


مطالعه موردی نقش گرمایش ناگهانی پوشش سپهر در تغییرات ازن کلی نیمکره شمالی

محمد مرادی* 

پژوهشگاه هواشناسی، تهران، ایران

Doi: <https://doi.org/10.48308/esrj.2023.103141> (پژوهشی)

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۱۱ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۲۸

چکیده

در این پژوهش با استفاده از داده‌های باز تحلیلی MERR2، اثر گرمایش ناگهانی پوشش سپهر بر تغییرات ازن کلی کلاهک قطبی در برخی زمستان‌های نیمکره شمالی بررسی شد. برای این منظور یک سال بدون گرمایش ناگهانی پوشش سپهر (۲۰۱۰-۲۰۱۱)، یک سال با گرمایش ناگهانی فرعی (۱۹۹۲) و چند گرمایش ناگهانی اصلی بر اساس دوره زندگی (۲۰۱۸، ۲۰۰۹، ۲۰۱۳، ۱۹۸۷) انتخاب و ازن کلی کلاهک قطبی در این دوره‌ها بررسی شد. از مقایسه تغییرات میانگین ازن کلی کلاهک قطبی نسبت به میانگین بلند مدت (۱۹۷۹-۲۰۲۰) در سال بدون گرمایش ناگهانی، با گرمایش ناگهانی نوع فرعی و اصلی، دیده شد که میانگین ازن کلی کلاهک قطبی در زمستان بدون گرمایش و با گرمایش نوع فرعی کمتر از میانگین بلند مدت و در زمستان با گرمایش ناگهانی نوع اصلی بیشتر از میانگین بلند مدت می‌باشد. نتایج نشان داد که بی‌هنجاری مثبت ازن کلی کلاهک قطبی در دوره رشد و بلوغ گرمایش ناگهانی پوشش سپهر نوع اصلی بیشتر و در دوره پیری آن کمتر است. هر چه طول دوره رشد و بلوغ بیشتر باشد و تغییرات میانگین مداری باد مداری نیز به سرعت کاهش یابد، بی‌هنجاری مثبت ازن کلی کلاهک قطبی نیز بیشتر است. در دوره رشد و بلوغ گرمایش ناگهانی پوشش سپهر، تاوه قطبی و جت شب قطبی لبه آن به سرعت تضعیف می‌شود و در نتیجه ازن کلی توسط گردش بروئر-دابسون از پوشش سپهر مناطق استوائی به کلاهک قطبی بهتر منتقل می‌شوند. همچنین در حین گرمایش ناگهانی پوشش سپهر، سرماییش دررو شاخه فروشارش قطبی گردش بروئر-دابسون تضعیف می‌شود. این مکانیسم نیز از طریق کاهش سرعت تخریب ازن، سبب افزایش ازن کلاهک قطبی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ازن کلی کلاهک قطبی، چرخه زندگی، گرمایش ناگهانی پوشش سپهر، گردش بروئر-دابسون.



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

E-mail: moradim36@gmail.com

* نویسنده مسئول:

The role of sudden stratospheric warming events on the total ozone variability in the northern hemisphere

Moradi* , M.,

Atmospheric Science and Meteorological Research (ASMERC), Tehran, Iran

(Original Article) <https://doi.org/10.48308/estj.2023.103141>

Received: 01 Jun 2022 Accepted: 17 Feb 2023

Abstract

In this study we have used the daily mean data from the MERRA2 and NCEP/NCAR. To study the distribution of total column ozone (TCO) during the sudden stratospheric warming (SSWs) events, five major SSWs, one minor SSWs and one year without SSWs events were identified. To represent TCO variations during the SSWs; the daily TCO in this cases are analyzed. The results showed that the during the five major SSWs events TCO over polar-cap region is increases(decrease) and the anomaly of this quantity is always positive(negative) compared to the long-term average. Furthermore, in during major SSWs events there observed an increase of 29-70 DU in TCO from the average value over the pole-cap and if the major SSWs is strong TCO is found to rise by 99-104 DU. The positive anomaly TCO in the polar-cap is more in growth and maturation of the major SSWs and less in the period of decline. The longer the growth and maturation period and the faster of reduce of the zonal mean zonal flow, the positive anomaly total column ozone is higher. During the period of growth and maturation of major SSWs, the polar vortex and night jet are rapidly weakened, and TCO is better transferred from the equatorial stratosphere to the polar cap by the Brewer-Dobson circulation. During the major SSWs that warming of stratosphere, diabatic cooling on the Brewer-Dobson extratropical down welling branch also weakens. This mechanism also increases the ozone of the polar-cap by reducing the rate of ozone depletion.

Keywords: Polar cap total column ozone, Life cycle, Major sudden stratospheric warnings, Brewer-Dobson circulation.



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY). license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

* Corresponding author E-mail address: moradim36@gmail.com

مقدمه

ازن در پوشش‌سپهر (Stratosphere) استوائی به‌طور دائم در اثر واکنش‌های فتوشیمیایی بین فوتون‌های اشعه فرابنفش خورشیدی و اکسیژن تشکیل می‌شود. این عنصر به صورت یک لایه در پوشش‌سپهر، تقریباً تمام اشعه فرابنفش خورشیدی را که از نظر بیولوژیکی مضر است، جذب می‌کند (Weber et al, 2018; Weber et al, 2011) و تعادل تابشی را در پوشش‌سپهر تغییر می‌دهد. ازن ابتدا بوسیله شونبین (Schönbein, 1867) معرفی شد و بعدها به وسیله پژوهشگران دیگر تحلیل گردید. چاپمن شیمی‌دان انگلیسی (Chapman, 1930)، اولین کسی بود که چرخه زندگی ازن را تشریح کرد (Madhu, 2016). براساس این نظریه، ازن طی دو واکنش فتوشیمیایی ایجاد می‌شود. ابتدا فوتون‌های بسیار پر انرژی تابش خورشیدی با طول موج کوتاه‌تر از ۲۴۲ نانومتر، مولکول اکسیژن را به دو اتم اکسیژن تجزیه می‌کند (Longematz, 2019) و سپس اکسیژن اتمی که تمایل زیادی به واکنش دارد، در مجاورت یک عنصر دیگر برای حفظ تعادل انرژی واکنش، به سرعت با مولکول‌های اکسیژن ترکیب می‌شود و ازن تولید می‌شود. ازن نیز با جذب اشعه فرابنفش با طول موج کوتاه‌تر از ۳۲۵ نانومتر، به اکسیژن مولکولی و اتمی تجزیه می‌شود و در ترکیب مجدد با اکسیژن اتمی، ضمن تولید دو مولکول اکسیژن، از بین می‌رود (Castillon, 2014; Douglass et al, 2014) و تعادل بین تولید و تخریب ازن برقرار می‌شود. این چرخه اشعه فرابنفش خورشیدی را به گرما تبدیل می‌کند و سبب گرم شدن پوشش‌سپهر مناطق استوایی می‌شود. پژوهش‌ها نشان داده است که علاوه بر چرخه تخریب ازن، کاتالیزورهای فعالی مانند ترکیبات کلر، برم، نیتروژن و هیدروژن، که توسط منابع طبیعی و انسانی وارد جو می‌شوند،

می‌توانند در واکنش‌های شیمیایی تخریب ازن وارد شوند و پس از تشکیل دو مولکول اکسیژن، ازن را از بین ببرند (Chalapathi et al, 2018). چرخه چاپمن اگر چه نحوه تشکیل و تخریب ازن را مشخص کرده است، ولی به تنهایی وجود مقادیر کم ازن کلی پوشش‌سپهر مناطق گرمسیری را نمی‌تواند توجیه کند (Longematz, 2019). توزیع ازن در پوشش‌سپهر تا حدود زیادی به موقعیت جغرافیایی و فصل بستگی دارد. تغییرات ازن نسبت به طول جغرافیایی کم است و اهمیت چندانی ندارد ولی تغییرات آن از نظر عرض جغرافیایی مهم‌تر است. در هر دو نیمکره از استوا به سوی عرض‌های جغرافیایی بالا، مقدار ازن افزایش می‌یابد (Castillon, 2014). در نیمکره شمالی از اول پاییز تا اول زمستان که زاویه میلی خورشیدی از صفر به ۲۳/۵- درجه کاهش و سپس تا اول بهار به صفر افزایش می‌یابد، مدارات بالای ۶۶/۵ درجه شمالی تابش خورشیدی را دریافت نمی‌کنند (Ahrens, 2009). بنابراین دمای هوا در کلاهدک قطبی به شدت کاهش می‌یابد در حالی که تغییر این کمیت در مناطق استوائی تقریباً ناچیز می‌باشد. پس یک گرادیان قوی دما بین قطب و استوا ایجاد می‌شود. در نتیجه این فرایند، تاوه قطبی پوشش‌سپهر و جت شب قطبی لبه آن توسعه می‌یابند. در این فصل در کلاهدک قطبی مطابق چرخه چاپمن، به سبب عدم تجزیه مولکول اکسیژن به اتم اکسیژن، شرایط برای تشکیل و تخریب ازن فتوشیمیایی فراهم نمی‌باشد. مشاهدات نشان داده است که غلظت ازن پوشش‌سپهر عرض‌های جغرافیایی میانی و بالا بیشتر از محل تولید آن در مناطق استوائی است. پس مکانیسم‌های دیگری وجود دارد که می‌تواند ازن اطراف استوا در وردسپهر (Troposphere) را ابتدا به پوشش‌سپهر استوایی و سپس به پوشش‌سپهر مناطق

