

## کاربست شاخص‌های دوشاخه‌شدگی جت و شکست موج راسبی برای بررسی دوره آلودگی حاد تهران در آذرماه ۱۳۸۹

مژده حافظی<sup>۱</sup>، مژگان رضایی‌منش<sup>۱</sup>، علیرضا محب‌الحجه<sup>\*</sup>، عباسعلی علی‌اکبری بیدختی<sup>۱</sup> و محمدعلی نصرافهانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران  
<sup>۲</sup> گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱/۳۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۹/۱۵)

### چکیده

با توجه به اهمیت آلودگی هوای شهر تهران از نظر آسیب‌رسانی آن به ساکنان این شهر، لازم است که عوامل هواشناختی متعدد مؤثر بر آن مورد بررسی قرار گیرد. این پژوهش اختصاص به بررسی ارتباط احتمالی شارش بزرگ‌مقیاس در وردسپهر زیرین با ایجاد شرایط حاد آلودگی هوا در تهران دارد. برای این منظور، در مورد وضعیت بحرانی آذرماه ۱۳۸۹، با بررسی شارش در ترازهای زیرین جو، محل استقرار جریان جتی و نیز تحلیل نقشه‌های دمای پتانسیلی  $\theta$  روی سطح هم‌تاوایی پتانسیلی PVU ۲ (یک واحد PV برابر با  $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ )، شاخص شارش دوشاخه موسوم به SFI، اختصار برای Split Flow Index، برای شناسایی دوشاخه‌شدگی جت و شاخص شکست موج برای شناسایی رویداد بندال، موسوم به شاخص  $\beta$ ، محاسبه می‌شود. برای این منظور از داده‌های سامانه پیش‌بینی جهانی (GFS)، شامل ارتفاع ژئوپتانسیلی، دما و سرعت باد برای ۱ نوامبر ۲۰۱۰ تا ۳۱ ژانویه ۲۰۱۱ استفاده شده است. بررسی نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی، سرعت باد، تاوایی نسبی و تابع جریان در تراز ۳۰۰ hPa امکان تشخیص دوره دوشاخه‌شدگی جریان جتی سطوح زیرین جو را فراهم می‌کند. شاخص دوشاخه‌شدگی شارش با استفاده از میانگین تاوایی برای هریک از جت‌های جنب‌حاره و جبهه قطبی و همچنین ناحیه کمینه سرعت بین این دو (GAP) در تراز ۳۰۰ hPa محاسبه می‌شود. علامت و بزرگی این شاخص معیاری از قدرت و شدت هریک از نواحی نام برده در دوشاخه‌شدگی شارش است. مثبت بودن شاخص SFI در نیمه اول آذر ۱۳۸۹ نشان از نبود دوشاخه‌شدگی جت دارد. بازه ۱۸-۲۳ آذرماه در حکم بازه حضور بندال گذرای امگا بر فراز آسیای میانه شناسایی شده است و با حضور مقادیر منفی (مثبت) SFI در ابتدای (انتهای) بازه، نشان از پیشرفت تدریجی بندال در این بازه دارد. از سوی دیگر می‌توان بندال را به واژگونی گرادیان نصف‌النهاری  $\theta$  روی PVU ۲ ارتباط داد. بر پایه این امر به موازات تحلیل شاخص SFI، به محاسبه شاخص  $\beta$  برای آشکارسازی و تعیین بندال بر مبنای توزیع PV- $\theta$  پرداخته شده است. مثبت بودن شاخص  $\beta$  در یک طول جغرافیایی به معنای رخداد واژگونی گرادیان نصف‌النهاری دمای پتانسیلی در آن طول جغرافیایی است. با تحلیل نقشه‌های دمای پتانسیلی روی سطح PVU ۲ و محاسبه شاخص  $\beta$  مشاهده شد که با توجه به مثبت شدن شاخص در میانه آذرماه، یک بندال آنی محلی روی داده است. اما با توجه به تعریف کلاسیک بندال و به علت کوتاهی دوره بندال شناسایی شده، نمی‌توان آن را به‌طور قطع به منزله یک بندال پذیرفت. بازه ۲۰-۲۵ آذرماه با مثبت شدن شاخص  $\beta$  و وجود بندالی گذرا با آنچه شاخص SFI مبنی بر دوشاخه‌شدگی شارش در بازه ۱۸-۲۳ آذرماه بر فراز آسیای میانه نشان می‌دهد، سازگاری دارد.

**واژه‌های کلیدی:** جریان جتی، بندال، دوشاخه‌شدگی جت، شکست موج راسبی، سطح PVU ۲، واژگونی گرادیان نصف‌النهاری دمای پتانسیلی

### Application of the split jet and Rossby-wave breaking indices to study the critical air pollution episodes in Tehran during Nov. and Dec. 2010

Mozhdeh Hafezi<sup>1</sup>, Mozhgan Rezaeimaneh<sup>1</sup>, Alireza Mohebalhojeh<sup>1</sup>, Abbas Ali Akbari Bidokhti<sup>1</sup> and Mohammad Ali Nasr Esfahani<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran*  
<sup>2</sup>*Department of Irrigation, Shahrekord University, Iran*

(Received: 20 April 2014, accepted: 6 December 2014)

## Summary

With regard to the adverse effects of air pollution in Tehran on its residents, it has become vital to investigate the meteorological factors that determine conditions favorable for the establishment of critical air-pollution episodes. Among these factors, the large-scale dynamical processes acting in the upper troposphere are particularly important, as they can provide a means of predicting the critical episodes using the medium-range weather forecasts. As a step in exploring such factors, this study focused on some aspects of the large-scale upper-tropospheric flow believed to have a significant impact on low-level flow. The upper-tropospheric jet stream with its possible split and the Rossby-wave breaking as a way of detecting and measuring blocking strength were examined using various diagnostics including the distribution of potential temperature  $\theta$  on the 2 PVU (a potential vorticity unit is equal to  $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ ) surface corresponding to the position of the dynamical tropopause. The analysis was carried out for a prolonged, acute episode of air pollution in Tehran.

For quantification, the previously introduced Split Flow Index (SFI) and the Rossby-wave breaking index, referred to as  $\beta$  for brevity were employed to identify the jet split and blocking formation, respectively. The Global Forecast System (GFS) data consisting of geopotential height, temperature and horizontal velocity components were used for the three-month period of 1 Nov 2010 to 31 Jan 2011. The geopotential height at 500 hPa, and the wind speed, relative vorticity and streamfunction fields at 300 hPa were analyzed to determine the synoptic structure associated with the intense air-pollution in Tehran from 22 Nov to 22 Dec 2010 (the month of Azar 1389 in Iranian calendar). The synoptic structure indicates persistent blockings in the Northern Atlantic, and the formation of deep troughs in the southern Europe together with strong ridges in their downstream sides. The high values of the geopotential height field, the negative relative vorticity and low wind speed in the middle and upper troposphere were the dominant features over Iran.

To compute the SFI, three regions had to be involved: the subtropical jet (STJ), the polar front jet (PFJ) and the gap between these two (GAP). The SFI was computed by subtracting the mean relative vorticity of GAP from the sum of mean relative vorticities of the STJ and PFJ regions. The sign and magnitude of the SFI were criteria for the occurrence and strength of a split jet. The results for the SFI were generally sensitive to the longitudinal and temporal interval used in computation of the SFI. By considering broader and longer longitudinal and temporal intervals, respectively, more accurate values for the SFI index could be obtained. With regard to the latter sensitivities, it was shown that within the positive values of SFI in the large part of Nov. and Dec. 2010 representing non-split flow, there was the period 9 to 14 Dec. 2010 during which the formation of a transient blocking over central Asia led to negative (positive) values of SFI at the beginning (end) of this period. The blocking formation was associated with the reversal of the meridional gradient of  $\theta$  on the 2 PVU surface. For this reason, the  $\beta$  index was used as a dynamical tool to detect and identify a blocking based on the distribution of  $\theta$

on potential vorticity surfaces. Results showed positive values of  $\beta$  over Iran for a few days in the middle of Azar (early Dec. 2010), indicating the presence of a transient blocking. There was also a second case of positive values of  $\beta$  from 11 to 16 Dec., which closely followed the negative values of the SFI (split-flow regime) from 9 to 14 Dec. over central Asia.

