

تحلیل فضایی تغییرات ماهانه ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای در ایران

سیدحسین میرموسوی^۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۰۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۸

چکیده

لایه مرزی سیاره‌ای پایین‌ترین بخش جو است که مستقیماً تحت تأثیر زمین بوده و مبادلات دما و تابش نقش کلیدی را در تغییرات ارتفاع این لایه دارد. تغییرات ارتفاع این لایه نیز می‌تواند نقش بسیار مهمی در کنترل پدیده‌های مختلف جوئی نظیر ابر، مه، آلاینده‌ها و... داشته باشد. ارتفاع لایه مرزی تحت تأثیر عوامل مختلفی نظیر تغییرات توپوگرافی، دما، رطوبت نسبی، شار تابشی و عرض جغرافیایی تغییر پیدا می‌کند. هر گونه تغییر در ارتفاع لایه مرزی می‌تواند پدیده‌های جوئی در زیر این لایه را تحت تأثیر قرار دهد. در این مطالعه تغییرات ماهانه ارتفاع لایه مرزی در ایران در طی دوره ۶۲ ساله (۲۰۲۱-۱۹۵۹) با استفاده از داده‌های نسخه ERA5 سایت ECMWF مورد بررسی قرار گرفت و به منظور تحلیل الگوهای فضایی حاکم بر تغییرات ارتفاع لایه مرزی از مدل GETIS ORD استفاده شد. نتایج حاصل از مطالعه نشان داد که ارتفاع این لایه در طی ماه‌های مختلف سال از الگوهای خوشه‌ای تبعیت می‌کند. دو کانون مهم لکه‌های سرد (ارتفاع کم) در بخش شمال‌غرب و شمال‌شرق ایران از معنی‌داری بالایی برخوردار هستند و نیمه جنوبی ایران مخصوصاً استان خوزستان، استان کرمان و جنوب استان سیستان و بلوچستان مهم‌ترین لکه‌های داغ (مناطق با ارتفاع زیاد) هستند. نتایج حاصل از تحلیل رگرسیون چندمتغیره نشان داد که شش متغیر میانگین دما، میانگین رطوبت نسبی، ضریب رطوبت خاک، عرض جغرافیایی، ارتفاع و فشار هوا با میزان همبستگی کلی ۷۰/۷۳ به ترتیب مهم‌ترین عوامل مؤثر در تغییرات ارتفاع لایه مرزی در ایران هستند.

واژه‌های کلیدی: لایه مرزی سیاره‌ای، ایران، مدل GETIS ORD، تحلیل فضایی

۱- مقدمه

پراکندگی آلودگی هوا به این نتیجه رسیدند که طرح‌واره‌های لایه مرزی سیاره‌ای، از جمله طرح‌واره YSU و MYNN2 برای مطالعات پراکندگی آلودگی هوا بهتر هستند. مهدیان و همکاران (۱۳۹۹) نیز در مطالعه‌ای با عنوان تغییرات سالانه ارتفاع لایه مرزی شهر تهران از توابع چندبعدی استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که سقف متوسط ارتفاع لایه مرزی در حدود ۸۵۰ متری سطح زمین قرار دارد و در شرایط شبانه به‌طور متوسط تا حدود ۸۰ متری و در شرایط روزانه تا حدود ۲۳۰۰ متری سطح زمین پایین و بالا می‌رود. در مطالعه‌ای دیگر ضرغامی‌پور و ملکوتی (۱۳۹۹) در زمینه مطالعه میدان باد لایه مرزی سیاره‌ای روی جزیره قشم از مدل WRF استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که سرعت باد در فصول بهار و تابستان از مقادیر بالاتری برخوردار است و زبری جزیره باعث کاهش سرعت باد، رخداد همگرایی و چرخش میدان باد بر روی تنگه هرمز می‌شود.

محققین خارجی مطالعات متعددی در مورد لایه مرزی سیاره‌ای انجام داده‌اند که از آن جمله می‌توان به مطالعات سیدل و همکاران (۲۰۱۲) اشاره نمود که تغییرات ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای را در ایالات متحده آمریکا و اروپا مورد بررسی قرار دادند و برای این منظور از داده‌های رادیوسوند و مرکز اروپایی پیش‌بینی هوای متوسط (ECMWF) استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که تغییرات این لایه در فصول گرم سال شدت بیشتری نسبت به سایر فصول دارد. در ارتباط با تغییرات بلند مدت لایه مرزی در مناطق بیابانی و سطح اقیانوس‌ها انگلن و تکسیرا (۲۰۱۳) مطالعه‌ای را انجام دادند و برای این انجام این مطالعه از داده‌های ECMWF استفاده نمودند و رابطه تغییرات ارتفاع لایه مرزی را با متغیرهای مختلفی همچون رطوبت نسبی، دما و فشار مورد ارزیابی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که تغییرات ارتفاع این لایه با تغییرات رطوبت نسبی ارتباط بیشتری نسبت به سایر پارامترها دارد. ارتفاع لایه مرزی در نواحی غربی قاره‌ها به دلیل وجود ابرهای مترکم، کم و در مناطق بیابانی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. دیوکر و

لایه مرزی سیاره‌ای (PBL) به عنوان پایین‌ترین قسمت تروپوسفر، پویاترین بخشی از جو است که تحت تأثیر مستقیم فعل و انفعالات جو و سطح زمین قرار دارد (گرت، ۱۹۹۲: ۱۲ و استل، ۲۰۱۲: ۴۲). این فعل و انفعالات بین سطح زمین و اتمسفر در بازه‌های زمانی کوتاه رخ می‌دهد و نقش مهمی در توسعه لایه مرزی دارد. ارتفاع لایه مرزی همچنین تحت تأثیر شرایط جوی، ویژگی‌های توپوگرافی و نوع پوشش زمین است و یک پارامتر مهم برای بسیاری از پدیده‌های هواشناسی به‌شمار می‌آید که کاربردهای مختلفی مانند نظارت بر کیفیت هوا، تشکیل و تکامل ابرها، شارهای سطحی و چرخه هیدرولوژیکی اتمسفر دارد (گرت، ۱۹۹۴: ۹۰). از آنجایی که ارتفاع لایه مرزی نشان‌دهنده عمق اختلاط متلاطم عمودی است، بنابراین در افزایش و یا کاهش غلظت آلاینده‌های نزدیک به سطح نقش بسیار مؤثری داشته و به عنوان یک پارامتر ضروری در پیش کیفیت هوا محسوب می‌شود (سو و خان، ۲۰۱۸: ۱۵۹۲۳). علاوه بر این، ارتفاع این لایه یک عامل کلیدی در پیش‌بینی‌های عددی آب و هوا است. از آنجایی که ارتفاع پایه ابرها معمولاً نزدیک به ارتفاع لایه مرزی است این لایه میزان توسعه ابر را تعیین کرده و موجب انتقال از همرفت کم عمق به عمیق در ابرها می‌شود (منکس و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۳۲۰۹).

بنابراین بررسی و تحلیل تغییرات لایه مرزی اهمیت بسیار زیادی در مطالعات آب و هواشناسی دارد. از جمله مطالعات داخلی می‌توان به مطالعه نصیری و همکاران (۱۳۹۶) اشاره نمود که در بررسی تغییرات ارتفاع و ضخامت لایه مرزی در شرایط گرد و غباری شهر اهواز نسبت به تحلیل سینوپتیک این پدیده اقدام نمودند و به این نتیجه رسیدند که ارتباط مستقیم و معنی‌داری بین شدت گرد و غبار و ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای در استان خوزستان وجود دارد. رنجبر و دنیادوست (۱۳۹۶) در مطالعه‌ای با عنوان ارزیابی عملکرد طرح‌واره‌های لایه مرزی سیاره‌ای مدل WRF در شبیه‌سازی پارامترهای جریان لایه مرزی برای استفاده در مطالعات

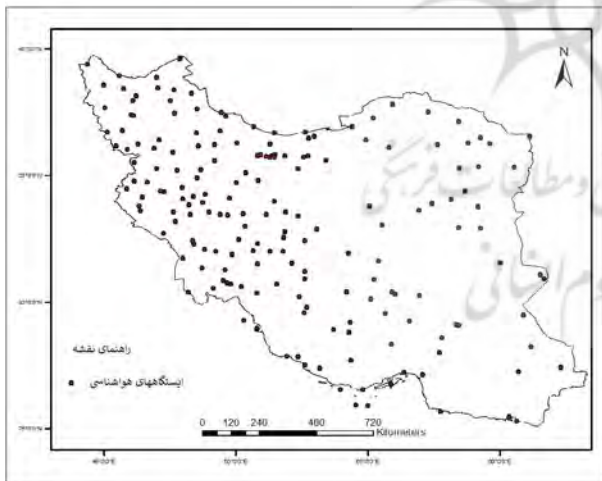
حاضر نیز با هدف بررسی تغییرات ماهانه و سالانه ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای در ایران انجام شده است. همچنین سعی شده با بهره‌گیری از مدل‌های تحلیل فضایی، به شناسایی الگوهای فضایی این تغییرات پرداخته شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- داده‌ها

داده‌های مورد استفاده در این مطالعه شامل داده‌های باز تحلیل شده در مقیاس زمانی ماهانه و سالانه ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای برای کل پهنه ایران با قدرت تفکیک 0.25×0.25 درجه است که از نسخه ERA5 سایت ECMWF در دوره زمانی ۲۰۲۱-۱۹۵۹ دریافت شده است.

همچنین به منظور بررسی و تحلیل رابطه متغیرهای مختلف اقلیمی (میانگین دما، میانگین رطوبت نسبی، میانگین فشار هوا) از داده‌های هواشناسی تعداد ۱۸۷ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک در طی دوره آماری ۲۰۲۲-۲۰۰۰ استفاده شده است (نگاره ۱).



نگاره ۱: نقشه موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده

در این مطالعه به منظور بررسی نقش رطوبت خاک در تغییرات ارتفاع لایه مرزی از داده‌های ضریب رطوبت خاک MERRA-2 با قدرت تفکیک 0.5×0.625 از پایگاه داده GES DIC متعلق به ناسا دریافت شده است.

