	۰/۰۹
	چولگی	۰/۴۸	۰/۱۷	۰/۰۵	-۰/۰۸	-۰/۴۹	-۰/۷۵
آستانه‌ها	چارک اول	۲۹۶/۷۰	۴۰۷/۹۹	۵۹۱/۵۱	۸۳۴/۷۲	۱۱۲۴/۴۶	۱۲۴۲/۳۵
	چارک سوم	۵۰۰/۲۲	۷۱۲/۷۱	۱۰۰۳/۹۱	۱۴۱۳/۹۵	۱۶۹۱/۰۳	۱۶۸۷/۵۰
کران بالا و پایین	بیشینه	۸۴۱/۰۹	۸۶۱/۳۷	۱۱۹۱/۴۱	۱۷۴۱/۷۴	۲۰۰۵/۳۷	۲۰۸۳/۱۵
	کمینه	۱۷۲/۶۹	۲۳۲/۸۰	۲۱۵/۶۵	۱۱۹/۷۱	۷۹/۵۶	۹۷/۶۸
مشخصه‌های آماری		**ژولای**	**آگوست**	**سپتامبر**	**اکتبر**	**نوامبر**	**دسامبر**
نمایه‌های مرکزی	میانگین	۱۳۸۸/۸۱	۱۳۲۵/۳۳	۱۱۲۶/۶۵	۹۰۵/۴۷	۵۸۲/۷۹	۳۹۰/۸۷
	میانه	۱۴۸۰/۱۵	۱۳۹۱/۷۴	۱۱۳۹/۴۹	۹۰۶/۱۹	۵۵۶/۸۹	۳۵۴/۶۱
	مد	۸۶۴/۵۷	۷۲۷/۳۲	۱۰۰۲/۵۶	۸۳۳/۵۱	۴۰۹/۰۱	۲۵۱/۰۹
نمایه‌های پراکندگی	دامنهٔ تغییرات	۱۸۵۴/۲۵	۱۷۱۵/۳۸	۱۴۹۴/۴۲	۱۰۷۲/۹۳	۷۰۲/۵۵	۶۹۱/۹۳
	واریانس	۸۲۲۹۳/۶۲	۶۵۲۰۶/۸۳	۵۷۶۹۸/۵۰	۴۶۸۹۶/۱۸	۲۵۳۷۷/۹۰	۱۳۳۹۱/۱۷
	انحراف معیار	۲۸۶/۸۷	۲۵۵/۳۶	۲۴۰/۲۱	۲۱۶/۵۶	۱۵۹/۳۰	۱۱۵/۷۲
نمایه‌های شکل توزیع	کشیدگی	۰/۶۵	۰/۷۰	-۰/۰۴	-۰/۵۶	-۰/۸۵	-۰/۵۰
	چولگی	-۱/۰۰	-۰/۹۳	-۰/۴۴	-۰/۱۲	۰/۳۰	۰/۶۱
آستانه‌ها	چارک اول	۱۲۲۲/۳۳	۱۱۷۶/۶۵	۹۹۴/۰۷	۷۷۰/۸۲	۴۴۹/۲۱	۲۹۷/۹۴
	چارک سوم	۱۵۹۰/۱۴	۱۴۹۹/۵۴	۱۲۹۶/۹۵	۱۰۷۰/۰۵	۷۱۰/۲۶	۴۸۲/۰۱
کران بالا و پایین	بیشینه	۱۹۶۲/۱۰	۱۸۵۷/۵۳	۱۷۰۴/۹۳	۱۳۹۸/۲۱	۹۹۰/۳۸	۹۰۱/۵۴
	کمینه	۱۰۷/۸۵	۱۴۲/۱۵	۲۱۰/۵۱	۳۲۵/۲۹	۲۸۷/۸۳	۲۰۹/۶۱

ماخذ: مطالعات نگارندگان، ۱۳۹۶



شکل ۲: پراکنش نگار ارتفاع لایۀ مرزی در ایران، الف) نمایندۀ فصل زمستان (ژانویه)؛ ب) نمایندۀ فصل بهار (ژوئن)؛ ج) نمایندۀ فصل تابستان (آگوست)؛ د) نمایندۀ فصل پاییز (اکتبر) (اعداد به متر هستند)

تهیه و ترسیم: مطالعات نگارندگان، ۱۳۹۶

جدول (۳) نتایج همبستگی ارتفاع لایۀ مرزی ایران را با مؤلفه‌های مکانی ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که ارتفاع لایـۀ مرزی ایران با ارتفاع، همبستگی چندان قوی ندارد. در این بین ۸ ماه از سال همبستگی مثبت ارتفاع لایۀ مرزی را با ارتفاع نشان دادند و چهار ماه ژولای تا اکتبر، همبستگی منفی را با ارتفاع لایۀ مرزی نشان داده‌اند. همبستگی‌های ارائه‌شده برای دورۀ سرد سال به مراتب قوی‌تر از دوره‌های گرم سال بوده است. از آنجا که ضریب همبستگی پیرسون از نسبت کوواریانس نمونۀ دو متغیّر به حاصل ضرب دو انحراف استاندارد به‌دست می‌آید و از آنجا که یکی از کاربردهای کواریانس شرح و تفسیر تلاطم است؛ درنتیجه این آماره جدای از مقدار همبستگی (خطی) می‌تواند توضیح مناسبی برای توضیح رفتار تلاطم ارتفاع لایۀ مرزی ایران باشد. در عین حال باید توجه داشت که $r_{demPBL=0}$ (یا نزدیک به صفر) لزوماً به این مفهوم نیست که ارتفاع (DEM) و ارتفاع لایۀ مرزی ایران هیچ رابطه‌ای با هم ندارند؛ بنابراین می‌توان اذعان داشت که دو سنجۀ نامبرده، رابطۀ خطی با هم ندارند، چراکه ضریب همبستگی فقط رابطۀ خطی را اندازه‌گیری می‌کند. بر این اساس ارتفاع لایۀ مرزی ایران دارای یک رابطۀ غیرخطی و احتمالاً پیچیده است و بیشینۀ همبستگی ارتفاع لایۀ مرزی ایران با مؤلفۀ مکانی عرض جغرافیایی است، چراکه نقش این مشخصۀ جغرافیایی با آفتاب‌گیری بسیار بالاست. فصول زمستان و پاییز بیشینۀ همبستگی را ارائه داده‌اند و پس از فصول تابستان و بهار قرار دارند. طول

جغرافیایی نیز همبستگی خوبی را با ارتفاع لایۀ مرزی ایران ارائه داده است. در بین فصول، فصل زمستان همبستگی قوی را با طول جغرافیایی ارائه داده است و در بین ماه‌های موردمطالعه،سپتامبر کمینۀ همبستگی و فوریه بیشینۀ همبستگی را ارائه داده است.

جدول ۳: همبستگی میانگین ارتفاع لایۀ مرزی ایران مبتنی‌بر برونداد پایگاه دادۀ مرکز پیش‌بینی میان‌مدت هواسپهر اروپایی (ECMWF) نسخۀ ERA Interim با ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی ($P-Value < 0.05$)

آماره/ ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن
طول جغرافیایی	۰/۶۹۴	۰/۷۳۴	۰/۷۲۵	۰/۶۹۰	۰/۶۰۲	۰/۵۳۶
عرض جغرافیای	-۰/۸۰۰	-۰/۷۰۴	-۰/۶۷۴	-۰/۷۱۵	-۰/۷۴۲	-۰/۶۲
ارتفاع	-۰/۲۸۹	-۰/۲۰۲	-۰/۱۳۹	-۰/۱۱۹	-۰/۰۸۵	۰/۰۶۳
آماره/ ماه	ژولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
طول جغرافیایی	۰/۴۳۹	۰/۳۰۰	۰/۲۹۲	۰/۴۶۰	۰/۵۶۳	۰/۶۰۳
عرض جغرافیای	-۰/۵۲۴	-۰/۵۵۸	-۰/۷۰۳	-۰/۸۴۵	-۰/۹۰۲	-۰/۸۷۷
ارتفاع	۰/۱۴۲	۰/۱۹۶	۰/۱۸۱	۰/۰۵۹	-۰/۰۸۸	-۰/۲۱۶