**Keywords:** Jet stream, blocking, jet split, Rossby-wave breaking, 2 PVU surface, reversal of meridional gradient of potential temperature

## ۱ مقدمه

آلودگی هوا یکی از بزرگ‌ترین مشکلاتی است که همراه با صنعتی شدن و گسترش شهرنشینی افزایش یافته و در سال‌های اخیر به یک مشکل بزرگ برای برخی شهرهای بزرگ دنیا و کشور ما تبدیل شده است. عوامل متعددی در پدید آمدن آلودگی هوا دخالت دارد که برخی از آنها عبارت‌اند از: آلودگی‌های حاصل از گسیل آلاینده‌های متفاوت، توپوگرافی منطقه، ساختار دمایی و گردش‌های جوئی. گرچه آلودگی هوای شهرهای بزرگی چون تهران، تا حد زیادی به مقدار و نوع گسیل آلاینده‌ها وابسته است، اما چگونگی توزیع آلودگی و میزان انباشت یا تهویه بر اثر حرکات جوئی هم نقش بسزایی در آن ایفا می‌کند. عوامل ذکر شده (توزیع، انباشت و تهویه آلودگی) به ساختار جوئی در مقیاس محلی بستگی دارد و ساختار جوئی در مقیاس محلی هم به شدت متأثر از ساختار آن در مقیاس‌های بزرگ‌تر است.

شکل‌های ۱ و ۲ شاخص استاندارد آلودگی هوا موسوم به PSI، اختصار برای Pollution Standard Index، کل را به ترتیب برای ماه‌های نوامبر و دسامبر ۲۰۱۰ در ایستگاه ژئوفیزیک نشان می‌دهند. این شاخص کمیته نرده‌ای برای تعیین کیفیت هوا است. پیش از ماه آذر ۱۳۸۹ نیز میزان این شاخص در برخی روزها از مرز ناسالم گذشته است ولی به‌طور خاص از ۲۲ نوامبر برابر با ۱ آذرماه با اندکی

آفت‌وخیز این روند تا ۱۲ دسامبر برابر با ۲۱ آذرماه ادامه دارد. شایان گفتن است که گذر از مرز ناسالم در هر یک از این نمودارها می‌تواند مرتبط با یکی از آلاینده‌های جوئی چون CO، NO<sub>2</sub> و یا SO<sub>2</sub> باشد؛ چرا که PSI کل، بیشینه PSI محاسبه شده برای آلاینده‌های گوناگون است. برای نمونه میزان زیاد PSI در ۲۲ نوامبر مربوط به آلاینده NO<sub>2</sub> است و نه CO. از این رو NO<sub>2</sub> آلاینده مسئول شناخته می‌شود.

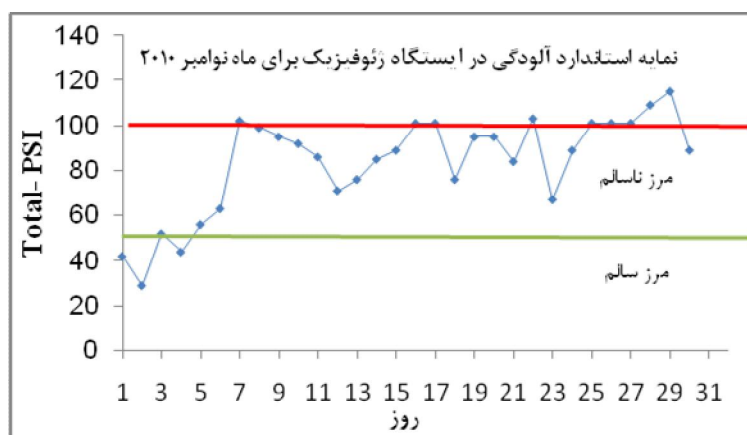
یکی از عوامل دینامیکی مؤثر بر آلودگی هوا، نحوه استقرار جریان جتی ترازهای زیرین جو است. جریان جتی با تغییرات بسامد کم خود که شامل دوره‌های جریان کاملاً مداری و دوره‌های جریان با مؤلفه نصف‌النهاری قوی است، به میزان زیادی بر وضع هوای مناطق پایین‌دست خود اثرگذار است. در حالتی که جریان جتی به‌صورت مؤلفه نصف‌النهاری شکل می‌گیرد، جریان جتی بند آمده و دو شاخه‌شدگی در جریان جتی و در پی آن «بندال» یا همان ناحیه شارش با کمینه سرعت شکل می‌گیرد (پلی، ۲۰۰۱). بسیاری از بررسی‌های صورت گرفته در زمینه جریان جتی دوشاخه‌شده به علت یکنواختی و مداری بودن بیشتر شارش در نیمکره جنوبی نسبت به نیمکره شمالی، روی این نیمکره تمرکز کرده‌اند. تالچارد (۱۹۷۲) موقعیت، شدت و وجود جت دوشاخه نیمکره جنوبی در زمستان را متأثر از جدانشدگی شارش از واچرخند موسمی تابستانه آسیا در نیمکره شمالی به سمت عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر نیمکره جنوبی در اثر نیروی کوریولیس دانست. کیدسون و سینکلر (۱۹۹۵) با استفاده

دینامیکی، به معرفی شاخصی برای شکست موج و شناسایی بن‌دال پرداخته‌اند که در پژوهش حاضر نیز این شاخص محاسبه و نتایج آن عرضه می‌شود. تیرلیس و هاسکینز (۲۰۰۷) با این شاخص و با استفاده از ۴۴ سال داده‌های بازتحلیل ECMWF به یک اقلیم‌شناسی جامع از بن‌دال در نیمکره شمالی دست‌یافته و مشاهده کردند که بیشتر بن‌دال‌های نیمکره شمالی در ناحیه اطلس - اروپا رخ می‌دهند. در قسمت دوم این مقاله بخشی از روش محاسبه توزیع دمای پتانسیلی ( $\theta$ ) روی سطح ۲ PVU داده خواهد شد. برای جزئیات بیشتری از محاسبه PV روی سطوح هم‌دمای پتانسیلی و استفاده از آن در تحلیل دینامیکی می‌توان به محب‌الحججه و مرادی (۱۳۸۱)، قرایلو (۱۳۸۳) و احمدی‌گیوی و همکاران (۱۳۸۴) نیز رجوع کرد.