می‌کند. گرمایش ناگهانی پوشن‌سپهر به یک آشفتگی بزرگ مقیاس زمستانه پوشن‌سپهر قطبی اشاره دارد که به‌طور قابل ملاحظه‌ای گردش و دما در جو میانی را تحت‌تاثیر قرار می‌دهد (Ageyeva et al, 2017). در فصل زمستان که فقط امواج راسبی بزرگ مقیاس می‌توانند از وردسپهر به پوشن‌سپهر نفوذ کنند، در اثر شکست در پوشن‌سپهر فوقانی، سبب تضعیف شارش پایه غربی و وارونگی جهت آن به شرقی می‌شوند. در اثر این تغییر و براساس معادله باد گرمائی، گرادیان نصف‌النهاری دما بین کلاهدک قطبی و مناطق گرمسیری معکوس می‌شود و دمای پوشن‌سپهر کلاهدک قطبی طی چند روز به شدت افزایش می‌یابد (Rao et al, 2018) و به تغییرات قابل توجهی در میزان چندین واکنش شیمیایی منجر می‌شود. این پدیده براساس پژوهش‌های انجام شده به نوع اصلی و فرعی تقسیم شده است (Yamazaki et al, 2019). نوع اصلی این پدیده دارای دوره زندگی است که به وسیله برخی پژوهشگران (Limpasuvan et al, 2004؛ مرادی، ۱۳۹۹) براساس تغییرات میانگین مداری مولفه مداری باد، تعریف شده است. در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی در مورد تغییرات ازن کلی (Shin et al, 2020)، گرمایش ناگهانی پوشن‌سپهر (Yamazaki et al, 2019) و همچنین رابطه بین تغییرات روزانه میانگین ازن کلی کلاهدک قطبی و گرمایش ناگهانی پوشن‌سپهر انجام شده است (Tweedy et al, 2013; Madhu, 2016) ولی نحوه تغییرات این عنصر در دوره زندگی این پدیده مورد توجه قرار نگرفته است. از این رو هدف از این پژوهش، بررسی تغییرات ازن کلی کلاهدک قطبی در چند مورد گرمایش ناگهانی پوشن‌سپهر است که تاکنون در ایران به آن پرداخته نشده است.

فوق انتقال دهد (Hong and Reichler, 2020). گردش بروئر - دابسون، اختلاط شبه افقی همدرگاشت (Isentrope) و شکست وردایست (Tropopause) سازوکارهای هستند که توزیع و تنظیم ازن پوشن‌سپهر را کنترل می‌کنند (Castanheira et al, 2012). گردش بروئر - دابسون (Dobson, 1956; Brewer, 1949)، یک گردش آهسته در مقیاس نیم‌کره‌ای است که به‌طور نصف‌النهاری هوای غنی از ازن و گازهای مختلف وردسپهر مناطق استوائی را به آرامی ابتدا به مناطق پوشن‌سپهر استوائی و سپس به مناطق پوشن‌سپهر میانی منتقل می‌کند (شرعی پور و بیدختی، ۱۳۹۳) و عامل انتقال به عرض‌های جغرافیایی بالا به وسیله دو سازوکار اختلاط شبه افقی همدرگاشت و گردش بروئر - دابسون انجام می‌شود (Lin et al, 2012; Castanheira et al, 2019) که جدا کردن سهم هر فرایند بسیار دشوار می‌باشد. گردش بروئر - دابسون از سه شاخه اصلی تشکیل شده است. ۱) شاخه فراشارش (Upwelling) استوایی که از وردسپهر استوایی هوای غنی از ازن را به پوشن‌سپهر استوایی انتقال می‌دهد. این شارش در پوشن‌سپهر استوایی با گرمایش دررو همراه است. ۲) شاخه شارش نصف‌النهاری قطب‌سو در پوشن‌سپهر که سبب شارش جرم به عرض‌های جغرافیایی متوسط و بالا در پوشن‌سپهر می‌شود. ۳) شاخه فروشارش قطبی که جرم را از پوشن‌سپهر فوقانی قطبی به پوشن‌سپهر پایین قطبی منتقل می‌کند. این شاخه در پوشن‌سپهر پایین قطبی با سرمای دررو همراه است (Castillon, 1995; Holton et al, 2014). در پوشن‌سپهر پایین و میانی، گردش بروئر - دابسون تحت‌تاثیر نفوذ امواج راسبی سیاره‌ای از وردسپهر به پوشن‌سپهر و سپس شکست آن در پوشن‌سپهر قرار می‌گیرد. این عامل، گرمایش ناگهانی پوشن‌سپهر را نیز ایجاد

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از داده‌های روزانه میانگین مداری دمای (برحسب کلون) سطح فشاری ده هکتوپاسکال در کلاهک قطبی در محدوده مدار ۶۰-۹۰ درجه شمالی، میانگین مداری مولفه مداری باد (برحسب متر بر ثانیه) در تراز ده هکتوپاسکال در روی مدار شصت درجه شمالی و ازن کلی کلاهک قطبی بر حسب دابسون استفاده شد. این داده‌ها، از داده‌های باز تحلیلی ناسا موسوم به MERRA2 است که به‌طور روزانه از اول ژوئیه سال قبل تا آخر ژوئن سال بعد در قالب متنی طی سال‌های مختلف دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۷۹ با تفکیک مکانی ۱ درجه عرض جغرافیایی و ۱/۲۵ درجه طول جغرافیایی به دست آمده و میانگین مداری آن در کلاهک قطبی در آدرس ozonewatch.gsfc.nasa.gov در دسترس قرار دارد.

برای بررسی میانگین مداری مولفه مداری باد و دما در روزهای مختلف رخداد گرمایش ناگهانی پوشش‌سپهر در عرض‌های جغرافیایی مختلف کلاهک قطبی نیز از داده‌های روزانه دما و مولفه مداری باد بایگانی مرکز ملی پیش‌بینی محیطی و پژوهش‌های جوی آمریکا استفاده شد. این داده‌ها

در قالب های مختلف در آدرس psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanaly sis در دسترس است. برای تحلیل اثر گرمایش ناگهانی پوشش‌سپهر بر تغییرات ازن کلی، یک سال بدون رخداد گرمایش، یک سال با گرمایش نوع فرعی و چند سال با گرمایش نوع اصلی که در جدول ۱ آورده شده است، در نظر گرفته شد. معیار انتخاب برای سال بدون گرمایش و گرمایش ناگهانی پوشش‌سپهر نوع فرعی براساس بیشترین تغییرات میانگین سرعت باد مداری است تا قویترین موردها بررسی شود و معیار انتخاب برای گرمایش ناگهانی پوشش‌سپهر نوع اصلی در دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۷۹، براساس طول دوره زندگی و نحوه تاثیر آن بر تاوه قطبی است. بر این اساس، شش گرمایش ناگهانی پوشش‌سپهر متفاوت و یک سال بدون گرمایش مطابق جدول ۱ انتخاب شد و تغییرات ازن کلی کلاهک قطبی در دوره زندگی موردهای انتخابی تحلیل شد. در این پژوهش ابتدا تغییرات روزانه میانگین ازن کلی کلاهک قطبی بررسی شد و سپس ضمن اشاره به گرمایش‌های ناگهانی انتخابی، جزئیات بیشتری از تغییرات ازن کلاهک قطبی در هنگام رخداد گرمایش ناگهانی بررسی گردید.

جدول ۱: ویژگی‌های گرمایش ناگهانی پوشش‌سپهر انتخابی (مرادی، ۱۳۹۹).

