Archive of SID

پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دورهٔ ۴۹، شماره ۱، بهار ۱۳۹۶
ص. ۱۳۳-۱۱۳

تحلیل تغییرات ماهانهٔ ارتفاع لایهٔ تروپوپاز بر روی ایران

حسن لشکری* ـ دانشیار جغرافیای طبیعی، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکدهٔ علوم زمین
عباسعلی داداشی رودباری ـ دانشجوی دکتری آب‌وهواشناسی شهری، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکدهٔ علوم زمین
زینب محمدی ـ دانشجوی دکتری آب و هواشناسی سینوپتیک، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکدهٔ علوم زمین

پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۰۶ تأیید نهایی: ۱۳۹۵/۰۹/۰۲

چکیده

تروپوپاز لایهٔ انتقالی از وردسپهر به پوش سپهر است. این لایه تعیین‌کنندهٔ حد بالایی و ضخامت وردسپهر است. در پژوهش حاضر از داده‌های ژرفاسنج مادون قرمز اتمسفری (AIRS) سنجندهٔ مودیس آکوا ماهواره (EOS) استفاده شد. این محصول به شکل پارامترهای ژئوفیزیکی است و در شبکه‌ای به ابعاد ۱×۱ درجهٔ قوسی توزیع شده است. این داده‌ها از ۱۸۰- تا ۱۸۰ طول جغرافیایی و ۹۰ تا ۹۰ عرض جغرافیایی موجودند که از سامانه تطبیقی پردازش مودیس (MODAPS) دریافت شدند. پس از بارگیری تصاویر مربوط به سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۵ میلادی، داده‌ها وارد نرم‌افزار MATLAB شد و مقادیر ارتفاعی تروپوپاز برای ماتریسی به ابعاد ۱۲×۱۵۵ برای هر سال محاسبه شد (۱۵۵ معرف مقادیر شبکه‌های محاط در مرز ایران و دوازده ماه‌های سال‌اند). نتایج حاصل از پردازش‌های تصویر وارد محیط نرم‌افزار ArcGis10.2 شد و نقشه‌های هر ماه با استفاده از روش کریجینگ به واسطهٔ کمترین مقدار خطا تهیه گردید. نتایج نشان داد در ماه فوریه بیشترین اختلاف ارتفاع بین جنوب و شمال کشور رخ می‌دهد. تقریباً در همهٔ پهنهٔ کشور منحنی هم‌ارتفاع موازی و مداری‌اند. در ماه‌های گرم سال ارتفاع تروپوپاز در جنوب شرق کاهش می‌یابد و بالاترین ارتفاع تروپوپاز در مرکز کشور رخ می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: ارتفاع لایهٔ تروپوپاز، ایران، تروپوپاز، نیمرخ ارتفاعی تروپوپاز.

مقدمه

تروپوپاز[1] لایهٔ انتقالی از وردسپهر به پوش سپهر است. به عبارت دیگر، این لایه تعیین‌کنندهٔ ضخامت و سقف (حد بالایی) لایهٔ تروپوسفر است. به دلیل ماهیت و خصوصیت لایهٔ تروپوسفر و فعل و انفعالات درونی آن ارتفاع لایهٔ تروپوپاز در استوا و قطب متغیر است؛ به طوری که ارتفاع آن در استوا به حدود ۱۸ تا ۱۹ کیلومتر و در قطب به ۸ تا ۹ کیلومتر می‌رسد. از طرفی، ارتفاع این لایه تابع تغییرات ماهانه، فصلی، و سالانه نیز است که به دلیل تغییر در مکانیسم فعالیت سامانه‌ها در فصول مختلف سال، تغییر در ساختار فیزیکی زمین (جنس زمین، توپوگرافی، تغییرات سالانه در میل تابش

نویسندهٔ مسئول: ۰۹۱۲۳۲۷۳۷۱۵
* E- mail: Dr_Lashkari61@yahoo.com

1. Tropopause

www.SID.ir

Archive of SID

خورشید، و...) و تغییر در ساختار فیزیکی جو در طول زمان و مکان است(هال[1] و همکاران، ۲۰۱۱). در نتیجه، می‌توان گفت ارتفاع لایهٔ تروپوپاز انعکاسی از فعل و انفعالات درون جو لایهٔ تروپوسفر، تبادلات انرژی، و مادهٔ بین مناطق مختلف سیارهٔ زمین در قالب گردش عمومی جو و شدت و مدت فعالیت سامانه‌های جوی در هر زمان است. از طرفی، می‌دانیم تبادل انرژی و ماده بین دو لایهٔ تروپوسفر و استراتوسفر از طریق این لایه انجام می‌شود. بنابراین، تغییرات ارتفاع این لایه در طول زمان بیانگر تغییر در ساختار و انرژی لایهٔ تروپوسفر و نشان‌دهندهٔ تغییرات ایجادشده در این لایه است؛ بدین ترتیب، می‌توان روند تغییرات انرژی و دما را در لایهٔ تروپوسفر آشکارسازی کرد. بازیو جزو اولین محققانی بود که در سال ۱۹۰۶ به کاهش آشکار سرعت باد با ارتفاع در بالای تروپوپاز اشاره کرد (شاپیرو و کیسر[2]، ۱۹۹۰؛ ویلیماز[3]، ۲۰۰۳). سپس، داپسون در سال ۱۹۲۰ مشاهده کرد که سطح ماکزیمم باد وابستگی تنگاتنگی با تروپوپاز دارد و نتیجه گرفت که این موضوع عکس خصوصیت جهت گرادیان افقی دما در تروپوپاز است. با توجه به تحقیقات انجام‌شده، بر اساس اطلاعات هواشناسی در اروپا (ویلیامز و برایان[4]، ۲۰۰۶)، جنوب غربی ایالات متحده، جزیرهٔ آمستردام و جنوب اقیانوس هند، نتیجهٔ به‌دست‌آمده تقریباً به صورت یکنواخت بیانگر آن است که به طور میانگین سطح بیشینه باد فقط همبستگی ضعیفی را برای مجموعهٔ مشاهدات جداگانه نشان می‌دهد. کنتی و همکاران (۲۰۰۱) در تحقیقی به بررسی ساختار و تکامل توفان‌های حاره‌ای، سیکلون، جبهه، جت، و تروپوپاز در مدل گردش عمومی جو پرداختند. نتایج نشان داد که توفان‌های حاره‌ای به‌شدت از تغییر و تحولات در لایهٔ تروپوپاز متأثرند (کنتی و همکاران، ۲۰۰۱: ۱۸۵۳). بر اساس نتایج تحقیق مارتن و همکاران، با عنوان «ارتباط نوسانات اطلس شمالی بر تروپوسفر و استراتوسفر»، تغییرات در ارتفاع تروپوپاز سبب ایجاد گرداب‌های استراتوسفری می‌شود (مارتن و همکاران، ۲۰۰۲: ۱۹۷۸). هیروکی عمق استراتوسفر را در اندونزی و ارتباط آن را با تروپوپاز حاره‌ای در یک بستهٔ هوا بررسی کرد. نتایج تحقیق وی نشان داد در شرایطی که حرکات قوی به سمت بالا در بخش پایین‌تر از لایهٔ تروپوپاز حاره‌ای، مناطق قاره‌ای و غربی استوایی اقیانوس آرام مربوط به «چشمهٔ استراتوسفر» منطقه و حرکت رو به پایین در بخش بالای لایهٔ تروپوپاز حاره‌ای در اندونزی نشان‌دهندهٔ تخلیهٔ استراتوسفر است، در تروپوپاز حاره‌ای جریان شرقی قوی، غالب، و سرد منطقه صعود به سمت شرق می‌چرخد (هیروکی، ۲۰۰۳: ۱). ریچلر و همکاران (۲۰۰۳) نیز در تحقیقی به تعیین ارتفاع تروپوپاز از دادهٔ مشبک پرداختند. نامبردگان برای تعیین ارتفاع تروپوپاز از یک آستانهٔ حرارتی (آستانه بر اساس لپس ریت) برای ارتفاع تروپوپاز استفاده کردند؛ نتایج پژوهش آنان نشان داد، ارزیابی قائم درجهٔ حرارت با تفکیک قائم بالا می‌تواند به شناسایی بهینه‌تر ارتفاع تروپوپاز منتهی گردد (ریچلر و همکاران، ۲۰۰۳: ۶). بنوزول و هاینز در مطالعه‌ای مسیر تروپوپاز حاره‌ای را از سال ۱۹۹۷ تا ۱۹۹۹ بررسی کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که تأثیر تغییرات دما در لایهٔ تروپوپاز در طول مسیر عمدتاً از طریق فرارفت افقی از طریق شیب قوی است و جابه‌جایی عمودی و افقی نقش مهمی در شرایط النینو و لانینا دارد (بنوزول و هاینز، ۲۰۰۴: ۱۰۲۹). لیو و زیپسر

1. Hall
2. Shapiro & Keyser
3. Williams
4. Williams and Bryan

www.SID.ir

Archive of SID

(۲۰۰۵) به توزیع جهانی همرفت در تروپوپاز حاره‌ای اشاره کرده‌اند. در زمینهٔ تروپوپاز به برخی تحقیقات (استیونسون[1] و همکاران، ۲۰۰۶؛ فیگلوستر[2] و همکاران، ۲۰۰۹؛ استیون و همکاران، ۲۰۱۵) می‌توان اشاره کرد. تغییرات ارتفاع لایهٔ تروپوپاز واکنشی به تغییراتی است که به طور فصلی یا سالانه در لایهٔ زیرین اتمسفر رخ می‌دهد. در عین حال، این لایه متأثر از لایهٔ بالایی خود، یعنی استراتوسفر، نیز است. در صورتی که این تغییرات دارای روندی فصلی یا سالانه باشد، می‌توان تخمین زد که تغییرات ایجادشده در لایهٔ تروپوسفر دارای روند است و می‌توان تغییرات احتمالی و نتایج حاصل از آن را تخمین زد و پیش‌بینی کرد. به همین منظور، نقشه‌های تهیه‌شده از ارتفاع لایهٔ تروپوپاز شیب ارتفاع آن بر روی ایران در دورهٔ آماری ۲۰۰۳ ـ ۲۰۱۵ در هر یک از ماه‌های سال بررسی شده است.

داده‌ها و روش‌ها

وردایست (تروپوپاز) به مرز بین تروپوسفر و استراتوسفر اطلاق می‌شود. تروپوپاز منطقه‌ای است که در آنجا کاهش دما با افزایش ارتفاع متوقف می‌شود و جو در آنجا به طور کامل خشک است. میزان کاهش دما در تروپوسفر مثبت است؛ یعنی در لایهٔ تروپوسفر با افزایش ارتفاع از میزان دما کاسته می‌شود. در حقیقت، تروپوپاز منطقه‌ای است که این میزان کاهش دما از مثبت به منفی تغییر می‌کند. بنابراین، میزان کاهش دما در استراتوسفر منفی است. به عبارت دیگر، در این لایه با افزایش ارتفاع بر میزان دمای هوا افزوده می‌شود. تعریف دقیق تروپوپاز، که سازمان جهانی هواشناسی از آن استفاده می‌کند، این‌گونه است:

تروپوپاز مرز بین تروپوسفر و استراتوسفر است(اندروز و همکاران[3]، ۱۹۸۷)؛ جایی که در آن معمولاً تغییر ناگهانی در میزان کاهش دما اتفاق می‌افتد. این لایه پایین‌ترین سطح از جو تعریف می‌شود که در آن دما تا ۲ درجهٔ سانتی‌گراد در هر کیلومتر کاهش می‌یابد؛ به شرطی که میزان متوسط نرخ کاهش دما بین این سطح و همهٔ سطوح بالاتر با فاصلهٔ ۲ کیلومتری آن از ۲ درجهٔ سانتی‌گراد در هر کیلومتر تجاوز نکند (هریسبرگ[4]، ۱۹۸۹؛ ریگبی، ۱۹۹۲؛ ریچلر و همکاران، ۲۰۰۳).