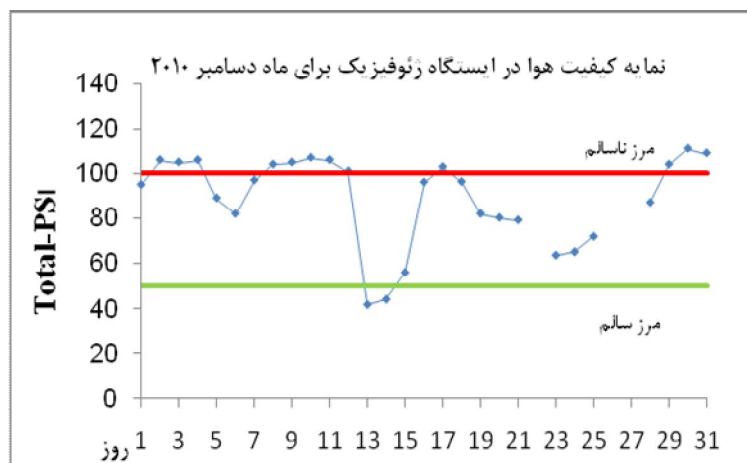
همچنین در ارتباط با اثر شارش بزرگ‌مقیاس روی وضعیت آلودگی هوای شهر تهران، بیدختی و شرعی‌پور (۱۳۸۸) پژوهشی را عملی ساختند. آنها تأثیر وضعیت وردسپهر زبرین روی آلودگی هوای شهر تهران را بررسی کردند و با توجه به تأثیرپذیری برخی مشخصه‌های هواشناختی سطح زمین از وردسپهر زبرین، به بررسی همبستگی آنها پرداختند. برخی از نتایج پژوهش اخیر عبارت‌انداز: ۱) تأثیرات جت جنب‌حاره‌ای و جت قطبی بر

از پالایه پایین‌گذر ۱۰ روزه روی داده‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ hPa دریافتند که جت دوشاخه با فاز منفی مد حلقوی نیمکره جنوبی موسوم به SAM، اختصار برای Southern Hemisphere Annular Mode، یا نوسان جنوبگان همراه است. چن و همکاران (۱۹۹۶) فاز النینو نوسان جنوبی را در دوشاخه شدن جت مؤثر دانستند. بالس الشولز و همکاران (۲۰۰۱) شاخصی را به منظور تعیین بزرگی شارش دوشاخه‌شده بر پایه میدان تاوایی ۲۰۰ hPa معرفی کردند که مبنای کار در مورد جت در این پژوهش است.

یکی دیگر از عوامل دینامیکی مؤثر بر آلودگی هوا، شکل‌گیری بن‌دال و نحوه استقرار آن است که با دوشاخه‌شدگی شارش در وردسپهر زبرین ارتباط دارد. با توجه به اهمیت بن‌دالین تاوایی پتانسیلی (PV) در شناخت پدیده‌ها در طیف بزرگی از شارش‌های جوئی (هاسکینز و همکاران، ۱۹۸۵؛ هینز و مک‌ایتایر، ۱۹۸۷؛ تورنکرافت و همکاران، ۱۹۹۳)، در سال‌های اخیر توجه به عرضه شاخص‌هایی برای آشکارسازی و تعیین کمی رخداد بن‌دال بر مبنای PV معطوف شده است. در این میان، پلی و هاسکینز (۲۰۰۳) بر مبنای توزیع دمای پتانسیلی روی سطح دارای تاوایی پتانسیلی ۲PVU (یک واحد PV برابر با  $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ )، منطق بر مکان وردایست



شکل ۱. شاخص PSI کل در ایستگاه ژئوفیزیک برای ماه نوامبر ۲۰۱۰.



شکل ۲. شاخص PSI کل در ایستگاه ژئوفیزیک برای دسامبر ۲۰۱۰.

بلندمدت، برای نمونه فصلی و یا سالانه است. از این رو برای محاسبه شاخص دوشاخه‌شدگی شارش کل، بازه اول نوامبر ۲۰۱۰ تا ۳۱ ژانویه ۲۰۱۱ در نظر گرفته شد تا از این راه درک بهتری نسبت به دوشاخه‌شدگی شارش در این دوره به دست آید. در ابتدا با استفاده از نقشه‌های هافمولر بزرگی سرعت باد (شکل ۳) و تاوایی نسبی (نشان داده نشده) تراز  $300 \text{ hPa}$ ، طول و عرض جغرافیایی مربوط به محل قرارگیری جت جبهه قطبی (STJ) و جت جنب‌حاره (PFJ) و همچنین ناحیه کمینه سرعت بین آنها (GAP) تعیین و میانگین تاوایی نسبی برای هر یک از این نواحی محاسبه شد. از آنجا که دوشاخه‌شدگی جریان جتی می‌تواند به‌طور محلی وجود داشته باشد، از این رو تعیین طول و عرض جغرافیایی این دوشاخه‌شدگی حائز اهمیت است. شایان گفتن است که پریشیدگی‌های مشاهده شده در شکل ۳ به دلیل عدم استفاده از یک پالایه است. آزمایش نشان می‌دهد در صورتی که نواحی تحت بررسی به بازه‌های کوچک‌تری در راستای طول جغرافیایی تقسیم و برای هر یک شاخصی مجزا تعیین شود، استفاده از پالایه زمانی مناسبی مانند لانکزوس پایین‌گذر، نسبت به حالت فعلی که بازه طول جغرافیایی گسترده‌تری انتخاب شده، مفیدتر خواهد بود. سپس از رابطه زیر شاخص

آلودگی هوا، (۲) وجود ضریب همبستگی بین کمیت فشار سطح زمین و آلودگی هوا، (۳) بزرگ بودن مقادیر مثبت سرعت قائم فشاری و (۴) افزایش میانگین دما در دوره‌های حاد آلودگی هوا.

## ۲ روش تحقیق

در ابتدا داده‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی، دما و مؤلفه‌های سرعت باد روی سطوح فشاری متفاوت موجود در وردسپهر و پوشن سپهر در ساعت‌های  $0000, 0600, 1200$  و  $1800$  UTC مربوط به ماه‌های نوامبر، دسامبر ۲۰۱۰ و ژانویه ۲۰۱۱ برگرفته از «سامانه پیش‌بینی جهانی» موسوم به GFS روی یک شبکه کروی تهیه و آماده‌سازی شد. دمای پتانسیلی نیز که برای محاسبه تاوایی پتانسیلی مورد نیاز است، با استفاده از داده‌های دما روی سطوح فشاری محاسبه شد. سپس با استفاده از داده‌های آماده شده، میدان‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی  $500 \text{ hPa}$ ، هم‌تندی، تاوایی نسبی و تابع جریان تراز  $300 \text{ hPa}$  در آذرماه ۱۳۸۹ (۲۲ نوامبر تا ۲۲ دسامبر ۲۰۱۰) بررسی و سامانه‌های دینامیکی مهم این دوره مشخص شد.

بر طبق کار بالسل‌شولز و همکاران (۲۰۰۱) برای محاسبه شاخص دوشاخه‌شدگی شارش نیاز به دوره‌ای

واحد،  $k+1$  شماره سطح بالای آن (شماره‌گذاری از پایین به بالا صورت می‌گیرد)،  $\Delta\theta = \theta_{k+1} - \theta_k$  و  $Q$  تاوایی پتانسیلی روی سطوح  $\theta$  است. شایان گفتن است در صورتی می‌توان از این روش استفاده کرد که سطوح تاوایی پتانسیلی همانند سطوح هم‌دمای پتانسیلی در راستای قائم به سمت بالا افزایش یابند و تاشدگی وردایست وجود نداشته باشد.