ردیف	مورد	ویژگی
۱	۲۰۱۱-۲۰۱۰	بدون شرایط گرمایش ناگهانی با تغییرات زیاد میانگین مداری مولفه مداری باد
۲	۱۴ ژانویه ۱۹۹۲	گرمایش نوع فرعی، تغییرات میانگین مولفه مداری باد ۵۰ متر بر ثانیه
۳	۲۳ ژانویه ۱۹۸۷	گرمایش نوع اصلی با بیشترین دوره رشد، بیشترین دوره بلوغ
۴	۰۱ فوریه ۲۰۱۷	گرمایش نوع اصلی با کمترین دوره بلوغ، کمترین دوره پیری
۵	۰۶ ژانویه ۲۰۱۳	گرمایش نوع اصلی با کمترین دوره رشد
۶	۲۴ ژانویه ۲۰۰۹	گرمایش نوع اصلی با بیشترین دوره پیری، تبدیل هسته تاوه به سلول مجزا
۷	۱۲ فوریه ۲۰۱۸	گرمایش نوع اصلی با جابجایی مرکز تاوه قطبی

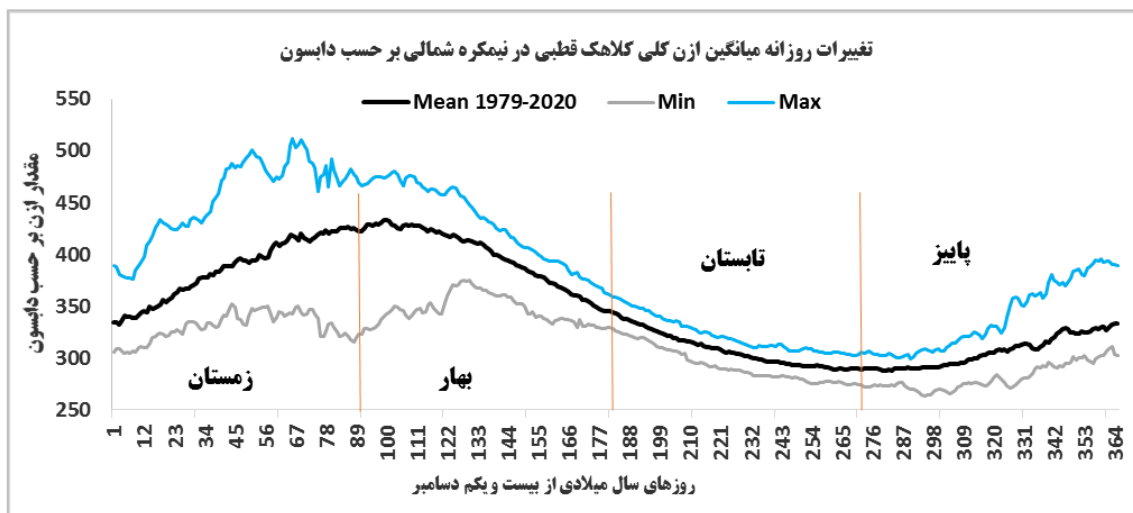
بحث و نتایج

مختلف سال در طول دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۷۹ را نشان می‌دهد. از این شکل دیده می‌شود که بیشینه، کمینه و میانگین ازن کلی در زمستان و

شکل ۱ تغییرات کمینه، بیشینه و میانگین روزانه ازن کلی کلاهک قطبی نیمکره شمالی در فصل‌های

قطبی سرعت بیشتری بگیرد و در نتیجه ازن کلی کلاهِک قطبی در زمستان افزایش یابد. در ابتدای فصل بهار نیز به محض رسیدن تابش خورشیدی به کلاهِک قطبی، شرایط برای ایجاد واکنش‌های فتوشیمیایی فراهم می‌شود و مقادیر ازن کلاهِک قطبی نیز افزایش می‌یابد. به تدریج که مناطق قطبی گرم می‌شود، واکنش‌های مربوط به تخریب ازن بر واکنش‌های مربوط به ایجاد ازن پیشی می‌گیرد و میانگین ازن کلی کلاهِک قطبی کاهش می‌یابد.

بهار نسبت به تابستان و پاییز بیشتر است. میانگین ازن کلی از اول زمستان به تدریج افزایش می‌یابد و در ابتدای بهار به بیشینه مقدار خود می‌رسد. سپس این مقدار کاهش یافته تا اواخر تابستان و اوایل پاییز به کمترین مقدار خود برسد. چنین بر می‌آید که در زمستان‌های نیمکره شمالی به سبب نبود تابش خورشیدی، در کلاهِک قطبی، شرایط برای تشکیل و تخریب ازن مطابق چرخه چاپمن فراهم نیست و شرایط دیگری سبب شده است تا انتقال ازن کلی از پوشش سپهر مناطق استوائی به مناطق کلاهِک

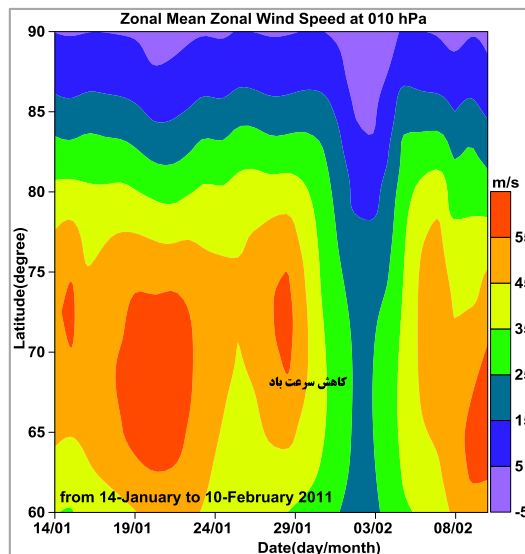


شکل ۱: تغییرات روزانه کمینه، میانگین و بیشینه ازن کلاهِک قطبی در نیمکره شمالی بر حسب دابسون.

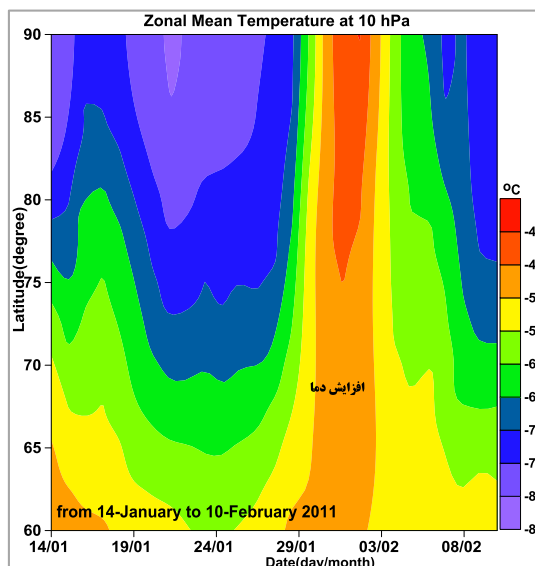
کرده است. در این دوره در عرض‌های نزدیک قطب، میانگین دمای پوشش سپهر از 8°C - درجه سلسیوس، به $42/5^{\circ}\text{C}$ - درجه سلسیوس افزایش یافته است. این در حالی است که میانگین مداری دما در محدوده 60° - 90° درجه شمالی، در طول گرمایش 21°C درجه افزایش یافته است (شکل ۳) که با تعریف ارائه شده گرمایش ناگهانی پوشش سپهر مطابقت ندارد. از این رو سال $2010-2011$ به عنوان یک سال بدون گرمایش ناگهانی در نظر گرفته شده است که در آن تغییرات میانگین مداری دما و باد قابل توجه بوده است.

مقایسه تغییرات ازن کلی در یک سال بدون گرمایش، با گرمایش نوع فرعی و اصلی

در بازه زمانی اول ژوئیه سال 2010 تا سی‌ام ژوئن سال 2011 ، میانگین مداری مولفه مداری سرعت باد در تراز ده هکتوپاسکال، دستخوش تغییر شده است. این تغییر در دوره پانزدهم ژانویه تا دهم فوریه 2011 قابل توجه است به طوری که این کمیت در اطراف مدار 70° درجه شمالی از $52/5$ متر بر ثانیه در روز بیستم ژانویه، به $17/5$ متر بر ثانیه در روز سوم فوریه کاهش یافته است (شکل ۲) و سپس به سرعت به مقادیر بالاتر افزایش پیدا



شکل ۲: تغییرات روزانه میانگین مداری مولفه مداری باد (متر بر ثانیه) در سطح فشاری ۱۰ هکتوپاسکال در عرضهای جغرافیائی مختلف در دوره چهاردهم ژانویه تا دهم فوریه ۲۰۱۱.



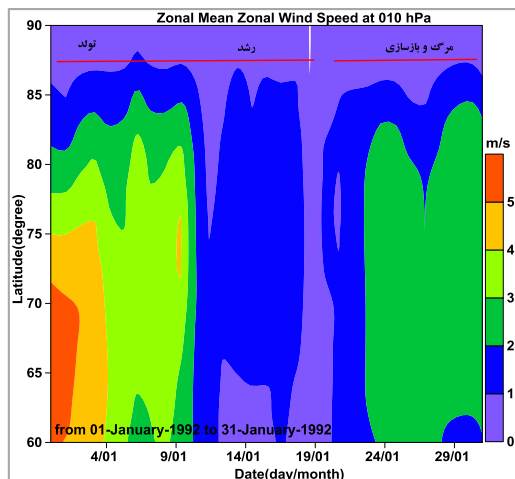
شکل ۳: تغییرات روزانه میانگین مداری دما (درجه سلسیوس) در سطح فشاری ۱۰ هکتوپاسکال در عرضهای جغرافیائی مختلف در دوره چهاردهم ژانویه تا دهم فوریه ۲۰۱۱.