کاسمن (۲۰۱۵) تغییرات ارتفاع لایه مرزی را در نواحی کوهستانی و دشت‌ها بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که شدت تغییرات این لایه در نواحی کوهستانی به دلیل جریان بادهای گرادیان بسیار بیشتر از دره‌ها و دشت‌ها است. گوو و همکاران (۲۰۱۶) ارتفاع لایه مرزی را در چین توسط داده‌های باز تحلیل شده و رادیوسوند استخراج و با هم مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که توافق خوبی بین این دو مجموعه داده وجود دارد. آن‌ها تأکید کردند که تکنیک‌های سنجش از دور، به‌عنوان یک روش جایگزین مناسب می‌تواند برای تعیین لایه مرزی استفاده شود. گوو و همکاران (۲۰۱۹) روند تغییرات بلندمدت لایه مرزی را در چین بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که ارتفاع مرزی در چین طی سال‌های ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۳ دارای روند افزایشی بوده اما کاهش غیریکنواختی پس از سال ۲۰۰۴ اتفاق افتاده است. پالم و همکاران (۲۰۲۱) ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای را بر اساس داده‌های حاصل از ماهواره‌های ICESat-2 و CATS مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که لایه مرزی تخمین زده شده توسط لیدار در ارتفاعات دارای همبستگی فضایی بالایی نسبت به سایر نقاط است اما عموماً این تخمین در اقیانوس‌ها در اکثر موارد ۴۰۰ متر بیشتر از حد معمول بوده و همبستگی فضایی پایینی نیز دارد. وانگ (۲۰۲۲) نیز در مطالعه‌ای در زمینه بررسی تغییرات روزانه و فصلی ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای در آسیای شرقی به این نتیجه رسید که ارتفاع لایه مرزی در این منطقه به‌شدت ناپایدار بوده و عمدتاً تابعی از توپوگرافی و تابش است و بیشترین ارتفاع در فلات تبت به دلیل بالا بودن ارتفاع و شار تابشی ثبت شده است. در زمینه سایر پژوهش‌های مربوط به لایه مرزی می‌توان به مطالعات ساویر (۲۰۱۳)، دای و همکاران (۲۰۱۴)، زانگ و همکاران (۲۰۱۶)، سو و همکاران (۲۰۱۷)، ال‌بکش (۲۰۲۰) و ساها و همکاران (۲۰۲۲) نیز اشاره نمود.

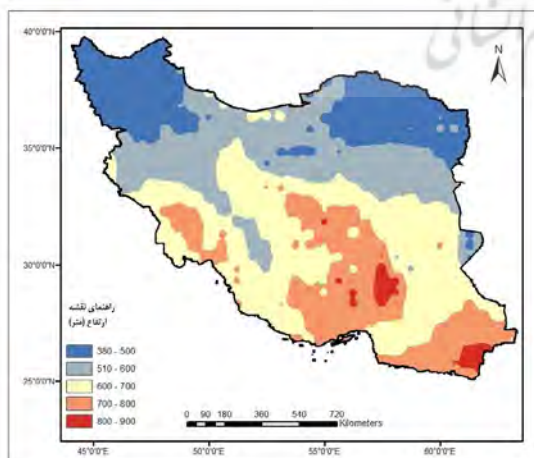
با توجه به اینکه مطالعات مربوط به تغییرات ارتفاع لایه مرزی از اهمیت زیادی برخوردار است بنابراین، مطالعه

۲-۲- روش‌ها

رگرسیون استاندارد چندمتغیره استفاده شده است. دلیل استفاده از این روش این است که هر کدام از این متغیرها دارای واحدهای اندازه‌گیری متفاوتی هستند و به همین دلیل نمی‌توان به‌طور دقیق سهم هر کدام از این متغیرها را در تغییرات ارتفاع لایه مرزی مشخص کرد. بنابراین برای محاسبه اهمیت نسبی هر کدام از این متغیرها لازم است نسبت به استانداردسازی متغیرها براساس میانگین و انحراف معیارشان قبل از مدل‌سازی رگرسیونی اقدام شود. از این‌رو رگرسیون استاندارد چندمتغیره روش مناسب‌تری برای این منظور محسوب می‌شود (عساکره، ۱۳۹۰: ۲۵۳).

۳- بحث و نتیجه‌گیری

بررسی تغییرات میانگین ارتفاع لایه مرزی در ماه ژانویه در ایران نشان می‌دهد بیشترین ارتفاع، در این ماه ۹۰۰ متر است که عمدتاً در بخش‌هایی از شرق استان کرمان و جنوب و جنوب‌شرق استان هرمزگان قرار گرفته است. در این ماه میانگین حداقل ارتفاع هم به میزان ۳۸۰ متر در شمال‌غرب و جنوب‌شرق استان سیستان و بلوچستان قرار دارد. با توجه به پایین بودن دمای هوا در این ماه، استقرار ارتفاع زیاد در جنوب ایران و ارتفاع کم در شمال‌غرب و شمال‌شرق ایران، نشان از تأثیر شدید دما در تغییرات ارتفاع لایه مرزی دارد (نگاره ۲).



نگاره ۲: نقشه ارتفاع لایه مرزی ماه ژانویه (۲۰۲۱-۱۹۵۹)

در مطالعه حاضر، در مرحله نخست به منظور آماده‌سازی داده‌ها با استفاده از قابلیت برنامه‌نویسی در نرم‌افزار Matlab نسبت به تهیه نقشه‌های با میانگین ۱۳ ساله دوازده ماه سال اقدام شده است و سپس با استفاده از نرم‌افزار ARC GIS نقشه‌های میانگین ماهانه ارتفاع لایه مرزی در ایران ترسیم شده‌اند. در مرحله بعد برای تحلیل تغییرات فضایی حاکم، ارتفاع لایه مرزی در ماه‌های مختلف از آماره فضایی $Getis-Ord\ G_i^*$ استفاده شده است. اساس این مدل بر مبنای آن است که ویژگی‌های دارای مقادیر بالا یا پایین به‌صورت مکانی خوشه‌بندی می‌شوند. این ابزار با نگاه کردن به هر ویژگی در بافت و ویژگی‌های همسایه کار می‌کند. یک ویژگی با ارزش بالا مهم است اما ممکن است از نظر آماری نقطه داغ محسوب نشود (انتظاری و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۳۵). برای اینکه یک نقطه معنی‌دار از نظر آماری باشد، بایستی یک پیکسل دارای مقادیر بالا با پیکسل‌های مجاور با مقادیر بالا نیز احاطه شود. آماره $Getis-Ord\ G_i^*$ از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_j w_{ij}(d)x_j - \bar{X}\sum_j w_{ij}(d)}{s\sqrt{\frac{n\sum_j w_{ij}^2(d) - (\sum_j w_{ij}(d))^2}{n-1}}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه (۱) w_{ij} ماتریس وزنی متقارن ۱ یا ۰ با $1s$ برای همه ویژگی‌ها در فاصله d است، x_j مقدار مشخصه مرتبط با ویژگی j و s است. \bar{X} و S به ترتیب میانگین و انحراف معیار مقادیر صفت هستند. مقادیر \bar{X} و S در رابطه ۱ به‌صورت روابط (۲) و (۳) محاسبه می‌شوند.

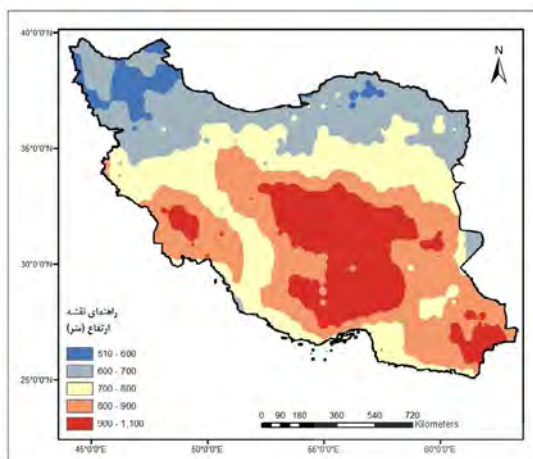
$$\bar{X} = \frac{\sum_i x_i}{n} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_j x_j^2}{n} - (\bar{X})^2} \quad \text{رابطه (۳)}$$

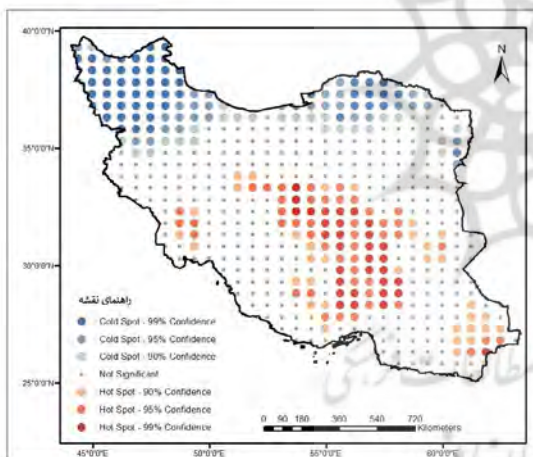
همچنین به‌منظور تحلیل متغیرهای مؤثر در تغییرات ارتفاع لایه مرزی نظیر دما، رطوبت نسبی، رطوبت خاک و ... از روش

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (س)
تحلیل فضایی تغییرات ماهانه ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای در ایران / ۱۲۱

شمال غرب و شمال شرق ایران با ضریب اطمینان ۹۹ درصد، از معنی داری خاصی برخوردار است (نگاره ۵).