مأخذ: مطالعات نگارندگان، ۱۳۹۶

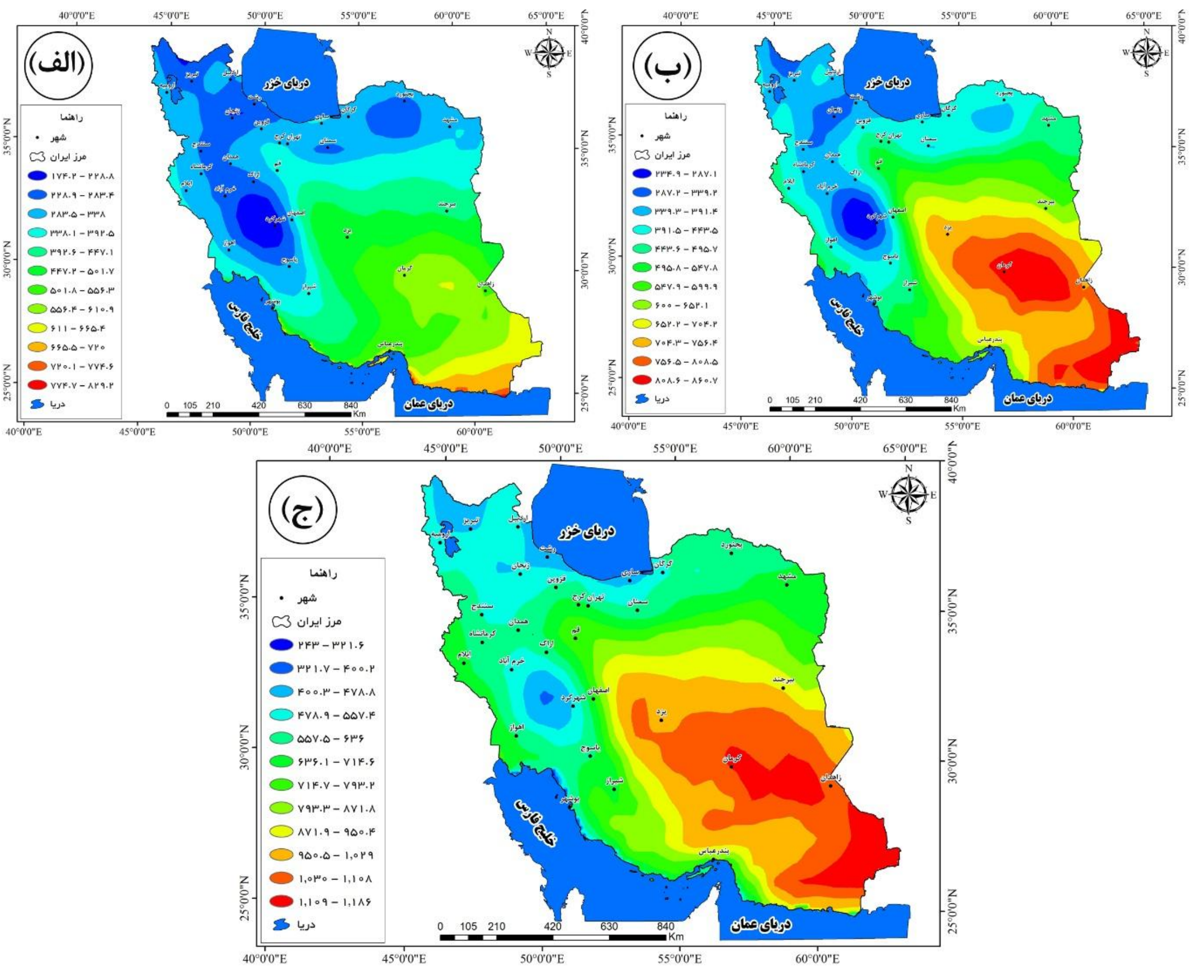
توزیع زمانی- مکانی ارتفاع لایۀ مرزی در گسترۀ ایران به تفکیک هر ماه در ذیل بررسی شده است.

ژانویه، فوریه و مارس (JFM)

دگرگونی ارتفاع لایۀ مرزی (PBL) در ماه ژانویه براساس برونداد پایگاه ECMWF در شکل (۳- الف) مشخص شده است. همان‌طور که مشخص شده است، ماه‌های سرد سال از کمینۀ ارتفاع لایۀ مرزی برخوردار می‌باشند. در این ماه ارتفاع لایۀ مرزی در کمترین ارتفاع، به ۱۷۴ متر منطبق بر منطقۀ زاگرس مرتفع تا بیشترین ارتفاع برابر با ۸۲۴ متر منطبق بر مجاور دریای عمان در نوسان است. ارتفاع لایۀ مرزی در این ماه به‌عنوان یکی از سردترین ماه‌های سال در حالت کمینه قرار دارد. فقط در نواحی گرمسیر و نیمۀ جنوب شرقی کشور است که ارتفاع بالاتری در ارتفاع لایۀ مرزی مشاهده می‌شود. آرایش مکانی ارتفاع لایۀ مرزی در این ماه به‌عنوان سردترین ماه سال، از وضعیت توپوگرافیکی به‌خصوص روند ناهمواری‌ها و عرض جغرافیایی تبعیت می‌کند. به‌طوری که روند کاهش در ارتفاع لایۀ مرزی از شمال غرب به جنوب شرق متناسب با تغییر چشم‌انداز ناهمواری و وجود یک سطوح هموار و کم‌ارتفاع با ماهیت بیابانی و کویری کاملاً آشکار است. ازنظر منطقه‌ای، کمترین ارتفاع لایۀ مرزی در مناطق نیمۀ شمالی، عرض‌های بالاتر و ناهمواری‌های زاگرس و البرز و شمال شرق مشاهده می‌شود. لایۀ مرزی در ماه ژانویه در مناطق سردسیر کمترین ارتفاع را دارد و در مناطق نیمه‌مرکزی، استان‌های یزد، کرمان، سیستان و بلوچستان ارتفاع لایۀ مرزی بیش از ۴۰۰ متر اختلاف دارد.

توزیع مکانی ارتفاع لایۀ مرزی ماه فوریه در شکل (۳-ب) مشخص شده است. همان‌طور که مشخص شده، کمینۀ ارتفاع لایۀ مرزی در ماه‌های سرد سال در ماه ژانویه رخ داده و این شرایط بیشتر منطبق بر مناطق مرتفع و سردسیر زاگرس است. در ماه فوریه فقط مناطق محدودی در مرزی‌های شمال غربی ایران و منطقۀ زاگرس مرتفع، ارتفاع لایۀ مرزی کمتر شده است و لایۀ مرزی با ضخامت کم در این ماه از ۲۳۴ تا ۵۰۰ متر در بین مناطق سردسیر و مرتفع متغیّر است. ضخامت لایۀ مرزی در این ماه از سال، از ۲۴۳ تا ۱۱۸۶ متر در نوسان است. درواقع این اثرات جغرافیایی یا توپوگرافیکی است که آرایش لایۀ مرزی و ارتفاع آن را تعیین می‌کند. از آنجا که ضخامت لایۀ مرزی متأثر از وضعیت چرخۀ گرمایش شبانه‌روزی است؛ بنابراین چرخۀ شبانه‌روزی نیز به‌شدت متأثر از وضعیت توپوگرافیکی و عوامل مکانی است. به‌طوری

که در این ماه متناسب با دو چشم‌انداز ناهموار و هموار در کشور دو ناحیهٔ مرتفع و کم‌ارتفاع آرایش مکانی ارتفاع لایهٔ مرزی مشاهده می‌شود. کانون بیشینهٔ ضخامت لایهٔ مرزی بالا منطبق بر منطقهٔ جنوب شرق ایران و کویر لوت متمرکز است. با توجه به این آرایش مکانی، از شمال به جنوب و از غرب به شرق بر ارتفاع لایهٔ مرزی افزوده می‌شود. چشم‌انداز برجستهٔ طبیعی در نیمهٔ غربی و شمالی موجب شده که ارتفاع لایهٔ مرزی نسبت‌به چشم‌انداز کم‌ارتفاع و مسطح نیمهٔ شرقی و جنوبی از ارتفاع کمتری برخوردار باشد. توزیع مکانی ارتفاع لایهٔ مرزی در ماه مارس در شکل (۳- ج) مشخص شده است. در این ماه کمترین ارتفاع با ۱۳۰ متر به‌صورت بسیار محدود در نوار ساحلی دریای خزر در گیلان و مازندران و بیشترین ارتفاع لایهٔ مرزی در جنوب شرق ایران به‌خصوص شرق استان کرمان و جنوب سیستان و بلوچستان رخ می‌دهد. در این ماه نیز به مانند دیگر ماه‌های سرد سال، با توجه به ساختاری جغرافیایی و توپوگرافیکی فلات ایران، ارتفاع لایهٔ مرزی به دو بخش کم ارتفاع و ارتفاع بیشتر طبقه‌بندی می‌شود. ارتفاع لایهٔ مرزی از ۲۴۳ تا ۱۱۸۶ متر در نوسان است.



