

## ارتباط گرمایش ناگهانی پوشش سپهر نوع اصلی با تغییرات تاوه قطبی

در دوره آماری ۱۹۷۹-۲۰۱۹

محمد مرادی\*

دانشیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

(دریافت: ۹۹/۴/۱۴، پذیرش نهایی: ۹۹/۷/۸)

## چکیده

گرمایش ناگهانی پوشش سپهر نوع اصلی زمانی رخ می‌دهد، که دمای مناطق نزدیک قطب به‌طور ناگهانی در مدت چند روز، بیش از بیست و پنج کلون افزایش یابد و بادهای غربی پوشش سپهر قطبی به شرقی تغییر کند. در این پژوهش، با استفاده از داده‌های بازتحلیلی MERR2، نوزده گرمایش ناگهانی پوشش سپهر در طول دوره آماری ۱۹۷۹-۲۰۱۹ آشکار و ارتباط آنها با تاوه قطبی بررسی شد. برای تعیین جابه‌جایی و تقسیم هسته تاوه، ابتدا روز تولد، روز صفر، روز مرگ و مدار آستانه تعریف شد و سپس، دوره‌های قبل و بعد از تغییر و دوره بازسازی در نظر گرفته شد و با به‌کارگیری داده‌های روزانه ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ده هکتوپاسکال در این دوره‌ها، جابه‌جایی و نحوه تقسیم تاوه بررسی شد.

بررسی‌ها، نشان داد که، در ۴۲ درصد، هسته تاوه قطبی به‌سوی جنوب جابه‌جا شده است و مرکز هسته پس از جابه‌جایی تضعیف شده است. در ۵۸ درصد، هسته تاوه به دو سلول تبدیل شده است. از این مقدار ۱۵/۸ درصد از نوع تقسیم ناقص است، که در آن هسته ثانوی کمتر از دو پربند بسته با فاصله ۱۰۰ ژئوپتانسیل متر دارد و از طریق ناوه ارتفاع به هسته اولیه وابسته است. ۴۲/۲ درصد نیز از نوع تقسیم کامل است، که از این مقدار، در ۱۵/۸ درصد هسته ثانوی از هسته مادر به‌طور کامل جدا شده است و در ۲۶/۴ درصد با وجودی که هسته ثانوی به‌طور کامل شکل گرفته است و بیش از دو پربند بسته با فاصله ۱۰۰ واحدی دارند، ولی این هسته از طریق ناوه ارتفاع به هسته مادر وابسته است.

واژه‌های کلیدی: گرمایش ناگهانی پوشش سپهر نوع اصلی، تاوه قطبی پوشش سپهری، جابه‌جایی، تقسیم کامل، تقسیم ناقص.

## ۱. مقدمه

پولوانی، (۲۰۰۷) و می‌تواند سبب کاهش سرعت باد غربی و تغییر جهت آن به شرقی شود که در نتیجه به شکست تاوه قطبی منجر شود.

کاهش مؤلفه مداری سرعت باد از مقادیر مثبت به مقادیر منفی و افزایش جهشی دمای پوشش سپهر قطبی بین چهل تا شصت کلون در چند روز، از ویژگی‌های گرمایش ناگهانی پوشش سپهر می‌باشد (رائو و همکاران، ۲۰۱۹). تغییر جهت باد از غربی به شرقی که در اثر گرمایش ناگهانی پوشش سپهر رخ می‌دهد، می‌تواند تاوه قطبی را به دو تاوه مستقل کوچک‌تر تقسیم کند و آنها را به عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر انتقال دهد. این شرایط با تأخیر ده تا بیست روزه، سبب ماندگاری هوای سرد و امواج سرمایایی در مناطق مختلف اروپای شمالی و اوراسیا می‌شود (ناش و همکاران، ۲۰۱۶).

گرمایش ناگهانی پوشش سپهر به یک آشفستگی بزرگ مقیاس زمستانه پوشش سپهر قطبی اشاره دارد که به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای دما و گردش در جو میانی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (اگی‌یاوا و همکاران، ۲۰۱۷). در فصل زمستان که فقط امواج راسی بزرگ مقیاس می‌تواند از وردسپهر به پوشش سپهر نفوذ کنند، در اثر شکست در پوشش سپهر فوقانی، سبب تضعیف شارش پایه غربی و تغییر جهت آن به شرقی می‌شوند. این فرایند سبب افزایش ناگهانی دما در داخل تاوه قطبی می‌شود و گرمایش ناگهانی پوشش سپهر را ایجاد می‌کند (کرمی و همکاران، ۱۳۹۷). این پدیده که برای اولین بار در زمستان ۱۹۵۲ شناسائی شد (پالمیرو و همکاران، ۲۰۱۵) و به‌طور متوسط رخداد آن هر سال حدود ۰/۶ یا هر سه سال دو بار در برخی زمستان‌های قطب شمال رخ می‌دهد (چارلتون و

توسط پژوهشگران زیادی بررسی شده است که در زیر به طور کوتاه به چند نمونه اشاره می‌شود.

هنر و همکاران (۲۰۰۷)، بر اساس توزیع تاوایی پتانسیلی روی سطوح همدرگاشت و استفاده از داده‌های روزانه ECMWF در دوره آماری ۲۰۰۷-۱۹۵۷، رخداد گرمایش ناگهانی پوشن سپهر را بررسی کردند. این پژوهشگران ابتدا توزیع میدان دما و میدان باد مداری در هنگام رخداد گرمایش ناگهانی پوشن سپهر طی ماه‌های دسامبر تا مارس ۲۰۰۱-۲۰۰۰ و ۲۰۰۲-۲۰۰۱ را با جزئیات بیشتر تحلیل کردند و سپس تحول تاوه قطبی در فرایند گرمایش را شرح دادند. بر اساس این تحقیق مشخص شد که گرمایش ناگهانی پوشن سپهر دارای تغییرات درون سالانه و درون دهه‌ای است که فراوانی حالت اول در دهه ۱۹۶۰-۱۹۵۰ و فراوانی نوع دوم در دهه ۱۹۸۰-۱۹۷۰ بیشتر بوده است.

پیترز و همکاران (۲۰۱۰)، با استفاده از داده‌های باز تحلیل NCEP/NCAR، دو گرمایش ناگهانی پوشن سپهر را که در زمستان‌های ۲۰۰۳-۲۰۰۲ و ۲۰۰۵-۲۰۰۴ در نیمکره شمالی رخ داده بود را از دیدگاه دینامیکی ارزیابی کردند. آنها مشاهده کردند که کمترین دما در پوشن سپهر پایین و میانه در مناطق قطبی فقط در زمستان ۲۰۰۳-۲۰۰۲ به ثبت رسیده است. آنها نشان دادند که در اثر این گرمایش هسته تاوه قطبی در نیمه میانی ژانویه جابه‌جا شده است.

گرمایش ناگهانی پوشن سپهر از دیدگاه سازمان هواشناسی جهانی (مک ایتنورف، ۱۹۷۸) زمانی رخ می‌دهد که در بازه زمانی نوامبر تا آوریل در تراز ۱۰ هکتوپاسکال، میانگین مداری دمای قطب بیشتر از میانگین مداری دما در عرض جغرافیایی ۶۰ درجه شمالی باشد. نوع اصلی نیز زمانی اتفاق می‌افتد که در مدت افزایش جهشی دمای پوشن سپهری، میانگین مداری مؤلفه مداری باد در روی مدار ۶۰ درجه شمالی در تراز ۱۰ هکتوپاسکال، از مقدار مثبت به منفی تغییر کند و سپس به مقدار مثبت برگردد (یامازاکی و ماتياس، ۲۰۱۹ و باتلر و گربر، ۲۰۱۸). برخی پژوهشگران این تعریف را تغییر داده‌اند که در جدول ۱ به تعدادی از آنها اشاره شده است. بیشتر پژوهشگران در دهه اخیر برای آشکارسازی گرمایش ناگهانی پوشن سپهر، از تعریف سازمان جهانی هواشناسی (۱۹۷۸)، با اعمال تغییر جزئی استفاده کرده‌اند. برخی نیز بین نوع اصلی و فرعی تفاوتی در نظر نگرفته‌اند و با در نظر گرفتن شرایط خاصی گرمایش نهائی را نیز پالایش کرده‌اند (پالمیرو و همکاران، ۲۰۱۵). برخی پژوهشگران بر اساس تغییر تاوه قطبی حاصل از گرمایش ناگهانی این پدیده را دسته‌بندی کرده‌اند به طوری که گرمایش ناگهانی نوع اول سبب جابه‌جایی تاوه قطبی و نوع دوم سبب تجزیه تاوه به دو هسته مجزا می‌شود (پالمیرو و همکاران، ۲۰۱۵). پدیده گرمایش ناگهانی پوشن سپهر در خارج از ایران،

جدول ۱. شرایط تعریف شده برای آشکارسازی گرمایش ناگهانی پوشن سپهر از دیدگاه پژوهشگران مختلف.

ردیف	تعریف	دوره رخداد	تراز فشاری (هکتوپاسکال)	زمان بازسازی (روز)	مرجع
۱	$\bar{u}_{60^{\circ}N} < 0 \text{ ms}^{-1}$ $\bar{T}_{90^{\circ}N} - \bar{T}_{60^{\circ}N} > 0 \text{ K}$	نوامبر-آوریل	۰۱۰	۲۰	مک ایتنورف، ۱۹۷۸
۲	$\delta[\bar{u}_{50^{\circ}-70^{\circ}N}]_{7day} < -20 \text{ ms}^{-1}$	دسامبر-فوریه	۰۱۰	-	کودرا، ۲۰۰۶
۳	$\delta[\bar{T}_{80^{\circ}-90^{\circ}N}]_{6day} > 20 \text{ K}$	اکتبر-می	۰۳۰، ۰۲۰، ۰۱۰	۳۰	ناکاگاو و یامازاکی، ۲۰۰۶
۴	$\bar{u}_{60^{\circ}N} < 0 \text{ ms}^{-1}$	نوامبر-مارس	۰۱۰	۲۰	چارلتون و پولوانی، ۲۰۰۷

تغییر جهت باد غربی به شرقی در فاصله ماه نوامبر تا مارس و سپس برگشت به حالت اولیه پس از بیست روز متوالی استفاده شد.

آگی‌یاوا و همکاران (۲۰۱۷)، با استفاده از داده‌های NCEP/NCAR، ERA40 و ERA-Interim، ویژگی‌های آماری گرمایش ناگهانی پوشش سپهر از نوع اصلی و فرعی را که در دوره آماری ۲۰۱۵-۱۹۵۸ در نیمکره شمالی رخ داده است را تحلیل کردند. این پژوهشگران در بازه زمانی فوق، ۴۱ مورد از نوع اصلی و ۴۱ مورد نیز از نوع فرعی آشکار کردند. آنها نشان دادند که فراوانی رخدادهای گرمایش ناگهانی پوشش سپهر اصلی که با جابه‌جایی تاوه قطبی پوشش سپهری همراهی داشته است، در فاز شرقی نوسان شبه دوسالانه بیشتر از فاز غربی آن است و فراوانی رخدادهای گرمایش ناگهانی پوشش سپهر فرعی در فاز غربی نوسان شبه دوسالانه بیشتر از فاز شرقی آن می‌باشد.

کیم و همکاران (۲۰۱۷)، برای ارزیابی فراوانی گرمایش ناگهانی پوشش سپهر، تعریف سازمان جهانی هواشناسی را بر پایه گرایش میانگین مداری مؤلفه مداری باد روی مدار شصت درجه شمالی تغییر دادند و سپس در دوره آماری ۲۰۰۲-۱۹۵۸ فراوانی رخداد گرمایش ناگهانی پوشش سپهر را با دو تعریف مجزا برآورد کردند. آنها نشان دادند که در ۱۸ مورد، نتایج هر دو تعریف یکسان است ولی در فاصله ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۵، پنج مورد گرمایش ناگهانی پوشش سپهر رخ داده است که با تعریف سازمان جهانی هواشناسی آشکار نشد.