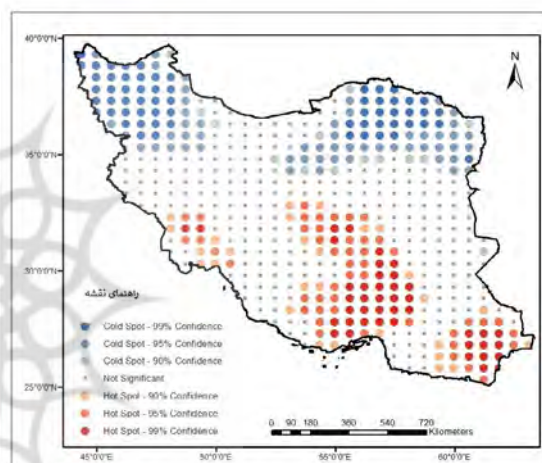
نگاره ۴: نقشه ارتفاع لایه مرزی ماه فوریه (۲۰۲۱-۱۹۵۹)



نگاره ۵: نقشه مدل Getis Ord ماه فوریه (۲۰۲۱-۱۹۵۹)

در ماه مارس حداکثر ارتفاع لایه مرزی به ۱۳۹۳ متر افزایش پیدا کرده است و استان خوزستان، بخش‌های وسیعی از مناطق مرکزی تا جنوب و جنوب شرق ایران مناطقی هستند که بالاترین ارتفاع را به خود اختصاص داده‌اند. متوسط حداقل ارتفاع لایه مرزی در این ماه ۵۴۹ متر است که باریکه‌ای از استان‌های اردبیل و گیلان را شامل می‌شود. میانگین ارتفاع لایه مرزی در ماه مارس برای کل پهنه ایران ۱۰۲۸ متر است (نگاره ۶).

متوسط ارتفاع لایه مرزی ماه ژانویه در کل پهنه ایران نیز ۶۰۸ متر است. تحلیل لکه‌های داغ و سرد نیز وجود معنی داری در خوشه‌های با مقادیر بالا در سه بخش مختلف کشور را نشان می‌دهد. بخش اول شامل محدوده‌ای از جنوب غرب ایران (استان خوزستان)، بخش دوم مناطق مرکزی و جنوبی ایران در محدوده استان‌های یزد، کرمان و هرمزگان و بخش سوم شمال گوشه انتهایی جنوب شرق ایران است. مقادیر پایین در نیمه شمالی ایران در دو منطقه شمال غرب و شمال شرق ایران متمرکز شده است (نگاره ۳).

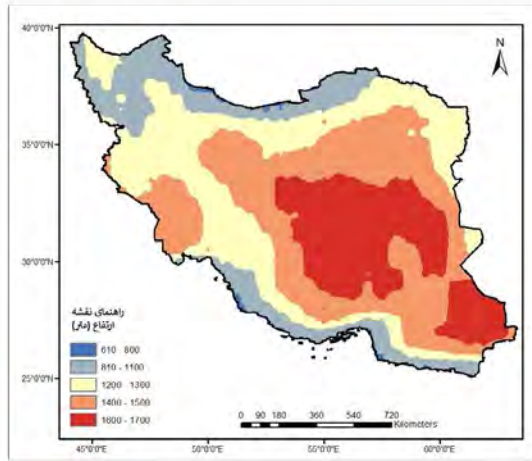


نگاره ۳: نقشه مدل Getis Ord ماه ژانویه (۲۰۲۱-۱۹۵۹)

در ماه فوریه حداکثر ارتفاع لایه مرزی به میزان ۱۱۰۰ متر است که در بخش‌های مرکزی ایران در محدوده استان‌های یزد و کرمان و همچنین بخش‌هایی از جنوب شرق ایران قرار دارد. حداقل ارتفاع هم به میزان ۵۱۰ متر در دو بخش شمال غرب (در بخش‌هایی از استان‌های آذربایجان شرقی و اردبیل و شمال شرق ایران در بخش‌هایی از استان گلستان قرار دارد. متوسط ارتفاع لایه مرزی ایران در این ماه ۷۷۷ متر تخمین زده شده است (نگاره ۴).

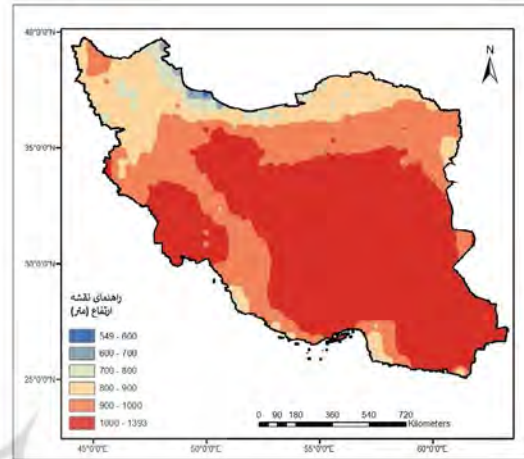
تحلیل لکه‌های داغ و سرد وجود سه لکه داغ (ارتفاع زیاد) در جنوب شرق ایران (استان خوزستان)، جنوب شرق (استان سیستان و بلوچستان) و مناطق مرکزی ایران را نشان می‌دهد. دو لکه سرد (ارتفاع پایین) هم همانند ماه قبل در

جنوب شرقی را نشان می دهد (نگاره ۹).

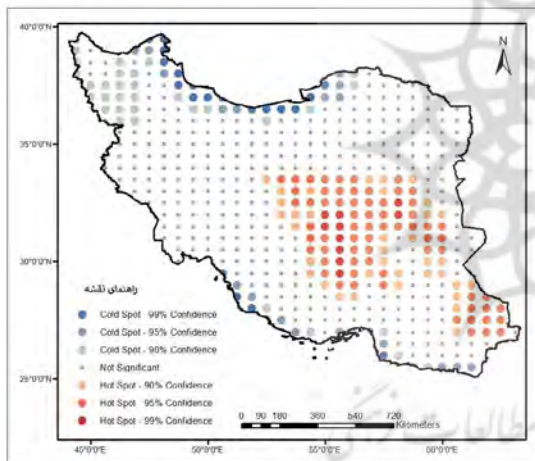


نگاره ۸: نقشه ارتفاع لایه مرزی ماه آوریل (۱۹۵۹-۲۰۲۱)

تحلیل لکه های داغ و سرد معنی داری لکه سرد نیمه شمالی و مناطق محدودی از جنوب ایران و لکه های داغ در سه بخش فوق الذکر در نیمه جنوبی را نشان می دهد (نگاره ۷).



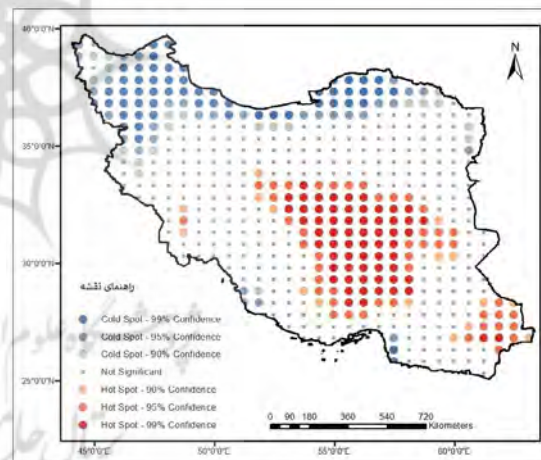
نگاره ۶: نقشه ارتفاع لایه مرزی ماه مارس (۱۹۵۹-۲۰۲۱)



نگاره ۹: نقشه مدل Getis Ord ماه آوریل (۱۹۵۹-۲۰۲۱)

در ماه می حداکثر ارتفاع لایه مرزی به میزان قابل توجهی افزایش پیدا کرده و به ۲۲۱۳ متر رسیده است. سه منطقه کرمان، سیستان و بلوچستان و بخش جنوب غربی خراسان جنوبی دارای بیشترین ارتفاع هستند. در این ماه حداقل ارتفاع لایه مرزی، ۶۲۸ متر است که در نوار باریکی از سواحل خزر قرار دارد. میانگین ارتفاع کل پهنه ایران در ماه می ۱۵۰۹ متر است که نشان از افزایش قابل ملاحظه نسبت به ماه قبل دارد (نگاره ۱۰).

تحلیل لکه های داغ و سرد معنی داری لکه داغ مناطق مرکزی و جنوب شرقی را نشان می دهد. در این ماه محدود



نگاره ۷: نقشه مدل Getis Ord ماه مارس (۱۹۵۹-۲۰۲۱)

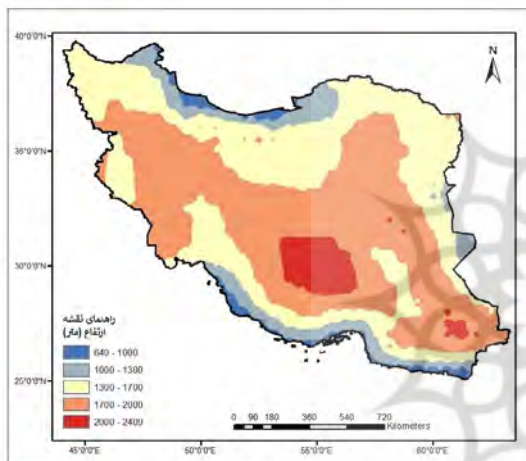
در ماه آوریل حداکثر ارتفاع لایه مرزی به میزان ۱۷۰۰ متر در مناطق مرکزی و جنوب شرقی ایران قرار دارد. حداقل ارتفاع در این ماه ۶۱۰ متر است که در مناطق محدودی از اطراف سواحل دریای خزر قابل مشاهده است. متوسط ارتفاع این لایه برای کل ایران هم ۱۲۷۳ متر می باشد (نگاره ۸).