شکل ۳: ارتفاع لایهٔ مرزی (BLH) بر فراز ایران در فصل زمستان، الف) ژانویه، ب) فوریه، ج) مارس

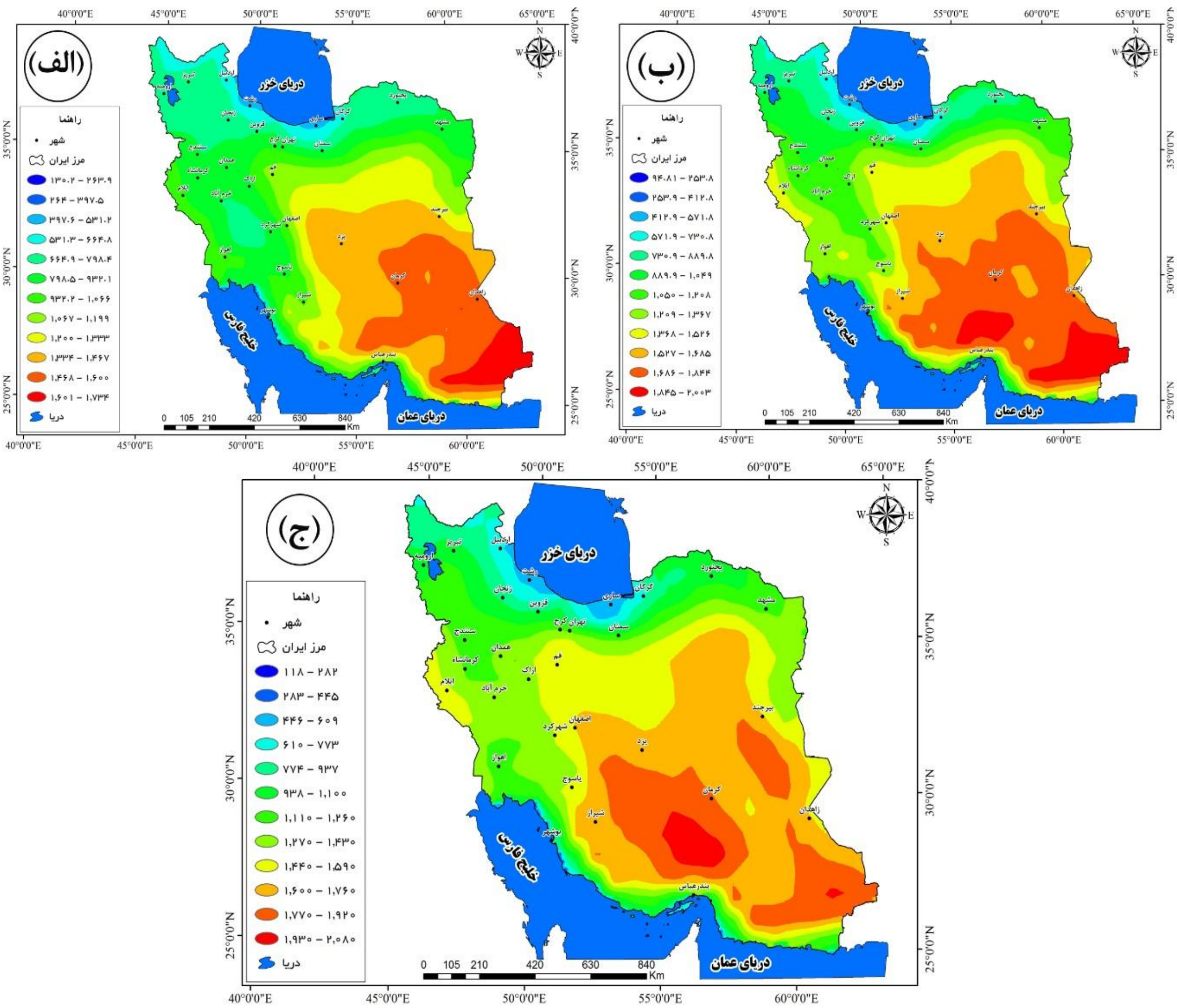
تهیه و ترسیم : مطالعات نگارندگان، ۱۳۹۶

آوریل، می و ژوئن (AMJ)

توزیع ارتفاع لایهٔ مرزی در ماه آوریل در شکل (۴-الف) مشخص شده است. متناسب با دِگرش فصلی و شروع فصل بهار، آرایش ارتفاع لایهٔ مرزی نیز تغییر پیدا کرده است. در این ماه نسبت‌به ماه مارس، ارتفاع لایهٔ مرزی ۶۰۰ متر بیشتر شده است. در ماه آوریل کمترین ارتفاع لایهٔ مرزی در مناطق محدودی در نوار ساحلی دریای خزر در وهلهٔ اول و دوم در سواحل خلیج‌فارس و دریای عمان و مناطق مرتفع زاگرس و شمال غرب مشاهده می‌شود. در مناطق ساحلی به‌دلیل نقش تعدیل‌کنندگی پهنه‌های آبی بر دمای هوا و گنجایش دمایی بالای آب، ارتفاع لایهٔ مرزی در این نواحی کمتر است. بیشینهٔ ارتفاع لایهٔ مرزی در پهنهٔ وسیعی از ایران منطبق بر نواحی مرکزی و جنوب شرقی ایران مشاهده می‌شود. بیشینهٔ ارتفاع لایهٔ مرزی با ۱۷۴۳ متر در نواحی گرم‌تر در مناطق مجاور دریای عمان در جنوب استان سیستان و بلوچستان رخ می‌دهد. از شمال غرب به جنوب شرق به‌تدریج بر ارتفاع لایهٔ مرزی افزوده می‌شود.

آرایش مکانی ارتفاع لایهٔ مرزی در ماه مِی در شکل (۴-ب) مشخص شده است. در این ماه با توجه به افزایش تدریجی دمای هوا و تبعیت ارتفاع لایهٔ مرزی از آهنگ دمای شبانه‌روزی، به‌تدریج بر ارتفاع لایهٔ مرزی افزوده می‌شود. در این ماه بیشینهٔ ارتفاع لایهٔ مرزی در مناطق جنوب شرق و جنوب کشور به بیش از ۲۰۰۰ متر می‌رسد. در این ماه فقط در مناطقی از دامنه‌های البرز شمالی و نوار ساحلی خزر و نوار ساحلی خلیج فارس و دریای عمان و مرزهای شمال غربی کشور، ارتفاع لایهٔ مرزی از ۱۰۰ تا ۴۰۰ متر متغیّر است. در بقیهٔ نقاط به‌تدریج بر ارتفاع لایهٔ مرزی افزوده می‌شود. در این ماه کل کشور به دو پهنهٔ مختلف تقسیم شده است؛ یک پهنه منطبق بر مناطق کوهستانی البرز و زاگرس و خراسان شمالی به‌عنوان چشم‌انداز ناهموار با ارتفاع لایهٔ مرزی از ۷۰۰ تا ۱۲۰۰ متر و پهنهٔ دیگر که بیشترین وسعت را نیز دربرمی‌گیرد، از مناطق کوهپایه‌ای شروع شده و تا مناطق جنوبی می‌رسد که منطبق بر چشم‌اندازی هموار ازنظر جغرافیایی است، ارتفاع لایهٔ مرزی در اینجا از ۱۳۰۰ متر تا ۲۰۰۳ متر در نوسان است. در این ماه با توجه به افزایش تدریجی دمای هوا، کانون بیشترین لایهٔ مرزی از جنوب شرق به‌سمت نواحی جنوبی مرکزی کشیده شده است.

دگرگونی مکانی ارتفاع لایهٔ مرزی ماه ژوئن در سطح کشور در شکل (۴-ج) مشخص شده است. در این ماه فقط نوار بسیار ضعیفی در سواحل خلیج فارس و منطقهٔ نسبتاً ساحلی جلگهٔ خزر و دامنه‌های شمالی البرز، ارتفاع لایهٔ مرزی کمتر است و از حدود ۱۱۸ تا ۷۰۰ متر در نوسان است. با توجه به آهنگ افزایش تدریجی دمای کشور در این ماه نسبت‌به ماه مِی، حدود ۸۰ متر بر ارتفاع لایهٔ مرزی در بالاترین سطح افزوده شده است. هر چقدر از سواحل فاصله گرفته می‌شود، ارتفاع لایهٔ مرزی بیشتر است. نقش تعدیل‌کنندگی آب بر وضعیت لایهٔ مرزی کاملاً آشکار است. در این ماه تقریباً در کل کشور به‌تدریج بر ارتفاع لایهٔ مرزی افزوده می‌شود و کانون مرتفع‌ترین مناطق، به‌سمت نواحی مرکزی و بیابانی گسترش بیشتری یافته است. در شرایط آب و هوایی بری که منطبق بر چشم‌انداز جغرافیایی هموار بیابانی و کویری است، ارتفاع لایهٔ مرزی نیز بیشتر است. برای نمونه در نواحی بیابانی و کویری مرکزی ایران که جزو گرم‌ترین و بری‌ترین رژیم‌های دمایی و آب و هوایی کشور محسوب می‌شوند، در تمام سال ارتفاع لایهٔ مرزی همچنان در سطح بالایی قرار دارد. ازنظر زمانی بیشینهٔ ارتفاع لایهٔ مرزی در ماه ژوئن رخ داده است.