داشته است. در مدت گرمایش نیز علامت مقادیر میانگین مداری مولفه مداری باد، تغییر نکرده است. در این بازه زمانی، میانگین مداری مولفه مداری باد از مقدار بیشینه خود طی روزهای متوالی کاهش یافته است. به طوری که این مقدار در عرض جغرافیائی ۶۵ درجه شمالی از ۵۸ متر بر ثانیه در روز یکم ژانویه ۱۹۹۲، به مقدار ۸ متر بر ثانیه در روز نوزدهم ژانویه تغییر کرده است (شکل ۴). در

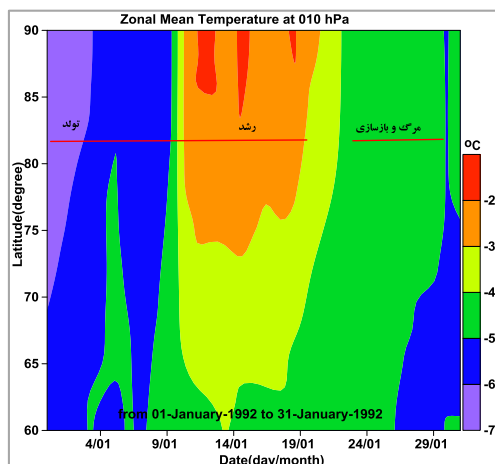
در دوره زندگی گرمایش ناگهانی پوشش سپهر نوع فرعی سه مرحله تولد، رشد و مرگ اهمیت دارد که بر مبنای کاهش میانگین مداری مولفه مداری باد تعیین می‌شود. یک گرمایش ناگهانی پوشش سپهر نوع فرعی در بازه بیست و نهم دسامبر ۱۹۹۱ تا هیجدهم ژانویه ۱۹۹۲، رخ داده است. در این مدت میانگین مداری مولفه مداری باد ۵۰ متر بر ثانیه کاهش و میانگین مداری دما سی درجه افزایش

گرمایش، به $۱۷/۵$ - درجه سلسیوس افزایش یافته است (شکل ۵).

عرض‌های نزدیک قطب، میانگین دمای پوشش سپهر نیز در دوره فوق، از ۶۵ - درجه سلسیوس در شروع



شکل ۴: تغییرات روزانه میانگین مداری مولفه مداری باد (متر بر ثانیه) در سطح فشاری ۱۰ هکتوپاسکال در عرض‌های جغرافیائی مختلف در دوره یکم تا سی و یکم ژانویه ۱۹۹۲.



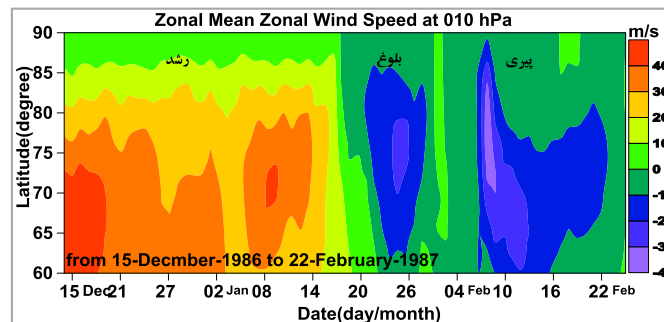
شکل ۵: تغییرات روزانه میانگین دما (درجه سلسیوس) در سطح فشاری ۱۰ هکتوپاسکال در عرض‌های جغرافیائی مختلف در دوره یکم تا سی و یکم ژانویه ۱۹۹۲.

جغرافیائی ۶۵ درجه شمالی از ۴۰ متر بر ثانیه در روز ۱۵ دسامبر ۱۹۸۶ ، به مقدار ۱۵ - متر بر ثانیه در روز ۸ فوریه کاهش پیدا کرده است (شکل ۶). این تغییر مطابق معادله باد گرمائی سبب افزایش دمای ناگهانی در پوشش سپهر پایین شده است. به طوری که در عرض‌های نزدیک قطب، میانگین دمای پوشش سپهر پایین از $۷۲/۵$ - درجه سلسیوس در شروع گرمایش، به $۳۲/۵$ - درجه سلسیوس در

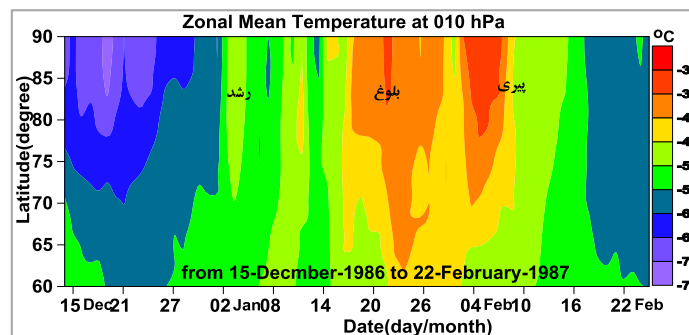
دوره زندگی گرمایش ناگهانی پوشش سپهر نوع اصلی، به چهار مرحله تقسیم می‌شود که نسبت به گرمایش نوع فرعی دارای مرحله بلوغ نیز می‌باشد. گرمایش ناگهانی نوع اصلی مورخ ۲۳ ژانویه ۱۹۸۷ ، در ۱۸ دسامبر ۱۹۸۶ متولد و در ۲۱ فوریه ۱۹۸۷ از بین رفته است و دوره رشد، بلوغ و پیری آن به ترتیب ۳۷ ، ۱۷ و ۱۲ روز طول کشیده است. در این گرمایش میانگین مداری مولفه مداری باد در عرض

زمستان بدون گرمایش نسبت به میانگین کلی دوره آماری انتخابی کمتر است. این مقدار نسبت به زمستان با گرمایش ناگهانی نوع فرعی و نوع اصلی نیز کمتر می‌باشد. این شکل همچنین نشان می‌دهد که میانگین ازن کلاهدک قطبی در گرمایش نوع فرعی نسبت به نوع اصلی کمتر است بنابراین نقش گرمایش ناگهانی پوشش سپهر از نوع اصلی در افزایش ازن کلاهدک قطبی آشکار می‌شود.

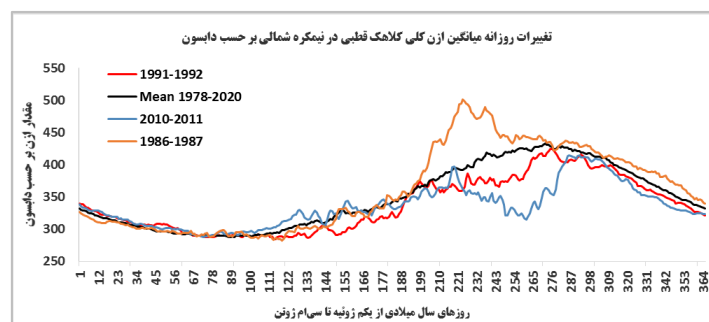
هنگام بلوغ افزایش یافته است (شکل ۷). در این گرمایش ناگهانی نوع اصلی، هسته تاوه قطبی پوشش سپهری از مدار ۷۵ درجه شمالی به موقعیت ۶۰ درجه عرض جغرافیائی شمالی جابجا شده است. شکل ۸ تغییرات روزانه میانگین ازن کلی در سال بدون گرمایش، با گرمایش نوع فرعی و با گرمایش نوع اصلی فوق را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که میانگین ازن کلی کلاهدک قطبی در



شکل ۶: تغییرات روزانه میانگین مداری مولفه مداری باد (متر بر ثانیه) در سطح فشاری ۱۰ هکتوپاسکال در عرض‌های جغرافیائی مختلف در دوره ۱۵ دسامبر ۱۹۸۶ تا ۲۲ فوریه ۱۹۸۷.



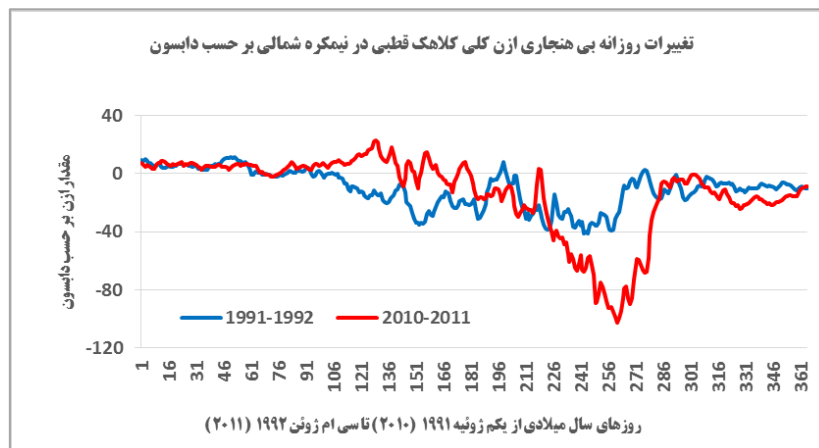
شکل ۷: تغییرات روزانه میانگین مداری دما (درجه سلسیوس) در سطح فشاری ۱۰ هکتوپاسکال در عرض‌های جغرافیائی مختلف در دوره ۱۵ دسامبر ۱۹۸۶ تا ۲۲ فوریه ۱۹۸۷.



شکل ۸: تغییرات روزانه میانگین ازن کلی کلاهدک قطبی نیمکره شمالی (دابسون) از یکم ژوئیه تا سی‌ام ژوئن، برای سال بدون گرمایش (آبی)، با گرمایش فرعی (قرمز) و با گرمایش نوع اصلی (نارنجی).