تروپوپاز به شرح زیر محاسبه می‌شود. در گام اول افت آهنگ دما[5] بر اساس رابطهٔ ۱ به‌دست می‌آید:

$$\Gamma(p) = \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{\partial T}{\partial p}\frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{\partial T}{\partial p^k}\frac{\partial p^k}{\partial p}\frac{\partial p}{\partial z} \qquad (۱)$$

در این رابطه T درجهٔ حرارت، P فشار، Z ارتفاع، و $k = R / c_p$ ، که در آن R ثابت گاز برای هوای خشک و c_p نشان‌دهندهٔ ظرفیت گرمایی هوا در فشار ثابت است، با استفاده از برآورد هیدرواستاتیک رابطهٔ ۱ تبدیل می‌شود به:

1. Stevenson
2. Fueglistaler
3. Andrews
4. Hirschberg
5. lapse-rate

www.SID.ir

Archive of SID

$$\Gamma(p)=\frac{\partial T}{\partial p^k}\frac{p^k}{T}(\frac{kg}{R}). \qquad (۲)$$

آنگاه $\Gamma_i+1/2$ که نیمی از فشار در سطح است از رابطهٔ ۳ محاسبه می‌شود.

$$p_i^k+1/2=\frac{p_i^k+p_{i+1}^k}{2} \qquad (۳)$$

پس از تعیین افت آهنگ در همهٔ سطوح، می‌توان مشخصات خطی ارتفاعی را به‌دست آورد (ریچلر، ۲۰۰۳).

در پژوهش حاضر از داده‌های ژرفاسنج مادون قرمز اتمسفری[۱](AIRS) (لیو[۲] و همکاران، ۲۰۰۸) سنجنده موسوم به مودیس[۳] آکوا[۴] ماهواره[۵](EOS) محصول (AIRS+AMSU) V006 (AIRX3STD) at GES DISC) (پیتمن[۶] و همکاران، ۲۰۰۹) استفاده شد. سری داده‌های این محصول از مودیس به شکل پارامترهای ژئوفیزیکی‌اند و در شبکه‌ای به ابعاد ۱×۱ درجه قوسی توزیع شده‌اند (آمن[۷] و همکاران، ۲۰۰۳). این داده‌ها از ۱۸۰- تا ۱۸۰ طول جغرافیایی و ۹۰- تا ۹۰ عرض جغرافیایی موجودند که از پایگاه تطبیقی پردازش مودیس (MODAPS[۸]) (جاستیس[۹] و همکاران، ۲۰۰۲) (http://modaps.nascom.nasa.gov/) قابل دریافت‌اند. پس از بارگیری تصاویر مربوط به سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۵ میلادی، داده‌ها وارد نرم‌افزار MATLAB شدند و با استفاده از روش سازمان هواشناسی جهانی (ریگبی، ۱۹۹۲؛ ریچلر و همکاران، ۲۰۰۳) مقادیر ارتفاعی تروپوپاز برای ماتریسی به ابعاد ۱۲×۱۵۵ برای هر سال محاسبه شد (۱۵۵ معرف مقادیر شبکه‌های محاط در مرز ایران و دوازده ماه‌های سال‌اند). نتایج حاصل از پردازش‌های تصویر وارد محیط نرم‌افزار ArcGis10.2 شد و نقشه‌های هر ماه با استفاده از روش کریجینگ به واسطهٔ کمترین مقدار خطا تهیه شد. در گام بعدی، به منظور ترسیم پروفیل طولی ارتفاع تروپوپاز در کشور از افزونهٔ 3D Analyst نرم‌افزار نام‌برده برشی از شمال غرب کشور (به منزلهٔ منطقهٔ بیشینهٔ ارتفاعی تروپوپاز) به جنوب شرق کشور (به منزلهٔ منطقهٔ کمینهٔ ارتفاعی تروپوپاز) ترسیم شد و نمودارهای مربوط برای هر یک از ماه‌های سال ترسیم گردید.

سرزمین پژوهش

کشور ایران از لحاظ موقعیت جغرافیایی در محدودهٔ نوسان ضلع شمالی سلول هدلی در گردش عمومی جو قرار دارد. به همین دلیل، جابه‌جایی زمانی این سلول به‌شدت آب‌وهوای این سرزمین را دست‌خوش تغییر می‌کند. به همین سبب، کشور ایران در محدودهٔ اثر سامانه‌های جوی مهمی همچون واچرخند عربستان، واچرخند سیبری، واچرخند آزور، کم‌فشار

1. atmospheric infrared sounder
2. Liu
3. moderate-resolution imaging spectroradiometer(MODIS)
4. aqua
5. earth observing system (EOS)
6. Pittman
7. Aumann
8. MODIS Adaptive Processing System (MODAPS)
9. Justice

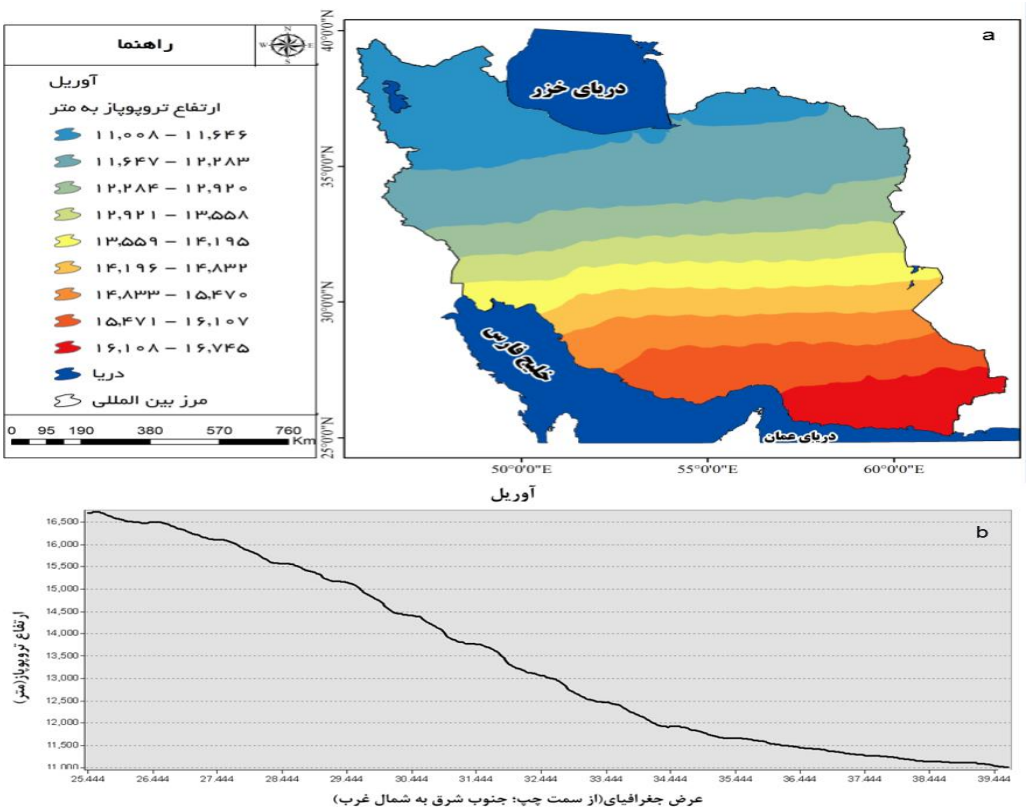
www.SID.ir

Archive of SID

سودان، و چرخندهای مدیترانه‌ای قرار دارد. از طرفی، این سرزمین در همجواری بیابان‌های گستردهٔ شبه‌جزیرهٔ عربستان و صحاری وسیع سیبری واقع شده است. دو رشته‌کوه عظیم زاگرس و البرز در نوار شمالی و غربی این کشور و وجود دشت کویر و دشت لوت در مرکز و جنوب شرق آن نیز به طور چشم‌گیری در مسیر ورود و عبور و مکانیسم سامانه‌ها مؤثر است. مجموع این عوامل سبب می‌شود وردسپهر روی ایران به‌شدت تابع تغییرات زمانی و مکانی شود و آثار آن در تروپوپاز متبلور گردد.

یافته‌های پژوهش

برای دریافت یک تصویر ذهنی درست تحلیل ارتفاعی تروپوپاز از فصل اعتدال بهاری شروع شده است. شکل ۱ a و b تغییرات ارتفاع لایهٔ تروپوپاز را در اولین ماه اعتدال و نیمرخ ارتفاعی این ماه نشان می‌دهد.



شکل ۱. تغییرات ارتفاع لایهٔ تروپوپاز و نیمرخ ارتفاعی در ماه آوریل

جنوب شرق ایران بالاترین ارتفاع تروپوپاز را و شمال غربی و بخش‌های کوچکی از شمال شرق ایران کمترین ارتفاع تروپوپاز را دارند. به عبارتی، شیب توپوگرافیک ارتفاع تروپوپاز جهتی جنوب‌شرقی– شمال‌غربی دارد. روند کاهشی از عرض جغرافیایی تبعیت می‌کند و منحنی‌های ارتفاع امتدادی شرقی– غربی دارند. در همهٔ عرض‌های جغرافیایی شیب ملایمی از شمال شرق به جنوب غرب دیده می‌شود و این به دلیل وجود ارتفاعات زاگرس در بخش غربی ایران است. در