شکل ۴: ارتفاع لایۀ مرزی (BLH) بر فراز ایران در فصل بهار، الف) آوریل، ب) می، ج) ژوئن

تهیه و ترسیم : مطالعات نگارندگان، ۱۳۹۶

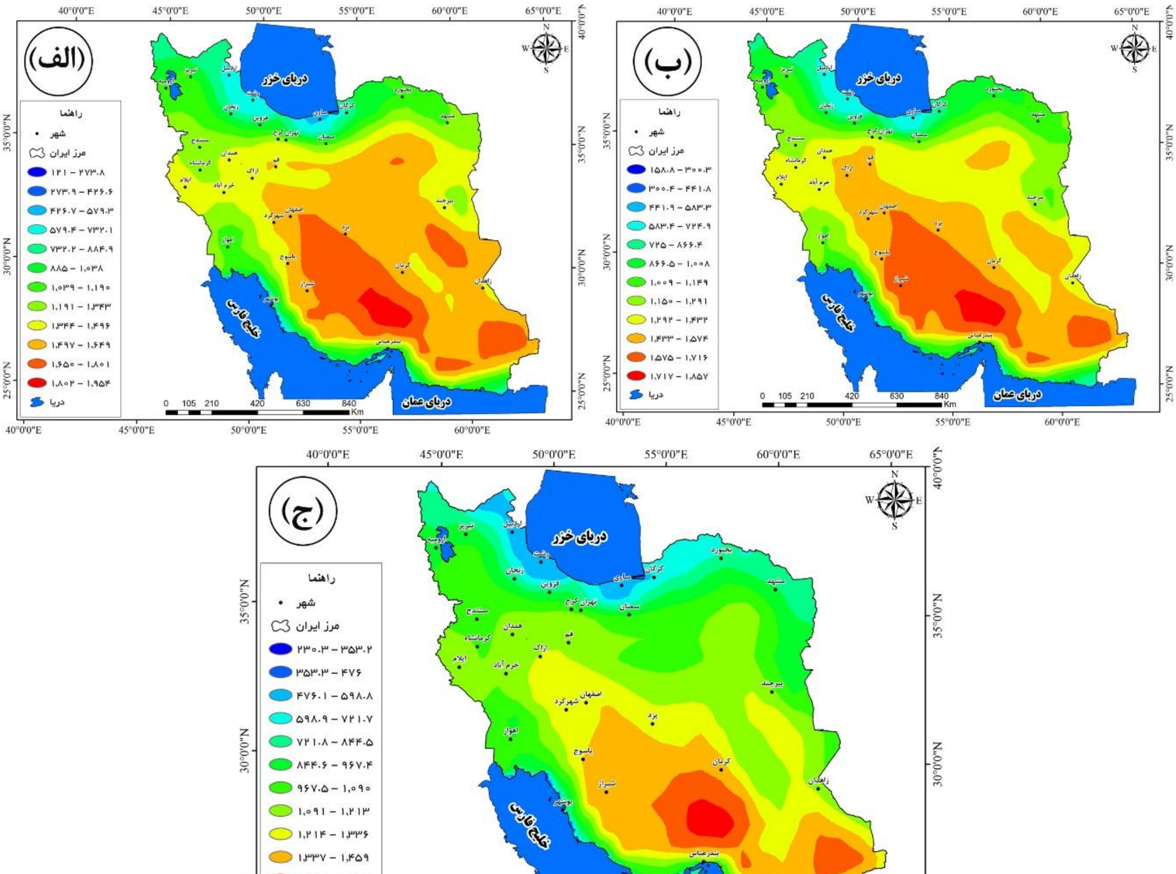
جولای، آگوست و سپتامبر (JAS)

توزیع ارتفاع لایۀ مرزی در ماه جولای در ایران در شکل (۵-الف) مشخص شده است. در این ماه به‌عنوان گرم‌ترین ماه در کشور، تقریباً در کل کشور ارتفاع لایۀ مرزی به بیش از ۱۲۰۰ متر ارتفاع می‌رسد، در نواحی مرکزی و نیمه‌جنوبی، این ارتفاع لایۀ مرزی تا ۱۹۵۴ متر نیز مشاهده شد. بررسی و هم‌سنجی توزیع زمانی ارتفاع لایۀ مرزی تا به اینجا به‌تدریج نشان داد که در ماه‌های گرم و به‌خصوص ماه‌های ژوئن و جولای، متناسب با گسترش پرفشار آزور بر سطح ایران و حاکمیت شرایط گرم و خشک، ارتفاع لایۀ مرزی به بالاترین سطح می‌رسد. در ماه جولای در نواحی حاشیۀ دریای خزر، ارتفاع لایۀ مرزی کمترین ارتفاع را دارد که بین ۱۲۱ تا ۵۰۰ متر است. نواحی حاشیۀ دریای عمان و خلیج فارس و مناطق مرتفع عرض‌های شمالی نسبت‌به دیگر مناطق ارتفاع لایۀ مرزی کمتری دارند. در این ماه کانونِ بالاترین ارتفاع لایۀ مرزی متناسب با افزایش دمای سطح زمین و دمای هوا در ایران زمین، به مناطق جنوبی کرمان کشیده می‌شود. در حالی که این کانون در ماه‌های سرد سال منطبق بر مناطق جنوب شرق کشور بیشتر در حوزۀ استان سیستان و بلوچستان و کویر لوت بوده است.

توزیع ارتفاع لایۀ مرزی در ماه آگوست در شکل (۵-ب) مشخص شده است. همان‌طور که در ماه جولای بیان شد، هر چقدر به ایام گرم سال پیش می‌رویم، کانون بیشینۀ ارتفاع لایۀ مرزی از نواحی

شرقی و مرکـزی بـه نیمـهٔ غربـی نـواحی گـرم کشـور جابه‌جا می‌شود. همچنان نواحی ساحلی شمال کشور و نوار ساحلی جنوب به‌طور محدود کـانون ارتفـاع کمتـر لایهٔ مرزی می‌باشند. در ماه آگوست از بیشینهٔ ارتفـاعی لایهٔ مرزی کاسته مـی‌شـود. بیشـتر کشـور بـا شـرایط حداکثر ارتفاع لایهٔ مرزی همراه است.

توزیع ارتفاع لایهٔ مـرزی در مـاه سـپتامبر در شـکل (۵- ج) مشخص شده است. در ایـن مـاه رونـد کـاهش ارتفاع لایهٔ مرزی قابل مشاهده است. از گسـترهٔ نـواحی با ارتفاع لایهٔ مرزی بالاتر کاسته شده و بیشینهٔ ارتفاع لایهٔ مرزی به مناطق جنوبی اسـتان کرمـان و شـمال هرمزگان جابه‌جـا شـده اسـت. بـه‌تـدریج از مرزهـای شمال غربی و منطقهٔ مجاور دریای خزر، ارتفـاع لایـهٔ مرزی کاهش چشمگیری می‌یابد. در بخش اعظمی از کشور، ارتفـاع لایـهٔ مـرزی ۷۰۰ تـا ۱۲۰۰ متـر و در دیگر مناطق، ۱۲۰۰ تـا ۱۷۰۰ متـر ارتفـاع دارد کـه منطبق‌بر نواحی جنوبی و کویری است.



شکل ۵: ارتفاع لایهٔ مرزی (BLH) بر فراز ایران در فصل تابستان، الف) ژولای، ب) آگوست، ج) سپتامبر

تهیه و ترسیم: مطالعات نگارندگان، ۱۳۹۶

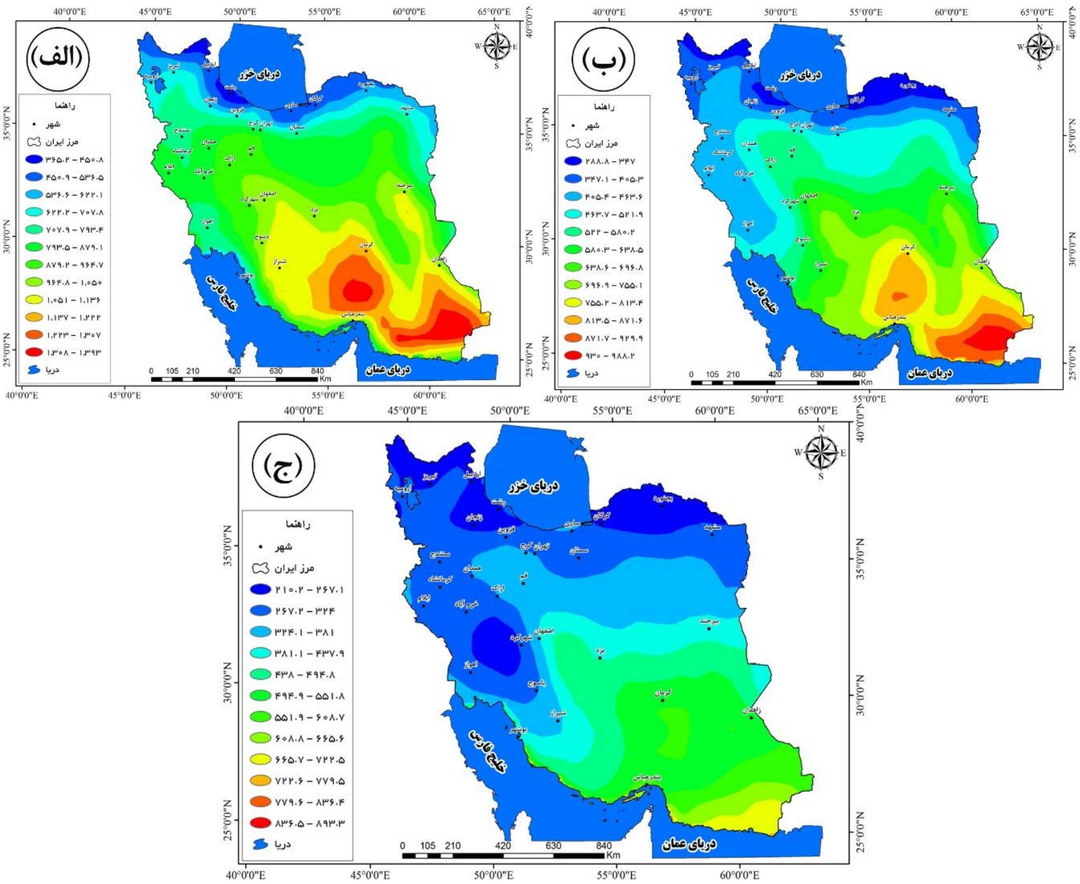
اکتبر، نوامبر و دسامبر (OND)

