

## اثر چرخه خورشیدی بر پوشش سپهر و مدوله‌سازی آن با نوسان شبه‌دوسالانه

مطهره صمداللهی<sup>۱</sup>، علیرضا محب‌الحجه<sup>۲</sup>، محمد میرزائی<sup>۳\*</sup> و محمد جغتایی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استاد، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۴</sup> استادیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۴)

### چکیده

برای شناسایی دینامیک پوشش سپهر، آشکارسازی اثرات چرخه ۱۱ ساله خورشیدی بر آن و نحوه وابستگی این اثرات به نوسان شبه‌دوسالانه (QBO) حائز اهمیت است. برای آشکارسازی اثرات، از داده‌های بازتحلیل JRA-55 با تفکیک  $1/25^\circ$  در دو راستای مداری و نصف‌النهاری در بازه زمانی ۱۹۵۸ تا ۲۰۱۷ استفاده شده است. با کمک داده‌های شار خورشیدی طول موج  $10/7$  سانتی‌متر ( $F_{10.7}$ ) و بگاه دانشگاه کلرادو (LISIRD)، فازهای متناظر با بی‌هنجاری‌های مثبت و منفی  $F_{10.7}$ ، با نام‌های به‌ترتیب HS و LS، محاسبه شد. همچنین برای QBO، فازهای غربی (WQBO) و شرقی (EQBO) با استفاده از داده‌های هواشناسی دانشگاه برلین (FUB) در ماه ژوئیه، اوایل زمستان (نوامبر و دسامبر) و اواخر زمستان (ژانویه، فوریه و مارس) تعیین شد. سپس، بر مبنای میانگین ماهانه دما، ارتفاع ژئوپتانسیلی و تاوایی پتانسیلی (PV) در تراز ۳۰ hPa، همبستگی آنها با  $F_{10.7}$  برای فازهای QBO محاسبه و همراه با اختلاف دما و ارتفاع ژئوپتانسیلی بین فازهای HS و LS تحلیل شد. نتایج نشان داد بیشینه همبستگی دما و ارتفاع ژئوپتانسیلی با  $F_{10.7}$  برای ماه ژوئیه در منطقه جنب‌حاره منطبق بر بیشینه دریافت شار خورشیدی است. این همبستگی‌ها در مجموعه سال‌های EQBO، بزرگ‌تر و گسترده‌تر از مجموعه تمام سال‌ها و مجموعه WQBO هستند. در عین کوچکی مقادیر همبستگی PV با  $F_{10.7}$  برای ماه ژوئیه، الگوی مشخصی برای تغییرات آنها طی فازهای QBO مشاهده نشد. برای اوایل و اواخر زمستان، همبستگی دما و ارتفاع ژئوپتانسیلی با  $F_{10.7}$  در تمام سال‌ها و WQBO کوچک است اما برای EQBO همبستگی مقدار به‌نسبت بزرگی دارد و بیشینه آن در مناطق حاره هر دو نیمکره دیده می‌شود. این همبستگی برای PV در مناطق زیادی از دو نیمکره گسترده شده و مقادیر آن در EQBO از WQBO قوی‌تر است. همچنین اختلاف دما و ارتفاع ژئوپتانسیلی بین HS و LS برای WQBO در نیمکره جنوبی بیشینه است اما در EQBO الگوی همبستگی گسترده‌تری در مناطق جنب‌حاره دو نیمکره وجود دارد.

**واژگان کلیدی:** ارتفاع ژئوپتانسیلی، تاوایی پتانسیلی، دما، شار خورشیدی، نوسان شبه‌دوسالانه

## ۱ مقدمه

یکی از پدیده‌های مهم پوشش سپهر نوسان شبه‌دوسالانه (QBO) است. رویداد این پدیده به نسبت منظم، همیشگی و دارای میانگین دوره تناوب ۲۸ الی ۲۹ ماه است. پدیده QBO با شاخص باد مداری در پوشش سپهر بین ۱۰۰ و ۱۰ هکتوپاسکال اندازه‌گیری می‌شود (سوین‌بنک و همکاران، ۱۹۹۸). هنگام رخداد QBO، کمربندهایی از بادهای غربی و شرقی با یکدیگر جایگزین می‌شوند که در راستای قائم و پایین سو از پوشش سپهر میانی تا پوشش سپهر زیرین انتشار می‌یابند (بالدوین و دانکرتون، ۱۹۹۸). QBO دارای دو فاز غربی (WQBO) و شرقی (EQBO) است که در پوشش سپهر حاره‌ای طی WQBO و EQBO به ترتیب بادهای غربی و شرقی برقرار است. یک چرخه کامل این نوسان حدود ۲۷ ماه به طول می‌انجامد (بریجمن و اولیور، ۲۰۰۶) و در این مدت به تدریج هر کدام از این فازها جایگزین فاز دیگر می‌شود. این نوسان از طریق برهمکنش طیفی از امواج منطقه حاره‌ای با جریان میانگین ایجاد می‌شود. در ابتدا تصور می‌شد تنها امواج کلونین و راسبی-گرانی در ایجاد این نوسان نقش دارند، ولی به تدریج مشخص شد که برای رخداد QBO، با توجه به گردش پروتر-دابسون و جریان بالارو همبسته با آن در پوشش سپهر منطقه حاره با سرعت حدود یک کیلومتر بر ماه، به شار تکانه اضافی دیگری ناشی از طیفی از امواج گرانی نیاز است (دانکرتون و بالدوین، ۱۹۹۱؛ مک‌اینتایر و دانکرتون، ۱۹۹۴؛ دانکرتون، ۱۹۹۷).

منبع اولیه انرژی برای جو زمین، خورشید است. تغییرات میزان انرژی خروجی از خورشید و یا نوسانات دمایی سطح آن، می‌تواند از طریق تغییر در شار تابشی دریافتی در بام جو و نیز بارش الکترون‌های پرنرژی (سپالا و کلایل‌ورد، ۲۰۱۴؛ سلمین و همکاران، ۲۰۲۰؛ تارتاگ‌لیونه و همکاران، ۲۰۲۰؛ سلاگ و همکاران، ۲۰۲۲) نوسانات و تغییراتی را در جو زمین ایجاد کند (مارسدن و لینگفلتر، ۲۰۰۳). فعالیت خورشیدی بر حسب تابش از سطح آن

عمدتاً با چرخه ۱۱ ساله معروف به چرخه خورشیدی (SC) افزایش و کاهش می‌یابد که از بسیاری جهات بر زندگی در زمین تأثیر می‌گذارد. مشاهدات نشان می‌دهد که تغییرات منظمی در مناطق فعال خورشیدی با دوره تناوب ۱۱ ساله وجود دارد (ون‌لون و لایبتزک، ۲۰۰۰). شار تابش خورشیدی در طول موج  $10/7 \text{ cm}$  به خوبی چرخه ۱۱ ساله خورشید را آشکار می‌کند (سیمپسون، ۲۰۰۹). بی‌هنجاری مثبت (منفی) شار تابش خورشیدی نسبت به میانگین بلندمدت آن نشان‌دهنده فعالیت زیاد (کم) خورشیدی است که در اینجا با اختصار HS برای High Solar (LS) برای Low Solar نشان داده می‌شود. مطالعات پیشین حاکی از آن بوده که اثر سیگنال خورشیدی با دسته‌بندی بر حسب فازهای QBO در داده‌های اقلیمی بهتر آشکار می‌شود. از طرف دیگر، نتایج مطالعه بکوروکوف و همکاران (۱۹۹۴) نشان داد دامنه سیگنال QBO در دمای پوشش سپهر در HS بیشتر از LS است و بنابراین، در بررسی اثرات برون‌حاره‌ای QBO در داده‌های اقلیمی، در نظر گرفتن مدوله‌سازی اثر QBO با چرخه خورشیدی نیز لازم است (لایبتزک، ۲۰۰۳). به کمک آزمون‌های انجام شده با مدل‌های گردش کلی جو، پاسخ منطقه‌ای به چرخه خورشیدی ۱۱ ساله با استفاده از تغییرات گرمایش تابشی همبسته با ازون تأیید شده است (لارکین و همکاران، ۲۰۰۰). هیگ (۱۹۹۹) یک ساختار نواری شکل قائم برای باد و دما در نتایج شبیه‌سازی با مدل گردش کلی در ژانویه یافت. همچنین هود (۲۰۰۴) در مطالعه‌ای مشاهداتی نشان داد که سیگنال دمایی همبسته با چرخه خورشیدی در مناطق استوایی پوشش سپهر دارای الگوی سه‌یاخته‌ای در تغییرات با ارتفاع است. مطالعه لایبتزک و همکاران (۲۰۰۲) حاکی از اختلاف دما بین HS و LS در پوشش سپهر زیرین و بستگی سیگنال خورشیدی در پوشش سپهر زیرین قطبی به فاز QBO است. در زمستان و در فاز WQBO (EQBO)، همبستگی مثبت (منفی) بین سیگنال خورشیدی و دمای قطب شمال وجود دارد. این همبستگی‌ها نتیجه گرم‌شدن عمده بیشتر اواسط زمستان در

به آشکارسازی اثرات چرخه خورشیدی بر پوشش سپهر دارد تا زمینه برای بررسی اثرات وردسپهری در آینده فراهم شود.

بدین ترتیب ساختار مقاله حاضر به این صورت است که در بخش دوم داده‌ها و روش انجام پژوهش بیان می‌شود. سپس، نتایج همبستگی با شار خورشیدی برای دما، ارتفاع ژئوپتانسیلی و تاوایی پتانسیلی (PV) در پوشش سپهر و نیز اختلاف دما و ارتفاع ژئوپتانسیلی بین HS و LS برای همه سال‌ها و فازهای مختلف QBO طی دوره مطالعاتی در بخش سوم ارائه می‌شود و در نهایت نیز جمع‌بندی نتایج در بخش چهارم آورده شده است.

## ۲ داده‌ها و روش انجام کار

در پژوهش حاضر و در ادامه مطالعه لایبترک (۲۰۰۳)، برای بررسی دقیق‌تر تغییرات ناشی از چرخه خورشیدی بر پوشش سپهر و مدوله‌سازی آن با QBO، دوره اقلیم‌شناختی مورد مطالعه به ۶۰ سال (۱۹۵۸ تا ۲۰۱۷) بسط داده شده و به‌علاوه از مجموعه داده بازتحلیل ژاپن با روش‌های نوین داده‌گواری استفاده می‌شود. مقایسه میدان‌ها برای سه دوره در طی فصل‌های نیمکره شمالی انجام شده است: ماه ژوئیه که طی آن پوشش سپهر در نیمکره شمالی دستخوش تغییرات ناشی از انتشار قائم امواج راسبی نیست؛ اوایل (نوامبر و دسامبر) و اواخر زمستان (ژانویه، فوریه و مارس) که طی آن تاوه قطبی در نیمکره شمالی فعال است. علاوه بر بررسی دو کمیت دما و ارتفاع ژئوپتانسیلی، همچنین با محاسبه همبستگی PV با شار تابش خورشیدی دید بهتری از نقش هر یک از این عوامل نسبت به مطالعات پیشین فراهم می‌شود.

داده‌های بازتحلیل ژاپن مربوط به پروژه ۵۵ ساله (JRA-55) آژانس هواشناسی ژاپن با تفکیک افقی  $1/25 \times 1/25$  درجه در دو راستای مداری و نصف‌النهاری برای دوره مطالعاتی ۱۹۵۸ تا ۲۰۱۷ شامل میدان‌های سرعت، دما و

طول WQBO/HS و گرمایش عمده کمتر اواسط زمستان در طول EQBO/HS است (ون لون و لایبترک، ۲۰۰۰).