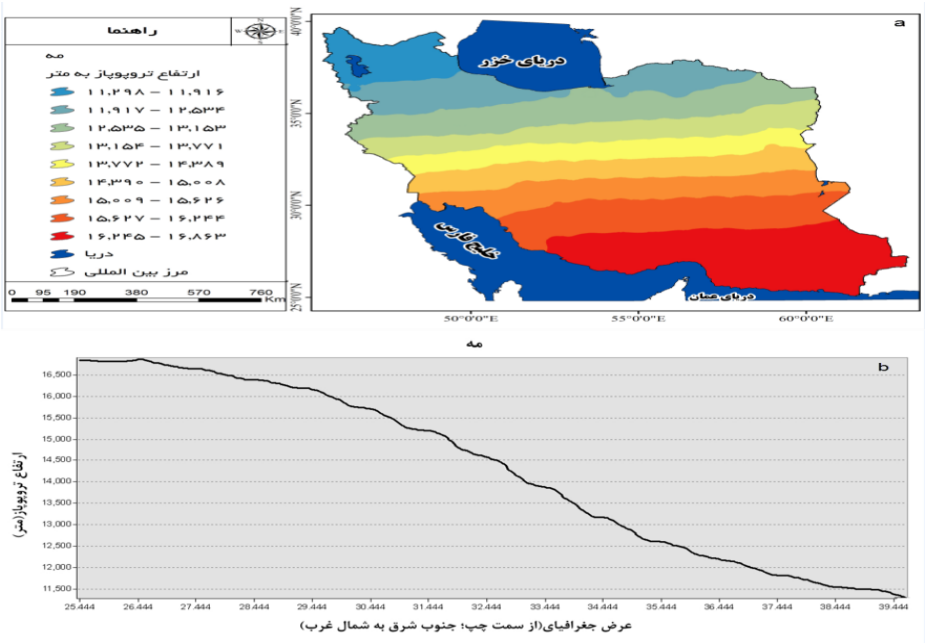
www.SID.ir

Archive of SID

همهٔ لایه‌های ارتفاعی در دامنه‌های غربی زاگرس مجدداً شیبی شمال شرقی و جنوب شرقی اتفاق می‌افتد. این شیب بر روی استان‌های بوشهر، چهارمحال و بختیاری شدیدتر از سایر دامنه‌هاست. نقشهٔ نیمرخ ارتفاعی بیانگر آن است که شیب کاهشی ارتفاع از جنوب به شمال تا عرض ۳۳ درجهٔ شمالی روند تندتری داشته، ولی از این عرض جغرافیایی این شیب ملایم‌تر شده است. این پدیده را با تأثیر ارتفاع رشته‌کوه‌های البرز می‌توان مرتبط دانست. بلندترین ارتفاع تروپوپاز در جنوب شرق ۱۶۷۰۰ متر و در شمال غرب این ارتفاع به حدود ۱۱۰۰۰ متر می‌رسد که در واقع اختلاف ارتفاع تروپوپاز در این ماه به حدود ۵۷۰۰ متر می‌رسد که ضخامتی معادل تراز دریا تا وردسپهر میانی است. به عبارتی، شیب ارتفاعی بسیار درخور توجه است.

ماه می

شکل ۲ a وb نقشهٔ ارتفاعی لایهٔ تروپوپاز را در ماه می نشان می‌دهد. ارتفاع لایه نسبت به ماه قبل در بخش جنوبی و شمالی تغییرات جزئی را نشان می‌دهد. در واقع، در هر دو بخش کشور ارتفاع لایه حدود صد متر در جنوب و ۳۰۰ متر در شمال افزایش یافته است.



شکل ۲. تغییرات ارتفاع لایهٔ تروپوپاز و نیمرخ ارتفاعی در ماه می

پدیدهٔ درخور توجه در این ماه پهنهٔ لایهٔ اول (در جنوب کشور) است که نسبت به ماه قبل افزایش نشان می‌دهد. این پدیده نشان دهندهٔ آن است که با افزایش ارتفاع خورشید این پهنهٔ گرم در جنوب کشور گسترش یافته و همهٔ استان‌های سیستان و بلوچستان، کرمان، هرمزگان، و شرق بوشهر را در بر گرفته است و در واقع خطالرأس ارتفاع زاگرس جنوبی حد پهنهٔ گرم جنوبی را محدود کرده است.

www.SID.ir

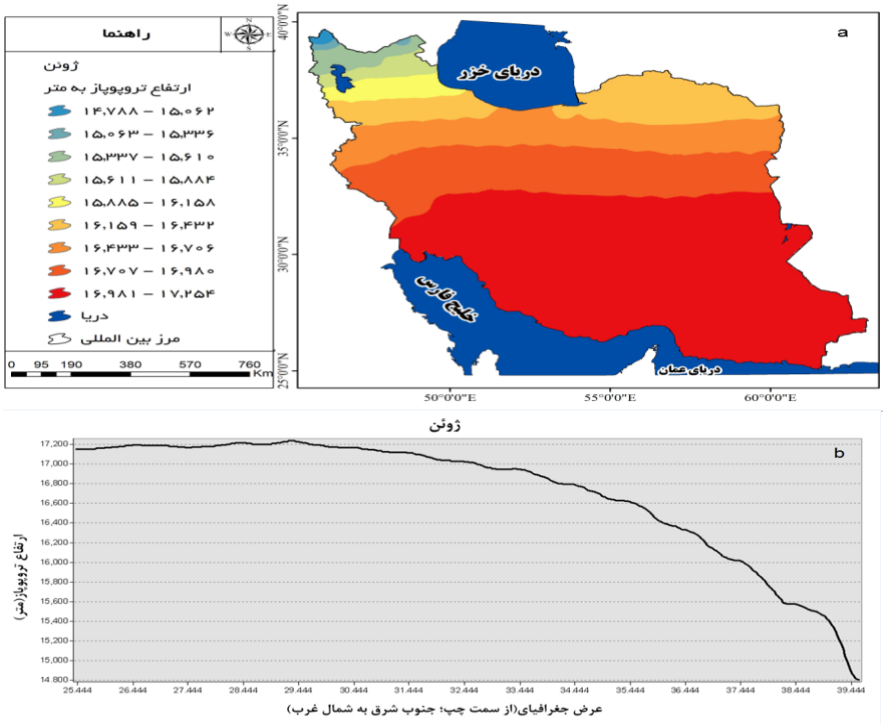
Archive of SID

روند کلی شیب منحنی‌ها همانند ماه قبل است و شیبی شمال شرقی- جنوب غربی دارند. پدیدهٔ درخور توجه دیگر برآمدگی منحنی‌های هم‌ارتفاع به سمت شمال بر روی جنوب شرق دریای مازندران است. ملاحظه می‌شود که در این منطقه ارتباط لایه بین خراسان شمالی و همدان و زنجان قطع شده است.

ماه ژوئن

شکل ۳ a و b نقشهٔ ارتفاع تروپوپاز نیمرخ شیب ارتفاعی را بر روی ایران در ماه ژوئن نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود تغییرات نسبت به ماه قبل بسیار چشم‌گیر است. ارتفاع لایه در جنوب کشور به حدود ۱۷ هزار متر و در شمال غرب کشور به ۱۴۸۰۰ متر افزایش یافته است. بدین ترتیب، تغییرات ارتفاع لایهٔ تروپوپاز در شمال غرب کشور حدود ۳۵۰۰ متر افزایش یافته است. در حالی که در جنوب کشور این افزایش بیشتر از ۳۹۰ متر نیست. تغییر درخور توجه دیگر افزایش پهنهٔ ارتفاعی اول به سمت شمال است. ملاحظه می‌شود که نصف کشور در محدودهٔ ارتفاعی طبقهٔ اول قرار دارد. زیر مدار ۳۱ درجه تقریباً دارای یک لایهٔ ارتفاعی‌اند. از این مدار به بالا تغییرات لایهٔ ارتفاعی تروپوپاز شدیدتر شده و این شیو در شمال غرب کشور شدیدتر از سایر نقاط کشور است. توپوگرافی پیچیدهٔ شمال غرب کشور و تأثیر آن بر پیچیدگی دریافت انرژی تابشی و وقوع جریان‌های همرفتی محلی بر تغییرات ارتفاع تروپوپاز در این منطقه افزوده است.

همان‌طور که نیمرخ شیب ارتفاع جنوب- شمال نیز نشان می‌دهد، شیب نیمرخ در زیر عرض ۳۴ درجه بسیار بطئی و ملایم و برعکس در نوار شمالی و بخصوص شمال غرب این شیب بسیار تند است.



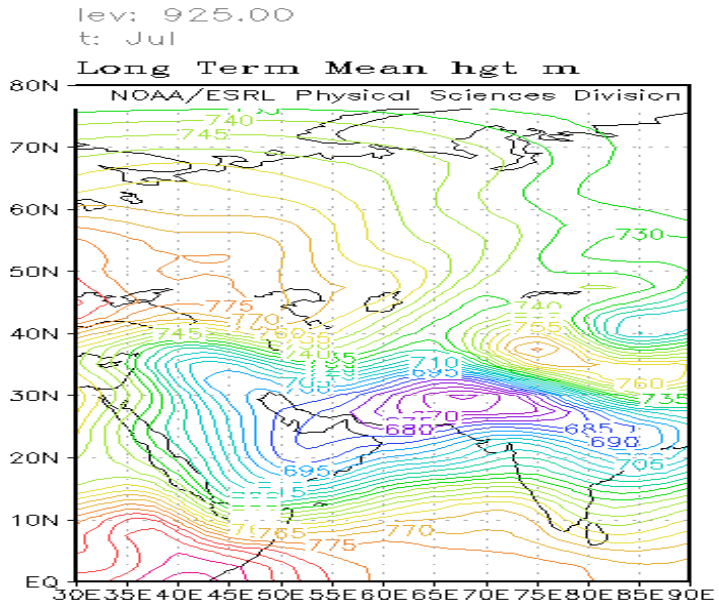
شکل ۳. تغییرات ارتفاع لایهٔ تروپوپاز و نیمرخ ارتفاعی در ماه ژوئن

www.SID.ir

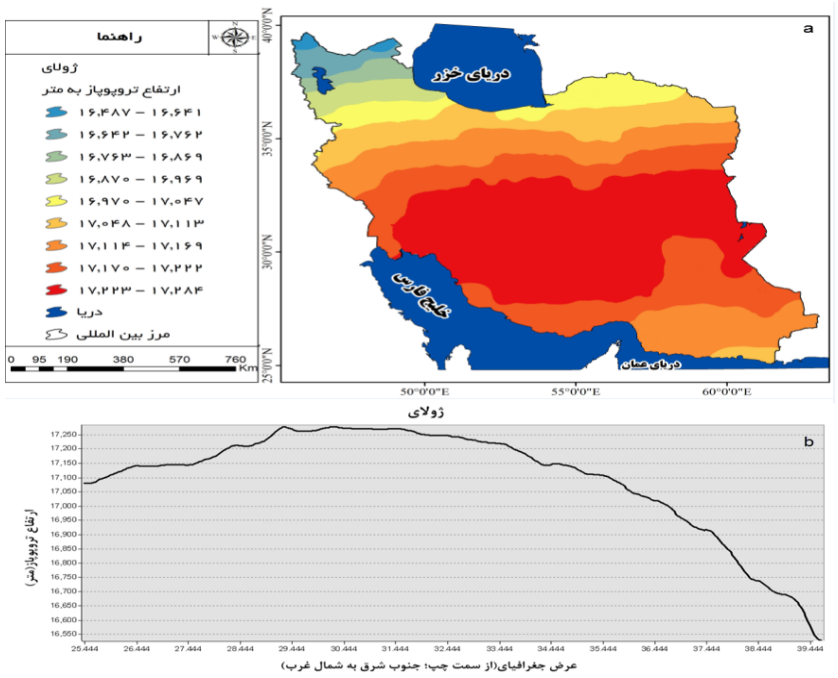
Archive of SID

ماه جولای

شکل ۵ a وb تغییرات ارتفاع لایهٔ تروپوپاز را در ماه جولای بر روی ایران نشان می‌دهد. تغییرات ارتفاع لایهٔ تروپوپاز در این ماه بسیار پیچیده‌تر از ماه‌های قبل است. تقریباً همهٔ الگوهای ماه‌های قبل در این ماه به هم ریخته است. بالاترین ارتفاع لایهٔ تروپوپاز در بخش میانی (متمایل به جنوب) کشور رخ داده است. به‌جز بخش کوچکی در شمال استان کرمان (در امتداد کویر لوت) محدودهٔ عرض‌های ۳۱ تا ۳۳ درجهٔ شمالی بالاترین ارتفاع لایهٔ تروپوپاز را داراست. به سمت عرض‌های پایین و بالاتر از ارتفاع لایهٔ تروپوپاز کم می‌شود.