پلی و هاسکینز (۲۰۰۳)، با توجه به ملاحظات دینامیکی، بندال را با واژگونی گرادیان نصف‌النهاری معمول  $\theta$  روی سطح PVU ۲، یعنی شکست موج راسبی در وردسپهر زبرین، ارتباط دادند. آنها بر این مبنا به تعریف شاخصی دینامیکی برای آشکارسازی و تعیین بندال از روی توزیع PV- $\theta$  پرداختند. شکل ۴ طرحواره‌ای از پارامترهایی است که برای تعریف شاخص حاصل برای تشخیص بندال در یک طول جغرافیایی  $\lambda_0$  استفاده می‌شود. خط ضخیم نشان‌دهنده پربند  $\theta$  روی سطح PVU ۲ در هنگام وقوع بندالی است که مرکز آن روی  $\lambda_0$  قرار دارد. در ادامه این شاخص با عنوان  $\beta$  خوانده می‌شود. شاخص  $\beta$  در طول جغرافیایی  $\lambda_0$  به صورت اختلاف بین دمای پتانسیلی میانگین در مستطیل‌های شمالی و جنوبی به صورت زیر تعریف می‌شود (پلی و هاسکینز، ۲۰۰۳):

$$\beta = \frac{2}{\Delta\varphi} \left( \int_{\varphi_0}^{\varphi_0 + \Delta\varphi/2} \theta d\varphi - \int_{\varphi_0 - \Delta\varphi/2}^{\varphi_0} \theta d\varphi \right), \quad (3)$$

که در آن  $\varphi_0$  عرض جغرافیایی بندال و  $\Delta\varphi$  مقیاس نوعی پهنای بندال در راستای عرض جغرافیایی است که تقریباً  $30^\circ$  در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه  $\varphi_0$  باید میانگین سالانه عرض جغرافیایی مرکزی بندال ( $\varphi_c$ ) که تابعی از طول جغرافیایی است، تعیین شود. به این منظور

دوشاخه‌شدگی شارش (SFI) تعیین می‌شود (بالس الشولز و همکاران، ۲۰۰۱):

$$SFI = \zeta_{PFJ} + \zeta_{STJ} - \zeta_{GAP}, \quad (1)$$

که  $\zeta_{STJ}$  میانگین تاوایی STJ،  $\zeta_{GAP}$  میانگین تاوایی GAP،  $\zeta_{PFJ}$  میانگین تاوایی PFJ و SFI همگی بر حسب  $S^{-1}$  است. با تفریق میانگین سه‌ماهه از مقدار SFI هر ماه و تقسیم نتیجه حاصل بر انحراف استاندارد سه‌ماهه مقدار SFI به‌نچار می‌شود. مقادیر منفی نشان‌دهنده شارش دوشاخه‌شده و مقادیر مثبت نشان‌دهنده شارش دوشاخه‌نشده است. محاسبه تاوایی نسبی با استفاده از داده‌های آنی مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری سرعت باد به روش طیفی با به‌کارگیری زیربرنامه‌های موجود در کتابخانه نرم‌افزاری Spherpac (آدامس و سوارترزرا، ۱۹۹۹) صورت گرفته است.

تاوایی پتانسیلی روی سطوح فشاری به روش تفاضل متناهی برآورد و سپس روی سطوح هم‌دمای پتانسیلی  $\theta$  درون‌یابی شد. برای به‌دست آوردن توزیع دمای پتانسیلی  $\theta$  روی سطح PVU ۲، در هر نقطه شبکه افقی روی کره، روش زیر به کار بسته شد. با توجه به آنکه به‌طور کلی با حرکت در راستای قائم از بالا به پایین، تاوایی پتانسیلی کاهش می‌یابد، از بالاترین سطح هم‌دمای پتانسیلی به سمت پایین برای یافتن سطحی با مقدار PV کوچک‌تر یا مساوی ۲ واحد، جست‌وجو صورت می‌گیرد. سپس با استفاده از رابطه زیر بر مبنای درون‌یابی خطی از روی نقاط سطح به‌دست آمده و سطح بلافاصله بالای آن مقدار  $\theta$  روی سطح PVU ۲ محاسبه می‌شود:

$$\theta = \frac{\Delta\theta(2-Q_k)}{Q_{k+1}-Q_k} + \theta_k, \quad (2)$$

که پایین‌نویس  $k$  معرف شماره سطح هم‌دمای پتانسیلی یافت شده ( $\theta_k$ ) با مقدار PV کوچک‌تر یا مساوی ۲

### ۳ بررسی همدیدی

نتایج حاصل از بررسی نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و بزرگی بردار سرعت افقی باد در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال ساعت‌های ۰۰۰۰، ۰۶۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۸۰۰ UTC در آذرماه ۱۳۸۹ را می‌توان با شناسایی رویدادهای همدیدی مهم از دیدگاه ارتباط احتمالی با آلودگی هوا به صورت زیر خلاصه کرد.

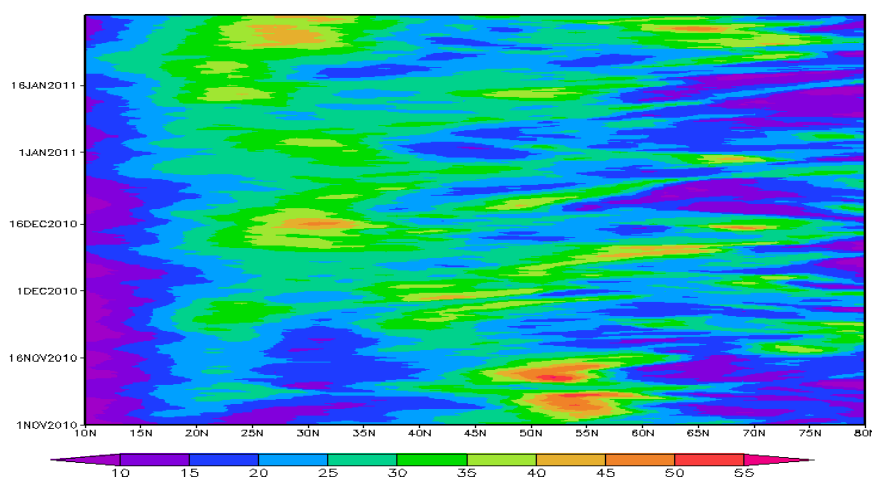
از ویژگی‌های بارز، وقوع دو دوره طولانی آلودگی هوا در نیمه اول آذرماه است. اولین دوره از روز سوم تا روز هشتم، هنگامی رخ می‌دهد که مطابق شکل‌های ۶-الف و ۶-ب یک پشته روی ایران و ناوهای در جلوی آن (شرق ایران) مشاهده می‌شود و دوشاخه شدن جت و قرار گرفتن ایران در ناحیه بین دو جت موجب کاهش یافتن سرعت باد در سطوح بالا و همراه با آن آلودگی هوا در سطوح پایین شده است.

دومین دوره آلودگی از روز نهم تا روز هجدهم اتفاق می‌افتد. در این دوره مطابق شکل‌های ۶-ج و ۶-د، یک

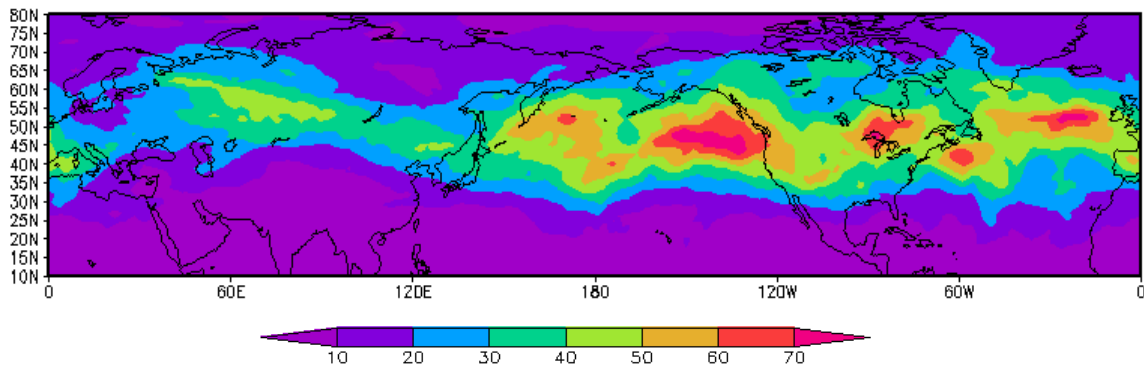
الگوی میانگین سه ماهه (نوامبر، دسامبر ۲۰۱۰ و ژانویه ۲۰۱۱) انرژی جنبشی پیچک‌های گذرا (EKE) برای نیمکره شمالی به دست آمد (شکل ۴). پس از آن مطابق با پلی و هاسکینز (۲۰۰۳) در هر طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی بیشینه EKE در حکم  $\varphi_c$  در نظر گرفته شد. سپس مقدار  $\varphi_0$  در هر طول جغرافیایی به صورت زیر محاسبه شد (پلی و هاسکینز، ۲۰۰۳):

$$\varphi_0 = \varphi_c(\lambda) \pm \Delta\varphi, \quad (4)$$

که  $\Delta\varphi = 0,4$  درجه است. به این ترتیب برای هر طول جغرافیایی سه مقدار  $\varphi_0$  به دست می‌آید، مقدار  $\beta$  برای هر کدام از آنها محاسبه و در نهایت بیشینه مقدارهای به دست آمده به منزله شاخص بندال در نظر گرفته می‌شود. بندال آنی محلی در هر طول جغرافیایی هنگامی رخ می‌دهد که شاخص  $\beta$  در آن طول جغرافیایی مثبت، یعنی دمای پتانسیلی مستطیل شمالی بیشتر از دمای پتانسیلی مستطیل جنوبی (شکل ۵) باشد.