بیشترین مقدار خود $8/5+$ دابسون می‌رسد. تغییرات مقدار بی‌هنجاری در این مورد به گونه‌ای است که طی مدت ۱۸ روز این کمیت بین مقادیر $10-$ تا $10+$ دابسون به نرمی تغییر می‌کند (شکل ۳). در این سال بی‌هنجاری منفی از بیستم ژانویه شروع شده و تا پایان مارس ادامه داشته است که کمترین مقدار آن در روز ۱۴ مارس به $50-$ دابسون رسیده است. چنین به نظر می‌رسد که در این دو حالت موردی، نبود شرایط موثر بر ایجاد گرمایش ناگهانی قوی، توانسته است روی عامل افزایش ازن کلی کلاهدک قطبی اثر کند و در نتیجه یا انتقال ازن از مناطق نزدیک استوا به کلاهدک قطبی افزایش نیافته است و یا شرایط تخریب ازن فراهم نشده است.

از بررسی بی‌هنجاری روزانه ازن کلی در سال بدون گرمایش دیده شد که در این سال، چند بی‌هنجاری مثبت در روزهای ماه نوامبر ۲۰۱۰ برآورد شده است که بیشینه آن به مقدار $22/9+$ دابسون، به روز ششم نوامبر ۲۰۱۰ تعلق دارد که در این تاریخ شرایط رخداد گرمایش ناگهانی پوشن سپهر ثبت نشده است. کمترین بی‌هنجاری منفی ازن کلی در این مورد، به مقدار $110/1-$ دابسون در روز ۱۸ مارس ۲۰۱۱ برآورد شده است (شکل ۹). بررسی‌ها نشان داد که در گرمایش فرعی مربوط به سال $1991-1992$ ، با کاهش میانگین مداری مولفه مداری باد، بی‌هنجاری از مقادیر منفی به سوی مقادیر مثبت کوچک تغییر می‌کند. کمترین مقدار این کمیت در روز یکم ژانویه $30-$ دابسون است که به تدریج افزایش می‌یابد و در روز پانزدهم ژانویه به

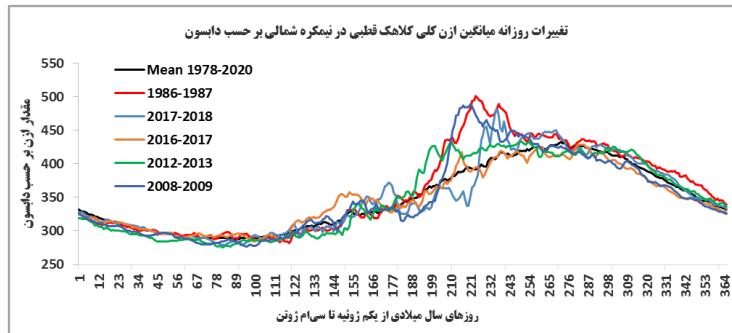


شکل ۹: تغییرات روزانه بی‌هنجاری ازن کلی کلاهدک قطبی نیمکره شمالی (دابسون) از یکم ژانویه ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۰ تا سی‌ام ژوئن ۱۹۹۲ (۲۰۱۱).

آماری، به ترتیب در گرمایش $1986-1987$ و $2009-2008$ و کمترین افزایش نسبت به میانگین بلند مدت در گرمایش $2017-2016$ رخ داده است. در زیر حالت‌های موردی انتخابی، با جزئیات بیشتری بررسی می‌شود.

مقایسه تغییرات ازن کلی در سال‌های با گرمایش نوع اصلی

شکل ۱۰ تغییرات ازن کلاهدک قطبی در سال‌های با گرمایش نوع اصلی مختلف را نشان می‌دهد. از این شکل دیده می‌شود که بیشترین افزایش میانگین ازن کلی نسبت به میانگین بلند مدت دوره



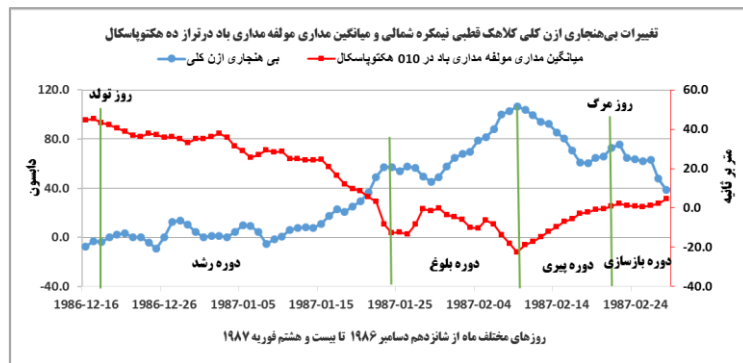
شکل ۱۰: تغییرات روزانه میانگین ازن کلی کلاهِک قطبی نیمکره شمالی (دابسون) از یکم ژوئیه تا سی‌ام ژوئن، برای حالت‌های انتخابی گرمایش نوع اصلی.

مداری باد مداری سبب افت و خیز در بی‌هنجاری ازن کلی کلاهِک قطبی می‌شود. شایان ذکر است که در این حالت موردی موقعیت محور جت لبه تاوه قطبی بعد از گرمایش به سوی جنوب منتقل شده است و مقدار اندازه سرعت محور آن نیز کاهش یافته است. گرمایش ناگهانی پوشش سپهر ۱ فوریه ۲۰۱۷، با دوره رشد ۱۱ روزه، بدون طی کردن دوران بلوغ، به پیری رسیده است. دوره پیری این پدیده نیز یک روز طول کشیده است. پس این مورد دوره بلوغ و پیری کوتاهی داشته است. این پدیده در ۲۲ ژانویه ۲۰۱۷ متولد و در ۰۲ فوریه همان سال از بین رفته است. بررسی میانگین مداری مولفه مداری باد در این مورد نشان می‌دهد که این کمیت از مقدار بیشینه خود طی روزهای متوالی کاهش یافته و علامت آن به منفی تغییر کرده است. به طوری که این مقدار در عرض جغرافیایی ۶۵ درجه شمالی از ۵۵ متر بر ثانیه در روز ۱۹ ژانویه ۲۰۱۷، به مقدار ۵- متر بر ثانیه در روز ۰۱ فوریه رسیده است. این کاهش سرعت در عرض جغرافیایی ۶۰ درجه از ۴۸ متر بر ثانیه به ۰/۱- متر بر ثانیه تغییر کرده است. در این مورد در عرض‌های نزدیک قطب، میانگین دمای پوشش سپهر پایین از ۶۷/۵- درجه سلسیوس در شروع گرمایش، به ۲۷/۵- درجه سلسیوس در انتهای دوره رشد افزایش یافته است. از بررسی مقادیر بی‌هنجاری روزانه ازن کلی در

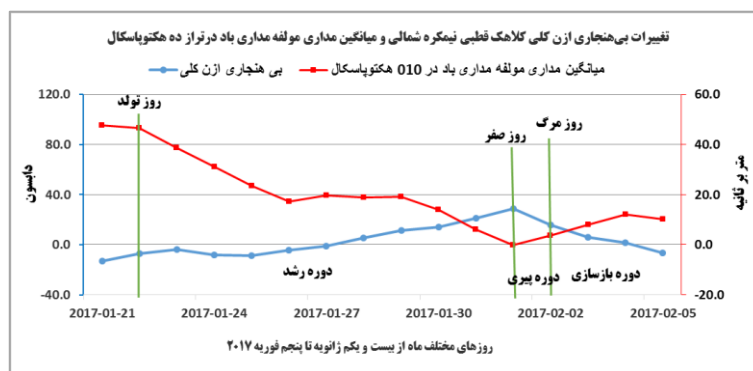
با بررسی بی‌هنجاری ازن کلاهِک قطبی در گرمایش مربوط به سال ۱۹۸۶-۱۹۸۷، دیده شد که با کاهش میانگین مداری مولفه مداری باد، بی‌هنجاری به سوی مقادیر مثبت تغییر می‌کند. بیشینه این مقدار از روز تولد تا دو روز قبل از روز صفر که در دوره رشد قرار گرفته است، حدود $40+$ دابسون است و در روز صفر به $57/2+$ دابسون می‌رسد. بی‌هنجاری مثبت ازن کلی در دوران بلوغ (از روز صفر تا روز کمترین مقدار میانگین سرعت) نیز افزایش یافته است به طوری که در روز نهم فوریه که میانگین مداری باد مداری به کمترین مقدار می‌رسد، بی‌هنجاری مثبت نیز به $106/6+$ دابسون افزایش می‌یابد. در دوران پیری (از روز کمترین مقدار میانگین سرعت تا روز مرگ) نیز مقادیر بی‌هنجاری مثبت همچنان وجود دارد ولی مقادیر به تدریج کاهش می‌یابد (شکل ۱۱). تغییرات مقدار بی‌هنجاری در این مورد به گونه‌ای است که از $5/2-$ دابسون در روز هشتم ژانویه به مقدار $106/6+$ دابسون در روز نهم فوریه تغییر می‌کند. بررسی ازن کلی این حالت موردی نشان داد که بی‌هنجاری مثبت در دوران بلوغ گرمایش به بیشترین مقدار خود می‌رسد و در دوران پیری با وجودی که این کمیت به تدریج کاهش می‌یابد ولی مقادیر آن همچنان مثبت است. در این مورد در دوران بلوغ و پیری ایجاد افت و خیزهای میانگین

است به طوری که بیشینه بی‌هنجاری مثبت در روز صفر به مقدار $28/7+$ دابسون ثبت شده است. این کمیت به تدریج در دوره پیری کاهش یافته است (شکل ۱۲).