شکل ۴. میانگین بلندمدت ارتفاع ژئوپتانسیل بر حسب متر در ماه جولای



شکل ۵. تغییرات ارتفاع لایهٔ تروپوپاز و نیمرخ ارتفاعی در ماه جولای

www.SID.ir

Archive of SID

پهنهٔ جنوب و جنوب شرق کشور، شامل استان‌های سیستان و بلوچستان، کرمان، هرمزگان، و بوشهر، در این پهنه قرار دارند. اگر دقت شود، این محدوده از کشور در این ایام با ورود سامانه‌های مونسونی به منطقه همراه است و در عین حال با گسترش شمال سوی ITCZ در این ماه سامانه‌های جوی ناپایدار از جمله زبانه‌های کم‌فشار حرارتی پاکستان بر روی منطقه گسترش یافته و با وقوع بارش‌های مونسونی و مصرف انرژی بادررو به وسیلهٔ تبخیر ناشی از بارش‌ها، جو منطقه خنک‌تر از سایر بخش‌های کشور، بخصوص ایران مرکزی، می‌شود.

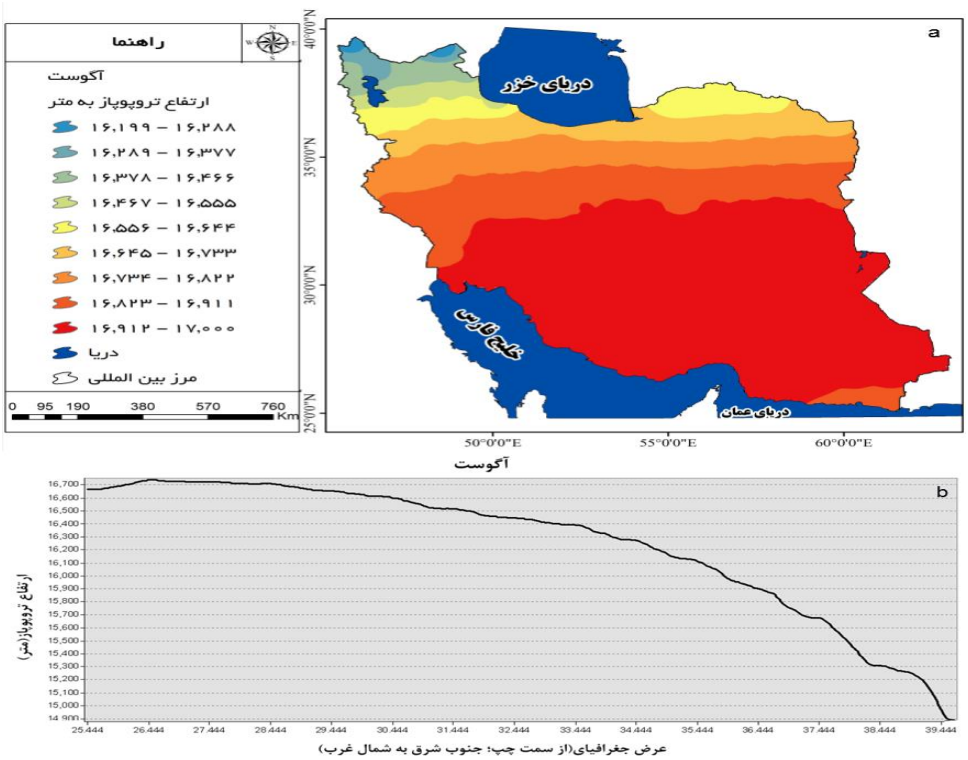
همان طور که در شکل ۴ نیز دیده می‌شود، در این ماه از سال کم‌فشار حرارتی پاکستان بر روی شمال شرق پاکستان استقرار داشته و زبانهٔ غربی آن بخش جنوبی و مرکزی و حتی بخش غربی کشور ایران را در لایهٔ زیرین وردسپهر در بر گرفته است. به طرف شمال و شمال غرب همچنان ارتفاع لایهٔ تروپوپاز کاهش دارد و در پهنه‌هایی از شمال غرب آذربایجان به کمترین مقدار خودی می‌رسد. با این همه دگرگونی‌ها ارتفاع لایهٔ تروپوپاز در مرتفع‌ترین و پست‌ترین نقطه لایهٔ تروپوپاز بیش از ۷۸۰ متر نمی‌رسد. به عبارت دیگر، به دلیل افزایش ارتفاع خورشید و افزایش مقدار انرژی تابشی ورودی به کشور و حرکت شمال سوی پُرفشار جنب حاره‌ای و گرمایش بی‌دررو حاصل از آن بر روی جو ایران، ارتفاع لایهٔ تروپوپاز به‌طور درخور توجهی بالا رفته است و در همهٔ بخش‌های کشور ارتفاعی بیش از ۱۶ هزار متر می‌رسد. تروپوپاز در این ماه بالاترین ارتفاع خود را دارد.

ماه آگوست

شکل ۶ a و b ارتفاع لایهٔ تروپوپاز را در ماه آگوست نشان می‌دهد. در قیاس با ماه قبل، با اینکه پهنهٔ ارتفاع زیاد تروپوپاز گسترش درخور توجهی به سمت جنوب پیدا کرده است، در بخش کوچکی از جنوب شرق ایران ارتفاع لایهٔ تروپوپاز کاهش یافته است. در نیمهٔ جنوبی کشور تغییرات ارتفاع لایهٔ تروپوپاز بسیار اندک و تقریباً همگن است. ولی از عرض 32 درجه به سمت شمال این تغییرات شدیدتر است و در شمال غرب باز هم شدیدتر از سایر نقاط کشور است. بالاترین ارتفاع در جنوب شرق کشور ۱۷۰۰۰ متر و در شمال غرب کشور به ۱۶۲۰۰ متر می‌رسد. بنابراین، در این ماه نیز تغییرات ارتفاع در جنوب و شمال کشور کمتر از ۸۰۰ متر است. و در واقع در نیمی از کشور این تغییرات بیش از ۱۰۰ متر نیست. نیمرخ شیب نیز این پدیده را به‌خوبی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود تغییرات شیب ارتفاع از عرض ۲۵ تا عرض ۳۵ درجهٔ شمالی بسیار اندک و بطئی و بالاتر از عرض ۳۵ درجه این شیب قدری تندتر شده است. این پدیده وجود فعالیت‌های جوی و تأثیر توپوگرافی را در ارتفاع تروپوپاز در این منطقه نشان می‌دهد. همچنان که این پدیده در دامنه‌های غربی رشته‌کوه‌های زاگرس نیز به‌چشم می‌خورد.

www.SID.ir

Archive of SID



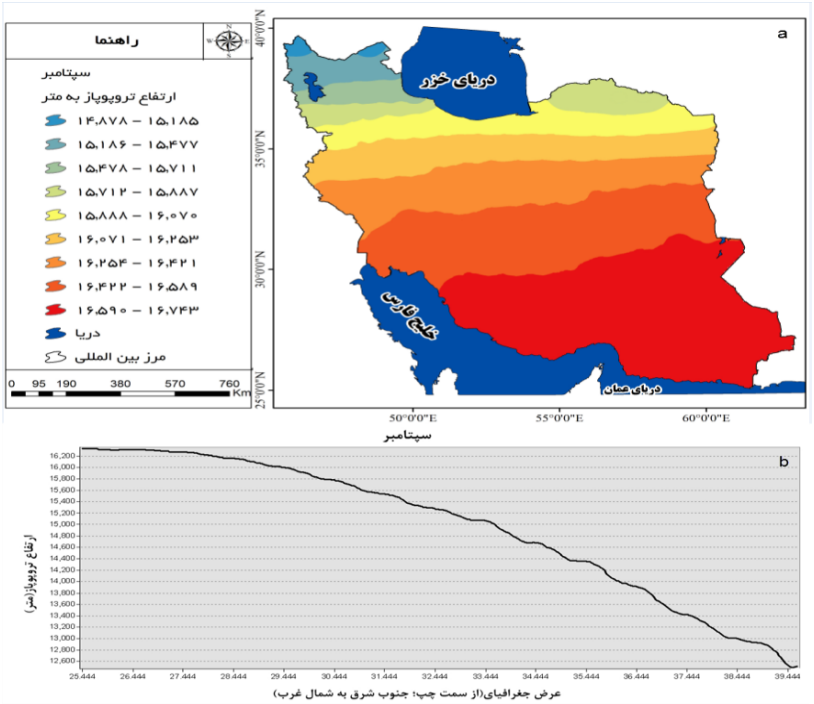
شکل ۶. تغییرات ارتفاع لایهٔ تروپوپاز و نیمرخ ارتفاعی در ماه آگوست

ماه سپتامبر

در این ماه ارتفاع لایهٔ تروپوپاز در قیاس با ماه‌های قبل کاهش یافته است. در جنوبی‌ترین نقطهٔ کشور این ارتفاع از ۱۷۰۰۰ متر به ۱۶۷۰۰ متر و در شمال کشور از ۱۶۲۸۸ متر به ۱۵۱۸۵ متر کاهش یافته است. کاهش ارتفاع در شمال کشور بیش از ۱۰۰۰ متر است. در صورتی که این کاهش در جنوب کشور کمتر از ۳۰۰ متر بوده است. برخلاف ماه‌های جولای و آگوست که جنوب شرق ایران ارتفاع کمتری از مرکز کشور داشت، در ماه سپتامبر تغییرات شیب ارتفاعی تروپوپاز به حالت نرمال خود برگشته است. تغییرات ارتفاع تروپوپاز همچنان با تغییرات عرض جغرافیایی هماهنگ است و با افزایش عرض جغرافیایی ارتفاع تروپوپاز کاهش یافته است، ولی همچنان تغییرات شیب در نیمهٔ جنوبی بسیار بطئی و کند و در بخش‌های شمالی کشور این شیب تندتر است. در بخش شمال غرب ایران این تغییرات همچنان شدیدتر از سایر نقاط است. شکل ۷ a و b این پدیده را به خوبی نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد جابه‌جایی شمال سوی پُرفشار جنب حاره‌ای و از جمله پُرفشار جنب حاره‌ای عربستان در دورهٔ گرم سال و فرایند دینامیکی حاصل از آن باعث گرم‌ترشدن لایهٔ تروپوسفر در نیمهٔ جنوبی ایران شده است و این لایه شرایط یکنواخت‌تری از لحاظ دمایی پیدا کرده و تغییرات ارتفاعی لایهٔ تروپوپاز کاهش یافته است.