شکل ۳. نقشه هافمولر بزرگی سرعت باد تراز ۳۰۰ hPa برای دوره ۱ نوامبر ۲۰۱۰ تا ۳۱ ژانویه ۲۰۱۱.



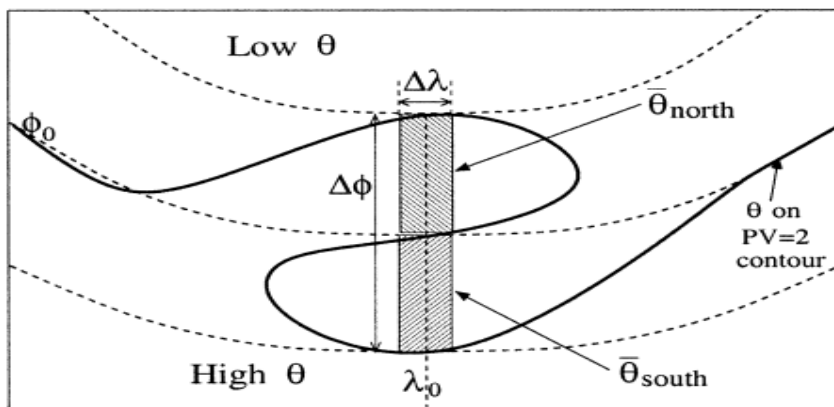
شکل ۴. میانگین سه‌ماهه (نوامبر، دسامبر و ژانویه) انرژی جنبشی پیچک‌های گذرا (EKE) برحسب  $ms^{-2}$  میانگین‌گیری شده بین سطوح ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال.

#### ۴ نتایج شاخص‌ها

##### ۱-۴ شاخص SFI

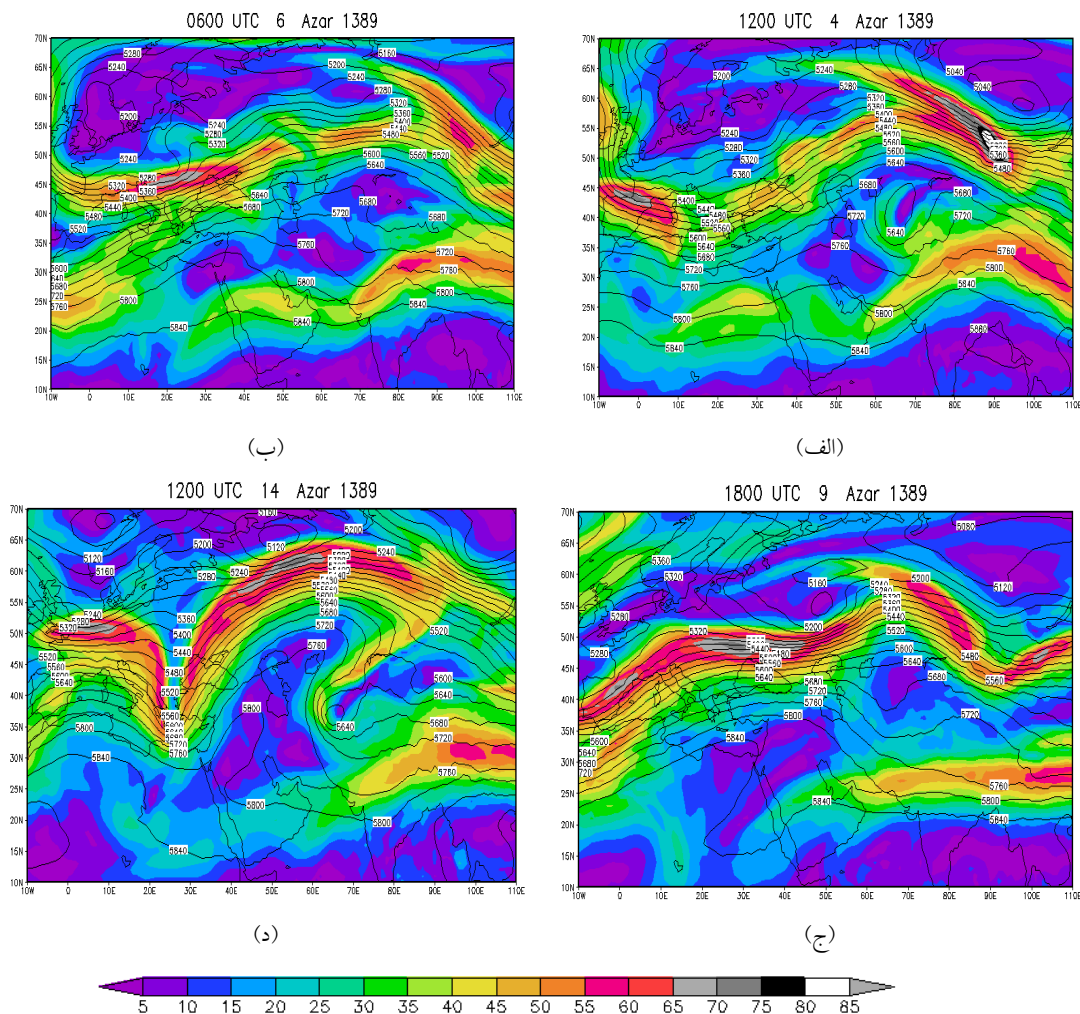
بازه عرض جغرافیایی هریک از نواحی موردنیاز برای محاسبه شاخص SFI، که پیش‌تر شرح داده شده به قرار زیر است: STJ بین ۲۲-۳۲ درجه شمالی، GAP بین ۳۷-۵۰ درجه شمالی و PFJ بین ۵۵-۷۰ درجه شمالی. بازه طول جغرافیایی منتخب برای هر سه ناحیه از ۵۰ درجه شرقی تا ۵۰ درجه غربی است تا بتوان نواحی اطلس، اروپا، مدیترانه، خاورمیانه و ایران را پوشش داد. مقدار میانگین

پشته روی ایران تشکیل شده است و دو ناوه نیز در دو سوی آن دیده می‌شود. با وجود اینکه الگوی ایجاد شده تقریباً شبیه بندال است و به نظر می‌آید بتوان آن را به مثابه بندال پشته‌ای ایستا و در روزهای بعدی به منزله بندال امگا در نظر گرفت، اما در واقع، جزء هیچکدام از سه نوع بندال شناخته شده قرار نمی‌گیرد. در این دوره از آلودگی هوا، سرعت باد روی ایران در تراز ۳۰۰ hPa به شدت کاهش یافته و به حدود ۵ m/s رسیده است.



شکل ۵. طرحواره‌ای از واژگونی پربند  $\theta$  روی سطح PV و پارامترهای لازم برای محاسبه شاخص بندال در طول جغرافیایی  $\lambda_0$  (پلی و هاسکینز، ۲۰۰۳).