وارجین و کیریشوف (۲۰۱۹)، با استفاده از داده‌های تحلیلی NCEP، SABER و مقادیر اندازه‌گیری ماهواره‌ای MLS، فرایند دینامیکی پوشش سپهر قطبی در زمستان ۲۰۱۷-۲۰۱۸ را بررسی کردند و نشان دادند که انتشار پایین سوی فعالیت موج از پوشش سپهر به وردسپهر در نزدیکی کانادا از اواخر دسامبر ۲۰۱۷ تا اوایل ژانویه با گرمایش ناگهانی پوشش سپهر در فوریه ۲۰۱۸، جدا شدن تاوه قطبی پوشش سپهری، سرمایش گرم‌سپهر، تغییرات ارتفاع وردایست و سرمایش پوشش سپهر پایین در مناطق

کوتیپورات و نیکولین (۲۰۱۲)، گرمایش ناگهانی پوشش سپهر در زمستان‌های دوره ۲۰۱۰-۲۰۰۳ را بررسی و مشاهده کردند که در شش زمستان این دوره، گرمایش ناگهانی پوشش سپهر نوع اصلی رخ داده است. سه مورد گرمایش آشکار شده ۲۰۰۴-۲۰۰۳، ۲۰۰۶-۲۰۰۵ و ۲۰۰۹-۲۰۰۸ در ژانویه و سه مورد آن نیز در ۲۰۰۷-۲۰۰۶، ۲۰۰۸-۲۰۰۷ و ۲۰۱۰-۲۰۰۹ در فوریه ثبت شده است. آنها نشان دادند که گرمایش مربوط به زمستان ۲۰۰۸-۲۰۰۹ قوی‌ترین گرمایش بوده است که هسته تاوه قطبی طی دوره زندگی این پدیده، به دو هسته جدا تجزیه شده است. در بقیه مورددا هسته تاوه قطبی فقط جابه‌جا شده است. به‌علاوه گرمایش زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۶ نیز ضعیف‌ترین گرمایش دوره مورد مطالعه ثبت شده است.

کوهن و جونز (۲۰۱۱)، اثر گرمایش ناگهانی پوشش سپهر بر بی‌هنجاری فشار در وردسپهر پایین را بررسی کردند. این پژوهشگران ضمن تأیید اثر رخداد این پدیده بر جابه‌جایی و تقسیم هسته تاوه قطبی به دو سلول مجزا، نشان دادند که ناهنجاری فشار سطح دریا در روی آبهای آتلانتیک شمالی و آرام شمالی قبل و بعد از جابه‌جایی تاوه قطبی، به‌طور قابل توجهی تفاوت دارند.

باتلر و همکاران (۲۰۱۵)، گرمایش ناگهانی پوشش سپهر از نوع اصلی را بررسی کردند و نشان دادند که فراوانی رخداد این پدیده در نیمکره شمالی نسبت به نیمکره جنوبی خیلی بیشتر است و علت آنرا در بیشتر بودن فراوانی عبور امواج سیاره‌ای در نیمکره شمالی بیان کردند. این پژوهشگران رخداد این پدیده در نیمکره شمالی را شصت درصد برآورد کردند.

باتلر و همکاران (۲۰۱۷)، برای تعیین تاریخ دقیق رخداد گرمایش ناگهانی پوشش سپهر، ویژگی‌های این پدیده را تغییر دادند و در دوره آماری ۲۰۱۴-۱۹۵۸، با استفاده از شش نوع داده متفاوت، چهل‌ویک رخداد گرمایش ناگهانی پوشش سپهر از نوع اصلی را در نیمکره شمالی و یک مورد را در نیمکره جنوبی آشکار کردند. در این پژوهش در تعریف نوع اصلی گرمایش برای اولین بار، از

حاره، همراهی می‌کند.

وانگ و همکاران (۲۰۱۹)، با استفاده از داده‌های باد مداری، دما و نیمرخ قائم منواکسیدکربن که از سایت خارکوف در اوکراین گرفته شده است (از طریق ایمیل Shulga@kharkov.ua در دسترس است)، اثر گرمایش ناگهانی پوشش سپهر نوع اصلی که در فوریه ۲۰۱۸ در نیمکره شمالی رخ داده است را روی تغییرات روزانه منواکسیدکربن بررسی کردند و نشان دادند که در مدت گرمایش ناگهانی پوشش سپهر، یک باند پهن تغییرات روزانه منواکسیدکربن، دما و باد مداری در گرم‌سپهر و وردسپهر ایجاد شده است.

کوی و پائسون (۲۰۱۹)، گرمایش ناگهانی پوشش سپهر مورخ شش ژانویه ۲۰۱۳ را بررسی کردند و نشان دادند که این حالت موردی که سبب تجزیه تاوه قطبی به دو هسته مجزا شده است، به سبب شکست امواج سیاره‌ای و افزایش نفوذ شار قائم فعالیت موج به پوشش سپهر پایین رخ داده است.

یامازاکی و همکاران (۲۰۱۹)، حالت موردی گرمایش ناگهانی پوشش سپهر قطب جنوب که در سپتامبر ۲۰۱۹ رخ داده است را بررسی کردند. آنها با استفاده از داده‌های بازتحلیلی MERRA2 نشان دادند که میانگین مداری دمای قطب جنوب در تراز ده هکتوپاسکال از ۲۰۸ کلوین در پنجم سپتامبر به ۲۵۹ کلوین در یازده سپتامبر افزایش یافته است. این پژوهشگران دیدند که اختلاف دمای ۵۱ کلوین در مدت شش روز، بیشترین اختلاف دما در مجموعه داده‌ها از ژانویه ۱۹۸۰ تا سپتامبر ۲۰۱۹ بوده است. از آنجایی که طی مدت فوق در تراز ده هکتوپاسکال، میانگین مداری باد در روی مدار شصت درجه جنوبی تغییری نداشت، بنابراین این گرمایش ناگهانی پوشش سپهر در قطب جنوب از نوع فرعی تشخیص داده شد.

چوی و همکاران (۲۰۱۹)، بر اساس اولین روزی که علامت میانگین مؤلفه مداری از مثبت به منفی تغییر می‌کند، روز صفر یا روز مرکزی را تعریف کردند و برای

دوره آماری ۲۰۱۳-۱۹۵۸، با استفاده از چند مجموعه داده، تعداد ۴۳ رخداد گرمای ناگهانی پوشش سپهر را آشکار کردند. این پژوهشگران در ادامه بر اساس جابه‌جایی یا تشکیل دو هسته بسته مجزا مراکز بیشینه و کمینه اغتشاش مداری ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۱۰ هکتوپاسکال، رخداد گرمایش ناگهانی پوشش سپهر را به سه دسته جابه‌جایی-جابه‌جایی، جابه‌جایی-جدایی و جدایی-جدایی تقسیم کردند.

در ایران گرمایش ناگهانی پوشش سپهر کمتر مورد توجه قرار گرفته است به طوری که نتایج حاصل از جستجوی اینترنتی، فقط سه مورد را مشخص کرد. ریوندی و همکاران (۱۳۹۳)، با استفاده از داده‌های بایگانی NCEP/NCAR، علت رخداد سرما و یخبندان دی‌ماه ۱۳۹۲ شمال شرق ایران را به گرمایش ناگهانی پوشش سپهر ارتباط داده‌اند. آنها بیان کردند که رخداد گرمایش ناگهانی پوشش سپهر اواخر دی ماه سبب گسترش و استقرار تاوه قطبی به شمال شرق ایران شده است که در نتیجه آن سرما و یخبندان مناطق شمال شرقی ایران به‌ویژه مشهد را تحت تأثیر قرار داده است.

میررکنی و همکاران (۱۳۹۲) در بررسی بی‌هنجاری‌های اقلیمی زمستان‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۸۸، با استفاده از تابع‌های متعامد تجربی و فرایافت‌های اویلری نشان دادند که وقوع (فقدان) گرمایش ناگهانی فرعی یا اصلی در اثنای زمستان، سبب جابه‌جایی الگوی دو قطبی سرد به عرضهای پایین‌تر (بالا‌تر) و در نتیجه بروز زمستان سرد (گرم) در منطقه می‌شود.

کرمی و همکاران (۱۳۹۷)، در بررسی حالت‌های بازتاب، جذب و انتشار امواج راسبی انتشار یابنده بالاسو، با استفاده از داده‌های بازتحلیلی ERA-Interim در زمستان‌های دوره آماری ۲۰۱۴-۱۹۷۹ نشان دادند که در سال‌هایی که پوشش سپهر حالت بازتابی دارد، تنها در ۳۳ درصد از زمستان‌ها احتمال رخداد پدیده گرمایش ناگهانی پوشش سپهری وجود دارد. این در حالی است که در زمستان‌هایی که پوشش سپهر حالت غیربازتابی دارد، چون

نشده است.

## ۲. روش پژوهش

در این پژوهش گرمایش ناگهانی پوشش سپهر که توسط سازمان جهان هواشناسی تعریف شده است، کمی تغییر داده شد و به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

گرمایش ناگهانی پوشش سپهر موقعی رخ می‌دهد که میانگین مداری دمای تراز ده هکتوپاسکال در روی مدار شصت تا نود درجه شمالی در بازه زمانی اول دسامبر تا پایان مارس، بیش از ۲۵ کلون افزایش یابد و در این فاصله، میانگین مداری مؤلفه مداری باد در روی مدار شصت درجه شمالی در این تراز نیز بیش از ۲۰ متر بر ثانیه کاهش یابد. نوع اصلی گرمایش زمانی است که علامت میانگین مداری باد در دوره گرمایش از مقادیر مثبت به منفی تغییر کند و تا پایان مارس علامت آن به مقادیر مثبت برگردد. در صورتی که علامت این کمیت در دوره گرمایش، تغییر نکند، نوع گرمایش فرعی است. این تعاریف در جدول ۲ آورده شده است.

برای تعیین جابه‌جایی تاوه قطبی که معمولاً در پاییز تشکیل می‌شود، در زمستان به بلوغ می‌رسد و در بهار از بین می‌رود، مرکز تاوه قطبی پوشش سپهری در روزهای مختلف زمستان‌های دوره آماری ۲۰۱۹-۱۹۴۸ (دسامبر، ژانویه، فوریه و مارس) بررسی شد.

احتمال انتشار و نفوذ امواج راسبی از وردسپهر به پوشش سپهر زیرین در فاصله عرض جغرافیایی ۹۰-۷۰ درجه شمالی بیشتر است، پس احتمال رخداد این پدیده نیز بیشتر است به همین دلیل در این شرایط، در حدود ۶۲ درصد از زمستان‌ها احتمال رخداد گرمایش ناگهانی پوشش سپهر وجود دارد.

هدف از این تحقیق ابتدا آشکارسازی گرمایش ناگهانی پوشش سپهر از نوع اصلی و فرعی در زمستان‌های دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۷۹ است و سپس بررسی اثر گرمایش ناگهانی پوشش سپهر از نوع اصلی بر تغییرات تاوه قطبی پوشش سپهری می‌باشد. این پژوهش در چند مرحله انجام شده است. ابتدا با توجه به تعریف گرمایش ناگهانی پوشش سپهر، مفاهیم مورد نیاز پژوهش تعریف می‌شود و سپس با به‌کارگیری مفاهیم تعریف شده و استفاده از داده‌های میانگین مداری باد مداری و میانگین مداری دما در تراز ده هکتوپاسکال، انواع مختلف گرمایش ناگهانی پوشش سپهر آشکار می‌شود. در ادامه، با استفاده از تغییرات ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ده هکتوپاسکال، تغییرات مرکز تاوه قطبی بررسی می‌شود و در پایان نتایج موردی بیان می‌شود. آنچه این پژوهش را از پژوهش‌های پیشین متفاوت می‌کند، استفاده از تعریف روز تولد، روز صفر و روز مرگ این پدیده در تغییرات تاوه قطبی است که با تعاریف پژوهشگران پیشین متفاوت می‌باشد و در ایران نیز تاکنون به این موضوع پرداخته

جدول ۲. شرایط آشکارسازی گرمایش ناگهانی پوشش سپهر از دیدگاه این پژوهش.