www.SID.ir

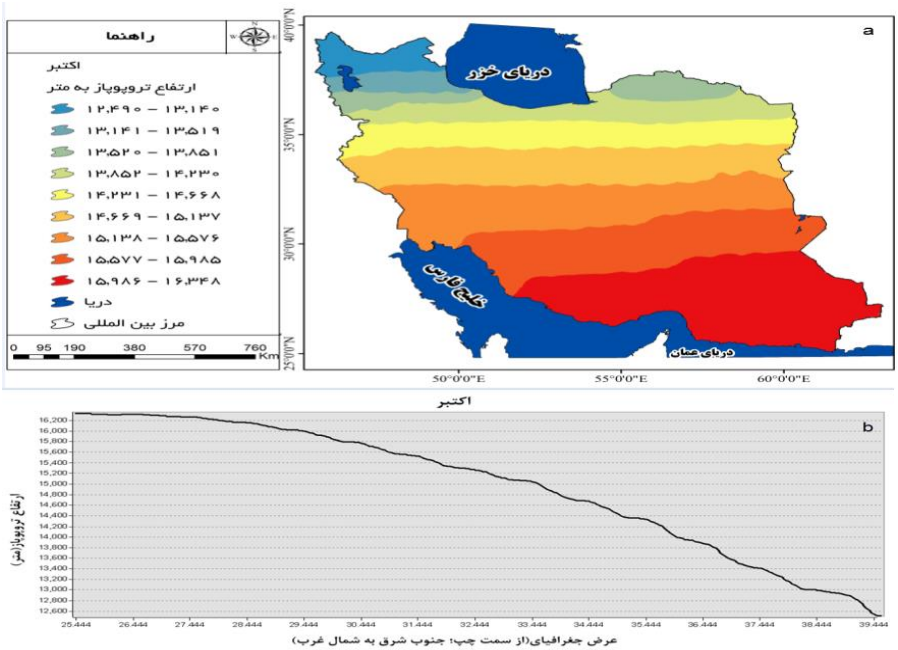
Archive of SID



شکل ۷. تغییرات ارتفاع لایهٔ تروپوپاز و نیمرخ ارتفاعی در ماه سپتامبر

ماه اکتبر

این ماه دومین ماه اعتدال است، ولی ارتفاع تروپوپاز در قیاس با اعتدال بهاری تفاوت‌هایی را نشـان مـی‌دهـد. در جنـوب کشور ارتفاع تروپوپاز ۱۶۳۴۸ متر است که در قیاس با ماه آوریل (۱۶۷۴۵ متر) حدود ۴۰۰ متر افت ارتفاع دیده مـی‌شـود. در بخش شمالی این ارتفاع ۱۳۱۴۰ متر است که نسبت به ماه آوریل (۱۱۶۴۶ متر) حدود ۱۵۰۰ متر مرتفع‌تر است.



شکل ۸. تغییرات ارتفاع لایهٔ تروپوپاز و نیمرخ ارتفاعی در ماه اکتبر

www.SID.ir

Archive of SID

بدین ترتیب، در ماه اکتبر در جنوب کشور ارتفاع تروپوپاز نسبت به ماه اعتدال بهاری کاهش ارتفاع دارد، ولی در شمال کشور نسبت به آوریل حدود ۱۵۰۰ متر افزایش ارتفاع دارد. پدیدهٔ درخور ذکر تأثیر رشته‌کوه‌های البرز بخصوص بخش مرکزی آن بر لایهٔ تروپوپاز است.

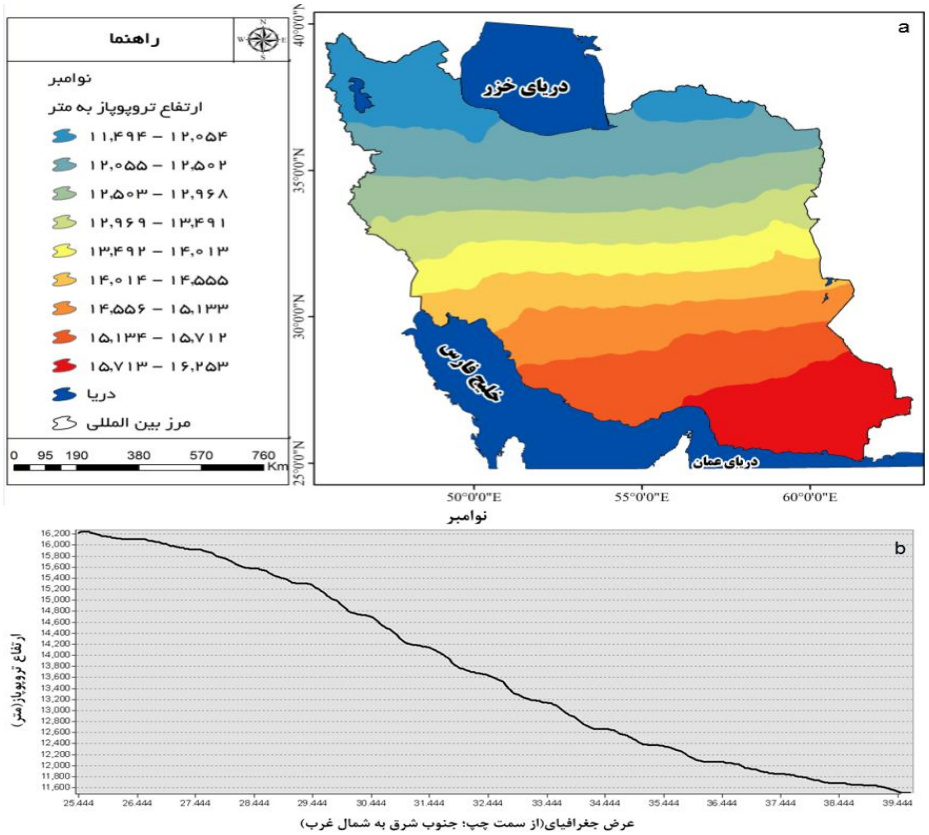
همان طور که دیده می‌شود، از ماه مارس به‌تدریج توپوگرافی رشته‌کوه‌های البرز میانی تأثیر خود را بر لایهٔ تروپوپاز تحمیل می‌کند؛ به طوری که لایهٔ هم‌ارتفاع در طول هشت ماه دورهٔ گرم سال بین شمال شرق و شمال غرب کشور گسسته و به عبارتی این محدوده با لایهٔ هم‌ارتفاع تروپوپاز عرض پایین‌تر هماهنگ می‌شود. به بیان دیگر، ارتفاع لایهٔ تروپوپاز در این محدوده مرتفع‌تر از مناطق هم‌عرض خود است. ارتفاع زیاد این رشته‌کوه از یک طرف و وقوع ناپایداری‌های محلی در طول دورهٔ گرم سال و جریانات همرفتی دامنه‌های شمالی البرز نیز این پدیده را تقویت می‌کند.

ماه نوامبر

شکل ۹ a و b پراکنش لایه‌های هم‌ارتفاع تروپوپاز نیمرخ طولی آن را در کشور ایران در ماه نوامبر نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود، ارتفاع لایهٔ تروپوپاز در همهٔ بخش‌های کشور کاهش یافته است. این کاهش در جنوب کشور ۹۵ متر و در شمال غرب ۱۰۸۶ متر است. این کاهش ارتفاع در سرتاسر کشور یکنواخت نیست. به سبب هجوم هوای سرد عرض‌های شمالی به سمت عرض‌های نیمروزی‌تر از طریق گسترش جنوب سوی ورتکس قطبی و گسترش جنوب سوی زبانه‌های پُرفشار سیبری کاهش ارتفاع در عرض‌های شمالی کشور بسیار شدیدتر از عرض‌های جنوبی کشور است. به دلیل جابه‌جایی شرق سوی پُرفشار جنب حاره‌ای عربستان در دورهٔ سرد سال، جنوب شرق ایران پُرارتفاع‌ترین بخش از لحاظ ارتفاع لایهٔ تروپوپاز است. همچنین، بر اثر افزایش شیو دمایی در این دوره از سال، گرادیان ارتفاعی بین جنوب و شمال کشور به‌شدت زیادتر شده است. شیب منحنی‌های هم‌ارتفاع به‌جز در غرب کشور از عرض جغرافیایی تبعیت می‌کند. ولی در نیمهٔ غربی، بخصوص در جنوب غرب کشور، این منحنی‌ها شکسته شده و جهت شمال شرقی- جنوب غربی پیدا کرده‌اند. کم‌ارتفاع‌ترین ارتفاع تروپوپاز در شمال غرب و شمال شرق کشور دیده می‌شود؛ جایی که زبانه‌های پُرفشار سیبری امکان نفوذ می‌یابند و دما را کاهش می‌دهند. در صورتی که محدودهٔ مرکزی (شمال کشور)، به سبب توپوگرافی ویژهٔ البرز مرکزی، امکان چنین گسترشی را فراهم نمی‌کند. به همین دلیل، حوزهٔ مرکزی نوار شمالی ارتفاعی بیشتر از سایر بخش‌ها دارد و در لایهٔ هم‌ارتفاع شکسته شده است. در مقابل، در محدودهٔ جنوب غرب کشور (محدودهٔ استان‌های خوزستان و ایلام) و دشت‌های غربی ارتفاعات زاگرس جنوبی ارتفاع تروپوپاز کاهش یافته است.

www.SID.ir

Archive of SID



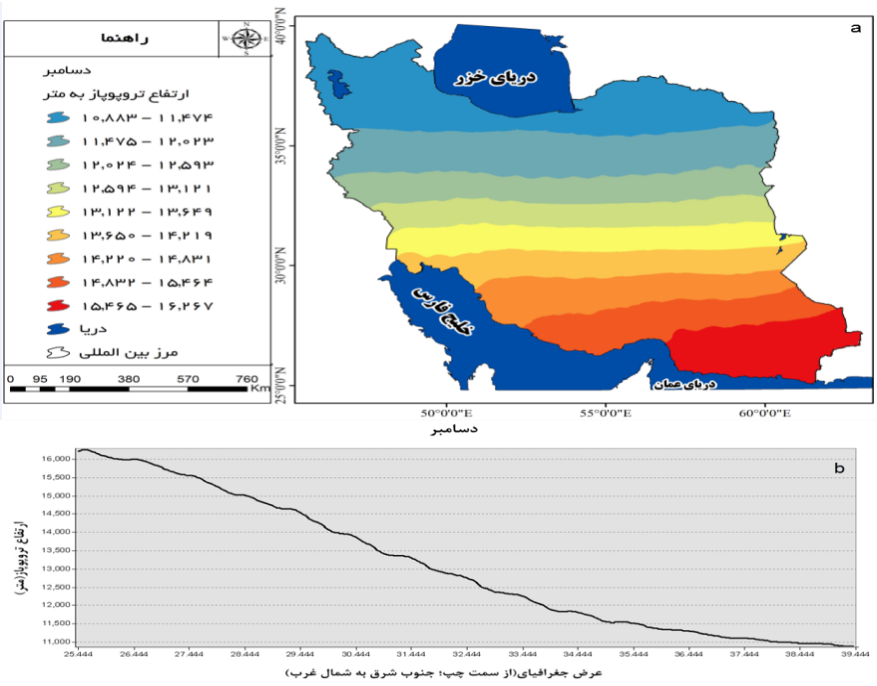
شکل ۹. تغییرات ارتفاع لایهٔ تروپوپاز و نیمرخ ارتفاعی در ماه نوامبر