توزیع ارتفـاع لایـهٔ مـرزی در مـاه اکتبـر در شـکل (۶- الف) مشخص شده است. با گذار فصلـی و کـاهش تدریجی دمای هوا به‌تـدریج از عـرض‌هـای شـمالی بـر محدودهٔ لایهٔ مرزی با ارتفاع کمتـر افـزوده مـی‌شـود. مناطق عرض‌های شمال غربی و منطقهٔ سـاحلی خـزر در دامنه‌های شمالی البرز، کانون کمترین ارتفاع لایـهٔ مرزی هستند، درواقع کاهش دمای هوا در این نواحی

زودتر از دیگر مناطق آغاز می‌شود. با توجه به آغاز و گسترش هوای سرد از عرض‌های شمالی، بیشینهٔ ارتفاع لایهٔ مرزی محدودتر شده و به مناطق جنوب شرق جابه‌جا می‌شود. در بیشتر گسترهٔ ایران، آرایش ارتفاع لایهٔ مرزی از مناطق با عرض‌های بالاتر با ارتفاع ۷۰۰ متر شروع شده و به‌تدریج با روندی افزایشی به ۱۳۰۰ متر در مناطق جنوبی و جنوب شرقی می‌رسد.

دگرگونی ارتفاع لایهٔ مرزی ماه نوامبر در (۶- ب) مشخص شده است. در این ماه با سرمایش بیشتر سطح زمین و دمای هوا، از عرض‌های شمالی به‌تدریج ارتفاع لایهٔ مرزی کاهش یافته و بر گسترهٔ آن افزوده می‌شود. ارتفاع لایهٔ مرزی با توجه به کاهش ارتفاع هواسپهر در عرض‌های شمالی به‌دلیل نفوذ تودهٔ هواهای سرد و همچنین وضعیت ناهمواری‌ها، بیشتر در منطقهٔ جنوب شرق مشاهده می‌شود. کمترین ارتفاع لایهٔ مرزی در این ماه در مناطق شمال شرق، شمال و شمال غرب با ارتفاعی برابر با ۲۸۸ تا ۳۴۷ متر رخ می‌دهد. به‌تدریج به‌سمت عرض‌های پایین‌تر از ارتفاع لایهٔ مرزی کاسته می‌شود. در این ماه فقط منطقهٔ جنوب شرق به‌خصوص جنوب استان سیستان و بلوچستان بیشترین ارتفاع لایهٔ مرزی را دارد.

توزیع ارتفاع لایهٔ مرزی در ماه دسامبر در شکل (۶- ج) مشخص شده است. در ماه دسامبر به‌عنوان یکی از سردترین ماه‌های سال، ارتفاع لایهٔ مرزی در بیشتر کشور به کمترین ارتفاع می‌رسد. در این ماه فقط منطقهٔ مجاور دریای عمان در پسکرانهٔ جنوب شرقی ایران ارتفاع آن به ۸۹۳ متر می‌رسد، در واقع در این منطقه از کشور بالاترین ارتفاع لایهٔ مرزی رخ می‌دهد. کمترین ارتفاع لایهٔ مرزی منطبق بر نواحی کوهستانی و عرض‌های شمالی است. از جنوب به شمال، از ارتفاع لایهٔ مرزی کاسته می‌شود.



شکل ۶: ارتفاع لایهٔ مرزی (BLH) بر فراز ایران در فصل پاییز، الف) اکتبر، ب) نوامبر، ج) دسامبر

تهیه و ترسیم: مطالعات نگارندگان، ۱۳۹۶

دگرگونی زمانی- مکانی ارتفاع لایۀ مرزی در نوشتار حاضر بررسی شد. ارتفاع لایۀ مرزی یکی از بخش‌های مهم در مطالعات آب و هوایی محسوب می‌شود. لایۀ مرزی به‌عنوان لایه‌ای از هواسپهر است که حیات بشری به آن وابسته است. نتایج پردازش‌ها بر مبنای آمار بلندمدت نشان داد که آرایش مکانی ارتفاع لایۀ مرزی به‌شدت متأثر از وضعیت جغرافیایی و توپوگرافیکی ایران است. درواقع دگرگونی گرمایشی و آهنگ تغییرات آن متناسب با چرخۀ شبانه‌روزی، وضعیت ارتفاع لایۀ مرزی را مشخص می‌کند. ارتفاع لایۀ مرزی در ماه‌های سرد سال به کم‌ترین ارتفاع خود می‌رسد. ازنظر مکانی کمترین ارتفاع لایۀ مرزی منطبق بر چشم‌انداز نواحی مرتفع رشته کوه‌های زاگرس و البرز و عرض‌های شمالی کشور مشاهده شد. با توجه به تغییر چشم‌انداز گسترۀ کشور از شمال به جنوب ایران، بر ارتفاع لایۀ مرزی افزوده می‌شود. در منطقۀ جنوب شرق ایران کانون بیشترین ارتفاع لایۀ مرزی رخ می‌دهد. در فصول زمستان، بهار و پاییز کانون بیشینۀ ارتفاع لایۀ مرزی در نواحی جنوب شرق مشاهده شد. در فصل تابستان کانون ارتفاع بالای مرزی به نیمۀ جنوبی و از شرق به غرب جابه‌جا می‌شود. وردایی رفتاری ارتفاع لایۀ مرزی از عرض جغرافیایی و دگرگونی چشم‌انداز طبیعی منطقه تبعیت می‌کند. در تمام ماه‌های سال از شمال غرب به جنوب شرق ارتفاع لایۀ مرزی افزایش پیدا می‌کند.

مشخص شد که لایۀ مرزی یک بخش مهمی در مطالعات آب و هوایی محسوب می‌شود. این بخش از هواسپهر پایینی به‌دلیل نزدیکی به سطح زمین به‌شدت تأثیرپذیر است و شرایط جغرافیایی و ویژگی‌های سطح زمین بر روی آن کارایی بسزایی می‌گذارد. آنچه در این نوشتار بیشتر قابل بحث است، اثرات توپوگرافیکی است که در منابع به‌عنوان اثرات جغرافیایی نیز بیان می‌شود. الگوی تغییرات زمانی- مکانی لایۀ مرزی در ایران بسیار تأثیرگذار است. متناسب با تغییرات فصلی در اثر حرکت انتقالی زمین و جابه‌جایی فصول و پیدایش سرماها و گرماها، تغییرات زمانی ارتفاع لایۀ مرزی نیز قابل مشاهده است. درواقع آهنگ دگرگونی فصول متناسب با گردش محور زمین و تغییرات تابش خورشید، وضعیت ارتفاع لایۀ مرزی متناسب با میزان گرمایش دریافتی در روز تغییر می‌یابد؛ بنابراین وردایی زمانی ارتفاع لایۀ مرزی بیشتر به دگرگونی فصلی و وضعیت تابش دریافتی بستگی دارد. آرایش و وردایی مکانی ارتفاع لایۀ مرزی در سازوکاری ترکیبی از اثرات جغرافیایی یا وضعیت توپوگرافیکی تأثیر می‌پذیرد. در الگوی فضایی ارتفاع لایۀ مرزی از شمال به جنوب و از غرب به شرق کشور متناسب با کاهش ارتفاع و تغییر چشم‌انداز سطوح ناهموار به هموار در سطح زمین، میزان ارتفاع لایۀ مرزی نیز افزایش می‌یابد. در ایام سرد سال با توجه به ضخامت کم هواسپهر، ارتفاع لایۀ مرزی نیز کمتر از دیگر فصول بوده و کانون کمترین ارتفاع لایۀ مرزی در مناطق مرتفع ناهموار غرب و شمال کشور و بیشترین ارتفاع در مناطق مرکزی و جنوب شرقی رخ می‌دهد. از فصل بهار با آهنگ دگرگونی فصلی، سازوکار ارتفاع لایۀ مرزی نیز تغییر یافته و بیشتر ایران میزان ارتفاع لایۀ مرزی میل به افزایش نشان می‌دهد. در ماه‌های فصل گرم فقط نواحی عرض‌های بسیار بالا و مجاور دریا از ضخامت کمتری برخوردار هستند. در مناطق ساحلی و نزدیک دریا به‌دلیل نقش تعدیل‌کنندگی دریا بر روی تابش دریافتی و دمای هوا و تفاوت گنجایشی و ظرفیت گرمایی آب در جذب تابش، همیشه ارتفاع لایۀ مرزی کمتر است.