نوع گرمایش	زمان بازسازی (روز)	تراز فشاری (هکتوپاسکال)	دوره رخداد	تعریف
اصلی	۲۰	۰۱۰	نوامبر تا	$[\bar{T}_{60^{\circ}-90^{\circ}N}]_{End} - [\bar{T}_{60^{\circ}-90^{\circ}N}]_{Start} > 25K$ $[\bar{u}_{60^{\circ}N}]_{Start} - [\bar{u}_{60^{\circ}N}]_{End} > +20 \text{ ms}^{-1}$ $[\bar{u}_{60^{\circ}N}]_k < 0 \text{ ms}^{-1}, Start < k < End$
فرعی			مارس	$[\bar{T}_{60^{\circ}-90^{\circ}N}]_{End} - [\bar{T}_{60^{\circ}-90^{\circ}N}]_{Start} > 25K$ $[\bar{u}_{60^{\circ}N}]_{Start} - [\bar{u}_{60^{\circ}N}]_{End} > +20 \text{ ms}^{-1}$ $[\bar{u}_{60^{\circ}N}]_k \geq 0 \text{ ms}^{-1}, Start < k < End$

تغییر می‌کند. در این مطالعه، میانگین ارتفاع تراز ده هکتوپاسکال از روز تولد تا روز صفر، از روز صفر تا روز مرگ و از روز مرگ تا بیست روز پس از آن بررسی می‌شود. در این دوره‌ها تبدیل تاوه قطبی از یک هسته به دو هسته مجزا و سپس بازسازی مجدد آن بهتر آشکار می‌شود. این تعریف سبب می‌شود تا تغییرات کوتاه‌مدت تاوه قطبی در حین گرمایش حذف شود. در این تحقیق جابه‌جایی مرکز تاوه قطبی فقط نسبت به عرض جغرافیایی در نظر گرفته می‌شود و زمانی رخ می‌دهد که موقعیت مرکز تاوه پس از گرمایش، پایین‌تر از مدار آستانه ارائه شده در جدول ۳ قرار گیرد. تقسیم هسته تاوه به دو هسته مجزا نیز زمانی رخ می‌دهد که یا هسته ثانوی که به فرزند نیز معروف است، به‌طور کامل از هسته مادر جدا شده باشد و یا دست کم دو منحنی بسته با بازه پربندی ۱۰۰ ژئوپتانسیل متر در هسته فرزند وجود داشته باشد. اگر فرزند از طریق ناوه به هسته مادر وابسته باشد و کمتر از دو پربند بسته داشته باشد، نوع تقسیم تاوه به‌عنوان تقسیم ناقص معرفی می‌شود. برای انجام این تحقیق مراحل زیر انجام شده است:

۱- رسم نمودار سری زمانی میانگین مداری دما و مؤلفه مداری باد در تراز ده هکتوپاسکال در روی مدار شصت درجه شمالی در روزهای مختلف سال از یکم ژوئیه تا سی‌ام ژوئن سال بعد برای تعیین تاریخ رخداد گرمایش ناگهانی پوشن‌سپهر و سپس تعیین نوع آنها بر اساس تعریف ارائه شده.

کمترین ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ده هکتوپاسکال به‌عنوان مرکز تاوه قطبی در نظر گرفته شد و در تمام روزهای دوره انتخابی، موقعیت این مرکز آشکار شد. با به‌کارگیری نرم افزارهای آماری در این دوره‌ها، میانگین و انحراف معیار مدار مرکز تاوه تعیین شد و بر اساس آن، مدار آستانه که میانگین منهای یک انحراف معیار در نظر گرفته شده است، برای میزان جابه‌جایی تعیین شد. در صورتی که مرکز تاوه در مدت جابه‌جایی از مدار آستانه پایین‌تر باشد، آنگاه تغییرات موقعیت تاوه به‌عنوان جابه‌جایی در نظر گرفته شد. این روش از سویر و همکاران (۲۰۱۳) گرفته شده است. تفاوت این روش با روش پژوهشگران فوق این است که آنها مدار ۶۶ درجه شمالی را به‌عنوان مدار آستانه معرفی کردند و معیار جابه‌جایی را ماندگاری هفت روزه مدار مرکزی تاوه در زیر مدار آستانه در نظر گرفتند. یکی از مزایا و معایب استفاده از روش این پژوهش به‌ترتیب، شناور بودن مدار آستانه و نبود شرایط یکسان مقایسه مدار مرکزی برای ماه‌های مختلف می‌باشد. نتایج در جدول ۳ نشان داده شده است.

برای بررسی تغییرات تاوه از تعریف سه روز ویژه بر اساس نحوه تغییرات میانگین مداری باد در تراز ده هکتوپاسکال استفاده شده است. روز تولد، اولین روزی است که میانگین مداری مؤلفه مداری باد از حالت بیشینه کاهش می‌یابد. روز صفر به روزی گفته می‌شود که مقدار میانگین مداری باد منفی می‌شود. روز مرگ نیز اولین روزی است که میانگین مداری باد مجدداً به مقدار مثبت

جدول ۳. میانگین، انحراف معیار و مدار آستانه (درجه) برای تعیین جابه‌جایی مرکز تاوه قطبی در دوره‌های مختلف (۲۰۱۹-۱۹۴۸).

ردیف	ماه	میانگین (درجه)	انحراف معیار (درجه)	مدار آستانه (درجه)
۱	دسامبر	۸۱/۰	۴/۸	۷۶/۲
۲	ژانویه	۷۹/۳	۶/۳	۷۳/۰
۳	فوریه	۷۷/۹	۶/۶	۷۱/۳
۴	مارس	۷۷/۰	۷/۴	۶۹/۶
۵	دسامبر-ژانویه	۸۰/۱	۵/۶	۷۴/۵
۶	ژانویه-فوریه	۷۸/۶	۶/۴	۷۲/۲
۷	فوریه-مارس	۷۷/۵	۷/۰	۷۰/۵
۸	دسامبر-مارس	۷۸/۷	۶/۵	۷۲/۲

برای بررسی تغییرات تاوه قطبی نیز از داده‌های روزانه ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ده هکتوپاسکال که در بایگانی NCEP/NCAR در دسترس است، استفاده شده است.

#### ۴. نتایج و بحث

بر اساس تعریف ارائه شده در بندهای پیش، در دوره آماری ۲۰۱۹-۱۹۷۹، سری‌های زمانی سالانه میانگین مداری دما و مؤلفه مداری باد بررسی شد و انواع گرمایش ناگهانی پوشش سپهر آشکار شد. گرمایش در سیزده مورد، از نوع فرعی و در نوزده مورد از نوع اصلی تشخیص داده شد. از آنجا که، تغییرات میانگین سرعت باد نقش زیادی در تغییرات تاوه قطبی دارد، از این رو روزهایی که علامت این کمیت تغییر کرده است، به‌عنوان دوره‌های قبل از تغییر، بعد از تغییر و دوره بازسازی معرفی شده است. در بررسی موردهای آشکار شده در دوره‌های فوق، مشاهده شد که در هشت مورد (۴۲ درصد) هسته تاوه قطبی فقط جابه‌جا شده است و در یازده مورد (۵۸ درصد) هسته تاوه به دو سلول تبدیل شده است. در این موارد هسته‌ها نیز جابه‌جا شده‌اند. این ویژگی‌ها در جدول‌های ۴ و ۵ آورده شده است.

۲- محاسبه میانگین و انحراف معیار زمستانه (دسامبر، ژانویه، فوریه و مارس) مدار مرکز تاوه قطبی در تراز فشاری ده هکتوپاسکال در دوره آماری ۲۰۱۹-۱۹۴۸ و تعیین مدار آستانه بر اساس تعریف ارائه شده.

۳- رسم الگوی میانگین ارتفاع تراز ده هکتوپاسکال در سه دوره مختلف (روز تولد تا روز صفر، روز صفر تا روز مرگ، روز مرگ و بیست روز پس از آن)، و تعیین موقعیت مرکز آن برای بررسی جابه‌جایی تاوه قطبی یا تبدیل هسته آن به دو هسته مجزا.

#### ۳. شیوه محاسبات

برای آشکارسازی گرمایش ناگهانی پوشش سپهر، از داده‌های باز تحلیلی ناسا (NASA National Aeronautics and Space Administration) موسوم به (Modern-Era Retrospective-analysis) MERRA2 (for Research and Applications version 2)، استفاده شد. از این داده‌های روزانه، میانگین مداری دما در مدارهای ۹۰-۶۰ و میانگین مداری مؤلفه مداری بردار باد روی مدار ۶۰ درجه شمالی در تراز ده هکتوپاسکال از اول ژوئیه سال قبل تا سی‌ام ژوئن سال بعد در دوره آماری ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۹، استخراج و تحلیل شد.

جدول ۴. دوره‌های انتخابی برای بررسی جابه‌جایی تاوه قطبی در دوره آماری ۲۰۱۹-۱۹۷۹.

ردیف	سال	دوره قبل از تغییر	دوره بعد از تغییر	دوره بازسازی
۱	۱۹۷۹-۱۹۸۰	۰۹ فوریه ۱۹۸۰	۰۱ مارس ۱۹۸۰	۰۳ مارس ۱۹۸۰
		۲۹ فوریه ۱۹۸۰	۰۲ مارس ۱۹۸۰	۲۲ مارس ۱۹۸۰
۲	۱۹۸۳-۱۹۸۴	۱۳ فوریه ۱۹۸۴	۲۴ فوریه ۱۹۸۴	۲۸ فوریه ۱۹۸۴
		۲۳ فوریه ۱۹۸۴	۲۷ فوریه ۱۹۸۴	۱۸ مارس ۱۹۸۴
۳	۱۹۸۶-۱۹۸۷	۱۸ دسامبر ۱۹۸۶	۲۳ ژانویه ۱۹۸۷	۲۱ فوریه ۱۹۸۷
		۲۲ ژانویه ۱۹۸۷	۲۰ فوریه ۱۹۸۷	۱۲ مارس ۱۹۸۷
۴	۲۰۰۰-۲۰۰۱	۱۷ ژانویه ۲۰۰۱	۱۱ فوریه ۲۰۰۱	۲۵ فوریه ۲۰۰۱
		۱۰ فوریه ۲۰۰۱	۲۴ فوریه ۲۰۰۱	۱۶ مارس ۲۰۰۱
۵	۲۰۰۱-۲۰۰۲	۱۴ دسامبر ۲۰۰۱	۳۰ دسامبر ۲۰۰۱	۰۳ ژانویه ۲۰۰۲
		۲۹ دسامبر ۲۰۰۱	۰۲ ژانویه ۲۰۰۲	۲۲ ژانویه ۲۰۰۲
۶	۲۰۰۵-۲۰۰۶	۲۶ دسامبر ۲۰۰۵	۲۱ ژانویه ۲۰۰۶	۱۶ فوریه ۲۰۰۶
		۲۰ ژانویه ۲۰۰۶	۱۵ فوریه ۲۰۰۶	۰۷ مارس ۲۰۰۶
۷	۲۰۱۶-۲۰۱۷	۲۲ ژانویه ۲۰۱۷	۰۱ فوریه ۲۰۱۷	۰۲ فوریه ۲۰۱۷
		۳۱ ژانویه ۲۰۱۷	۱۷ فوریه ۲۰۱۷	۱۷ فوریه ۲۰۱۷
۸	۲۰۱۷-۲۰۱۸	۰۵ فوریه ۲۰۱۸	۱۲ فوریه ۲۰۱۸	۰۱ مارس ۲۰۱۸
		۱۱ فوریه ۲۰۱۸	۲۸ فوریه ۲۰۱۸	۲۰ مارس ۲۰۱۸

جدول ۵. دوره‌های انتخابی برای بررسی تقسیم تاوه قطبی در دوره آماری ۱۹۷۹-۲۰۱۹.