ماه دسامبر

شکل ۱۰ a وb توزیع ارتفاعی لایهٔ تروپوپاز را در ماه دسامبر نشان می‌دهد. در قیاس با ماه قبل، ارتفاع لایهٔ تروپوپاز در جنوب شرق ایران تفاوت چندانی را نشان نمی‌دهد. ولی در شمال کشور ارتفاع تروپوپاز ۵۸۰ متر کاهش نشان می‌دهد. پهنهٔ کم‌ارتفاع تروپوپاز در نوار شمالی در این ماه یکپارچه شده و گسستگی نوار مرکزی البرز از بین رفته است. این پدیده نشان‌دهندهٔ گسترش جنوب سوی ورتکس قطبی و زبانه‌های پُرفشار سیبری در نوار شمالی کشور است. منحنی‌های هم‌ارتفاع در بالای مدار ۳۰ درجهٔ شمالی تقریباً غربی- شرقی است و فقط در نوار جنوبی کشور منحنی‌های هم‌ارتفاع شیبی شمال شرقی- جنوب غربی دارند. نیمرخ شیب تروپوپاز، همانند ماه قبل، بخصوص در بالای ۲۸ درجه زیاد است و بیانگر شیو ارتفاعی شدید در نیمهٔ شمالی کشور است. به همین دلیل، شیو حرارتی نیز در بخش شمالی کشور شدیدتر از بخش جنوبی آن است. این همگنی دمایی در پهنه و شیب لایه‌های ارتفاعی نیز به‌خوبی مشاهده می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۰. تغییرات ارتفاع لایهٔ تروپوپاز و نیمرخ ارتفاعی در ماه دسامبر

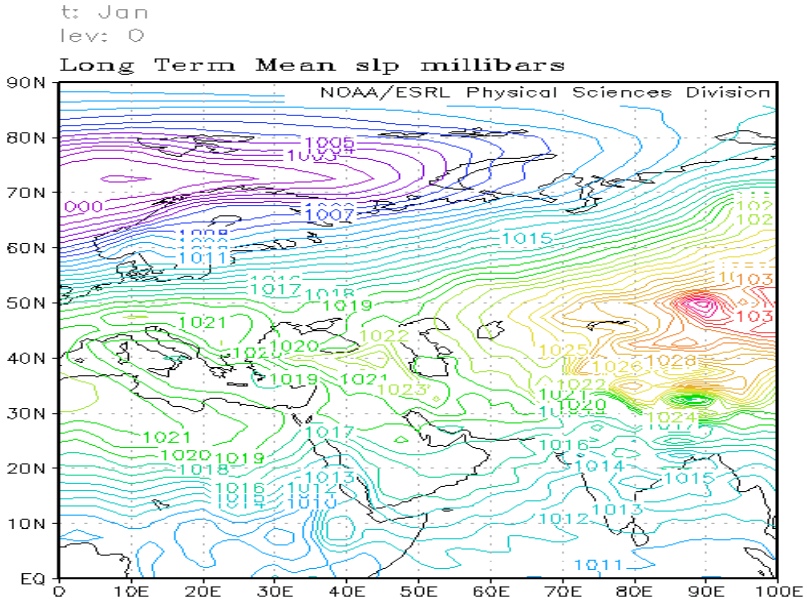
ماه ژانویه

شکل ۱۲ a و b توزیع ارتفاعی لایهٔ تروپوپاز را در پهنهٔ کشور ایران نشان می‌دهد. ارتفاع لایهٔ تروپوپاز در جنوب کشور ۴۴۴ متر و در شمال کشور ۴۹۱ متر کاهش نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که تغییر ارتفاع تروپوپاز در جنوب و شمال کشور همسان می‌شود. تفاوت دیگری که در ماه دسامبر شروع شده در این ماه نیز تداوم دارد. گسترش پهنهٔ ارتفاع و همسانی لایهٔ ارتفاعی نوار شمالی کشور و دگرگونی شیب شدیدتر لایه‌های ارتفاعی در بخش جنوبی کشور است. در حالی که در ماه‌های گرم سال شیو ارتفاعی در عرض‌های پایین بسیار بطئی و ملایم بود و این شیو ارتفاعی در عرض‌های شمالی شدیدتر بوده است. همچنان که پهنهٔ کم‌ارتفاع در نوار شمالی رو به عرض‌های پایین در حال گسترش است، پهنهٔ لایهٔ پُرارتفاع در جنوب شرق کشور کوچک‌تر و محدودتر می‌شود. خط هم‌ارتفاع در مرکز کشور موازی و مستقیم است، ولی در بخش جنوبی کشور، بخصوص در جنوب غرب، شیبی شمال شرقی- جنوب غربی دارد. نیمرخ طولی لایهٔ تروپوپاز نیز به‌خوبی شیب شدید توزیع ارتفاع را در بخش جنوبی و یکنواختی شیب را در نوار شمالی نشان می‌دهد. همان طور که بر روی نقشهٔ طولانی‌مدت تراز دریا در ماه ژانویه (شکل ۱۱) دیده می‌شود، در این ماه غلبهٔ زبانه‌های پُرفشار سیبری بر روی ایران، بخصوص در نوار شمالی و شمال غربی کشور، است. یک هستهٔ پُرفشار فرعی بر روی نقشه در شمال غرب کشور به‌چشم می‌خورد.

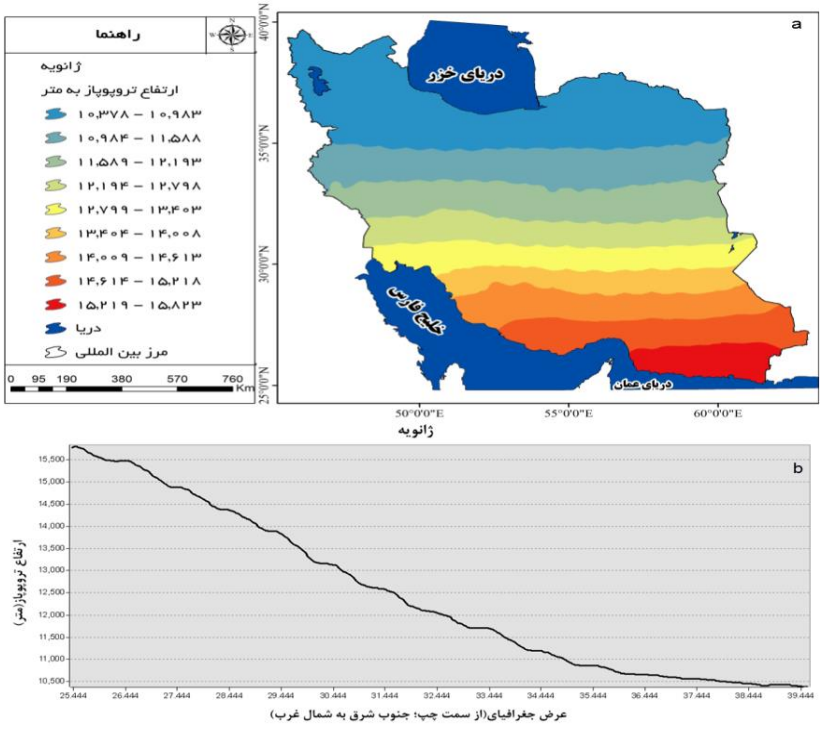
با گسترش جنوب سوی زبانه‌های پُرفشار سیبری و کاهش طول روز و به‌تبع کاهش تابشی ورودی در بالاتر از عرض جغرافیایی ۳۵ درجه، جوّی سرد بر منطقه حاکم می‌شود و ارتفاع تروپوپاز در پایین حد خود قرار می‌گیرد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۱. نقشهٔ طولانی‌مدت تراز دریا در ماه ژانویه



شکل ۱۲. تغییرات ارتفاع لایهٔ تروپوپاز و نیمرخ ارتفاعی در ماه ژانویه

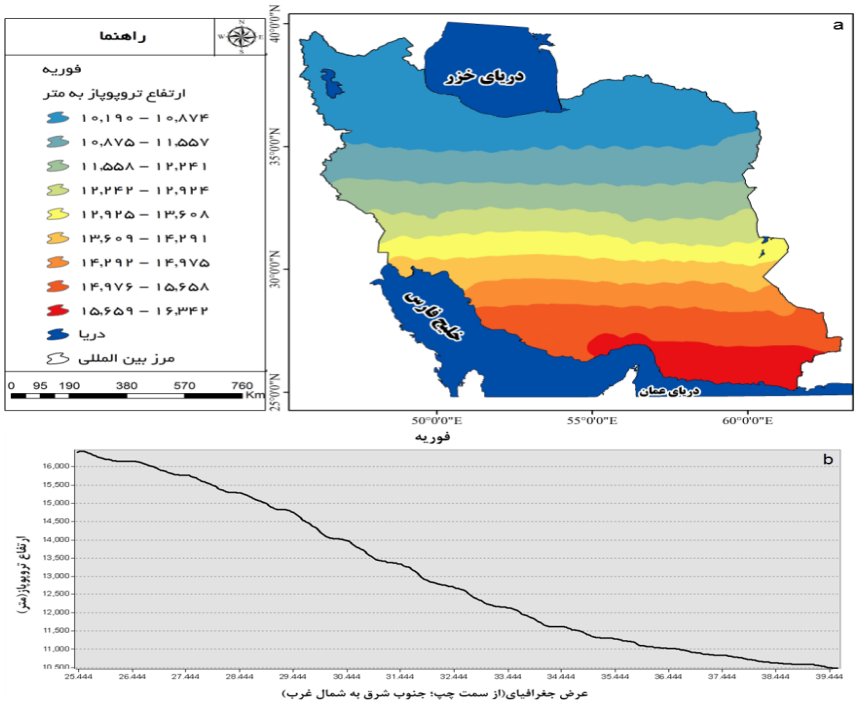
ماه فوریه

شکل ۱۳ a و b پراکنش ارتفاعی لایهٔ تروپوپاز را در ماه فوریه نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود، ارتفاع لایه در

www.SID.ir

Archive of SID

جنوب کشور در قیاس با شمال ۵۲۰ متر افزایش نشان می‌دهد. در حالی که این افزایش در شمال کشور حدود ۱۱۰ متر است. در این ماه بیشترین اختلاف ارتفاع بین جنوب و شمال کشور اتفاق افتاده است. توزیع ارتفاعی تروپوپاز در پهنهٔ کشور باز هم تابع عرض جغرافیایی است. تقریباً در همهٔ پهنهٔ کشور منحنی هم‌ارتفاع موازی و مداری است و برخلاف ماه‌های قبل در غرب و جنوب غرب نیز شیب ندارد. ولی همچنان شیب ارتفاعی در بخش شمالی کشور بطئی و ملایم و در بخش مرکزی و جنوبی کشور شیب ارتفاعی تندتر است. این پدیده نشان‌دهندهٔ حاکمیت یک جو نسبتاً همگن در نوار شمالی کشور و تغییرات دمایی شدیدتر آن در سایر نقاط کشور است. افزایش ارتفاع تروپوپاز در همهٔ پهنهٔ کشور بیانگر افزایش نسبی دما در سراسر کشور به دلیل افزایش نسبی زاویهٔ تابش و افزایش طول روز است.