چرخه ۱۱ ساله خورشیدی می‌تواند مستقیماً با حضور یک بی‌هنجاری باد ۱۱ ساله در وردسپهر زیرین جنب‌حاره (گری و همکاران، ۲۰۰۴) یا به طور غیرمستقیم با تغییر QBO استوایی، بسامد رخداد گرمایش ناگهانی پوشش سپهر را تحت تأثیر قرار دهد (پاسکو و همکاران، ۲۰۰۵). بنابر نتایج لایبترک (۲۰۰۳)، همبستگی دما با شار خورشیدی تقریباً در کل نیمکره شمالی (تابستان) مثبت، در مناطق استوایی و هر دو منطقه قطبی ضعیف، و در عرض‌های میانه نیمکره جنوبی منفی است. با این حال، الگو و اندازه همبستگی‌ها در فازهای مختلف QBO کاملاً متفاوت است.

بررسی اثر چرخه خورشیدی بر پوشش سپهر، گردش برون‌حاره‌ای و مدوله‌سازی آن با QBO (برای مثال، لایبترک، ۲۰۰۳؛ پاسکو و همکاران، ۲۰۰۵؛ لو و همکاران، ۲۰۰۹) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این راستا، لایبترک (۲۰۰۳) ارتباط کمیت‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی و دما با چرخه خورشیدی و تأثیرپذیری آن از QBO را برای دوره ۳۵ ساله (۱۹۶۸ تا ۲۰۰۲) نشان داد. در مورد اثرات وردسپهری QBO می‌توان به کار اسبقی و همکاران (۲۰۱۷) اشاره کرد که در آن اثر بارزی از QBO بر میانگین انرژی جنبشی پیچکی در ستون قائم و عوامل تغییردهنده آن نشان داده شده است. اسمعیلی و همکاران (۲۰۲۲) با کاربست دیدگاه فعالیت موج به بررسی اثرات QBO بر انتشار موج راسبی در وردسپهر زیرین پرداختند و نتایجی گاه متمایز از کار اسبقی و همکاران (۲۰۱۷) به‌دست آوردند. برای نمونه، برحسب فعالیت موج راسبی و در طی فصل زمستان، مسیر توفان مدیترانه در وردسپهر زیرین در فاز شرقی QBO قوی‌تر است که با رفتار میانگین قائم انرژی جنبشی پیچکی متفاوت است. با هدف نهایی تعمیم دو کار اخیر با وارد کردن چرخه خورشیدی به مجموعه عوامل کم‌بسامد شکل‌دهنده وضع هوا، پژوهش حاضر اختصاص

[berlin.de/en/met/ag/strat/produkte/qbo/index.htm](http://berlin.de/en/met/ag/strat/produkte/qbo/index.htm)

استفاده شده است. روش تعیین فازهای QBO به این صورت است که اگر علامت میانگین مداری باد مداری تراز ۵۰ هکتوپاسکال در دو ماه اول زمستان و یا در سه ماه آخر آن هم‌زمان مثبت باشد آن دسته در آن سال در فاز غربی یا WQBO و اگر هم‌زمان باهم منفی باشد آن دسته در فاز شرقی یا EQBO واقع است. ولی هنگامی که بین ماه‌های هر دسته اختلاف علامت وجود داشته باشد، دوره گذار در نظر گرفته می‌شود. براین اساس و در این پژوهش، تعداد سال‌های WQBO برای اوایل (اواخر) زمستان، ۳۵ (۳۷) و تعداد سال‌های EQBO برای اوایل (اواخر) زمستان، ۲۳ (۲۰) به دست آمد. همچنین سال ۱۹۹۲ در اوایل زمستان و سال‌های ۱۹۹۹، ۲۰۰۲ و ۲۰۱۰ در اواخر زمستان سال‌های گذار فاز تشخیص داده شدند. به همین ترتیب، برای ماه ژوئیه از سال ۱۹۵۸ تا ۲۰۱۷ تعداد سال‌های WQBO و EQBO به ترتیب ۳۱ و ۲۹ به دست آمد.

## ۲-۲ تعیین فازهای شارخوردی

به عنوان معیاری از چرخه یازده ساله خورشیدی از مقادیر متوسط ماهانه شار خورشیدی در طول موج ۱۰/۷ سانتی‌متر ( $F_{10.7}$ ) با واحد  $10^{-22} \text{Wm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$  استفاده شده که داده‌های آن به صورت روزانه در وبگاه دانشگاه کلرادو ([lisird.lasp.colorado.edu/lisird/](http://lisird.lasp.colorado.edu/lisird/)) موجود است. با استخراج داده‌های  $F_{10.7}$  به صورت روزانه، برای ماه‌های موردنظر میانگین ماهانه گرفته شد. بی‌هنجاری مثبت نشان‌دهنده فعالیت بیشتر از نرمال خورشیدی (HS) و بی‌هنجاری منفی نشان‌دهنده فعالیت کمتر از نرمال خورشیدی (LS) است. برای دوره مطالعاتی، تعداد سال‌های HS (LS) برای اوایل زمستان، اواخر زمستان و ماه ژوئیه به ترتیب ۲۵ (۳۵)، ۲۳ (۳۷) و ۲۴ (۳۶) است. با تعیین سال‌های دو فاز خورشیدی HS و LS، اختلاف کمیت‌های هواشناختی در تراز ۳۰ hPa بین HS و LS برای اوایل و

ارتفاع ژئوپتانسیلی در ساعت UTC ۰۰ استفاده شده و بر مبنای آنها PV بر روی تراز فشاری تراز ۳۰ hPa تعیین شده است. میانگین ماهانه PV، دما و ارتفاع ژئوپتانسیلی برای ماه ژوئیه، ماه‌های نوامبر و دسامبر به منزله اوایل زمستان و ماه‌های ژانویه، فوریه و دسامبر به منزله اواخر زمستان، طی دوره مورد مطالعه در تراز ۳۰ hPa محاسبه شده است. این محاسبات برای کل سال‌های مورد مطالعه و به‌طور جداگانه برای فازهای مختلف QBO و چرخه خورشیدی انجام شده است. محاسبه PV با رابطه (هولتون و حکیم، ۲۰۱۳):

$$PV = \frac{1}{\rho} \xi_a \cdot \nabla \theta \quad (1)$$

در شکل آب‌ایستایی آن (هاسکینز و همکاران، ۱۹۸۵):

$$PV = -g \left\{ \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)_p + f - \frac{\partial p}{\partial \theta} \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial p} - \frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial p} \right) \right\} \frac{\partial \theta}{\partial p} \quad (2)$$

انجام گرفته که در اینجا  $\rho$  چگالی،  $\xi_a$  تاوایی مطلق،  $\theta$  دمای پتانسیلی،  $g$  شتاب گرانی،  $u$  و  $v$  به ترتیب مولفه‌های مداری و نصف‌النهاری سرعت،  $p$  فشار،  $f$  پارامتر کوریولیس است و PV با واحد  $\text{PVU} = 10^{-6} \text{Kkg}^{-1} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$  بیان می‌شود.

## ۱-۲ تعیین فازهای QBO

برای بررسی پدیده QBO، میانگین متغیرهای هر گروه زمانی نماینده کمی خصوصیات آن گروه در نظر گرفته می‌شود و به همه ماه‌های زیرمجموعه آن نسبت داده می‌شود؛ پس لازم است شیوه بررسی ماه به ماه تغییر کرده و فاز دو ماه اوایل زمستان با هم و سه ماه اواخر زمستان با هم یکسان باشد.

برای تعیین فازهای QBO طی بازه زمانی ۲۰۱۷-۱۹۵۸، از داده‌های میانگین مداری باد مداری ترازهای ۴۰ و ۵۰ هکتوپاسکال دانشگاه برلین (<http://www.geo.fu-fub.de>)

اختلاف بین فازهای HS و LS برای کمیت‌های دما و ارتفاع ژئوپتانسیلی نیز در تراز ۳۰hPa بررسی می‌شود. با هدف تعیین نحوه تغییر با QBO، مقایسه‌ها در سه مجموعه شامل مجموعه همه سال‌ها و دو مجموعه EQBO و WQBO به ترتیب در بردارنده فازهای شرقی و غربی QBO، انجام می‌گیرد.

### ۳-۱ ارتباط میدان دما و چرخه خورشیدی

همبستگی دما در تراز ۳۰hPa با  $F_{10.7}$  برای ماه ژوئیه در شکل ۱ رسم شده است که در آن برای نمایش بهتر الگوی همبستگی‌های مهم، مقادیر ۰/۴ و بالاتر با سایه‌روشن قرمز مشخص شده‌اند (مقایسه شود با شکل ۱ در لایبترک، ۲۰۰۳). مطابق شکل ۱-الف که در بردارنده همه سال‌ها است، کمربندی با همبستگی بیشتر از ۰/۴ در نیمکره شمالی از ۱۰ تا ۴۰ درجه شمالی کشیده شده است. در نیمکره جنوبی در عرض‌های ۱۰ تا ۳۰ درجه سه منطقه با همبستگی بیشتر از ۰/۴ وجود دارد. برای مجموعه EQBO (شکل ۱-ب)، همبستگی گسترده‌تر و بزرگ‌تری برای هر دو نیمکره مشاهده می‌شود. همچنین مقدار و موقعیت همبستگی نسبت به مجموعه همه سال‌ها افزایش یافته و همبستگی ۰/۸ نیز در هر دو نیمکره دیده می‌شود. مقادیر همبستگی در نیمکره شمالی عمدتاً مثبت هستند که نشان‌دهنده ارتباط مستقیم دما با  $F_{10.7}$  است. مقادیر همبستگی دقیقاً در بالا و پایین خط استوا کم است اما با دور شدن از استوا به سمت عرض‌های بالاتر نیمکره شمالی، تقریباً همبستگی افزایش می‌یابد که بیشترین مقادیر همبستگی از منطقه جنب‌حاره تا حدود عرض ۵۰ درجه شمالی است. با توجه به این که در ماه ژوئیه نیمکره شمالی در فصل تابستان قرار داد و نیز با توجه به تاثیرپذیری زیاد پوشش سپهر از فرایندهای تابشی در فصل تابستان، وجود همبستگی بیشتر بین تابش خورشیدی و دما نسبت به نیمکره جنوبی توجیه‌پذیر است. مطابق انتظار، در مناطق جنب‌حاره که دریافت انرژی خورشیدی بیشینه

اواخر زمستان و ماه ژوئیه محاسبه می‌شود. نحوه تقسیم‌بندی فازهای خورشیدی و تعیین اختلاف بین HS و LS که در اینجا بیان شد تفاوت آشکاری با روش به کار رفته در کارهای پیشین (لایبترک و همکاران، ۲۰۰۲؛ لایبترک، ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴) که بر مبنای کاربست وایزش (رگرسیون) در هر نقطه شبکه‌ای بوده‌اند، دارد. در روش به کار رفته در این مقاله‌ها، از میانگین اختلاف شار خورشیدی ۱۰/۷ سانتی‌متر بین کمینه خورشیدی (حدود ۷۰ واحد) و بیشینه خورشیدی (حدود ۲۰۰ واحد)، یعنی ۱۳۰ واحد استفاده شده و سپس با فرض وایزش خطی بین هر کمیت  $X$  و  $Y$  شار خورشیدی ۱۰/۷ سانتی‌متر، شیب خط وایزش تعیین و با ضرب آن در ۱۳۰ اختلاف کمیت  $Y$  بین بیشینه و کمینه خورشیدی تعیین شده است. به دلیل تعداد کم حالت‌های فرین رخداد بیشینه و کمینه خورشیدی در دوره مطالعاتی، اعتبار و اهمیت اختلافی که به این ترتیب به دست می‌آید چندان مشخص نیست.