شکل ۶. میدان ارتفاع ژئوپتانسیلی ۵۰۰ hPa (خطوط توپر) و بزرگی سرعت باد افقی تراز ۳۰۰ hPa برحسب  $\text{ms}^{-1}$  (سایه‌های رنگی). (الف) ساعت UTC ۱۲۰۰ روز چهارم آذر، (ب) ساعت UTC ۰۶۰۰ روز ششم، (ج) ساعت UTC ۱۸۰۰ روز نهم، (د) ساعت UTC ۱۲۰۰ روز چهاردهم.

گرفته‌اند، مقیاس محدودی داشتند، درحالی‌که بازه طول جغرافیایی منتخب برای محاسبه شاخص ماهانه گسترده‌تر است و سبب حذف نواحی محلی شده است. ماه ژانویه در مقایسه با دو ماه قبل، مقدار منفی شاخص یا شارش دوشاخه‌شده را نشان می‌دهد. گرچه کمیت SFI بهنجارشده ماهانه دارای افت‌وخیزی بین مقادیر مثبت و منفی است، اما مقدار میانگین SFI بهنجارشده سه‌ماهه در این بازه ۰.۰۱- است که نشان از شارش دوشاخه‌شده ولی

برای این بازه سه‌ماهه در تراز ۳۰۰ hPa برابر با  $-5/47 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$  و انحراف استاندارد آن  $9/62 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$  است. میزان بهنجارشده SFI هر ماه در جدول ۱ آمده است. در آذرماه ۱۳۸۹ شاخص مثبت بوده که نشان‌دهنده دوشاخه نشدن شارش است. شایان گفتن است که ناحیه‌های کمینه سرعت در وردسپهر زبرین که به‌طور پیاپی بر فراز ایران در نیمه نخست آذرماه ۱۳۸۹ شکل

همان‌طور که ذکر شد، اثرات محلی کمینه‌های سرعت مشاهده شده در نیمه نخست آذرماه روی ایران، به علت میانگین‌گیری بلندمدت و انتخاب نوار طول جغرافیایی گسترده حذف می‌شود. برای داشتن درکی از شارش دوشاخه‌شده به‌طور محلی، زیربازه زمانی ۱۸-۲۳ آذرماه به منزله بازه‌ای که در آن دوشاخه‌شدگی جریان جتی بر فراز آسیای میانه روی داده، انتخاب و شاخص بهنجار شده به‌صورت روزانه به دو شکل محاسبه شده است. براساس نقشه‌های همدیدی (نشان داده نشده)، جت دوشاخه در این بازه بر فراز آسیای میانه (بالاتر از عرض ۵۰ درجه جغرافیایی) حضور دارد.

در شکل نخست، با استفاده از نواحی طول و عرض جغرافیایی که پیش‌تر تعیین شد، شاخص روزانه برای دوره ۹۲ روزه محاسبه شده است. مقدار SFI با تفریق میانگین ۹۲ روزه از مقدار SFI هر روز و تقسیم نتیجه حاصل بر انحراف استاندارد ۹۲ روزه بهنجار می‌شود. از میان این مقادیر بهنجار شده، مقادیر ۱۸-۲۳ آذر در جدول ۳ آمده است. همان‌طور که جدول ۳ نیز نشان می‌دهد، مقادیر حاکم بر این زیربازه زمانی، به‌ویژه در ۵ روز نخست منفی

ضعیف دارد. با استفاده از جدول ۲ به بررسی همبستگی بین SFI و مؤلفه‌های آن در این ۳ ماه پرداخته شده است. همبستگی بزرگ مثبت بین SFI و  $\zeta_{PFJ}$  نشان می‌دهد که بزرگی و شدت تاوایی PFJ در شدت SFI تاثیر بسزایی دارد، درحالی‌که تاوایی GAP با همبستگی منفی با SFI بر تاوایی واچرخندی در این ناحیه تاکید می‌کند. همبستگی  $\zeta_{STJ}$  و مقدار SFI با مقادیر مثبت کوچک‌تر نسبت به همبستگی PFJ و مقدار SFI، از تاثیر چشمگیر  $\zeta_{STJ}$  بر SFI حکایت دارد که با حضور همیشگی‌اش در شدت SFI نقش ایفا می‌کند. شایان گفتن است که مقادیر جدول ۲ با آنچه در جدول متناظر در کار بالسالشولز و همکاران (۲۰۰۱) آمده، از نظر علامت و تا حدی هم بزرگی، هم‌خوانی دارند. تنها مورد متفاوت، همبستگی  $\zeta_{STJ}$  و  $\zeta_{PFJ}$  با مقدار  $-۰/۱۱$  است که در مقابل مقدار مثبت  $۰/۲۸$  این همبستگی در کار آنها قرار دارد. علت وجود این مقدار منفی را می‌توان با تغییرات نامنظم این دو جریان جتی، به‌ویژه جت جبهه قطبی، مرتبط دانست که سبب ناراستایی این دو جریان با ایجاد شارش دوشاخه می‌شود.

جدول ۱. مقادیر SFI بهنجار شده برای ۳ ماه مورد بررسی در تراز ۳۰۰ hPa.

ماه	نوامبر ۲۰۱۰	دسامبر ۲۰۱۰	ژانویه ۲۰۱۱
SFI بهنجار شده	۰/۰۲	۰/۴	-۰/۴۵

جدول ۲. همبستگی SFI و مؤلفه‌های آن برای دوره سه‌ماهه مورد بررسی در تراز ۳۰۰ hPa.

شاخص و اجزای آن	SFI	$\zeta_{STJ}$	$\zeta_{GAP}$	$\zeta_{PFJ}$
SFI	-----	۰/۴۵	-۰/۸۸	۰/۷۸
$\zeta_{STJ}$	۰/۴۵	-----	-۰/۴۷	-۰/۱۱
$\zeta_{GAP}$	-۰/۸۸	-۰/۴۷	-----	-۰/۴۹
$\zeta_{PFJ}$	۰/۷۸	-۰/۱۱	-۰/۴۹	-----

جدول ۳. مقادیر SFI بهنجارشده برای زیربازه زمانی ۶ روزه ۱۸-۲۳ آذر ۱۳۸۹ بین ۵۰ درجه شرقی تا ۵۰ درجه غربی در تراز ۳۰۰ hPa.

روز	۱۸ آذر	۱۹ آذر	۲۰ آذر	۲۱ آذر	۲۲ آذر	۲۳ آذر
SFI بهنجارشده	-۰/۲۴	-۱/۱۶	-۰/۹۶	-۱/۵۶	-۰/۰۰۳	۱/۵۳