تحلیل لکه های داغ و سرد معنی داری لکه سرد در نواری از نیمه شمالی و شمال غرب ایران و لکه های داغ در نواحی محدودی از جنوب غرب، بخش وسیعی از مرکز و

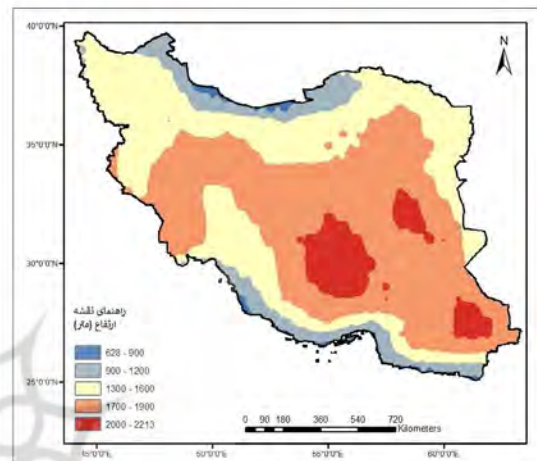
فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (مهر)
تحلیل فضایی تغییرات ماهانه ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای در ایران / ۱۲۳

پهنه کشور در ماه جون ۱۵۸۲ متر ارتفاع دارد (نگاره ۱۲). تحلیل لکه‌های داغ و سرد نیز معنی‌داری نقاط با ارتفاع بالا در استان همدان، استان کرمان و بخش‌هایی از جنوب استان‌های خراسان و سیستان و بلوچستان را نشان می‌دهد. لکه‌های سرد به‌صورت نواری از غرب دریای خزر شروع و با عبور از حاشیه خزر در شمال استان اردبیل به پایان می‌رسد. هم‌چنین یک لکه سرد دیگر با معنی‌داری بالا به‌صورت نواری در اطراف خلیج فارس و دریای عمان قابل مشاهده است (نگاره ۱۳).

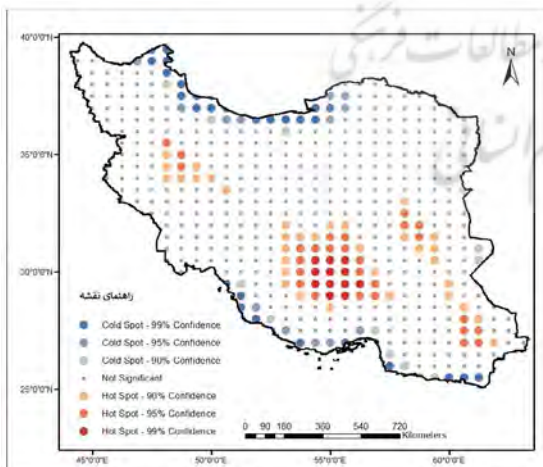
باریکی از اطراف دریای خزر از شرق تا شمال استان اردبیل هم‌چنین نوار باریکی از سواحل جنوبی ایران به عنوان لکه سرد از معنی‌داری بالایی برخوردار است که این امر می‌تواند ناشی از بالا بودن میزان رطوبت در این مناطق نسبت به سایر نقاط ایران باشد (نگاره ۱۱).



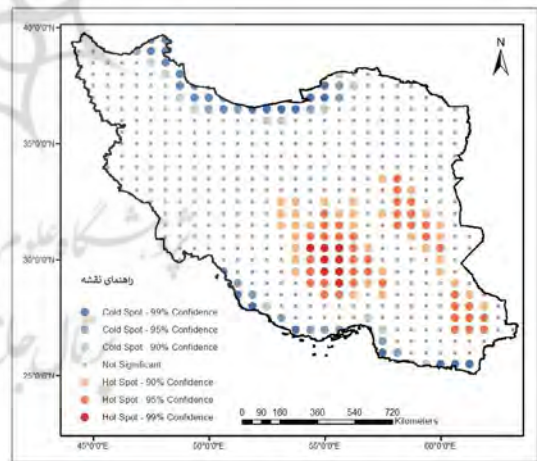
نگاره ۱۲: نقشه ارتفاع لایه مرزی ماه جون (۱۹۵۹-۲۰۲۱)



نگاره ۱۰: نقشه ارتفاع لایه مرزی ماه می (۱۹۵۹-۲۰۲۱)



نگاره ۱۳: نقشه مدل Getis Ord ماه جون (۱۹۵۹-۲۰۲۱)



نگاره ۱۱: نقشه مدل Getis Ord ماه می (۱۹۵۹-۲۰۲۱)

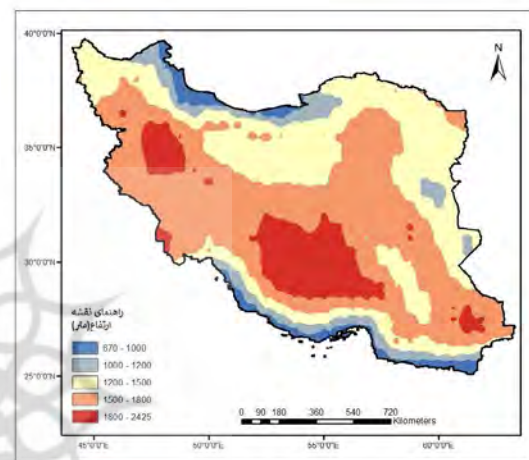
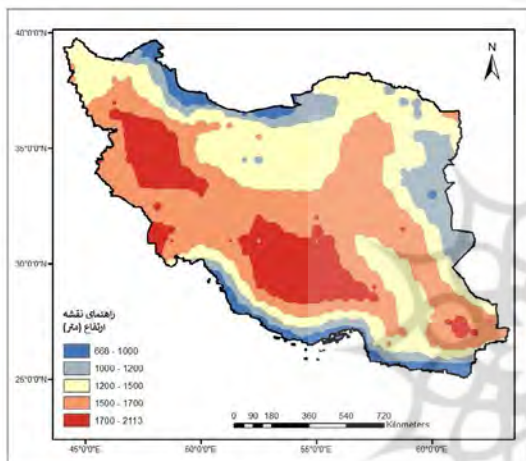
در ماه جولای هم ارتفاع لایه مرزی از ویژگی‌هایی مشابه ماه جون برخوردار است. حداکثر ارتفاع در این ماه

حداکثر ارتفاع لایه مرزی در ماه جون به میزان ۲۴۰۹ متر است که این ارتفاع در استان کرمان و بخش کوچکی از جنوب استان سیستان و بلوچستان قرار دارد. حداقل ارتفاع در این ماه نیز ۶۴۰ متر است که همانند ماه قبل نوار باریکی از بخش شمالی ایران در حاشیه دریای خزر و سواحل جنوبی ایران را شامل می‌شود. به‌طور متوسط، کل

۲۴۲۵ متر، حداقل ارتفاع ۶۷۰ متر و میانگین ارتفاع ۱۵۹۳ است (نگاره ۱۴).

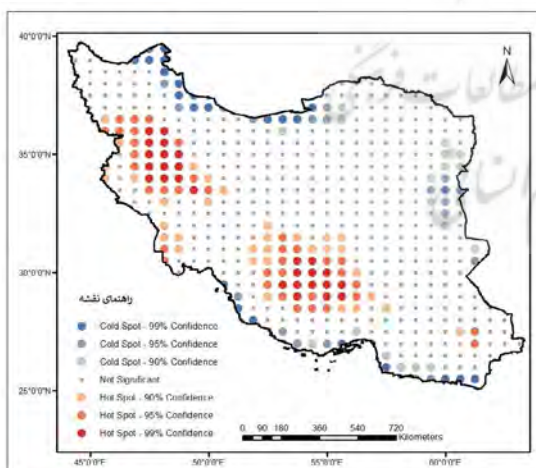
ماه جولای بالاترین میزان ارتفاع لایه مرزی در کل سال را دارد که این موضوع می‌تواند به دلیل بالا بودن میانگین دما در این ماه نسبت به سایر ماه‌های سال باشد. تحلیل لکه داغ نیز معنی‌داری الگوی حاکم در ماه قبل را با گسترش نسبی در تعداد لکه‌های داغ و سرد تأیید می‌نماید (نگاره ۱۵).

خراسان را نشان می‌دهد (نگاره ۱۷).



نگاره ۱۴: نقشه ارتفاع لایه مرزی ماه جولای (۱۹۰۹-۲۰۲۱)

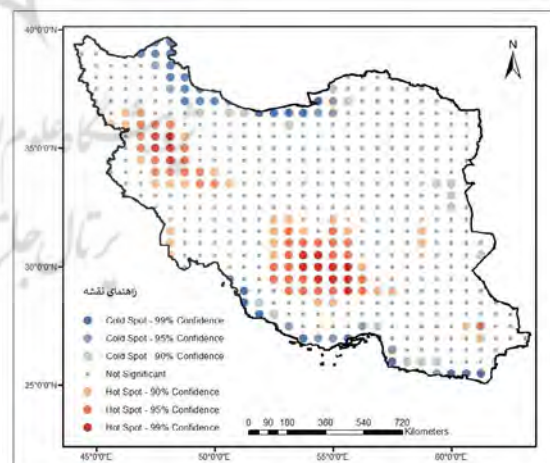
نگاره ۱۶: نقشه ارتفاع لایه مرزی ماه آگوست (۱۹۰۹-۲۰۲۱)



نگاره ۱۷: نقشه مدل Getis Ord ماه آگوست (۱۹۰۹-۲۰۲۱)

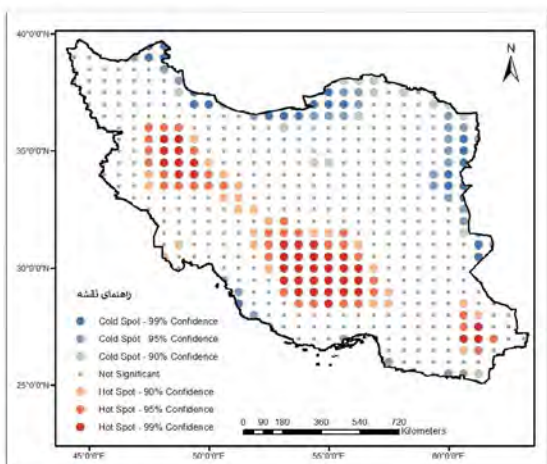
در ماه سپتامبر حداکثر ارتفاع لایه مرزی، ۲۰۹۳ متر است که نسبت به ماه قبل کاهش قابل ملاحظه‌ای در منطقه با ارتفاع زیاد مشاهده می‌شود به نحوی که تنها منطقه با