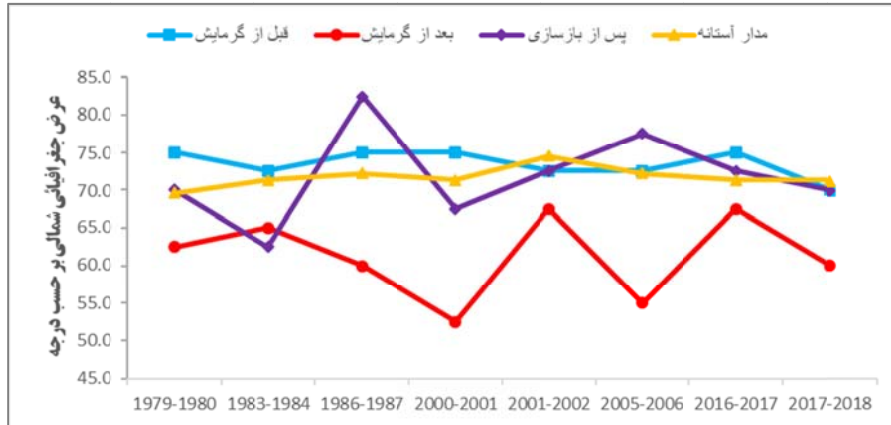
ردیف	سال	دوره قبل از تغییر	دوره بعد از تغییر	دوره بازسازی
۱	۱۹۸۴-۱۹۸۵	۱۷ دسامبر ۱۹۸۴ ۳۱ دسامبر ۱۹۸۴	۰۱ ژانویه ۱۹۸۵ ۰۵ ژانویه ۱۹۸۵	۰۶ ژانویه ۱۹۸۵ ۲۵ ژانویه ۱۹۸۵
۲	۱۹۸۷-۱۹۸۸	۲۷ نوامبر ۱۹۸۷ ۰۷ دسامبر ۱۹۸۷	۰۸ دسامبر ۱۹۸۷ ۱۶ دسامبر ۱۹۸۷	۱۷ دسامبر ۱۹۸۷ ۰۵ ژانویه ۱۹۸۸
۳	۱۹۸۷-۱۹۸۸	۱۳ فوریه ۱۹۸۸ ۱۳ مارس ۱۹۸۸	۱۴ مارس ۱۹۸۸ ۱۶ مارس ۱۹۸۸	۱۷ مارس ۱۹۸۸ ۰۵ آوریل ۱۹۸۸
۴	۱۹۸۸-۱۹۸۹	۰۴ فوریه ۱۹۸۹ ۲۰ فوریه ۱۹۸۹	۲۱ فوریه ۱۹۸۹ ۰۱ مارس ۱۹۸۹	۰۲ مارس ۱۹۸۹ ۲۱ مارس ۱۹۸۹
۵	۱۹۹۸-۱۹۹۹	۲۴ نوامبر ۱۹۹۸ ۱۴ دسامبر ۱۹۹۸	۱۵ دسامبر ۱۹۹۸ ۲۰ دسامبر ۱۹۹۸	۲۱ دسامبر ۱۹۹۸ ۰۹ ژانویه ۱۹۹۹
۶	۱۹۹۸-۱۹۹۹	۱۳ فوریه ۱۹۹۹ ۲۵ فوریه ۱۹۹۹	۲۶ فوریه ۱۹۹۹ ۱۸ مارس ۱۹۹۹	۱۹ مارس ۱۹۹۹ ۰۷ آوریل ۱۹۹۹
۷	۲۰۰۳-۲۰۰۴	۱۱ دسامبر ۲۰۰۳ ۰۴ ژانویه ۲۰۰۴	۰۵ ژانویه ۲۰۰۴ ۱۴ ژانویه ۲۰۰۴	۱۵ ژانویه ۲۰۰۴ ۰۳ فوریه ۲۰۰۴
۸	۲۰۰۸-۲۰۰۹	۰۹ ژانویه ۲۰۰۹ ۲۳ ژانویه ۲۰۰۹	۲۴ ژانویه ۲۰۰۹ ۲۲ فوریه ۲۰۰۹	۲۳ فوریه ۲۰۰۹ ۱۴ مارس ۲۰۰۹
۹	۲۰۰۹-۲۰۱۰	۱۰ ژانویه ۲۰۱۰ ۰۸ فوریه ۲۰۱۰	۰۹ فوریه ۲۰۱۰ ۲۳ فوریه ۲۰۱۰	۲۴ فوریه ۲۰۱۰ ۱۵ مارس ۲۰۱۰
۱۰	۲۰۱۲-۲۰۱۳	۰۱ ژانویه ۲۰۱۳ ۰۵ ژانویه ۲۰۱۳	۰۶ ژانویه ۲۰۱۳ ۲۷ ژانویه ۲۰۱۳	۲۸ ژانویه ۲۰۱۳ ۱۶ فوریه ۲۰۱۳
۱۱	۲۰۱۸-۲۰۱۹	۲۳ دسامبر ۲۰۱۸ ۰۱ ژانویه ۲۰۱۹	۰۲ ژانویه ۲۰۱۹ ۱۸ ژانویه ۲۰۱۹	۱۹ ژانویه ۲۰۱۹ ۰۷ فوریه ۲۰۱۹

جدول ۶ آورده شده است. از شکل ۱ دیده می‌شود که در همه موارد آشکار شده، مرکز تاوه قطبی قبل از گرمایش (رنگ آبی) به سوی جنوب جابه‌جا شده است (رنگ قرمز) و مرکز تاوه پس از جابه‌جایی خیلی پایین‌تر از مدار آستانه (رنگ زرد) قرار گرفته است. پس از بازسازی (رنگ بنفش) مرکز تاوه با جابه‌جایی شمال‌سو، به محدوده قبل از گرمایش نزدیک شده است. در گرمایش ۱۹۸۴-۱۹۸۳، که مرکز تاوه پس از بازسازی مجدداً به سوی جنوب جابه‌جا شده است، زمان بازسازی بیشتر از بیست روز طول کشیده است.

از مقایسه نتایج این جدول‌ها با پژوهش آگی‌یاوا و همکاران (۲۰۱۷)، دیده شد که هفت مورد جابه‌جایی هسته و دو مورد تقسیم هسته تاوه قطبی، در پژوهش حاضر با تعریف ارائه شده برای گرمایش ناگهانی پوشش سپهر، آشکار نشده است. این تفاوت‌ها به سبب در نظر گرفتن تغییرات میانگین مداری دمای تراز ده هکتوپاسکال رخ داده است.

۴-۱. ارتباط گرمایش با جابه‌جایی تاوه قطبی نحوه جابه‌جایی و تغییرات مرکز تاوه قطبی در شکل ۱ و





شکل ۱. تغییرات عرض جغرافیایی مرکز تاوه قطبی قبل از گرمایش (رنگ آبی)، بعد از گرمایش (رنگ قرمز)، بعد از بازسازی (رنگ بنفش) و مدار آستانه (رنگ زرد).

که به ترتیب در موردهای ۲۰۰۱-۲۰۰۲ و ۲۰۰۰-۲۰۰۱ ثبت شده است. همچنین در هر هشت مورد، مرکز تاوه پس از گرمایش، تضعیف شده است که کمترین مقدار تضعیف با ۳۵۹/۴ ژئوپتانسیل متر در مورد ۲۰۱۶-۲۰۱۷ و بیشترین مقدار تضعیف با ۱۵۱۱/۹ ژئوپتانسیل متر در مورد ۲۰۱۷-۲۰۱۸ برآورد شده است. نمونه‌های با بیشترین تغییرات، با جزئیات بیشتری تحلیل شده‌اند.

از جدول ۶ دیده می‌شود که پنج مورد جابه‌جایی مداری به صورت غرب سو و سه مورد نیز شرق سو بوده است. بیشترین جابه‌جایی مداری ۳۷/۵ درجه و کمترین ۷/۵ درجه است که این جابه‌جایی به ترتیب در حالت‌های موردی ۲۰۱۶-۲۰۱۷ و ۲۰۰۵-۲۰۰۶ رخ داده است. در هر هشت مورد، جابه‌جایی نصف‌النهار هسته تاوه جنوب سو است و بیشترین و کمترین جابه‌جایی به ترتیب ۲۲/۵ و ۵/۰ درجه است

جدول ۶. نحوه جابه‌جایی مرکز تاوه قطبی در دوره آماری ۱۹۷۹-۲۰۱۹.

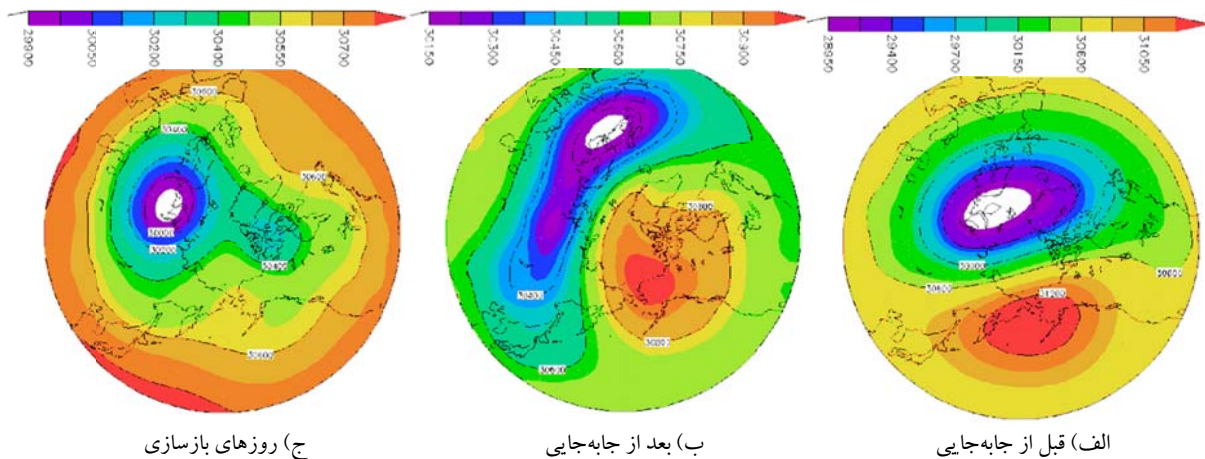
نوع اثر	تغییرات مرکز تاوه		تغییرات نصف‌النهاری		تغییرات مداری		سال	ردیف
	نحوه تغییر	اختلاف ارتفاع (ژئوپتانسیل متر)	نحوه تغییر	اختلاف عرض	نحوه تغییر	اختلاف طول		
جابه‌جایی	تضعیف	۸۰۲/۵	جنوب سو	-۱۲/۵	غرب سو	-۱۵/۰	۱۹۷۹-۱۹۸۰	۱
		۶۳۶/۴		-۷/۵	شرق سو	۱۰/۰	۱۹۸۳-۱۹۸۴	۲
		۱۲۵۲/۹		-۱۵/۰	شرق سو	۳۰/۰	۱۹۸۶-۱۹۸۷	۳
		۱۳۰۹/۴		-۲۲/۵	غرب سو	-۲۵/۰	۲۰۰۰-۲۰۰۱	۴
		۳۸۴/۵		-۵/۰	غرب سو	-۱۵/۰	۲۰۰۱-۲۰۰۲	۵
		۱۱۳۴/۱		-۱۷/۵	شرق سو	۳۷/۵	۲۰۰۵-۲۰۰۶	۶
		۳۵۹/۴		-۷/۵	غرب سو	-۷/۵	۲۰۱۶-۲۰۱۷	۷
		۱۵۱۱/۹		-۱۰/۰	غرب سو	-۲۷/۵	۲۰۱۷-۲۰۱۸	۸

الف) به موقعیت (۴۰/۰ ۵۵/۰) درجه طول جغرافیایی شرقی و عرض جغرافیایی شمالی جابه‌جا شده است (شکل ب) و پس از بیست روز بازسازی (شکل ج)، در محدوده (۱۱۷/۵ ۷۷/۵) قرار گرفته است.