نوسانات جغرافیایی می‌تواند جریان لایۀ مرزی را تغییر دهد و در بعضی موارد چرخش‌هایی در ارتباط با چرخه‌های گرمایی شبانه‌روزی تولید شود. تمام جریانات و تکانه‌های متأثر از شرایط جغرافیایی، هموار و ناهموار هستند. بادهای سطح زمین، بادهای کوه به درّه و برعکس و نسیم‌ها همگی نشان‌دهندۀ

اثرپـذیری آن‌هـا از شـرایط جغرافیـایی اسـت. شـرایط جغرافیایی هر منطقه با دگرگونی وضعیت میزان تـابش دریافتی و برگشـتی ازطریـق سـطوح نـاهموار و زاویـهٔ تابش، موجب دگرگونی در چرخهٔ گرمایش و سرمایشی دمایی می‌شود که به تناسب آن نیز ارتفاع لایـهٔ مـرزی در زمان و فضا تغییر پیدا می‌کند.

به‌طور کلی، در ایـران در مـاه‌هـای ژانویـه و ژوئـن به‌ترتیـب کـم‌تـرین و بـیش‌تـرین ارتفـاع لایـهٔ مـرزی مشاهده می‌شود. در طول سال بیشینهٔ ارتفاع یا ارتفـاع لایهٔ مرزی بر نواحی بیابانی و کویری مرکزی و جنـوب شرقی و جنوبی ایران منطبق است. تغییرات زمانی لایهٔ مرزی از آهنگ تغییـرات فصـلی و چرخـهٔ شـبانه‌روزی تأثیر بالایی می‌پذیرد. آرایش فضایی ارتفاع لایهٔ مـرزی از وضعیت توپوگرافیکی و وضعیت سـطح زمـین ازنظـر مورفولوژی به‌شدت تأثیر می‌پذیرد. متناسب با وضـعیت جغرافیایی و توپوگرافیکی ایران، از شمال به جنوب و از غرب به شرق بر ضخامت لایهٔ مرزی افـزوده مـی‌شـود. براساس برونداد پایگاه دادهٔ مرکز پیش‌بینی میان‌مـدت هواسـپهر اروپـایی (ECMWF) نسـخهٔ ERA Interim حداکثر ارتفاع لایـهٔ مـرزی در ایـران در مـاه ژوئـن تـا ۲۰۰۳ متر رخ می‌دهد و در کمترین حالت ارتفاع لایـهٔ مرزی در ماه‌های سرد به ۱۷۴ متر در مناطق سردسـیر و مرتفع مشاهده شـد؛ بنـابراین سـاختار دمـایی ایـران متناسب با وضعیت جغرافیایی و توپـوگرافیکی، الگـوی زمانی- مکانی ضخامت لایهٔ مرزی در ایران را مشـخص می‌کند.

نتیجه

در این پژوهش دگرگونی زمانی- مکانی ارتفاع لایـهٔ مرزی (BLH) در گسـترهٔ ایـران‌زمـین از دیـدگاه آب و هواشناسی براساس داده‌های بلندمدت (۱۹۷۹-۲۰۱۵) مرکـز پـیش‌بینـی میـان‌مـدت هواسـپهر اروپـایی (ECMWF) نسـخهٔ ERA-Interim بـا تفکیـک مکـانی ۰/۱۲۵×۰/۱۲۵ درجه قوسی مورد واکاوی قـرار گرفتـه است. از نظر زمانی بیشینهٔ ارتفاع لایهٔ مـرزی در مـاه ژوئن و کمینهٔ ارتفـاع لایـهٔ مـرزی در مـاه ژانویـه رخ می‌دهد. تغییرات زمانی لایهٔ مرزی از آهنگ تغییـرات فصلی و چرخهٔ شـبانه‌روزی تـأثیر بـالایی مـی‌پـذیرد. الگوی تغییـرات زمـانی ارتفـاع لایـهٔ مـرزی متـأثر از وضعیت گرمایش هوا و سطح زمین در فصول مختلف و وضعیت ارتفاعات و ناهمواری‌های منطقـه اسـت. در ایام سـرد ارتفـاع لایـهٔ مـرزی کمتـر و در ایـام گـرم برعکس بیشتر می‌شود. دمـای هـوا مـی‌توانـد عامـل اصلی در دگرگونی ارتفاع لایهٔ مـرزی محسـوب شـود. هر چقدر گرمایش سطحی بیشتر باشـد، ارتفـاع لایـهٔ مرزی بیشتر است؛ بنابراین بین دمای هوا و ضـخامت لایهٔ مرزی ارتباط مستقیمی وجود دارد.

الگـوی دگرگـونی فضـایی ارتفـاع لایـهٔ مـرزی در ماه‌های سرد سال منسجم‌تـر از مـاه‌هـای گـرم سـال است. مناطق سـاحلی و مجـاور دریـا بـه‌دلیـل نقـش تعدیل‌کنندگی دریا در وضـعیت دمـای هـوا، همـواره کمترین ارتفـاع لایـهٔ مـرزی را دارنـد. ازنظـر آرایـش مکـانی، نـواحی مرتفـع و نـاهموار زاگـرس و نـواحی ساحلی دارای کمترین ارتفـاع لایـهٔ مـرزی و منـاطق بیابانی نواحی داخلی به‌خصوص جنـوب شـرق ایـران، ارتفاع لایـهٔ مـرزی در بـالاترین سـطح قـرار دارد. در ماه‌های سرد سال بیشینهٔ ارتفاع لایهٔ مرزی در نواحی جنوب شرق ایـران و در ایـام گـرم سـال بـه‌خصـوص ماه‌های ژوئـن و جـولای بـه منطقـهٔ غربـی و جنـوب کرمان و شمال استان هرمزگان کشیده مـی‌شـود. در تمـام سـال منـاطق مجـاور دریـا بـه‌دلیـل نقـش تعدیل‌کنندگی دریا، کانون کم‌ترین ارتفاع لایهٔ مـرزی می‌باشند. در ماه‌هـای اواسـط فصـل بهـار تـا اواسـط تابستان، ارتفاع لایهٔ مرزی بیش‌ترین ارتفاع را دارد. از غرب به شرق و از شمال بـه جنـوب بـر ارتفـاع لایـهٔ مرزی افزوده می‌شود. کانون بیشینهٔ ارتفاع لایهٔ مرزی منطبق بر نواحی بری و بیابانی و کویری کـه از رژیـم دمایی گرم و خشک برخوردار است، منطبق می‌باشد.

دگرگونی‌های زمانی- مکانی ارتفاع لایهٔ مرزی بر فراز ایران، کارایی حیاتی در الگوهای گردشی پایین هواسپهر و همچنین الگوهای قائم آن را دارد. براساس فرایندهای فیزیکی غالب، دو رژیم ارتفاع لایهٔ مرزی برای کشور قابل شناسایی است: ۱- مناطق ساحلی که لایهٔ مرزی پایداری را به‌نسبت مناطق خشک داخلی ارائه داده‌اند؛ ۲- لایهٔ مرزی مناطق بیابانی داخلی که ناپایداری بالایی دارند. این رژیم‌ها مناطق وسیع جغرافیایی را به خود اختصاص داده‌اند. رانش شناور محلی و کنترل ثبات ایستایی عمق لایهٔ مرزی در مناطق مجاور ساحلی را می‌توان به شار جرمی این مناطق نسبت داد. از آنجایی که یک لایهٔ مرزی در تودهٔ هوای پیش‌رونده و پشت جبهه تشکیل می‌شود نتایج این مطالعه و همچنین مطالعات آتی می‌تواند به درک درستی از توده‌ها و جبهه‌ها منتهی شود. همان‌طور که فلاح قالهری (۱۳۹۳) ابراز داشته است، بیشتر واداشت‌های همدید و طوفان‌های مرتبط با کم‌فشارها به‌قدری قوی هستند که به‌آسانی می‌توانند وارونگی پوششی را بالا برده یا کل آن را حذف کنند. این حالت می‌تواند منجر به مخلوط‌شدن هوای لایهٔ مرزی از طریق طوفان‌های تندری و ابرهای دیگر در کل عمق وردسپهر شود؛ ازاین‌رو شناخت درست لایهٔ مرزی و دگرگونی‌های قائم آن -که پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی به آن اهتمام ورزیده شود- می‌تواند منجر به شناسایی مناطق مستعد توفان‌های تندری شود. وان انن و تکشاران (۲۰۱۳) در بخشی از پژوهش خود ابراز داشته‌اند که نواحی استقرار ITCZ (کمربند همگرایی بین حاره ای) ارتفاع لایهٔ مرزی بیشینه است. در ایران زمانی که کمربند همگرایی بین حارهٔ مناطق جنوب شرق را تحت‌تأثیر خود قرار می‌دهد، بخش‌هایی از این نواحی به‌ویژه در محدودهٔ دریای عمان تحت‌تأثیر سامانهٔ ITCZ قرار می‌گیرند که تأثیر آن را می‌توان در دگرگونی ارتفاع لایهٔ مرزی دید. در مناطق ساحلی شمال و برخی از مناطق ساحلی جنوب به‌خصوص در خلیج فارس که تحت‌تأثیر ابرناکی هستند، ارتفاع لایهٔ مرزی پایین است. این مقادیر کم با ماهیت پایدار این ابرها (ساختار ترمودینامیکی مرتبط با نوع ابر) در ارتباط است؛ به‌طوری که در مناطقی که ابرهای کومه‌ایی[1] به‌دلیل عمیق‌تر بودن نسبت‌به ابرهای پوشن‌کومه‌ای[2] (ابرهای نیمه‌عمیق) حاکم هستند، باید شاهد عمق کمتر لایهٔ مرزی از یک طرف و دگرگونی کمتر فصلی و حتی روزانهٔ آن از طرف دیگر بود. این امر را می‌توان به‌راحتی در دگرگونی ماهیانهٔ ارتفاع لایهٔ مرزی در مقایسه با مناطق ساحلی شمال و جنوب کشور دید.