حالت موردی ۲۰۱۶-۲۰۱۷ دیده می‌شود که این کمیت در هنگام رخداد گرمایش ناگهانی پوشن سپهر، تغییرات قابل توجهی نداشته است. این کمیت به آرامی از روز تولد تا روز صفر افزایش یافته



شکل ۱۱: تغییرات روزانه بی‌هنجاری ازن کلی کلاهدک قطبی (دابسون) نیمکره شمالی و میانگین مداری مولفه مداری باد (متر بر ثانیه) در تراز ده هکتوپاسکال روی مدار 60° درجه شمالی از ۱۶ دسامبر ۱۹۸۶ تا ۲۸ فوریه ۱۹۸۷.



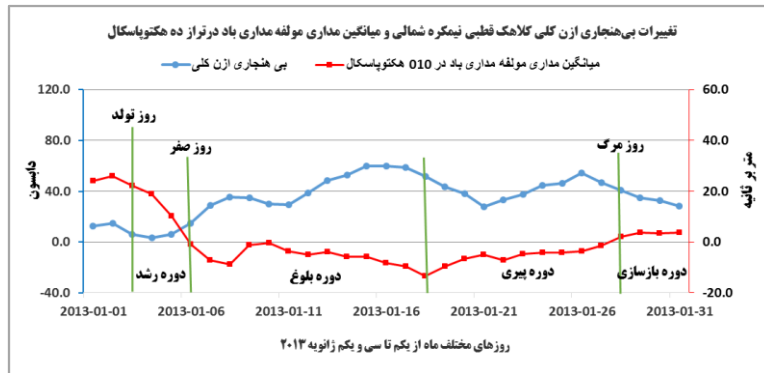
شکل ۱۲: تغییرات روزانه بی‌هنجاری ازن کلی کلاهدک قطبی (دابسون) نیمکره شمالی و میانگین مداری مولفه مداری باد (متر بر ثانیه) در تراز ده هکتوپاسکال روی مدار 60° درجه شمالی از بیست و یکم ژانویه تا پنجم فوریه ۲۰۱۷.

می‌دهد که در عرض‌های جغرافیایی نزدیک قطب، میانگین مداری دما از $72/5-$ در دوره رشد، به $35/5-$ در دوره بلوغ افزایش یافته است. بیشینه بی‌هنجاری مثبت در گرمایش ۲۰۱۲-۲۰۱۳ در روز پانزدهم ژانویه ۲۰۱۳ به مقدار $59/8+$ دابسون ثبت شده است (شکل ۱۳). این بی‌هنجاری مثبت ازن چند روز پس از روز صفر و سه روز قبل از آنکه میانگین مداری مولفه مداری باد به کمترین مقدار خود برسد، در دوران بلوغ ثبت شده است. گرمایش ناگهانی پوشن سپهر ۱۲ فوریه ۲۰۱۸، سبب شده است تا تاوه قطبی پوشن سپهر ده درجه به سوی

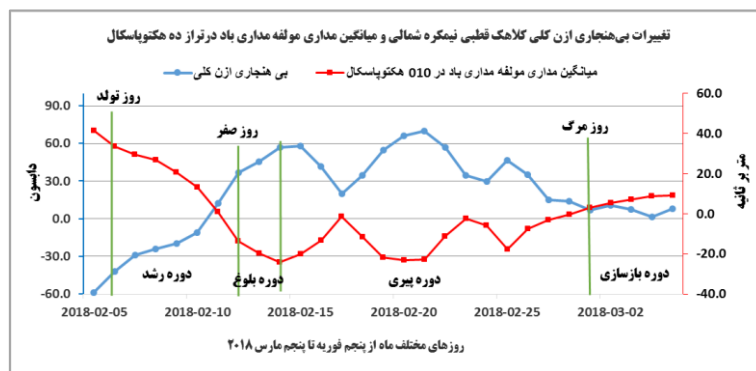
گرمایش ناگهانی پوشن سپهر ۶ ژانویه ۲۰۱۳، دوره رشد کوتاهی داشته است. این پدیده در ۱ ژانویه ۲۰۱۳ متولد و در ۲۸ ژانویه همان سال از بین رفته است. با وجودی که در این حالت موردی، دوره رشد کوتاه است و فقط ۶ روز طول کشیده است، ولی مجموع دوره بلوغ و پیری که در آن بی‌هنجاری ازن مثبت می‌شود، ۲۲ روز طول کشیده است. در این مورد در محدوده عرض‌های جغرافیایی 70° تا 75° درجه شمالی، میانگین مداری مولفه مداری باد در این مورد از $42/5$ متر بر ثانیه به $32/5-$ متر بر ثانیه کاهش یافته است. بررسی تغییرات دما نیز نشان

ثانیه کاهش یافته است. در این مدت نیز در مناطق نزدیک به قطب، میانگین مداری دما از $۷۷/۵-$ درجه سلسیوس به $۲۲/۵-$ درجه سلسیوس افزایش یافته است. در این نوع گرمایش تاوه قطبی به دو هسته جدا تقسیم شده است و هسته جت لبه آن نیز حین تضعیف، دستخوش ناپیوستگی شده و بادهای با جهت شرقی ایجاد کرده است (شکل ۱۵). چنین به نظر می‌رسد که گرمایش ناگهانی پوشن‌سپهر با تضعیف شارش پایه غربی و وارونگی جهت آن به شرقی و نیز افزایش جهشی میانگین مداری دما، سبب شده است تا تاوه قطبی پوشن‌سپهر تضعیف شود و جت شب قطبی لبه آن به هم بریزد و در نتیجه، این پدیده شرایط را برای افزایش سرعت انتقال ازن از مناطق استوائی به مناطق کلاهدک قطبی فراهم گردد. از بررسی مقادیر بی‌هنجاری روزانه ازن کلی گرمایش مربوط به سال $۲۰۰۸-۲۰۰۹$ دیده می‌شود که در این حالت موردی، بی‌هنجاری ازن کلی کلاهدک قطبی در دوره رشد افزایش یافته است و در دوره بلوغ این افزایش شیب بیشتری پیدا کرده است. اگر چه طول دوره بلوغ در این مورد نسبت به دوره پیری کمتر است، ولی چند روز آغازین دوره پیری که در آن میانگین مداری باد مداری بین $۲۹-$ تا $۱۵-$ متر بر ثانیه تغییر کرده است، نیز همچنان با افزایش بی‌هنجاری ازن کلاهدک قطبی همراهی دارد به طوری که کمترین میانگین مداری مولفه مداری باد سه روز عقب‌تر از بی‌هنجاری مثبت بیشینه می‌باشد. در روز بیست و هشتم ژانویه کمترین میانگین مداری مولفه باد مداری، $۳۱/۱-$ متر بر ثانیه است در حالی که بیشترین بی‌هنجاری مثبت ازن کلی در روز دوم فوریه به مقدار $۹۹/۲+$ دابسون رسیده است که در این روز میانگین مداری باد مداری $۲۱-$ متر بر ثانیه برآورد شده است (شکل ۱۶).

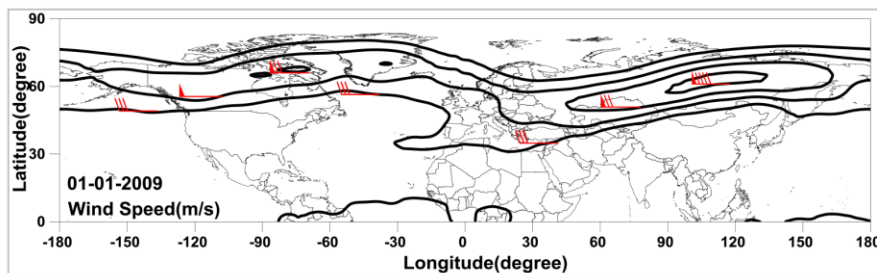
جنوب جابجا شود (مرادی، ۱۳۹۹). این پدیده در ۰۵ فوریه ۲۰۱۸ متولد و در ۱ مارس همان سال از بین رفته است. دوره زندگی این حالت موردی ۲۹ روز طول کشیده است که ۱۷ روز آن دوره بلوغ و پیری بوده است. در این مورد، در اطراف مدار ۶۵ درجه شمالی، میانگین مداری مولفه مداری در طول ده روز، از $۳۷/۵+$ متر بر ثانیه به $۳۷/۵-$ متر بر ثانیه کاهش یافته است. از بررسی مقادیر بی‌هنجاری روزانه ازن کلی مورد $۲۰۱۸-۲۰۱۷$ دیده می‌شود که کمترین میانگین مداری مولفه مداری باد با دو بی‌هنجاری مثبت قوی همراه است. در چهاردهم فوریه، بی‌هنجاری مثبت ازن کلی با $۵۷/۸+$ دابسون با کمترین میانگین مداری مولفه مداری باد به مقدار $۲۴/۲-$ متر بر ثانیه در دوره بلوغ همراهی دارد. بی‌هنجاری ازن کلی در روز پنجم فوریه $۶۰/۰-$ دابسون است که در روز بیست و یکم به $۶۹/۹+$ دابسون تغییر کرده است. این بی‌هنجاری مثبت ازن با میانگین مداری مولفه مداری باد به مقدار $۲۲/۷-$ متر بر ثانیه در دوره پیری هماهنگ است (شکل ۱۴). این قله بی‌هنجاری ازن کلی به سبب تغییرات میانگین مداری باد مداری از صفر به $۲۲/۷-$ متر بر ثانیه رخ داده است. در این مورد نیز افت و خیزهای میانگین مداری باد مداری سبب ایجاد افت و خیزهای بی‌هنجاری مثبت ازن کلی کلاهدک قطبی شده است. گرمایش ناگهانی پوشن‌سپهر مورخ ۲۴ ژانویه ۲۰۰۹، سبب شده است تا تاوه قطبی دستخوش تغییر شود و هسته آن به دو هسته جدا تبدیل شود (مرادی، ۱۳۹۹). این پدیده در ۰۹ ژانویه ۲۰۰۹ متولد و در ۲۳ فوریه همان سال از بین رفته است. دوره زندگی این حالت موردی ۴۶ روز طول کشیده است که ۳۰ روز آن دوره بلوغ و پیری بوده است. در این مورد، در اطراف مدار $۶۲/۵$ درجه شمالی، میانگین مداری مولفه مداری باد در طول بیست روز، از $۶۵+$ متر بر ثانیه به $۳۰-$ متر بر