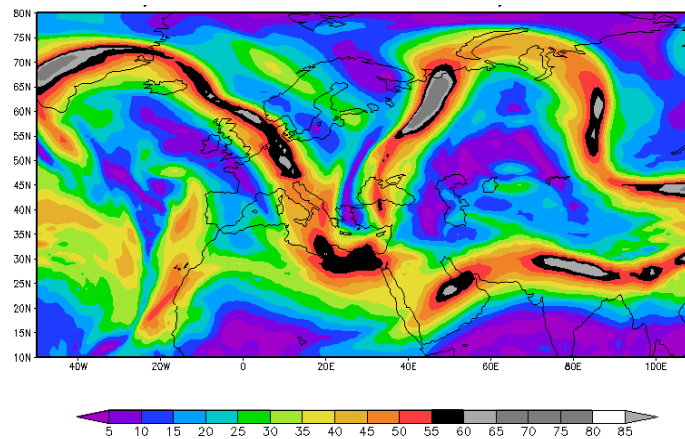
مشخص می‌شود. بازه عرض جغرافیایی هریک از نواحی فوق به شرح زیر است: STJ بین ۲۰-۳۲ درجه شمالی، GAP بین ۳۸-۵۳ درجه شمالی و PFJ بین ۵۸-۷۰ درجه شمالی. بازه طول جغرافیایی منتخب برای هر سه ناحیه بین ۴۰-۸۰ درجه شرقی است. با استفاده از بازه‌های طول و عرض جغرافیایی تعیین شده، شاخص روزانه برای دوره ۹۲ روزه محاسبه شده است. مقدار SFI با تفریق میانگین ۹۲ روزه از مقدار SFI هرروز و تقسیم نتیجه حاصل بر انحراف استاندارد ۹۲ روزه بهنجار می‌شود. از میان این مقادیر بهنجار شده، مقادیر ۱۸-۲۳ آذر در جدول ۴ آمده است. جدول ۴ نسبت به جدول ۳ مقادیر مثبت را در ابتدای زیربازه نشان می‌دهد که نشانگر شارش دوشاخه‌نشده است. نکته شایان توجه آن است که مقادیر منفی نشان‌دهنده شارش دوشاخه‌شده در پایان زیربازه بیشتر حضور دارند. شایان گفتن است که تا روز ۲۶ آذر نیز همچنان مقادیر منفی حضور دارند (در جدول نشان داده نشده است). اختلاف بین جدول‌های ۳ و ۴ را می‌توان با بازه طول جغرافیایی انتخاب شده نیز مرتبط دانست. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که با داشتن بازه زمانی طولانی و بازه مکانی مناسب، نمایه دقیق‌تری به دست می‌آید.

بوده است که نشان از شارش دوشاخه‌شده و مراحل رشد و بلوغ بندال موقت دارد. به تدریج از روز ۲۲م میزان منفی شاخص کاهش می‌یابد و به صفر نزدیک می‌شود. در نهایت در روز پایانی این زیربازه مقدار مثبت شاخص، از فاز میرایی بندال موقت در آن ناحیه و به پایان رسیدن شارش دوشاخه حکایت دارد. می‌توان نتیجه گرفت که محاسبه شاخص، چه به صورت روزانه و چه به صورت ماهانه یا فصلی، معیار مناسبی برای دوشاخه‌شدگی شارش و حضور بندال به دست می‌دهد. بنابراین انتظار می‌رود با پیش‌بینی تاوایی و ردسپهر زبرین در روزهای آینده بتوان از این شاخص در حکم ابزاری برای پیش‌بینی شکل‌گیری دوشاخه‌شدگی شارش و حضور بندال استفاده کرد.

در شکل دوم، محاسبه مشابه با آنچه در بالا آمد، اما این بار با بازه‌های طول و عرض جغرافیایی محدود به بندال آسیای میانه برای زیربازه زمانی ۱۸-۲۳ آذرماه (شکل ۷) صورت گرفته است. از این راه می‌توان با مقایسه نتایج این دو شکل محاسبه اطلاعاتی به دست آورد. با استفاده از نقشه‌های هافمولر، بزرگی سرعت باد (شکل ۸) و تاوایی نسبی (شکل نشان داده نشده) تراز ۳۰۰ hPa طول و عرض جغرافیایی مناسب جت جبهه قطبی، جت جنب‌حاره و ناحیه کمینه سرعت بین این دو برای این مورد محلی

جدول ۴. مقادیر SFI بهنجارشده برای زیربازه زمانی ۶ روزه ۱۸-۲۳ آذر ۱۳۸۹ بین ۴۰-۸۰ درجه شرقی در تراز ۳۰۰ hPa.

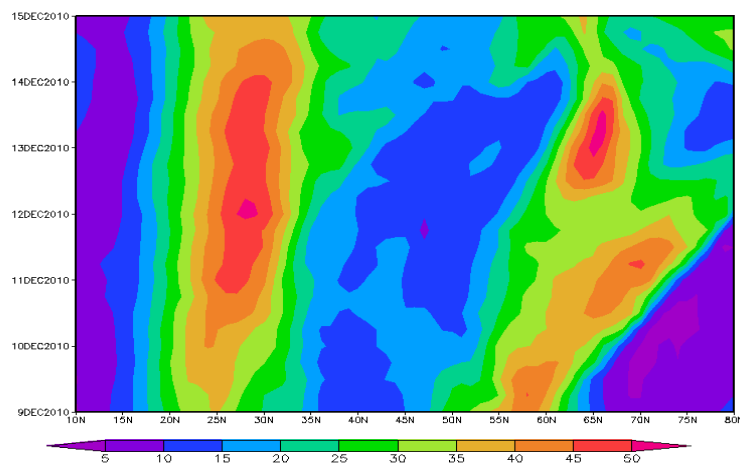
روز	۱۸ آذر	۱۹ آذر	۲۰ آذر	۲۱ آذر	۲۲ آذر	۲۳ آذر
SFI بهنجارشده	۰/۸۳	۱/۱۷	-۰/۲۶	۱/۰۵	-۰/۳۳	-۱/۳۱



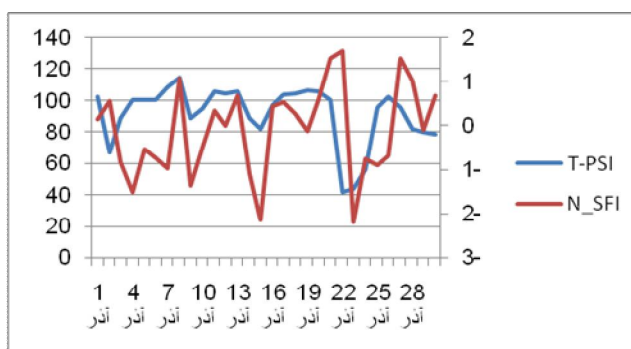
شکل ۷. میدان بزرگی سرعت باد تراز ۳۰۰ hPa در ساعت ۰۰:۱۲ روز ۲۰ آذرماه ۱۳۸۹.

دوشاخه‌شدگی شارش است و وجود سرعت‌های کمینه بین دو جریان جتی را به خوبی می‌توان دید. میزان PSI نیز مطابق انتظار مقادیر بالاتر از مرز متوسط را نشان می‌دهد. به‌علاوه، بازه‌های با مقدار مثبت SFI با کاهش میزان PSI همراه نبوده است. اُفت‌وخیز بین مقادیر مثبت و منفی با آنچه در نقشه‌های بزرگی سرعت باد مداری مبنی بر وجود کمینه سرعت در ورود سپهر زیرین به صورت موقت در یک روز و نبود آن در روز دیگر، هم‌خوانی دارد. نکته شایان توجه در ارتباط با مقادیر منفی SFI این است که قله مقدار PSI با تاخیر نسبت به مقادیر منفی SFI روی می‌دهد. برای

در ادامه، تحول زمانی شاخص استاندارد آلودگی هوا (PSI) و شاخص دوشاخه‌شدگی شارش (SFI)، در شکل ۹ از ۱-۳۰ آذرماه ۱۳۸۹ مقایسه می‌شود. مقادیر PSI برای ایستگاه ژئوفیزیک و مقادیر SFI آورده شده، میانگین فضایی روی نوار طول جغرافیایی ۵۰-۵۴ درجه شرقی که تهران را دربرمی‌گیرد، هستند. مقادیر PSI کل روی محور قائم سمت چپ و مقادیر SFI به‌نچار شده روی محور قائم سمت راست نشان داده شده است. در بیشتر این دوره میزان PSI از مرز متوسط (۵۰) عبور کرده است. در بازه آذرماه ۱۳۸۹ حضور مقادیر منفی SFI نشان‌دهنده



شکل ۸. نقشه هافمولر بزرگی سرعت باد تراز ۳۰۰ hPa برای دوره ۱۸-۲۳ آذرماه ۱۳۸۹.