براساس نتایج نوشتار حاضر، عامل اصلی دگرگونی زمانی- مکانی ارتفاع لایهٔ مرزی (BLH)، گرمایش و سرمایش سطح زمین و مؤلفه‌های مکانی و توپوگرافیکی درسطح زمین است.

نتایج و دستاوردهای این تحقیق در آگاهی‌بخشی در امور هواسپهر و به‌خصوص هوانوردی و برنامه‌ریزی کیفیت هوا و مدیریت آلودگی‌های هوایی حائز اهمیت است. نتایج مطالعهٔ حاضر، مطالعهٔ وان انن و تکشاران (۲۰۱۳) را مبنی‌بر اینکه بالاترین ارتفاع لایهٔ مرزی در مناطق بری و بیابانی در طول روز رخ می‌دهد، تأیید می‌کند. به‌طوری که در طول سال در ایران همیشه مناطق بیابانی جنوب شرق و مرکز، بالاترین ارتفاع لایهٔ مرزی را داشته‌اند.

1-Cumulus
2-Stratocumulus

منابع

-دارند، محمد؛ سوما زندکریمی (۱۳۹۴). واکاوی سنجش دقت زمانی- مکانی بارش پایگاه دادهٔ مرکـز پـیش‌بینــی میـان‌مـدت جـوّی اروپـایی (ECMWF) بـر روی ایـران زمین، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. دورهٔ ۴۷. شـمارهٔ ۴. صفحات ۶۷۵-۶۵۱.

-فلاح‌قالهری، غلام‌عباس(۱۳۹۳).آب و هوای لایهٔ‌مرزی، انتشارات دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ۴۰۳ص.

- Ahlgrimm, M., & Forbes, R. (2014). Improving the representation of low clouds and drizzle in the ECMWF model based on ARM observations from the Azores. Monthly Weather Review, 142(2), 668-685.
- Ahlgrimm, M., & Randall, D. A. (2006). Diagnosing monthly mean boundary layer properties from reanalysis data using a bulk boundary layer model. Journal of the atmospheric sciences, 63(3), 998-1012.
- Baklanov, A., Mestayer, P. G., Clappier, A., Zilitinkevich, S., Joffre, S., Mahura, A., & Nielsen, N. W. (2008). Towards improving the simulation of meteorological fields in urban areas through updated/advanced surface fluxes description. Atmospheric Chemistry and Physics, 8(3), 523-543.
- Barlow, J. F (2014). Progress in observing and modelling the urban boundary layer. Urban Climate, 10, 216-240.
- Chemel, C., & Sokhi, R. S. (2012). Response of London's urban heat island to a marine air intrusion in an easterly wind regime. Boundary-layer meteorology, 144(1), 65-81.
- Du, C., Liu, S., Yu, X., Li, X., Chen, C., Peng, Y.,& Wang, F. (2013). Urban boundary layer height characteristics and relationship with particulate matter mass concentrations in Xi'an, central China.Aerosol Air Qual Res,13,1598-1607.
- Dupont, J. C., Haeffelin, M., Badosa, J., Elias, T., Favez, O., Petit, J. E., ... & Bonne, J. L. (2016). Role of the boundary layer dynamics effects on an extreme air pollution event in Paris. Atmospheric Environment, 141, 571-579.
- Guo, J., Miao, Y., Zhang, Y., Liu, H., Li, Z., Zhang, W., ... & Zhai, P. (2016). The climatology of planetary boundary layer height in China derived from radiosonde and reanalysis data. Atmos. Chem. Phys, 16(20), 13-309.
- Jiang, Q., Doyle, J. D., & Smith, R. B. (2006). Interaction between trapped waves and boundary layers. Journal of the atmospheric sciences, 63(2), 617-633.
- Jiang, Q., Smith, R. B., & Doyle, J. D. (2008). Impact of the atmospheric boundary layer on mountain waves. Journal of the Atmospheric Sciences, 65(2), 592-608.
- Köhler, M., Ahlgrimm, M., & Beljaars, A. (2011). Unified treatment of dry convective and stratocumulus-topped boundary layers in the ECMWF model. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137(654), 43-57.
- Letzel, M. O., & Raasch, S. (2003). Large eddy simulation of thermally induced oscillations in the convective boundary layer. Journal of the atmospheric sciences, 60(18), 2328-2341.
- Liu, J., Huang, J., Chen, B., Zhou, T., Yan, H., Jin, H., ... & Zhang, B. (2015). Comparisons of PBL heights derived from CALIPSO and ECMWF reanalysis data over China. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 153, 102-112.
- Liu, S., & Liang, X. Z (2010). Observed diurnal cycle climatology of planetary boundary layer height. Journal of Climate, 23(21), 5790-5809.
- Sarkar, A., & De Ridder, K. (2011). The urban heat island intensity of Paris: a case study based on a simple urban surface parametrization. Boundary-layer meteorology, 138(3), 511-520.
- Scorer, R. S. (1949). Theory of waves in the lee of mountains. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 75(323), 41-56.
- Seidel, D. J., Ao, C. O., & Li, K (2010). Estimating climatological planetary boundary layer heights from radiosonde observations: Comparison of methods and uncertainty analysis. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 115(D16).
- Simmons, A. J., Willett, K. M., Jones, P. D., Thorne, P. W,&Dee,D.P (2010). Low-frequency variations in surface atmospheric humidity, temperature, and precipitation: Inferences from reanalyses and monthly gridded observational data sets. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 115 (D1).
- Smith, C. M., & Skyllingstad, E. D (2009). Investigation of upstream boundary layer influence on mountain wave breaking and lee wave rotors using a large-eddy simulation. Journal of the Atmospheric Sciences, 66(10), 3147-3164.

- Smith, R. B. (2007). Interacting mountain waves and boundary layers. Journal of the atmospheric sciences, 64(2), 594-607.
- Stull, R. B. (2012). An introduction to boundary layer meteorology (Vol. 13). Springer Science & Business Media. Van Dam, B., Helmig, D., Neff, W,& Kramer, L. (2013). Evaluation of boundary layer depth estimates at Summit Station, Greenland. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 52(10), 2356-2362.
- Von Engeln, A., & Teixeira, J. (2004). A ducting climatology derived from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts global analysis fields. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 109 (D18).
- Von Engeln, A., & Teixeira, J(2013). A planetary boundary layer height climatology derived from ECMWF reanalysis data. Journal of Climate, 26(17), 6575-6590.
- Wouters, H., Ridder, K. D., Demuzere, M., Lauwaet, D., & van Lipzig, N. P. M (2013). The diurnal evolution of the urban heat island of Paris: a model-based case study during summer 2006. Atmospheric Chemistry and Physics, 13(17), 8525-8541.
- Zhang, Y., Seidel, D. J., & Zhang, S (2013). Trends in planetary boundary layer height over Europe. Journal of Climate, 26(24), 10071-10076.

Geography and Development
17nd Year-No.54–Spring 2019
Received:20/06/2017 Accepted: 17/04/2018

Analysis of Spatio-Temporal Changes of the Boundary Layer Height Based on Output European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) in Iran

Dr. Mahmoud Ahmadi
Associate Professor of Climatology
Faculty of Earth Sciences
University of Shahid Beheshti

Abas Ali Dadashiroudbari
Ph.D Student of Urban Climatology
Faculty of Earth Sciences
University of Shahid Beheshti

Hamzeh Ahmadi
Ph.D of Agricultural Climatology,
Faculty of Geography and Environmental Sciences,
University of Hakim Sabzevari

Introduction

The boundary layer is of great importance in terms of air quality and the processes of air and meteorology. The term "boundary layer" has been taken from the topic of fluid mechanics by the meteorologist's wisdom, whose research has focused on the lower airway. Some scholars have focused their attention on pilot studies of the boundary layer and its transformation on the Earth's surface. The height of the frontier is one of the most important components of the spreading of pollutants and the air quality of the layer near the ground. The boundary layer is defined as a layer of fluid (water or gas) that immediately lies adjacent to a material level and a significant exchange of momentum, heat, or mass occurs between the surface and the fluid. The boundary layer is formed due to the interaction between the atmosphere and its surface (ground or water) at a time scale of several hours to one day. The boundary layer, combined with a combination of mechanisms, provides human life by mixing and exchanging air as a fluid. Everything that occurs near the surface of the earth is more important in the planning and use of weather data. Layer height studies are widely used to better understand this part of the atmosphere for weather applications in urban pollution management, land use, and human well-being.