### ۳-۲ ضریب همبستگی

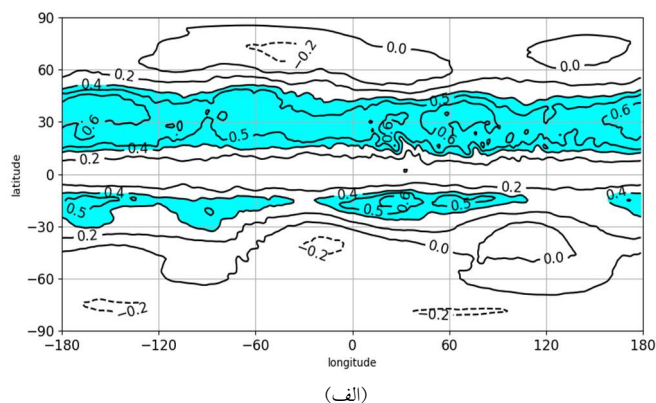
در تحلیل‌های چند متغیره آماری، شیوه‌های مختلف محاسباتی برای اندازه‌گیری وابستگی یا ارتباط بین دو متغیر تصادفی وجود دارد. منظور از ضریب همبستگی بین دو متغیر، قابلیت تعیین مقدار یکی بر حسب دیگری است. در این پژوهش، از ضریب همبستگی پیرسون برای تعیین همبستگی بین میانگین کمیت‌های هواشناختی PV، دما و ارتفاع ژئوپتانسیلی در تراز ۳۰ hPa با  $F_{10.7}$  برای ماه ژوئیه و اوایل و اواخر زمستان استفاده شده است.

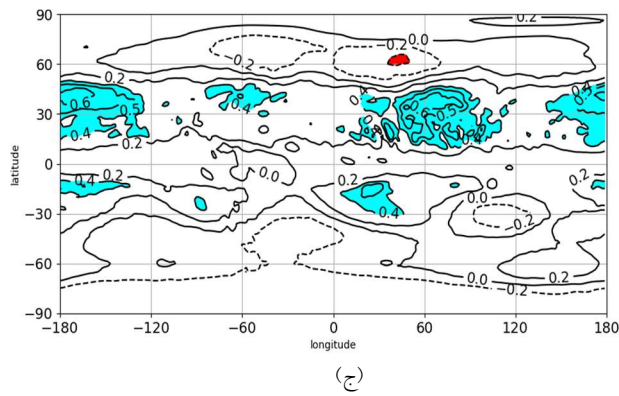
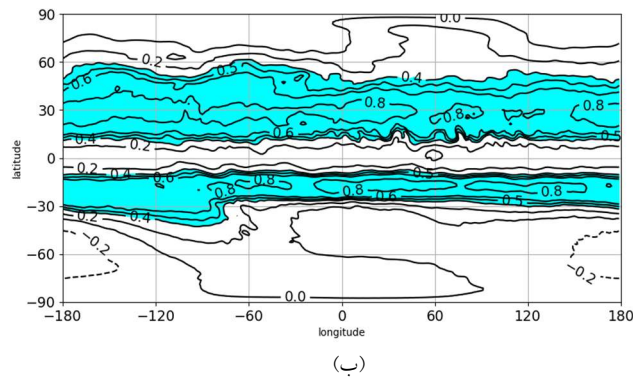
### ۳ نتایج

در این بخش، به ترتیب برای کمیت‌های دما، ارتفاع ژئوپتانسیلی و PV نقش سیگنال خورشیدی از طریق میدان‌های همبستگی با شار  $F_{10.7}$  بررسی می‌شود. برای کسب اطلاعات بیشتر و تحلیل مطمئن‌تر، میدان‌های

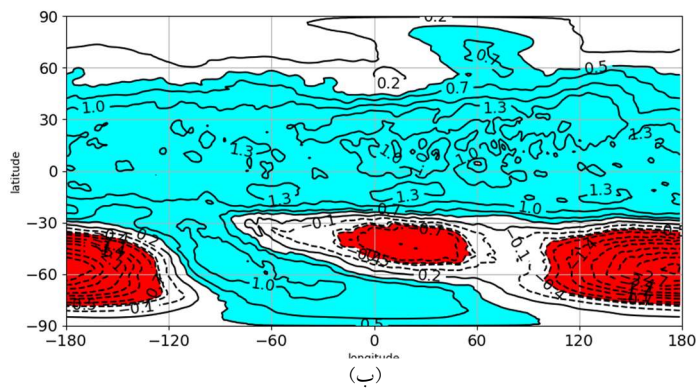
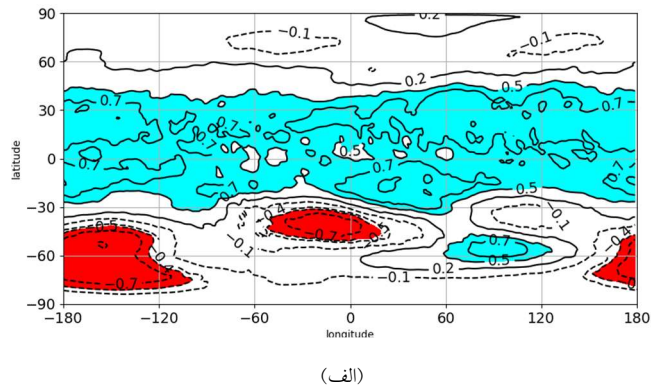
برای مجموعه EQBO (شکل ۲-ب)، اختلاف دمای مثبت بیشتر شده و تا مقدار ۱/۴ کلوین هم رسیده است که بیشتر در حوالی عرض ۳۰ درجه شمالی دیده می‌شود. در اطراف استوا، اختلاف دما نسبت به مجموعه همه سال‌ها افزایش چشمگیری داشته و تا ۱/۱ کلوین هم می‌رسد. در حالی که در سراسر نیمکره تابستانه (نیمکره شمالی)، اختلاف دارای مقدار مثبت است، اما در نیمکره زمستانه از عرض ۳۰ درجه جنوبی به پایین‌تر، ترکیبی از مقادیر مثبت و منفی بزرگ (تا حدود ۳/۰- کلوین) وجود دارد که می‌تواند نشان‌دهنده اثرات دینامیکی غیرمستقیم چرخه خورشیدی باشد. با توجه به شکل ۲-ج برای مجموعه WQBO، الگو در نیمکره تابستانه کاملاً دگرگون می‌شود به طوری که در عرض‌های میانه تا بالای نیمکره شمالی مقادیر مثبت جای خود را به مقادیر منفی می‌دهند. در نیمکره جنوبی هم الگوی اختلاف دگرگون می‌شود، به طوری که در عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر از ۳۰ درجه جنوبی به خوبی می‌توان ردِ عدد موج مداری یک را با مقادیر مثبت تا حدود ۲/۳ کلوین و مقادیر منفی تا حدود ۱/۰- کلوین دید. به طور کلی این شکل نشانه‌ای است از آن که چگونگی QBO اثر چرخه خورشیدی را در پوشش سپهر از طریق دینامیکی تغییر می‌دهد. در عین حال، سازگار با شکل ۱، الگوی اختلاف دما در همه سال‌ها بیشتر تحت تاثیر EQBO است.

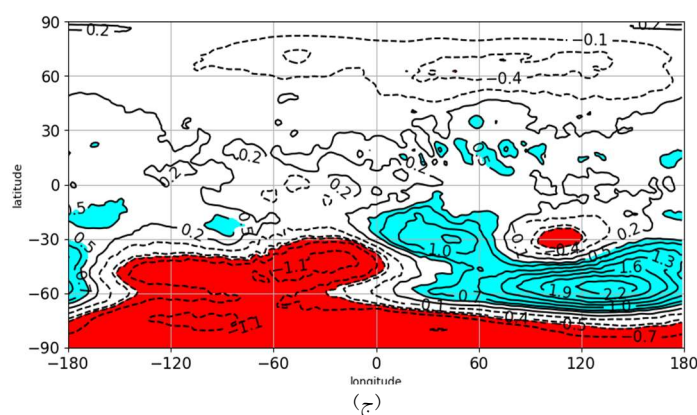
است، همبستگی بین دما و شار خورشیدی هم بالاتر است. برای مجموعه WQBO (شکل ۱-ج)، مناطق پراکنده همبستگی بیشتر از ۰/۴ در نیمکره شمالی و جنوبی مشاهده می‌شود. در نیمکره شمالی این مناطق بین عرض ۱۰ تا ۶۰ درجه واقع شده است. در نیمکره جنوبی مناطق و مقادیر همبستگی کوچک‌تر در عرض‌های ۱۰ تا ۴۰ درجه مشاهده می‌شود که ناشی از شرایط زمستانی در نیمکره جنوبی است. به طور کلی شکل ۱ نشان می‌دهد که الگوی همبستگی برای کل سال‌ها عمدتاً تابع الگوی مجموعه EQBO است که در آن همبستگی‌ها از مجموعه WQBO بزرگ‌تر و گسترده‌ترند. با توجه به اینکه این بررسی در تابستان نیمکره شمالی انجام شده است، نتایج نشان می‌دهد که تاثیر چرخه خورشیدی در نیمکره تابستانه قوی‌تر است. شکل ۲ اختلاف دمای تراز ۳۰ hPa بین HS و LS را در سه مجموعه نشان می‌دهد. در مجموعه همه سال‌ها (شکل ۲-الف)، اختلاف دمای بیشتر از ۰/۵ کلوین تقریباً بیشتر پهنه‌ای از عرض ۴۰ درجه شمالی تا ۳۰ درجه جنوبی را می‌پوشاند. بیشترین اختلاف دما ۰/۸ کلوین است که عمدتاً در اطراف عرض ۳۰ درجه شمالی دیده می‌شود. در عرض‌های میانه نیمکره زمستانه (نیمکره جنوبی)، در حالی که در بازه طول جغرافیایی ۶۰ تا ۱۲۰ درجه شرقی اختلاف دمای بیشتر از ۰/۵ کلوین وجود دارد، در بخش‌های دیگر اختلاف منفی به نسبت بزرگ تا مقدار ۱/۰- کلوین در حدود ۱۵۰ درجه غربی حاکم است.





شکل ۱. همبستگی بین  $F_{10.7}$  و دمای تراز ۳۰ hPa (پریندها با مقادیر بین -۱ و ۱؛ خطوط توپر و خط‌چین به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر مثبت و منفی هستند) برای ماه ژوئیه طی ۱۹۵۸ تا ۲۰۱۷ حاصل از داده‌های بازتحلیل JRA-55 برای مجموعه (الف) تمام سال‌ها، (ب) سال‌های با فاز شرقی QBO و (ج) سال‌های با فاز غربی QBO. منطقه سایه‌روشن با رنگ آبی همبستگی بیشتر از ۰/۴ و منطقه سایه‌روشن با رنگ قرمز همبستگی کوچک‌تر از ۰/۴- را نشان می‌دهد.