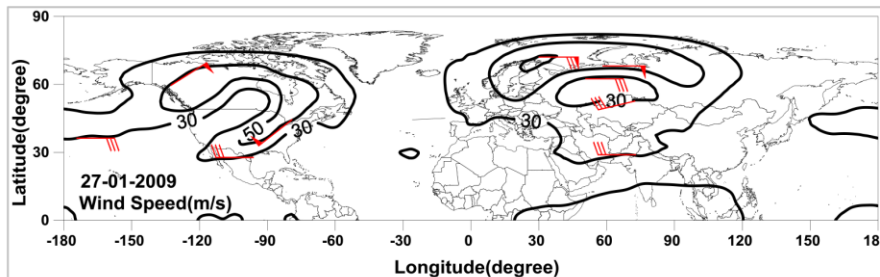
شکل ۱۳: تغییرات روزانه بی‌هنجاری ازن کلی کلاهک قطبی نیمکره شمالی و میانگین مداری مولفه مداری باد (متر بر ثانیه) در تراز ده هکتوپاسکال روی مدار ۶۰ درجه شمالی از یکم تا سی و یکم ژانویه ۲۰۱۳.



شکل ۱۴: تغییرات روزانه بی‌هنجاری ازن کلی کلاهک قطبی (دابسون) نیمکره شمالی و میانگین مداری مولفه مداری باد (متر بر ثانیه) در تراز ده هکتوپاسکال روی مدار ۶۰ درجه شمالی از پنجم فوریه تا پنجم مارس ۲۰۱۸.

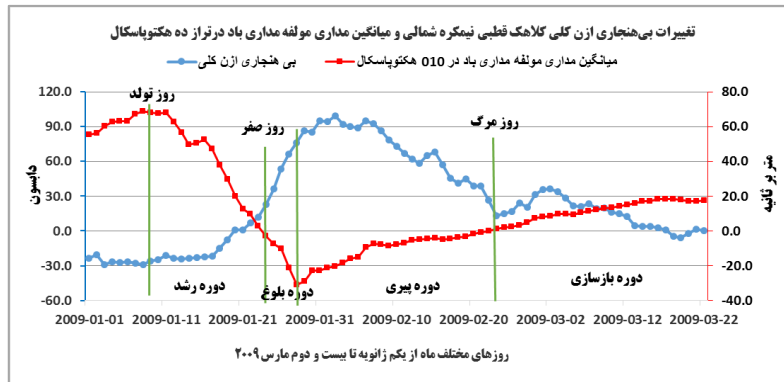


الف) قبل از گرمایش



ب) بعد از گرمایش

شکل ۱۵: محور جت قطبی (متر بر ثانیه) در سطح فشاری ده هکتوپاسکال در روزهای الف: یکم ژانویه ۲۰۰۹ (قبل از گرمایش) و ب: بیست و هفتم ژانویه ۲۰۰۹ (بعد از گرمایش). مثلث بسته معرف سرعت ۵۰ متر بر ثانیه و هر خط ده متر بر ثانیه است.



شکل ۱۶: تغییرات روزانه بی‌هنجاری ازن کلی کلاهک قطبی (دابسون) نیمکره شمالی و میانگین مداری مولفه مداری باد در تراز ده هکتوپاسکال باد (متر بر ثانیه) در تراز ده هکتوپاسکال روی مدار ۶۰ درجه شمالی از یکم ژانویه تا بیست و دوم مارس ۲۰۰۹.

شده است. به طوری که مقدار ازن کلی کلاهک قطبی در روز نهم فوریه ۱۹۸۷ به مقدار ۵۰۱/۱ دابسون رسیده است و میانگین بلند مدت آن نیز در این روز ۳۹۴/۵ دابسون محاسبه شده است. این تفاوت ممکن است به خاطر استفاده از داده‌های متفاوت و انتخاب دوره آماری متفاوت ایجاد شده باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش نقش گرمایش ناگهانی پوشش سپهر بر تغییرات ازن کلی کلاهک قطبی نیمکره شمالی بررسی شد و نتایج موردی زیر به دست آمد: در دوره زندگی گرمایش ناگهانی پوشش سپهر نوع فرعی که شامل روز تولد، دوره رشد و روز مرگ است، جت قطبی لبه تاوه قطبی تضعیف می‌شود ولی به هم نمی‌ریزد و شرایط افزایش ازن کلاهک قطبی را فراهم نمی‌سازد. در حالت موردی گرمایش نوع فرعی انتخابی در این مطالعه دیده شد که بی‌هنجاری ازن کلاهک قطبی نسبت به میانگین بلند مدت منفی است. در دوره زندگی گرمایش ناگهانی پوشش سپهر نوع اصلی که شامل روز تولد، دوره رشد، روز صفر، دوره بلوغ، دوره پیری و روز مرگ و بازسازی است، جت شب قطبی لبه تاوه قطبی ابتدا تضعیف می‌شود و سپس به هم می‌ریزد

نتایج حاصل از بررسی تغییرات بی‌هنجاری ازن کلی کلاهک قطبی با رخداد گرمایش ناگهانی پوشش سپهر با پژوهش مدهو (Madhu, 2016)، مقایسه شد. این پژوهشگر با استفاده از داده‌های بایگانی NCEP/NCAR چند گرمایش ناگهانی پوشش سپهر (۱۹۹۸-۹۹، ۱۹۸۷-۸۸، ۱۹۸۴-۸۵، ۱۹۸۱-۸۲) که در میانه زمستان رخ داده بود را بررسی کرد و نشان داد که مقدار ازن در مناطق قطبی ۳۰ دابسون نسبت به میانگین بلند مدت افزایش داشته است و در هنگام رخداد گرمایش ناگهانی پوشش سپهر نوع نهائی (۱۹۷۹-۸۰) که در آخر زمستان رخ داده بود، مقدار ازن در مناطق قطبی ۵۰ دابسون نسبت به میانگین بلند مدت افزایش یافته است. تشابه تغییرات ازن کلی در گرمایش ناگهانی پوشش سپهر در پژوهش حاضر با پژوهش مدهو (۲۰۱۶) در افزایش ازن کلی کلاهک قطبی است و تفاوت آن در مقدار افزایش آن می‌باشد. به طوری که در موردهای انتخابی این پژوهش بیشترین مقدار افزایش بین ۲۹ دابسون در گرمایش ۲۰۱۶-۲۰۱۷ و ۱۰۶/۶ دابسون در گرمایش ۱۹۸۶-۱۹۸۷ در تغییر بوده است. در گرمایش ۱۹۸۶-۱۹۸۷ که در هر دو پژوهش مشترک است، بیشترین افزایش ازن کلی کلاهک قطبی ۱۰۶/۶ دابسون در دوره بلوغ گرمایش برآورد

شارش غربی تبدیل می‌شود و در نتیجه مقدار ازن کلاهدک قطبی در این دوره کاهش می‌یابد. هر چه طول دوره رشد و بلوغ بیشتر باشد و تغییرات میانگین مداری باد مداری نیز به سرعت کاهش یابد، بی‌هنجاری مثبت ازن کلی کلاهدک قطبی نیز بیشتر است. بیشترین بی‌هنجاری مثبت ازن کلاهدک قطبی نسبت به بلندمدت دوره آماری در گرمایش ناگهانی نوع اصلی ژانویه ۱۹۸۷ به مقدار ۱۰۶/۶ دابسون ثبت شده است. در گرمایش ناگهانی ژانویه ۲۰۰۹ این مقدار ۹۹/۲ دابسون است. کمترین مقدار بی‌هنجاری مثبت ازن کلاهدک قطبی نیز با مقدار ۲۸/۷ دابسون در حالت موردی فوریه ۲۰۱۷ ثبت شده است. از آنجائی که گرمایش ناگهانی پوشن سپهر نوع اصلی بر تغییرات میانگین مداری دما در مناطق حاره و جنب حاره اثر قابل توجهی ندارد (مرادی، ۱۴۰۰)، از این رو چنین به نظر می‌رسد که اثر گرمایش ناگهانی پوشن سپهر بر شاخه فراشارش منطقه استوائی و نیز شارش نصف‌النهاری قطب سوی منطقه جنب حاره گردش بروئر دابسون بسیار ناچیز باشد ولی از طریق تضعیف سرمایش دررو شاخه فرو شارش قطبی این گردش در پوشن سپهر پایین می‌تواند موثر باشد. این اثر می‌تواند ضمن افزایش شار ازن و اتم‌های آزاد مانند کلر و برم به پوشن سپهر پایین منطقه کلاهدک قطبی از طریق افزایش گرما، شرایط فیزیکی مربوط به واکنش‌های تخریب ازن را نیز تغییر دهد و در نتیجه سبب کاهش سرعت تخریب ازن شود.