در ماه آگوست حداکثر ارتفاع لایه مرزی نسبت به ماه قبل کاهش پیدا کرده و به ۲۱۱۳ متر رسیده است. حداقل ارتفاع در ایران نیز ۶۶۸ متر است که در سه منطقه می‌توان مشاهده نمود. منطقه اول در نوار باریکی از بخش‌های

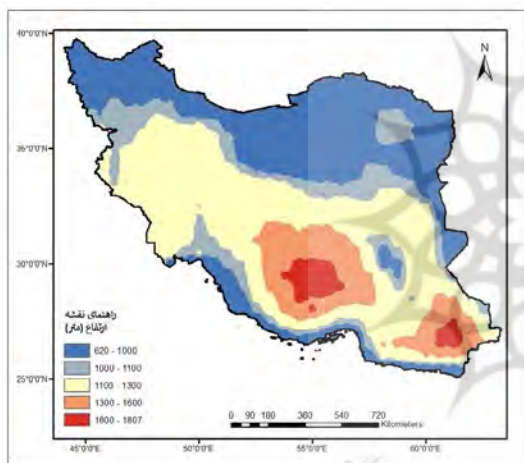


نگاره ۱۵: نقشه مدل Getis Ord ماه جولای (۱۹۰۹-۲۰۲۱)

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (م)
تحلیل فضایی تغییرات ماهانه ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای در ایران / ۱۲۵



نگاره ۱۹: نقشه مدل Getis Ord ماه سپتامبر (۱۹۵۹-۲۰۲۱)



نگاره ۲۰: نقشه ارتفاع لایه مرزی ماه اکتبر (۱۹۵۹-۲۰۲۱)

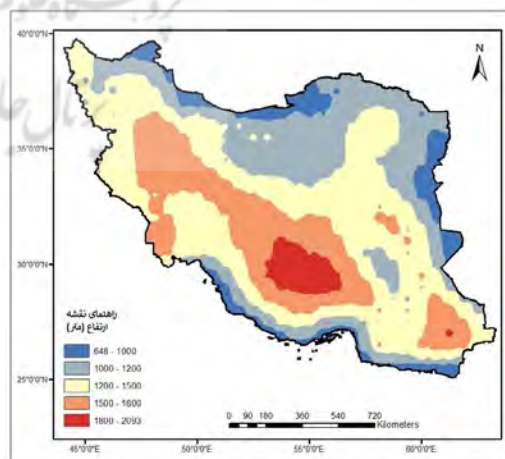
تحلیل لکه‌های داغ و سرد معنی‌داری لکه‌های سرد در بخش وسیعی از نیمه شمالی و نوار باریکی از نواحی شمال شرق و شرق را نشان می‌دهد. لکه‌های داغ در بخش‌های وسیعی از محدوده اطراف استان‌های کرمان و هرمزگان از معنی‌داری بالایی برخوردار است (نگاره ۲۱).

حداکثر ارتفاع لایه مرزی در ماه نوامبر کاهش بسیار زیادی نسبت به ماه قبل داشته و به ارتفاع ۱۱۱۰ متر رسیده است و در جنوب استان سیستان و بلوچستان و مناطق کوچکی از استان کرمان دیده می‌شود. در این ماه حداقل ارتفاع ۵۴۰ متر است که شامل بخش وسیعی از نیمه شمالی کشور، بخش قابل ملاحظه‌ای از شرق و جنوب غرب است.

حداکثر ارتفاع استان کرمان است. حداقل ارتفاع در این ماه ۶۴۸ متر است که سه منطقه می‌توان مشاهده نمود. اول، نوار باریکی که از شمال غرب شروع و تا انتهای استان مازندران ادامه پیدا کرده است و منطقه دوم نوار باریکی در شرق ایران و منطقه سوم نیز به صورت نوار باریکی در امتداد سواحل خلیج فارس و دریای عمان قرار دارد. میانگین ارتفاع لایه مرزی در این ماه نیز ۱۳۲۹ متر است (نگاره ۱۹).

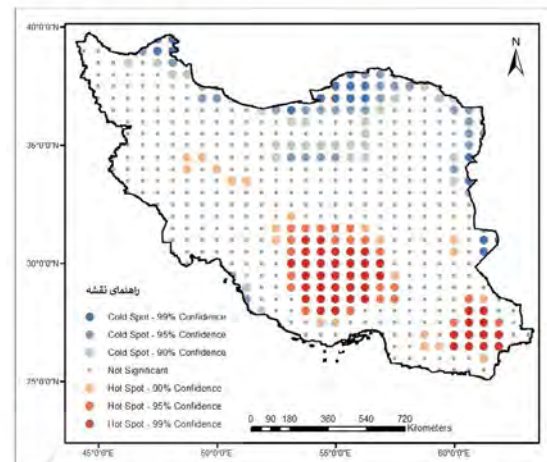
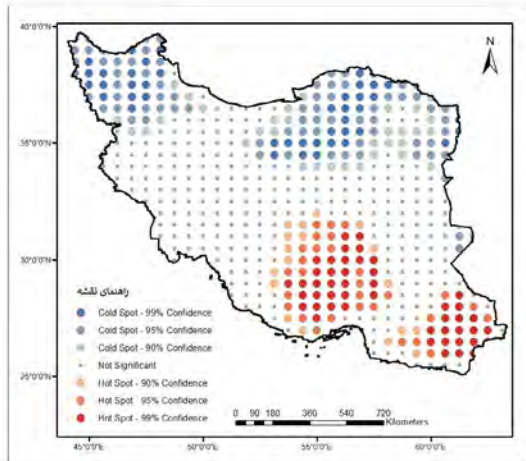
تحلیل لکه‌های داغ نشان‌دهنده معنی‌داری نقاط با ارتفاع بالا در بخش‌هایی از استان همدان و کردستان تا استان کرمان و همچنین جنوب استان سیستان و بلوچستان است. لکه‌های سرد نیز در نوازی از اطراف دریای خزر تا شمال استان اردبیل و همچنین شرق استان‌های خراسان شمالی تا خراسان جنوبی معنی‌دار است (نگاره ۱۸).

در ماه اکتبر با کاهش ۲۸۶ متری در حداکثر ارتفاع لایه مرزی ارتفاع به ۱۸۰۷ متر رسید محدوده حداکثر ارتفاع هم به لکه‌های کوچکی در استان کرمان و جنوب سیستان و بلوچستان محدود شده است. حداقل ارتفاع در این ماه نیز ۶۲۰ متر است که در پهنه وسیعی از نیمه شمالی کشور و همچنین نوار ساحلی جنوبی قابل مشاهده است. میانگین ارتفاع این ماه نیز ۱۰۸۲ متر است (نگاره ۲۰).



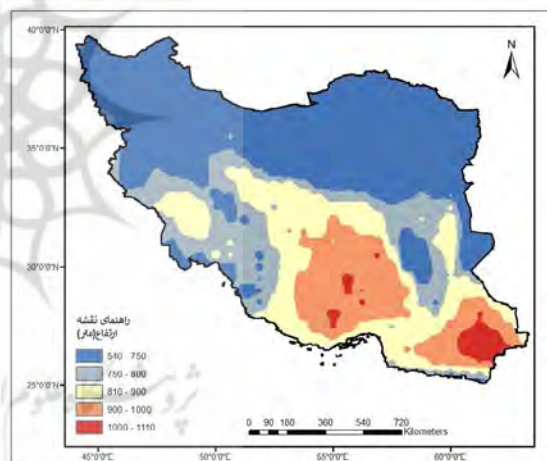
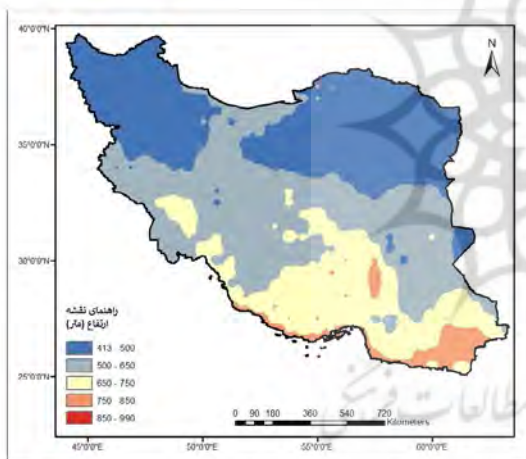
نگاره ۱۸: نقشه ارتفاع لایه مرزی ماه سپتامبر (۱۹۵۹-۲۰۲۱)

متوسط ارتفاع لایه مرزی نیز در این ماه ۷۵۳ متر است متوسط ارتفاع کل پهنه کشور نیز در این ماه ۵۸۲ متر است (نگاره ۲۲). (نگاره ۲۴).



نگاره ۲۳: نقشه مدل Getis Ord ماه نوامبر (۲۰۲۱-۱۹۰۹)

نگاره ۲۱: نقشه مدل Getis Ord ماه اکتبر (۲۰۲۱-۱۹۰۹)



نگاره ۲۴: نقشه ارتفاع لایه مرزی ماه دسامبر (۲۰۲۱-۱۹۰۹)

نگاره ۲۲: نقشه ارتفاع لایه مرزی ماه نوامبر (۲۰۲۱-۱۹۰۹)

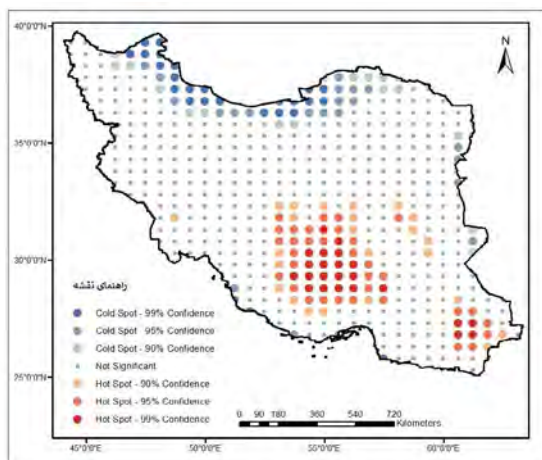
تحلیل لکه‌های داغ و سرد نیز الگوی مشابهی را نشان می‌دهد و معنی‌داری وجود این نقاط با ارتفاع زیاد و کم را تأیید می‌کند (نگاره ۲۵).