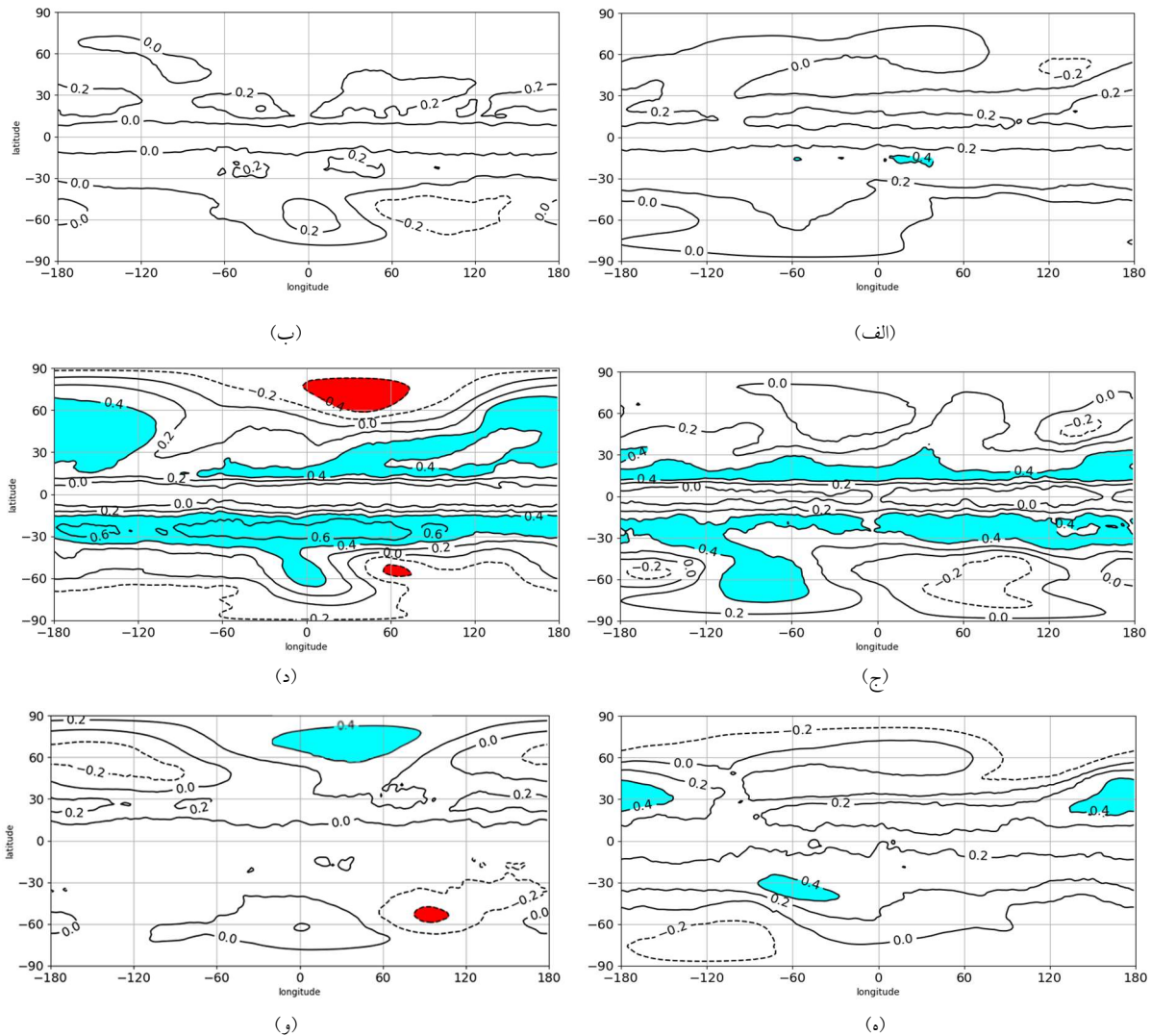




شکل ۲. اختلاف دما بین HS و LS در ماه ژوئیه و تراز ۳۰ hPa (برحسب کلونین؛ مناطق سایه‌روشن آبی و قرمز به ترتیب نشان‌دهنده اختلاف دما بزرگ‌تر از ۰/۵ و کوچک‌تر از ۰/۷- کلونین) برای مجموعه (الف) تمام سال‌ها، (ب) سال‌های فاز شرقی QBO و (ج) سال‌های فاز غربی QBO حاصل از داده‌های بازتحلیل JRA-55 برای دوره ۱۹۵۸ تا ۲۰۱۷.

مربوط به اثر چرخه خورشیدی بر گردش بروئر-دابسون که گردش مهم در صفحه نصف‌النهاری-قائم در وردسپهر زبرین و پوشن سپهر است (وکیس، ۲۰۱۷)، باشد. شکل‌گیری کمربندی از مقادیر به نسبت بزرگ تا همبستگی ۰/۶ در نیمکره جنوبی در اواخر زمستان هم شایان توجه است. در مجموعه WQBO (شکل‌های ۳-ه و ۳-و) به‌طور کلی همبستگی‌ها ضعیف‌تر از مجموعه EQBO هستند. به‌علاوه، از حدود ۳۰ تا ۹۰ درجه شمالی، همبستگی‌ها در WQBO علامت مخالف با مقادیر متناظرشان در EQBO دارند که این امر در اواخر زمستان بارزتر است. با توجه به اثر شناخته‌شده QBO بر تاوه قطبی به شکل تاوه قوی‌تر در WQBO و تاوه ضعیف‌تر در EQBO (هولتون و تن، ۱۹۸۰)، این اختلاف علامت را می‌توان در چارچوب وابستگی اثر چرخه خورشیدی به حالت تاوه قطبی پوشن سپهری فهمید.

پس از بررسی وضعیت در تابستان نیمکره شمالی، در اینجا به اثر سیگنال خورشیدی در زمستان نیمکره شمالی پرداخته می‌شود. همبستگی دما در تراز ۳۰ hPa با  $F_{10.7}$  به تفکیک برای اوایل و اواخر زمستان در شکل ۳ ارائه شده است. با توجه به شکل‌های ۳-الف و ۳-ب به ترتیب برای اوایل و اواخر زمستان و مجموعه همه سال‌ها، میزان همبستگی ضعیف است. این امر به‌ویژه در نیمکره شمالی که در این زمان به دور از تعادل تابشی و کاملاً تحت تاثیر فعالیت‌های دینامیکی است، دیده می‌شود. میزان همبستگی به‌طور محسوسی در مجموعه EQBO (شکل‌های ۳-ج و ۳-د) افزایش می‌یابد، به طوری که برای اوایل زمستان، همبستگی ۰/۴ از ۳۰ تا ۱۰ درجه نیمکره شمالی و از ۱۰ تا ۳۰ درجه جنوبی به‌صورت کمربندی مجزا قرار دارد. در گذر از اوایل زمستان به اواخر زمستان، تغییر مهم در الگوی همبستگی مربوط به ظهور گستره‌ای مداری از مقادیر منفی حول شمالگان در اواخر زمستان است. این امر احتمالاً



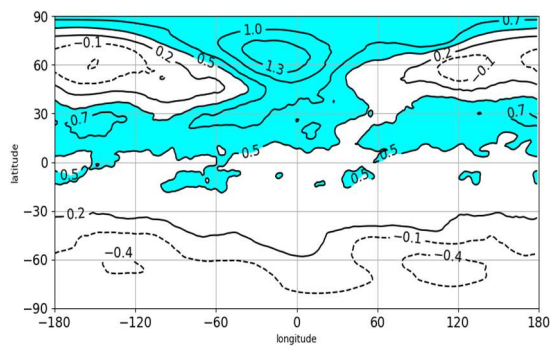
**شکل ۳.** همبستگی  $F_{10.7}$  و دمای تراز  $30 \text{ hPa}$  (پربندها با مقادیر بین  $-1$  و  $1$ ؛ خطوط توپر و خط چین به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر مثبت و منفی) حاصل از داده‌های بازتحلیل JRA-55 برای ۱۹۵۸ تا ۲۰۱۷. بخش‌های بالایی برای مجموعه تمام سال‌ها در (الف) اوایل و (ب) اواخر زمستان، بخش‌های میانی برای مجموعه سال‌های فاز شرقی QBO در (ج) اوایل و (د) اواخر زمستان، و بخش‌های پایینی برای مجموعه سال‌های فاز غربی QBO در (ه) اوایل و (و) اواخر زمستان است. منطقه سایه‌روشن با رنگ آبی همبستگی بیشتر از  $0.4$  و منطقه سایه‌روشن با رنگ قرمز همبستگی کوچک‌تر از  $-0.4$  را نشان می‌دهد.

بیشینه اختلاف با مقدار  $1/4$  کلونین از عرض  $60$  تا  $70$  درجه نیمکره شمالی قرار دارد. برای اوایل زمستان کمربند اختلاف  $0.5$  کلونین تقریباً از  $30$  درجه شمالی تا  $30$  درجه جنوبی کشیده شده است اما در اواخر زمستان فقط چند مرکز با اختلاف  $0.5$  کلونین در عرض  $10$  درجه وجود دارد.

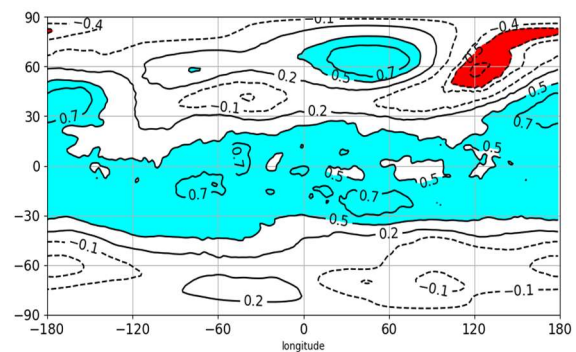
اختلاف دمای تراز  $30 \text{ hPa}$  بین HS و LS به تفکیک برای اوایل و اواخر زمستان در شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به شکل‌های ۴-الف و ۴-ب به ترتیب برای اوایل و اواخر زمستان و مجموعه همه سال‌ها، بیشینه اختلاف دما در عرض‌های میانه نیمکره شمالی واقع شده است. همچنین در عرض  $30$  درجه بیشینه اختلاف  $0.8$  کلونین برای اوایل زمستان در نیمکره شمالی وجود دارد. برای اواخر زمستان،

اختلاف بزرگ‌تر از  $0/5$  - کلونین نیز مشاهده می‌شود. در مجموعه WQBO (شکل‌های ۴-و و ۴-ه)، بیشینه مقدار اختلاف دما نسبت به مجموعه EQBO افزایش داشته و به مقدار  $3/3$  کلونین رسیده است. مقادیر بزرگ اختلاف منفی را برای اوایل و اواخر زمستان می‌توان در نیمکره شمالی دید که برای اوایل زمستان تقریباً از عرض  $60$  تا  $90$  درجه کشیده شده‌اند و بیشینه اختلاف منفی به مقدار  $2/7$  کلونین در طول جغرافیایی  $180$  درجه قرار دارد. در اواخر زمستان، بیشینه اختلاف منفی از  $60$  تا  $70$  درجه نیمکره شمالی با مقدار  $1/7$  - کلونین مشاهده می‌شود. در نیمکره جنوبی برای اواخر و اوایل زمستان مناطق کوچکی با اختلاف  $0/5$  - کلونین و بیشتر وجود دارد.

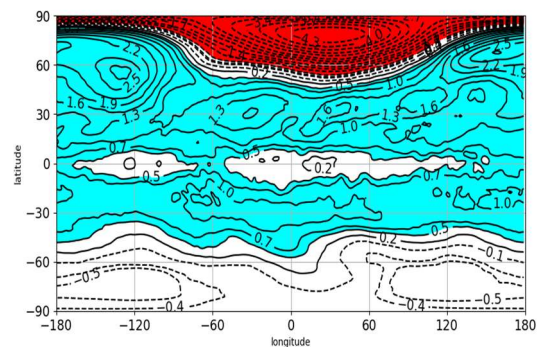
میزان اختلاف دما به‌طور محسوسی در مجموعه EQBO (شکل‌های ۴-ج و ۴-د) افزایش می‌یابد، به طوری که بیشینه اختلاف دما برای اوایل زمستان  $2/9$  کلونین در عرض  $70$  درجه شمالی و برای اواخر زمستان  $2/7$  کلونین در عرض‌های  $60$  و  $70$  درجه نیمکره شمالی واقع شده است. به صورت کلی مناطق دارای اختلاف  $0/5$  کلونین و بزرگ‌تر نسبت به شکل‌های ۴-الف و ۴-ب گسترش داشته و از نیمکره شمالی تا جنوبی کشیده شده‌اند، به طوری که در نیمکره جنوبی در اواخر زمستان اختلاف  $1/1$  کلونین هم در عرض  $30$  درجه مشاهده می‌شود. بیشینه اختلاف منفی برای اواخر زمستان در منطقه قطبی نیمکره شمالی  $4/3$  - کلونین است. برای اوایل و اواخر زمستان در نیمکره جنوبی



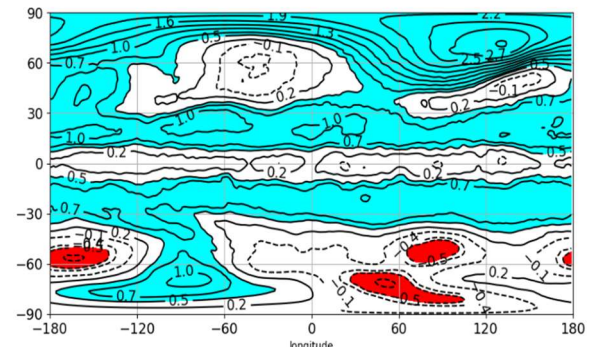
(ب)