و شرایط انتقال ازن به کلاهدک قطبی را فراهم می‌سازد. بر این اساس در پنج مورد گرمایش ناگهانی انتخابی، مقدار ازن کلاهدک قطبی نسبت به میانگین بلند مدت افزایش یافته است. بی‌هنجاری ازن کلی کلاهدک قطبی در روز تولد گرمایش نوع اصلی معمولاً منفی و یا مقادیر مثبت کوچکی دارد. این کمیت در دوره رشد افزایش می‌یابد و مقدار آن به مثبت تغییر می‌کند. بی‌هنجاری ازن کلاهدک قطبی، دو روز قبل از روز صفر مثبت می‌شود. هر چه طول دوره رشد طولانی‌تر باشد، بی‌هنجاری مثبت ازن کلاهدک قطبی نیز بیشتر می‌شود. مقدار این کمیت در دوره بلوغ نیز افزایشی است و بیشترین بی‌هنجاری مثبت ازن کلاهدک قطبی در هر پنج مورد گرمایش نوع اصلی انتخابی، در روزهای آخر دوره بلوغ و اوایل دوره پیری برآورد شده است. در گرمایش مورد ۲۰۱۷ که روز مرگ بلافاصله بعد از روز صفر رخ داده است، بیشترین بی‌هنجاری مثبت در روز صفر ثبت شده است. در دوره پیری به تدریج بی‌هنجاری ازن کلی کلاهدک قطبی کاهش می‌یابد. این روند تا روز مرگ و زمان بازسازی نیز ادامه می‌یابد. چنین بر می‌آید که چون در دوره رشد و بلوغ گرمایش ناگهانی پوشن سپهر نوع اصلی، میانگین مداری مولفه مداری باد به سرعت کاهش می‌یابد و سپس مقدار آن تغییر علامت می‌دهد از این رو مقادیر ازن کلی کلاهدک قطبی نیز افزایش می‌یابد و بی‌هنجاری این کمیت مثبت می‌شود. در دوره پیری اگر افت و خیزی در میانگین مداری مولفه مداری باد رخ ندهد، شارش شرقی ایجاد شده ابتدا تضعیف می‌شود و سپس به

منابع

-مرادی، م.، ۱۳۹۹. ارتباط گرمایش ناگهانی پوشن سپهر نوع اصلی با تغییرات تاوه قطبی در دوره آماری ۲۰۱۹-۱۹۷۹، مجله فیزیک زمین فضا، شماره ۳، ص ۶۰۳-۶۲۰.

-شرعی پور، ز. و علی اکبری بیدختی، ع.ا.، ۱۳۹۳. بررسی افت و خیز زمستانی ازن کلی جو مربوط به امواج مقیاس همدیدی در منطقه ایران، مجله فیزیک زمین فضا، شماره ۴، ص ۱۳۹-۱۵۴.

مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۴، ص ۲۱-۱۲.

مرادی، م.، ۱۳۹۹. بررسی دوره زندگی گرمایش ناگهانی پوشش سپهر نوع اصلی در نیمکره شمالی،

-Ageyeva, V., Gruzdev, A.N., Elokhov, A.S., Mokhov, I.I. and Zueva, N.E., 2017. Sudden Stratospheric Warmings: Statistical Characteristics and Influence on NO₂ and O₃ Total Contents, *Atmospheric and Oceanic Physics: 2017*, v. 53(5), p. 477-486.

-Ahrens, C.D., 2009. *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*, Ninth Edition. 2009, 2007 Brooks/Cole, Cengage Learning, 620 p.

-Brewer, A.W., 1949. Evidence for a world circulation provided by measurements of helium and water vapor distribution in the strato-sphere: *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, v. 75, p. 351-363.

-Castillon, A.O., 2014. The evolution of the Brewer-Dobson circulation and the ozone layer during the last three decades: Thesis to get the degree of a doctor of philosophy. Universitat de Barcelona, 104 p.

-Castanheira, J.M., Peevey, T.R., Marques, C.A.F. and Olsen, M.A., 2012. Relationships between Brewer-Dobson circulation, double tropopauses, ozone and stratospheric water vapour: *Atmos. Chem. Phys.*, v. 12, p. 10195-10208.

-Chapman, S., 1930. A theory of upper atmospheric ozone: *Mem. Roy. Meteorol. Soc.*, v. 3, 103 p.

-Chalpathi, G.V., Eswaraiah, S., Prasanth, P.V., Lee, J., Kumar, K.N. and Kim, Y.H., 2018. Unusual Changes in Stratospheric Ozone and Water Vapor Over Antarctica and its Relation to Mesosphere Dynamics during a Minor Sudden Stratosphere Warming: *International Journal of Current Research and Review*, v. 10, p. 53-58.

-Dobson, G.M., 1956. Origin and distribution of the polyatomic molecules

in the atmosphere: *Proc. Roy. Soc. Ldn.*, A236, p. 187-193.

-Douglass, A.R., Newman, P.A. and Solomon, S., 2014. The antarctic ozone hole: An update: *Physics Today*, v. 67, p. 42-48.

-Gerber, E.P., 2012. Stratospheric versus Tropospheric Control of the Strength and Structure of the Brewer-Dobson Circulation: *Journal of atmospheric sciences*, v. 69, p. 2857-2877.

-Hong, H.J. and Reichler, T., 2020. Local and Remote Response of Ozone to Arctic Stratospheric Circulation Extremes: *Atmospheric Chemistry and Physics*. <https://doi.org/10.5194/acp-2020-790>.

-Holton, J.R., Haynes, P.H., McIntyre, M.E., Douglass, A.R., Rood, R.B. and Pfister, L., 1995. Stratosphere-troposphere exchange: *Rev. Geophys.*, v. 33, p. 403-439.

-Limpasuvan, V., Thompson, D.W.J. and Hartmann, D.L., 2004. The life cycle of the northern hemisphere sudden stratospheric warmings: *Journal of climate*, v. 17, p. 2584-2596.

-Linz, M., Abalos, M., Glanville, A.S., Kinnison, D.E, Ming, A. and Neu, J.L., 2019. The global diabatic circulation of the stratosphere as a metric for the Brewer-Dobson circulation. *Atmos: Chem. Phys.*, v. 19, p. 5069-5090.

-Longematz, U., 2019. Stratospheric ozone: down and up through the Anthropocene: *ChemTexts* <https://doi.org/10.1007/s40828-019-0082-7>

-Madhu, V., 2016. Effects of Sudden Stratospheric Warming Events on the Distribution of Total Column Ozone over Polar and Middle Latitude Regions: *Open Journal of Marine Science*, v. 6, p. 302-316.

- Rao, J., Ren, R., Chen, H., Yu, Y. and Zhou, Y., 2018. The stratospheric sudden warming event in February 2018 and its prediction by a climate system model: *Journal of geophysics research atmospheric*, v. 123, p. 13332-13345.
- Shin, D., Song, S., Ryoo, S.B. and Lee, S.S., 2020. Variations in Ozone Concentration over the Mid-Latitude Region Revealed by Ozonesonde Observations in Pohang: South Korea. *Atmosphere*, v. 11, 746 p.
- Tweedy, O.V., Limpasuvan, V., orsolini, Y.J., Smith, A.K., Garcia, R.R., Kinnison, D., Randall, C.E., Kvissel, O.K., Stordal, F., Harvey, L. and Chandran, A., 2013. Nighttime secondary ozone layer during major stratospheric sudden warming's in specified-dynamics WACCM: *Journal of geophysical research atmospheres*, v. 118, p. 8346-8358.
- Weber, M., Dikty, S., Burrows, J.P., Garnt, H., Dameris, M., Kubin, A., Abalichin, L. and Langematz, U., 2011. The Brewer-Dobson circulation and total ozone from seasonal to decadal time scales: *Atmos. Chem. Phys.*, v. 11, p. 11221-11235.
- Weber, M., Coldewey-Egbers, M., Fioletov, V.E., Frith, S.M., Wild, J.D., Burrows, J.P., Long, C.S. and Loyola, D., 2018. Total ozone trends from 1979 to 2016 derived from five merged observational datasets—the emergence into ozone recovery: *Atmos. Chem. Phys.*, v. 18, p. 2097-2117.
- Yamazaki, Y. and Matthias, V., 2019. Large-amplitude quasi-10-day waves in the middle atmosphere during final warming's: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 124(17-18), p. 9874-9892.