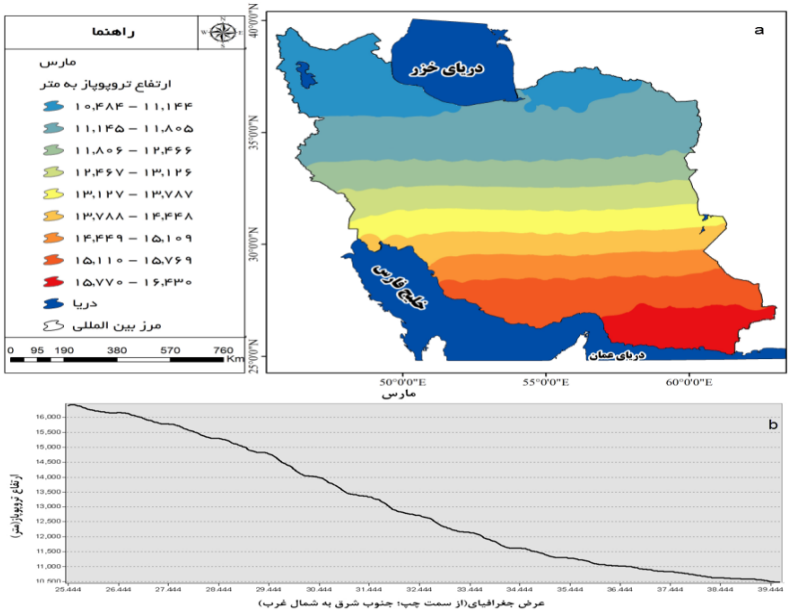
شکل ۱۳. تغییرات ارتفاع لایهٔ تروپوپاز و نیمرخ ارتفاعی در ماه فوریه

ماه مارس

شکل ۱۴ a و b نشان‌دهندهٔ تغییرات ارتفاع لایهٔ تروپوپاز در آخرین ماه دورهٔ سرد سال است. اولین تغییر کاهش پهنهٔ کم‌ارتفاع نوار شمالی از یک طرف و گسستگی در این لایه است. باز هم همانند ماه‌های گرم یک پهنهٔ کم‌ارتفاع در شمال شرق و یک پهنهٔ کم‌ارتفاع دیگر در شمال غرب کشور به‌چشم می‌خورد. این پهنه به وسیلهٔ توپوگرافی البرز بریده شده است. در این ماه نیز گرادیان ارتفاعی در نوار شمالی و جنوبی کشور بطئی و ملایم ولی در مرکز کشور شدیدتر است. ولی منحنی‌ها هم‌ارتفاع در مرکز کشور تقریباً موازی و مداری‌اند و شیب چندانی را نشان نمی‌دهند. به عبارتی، منحنی‌ها کاملاً از مدارات پیروی می‌کنند.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۴. تغییرات ارتفاع لایهٔ تروپوپاز و نیمرخ ارتفاعی در ماه مارس

بحث و نتیجه‌گیری

همان طور که ملاحظه شد، لایهٔ تروپوپاز، که واکنشی از تغییرات جوی لایهٔ وردسپهر زیرین است، در ایران تابع تغییرات فصلی و منطقه ای شدیدی است. برخی از این تغییرات ناشی از توپوگرافی پیچیدهٔ کشور و برخی نیز متأثر از تنوع سامانه‌های ورودی به کشور در فصول و ماه‌های مختلف سال است. در این میان نقش توپوگرافی در تغییرات منطقه‌ای ارتفاع تروپوپاز و نقش سامانه‌های جوی در تغییرات فصلی ارتفاع لایهٔ تروپوپاز بارزتر است.

جدول ۱ چکیدهٔ پراکنش ماهانه و تغییرات ارتفاع لایهٔ تروپوپاز را بین شمال و جنوب کشور ایران نشان می‌دهد.

جدول ۱. پراکنش ماهانه و تغییرات ارتفاع لایهٔ تروپوپاز بین شمال و جنوب کشور ایران (واحدها بر حسب متر است)

ماه‌ها	ارتفاع لایهٔ تروپوپاز در جنوب کشور	تغییرات ارتفاع نسبت به ماه قبل	ارتفاع لایهٔ تروپوپاز در شمال کشور	تغییرات ارتفاع نسبت به ماه قبل	اختلاف ارتفاع تروپوپاز بین جنوب و شمال کشور
آوریل	۱۶۷۴۵	+۳۱۵	۱۱۰۰۸	+۵۲۴	۵۷۳۴
می	۱۶۸۶۳	+۱۱۸	۱۱۲۹۸	+۲۹۰	۵۵۶۵
ژوئن	۱۷۲۵۴	+۳۹۱	۱۴۷۸۸	+۳۴۹۰	۲۴۶۶
جولای	۱۷۲۸۴	+۲۰	۱۶۴۸۷	+۱۶۹۹	۷۹۷
آگوست	۱۷۰۰۰	−۲۸۴	۱۶۱۹۹	−۲۹	۸۰۱
سپتامبر	۱۶۷۴۳	−۲۵۷	۱۴۸۷۸	−۱۳۲۱	۱۸۶۵
اکتبر	۱۶۳۴۸	−۳۹۵	۱۲۴۹۰	−۲۳۸۰	۳۸۵۸

www.SID.ir

Archive of SID

ادامه جدول ۱. پراکنش ماهانه و تغییرات ارتفاع لایهٔ تروپوپاز بین شمال و جنوب کشور ایران (واحدها بر حسب متر است)

ماه‌ها	ارتفاع لایهٔ تروپوپاز در جنوب کشور	تغییرات ارتفاع نسبت به ماه قبل	ارتفاع لایهٔ تروپوپاز در شمال کشور	تغییرات ارتفاع نسبت به ماه قبل	اختلاف ارتفاع تروپوپاز بین جنوب و شمال کشور
نوامبر	۱۶۲۵۳	−۹۵	۱۱۴۹۴	−۹۹۶	۴۷۵۹
دسامبر	۱۶۲۶۷	+۱۴	۱۰۸۸۳	−۶۱۱	۵۳۸۴
ژانویه	۱۵۸۲۳	−۴۴۴	۱۰۳۷۸	−۵۰۵	۵۴۴۵
فوریه	۱۶۳۴۲	+۵۲۰	۱۰۱۹۰	−۱۸۸	۶۱۵۲
مارس	۱۶۴۳۰	+۸۸	۱۰۴۸۴	+۲۹۴	۵۹۴۶

نکات اساسی در تغییرات سالانهٔ ارتفاع تروپوپاز در ایران را به‌ترتیب از بهار تا زمستان می‌توان به صورت زیر جمع‌بندی کرد:

۱. در ماه‌های اعتدال، یعنی آوریل و اکتبر، چون خورشید در اعتدال خود قرار دارد، انتظار می‌رود ارتفاع لایهٔ تروپوپاز نیز در شرایط متعادل باشد و این دو ماه حالت مشابه را در سرتاسر کشور دارا باشند. در این ماه اختلاف ارتفاع بین شمال تا جنوب به بیش از ۵۷۰۰ متر می‌رسد. این به مفهوم جابه‌جایی ناگهانی فصل در جنوب کشور است. در صورتی که در شمال و شمال غرب کشور جابه‌جایی فصل بطئی و آرام انجام می‌شود. این تغییر ارتفاع شدید در جنوب شرق و جنوب کشور به جابه‌جایی ناگهانی پُرفشار عربستان مربوط می‌شود (لشکری و همکاران، ۲۰۱۶). این اختلاف در اعتدال پاییزی به ۳۸۵۸ متر می‌رسد که بسیار کمتر از اعتدال بهاری است و ۱۴۸۲ متر پایین‌تر از ارتفاع تروپوپاز در اعتدال بهاری است. همان طور که ملاحظه می‌شود، تفاوت اساسی در ارتفاع این لایه در این دو ماه در پهنهٔ کشور وجود دارد. شروع گسترش زبانه‌های پُرفشار سیبری بر روی ایران و بخصوص بر روی منطقهٔ شمال غرب کشور و توپوگرافی این منطقه سبب شده است که با گسترش توده‌های سرد عرض‌های شمالی بر روی شمال غرب کشور و سردی نسبی جو ارتفاع تروپوپاز کاهش شدیدتری را نشان دهد. از طرفی، اختلاف کمتر در ارتفاع تروپوپاز در جنوب و شمال کشور در ماه اکتبر نشان‌دهندهٔ آن است که گذر از تابستان به پاییز در کشور آرام و بطئی انجام می‌شود.

۲. از ماه می به بعد پهنهٔ لایهٔ ارتفاعی جنوبی گسترده‌تر می‌شود و این گسترش تا پایان ماه اکتبر ادامه می‌یابد. به عبارت دیگر، در بخش عظیمی از نیمهٔ جنوبی کشور تغییرات ارتفاعی لایهٔ تروپوپاز بسیار اندک و جزئی است. به دلیل افزایش ارتفاع خورشید و جابه‌جایی شمال سوی پُرفشار جنب حاره‌ای عربستان و پایداری دینامیکی جو و گرمایش حاصل از آن سبب می‌شود، ضمن افزایش ضخامت لایهٔ وردسپهر، دمای جو در این بخش از کشور همگن‌تر شود و به‌تبع تغییرات شیب لایهٔ تروپوپاز بسیار کند و بطئی گردد. در ماه ژوئن تقریباً نصف کشور در یک پهنهٔ ارتفاعی قرار دارد.

۳. برعکس، در ماه‌های دسامبر، ژانویه، فوریه، می، و آوریل (ماه‌های سرد سال کشور ایران) لایه‌های هم‌ارتفاع در نوار شمالی کشور گسترده‌تر می‌شود. نفوذ زبانه‌های سرد از عرض‌های شمالی به دلیل گسترش تاوهٔ قطبی بخش شمالی کشور از لحاظ دمایی همگن‌تر می‌شود و تغییرات ارتفاع تروپوپاز بطئی و کند می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

۴. در همهٔ ماه‌های سال تغییرات ارتفاع لایهٔ تروپوپاز از جنوب به شمال تابع عرض جغرافیایی است و منحنی‌های هم‌ارتفاع امتدادی شرقی- غربی دارند. با این همه تقریباً در همهٔ ماه‌ها منحنی هم‌ارتفاع شیبی شمال شرقی- جنوب غربی دارند. به سبب گسترش شمال- جنوب رشته‌کوه‌های زاگرس در ضلع غربی کشور ایران منحنی‌های هم‌ارتفاع تروپوپاز به سمت غرب کشور به سمت عرض‌های جنوبی تمایل پیدا می‌کنند. علاوه بر این، در جنوب غرب ایران، بخصوص بر روی جلگهٔ خوزستان، منحنی‌های هم‌ارتفاع تروپوپاز مجدداً شیب پیدا می‌کنند و به سمت جنوب میل پیدا می‌کنند.