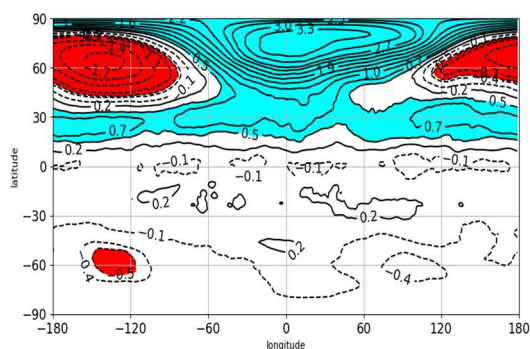
(الف)



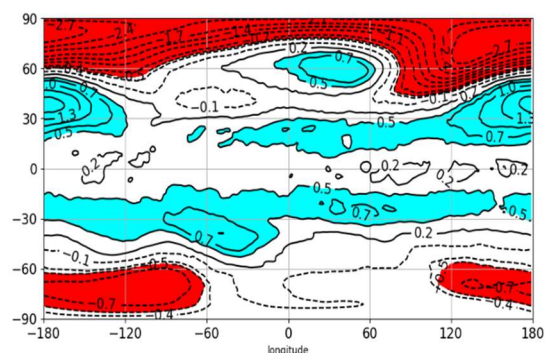
(د)



(ج)



(و)



(د)

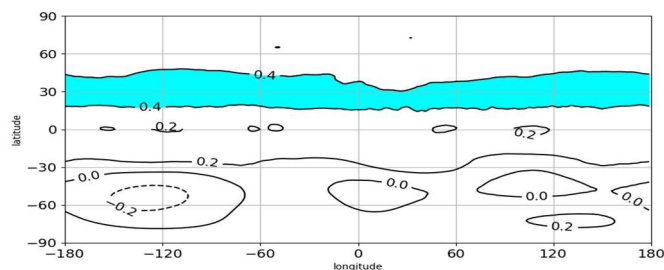
شکل ۴. اختلاف دما بین HS و LS در تراز ۳۰ hPa (برحسب کلون؛ مناطق سایه‌روشن آبی و قرمز به ترتیب نشان‌دهنده اختلاف دما بزرگ‌تر از ۰/۵ و کوچک‌تر از ۰/۵- کلون) حاصل از داده‌های بازتحلیل JRA-55 برای دوره ۱۹۵۸ تا ۲۰۱۷. بخش‌های بالایی برای مجموعه همه سال‌ها در (الف) اوایل و (ب) اواخر زمستان، بخش‌های میانی برای مجموعه سال‌های فاز شرقی QBO در (ج) اوایل و (د) اواخر زمستان، و بخش‌های پایینی برای مجموعه سال‌های فاز غربی QBO در (ه) اوایل و (و) اواخر زمستان است.

۳۰ درجه شمالی دیده می‌شود. در مجموع، همچون میدان دما، برای ارتفاع ژئوپتانسیلی هم اثر چرخه خورشیدی در نیمکره تابستانه در فاز شرقی QBO بارزتر است.

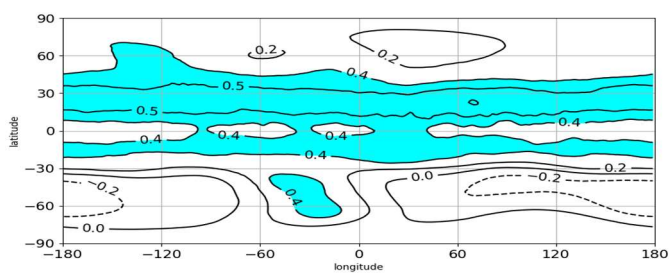
اختلاف ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۳۰ hPa بین HS و LS برای ماه ژوئیه در شکل ۶ ارائه شده است. در مجموعه همه سال‌ها (شکل ۶-الف)، در حالی که در سراسر نیمکره تابستانه اختلاف ارتفاع ژئوپتانسیلی مثبت است، در نیمکره زمستانه (نیمکره جنوبی) نشانه بارزی از الگوی عدد موج مداری ۲ با مقادیری در بازه ۳۵- تا ۳۵ ژئوپتانسیل متر وجود دارد. برای مجموعه EQBO (شکل ۶-ب)، شبیه به آنچه برای میدان دما در شکل ۲ دیده شد، در گستره مداری ۳۰ درجه جنوبی تا ۳۰ درجه شمالی، اختلاف ارتفاع ژئوپتانسیلی نسبت به مجموعه همه سال‌ها افزایش دارد.

### ۲-۳ ارتباط ارتفاع ژئوپتانسیلی و چرخه خورشیدی

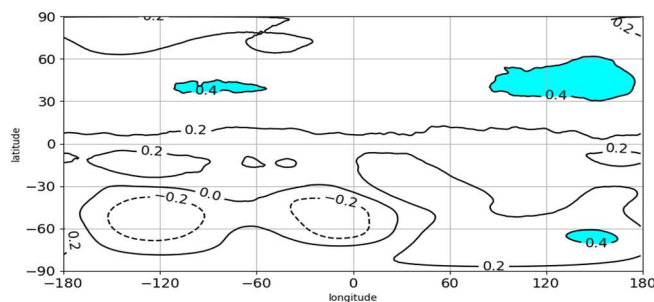
همبستگی ارتفاع ژئوپتانسیلی در ۳۰ hPa با  $F_{10.7}$  برای ماه ژوئیه در شکل ۵ آورده شده است. در مجموعه همه سال‌ها (شکل ۵-الف)، فقط یک کمربند مداری با همبستگی ۰/۴ یا اندکی بزرگ‌تر حول ۳۰ درجه شمالی دیده می‌شود. مقایسه با شکل ۱ نشان می‌دهد همبستگی دمای تراز ۳۰ hPa با  $F_{10.7}$  در همین مناطق در نیمکره شمالی مقدار ۰/۴ دارد. در حالی که در مجموعه EQBO (شکل ۵-ب)، کمربند مداری حول ۳۰ درجه شمالی با مقادیر همبستگی بزرگ‌تر (حدود ۰/۵) و با گستردگی نصف‌النهاری بیشتر حضور دارد، در مجموعه WQBO (شکل ۵-ج) فقط دو تکه گسسته با همبستگی ۰/۴ اندکی بالاتر از عرض جغرافیایی



(الف)

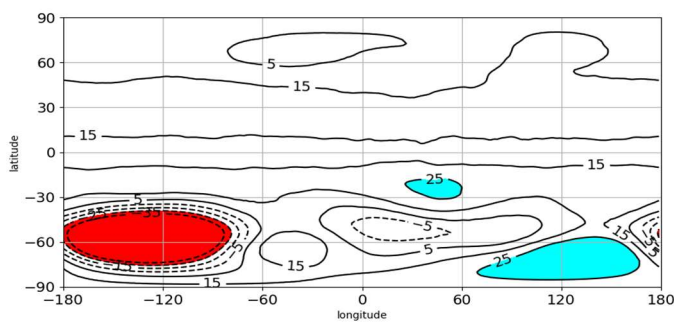


(ب)

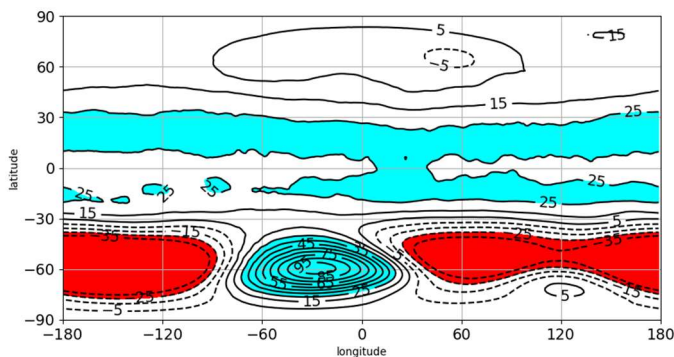


(ج)

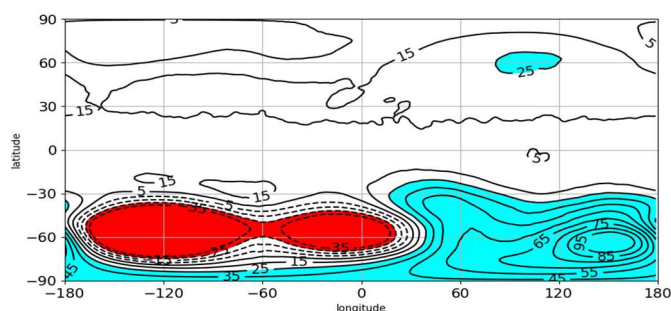
شکل ۵. همبستگی  $F_{10.7}$  و ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۳۰ hPa (پریندها با مقادیر بین -۱ و ۱؛ خطوط توپر و خطچین به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر مثبت و منفی هستند) برای ماه ژوئیه طی ۱۹۵۸ تا ۲۰۱۷ حاصل از داده‌های بازتحلیل JRA-55 برای مجموعه (الف) تمام سال‌ها، (ب) سال‌های با فاز شرقی QBO و (ج) سال‌های با فاز غربی QBO. منطقه سایه‌روشن با رنگ آبی همبستگی بیشتر از ۰/۴ را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶. اختلاف ارتفاع ژئوپتانسیلی بین HS و LS در ماه ژوئیه و تراز ۳۰ hPa (برحسب ژئوپتانسیل متر؛ مناطق سایه‌روشن آبی و قرمز به ترتیب نشان‌دهنده اختلاف ارتفاع ژئوپتانسیلی بزرگ‌تر از ۲۵ و کوچک‌تر از ۲۵- ژئوپتانسیل متر) برای مجموعه (الف) همه سال‌ها، (ب) سال‌های فاز شرقی QBO و (ج) سال‌های فاز غربی QBO حاصل از داده‌های بازتحلیل JRA-55 برای دوره ۱۹۵۸ تا ۲۰۱۷.

مقادیر منفی در عرض‌های بالا در نیمکره زمستانه را می‌توان نشانه دیگری از تاثیر احتمالی چرخه خورشیدی بر گردش بروئر-دابسون دانست. در مجموعه WQBO (شکل‌های ۷-ه و ۷-و)، همچون مجموعه همه سال‌ها، بجز ناحیه کوچکی در حول ۳۰ درجه شمالی همبستگی‌ها ضعیف و حداکثر در حد ۰/۲ است.

اختلاف ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۳۰ hPa بین HS و LS به تفکیک برای اوایل و اواخر زمستان در شکل ۸ ترسیم شده است که در آن، اختلاف ارتفاع ژئوپتانسیلی در مجموعه همه سال‌ها برای اوایل و اواخر زمستان به ترتیب در شکل‌های ۸-الف و ۸-ب آمده است. مطابق شکل ۸-الف، اختلاف ارتفاع ژئوپتانسیلی ۲۵ ژئوپتانسیل متر و بزرگ‌تر در نیمکره جنوبی از عرض ۵۰ تا ۹۰ درجه کشیده شده که بیشینه آن با مقدار ۵۰ ژئوپتانسیل متر در عرض ۸۰ درجه نیمکره جنوبی واقع شده است.

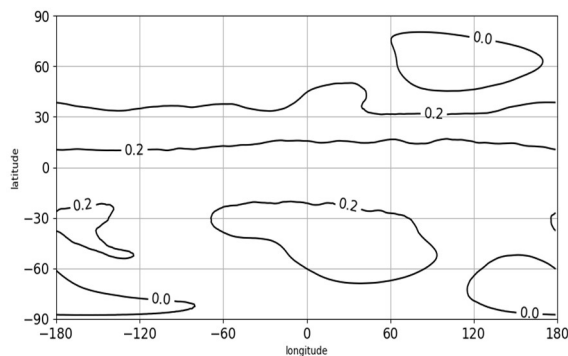
در نیمکره شمالی، دو منطقه با اختلاف ۲۵ ژئوپتانسیل متر و بزرگ‌تر قرار دارد اما از عرض‌های میانه تا قطب در نیمکره شمالی مقادیر منفی اختلاف ارتفاع ژئوپتانسیلی غالب است. در نیمکره جنوبی اختلاف ارتفاع منفی مشاهده نمی‌شود اما در نیمکره شمالی در عرض ۷۰ درجه بیشینه اختلاف منفی با مقدار ۶۵- ژئوپتانسیل متر دیده می‌شود. در شکل ۸-ب، بیشینه اختلاف ارتفاع ژئوپتانسیلی در نیمکره

اما بیشترین اختلاف ارتفاع ژئوپتانسیلی که حتی تا ۹۵ ژئوپتانسیل متر هم می‌رسد برای محدوده‌ای در طول ۳۰ درجه شرقی تا ۷۰ درجه غربی و حول ۶۰ درجه جنوبی در نیمکره زمستانه دیده می‌شود. نسبت به مجموعه EQBO، اختلاف ارتفاع ژئوپتانسیلی در مجموعه WQBO (شکل ۶-ج) در گستره مداری ۳۰ درجه جنوبی تا ۳۰ درجه شمالی کاهش محسوسی دارد، ولی در پیرامون تاوه قطبی جنوبگان دامنه و الگوی کلی تغییرات با حاکمیت عدد موج مداری ۱ همانند است.