Methods and Material

In this study, the ERA-Interim version of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) was used to evaluate the Boundary Layer Height (BLH) over Iran. As mentioned, the ERA-Interim version of the ECMWF database was used to examine the height of the layer. The BLH data for the Iranian region was downloaded monthly from 1979 to 2015, with a spatial resolution of 0.125 × 0.125 degrees arc from the base database. Subsequently, using NcDump software, decoded data was obtained, resulting in arrays of dimensions of 9966 × 444.

Results and Discussion

Maximum height of the boundary layer in June and minimum height of the boundary layer occurs in January. Changes when the boundary layer of high impact tracks seasonal changes and circadian cycle takes. The variation pattern of the height of the layer is influenced by the condition of air and ground heating in different seasons and the elevation and roughness of the region. In cold weather, the thickness of the fringe is less and in the warmer days, the reverse is increased. The air temperature can be considered as the main factor in these changes in the height and thickness of the boundary layer. The higher the surface heating, the greater the thickness of the fringe, so there is a direct relationship between the air temperature and the thickness of the fringe. The pattern of spatial variations in the height of the border layer in the cold months is more coherent than the warm months of the year. The coastal and adjacent areas of the sea always have the lowest thickness of the boundary layer due to the role of sea moderation in the air temperature. In terms of spatial arrangement, the high and rugged areas of Zagros and coastal areas with the least thickness of the borderline and desert areas of the inner regions, especially in south-eastern Iran, are the thickness of the border layer at the highest level. In the cold months of the year, the highest elevation of the border layer in the southeast of Iran and in the hot years of the year, especially in June and July, is drawn to the western and southern Kerman and Northern provinces of Hormozgan. Throughout the year, the areas adjacent to the sea are the lowest point of the border layer due to the role of moderating the sea. In mid-spring until mid-summer, the height of the fringe height is the highest. From the west to the east and from north to south, the height of the border is increased. The highest point of the fringe height corresponds to the Barry and Desert areas and the desert with a warm and dry temperature regime.

Conclusion

The spatiotemporal changes in the height of the border layer over Iran have a vital effect on low circulation patterns, as well as its vertical patterns. Based on the prevailing physical processes, two levels of surface layer elevation can be identified for the country: 1. Coastal regions that provide a change in lake with sustainability in terms of dry indoor regions; 2. the lining of the inner desert areas with high instability. These regimes have vast geographic areas. In Iran, when the convergence belt affects the south eastern regions of the region, parts of these areas, especially in the Oman Sea region, are affected by the ITCZ system, which can be seen in the change of the height of the border layer. In the northern coastal areas and some of the southern coastal areas, especially in the Persian Gulf, which are cloudy, the height of the border is low. These low levels are related to the stable nature of these clouds (the thermodynamic structure associated with the type of cloud), so that in areas where the Cumulus clouds are more dominant than Stratocumulus clouds, one should see a lower depth of the boundary layer on one side and It was less seasonal and even daily change on the other. This can easily be seen in the monthly fluctuation of the lake height compared with the coastal areas of the north and south of the country.

Keywords: Boundary layer height (BLH), Changes in spatiotemporal boundary layer, ECMWF database, Version of the ERA-Interim, Iran.

References

- Darand, Mohammad; Soma Zand Karimi (2005). Detection of the temporal-spatial accuracy of the rainfall data base of the European Center for Mid-Range Forecasting (ECMWF) on Iran Land, Natural Geography Research. Period 47, No. 4. Pages 651-675.
- Fallah Ghalheri, Gholam Abbas (2004). The Wetlands, Hakim Sabzevari University Press, Sabzevar, P.403.
- Ahlgrimm, M., & Forbes, R. (2014). Improving the representation of low clouds and drizzle in the ECMWF model based on ARM observations from the Azores. Monthly Weather Review, 142(2), 668-685.
- Ahlgrimm, M., & Randall, D. A. (2006). Diagnosing monthly mean boundary layer properties from reanalysis data using a bulk boundary layer model.Journal of the atmospheric sciences,63(3),998-1012.
- Baklanov, A., Mestayer, P. G., Clappier, A., Zilitinkevich, S., Joffre, S., Mahura, A., & Nielsen, N. W (2008). Towards improving the simulation of meteorological fields in urban areas through updated/advanced surface fluxes description. Atmospheric Chemistry and Physics, 8(3), 523-543.
- Barlow, J. F(2014).Progress in observing and modelling the urban boundary layer.Urban Climate, 10, 216-240.
- Chemel, C., & Sokhi, R. S. (2012). Response of London’s urban heat island to a marine air intrusion in an easterly wind regime. Boundary-layer meteorology, 144(1), 65-81.
- Darand, M., Zande Karimi, S. (2015). Evaluation of Spatio-Temporal Accuracy of Precipitation of European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) over Iran. Physical Geography Research Quarterly, 47(4), 651-675. doi: 10.22059/jphgr.2015.56054 (In Persian).
- Du, C., Liu, S., Yu, X., Li, X., Chen, C., Peng, Y., ... & Wang, F. (2013). Urban boundary layer height characteristics &relationship with particulate matter mass concentrations in Xi’an,central China.Aerosol Air Qual Res,13,1598-1607.
- Dupont, J. C., Haeffelin, M., Badosa, J., Elias, T., Favez, O., Petit, J. E., ... & Bonne, J. L. (2016). Role of the boundary layer dynamics effects on an extreme air pollution event in Paris. Atmospheric Environment, 141, 571-579.
- Fallah Ghalhari, Gholmababs (2014). Boundary layer climate, Hakim Sabzevari University Press, Sabzevar, 403 p (In Persian).
- Guo, J., Miao, Y., Zhang, Y., Liu, H., Li, Z., Zhang, W., & Zhai, P. (2016). The climatology of planetary boundary layer height in China derived from radiosonde and reanalysis data. Atmos. Chem. Phys, 16(20), 13-309.
- Jiang, Q., Doyle, J. D., & Smith, R. B. (2006). Interaction between trapped waves and boundary layers. Journal of the atmospheric sciences, 63(2), 617-633.
- Jiang, Q., Smith, R. B., & Doyle, J. D. (2008). Impact of the atmospheric boundary layer on mountain waves. Journal of the Atmospheric Sciences, 65(2), 592-608.
- Köhler, M., Ahlgrimm, M., & Beljaars, A. (2011). Unified treatment of dry convective and stratocumulus-topped boundary layers in the ECMWF model. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137(654), 43-57.
- Letzel, M. O., & Raasch, S. (2003). Large eddy simulation of thermally induced oscillations in the convective boundary layer. Journal of the atmospheric sciences, 60(18), 2328-2341.
- Liu, J., Huang, J., Chen, B., Zhou, T., Yan, H., Jin, H., ... & Zhang, B. (2015). Comparisons of PBL heights derived from CALIPSO and ECMWF reanalysis data over China. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 153, 102-112.

- Liu, S., & Liang, X. Z. (2010). Observed diurnal cycle climatology of planetary boundary layer height. Journal of Climate, 23(21), 5790-5809.
- Sarkar, A., & De Ridder, K. (2011). The urban heat island intensity of Paris: a case study based on a simple urban surface parametrization. Boundary-layer meteorology, 138(3), 511-520.
- Scorer, R. S. (1949). Theory of waves in the lee of mountains. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 75(323), 41-56.
- Seidel, D. J., Ao, C. O., & Li, K. (2010). Estimating climatological planetary boundary layer heights from radiosonde observations: Comparison of methods and uncertainty analysis. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 115(D16).
- Simmons, A. J., Willett, K. M., Jones, P. D., Thorne, P. W., & Dee, D. P. (2010). Low-frequency variations in surface atmospheric humidity, temperature, and precipitation: Inferences from reanalyses and monthly gridded observational data sets. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 115(D1).
- Smith, C. M., & Skyllingstad, E. D. (2009). Investigation of upstream boundary layer influence on mountain wave breaking and lee wave rotors using a large-eddy simulation. Journal of the Atmospheric Sciences, 66(10), 3147-3164.
- Smith, R. B. (2007). Interacting mountain waves and boundary layers. Journal of the atmospheric sciences, 64(2), 594-607.
- Stull, R. B. (2012). An introduction to boundary layer meteorology (Vol. 13). Springer Science & Business Media.
- Van Dam, B., Helmig, D., Neff, W., & Kramer, L (2013). Evaluation of boundary layer depth estimates at Summit Station, Greenland. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 52(10), 2356-2362.
- Von Engeln, A., & Teixeira, J (2004). A ducting climatology derived from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts global analysis fields. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 109(D18).
- Von Engeln, A., & Teixeira, J. (2013). A planetary boundary layer height climatology derived from ECMWF reanalysis data. Journal of Climate, 26(17), 6575-6590.
- Wouters, H., Ridder, K. D., Demuzere, M., Lauwaet, D., & van Lipzig, N. P. M. (2013). The diurnal evolution of the urban heat island of Paris: a model-based case study during summer 2006. Atmospheric Chemistry and Physics, 13(17), 8525-8541.
- Zhang, Y., Seidel, D. J., & Zhang, S (2013). Trends in planetary boundary layer height over Europe. Journal of Climate, 26(24), 10071-10076.