۵. در ماه‌های ژانویه، فوریه، و آوریل بیشترین تغییرات شیب ارتفاعی تروپوپاز در بخش جنوبی کشور، در ماه‌های مارس، می، و نوامبر این تغییرات شدید در مرکز کشور، و در ماه‌های ژوئن، جولای، اوت، سپتامبر، و اکتبر تغییرات شدید ارتفاعی در نوار شمالی کشور اتفاق می‌افتد.

۶. در ماه جولای ارتفاع لایهٔ تروپوپاز به بالاترین حد خود می‌رسد؛ به طوری که ارتفاع آن در اطراف دشت لوت به بیش از ۱۷۲۸۴ متر بالغ می‌شود. در این ماه ارتفاع لایهٔ تروپوپاز در مرکز کشور در بالاترین حد خود قرار دارد و به سمت شمال و جنوب از ارتفاع تروپوپاز کم می‌شود. با نفوذ جریانات موسمی به جنوب شرق کشور در طول ماه‌های جولای، اوت، و پدیده‌های ناپایداری حاصل از آن و همچنین گسترش شمال سوی ITCZ ارتفاع تروپوپاز در جنوب شرق کشور کاهش یافته است.

۷. همان‌طور که در جدول ۱ نیز دیده می‌شود، تغییرات ارتفاع لایهٔ تروپوپاز در جنوب کشور بسیار اندک است و در هیچ یک از ماه‌ها بالاتر از ۵۲۰ متر نرسیده است. بالاترین تغییر ارتفاع در بخش جنوبی کشور در ماه فوریه و کمترین آن در ماه جولای اتفاق می‌افتد. در مقابل، تغییرات ماه به ماه ارتفاع لایهٔ تروپوپاز در شمال کشور بسیار شدید است؛ به گونه‌ای که در برخی از ماه‌ها این تغییرات به بیش از ۳۰۰۰ متر نیز رسیده است. بالاترین تغییر مربوط به ماه ژوئن (۳۴۹۰ متر) و کمترین آن در ماه آگوست اتفاق افتاده است.

۸. در جنوب کشور از ماه فوریه ارتفاع تروپوپاز افزایش می‌یابد و تغییرات مثبت می‌شود و به مدت شش ماه این تغییرات ادامه می‌یابد. از ماه اوت این تغییرات منفی می‌شود و ارتفاع تروپوپاز کاهش و تا ماه ژانویه ادامه می‌یابد.

۹. در شمال کشور از ماه مارس ارتفاع تروپوپاز افزایش می‌یابد و به مدت پنج ماه ادامه می‌یابد و در ماه جولای به بالاترین ارتفاع خود می‌رسد. از ماه جولای به بعد ارتفاع تروپوپاز رو به کاهش می‌رود و تغییرات ارتفاعی منفی می‌شود. بیشترین کاهش ارتفاع در شمال بین ماه سپتامبر و اکتبر رخ می‌دهد و ارتفاع تروپوپاز ۲۳۸۰ متر کاهش می‌یابد. برعکس، از ماه می و ژوئن بالاترین افزایش ارتفاع صورت می‌گیرد و ارتفاع تروپوپاز ۳۴۹۰ متر افزایش می‌یابد.

۱۰. بالاترین اختلاف ارتفاع بین تروپوپاز شمال و جنوب کشور در ماه فوریه اتفاق می‌افتد. در این ماه اختلاف ارتفاع تروپوپاز در جنوب و شمال کشور بیش از ۶۰۰۰ متر است. در طول ماه‌های دسامبر تا می (شش ماه از سال) اختلاف ارتفاع در جنوب و شمال کشور بیش از ۵۰۰۰ متر است. و کمترین اختلاف ارتفاع نیز در ماه جولای اتفاق می‌افتد و اختلاف ارتفاع بیش از ۷۹۷ متر است.

۱۱. در طول ماه‌های دسامبر، ژانویه، و فوریه لایه‌های هم‌ارتفاع در شمال شرق و شمال غرب کشور یکپارچه‌اند.

www.SID.ir

Archive of SID

این به دلیل گسترش زبانه‌های سرد عرض‌های شمالی بر نوار شمالی کشور است، ولی در سایر ماه‌های سال لایه‌های هم‌ارتفاع در شمال شرق و شمال غرب کشور گسسته می‌شوند. گسترش شمال سوی هوای گرم دشت وسیع کویر در طول ماه‌های گرم سال و تجمع آن در دامنه‌های جنوبی البرز به وسیلهٔ سد کوهستانی البرز سبب می‌شود. لایهٔ هم‌ارتفاع در این بخش از کشور گسترش شمال سو پیدا می‌کند و ارتباط لایه‌های هم‌ارتفاع را در شمال شرق و شمال غرب کشور قطع می‌کند.

به طور خلاصه می‌توان گفت تغییرات منطقه‌ای در ارتفاع لایهٔ تروپوپاز در ایران ارتباط نزدیکی دارد با توپوگرافی و امتداد رشته‌کوه‌های حاشیهٔ شمالی و غربی کشور و پهنه‌های عظیم دشت‌های داخلی ایران و همچنین ورود سامانه‌های بارشی از مبادی ورودی مختلف به کشور.

همان طور که بر روی نقشه‌های لایه‌های ارتفاعی تروپوپاز نیز دیده می‌شود، در بیشترِ ماه‌های سال منحنی‌های هم‌ارتفاع تروپوپاز بر روی ارتفاعات زاگرس شیبی به سمت جنوب غرب پیدا می‌کنند. از طرفی، در طول ماه‌های گرم سال (بخصوص از ماه ژوئن تا اکتبر) منحنی‌های هم‌ارتفاع تروپوپاز بر روی البرز و بخصوص البرز مرکزی بریده می‌شود و دوباره بر روی شمال غرب کشور امتداد می‌یابد.

همچنین، این تحقیق نشان داد که تغییرات شدید ارتفاع لایهٔ تروپوپاز در فصول مختلف سال به تنوع سامانه‌های ورودی به کشور در هر فصلی بسیار بستگی دارد. ناهمگونی در ارتفاع لایهٔ تروپوپاز در جنوب شرق کشور کاملاً با فعالیت سامانه‌های مونسونی در فصل گرم ارتباط دارد. ملاحظه شد که ارتفاع این لایه در ماه‌های گرم سال بسیار پایین‌تر از سایر نقاط کشور است. در حالی که انتظار می‌رفت، با توجه به شرایط تابشی و عرض جغرافیایی پایین منطقه، بالاترین ارتفاع را در این بخش از سال داشته باشد. همچنان که تنوع شدید ارتفاعی لایه در فصول سرد در شمال شرق و شمال غرب، علاوه بر ارتفاع، به تنوع سامانه‌های ورودی به منطقه ارتباط دارد. در دورهٔ ورود سامانه‌های بارشی به کشور گرادیان ارتفاعی بین شمال و جنوب کشور به اوج خود می‌رسد.

منابع

Ambaum, M. H., & Hoskins, B. J. (2002). The NAO troposphere–stratosphere connection. *Journal of Climate*, 15(14), 1969-1978.

Andrews, D. G., Holton, J. R., & Leovy, C. B. (1987). Middle atmosphere dynamics (No. 40). Academic press.

Aumann, H. H., Chahine, M. T., Gautier, C., Goldberg, M. D., Kalnay, E., McMillin, L. M. ... & Strow, L. L. (2003). AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: Design, science objectives, data products, and processing systems. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(2), 253-264.

Bonazzola, M. and Hayne, P.H. (2004). A trajectory-based study of the tropical tropopause region, *Journal of Geophsical Reserch*, Vol. 109, D20112, doi: 10.1029/2003JD004356,

Conaty, A.L.; Jusem, J.C.; Takacs, L.; Keyser, D. and Atlas, R. (2001). The Structure and Evolution of Extratropical Cyclones, Fronts, Jet Streams, and the Tropopause in the GEOS General Circulation Model, *Bulletin of the American Meteorological Society*, p. 1853-1867.

Fueglistaler, S., Dessler, A. E., Dunkerton, T. J., Folkins, I., Fu, Q., & Mote, P. W. (2009). Tropical tropopause layer. *Reviews of Geophysics*, 47(1).

Hall, C. M., Hansen, G., Sigernes, F., & Kuyeng Ruiz, K. M. (2011). Tropopause height at 78° N 16° E: average seasonal variation 2007–2010. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(11), 5485-5490.

www.SID.ir

Archive of SID

Hardiman, S. C., Boutle, I. A., Bushell, A. C., Butchart, N., Cullen, M. J., Field, P. R., ... & O'Connor, F. M. (2015). Processes controlling tropical tropopause temperature and stratospheric water vapor in climate models. Journal of Climate, 28(16), 6516-6535.

Hiroaki, Hatsushika (2003). Stratospheric drain over Indonesia and dehydration within the tropical tropopause layer diagnosed by air parcel trajectories, *Journal of Geophysical*, 108(D19): 4610, doi: 10.1029/2002JD002986.

Hirschberg, P. A. (1989). Tropopause Undulations and the Development of Extratropical Cyclones.

Justice, C. O., Townshend, J. R. G., Vermote, E. F., Masuoka, E., Wolfe, R. E., Saleous, N., ... & Morisette, J. T. (2002). An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote sensing of Environment*, 83(1), 3-15.

Lashkari, H.; Matkan, A. and Mohammadi, Z. (2016). Local and Time Changes over a 66-Year Period and Annual Relocation of Saudi Arabian Subtropical High Pressure, *Open Journal of Geology*, 6: 1080-1095. Doi: 10.4236/ojg. 2016.69081.

Liu, C. and Zipser, E.J. (2005). Global distribution of convectionpenetrating the tropical tropopause, *J. Geophys*, Res.110, D23104, doi: 10.1029/2005JD006063.

Liu, C. Y., Li, J., Weisz, E., Schmit, T. J., Ackerman, S. A., & Huang, H. L. (2008). Synergistic use of AIRS and MODIS radiance measurements for atmospheric profiling. Geophysical Research Letters, 35(21).

Pittman, J. V., Pan, L. L., Wei, J. C., Irion, F. W., Liu, X., Maddy, E. S., ... & Gao, R. S. (2009). Evaluation of AIRS, IASI, and OMI ozone profile retrievals in the extratropical tropopause region using in situ aircraft measurements. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 114(D24).

Reichler, T.; Dameris, M. and Sausen, R. (2003). Determining the tropopause height from gridded data, *Geophysical research letters*, 30(20).

Rigby, M. (1992). International Meteorological Vocabulary. Revised edition. Geneva, Switzerland, *World Meteorological Organization*, p. 636. ISBN 92-63-02182-1.

Shapiro, M. A., & Keyser, D. A. (1990). Fronts, jet streams, and the tropopause. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratories, Wave Propagation Laboratory.

Stevenson, D. S., Dentener, F. J., Schultz, M. G., Ellingsen, K., Van Noije, T. P. C., Wild, O., ... & Bergmann, D. J. (2006). Multimodel ensemble simulations of present-day and near-future tropospheric ozone. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D8).

Williams, G.P. (2003). Jet sets, *J. Meteor. Soc. Japan*, 81: 439-476.

Williams, G.P. and Bryan, K. (2006). Ice age winds: an aquaplaned model, *Journal of Climate*, 19(9): 1706-1715.

www.SID.ir