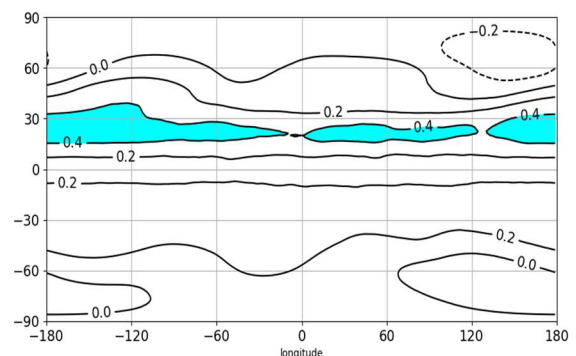
همبستگی ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۳۰ hPa با  $F_{10.7}$  برای اوایل و اواخر زمستان و سه مجموعه فوق در شکل ۷ ارائه شده است. در مجموعه همه سال‌ها (شکل‌های ۷-الف و ۷-ب)، بجز در کمربندی مداری با همبستگی ۰/۴ حول ۳۰ درجه شمالی در اوایل زمستان، در بقیه جاها مقادیر همبستگی ضعیف و حداکثر ۰/۲ است. در مجموعه EQBO (شکل‌های ۷-ج و ۷-د) نسبت به مجموعه همه سال‌ها، افزایش چشمگیر همبستگی تا حدود ۰/۶ در کمربند گسترده‌ای از نزدیکی ۶۰ درجه شمالی تا حدود ۴۰ درجه جنوبی دیده می‌شود. در شرایط زمستانه، همچون میدان دما در شکل ۳، و به‌ویژه برای اواخر زمستان شکل‌گیری مقادیر پادمبستگی در شمالگان شایان توجه است. مقادیر مثبت همبستگی در عرض‌های پایین همراه با

د ترسیم شده است. به طور کلی، نسبت به مجموعه همه سال‌ها، در مجموعه EQBO اختلاف‌ها تشدید می‌شود. در پهنه عرض‌های ۳۰ تا ۹۰ درجه شمالی، در حالی که در اوایل زمستان رد ترکیبی از عدم‌موج‌های مداری ۱ و ۲ را می‌توان یافت، در اواخر زمستان الگویی با گسترش مداری غالب است.

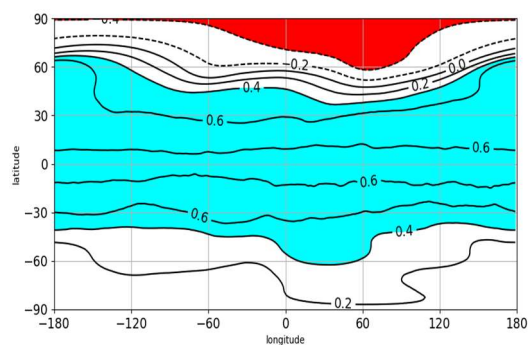
شمالی در عرض ۷۰ درجه با مقدار ۴۵ ژئوپتانسیل متر دیده می‌شود، در حالی که در نیمکره جنوبی اختلاف در همه جا مثبت و حداکثر برابر با ۲۰ ژئوپتانسیل متر است. اختلاف ارتفاع ژئوپتانسیلی در مجموعه EQBO به ترتیب برای اوایل و اواخر زمستان در شکل‌های ۸-ج و ۸-ا



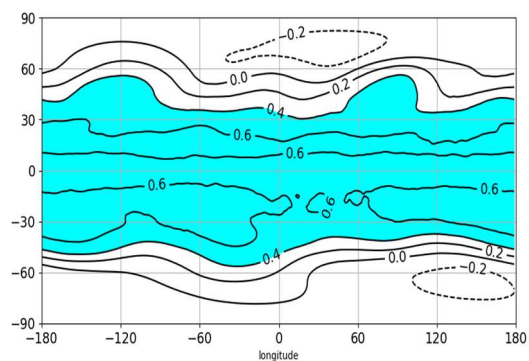
(ب)



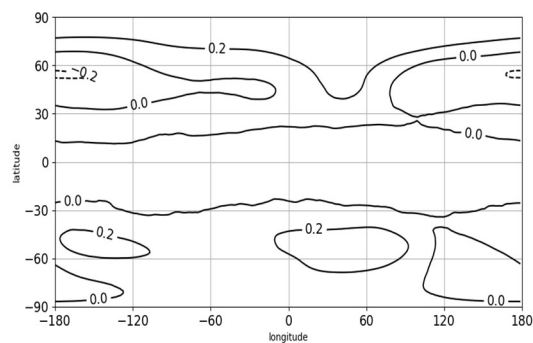
(الف)



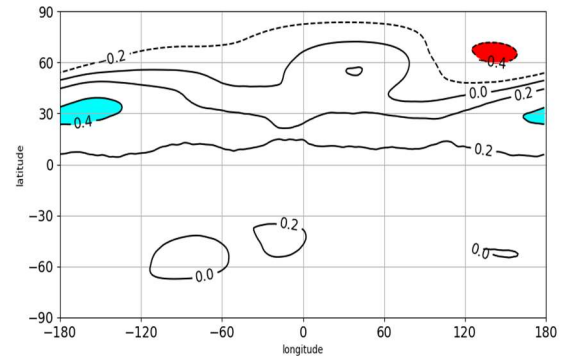
(د)



(ج)



(و)

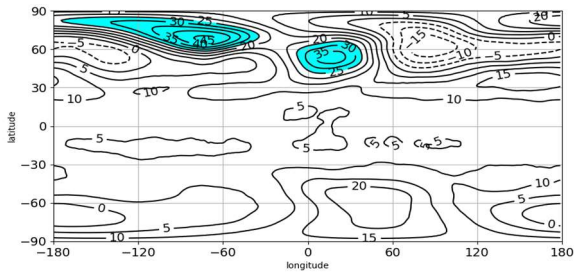


(ه)

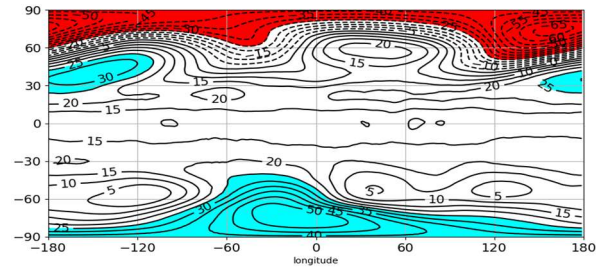
**شکل ۷.** همبستگی  $F_{10.7}$  و ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۳۰ hPa (پرندها با مقادیر بین ۱- و ۱؛ خطوط توپر و خط چین به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر مثبت و منفی) حاصل از داده‌های بازتحلیل JRA-55 برای ۱۹۵۸ تا ۲۰۱۷. بخش‌های بالایی برای مجموعه تمام سال‌ها در (الف) اوایل و (ب) اواخر زمستان، بخش‌های میانی برای مجموعه سال‌های فاز شرقی QBO در (ج) اوایل و (د) اواخر زمستان، و بخش‌های پایینی برای مجموعه سال‌های فاز غربی QBO در (ه) اوایل و (و) اواخر زمستان است. منطقه سایه‌روشن با رنگ آبی همبستگی بیشتر از ۰/۴ و منطقه سایه‌روشن با رنگ قرمز همبستگی کوچک‌تر از ۰/۴- را نشان می‌دهد.

WQBO تقریباً قرینه مجموعه EQBO است به طوری که اثر مجموع دو فاز در مجموعه همه سال‌ها ضعیف‌تر درمی‌آید.

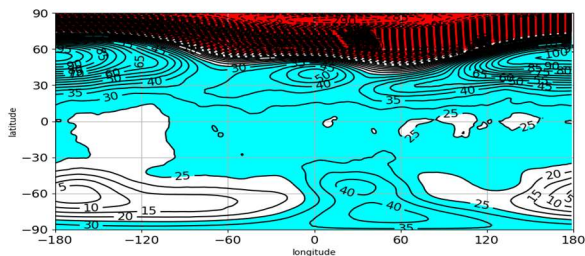
در اوایل زمستان، رفتار میدان اختلاف برای مجموعه WQBO (شکل ۸-۵) نسبت به مجموعه EQBO شباهت بیشتری به مجموعه همه سال دارد، در حالی که برای اواخر زمستان در نیمکره شمالی، میدان اختلاف برای مجموعه



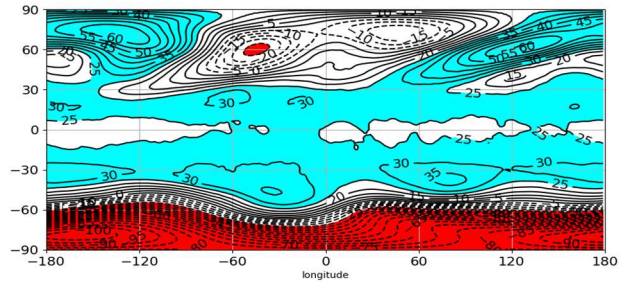
(ب)



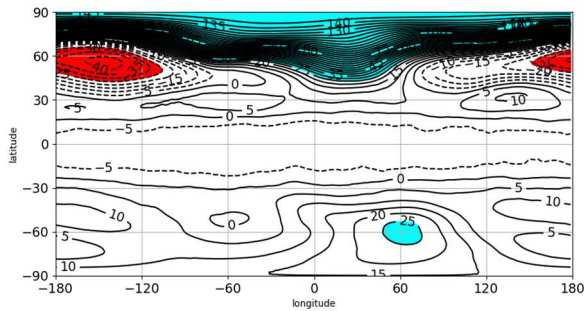
(الف)



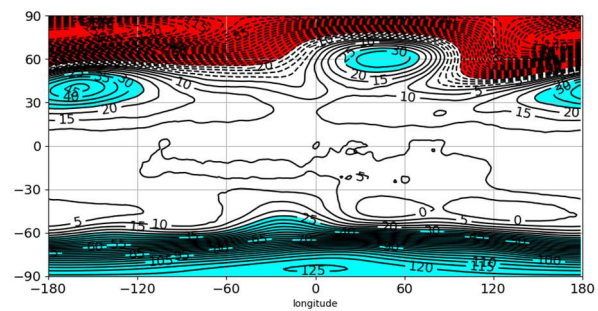
(د)



(ج)



(و)



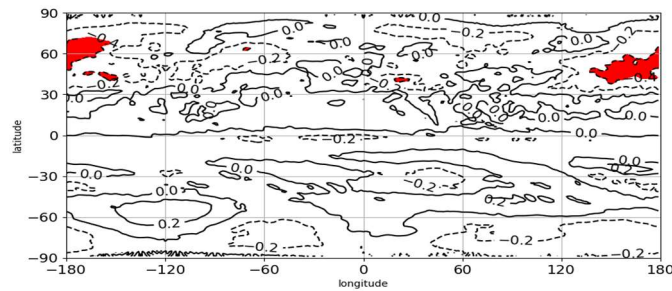
(ه)

شکل ۸. اختلاف ارتفاع ژئوپتانسیلی بین HS و LS در تراز ۳۰ hPa (برحسب ژئوپتانسیل متر؛ مناطق سایه‌روشن آبی و قرمز به ترتیب نشان‌دهنده اختلاف ارتفاع بزرگ‌تر از ۲۵ و کوچک‌تر از ۲۵- ژئوپتانسیل متر) حاصل از داده‌های بازتحلیل JRA-55 برای دوره ۱۹۵۸ تا ۲۰۱۷. بخش‌های بالایی برای مجموعه همه سال‌ها در (الف) اوایل و (ب) اواخر زمستان، بخش‌های میانی برای مجموعه سال‌های فاز شرقی QBO در (ج) اوایل و (د) اواخر زمستان، و بخش‌های پایینی برای مجموعه سال‌های فاز غربی QBO در (ه) اوایل و (و) اواخر زمستان است.