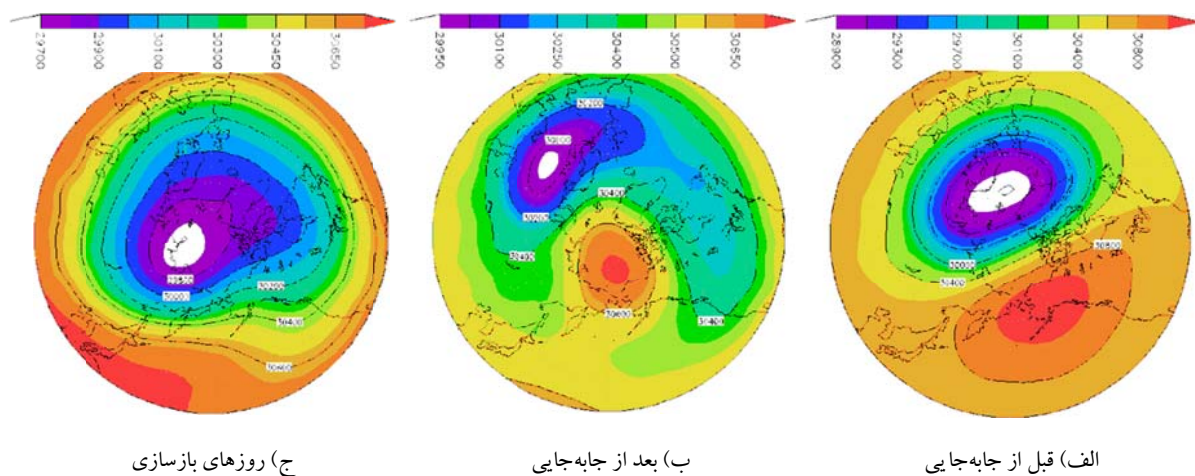
شکل ۴ میانگین ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۱۰ هکتوپاسکال در گرمایش فوریه ۲۰۱۸ که با بیشترین تغییرات مرکز تاوه همراه است را نشان می‌دهد. از این شکل دیده می‌شود که مرکز تاوه قبل از گرمایش (شکل الف) (۲۸۱۸۸/۲ ژئوپتانسیل متر است که بعد از گرمایش (شکل ب) به ۲۹۷۰۰/۱ واحد افزایش یافته است. این مرکز پس از بازسازی (شکل ج) پر شده است و به ۲۹۷۸۳/۵ ژئوپتانسیل متر تغییر کرده است.

شکل ۲ میانگین ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ده هکتوپاسکال در گرمایش فوریه ۲۰۰۱ که دارای بیشترین جابه‌جایی نصف‌النهاری است، را نشان می‌دهد. از این شکل دیده می‌شود که مرکز تاوه از موقعیت (۳۵/۰ ۷۵/۰) (شکل الف) به موقعیت (۱۰/۰ و ۵۲/۵) درجه طول جغرافیایی شرقی و عرض جغرافیایی شمالی جابه‌جا شده است (شکل ب) و پس از بیست روز بازسازی (شکل ج)، در محدوده (۶۲/۵ ۶۷/۵) قرار گرفته است.

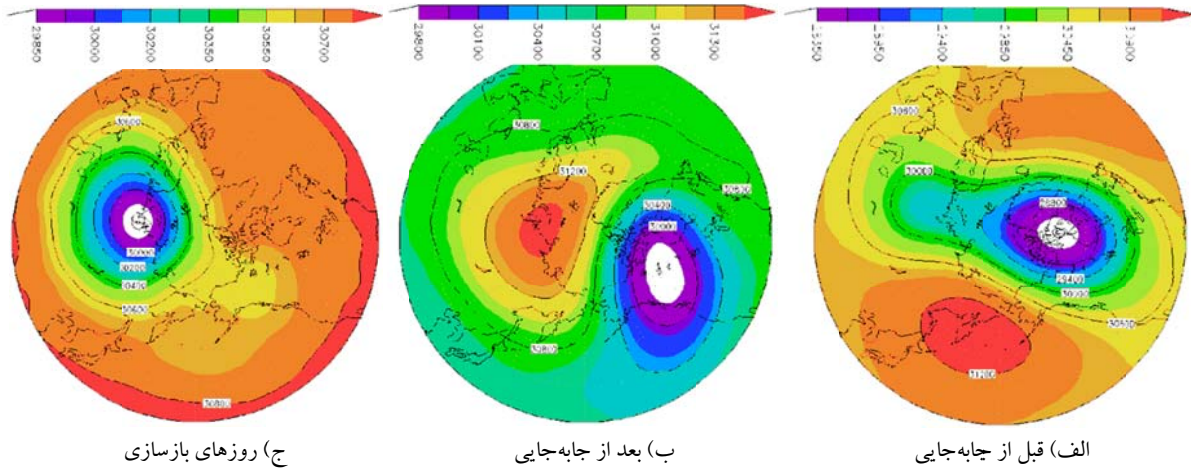
شکل ۳ میانگین ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۱۰ هکتوپاسکال در گرمایش ژانویه ۲۰۰۶ که دارای بیشترین جابه‌جایی مداری است، را نشان می‌دهد. از این شکل دیده می‌شود که مرکز تاوه از موقعیت (۲/۵ ۷۲/۵) (شکل



شکل ۲. میانگین ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۱۰ هکتوپاسکال بر حسب ژئوپتانسیل متر در مورد (۲۰۰۱-۲۰۰۰). الف) روزهای قبل از گرمایش از ۱۸ ژانویه تا ۱۰ فوریه ۲۰۰۱، ب) روزهای بعد از گرمایش از ۱۱ تا ۲۴ فوریه ۲۰۰۱ و ج) روزهای بازسازی از ۲۵ فوریه تا ۱۶ مارس ۲۰۰۱.



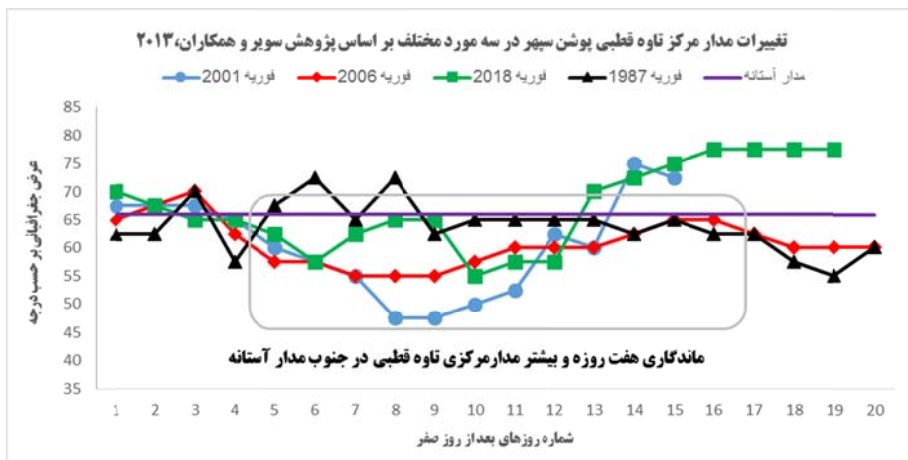
شکل ۳. میانگین ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۱۰ هکتوپاسکال بر حسب ژئوپتانسیل متر در مورد (۲۰۰۶-۲۰۰۵). الف) روزهای قبل از گرمایش از ۲۶ دسامبر ۲۰۰۵ تا ۲۰ ژانویه ۲۰۰۶، ب) روزهای بعد از گرمایش از ۲۱ ژانویه تا ۱۵ فوریه ۲۰۰۶ و ج) روزهای بازسازی از ۱۶ فوریه تا ۰۷ مارس ۲۰۰۶.



شکل ۴. میانگین ارتفاع ژئوتانسیل در تراز ۱۰ هکتوپاسکال بر حسب ژئوتانسیل متر در مورد ۲۰۱۷-۲۰۱۸. الف) روزهای قبل از گرمایش از ۰۵ تا ۱۱ فوریه ۲۰۱۸، ب) روزهای بعد از گرمایش ۱۲ تا ۲۸ فوریه ۲۰۱۸ و ج) روزهای بازسازی از ۰۱ تا ۲۰ مارس ۲۰۱۸.

تعریف سویر و همکاران، مطابقت دارد. شکل ۵ تغییرات مدار مرکز تاوه قطبی در چند مورد مختلف نشان داده شده است. بر اساس تعریف این پژوهشگران برای تعیین جابه‌جایی، مدار آستانه ۶۶ درجه شمالی انتخاب شد و ماندگاری هفت روزه مدار مرکز تاوه در بخش استواسوی این مدار از شرایط آشکارسازی جابه‌جایی در نظر گرفته شد. چهار مورد آشکار شده نیز با نتایج این پژوهشگران هماهنگ نبود. این اختلاف به دلیل محدودیت ماندگاری هفت روزه ظاهر شده است. این موارد در مارس ۱۹۸۰، فوریه ۱۹۸۴، دسامبر ۲۰۰۱ و فوریه ۲۰۱۷ آشکار شده است که دوره بعد از روز صفر این موارد به ترتیب دو، پنج، سه و یک روز طول کشیده است.

این مورد در پژوهش وانگ و همکاران (۲۰۱۹)، از نوع جدایی مرکز تاوه به دو هسته مجزا آورده شده است. در این پژوهش، بر اساس داده‌های ERA-Interim، نشان داده شده است که هسته مادر تاوه قطبی پوشش سپهری در روز دهم فوریه ۲۰۱۸، به دو هسته مجزا تقسیم شده است. این تقسیم با داده‌های NCEP-NCAR نیز قابل تشخیص است ولی بر اساس داده‌های مرکز NASA، علامت میانگین مداری مؤلفه مداری باد در روز دوازدهم فوریه ۲۰۱۸ تغییر کرده است. نتایج به دست آمده از این پژوهش با نتایج حاصل از پژوهش سویر و همکاران (۲۰۱۳)، مقایسه شد. از هشت مورد جابه‌جایی آشکار شده مرکز تاوه، چهار مورد با



شکل ۵. تغییرات عرض جغرافیایی مرکز تاوه قطبی پوشش سپهر بر اساس پژوهش سویر و همکاران (۲۰۱۳) در چهار مورد مختلف. مورد اول ۱۱ تا ۲۴ فوریه ۲۰۰۱ (رنگ آبی)، مورد دوم ۲۱ ژانویه تا ۰۹ فوریه ۲۰۰۶ (رنگ قرمز)، مورد سوم ۱۲ تا ۲۸ فوریه ۲۰۱۸ (رنگ سبز) و مورد چهارم ۲۳ ژانویه تا ۱۱ فوریه ۱۹۸۷ (رنگ مشکی). مدار آستانه با رنگ بنفش مشخص شده است.

## ۴-۲. ارتباط گرمایش با تجزیه هسته تاوه قطبی

نحوه تغییرات مرکز تاوه قطبی در مورد های که هسته تاوه قطبی به طور کامل و یا ناقص به دو هسته تبدیل شده است، در جدول ۷ آورده شده است. در این موارد نیز هسته تاوه ممکن است جابه جا نیز شده باشد. این جابه جایی در این بخش بررسی نمی شود. از این جدول دیده می شود که در سه مورد جدایی هسته به طور کامل انجام شده است و فرزند از طریق ناوه ارتفاع به مادر وابسته است و در هشت مورد یا هسته فرزند از هسته مادر جدا شده است و یا دارای دست کم دو پرند بسته ارتفاع با فاصله صد ژئوتانسیل متر می باشد.