بررسی نقشه میانگین سالانه ارتفاع لایه مرزی نیز نشان می‌دهد که حداکثر ارتفاع این لایه در ایران به‌طور متوسط ۱۶۰۰ متر است که در جنوب ایران در محدوده استان کرمان و جنوب استان سیستان و بلوچستان قرار دارد و به‌طور کلی نیمه جنوبی ایران به‌استثنای نوار باریکی از سواحل جنوب ارتفاع بیشتری را نسبت به نیمه شمالی دارد. کمترین میزان

تحلیل لکه‌های داغ و سرد نیز نشان‌دهنده دو لکه داغ با معنی‌داری بالا در استان سیستان و بلوچستان و نواحی مرکزی ایران است. لکه سرد واقع در بخش وسیعی از نیمه شمالی ایران دارای معنی‌داری بالایی است (نگاره ۲۳).

حداکثر ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای در ماه دسامبر ۹۹۰ متر است که به‌صورت نقاط کوچکی در شرق استان کرمان و جنوب استان سیستان و بلوچستان دیده می‌شود. دو منطقه شمال‌غرب و شمال‌شرق نیز با داشتن ۴۱۳ متر ارتفاع، حداقل ارتفاع را در این ماه به‌خود اختصاص داده‌اند.

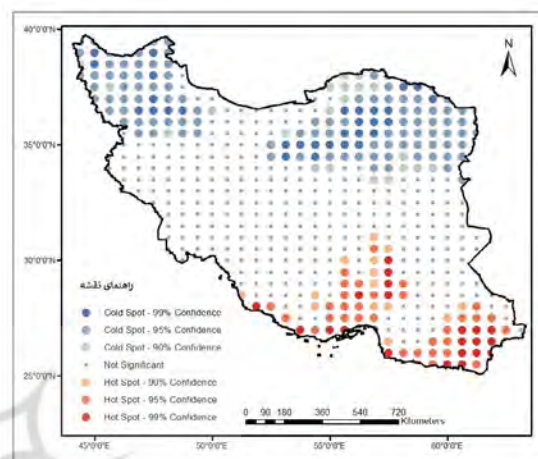
فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (۳۳)
 تحلیل فضایی تغییرات ماهانه ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای در ایران / ۱۲۷



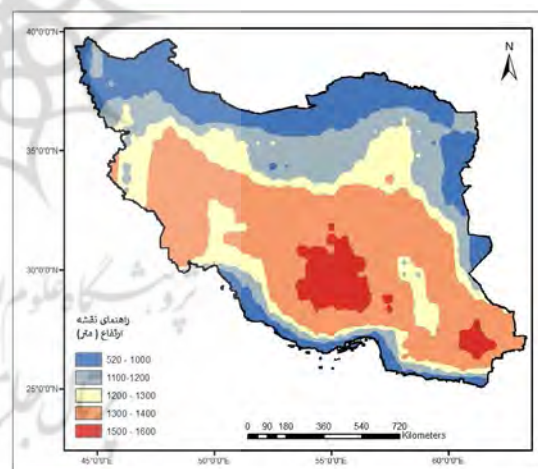
نگاره ۲۷: نقشه مدل Getis Ord سالانه (۱۹۵۹-۲۰۲۱)

به منظور بررسی دلایل جغرافیایی و اقلیمی تغییرات فضایی ارتفاع لایه مرزی نسبت به بررسی متغیرهای مؤثر در آن اقدام شد. نتایج برخی از مطالعات در سطح جهان نشان داد که در تغییرات ارتفاع لایه مرزی متغیرهای اقلیمی همچون دما، رطوبت نسبی و فشار هوا مؤثر هستند (الباکاش و سانگن، ۲۰۲۰: ۱). همچنین ارتفاع و عرض جغرافیایی نیز از جمله عوامل جغرافیایی است که می‌تواند تغییرات ارتفاع این لایه را تحت تأثیر قرار دهد (انگن و تکسیرا، ۲۰۱۳: ۲۰۷۵). بر این اساس با در نظر گرفتن طول دوره آماری یکسان (۲۰۰۰-۲۰۲۲) به ساخت داده‌های شبکه‌ای براساس روش میانبندی کریجینگ پرداخته شد و سپس با استفاده از مدل رگرسیون استاندارد چندمتغیره نسبت به بررسی میزان تأثیرگذاری آن‌ها بر ارتفاع لایه مرزی در ایران اقدام شد. برای این منظور ابتدا داده‌های مربوط به هر کدام از این متغیرها نسبت به میانگین و انحراف معیارشان استاندارد و سپس در مدل وارد شد. به طور کلی نتایج حاصل از مدل نشان داد که میانگین دما با میزان همبستگی ۰/۸۸ بیشترین تأثیر را در تغییرات ارتفاع لایه مرزی دارد. میانگین رطوبت نسبی با همبستگی ۰/۸۶- دومین فراسنج اقلیمی مؤثر در تغییرات این لایه است. بعد از این‌ها میزان رطوبت خاک، عرض جغرافیایی و ارتفاع، متغیرهایی هستند که میزان تغییرات ارتفاع لایه مرزی در ایران وابسته به آن‌ها است (جدول ۱).

ارتفاع بین ۵۲۰ تا ۱۰۰۰ متر عمدتاً در نیمه شمالی، بخش شرقی و نوار باریکی از سواحل جنوبی قرار دارد. میانگین ارتفاع لایه مرزی کل پهنه ایران در طول سال ۱۳۳۱ متر است (نگاره ۲۶).



نگاره ۲۵: نقشه مدل Getis Ord ماه دسامبر (۱۹۵۹-۲۰۲۱)



نگاره ۲۶: نقشه میانگین ارتفاع لایه مرزی سالانه (۱۹۵۹-۲۰۲۱)

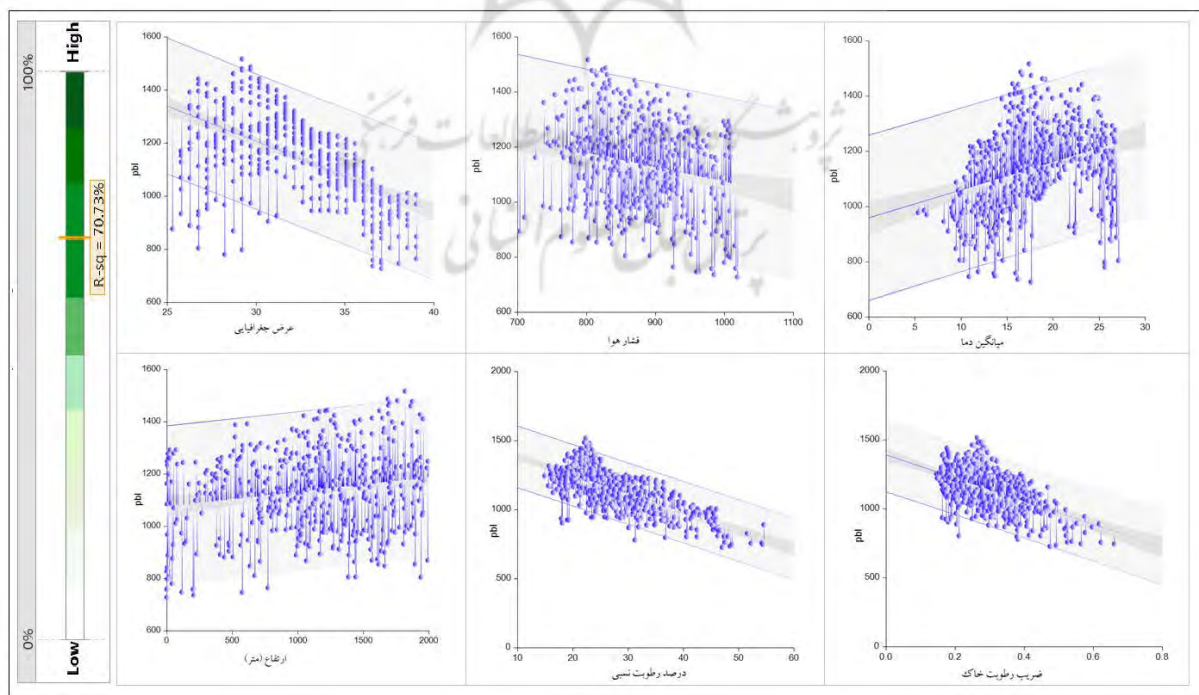
تحلیل لکه‌های داغ و سرد نشان‌دهنده تمرکز لکه‌های سرد (نقاط کم ارتفاع) در بخش شمالی کشور از شرق دریای خزر تا بخش شمالی استان آذربایجان شرقی و همچنین به صورت محدود در شرق و سواحل جنوبی است. لکه‌های داغ (مناطق با ارتفاع بالا) عمدتاً در بخش‌هایی از جنوب استان یزد تا جنوب استان کرمان و همچنین در بخش‌هایی از استان سیستان و بلوچستان متمرکز شده است (نگاره ۲۷).