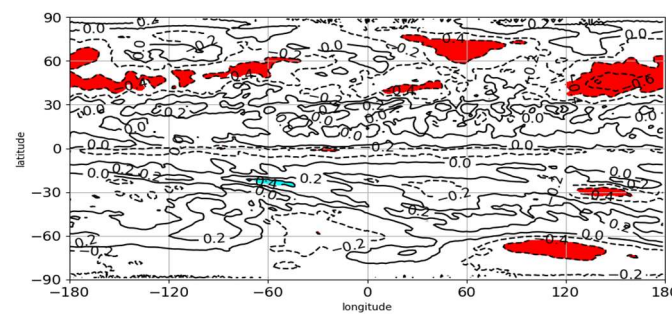
### ۳-۳ ارتباط تاوایی پتانسیلی و چرخه خورشیدی

شکل ۹ همبستگی PV را در تراز ۳۰ hPa با  $F_{10.7}$  برای ماه ژوئیه نشان می‌دهد. در مجموعه همه سال‌ها (شکل ۹-الف)، سیمای بارز در نیمکره تابستانه وجود مناطقی از پادهمبستگی تا  $۰/۴-$  بین  $۴۰$  تا  $۶۰$  درجه شمالی به معنای

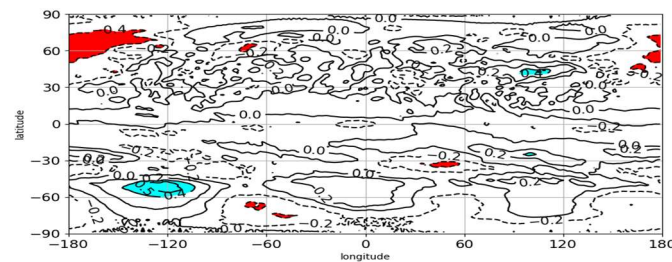
کاهش PV در HS است. این سیمای پادهمبستگی به شکل قوی‌تری در مجموعه EQBO (شکل ۹-ب) حضور دارد، به طوری که مقادیر پادهمبستگی تا حدود  $۰/۶-$  در نزدیکی  $۴۰$  درجه شمالی و  $۱۵۰$  درجه شرقی دیده می‌شود.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹. همبستگی  $F_{10.7}$  و PV در تراز ۳۰ hPa (پریندها با مقادیر بین ۱- و ۱؛ خطوط توپر و خط چین به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر مثبت و منفی) در ماه ژوئیه طی ۱۹۵۸ تا ۲۰۱۷ حاصل از داده‌های بازتحلیل JRA-55 برای مجموعه (الف) تمام سال‌ها، (ب) سال‌های با فاز شرقی QBO و (ج) سال‌های با فاز غربی QBO. منطقه سایه‌روشن با رنگ آبی همبستگی بیشتر از  $۰/۴$  و منطقه سایه‌روشن با رنگ قرمز همبستگی کوچک‌تر از  $۰/۴-$  را نشان می‌دهد.

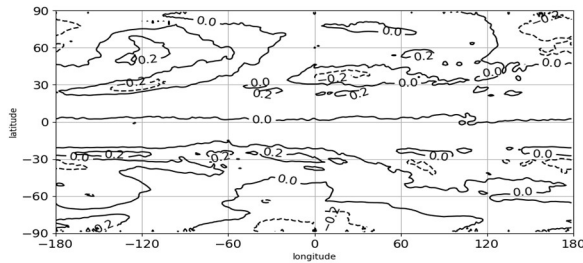
اما در مجموعه WQBO (شکل ۹-ج) سیمای پادهمبستگی مذکور تضعیف شده و حتی جای خود را به

مقادیر مثبت همبستگی تا  $۰/۴$  در حدود  $۴۰$  درجه شمالی و  $۹۰$  درجه شرقی می‌دهد. به طور کلی، در عرض‌های میانه

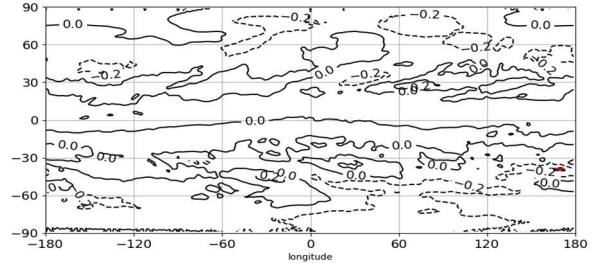
۱۰ آورده شده است. مطابق شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ب، برای مجموعه همه سال‌ها قدر مطلق همبستگی ضعیف و در بیشترین مقدار در حد ۰/۲ است.

نیمکره تابستانه، اثر متضاد چرخه خورشیدی در دو فاز QBO نمایان است.

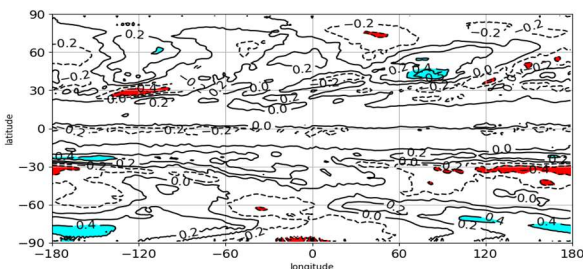
همبستگی PV در تراز ۳۰ hPa با  $F_{10.7}$  طی دوره ۱۹۵۸ تا ۲۰۱۷ برای اوایل و اواخر زمستان و سه مجموعه در شکل



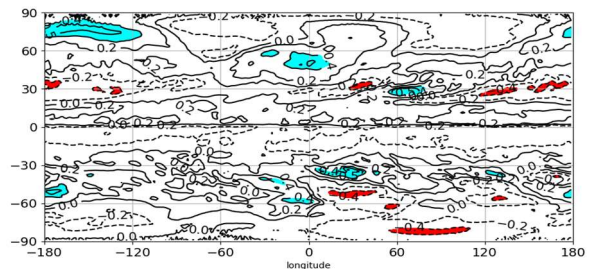
(ب)



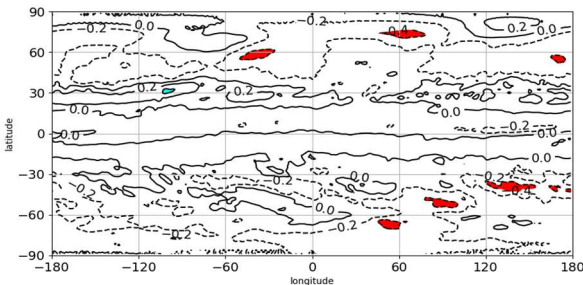
(الف)



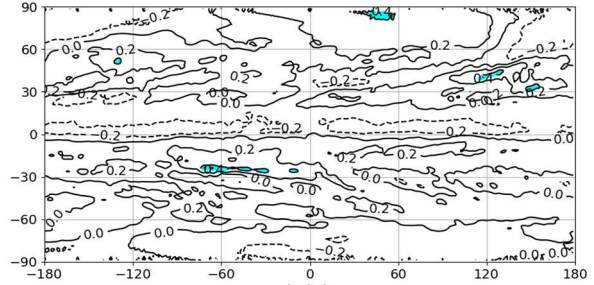
(د)



(ج)



(و)



(ه)

**شکل ۱۰.** همبستگی  $F_{10.7}$  و PV در تراز ۳۰ hPa (پربندها با مقادیر بین ۱- و ۱؛ خطوط توپر و خط چین به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر مثبت و منفی) در ماه ژوئیه حاصل از داده‌های بازتحلیل JRA-55 برای ۱۹۵۸ تا ۲۰۱۷. بخش‌های بالایی برای مجموعه تمام سال‌ها در (الف) اوایل و (ب) اواخر زمستان، بخش‌های میانی برای مجموعه سال‌های فاز شرقی QBO در (ج) اوایل و (د) اواخر زمستان، و بخش‌های پایینی برای مجموعه سال‌های فاز غربی QBO در (ه) اوایل و (و) اواخر زمستان است. منطقه سایه‌روشن با رنگ آبی همبستگی بیشتر از ۰/۴ و منطقه سایه‌روشن با رنگ قرمز همبستگی کوچک‌تر از ۰/۴- را نشان می‌دهد.

اواخر زمستان، چشمگیر است که در آن مقادیر مثبت همبستگی به ۰/۵ هم می‌رسد. برای مجموعه WQBO (شکل‌های ۱۰-و و ۱۰-ه) و نیمکره زمستانه در حالی که

در مجموعه EQBO (شکل‌های ۱۰-ج و ۱۰-د)، شکل‌گیری الگویی با عدد موج ۲ در راستای مداری در عرض‌های میانه تا جنب قطبی نیمکره زمستانه، به‌ویژه در

هرچند نتایج به صورت تمام کره‌ای ارائه شد، ولی در اینجا برای جمع‌بندی نتایج مهم تمرکز بر وضعیت در نیمکره شمالی است. در ماه ژوئیه، برای هر دو میدان دما و ارتفاع ژئوپتانسیلی بیشترین همبستگی با  $F_{10.7}$  در منطقه جنب‌حاره حول  $30^\circ$  درجه شمالی که بیشینه شار دریافتی از خورشید را دارد منطبق است. این بیشینه همبستگی در منطقه جنب‌حاره، در طی EQBO تقویت و طی WQBO تضعیف می‌شود. علاوه بر همبستگی  $F_{10.7}$ ، میدان‌های اختلاف بین دو فاز خورشیدی هم از حضور بیشترین مقادیر مثبت اختلاف در حول  $30^\circ$  درجه شمالی حکایت دارند که طی EQBO تقویت و طی WQBO تضعیف می‌شود. هر دو این نتایج با مطالعه لایبتزک (۲۰۰۳) برای دوره مطالعاتی ۳۵ ساله (۱۹۶۸ تا ۲۰۰۲)، همخوانی دارند. برای PV، همبستگی با  $F_{10.7}$  بیانگر آن است که پاسخ اصلی به چرخه خورشیدی در عرض‌های میانه واقع است و نشان از کاهش PV در این عرض‌ها در هنگام حاکمیت HS دارد. به علاوه، اثر مذکور چرخه خورشیدی در عرض‌های میانه طی EQBO تقویت و طی WQBO دگرگون می‌شود و حتی تغییر علامت می‌دهد.

در زمستان نیمکره شمالی، در هر دو بازه اوایل و اواخر زمستان چنانچه همه سال‌ها صرف نظر از وضعیت QBO در نظر گرفته شوند، هر سه میدان دما، ارتفاع ژئوپتانسیلی و PV همبستگی کوچکی را با چرخه خورشیدی نشان می‌دهند. اما چنانچه بررسی محدود به مجموعه سال‌های فاز شرقی شود، اثر شگرفی را در تقویت پاسخ به چرخه خورشیدی می‌توان آشکار کرد. در عین حال، فازهای شرقی و غربی QBO سیماهایی مخالف هم را بروز می‌دهند که این امر تایید دیگری بر مدوله‌سازی اثر چرخه خورشیدی از طریق QBO است. یافته شایان توجه دیگر در همبستگی برای میدان‌های دما و ارتفاع ژئوپتانسیلی طی EQBO، به‌ویژه در اواخر زمستان، جدایی مقادیر منفی در عرض‌های بالا از مقادیر مثبت در عرض‌های پایین است.