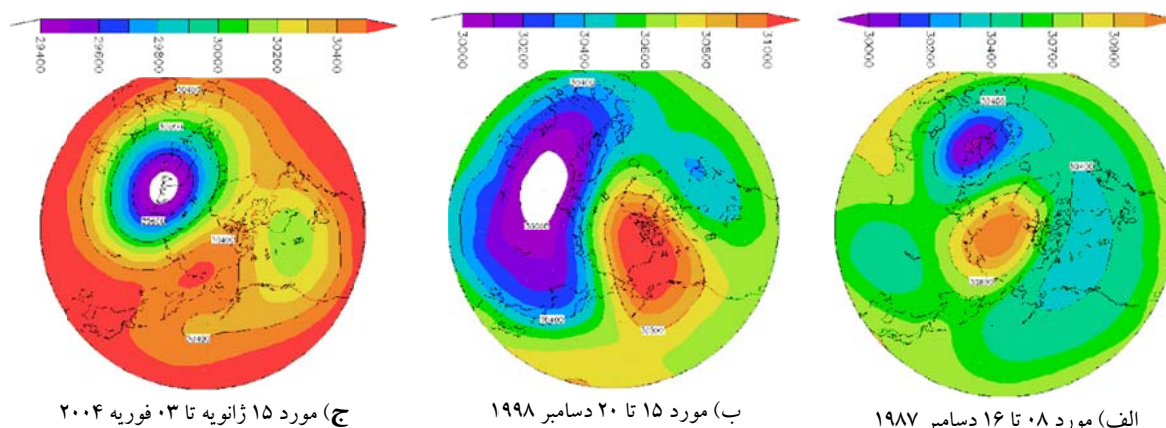
شکل ۶ میانگین ارتفاع ژئوتانسیل در تراز ۱۰

هکتوپاسکال در تقسیم ناقص هسته تاوه قطبی را نشان می دهد. از این شکل دیده می شود که در هر سه مورد نشان داده شده، هسته ثانوی تاوه از هسته مادر جدا نشده است و دارای دو پرند بسته نیز نمی باشد. در مورد اول (شکل ۶-الف)، هسته مادر دارای دو فرزند است که اولی نسبت به دومی گسترش بیشتری دارد. در مورد دوم (شکل ۶-ب)، هسته کوچکی با ناوه به هسته مادر ارتباط دارد. در مورد سوم (شکل ۶-ج)، هسته فرزند در زمان بازسازی تاوه شکل گرفته است.

شایان ذکر است که گرمایش های ۱۹۹۸-۱۲-۱۵ (شکل ۶-ب) و ۲۰۰۴-۰۱-۰۵ (شکل ۶-ج)، در پژوهش آگی یاوا و همکاران (۲۰۱۷)، از نوع جابه جایی تشخیص داده شده است.

جدول ۷. نحوه تغییرات مرکز تاوه قطبی از نوع جدایی هسته تاوه در دوره آماری ۱۹۷۹-۲۰۱۹.

توضیح	نوع جدایی هسته تاوه		سال	ردیف
	کامل	ناقص		
	✓		۱۹۸۴-۱۹۸۵	۱
دارای سه هسته	✓		۱۹۸۷-۱۹۸۸	۲
		✓	۱۹۸۷-۱۹۸۸	۳
		✓	۱۹۸۸-۱۹۸۹	۴
	✓		۱۹۹۸-۱۹۹۹	۵
		✓	۱۹۹۸-۱۹۹۹	۶
تقسیم هسته تاوه در حین بازسازی	✓		۲۰۰۳-۲۰۰۴	۷
		✓	۲۰۰۸-۲۰۰۹	۸
		✓	۲۰۰۹-۲۰۱۰	۹
		✓	۲۰۱۲-۲۰۱۳	۱۰
		✓	۲۰۱۸-۲۰۱۹	۱۱

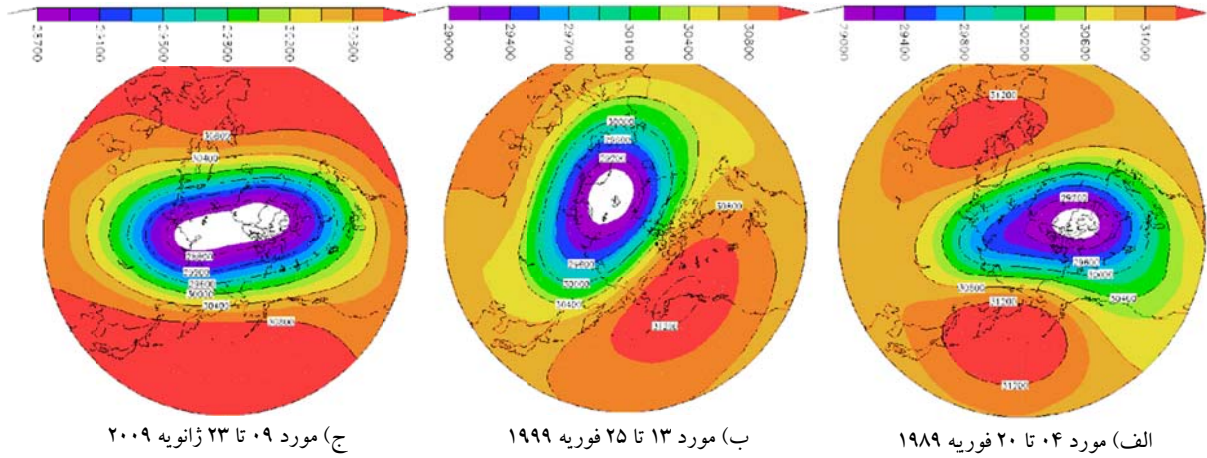


شکل ۶. میانگین ارتفاع ژئوتانسیل در تراز ۱۰ هکتوپاسکال بر حسب ژئوتانسیل متر در هنگام تقسیم ناقص هسته تاوه قطبی. الف) روزهای ۰۸ تا ۱۶ دسامبر ۱۹۸۷، ب) روزهای ۱۵ تا ۲۰ دسامبر ۱۹۹۸ و ج) روزهای ۱۵ ژانویه تا ۰۳ فوریه ۲۰۰۴.

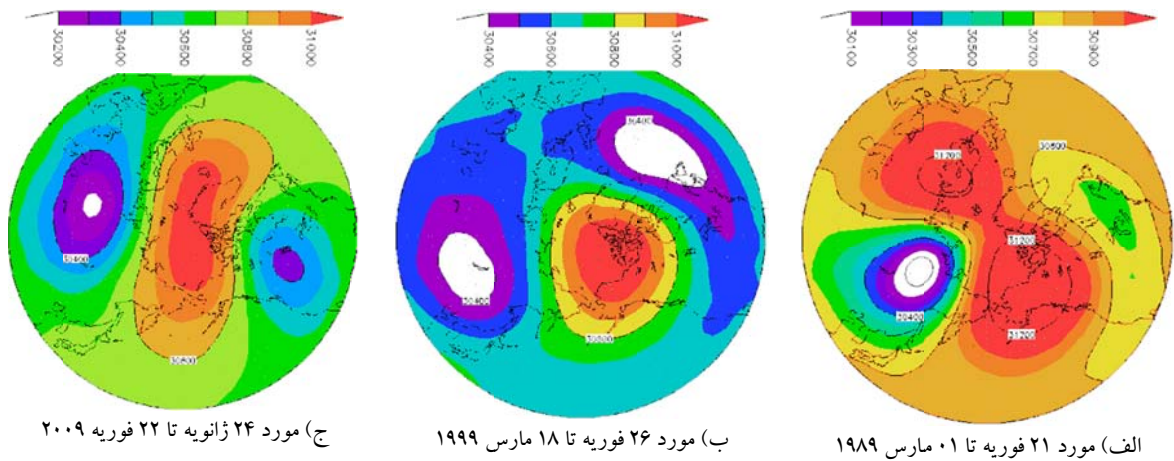
واحدی است. در گرمایش ژانویه ۱۹۸۵ (شکل ۹-الف)، هسته مادر و فرزند قابل تشخیص است. در این مورد هسته ثانوی در روی اروپای شمالی قرار گرفته است. در گرمایش مارس ۱۹۸۸، با وجودی که دو هسته تشکیل شده است ولی موقعیت مادر و فرزند مشخص نیست (شکل ۹-ب). در گرمایش‌های فوریه ۲۰۱۰ و ژانویه ۲۰۱۳ که در شکل‌های ۹-ج و ۹-د نشان داده شده است، دیده می‌شود که هسته مرکز ثانوی نسبت به مادر قوی‌تر است و در هر دو مورد هسته ثانوی در شمال کانادا است ولی هسته مادر در فوریه ۲۰۱۰ در شمال اروپا و در ژانویه ۲۰۱۳ در شمال روسیه قرار گرفته است. در گرمایش ژانویه ۲۰۱۹ (شکل ۹-ه)، هسته فرزند نسبت به هسته مادر ضعیف‌تر است. هسته مادر در اروپای شمالی و هسته فرزند در شمال کانادا جای گرفته‌اند. بررسی‌ها نشان داد که استفاده از تعریف چارلتون و پولوانی (۲۰۰۷) برای آشکارسازی اثر گرمایش ناگهانی پوشن سپهر بر تاوه قطبی مواردی آشکار می‌شود که تاوه قطبی در اثر تغییر علامت میانگین مداری مؤلفه مداری باد ایجاد می‌شود و افزایش قابل توجهی در میانگین مداری دما برآورد نشده است. نمونه‌ای از این موارد در روز ۱۸ ژانویه ۲۰۰۳ رخ داده است. با استفاده از داده‌های مورد استفاه این پژوهش، در روزهای ۱۹ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۰۲، میانگین مداری دما در تراز فشاری ده هکتوپاسکال از  $207/4$  کلون به  $231/9$  کلون افزایش یافته است ولی علامت میانگین مداری مؤلفه مداری در این بازه تغییر نکرده است. در روزهای ۱۱ تا ۱۸ ژانویه ۲۰۰۳، با وجودی که میانگین مداری مؤلفه مداری باد از  $33/8$  متر بر ثانیه به  $2/7$  متر بر ثانیه تغییر کرده است و تغییرات میانگین مداری دما قابل توجه نیست، ولی تاوه قطبی پوشن سپهر در روز ۱۸ ژانویه به دو هسته جدا تبدیل شده است (شکل ۹-و).

شکل‌های ۷ و ۸ میانگین ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۱۰ هکتوپاسکال برای موردهایی که هسته آن به دو سلول مجزا تبدیل شده است را نشان می‌دهد. شکل ۷ موقعیت اولیه تاوه و شکل ۸ موقعیت آن بعد از تشکیل هسته فرزند را نشان می‌دهند. در گرمایش فوریه ۱۹۸۹، دیده می‌شود که قبل از روز صفر، تاوه قطبی توسط دو مرکز پراارتفاع احاطه شده است (شکل ۷-الف) و با تغییر علامت میانگین مداری مؤلفه مداری باد، هسته اصلی تاوه به وسیله این دو مرکز، به دو هسته مجزا تقسیم شده است (شکل ۸-الف). در گرمایش فوریه ۱۹۹۹، هسته تاوه قطبی در کنار یک مرکز پر ارتفاع قرار گرفته است (شکل ۷-ب) و در فاصله روز صفر تا روز مرگ، دو هسته کشیده تاوه قطبی ایجاد شده است (شکل ۸-ب). در این حالت موردی ابتدا گرمایش ناگهانی در بازه ۱۵ تا ۲۰ دسامبر ۱۹۹۸ سبب شده است تا تاوه قطبی به طور ناقص به دو هسته تقسیم شود (شکل ۶-ب) و پس از بازسازی در اواخر دسامبر همان سال، مجدداً در انتهای فوریه ۱۹۹۹ به دو هسته مجزا تبدیل شود. این مورد توسط زوف و همکاران (۲۰۱۹) نیز آشکار شده است. در گرمایش ژانویه ۲۰۰۹، به سبب گستردگی تاوه قطبی و قوی بودن جریان‌های غربی، مراکز پر ارتفاع نتوانسته‌اند توسعه یابند (شکل ۷-ج). با تضعیف جریان‌های غربی و تغییر جهت آن به شرقی، پشته‌های ارتفاع تقویت و گسترش یافته و با تشکیل یک مرکز پر ارتفاع، هسته تاوه را به دو سلول مجزا تقسیم کرده‌اند.