جدول ۱: مشخصات آماری و میزان همبستگی متغیرهای مورد بررسی در مدل رگرسیون چندمتغیره

متغیر	حدافل	حداکثر	انحراف معیار	R square	RMSE	میزان همبستگی
میانگین دما	۱۷/۶	۲۷/۱۲	۴/۹۷	۰/۷۴	۰/۳۴	۰/۸۸
رطوبت نسبی	۲۸/۳	۵۹/۵	۸/۲	۰/۶۴	۰/۳۹	-۰/۸۶
ضریب رطوبت خاک	۰/۲۰	۰/۶۶	۰/۱۰	۰/۸۲	۰/۴۱	-۰/۷۵
عرض جغرافیایی	۲۵/۳۰	۳۹/۰۳	۳/۴	۰/۷۱	۰/۳۵	۰/۶۷
ارتفاع	-۲۶	۱۹۹۵	۵۱۹/۰۴	۰/۶۳	۰/۳۷	۰/۵۷
فشار هوا	۷۸۷/۲	۱۰۱۹/۳	۶۶/۱	۰/۷۶	۰/۴۲	-۰/۵۲

رطوبت نسبی نقش بسیار قابل توجهی در تغییرات فضایی ارتفاع این لایه دارد به نحوی که این موضوع را در نواحی کم ارتفاع اطراف سواحل شمالی و جنوبی به خوبی می توان مشاهده نمود چرا که رطوبت از طریق گرمای نهان تبخیر موجب کنترل دما شده و در نتیجه باعث کاهش ارتفاع لایه مرزی می شود که البته این موضوع در نواحی شمالی به دلیل میانگین دمای پایین تر مشهودتر از نوار ساحلی جنوب است. بنابراین رطوبت نسبی با لایه مرزی رابطه معکوس دارد (نگاره ۲۸). سومین پارامتر تأثیرگذار بر اساس نتایج

بررسی نتایج حاصل از خروجی های رگرسیون چندمتغیره نشان می دهد که با در نظر گرفتن نقش شش پارامتر مورد نظر در تغییرات ارتفاع لایه مرزی میزان همبستگی کلی این پارامترها ۷۰/۷۳ است که تأثیرگذاری قابل ملاحظه این پارامترها در این لایه را نشان می دهد (نگاره ۲۸). در بین پارامترهای مورد بررسی میانگین دما بیشترین سهم را در تغییرات ارتفاع لایه مرزی دارد که این موضوع را در نقشه های ماهانه و سالانه به خوبی می توان مشاهده نمود به نحوی که پرارتفاع ترین مناطق عمدتاً در نیمه جنوبی ایران متمرکز شده اند. بعد از متغیر دما،



نگاره ۲۸: نمودارهای همبستگی بین متغیرهای مورد مطالعه با ارتفاع لایه مرزی در ایران

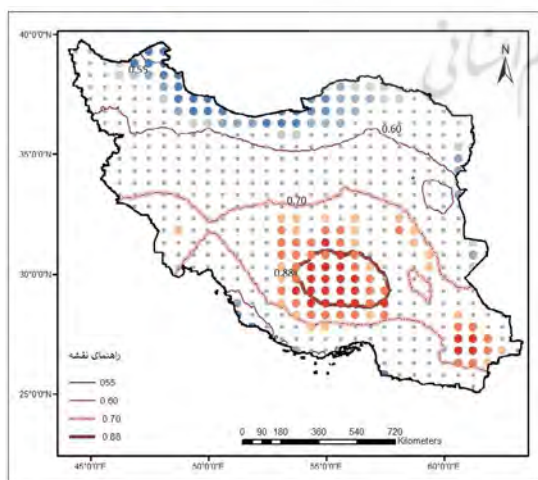
فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (۳۳)

تحلیل فضایی تغییرات ماهانه ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای در ایران / ۱۲۹

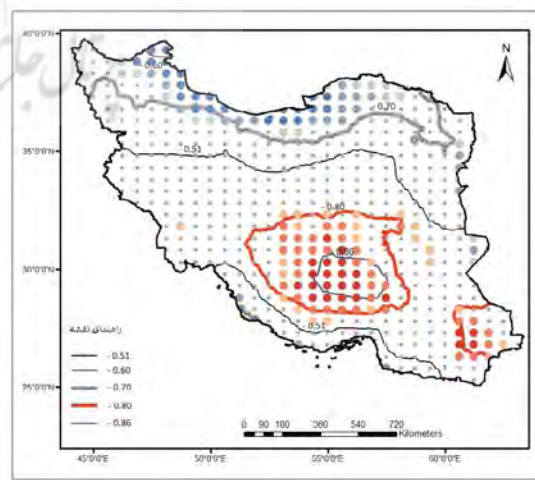
هوا است. طبیعتاً مناطقی که فشار هوا در آن‌ها کمتر است امکان صعود بیشتری در آن‌ها فراهم است و همین موضوع می‌تواند باعث افزایش ارتفاع لایه مرزی شود. بنابراین ارتفاع لایه مرزی در ایران علاوه بر پارامترهای مذکور، متأثر از تغییرات الگوهای فشار در زمان‌های مختلف سال نیز هست (نگاره ۲۸).

در مطالعه حاضر به منظور بررسی دقیق‌تر نقش متغیرهای تأثیرگذار در ارتفاع لایه مرزی در ایران، نتایج حاصل از تحلیل رگرسیونی برای دو متغیر میانگین دما و رطوبت نسبی تبدیل به نقشه شد و به منظور تحلیل دقیق‌تر در پس‌زمینه نقشه مدل تحلیل لکه‌های داغ قرار داده شد (نگاره‌های ۲۹ و ۳۰). در نقشه همبستگی دما با ارتفاع لایه مرزی محدوده‌ای که بیشترین لکه‌های داغ (مناطق با ارتفاع زیاد) قرار دارد دارای همبستگی ۰/۷۰ است که البته مناطق با بیشترین ارتفاع که در محدوده استان کرمان قرار دارد میزان همبستگی به ۰/۸۸ رسیده است که از منظر جغرافیایی و اقلیمی این محدوده به دلیل مجاورت با دشت بسیار گرم لوت، پایین بودن میزان رطوبت و کم بودن ضریب رطوبت خاک پتانسیل تبدیل به منطقه‌ای با بیشترین ارتفاع لایه مرزی را دارد. همچنین مناطق با ارتفاع کم یا لکه‌های سرد در بخش شمالی و به صورت محدود در نواحی جنوبی با میزان همبستگی ۰/۶۰

تحلیل رگرسیون چندمتغیره، ضریب رطوبت خاک است که همانند رطوبت نسبی دارای همبستگی منفی با ارتفاع لایه مرزی است. بر این اساس در مناطقی از کشور نظیر شمال و غرب که از ضریب رطوبت خاک بالاتری برخوردار هستند ارتفاع لایه مرزی تحت تأثیر آن پایین بوده و این موضوع به خوبی در نقشه‌های ماهانه و سالانه قابل مشاهده است. عرض جغرافیایی از دیگر پارامترهایی است که در ایران اکثر فراسنج‌های اقلیمی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بررسی نتایج حاصل از خروجی مدل رگرسیونی نشان می‌دهد این عامل به عنوان چهارمین عامل مهم در تغییرات فضایی ارتفاع لایه مرزی است به نحوی که عرض‌های بالای جغرافیایی به دلیل میانگین دمای کم‌تر و رطوبت بالاتر از ارتفاع لایه مرزی پایین‌تری برخوردار هستند و در مقابل عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر (به استثنای نوار ساحلی جنوب) از ارتفاع بیشتری برخوردار هستند (نگاره ۲۸). عامل ارتفاع پنجمین پارامتر مهم تأثیرگذار در ارتفاع لایه مرزی است به نحوی که در اکثر مناطق با ارتفاع زیاد به شرط فراهم بودن شرایط اقلیمی و جغرافیایی لازم، ارتفاع لایه مرزی بیشتر است و البته لازم به ذکر است که هر کدام از این پارامترها به تنهایی تأثیرگذار نبوده و در کنار سایر ویژگی‌ها می‌توانند نقش خود را ایفا نمایند. آخرین متغیر به لحاظ میزان تأثیرگذاری فشار



نگاره ۳۰: نقشه همبستگی بین میانگین دما با ارتفاع لایه مرزی سالانه (۱۹۵۹-۲۰۲۱)



نگاره ۲۹: نقشه همبستگی بین رطوبت نسبی با ارتفاع لایه مرزی سالانه (۱۹۵۹-۲۰۲۱)

برخوردار است به نحوی که نیمه شمالی کشور مخصوصاً دو منطقه شمال غرب و شمال شرق کشور در اکثر ماه‌های سال به عنوان لکه‌های سرد (با ارتفاع کم لایه مرزی) از معنی‌داری بالایی (۹۹ درصد) برخوردار هستند. در کنار این دو بخش، حاشیه‌های ساحلی دریای خزر و به صورت محدود نوار ساحلی خلیج فارس و دریای عمان نیز در اکثر ماه‌ها، کانون‌های کم‌ارتفاع هستند که براساس تحلیل رگرسیونی چندمتغیره مشخص شد که در منطقه شمال غرب و شمال شرق عامل پایین بودن میانگین دما، عرض جغرافیایی کمتر، بالا بودن ضریب رطوبت خاک و بالا بودن میزان رطوبت، عامل اصلی کم بودن ارتفاع لایه مرزی است. در نواحی ساحلی نیز اثر رطوبت در تعدیل دما همراه با پایین بودن میانگین دما مهم‌ترین دلایل در کاهش ارتفاع این لایه هستند که البته پارامترهای دیگر نظیر بالا بودن ضریب رطوبت خاک و پایین بودن فشار و ارتفاع کم منطقه نیز از عوامل دیگری هستند که در تحلیل‌های رگرسیون چندمتغیره نقش و میزان تأثیرگذاری آن‌ها مشخص شد. همچنین نتایج این مطالعه نشان داد که نیمه جنوبی ایران و به صورت ویژه استان خوزستان، استان کرمان و جنوب استان سیستان و بلوچستان در اکثر ماه‌های سال به عنوان لکه‌های داغ از معنی‌داری بالایی برخوردار هستند و این موضوع بر مبنای نقشه‌های همبستگی دما و رطوبت با ارتفاع لایه مرزی تحلیل و مشخص شد که مجاورت این منطقه با بیابان لوت و مناطق کویری و خشک که دارای میانگین دمای زیاد، رطوبت پایین و خاک خشک‌تری هستند سبب افزایش ارتفاع لایه مرزی در این مناطق شده و به دلیل برقراری حاکمیت شرایط اقلیمی و جغرافیایی مذکور در طول سال باعث شده این مناطق به عنوان لکه‌های داغ قابل مشاهده باشند. به طور کلی هر چند ارتفاع لایه مرزی به شدت متغیر است و از عوامل و شرایط متعددی تبعیت می‌کند ولی نتایج این مطالعه نشان داد به طور کلی ارتفاع این لایه عمدتاً متأثر از شش پارامتر مورد بررسی، مخصوصاً میانگین دما و رطوبت هست.