در اوایل زمستان (شکل ۱۰-و) سیمای حاکم مشخصی برای همبستگی به چشم نمی‌خورد، اما در اواخر زمستان (شکل ۱۰-ه) سیمای اصلی وجود پادهمبستگی تا مقادیر  $-0.4$  در حوالی  $60^\circ$  درجه شمالی است که رفتاری مخالف مجموعه EQBO نشان می‌دهد.

#### ۴ نتیجه‌گیری

برای چرخه ۱۱ ساله خورشیدی برحسب اختلاف از میانگین می‌توان دو فاز HS و LS متناظر با به‌ترتیب فعالیت بیش و کمتر از میانگین تعریف کرد. مسئله کلی مطرح آن است که آیا اختلاف گرمایش ناشی از تابش خورشیدی دریافتی بین دو فاز HS و LS آن قدر هست که منجر به تغییر گردش در پوشش سپهر زیرین و بازخورد غیرمستقیم در پوشش سپهر زیرین و وردسپهر شود. در عین حال، یکی دیگر از پدیده‌های کم‌بسامد مهم پوشش سپهر منطقه استوایی، QBO است که اثرات مهمی بر کل پوشش سپهر و حتی وردسپهر دارد. در گام اول از پاسخ به مسئله کلی فوق، اثر چرخه خورشیدی بر پوشش سپهر در سه حالت ممکن، بدون در نظر گرفتن QBO و با در نظر گرفتن فازهای شرقی و غربی QBO، در یک دوره مطالعاتی از ۱۹۵۸ تا ۲۰۱۷ (۶۰ سال) برای تابستان (ماه ژوئیه)، اوایل زمستان (نوامبر و دسامبر) و اواخر زمستان (ژانویه، فوریه و مارس) با استفاده از داده‌های بازتحلیل JRA55 مورد بررسی قرار گرفته است. تعریف فصل در اینجا بر مبنای نیمکره شمالی است. در این بررسی، ابتدا در مقیاس ماهانه فازهای غربی (WQBO) و شرقی (EQBO) برای QBO و فازهای بیشینه (HS) و کمینه (LS) فعالیت در چرخه خورشیدی بر مبنای شار  $F_{10.7}$  تفکیک شد. سپس، با محاسبه میانگین کمیت‌های دما، ارتفاع ژئوپتانسیلی و PV در تراز  $30 \text{ hPa}$ ، همبستگی آنها با  $F_{10.7}$  و نیز اختلاف مقدار بین دو فاز QBO و چرخه خورشیدی، یعنی EQBO-WQBO و HS-LS، تعیین شد.

- in response to the 11-year solar cycle: *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 125(555), 871–892.
- Holton, J. R., and Tan, H. C., 1980, The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 Mb: *J. Atmos. Sci.*, 37(10), 2200–2208.
- Hood, L. L., 2004, Effects of solar UV variability on the stratosphere, in *Solar Variability and its Effect on Climate*, *Geophys. Monogr. Ser.*, vol. 141, edited by J. Pap and P. Fox, pp. 283–304, AGU, Washington, D. C.
- Hoskins, B. J., McIntyre, M. E., and Robertson, A., 1985, On the use and significance of isentropic potential vorticity maps: *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 111, 877–946.
- Labitzke, K., 2003, The global signal of the 11-year sunspot cycle in the atmosphere: When do we need the QBO? *Meteorologische Zeitschrift*, 12(4), 209–216.
- Labitzke, K., 2004, On the signal of the 11-year sunspot cycle in the stratosphere and its modulation by the quasi-biennial oscillation: *J Atmos Sol Terr Phys*, 66, 1151–1157.
- Labitzke, K., Austin, J., Butchart, N., Knight, J., Takahashi, M., Nakamoto, M., Nagashima, T., Haigh, J. D., and Williams, V., 2002, The global signal of the 11-year solar cycle in the stratosphere: observations and models: *J Atmos Sol Terr Phys*, 64(2), 203–210.
- Larkin, A., Haigh, J. D., and Djavidnia, S., 2000, The effect of solar UV irradiance variations on the Earth's atmosphere: *Space Sci. Rev.*, 94(1-2), 199–214.
- Lu, H., Gray, L. J., Baldwin, M. P., and Jarvis, M. J., 2009, Life cycle of the QBO-modulated 11-year solar cycle signals in the Northern Hemispheric winter: *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 135, 1030–1043.
- Marsden D., and Lingenfelter, R. E., 2003, Solar activity and cloud opacity variations: A modulated cosmic ray ionization model. *J. Atmos. Sci.*, 60, 626–636.
- McIntyre, M. E., and Dunkerton, T. J., 1994, The quasi-biennial oscillation (QBO): Some points about the terrestrial QBO and the possibility of related phenomena in the solar interior, in *The Solar Engine and Its Influence on the Terrestrial Atmosphere and Climate*, edited by E. Nesme-Ribes, pp. 293–320, Springer-Verlag, New York.
- Pascoe, C. L., Gray, L. J., Crooks, S. A., Jukes, M. N., and Baldwin, M. P., 2005, The quasi-biennial oscillation: Analysis using ERA-40 data: *J. Geophys. Res.*, 110(D8), D08105, doi:10.1029/2004JD004941.
- این حالت الاکلنگی در راستای نصف‌النهاری می‌تواند نشانه‌ای از اثر مهم چرخه خورشیدی بر گردش در صفحه نصف‌النهاری-قائم، یا همان گردش بروتر-دایسون، باشد. مطالعات تکمیلی برای تایید این اثر در آینده لازم است. همچنین در ادامه می‌توان به بررسی اثرات وردسپهری چرخه خورشیدی، به‌تنهایی و در ترکیب با عوامل کم‌بسامد دیگر چون QBO، با فرایاب‌هایی چون انرژی جنبشی پیچکی و فالیته موج راسبی پرداخت.
- ### منابع
- Asbaghi, G., Joghataei, M., and Mohebalhojeh, A., 2017, Impact of the QBO on the North Atlantic and Mediterranean storm tracks: an energetic perspective: *Geophys. Res. Letters*, 44, 1060–1067.
- Baldwin, M. P., and Dunkerton, T. J., 1998, Biennial, quasi-biennial, and decadal oscillations of potential vorticity in the northern stratosphere: *J. Geophys. Res.*, 103(D4), 3919–3928.
- Bekorukov, V. I., Glazkov, V. N., and Kukoleva, A. A., 1994, Empirical model of total ozone for Northern Hemisphere at the different phases of quasi-biennial circle: *Meteorol. Gidrol.* 2, 36±40 (in Russian).
- Bridgman, H., and Oliver, J., 2006, *The Global Climate System: Patterns, Processes, and Teleconnections*: Cambridge University Press, 36 pp.
- Dunkerton, T. J., 1997, The role of gravity waves in the quasi-biennial oscillation: *J. Geophys. Res.*, 102, 26,053–26,076.
- Dunkerton, T. J., and Baldwin, M. P., 1991, Quasi-biennial modulation of planetary wave fluxes in the Northern Hemisphere winter: *J. Atmos. Sci.*, 48, 1043–1061.
- Esmali, S., Mohebalhojeh, A. R., and Mirzaei, M., 2022, Impacts of the QBO and ENSO on upper-tropospheric Rossby-wave activity associated with the North Atlantic and Mediterranean storm tracks: *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 148, 1–16.
- Gray, L. J., Crooks, S., Pascoe, C., Sparrow, S., and Palmer, M., 2004, Solar and QBO influences on the timing of stratospheric sudden warmings: *J. Atmos. Sci.*, 61(23), 2777–2796.
- Haigh, J. D., 1999, A GCM study of climate change

- Salminen, A., Asikainen, T., Maliniemi, V., and Mursula, K., 2020, Comparing the effects of solar-related and terrestrial drivers on the northern polar vortex: *J. Space Weather Space Clim.*, 10, 1–13, <https://doi.org/10.1051/swsc/2020058>.
- Seppälä, A., and Clilverd, M. A., 2014, Energetic particle forcing of the Northern Hemisphere winter stratosphere: comparison to solar irradiance forcing: *Frontiers in Physics*, 2, 1–6, doi: 10.3389/fphy.2014.00025
- Simpson, I. R., 2009, Solar influence on stratosphere–troposphere dynamical coupling: Space and Atmospheric Physics Group, The Blackett Laboratory, Imperial College, London SW7 2BW, UK.
- Swinbank, R., Douglas, C. S., Lahoz, W. A., O’neill, A., and Heaps, A., 1998, Middle atmosphere variability in the UK Meteorological Office Unified Model: *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 124, 1485–1525.
- Szelağ, M. E., Marsh, D. R., Verronen, P. T., Seppälä, A., and Kalakoski, N., 2022, Ozone impact from solar energetic particles cools the polar stratosphere: *Nature Communications*, 13:6883, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34666-y>.
- Tartaglione, N., Toniazio, T., Orsolini, Y., and Otterå, O.H., 2020, Impact of solar irradiance and geomagnetic activity on polar NO<sub>x</sub>, ozone and temperature in WACCM simulations: *J Atmos Sol Terr Phys*, 209, 105398, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105398>.
- van Loon, H., and Labitzke, K., 2000, The influence of the 11-year solar cycle on the stratosphere below 30 km: A review: *Space Sci. Rev.*, 94(1-2), 259–278.
- Vallis, G. K., 2017, *Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics. Fundamentals and large-scale circulation: Second Ed.*, Cambridge University Press, 946 pp.

## Impact of the solar cycle on the stratosphere and its modulation by the quasi-biennial oscillation

Motahareh Samadollahi<sup>1</sup>, Ali Reza Mohebalhojeh<sup>2</sup>, Mohammad Mirzaei<sup>3\*</sup> and Mohammad Joghataei<sup>4</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Graduate of Meteorology, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>4</sup> Assistant Professor, Faculty of Physics, Yazd University, Yazd, Iran

(Received: 12 November 2023, Accepted: 24 January 2024)

### Summary

The solar cycle is believed to have an important effect on the stratosphere with some degree of modulation by the quasi-biennial oscillation (QBO). To examine the likely effects of solar cycle and their modulation by QBO, in this study, the JRA-55 reanalysis data with a spatial resolution of 1.25 degrees in both the zonal and meridional directions were used for the period of 1958 to 2017 (60 years in total). Also, the solar flux at a wavelength of 10.7 cm, called  $F_{10.7}$ , was extracted from the LISIRD website data for the study period. The monthly average temperature, geopotential height and potential vorticity (PV) at 30 hPa level as well as the solar flux were determined for the 60-year duration of the study.

The months of the study period were classified into easterly and westerly phases of QBO called EQBO and WQBO, respectively. A similar classification was used for the set of years in which solar activity was greater (lower) than normal, called HS (LS) for high (low) solar. Using the FUB website data, the correlations of temperature, geopotential height and PV at 30 hPa with  $F_{10.7}$  in the Northern Hemisphere summer (July), early winter (November and December) and late winter (January, February and March) were calculated for the whole set of data and the two subsets obtained for the two phases of QBO. Besides, the changes in temperature and geopotential height between HS and LS phases were investigated.

The main results of this research in terms of solar and QBO phases are as follows. For the temperature and geopotential height at 30 hPa level, the correlations with solar cycle in July are stronger in the subtropics, and larger and spatially wider for the set of EQBO than both the set of all years and the set of WQBO. The correlation of PV with  $F_{10.7}$  is generally small in July, exhibiting no clear pattern during QBO phases. In early and late winter, for the temperature, geopotential height and PV of 30 hPa, the correlations with  $F_{10.7}$  are small for the set of all years and the set of WQBO, but attain a relatively large value for the set of EQBO with maximum values found in the tropical regions of both hemispheres. The corresponding correlation pattern for PV is distributed over many regions of both hemispheres with stronger values for the set of EQBO than the set of WQBO. Also, while the temperature and geopotential height difference between HS and LS for the set of WQBO reach their peak in the Southern Hemisphere, there is a spatially wider correlation pattern for the set of EQBO in the tropical regions of both hemispheres. Results also point to a possible impact of solar cycle on the Brewer–Dobson meridional circulation, a topic which needs a separate study.

**Keywords:** Geopotential height, potential vorticity, QBO, solar flux, temperature