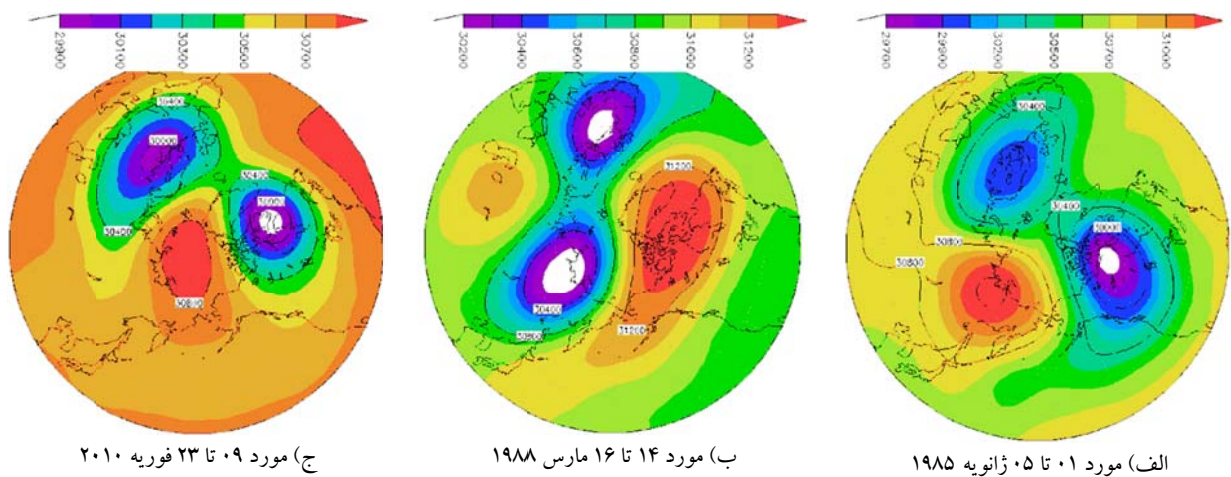
شکل ۹ موردهایی را نشان می‌دهد که در آنها هسته تاوه به دو هسته جدا تبدیل شده است ولی وابستگی هسته فرزند به مادر از طریق ناوه ارتفاعی قطع نشده است. در این موارد هسته ثانوی دست کم دارای دو پربند بسته صد

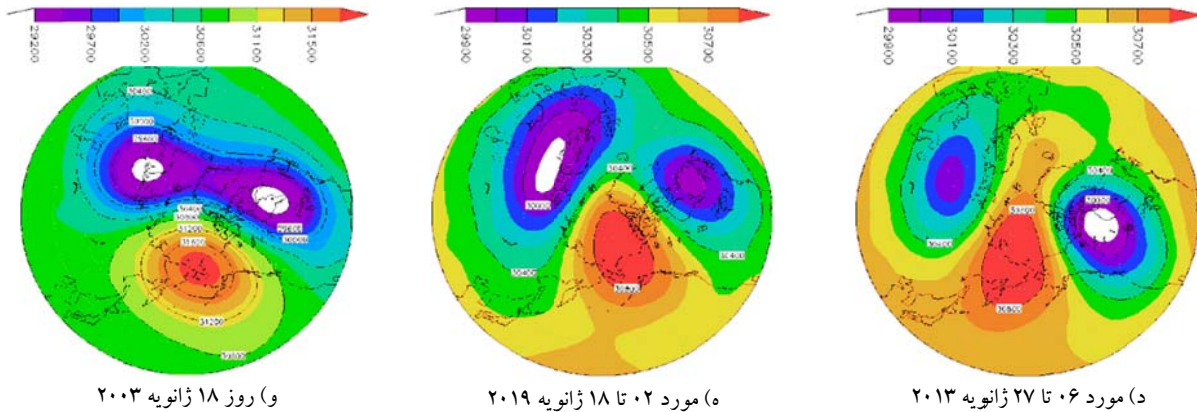


شکل ۷. موقعیت اولیه تاوه قطبی قبل از تقسیم کامل. (الف) روزهای ۰۴ تا ۲۰ فوریه ۱۹۸۹، (ب) روزهای ۱۳ تا ۲۵ فوریه ۱۹۹۹ و (ج) روزهای ۰۹ تا ۲۳ ژانویه ۲۰۰۹.



شکل ۸. موقعیت تاوه قطبی بعد از جدایی هسته فرزند از مادر. (الف) روزهای ۲۱ فوریه تا ۰۱ مارس ۱۹۸۹، (ب) روزهای ۲۶ فوریه تا ۱۸ مارس ۱۹۹۹ و (ج) روزهای ۲۴ ژانویه تا ۲۲ فوریه ۲۰۰۹.

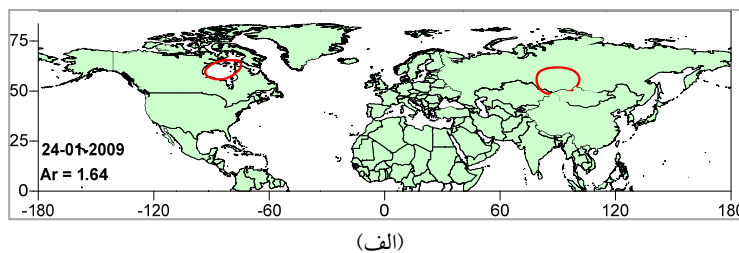




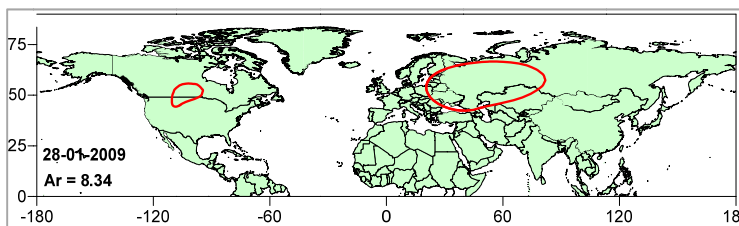
شکل ۹. میانگین ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۱۰ هکتوپاسکال بر حسب ژئوپتانسیل متر برای تقسیم کامل هسته تاوه قطبی از طریق دارا بودن دو پریند بسته ارتفاع. (الف) روزهای ۰۱ تا ۰۵ فوریه ۱۹۸۵، (ب) روزهای ۱۴ تا ۱۶ مارس ۱۹۸۸، (ج) روزهای ۰۹ تا ۲۳ فوریه ۲۰۱۰، (د) روزهای ۰۶ تا ۲۷ ژانویه ۲۰۱۳، (ه) روزهای ۰۲ تا ۱۸ ژانویه ۲۰۱۹ و (و) روز ۱۸ ژانویه ۲۰۰۳.

در مورد ۲۴ ژانویه تا ۲۲ فوریه ۲۰۰۹ که مرکز تاوه به دو هسته مجزا تقسیم شده است، شاخص نسبت ظاهری با تعیین اولین منحنی بسته در هر دو هسته تقسیم شده به طور تقریبی برآورد شد و دیده شد که در روز ۲۴ ژانویه ۲۰۰۹ این شاخص کمتر از ۲/۴ است و در روزهای ۲۵ تا ۳۱ ژانویه بیشتر ۲/۴ می باشد. در شکل ۱۰ مرکز تاوه قطبی بعد از تقسیم در دو روز مختلف مربوط به ژانویه ۲۰۰۹، نشان داده شده است. از شکل الف) دیده می شود که نسبت مساحت دو هسته در روز بیست و چهارم ژانویه حدود ۱/۶۴ و در روز بیست و هشتم این ماه ۸/۳۴ است که در اولی کمتر از مقدار آستانه و در دومی بیشتر از آن می باشد. این مورد با نتایج سویر و همکاران (۲۰۱۳)، مطابقت دارد.

نتایج به دست آمده از این قسمت نیز با نتایج حاصل از پژوهش سویر و همکاران (۲۰۱۳)، مقایسه شد. بر اساس تعریف این پژوهشگران برای تعیین تقسیم تاوه قطبی، از شاخص نسبت ظاهری استفاده شده است. مقدار آستانه این شاخص ۲/۴ تعیین شده است. جابه جایی مطابق این تعریف هنگامی رخ می دهد که این شاخص برای هفت روز و بیشتر از شاخص آستانه بیشتر باشد. سه مورد تقسیم هسته تاوه که در پژوهش حاضر آشکار شده است (موردهای ۱۹۸۴-۱۹۸۵، ۱۹۸۷-۱۹۸۸ و ۱۹۸۸-۱۹۸۹)، و در آنها دوره بعد از روز صفر کمتر از هفت روز است با پژوهش سویر و همکاران (۲۰۱۳)، مطابقت ندارد. این موردها با شرط بیشتر بودن شاخص ظاهری از مقدار آستانه به مدت هفت روز، سازگار نیست.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰. مرکز تاوه قطبی پوشش سپهر بعد از تقسیم هسته در تراز ۱۰ هکتوپاسکال (ژئوپتانسیل متر). الف) ۲۴ ژانویه ۲۰۰۹ و ب) ۲۸ ژانویه ۲۰۰۹.

## ۵. نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از داده‌های بازتحلیلی MERR2، گرمایش ناگهانی پوشش سپهر در طول دوره آماری ۲۰۱۹-۱۹۷۹ بررسی شد و ۱۹ مورد گرمایش نوع اصلی آشکار شد. در بررسی موردهای آشکار شده، برای تعیین جابه‌جایی هسته تاوه، روز تولد، روز صفر و روز مرگ تعریف شد و بر اساس این تعاریف، دوره قبل از جابه‌جایی، دوره بعد از جابه‌جایی و دوره بازسازی در نظر گرفته شد و سپس از تعریف مدار آستانه استفاده شد. برای تقسیم هسته تاوه نیز تقسیم کامل و ناقص تعریف شد.

بر اساس این تعریف‌ها مشاهده شد که در ۴۲ درصد موارد، هسته تاوه قطبی فقط جابه‌جا شده است. بررسی‌ها نشان داد که در موارد جابه‌جایی تاوه، جابه‌جایی جنوب‌سو است و مرکز هسته پس از تغییر تضعیف شده است. گرمایش ناگهانی پوشش سپهر که از طریق افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل سبب تضعیف مرکز تاوه قطبی می‌شود، از طریق جابه‌جایی جنوب سوی آن نیز باعث افزایش گردش چرخندی و در نتیجه تقویت سامانه چرخندی می‌شود. چون مرکز تاوه قطبی پس از جابه‌جایی نسبت به موقعیت اولیه تضعیف شده است، از این رو سهم افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل نسبت به حرکت چرخندی در این موارد بیشتر بوده است.