نیز نشان‌دهنده نقش کاهش میانگین دما، افزایش رطوبت و سایر پارامترهای مورد بررسی در کاهش ارتفاع لایه مرزی در این مناطق است (نگاره ۳۰).

در نقشه همبستگی رطوبت نسبی با ارتفاع هم مشاهده می‌شود مناطق با لکه‌های داغ در دو محدوده نواحی مرکزی و جنوب استان سیستان و بلوچستان دارای ضرایب همبستگی بین $-0/80$ تا $-0/86$ هستند که این موضوع نقش افزایش ارتفاع لایه مرزی با کاهش رطوبت را در این مناطق نشان می‌دهد. در مناطق با ارتفاع کم لایه مرزی یا لکه‌های سرد که عمدتاً در نیمه شمالی که از غرب دریای خزر شروع و تا شمال آذربایجان شرقی ادامه دارد و به صورت خیلی محدود در نوار ساحلی جنوب هم مشاهده می‌شود ضریب همبستگی $-0/70$ در نیمه شمالی و $-0/51$ در نیمه جنوبی نیز نقش افزایش رطوبت در کاهش میزان ارتفاع لایه مرزی را نشان می‌دهد (نگاره ۲۹).

۴- نتیجه‌گیری

لایه مرزی سیاره‌ای پایین‌ترین قسمت تروپوسفر است و تبادل فرآیندهای بین زمین و جو نقش مهمی در توسعه آن دارند (کایسدو و همکاران، ۲۰۱۷:۱۶۱۰). ارتفاع این لایه تحت تأثیر شرایط جوئی نظیر تغییرات دما، رطوبت، فشار هوا، ویژگی‌های توپوگرافی و کاربری زمین تغییرات زیادی پیدا می‌کند (دی آرودا و همکاران، ۲۰۱۸:۱۸۶). انتقال عمودی گرما، تکانه، رطوبت، تلاطم و آلاینده‌های هوا بین زمین اتمسفر سطحی و آزاد از طریق لایه مرزی صورت می‌گیرد بنابراین، لایه مرزی نقش مهمی در وقوع رویدادهای مختلف جوئی نظیر فرین آب و هوایی دارد (چن و همکاران، ۲۰۱۶:۲۰۲۳).

نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که ارتفاع لایه مرزی در ماه‌های مختلف سال تغییرات قابل ملاحظه‌ای در ایران دارد و به لحاظ تغییرات فضایی از الگوهای خوشه‌ای شدید تبعیت می‌کند. تحلیل لکه‌های داغ و سرد بر مبنای مدل Getis Ord نشان داد که توزیع فضایی ارتفاع لایه مرزی در یک دوره ۶۲ ساله از الگوهای فضایی کاملاً همگن

9- Chen, X., Skerlak, B., Rotach, M.W., Añel, J.A., Su, Z., Ma, Y & Li, M. (2016). Reasons for the extremely high-ranging planetary boundary layer over the western Tibetan plateau in winter. *J. Atmos. Sci.* 73, PP. 2021–2038.

10- Dai, C., Wang, Q., Kalogiros, J., Lenschow, D., Gao, Z & Zhou, M. (2014). Determining boundary-layer height from aircraft measurements. *Bound.-Layer Meteorol.* 152, PP. 277–302.

11- De Wekker, S.F & Kossmann, M. (2015). Convective boundary layer heights over mountainous terrain-A review of concepts. *Front. Earth Sci.* 3, PP 77-89.

12- De Arruda Moreira, G., Guerrero-Rascado, J.L., Bravo-Aranda, J.A., Benavent-Oltra, J.A., Ortiz-Amezcu, P., Róman, R., Bedoya-Velásquez, A.E., Landulfo, E & Alados-Arboledas, L. (2018). Study of the planetary boundary layer by microwave radiometer, elastic LIDAR and Doppler LIDAR estimations in Southern Iberian Peninsula. *Atmos. Res.* 213, PP. 185–195.

13- Engeln, A & Teixeira, J. (2013). A planetary boundary layer height climatology derived from ECMWF reanalysis data. *J. Clim.* 26, pp. 6575–6590.

14- Garratt, J.R. (1992). *The Atmospheric Boundary Layer-Cambridge Atmospheric and Space Science Series*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 336 pages.

15- Garratt, J.R. (1994). The atmospheric boundary layer. *Earth-Sci. Rev.* 37, pp. 89–134.

16- Guo, J., Miao, Y., Zhang, Y., Liu, H., Li, Z & Zhang, W. (2016). The Climatology of Planetary Boundary Layer Height in China Derived from Radiosonde and Reanalysis Data. *Atmos. Chem. Phys.* 16 (20), pp. 13309–13319.

17- Guo, J., Li, Y., Cohen, J. B., Li, J., Chen, D & Xu, H. (2019). Shift in the Temporal Trend of Boundary Layer Height in China Using Long-Term (1979-2016) Radiosonde Data. *Geophys. Res. Lett.* 46 (11), pp. 6080–6089.

18- Henkes, A., Fisch, G., Machado, L.A.T & Chaboureaud, J.P. (2021). Morning boundary layer conditions for shallow to deep convective cloud evolution during the dry season in the central Amazon. *Atmos. Chem. Phys.*

منابع و مأخذ

۱- انتظاری، داداشی رودباری، اسدی؛ علیرضا، عباسعلی، مهدی، (۱۳۹۴). ارزیابی خودهمبستگی فضایی تغییرات زمانی مکانی جزایر گرمایی در خراسان رضوی، نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۱۶، صص ۱۴۶-۱۲۵.

۲- رنجبر، دنیا دوست؛ عباس، غلامرضا (۱۳۹۶). ارزیابی عملکرد طرح‌واره‌های لایه مرزی سیاره‌ای PBL مدل WRF-ARW در شبیه‌سازی پارامترهای جریان لایه مرزی برای استفاده در مطالعات پراکندگی آلودگی هوا، مطالعه موردی: ایستگاه فرودگاه مهرآباد، ششمین همایش ملی مدیریت آلودگی هوا و صدا، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جوی، ۷ صفحه.

۳- ضرغامی پور، ملکوتی؛ منا، حسین، (۱۳۹۹). مطالعه میدان باد لایه مرزی سیاره‌ای روی جزیره قشم، فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۶، شماره ۱، صص ۱۴۷-۱۲۹.

۴- عساکره؛ حسین، (۱۳۹۰) مبانی اقلیم‌شناسی آماری، انتشارات دانشگاه زنجان، صص ۵۴۵.

۵- مهدیان ماه‌فروزی، شمسی‌پور، کریمی احمدآباد؛ مجتبی، علی‌اکبر، مصطفی، (۱۳۹۹). تغییرات سالانه ارتفاع لایه مرزی شهر تهران، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۲۵، صص ۵۰-۳۷.

۶- نصیری، زارعی، حلیمی، رستمی؛ بهروز، زهرا، منصور، محمد، (۱۳۹۵). بررسی تغییرات ضخامت و ارتفاع لایه مرزی در شرایط گرد و غباری شهر اهواز، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال سوم، شماره ۲، صص ۶۴-۱۵.

7- Allabakash, s & Lim, s. (2020). Climatology of Planetary Boundary Layer Height Controlling Meteorological Parameters over the Korean Peninsula. *Remote sensing.* 12, pp. 1–21.

8- Caicedo, V., Rappenglück, B., Lefer, B., Morris, G., Toledo, D & Delgado, R. (2017). Comparison of aerosol lidar retrieval methods for boundary layer height detection using ceilometer aerosol backscatter data. *Atmos. Chem. Phys.* 10, PP. 1609–1622.

- measurements over Hong Kong. *J. Geophys. Res. Atmos.* 122, pp. 3929–3943.
- 26- Zhang, W., Guo, J., Miao, Y., Liu, H., Zhang, Y., Li, Z & Zhai, P.(2016). Planetary boundary layer height from CALIOP compared to radiosonde over China. *Atmos. Chem. Phys.* 16, pp. 9951–9963.
- 21, pp. 13207–13225.
- 19- Palm, S.P., Selmer, P., Yorks, J., Nicholls, S & Nowotnick, E.(2021). Planetary Boundary Layer Height Estimates From ICESat-2 and CATS Backscatter Measurements. *Front. Remote Sens* 2, pp. 1-13.
- 20- Saha, S., Sharma, S., Kumar, K.N., Kumar, P., Lal, S & Kamat, D.(2022). Investigation of Atmospheric Boundary Layer characteristics using Ceilometer Lidar, COSMIC GPS RO satellite, Radiosonde and ERA-5 reanalysis dataset over Western Indian Region. *Atmos. Res.* 268, pp. 425-429.
- 21- Sawyer, V & Li, Z. (2013). Detection, variations and inter comparison of the planetary boundary layer depth from radiosonde, lidar and infrared spectrometer. *Atmos. Environ.* 79, pp. 518–528.
- 22- Seidel, D.J., Zhang, Y., Beljaars, A., Golaz, J.C., Jacobson, A.R & Medeiros, B.(2012). Climatology of the planetary boundary layer over the continental United States and Europe. *J. Geophys. Res. Atmos.* 117, pp. 1-15.
- 23- Stull, R.B. (2012). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*; Springer Science & Business Media: Berlin/Heidelberg, Germany; Volume 13, 666 Pages.
- 24- Su, T., Li, Z & Kahn, R. (2018). Relationships between the planetary boundary layer height and surface pollutants derived from lidar observations over China: Regional pattern and influencing factors. *Atmos. Chem. Phys.* 18, pp.15921–15935.
- 25- Su, T., Li, J., Li, C., Xiang, P., Lau, A.K.H., Guo, J., Yang, D & Miao, Y.(2017). An inter comparison of long-term planetary boundary layer heights retrieved from CALIPSO, ground-based lidar, and radiosonde

COPYRIGHTS

©2023 by the authors. Published by National Geographical Organization. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons [Attribution-NoDerivs 3.0 Unported \(CC BY-ND 3.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/)