بررسی موارد آشکار شده، نشان داد که در ۵۸ درصد موارد، هسته تاوه به دو سلول تبدیل شده است. سه مورد از نوع تقسیم ناقص است که در آن هسته ثانوی کمتر از دو پربند بسته ۱۰۰ واحدی دارد و از طریق ناوه ارتفاع به هسته اولیه وابسته است، این سه مورد در تاریخ‌های ۰۸ تا ۱۶ دسامبر ۱۹۸۷، ۱۵ تا ۲۰ دسامبر ۱۹۹۸ و ۱۵ ژانویه تا ۰۳ فوریه ۲۰۰۴ آشکار شده است. مورد اول این نوع، دارای دو هسته ثانوی است، مورد دوم یک فرزند دارد و تشکیل

هسته ثانوی در مورد سوم در دوره بازسازی رخ داده است.

در سه مورد ۲۱ فوریه تا ۰۱ مارس ۱۹۸۹، ۲۶ فوریه تا ۱۸ مارس ۱۹۹۹ و ۲۴ ژانویه تا ۲۲ فوریه ۲۰۰۹، هسته ثانوی از هسته مادر به‌طور کامل جدا شده است. از این سه مورد، تشکیل هسته فرزند در مورد سوم، به بازه زمانی بیشتری نیاز داشته است.

در پنج مورد نیز با وجودی که هسته ثانوی به‌طور کامل شکل گرفته است و بیش از دو پربند بسته ۱۰۰ واحدی دارند، ولی از طریق ناوه ارتفاع به هسته مادر وابسته هستند. در مورد ۰۱ تا ۰۵ ژانویه ۱۹۸۵، هسته مادر و فرزند قابل تشخیص نیستند. در مورد ۱۴ تا ۱۶ مارس ۱۹۸۸، نمی‌توان هسته اولیه و ثانویه را از هم جدا کرد. در موردهای ۰۹ تا ۲۳ فوریه ۲۰۱۰ و ۰۶ تا ۲۷ ژانویه ۲۰۱۳، هسته فرزند نسبت به هسته مادر قوی‌تر است. در مورد ۰۲ تا ۱۸ ژانویه ۲۰۱۹ هسته مادر نسبت به فرزند قوی‌تر می‌باشد.

## مراجع

ریوندی، ا.، محمدی‌ها، ا. و تقی زاده، ا.، ۱۳۹۳، تفسیر سرمای شدید زمستانی شرق ایران با استفاده از مؤلفه‌های استراتوسفری. شانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران.

کریمی، خ.، قادر، س. و موسوی، س. و.، ۱۳۹۷، شناسایی حالت‌های بازتاب، جذب و انتشار امواج راسبی انتشار یابنده بالاسو، م. ژئوفیزیک ایران، ۱۲(۲)، ۳۷-۲۳.

میررکنی، م.، محب‌الحجه، ع. ر. و احمدی گیوی، ف.، ۱۳۹۲، نقش گردش‌های پوشش سپهر در بی‌هنجاری‌های اقلیمی زمستان‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۸۸، م. ژئوفیزیک ایران، ۷(۱)، ۱۰۴-۸۶.

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

Butler, A. H. and Gerber, E. P., 2018, Optimizing the definition of a sudden stratospheric warming, J. Climate, 31, 2337-2344, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0648.1>, 2018.

Butler, A. H., Seidel, D. J., Hardiman, S. C.,



- Butchart, N., Birner, T. and Match, A., 2015, Defining sudden stratospheric warmings, *Meteor. Soc.*, 96, 1913–1928, <https://doi.org/10.1175/bams-d-13-00173.1>, 2015.
- Butler, A. H., Sjoberg, J. P., Seidel, D. J. and Rosenlof, K. H., 2017, A sudden stratospheric warming compendium, *Earth Syst. Sci. Data*, 9, 63–76, <https://doi.org/10.5194/essd-9-63-2017>, 2017.
- Charlton, A. J. and Polvani, L., 2007, A new look at stratospheric sudden warmings. Part I. Climatology and modeling benchmarks, *Journal of climate*, 20, 449–469.
- Choy, H., Kim, B. M. and Choy, W., 2019, Type classification of sudden stratospheric warming based on pre- and postwarming periods, *Journal of climate*, 32, 2349–2367. doi: 10.1175/JCLI-D-18-0223.1.
- Cohen, J., and Jones, J., 2011, Tropospheric precursors and stratospheric warmings, *Journal of climate*, 24, 1780–1790, doi:10.1029/2008JD010623.
- Coy, L. and Pawson, S., 2019, The major stratospheric sudden warming of january 2013, Analyses and forecasts in the GEOS-5 data assimilation system. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20140012679> 2019-12-07T17:27:26+00:00Z
- Hengde, Z., Shouting, G. and Weisong, L., 2007, Study on two categories of sudden stratospheric Warming. *ACTA METEOROLOGICA SINICA*, 21, 450–464.
- Kim, J., Son, S., W., Gerber, E.P. and Park, H.S., 2017, Defining sudden stratospheric warming in climate models: Accounting for biases in model climatologies. *Journal of climate*, 30, 5529–5546. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0465.1.
- Kodera, K., 2006, Influence of stratospheric sudden warming on the equatorial troposphere, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L06804, doi:10.1029/2005GL024510, 2006.
- Kuttippurath, J. and Nikulin, G., 2012, A comparative study of the major sudden stratospheric warming's in the Arctic winters 2003/2004–2009/2010, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 8115–8129.
- McInturff, R. M., 1978, Stratospheric warmings: Synoptic, dynamic and general-circulation aspects (Tech. Rep. No. 541, Ref. Publ. 1017), Suitland, Md. (available online at <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19780010687.pdf>).
- Nakagawa, K. I. and Yamazaki, K., 2006, What kind of stratospheric sudden warming propagates to the troposphere?, *Geophys. Res. Lett.*, 33, 1–13, L04801.
- Nath, D., Chen, W., Zelin, C., Pogoreltsev, A. I. and Wei, K., 2016, Dynamics of 2013 sudden stratospheric warming event and its impact on cold weather over Eurasia: Role of planetary wave reflection, *Sci Rep* 6, 24174 (2016).
- Palmeiro, F. M., Barriopedro, D., García-Herrera, R. and Calvo, N., 2015, Comparing Sudden Stratospheric Warming Definitions in Re-analysis Data, *J. Climate*, 28, 6823–6840.
- Peters, D.H.W., Vargin, P., Gabriel, A., tesvetkova, N. and Yushkov, V., 2010, Tropospheric forcing of the boreal polar vortex splitting in January 2003, *Ann. Geophys.*, 28, 2133–2148.
- 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, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 123, 13332–13345, <https://doi.org/10.1029/2018JD028908>, 2018.
- Rao, J., Ren, R. C., Chen, H., Liu, X., Yu, Y. and Yang, Y., 2019, Sub seasonal to seasonal hind casts of stratospheric sudden warming by BCC\_CSM1.1(m): A comparison with ECMWF, *Adv. Atmos. Sci.*, 36, 479–494, <https://doi.org/10.1007/s00376-018-8165-8>, 2019.
- Seviour, W. J. M., Mitchell, D. M. and Gray, L. J., 2013, A practical method to identify displaced and split stratospheric polar vortex events, *Geophysical research letters*, Vol. 40, 5268–5273, doi:10.1002/grl.50927, 2013.
- Vargin, P. N. and Kiryushov, B. M., 2019, Major Sudden Stratospheric Warming in the Arctic in February 2018 and Its Impacts on the Troposphere, Mesosphere, and Ozone Layer. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2019, 44(2), 112–123.
- Wang, Y., Shulgal, V., Milinevsky, G., Patoka, A., Evtushevsky, O., Klekociuk, A., Han, W., Grytsai, A., Shulga, D., Myshenko, V. and Antsyfeyev, O., 2019, Winter 2018 major sudden stratospheric warming impact on midlatitude mesosphere from microwave radiometer measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 10303–10317, 2019, <https://doi.org/10.5194/acp-19-10303-2019>
- WMO CAS, 1978, Abridged final report of the seventh session, Manila, 27 February–10 March 1978. Secretariat of the WMO Rep. WMO-509, 113 pp, [http://library.wmo.int/pmb\\_ged/wmo\\_509\\_en.pdf](http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_509_en.pdf).
- Yamazaki, Y., Matthias, V., Miyoshi, Y., Stolle, C., Siddiqui, T., Kervalishvili, G., Lastovicka, J., Kozubek, M., Ward, W., Themens, D. R., Kirstoffersen, S. and Alken, P., 2019, September 2019 Antarctic sudden stratospheric warming: quasi-6-day wave burst and ionospheric effects. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123(5),

4094–4109.

Yamazaki, Y. and Matthias, V., 2019, Large-amplitude quasi-10-day waves in the middle atmosphere during final warmings, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(17-18), 9874-9892.

Zuev, V. V. and Savelieva, E. S., 2019, Sudden stratospheric warming effects during the winter 1998/1999, *Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 112086F (18 December 2019); <https://doi.org/10.1117/12.2535586>.

## Evolution of polar stratospheric vortex during major sudden stratospheric warming in 1979-2019

Moradi, M.\*

*Associate Professor, Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran*

*(Received: 4 July 2020, Accepted: 29 Sep 2020)*

### Summary

A major sudden stratospheric warmings (SSWs) represent large-scale perturbations of the polar winter stratosphere, which substantively influence the temperature and circulation of the middle atmosphere and contents of atmospheric species. There are two types of sudden stratospheric warmings: minor warmings and major warmings. In a minor (major) warming the temperature gradient reverses over a range of altitude at or below 010hPa and zonal wind at 010hPa weakens but does not change its direction (reverse direction). Moreover, SSWs have been classified into vortex displacement events and vortex splitting events based on the shape and continuity of the polar vortex.

When a major sudden stratospheric warmings events occur, the zonal mean temperature at 10hPa around the polar cap for latitudes north of 60°N suddenly rises and increases by the 25K over period of several days and zonal-mean zonal wind reverses at 10hPa and 60°N during winter from November to March. In this paper, we consider just the major sudden stratospheric warming effect with displacement or split of the polar vortex toward mid latitudes in 1979-2019.

We have used the daily mean data from the MERRA2 assimilated data and NCEP-NCAR reanalysis data. From the MERRA2 data, zonal mean zonal wind and zonal mean temperature were obtained at 010hPa from 01 January 1979 to 04 June 2020. The temperature is averaged around the polar cap for latitudes north of 60°N and zonal wind is averaged for 60°N. From the NCEP-NCAR data, geopotential height is presented by a horizontal resolution of 2.5° × 2.5° at 10hPa from 1 January 1949 to 31 December 2019.

We first examined the time evolution of zonally averaged temperature and zonal wind at 60°N and 010hPa to identify the warmings onset day, zero day and decay day for the trace of SSWs and its relation with displacement or splitting of the polar vortex. Then we determined three periods: before and after the zero day and the time of recovery for warming event. Also we determined the threshold center latitude for investigating the polar vortex in 1949-2019. Finally, we determine the most probable directions of the polar stratospheric vortex displacement or splitting as a result of major SSWs.

Investigation of the zonal mean temperature and zonal-mean zonal wind at 10hPa detected 19 and 13 major and minor SSWs events respectively. From the total number of major SSWs (19), 11(58%) were classified as warmings with splitting of the stratospheric vortex and 8(44%) as warmings with displacement of the vortex. The mentioned 8 cases show that the polar vortex is displaced to the south and weakened after shifting and the other 11 cases show that the polar vortex is split into two cells. Of these 11 cases, 8 cases are of the complete splitting type and 3 cases are of the incomplete splitting type.

The SSWs events of 11 February 2001 (displacement type), 8 December 1987, 15 December 1998, 15 January 2004 (incomplete split type), 21 February 1989, 26 February 1999 and 24 January 2009 (complete split type) were selected to represent displacement, incomplete split and complete split type, respectively. During vortex displacements the polar vortex is shifted off the pole and during vortex splits the polar vortex is split into two pieces of comparable size.

**Keywords:** Major sudden stratospheric warming, Polar stratospheric vortex, Displacement, Complete split type, Incomplete split type.

\* Corresponding author:

moradim36@gmail.com