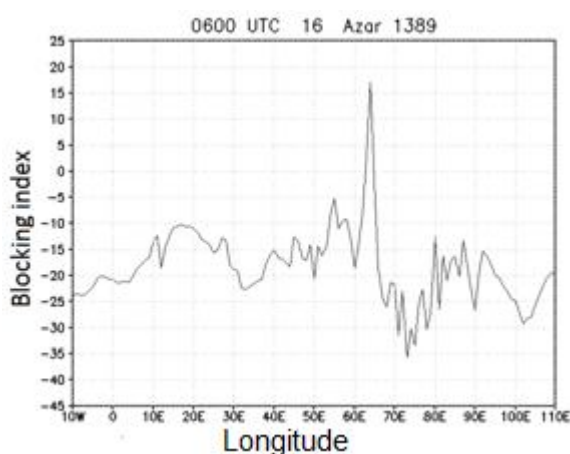


شکل ۹. تحول زمانی دو شاخص PSI و SFI، بهنجارشده در آذرماه ۱۳۸۹.

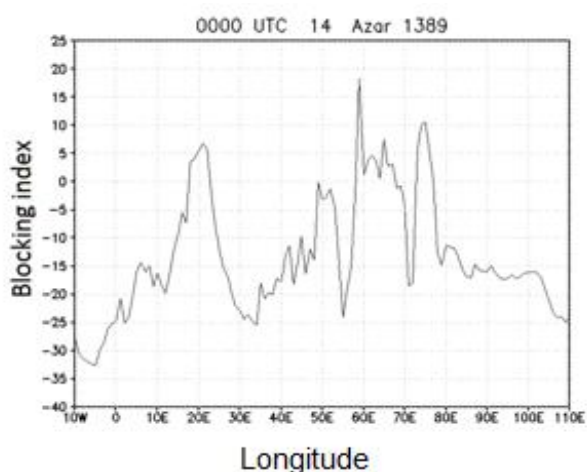
#### ۲-۴ شاخص $\beta$

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، مثبت بودن شاخص  $\beta$  در یک منطقه نشانه‌ای از رویداد بندال در آن ناحیه است. نمودار شاخص  $\beta$  نشان می‌دهد که مقدار شاخص در محدوده ۴۰-۸۰ درجه شرقی در سه زیربازه زمانی مثبت بوده است. اولین زیربازه با شاخص مثبت مطابق شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ب از ساعت ۰۰:۰۰ UTC روز چهاردهم تا ساعت ۰۶:۰۰ UTC روز شانزدهم مشاهده شده است. همان‌طور که ذکر شد هماهنگ با نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی، تاوایی

مثال در روزهای پانزدهم و بیست‌وسوم آذر که بیشترین مقدار منفی SFI دیده می‌شود، قله مقدار PSI چند روز بعد از آن روی می‌دهد. این امر با مشاهدات مبنی بر وجود تاخیر زمانی بین واداشت جوئی در مقیاس‌های بزرگ‌تر از محلی و وقوع آلودگی هوا هم‌خوانی دارد. این تاخیر را می‌توان به اثر انباشت نسبت داد. برای مثال درحالی‌که روز چهارم آذر با مقدار منفی SFI همراه بوده، در روزهای پس از آن مقدار PSI کل بیشتری نسبت به چهارم آذر دیده می‌شود.

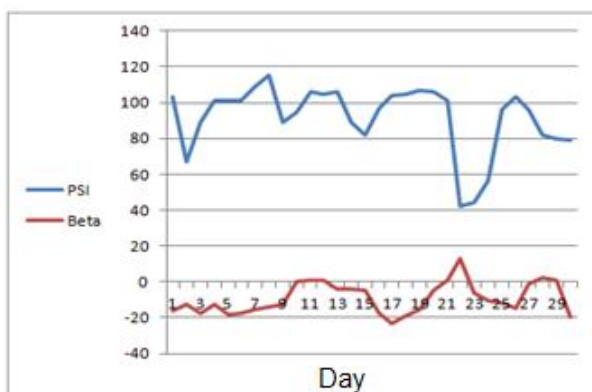


(الف)



(ب)

شکل ۱۰. تغییر شاخص  $\beta$  برحسب کلونین با طول جغرافیایی برای (الف) ساعت ۰۰:۰۰ UTC روز چهاردهم، (ب) ساعت ۰۶:۰۰ UTC روز شانزدهم.



شکل ۱۱. تحول زمانی دو شاخص بهنجار شده PSI و  $\beta$  در آذرماه ۱۳۸۹.

عرض‌های جغرافیایی بالاتر از ایران قابل مشاهده است. بنابراین با توجه به اینکه در سایر نقشه‌ها اثری از بندال روی منطقه ایران دیده نشده است می‌توان نتیجه گرفت که در این دو زیربازه واژگونی نصف‌النهاری دمای پتانسیلی در عرض‌های بالاتر از ۵۰ درجه شمالی موجب مثبت شدن شاخص شده است.

به‌طور کلی پس از بررسی نقشه‌ها در آذرماه ۱۳۸۹ و در نظر گرفتن خطاهای پیش آمده در محاسبات، این نتیجه به‌دست می‌آید که در این ماه بندال بارزی روی ایران اتفاق نیفتاده است. اگر هم از روز چهاردهم تا شانزدهم واژگونی دمای پتانسیلی یا مثبت بودن شاخص مشاهده شده، طبق تعریف پلی و هاسکینز (۲۰۰۳)، یک بندال آبی محلی بوده و دوره‌ای با تداوم زمانی کافی که بتوان آن را به معنای کلاسیک بندال در نظر گرفت، رخ نداده است.

در اینجا مقایسه‌ای از تحول زمانی شاخص  $\beta$  محاسبه شده از روی رابطه (۳) و شاخص آلودگی هوای تهران در دوره مورد بررسی صورت می‌گیرد. در بخش‌های پیشین، مقادیر شاخص از ۱۰ درجه غربی تا ۱۱۰ درجه شرقی و به‌صورت چهار مقدار در هر روز (فاصله‌های زمانی ۶

پتانسیلی سطح ۳۲۰K و الگوهای PV- $\theta$ ، این زیربازه زمانی با مهم‌ترین دوره آلودگی هوا در آذرماه هم‌خوانی خوبی را نشان می‌دهد. گرچه وجود بندال در نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی به‌طور بارز مشخص نیست، اما واژگونی توزیع دمای پتانسیلی روی سطح ۲ PVU مشاهده می‌شود و نمودارهای PV- $\theta$  وقوع بندال را در این زیربازه نشان می‌دهند. با مثبت شدن شاخص می‌توان انتظار داشت که طبق تعریف پلی و هاسکینز (۲۰۰۳) یک بندال آبی محلی رخ داده باشد، هرچند که تعریف کلاسیک بندال را از نظر مدت‌زمان استقرار برآورده نمی‌کند.

دومین و سومین زیربازه‌هایی که مقدار شاخص  $\beta$  در آنها مثبت شده، از ساعت UTC ۱۲۰۰ روز بیستم تا ساعت UTC ۰۶۰۰ روز بیست‌ونجم و همچنین از ساعت UTC ۱۲۰۰ روز بیست‌وهفتم تا ساعت UTC ۱۸۰۰ روز سی‌ام روی داده‌اند. گرچه مقادیر مشاهده شده شاخص در این حالت‌ها مثبت است، اما نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی و تاوایی پتانسیلی روی سطح ۳۲۰ K همراه با بررسی الگوهای PV- $\theta$  نشانی از وجود بارز بندال و واژگونی نصف‌النهاری توزیع دمای پتانسیلی ندارند. البته یک منطقه واژگونی نصف‌النهاری دمای پتانسیلی به‌نسبت بزرگ در

ساعت) محاسبه شده است. باتوجه به اینکه شاخص آلودگی مربوط به هوای تهران بوده و در هر روز یک مقدار برای شاخص در دست است، بنابراین قبل از رسم نمودار به تعیین برآوردی از مقدار  $\beta$  روزانه در تهران پرداخته شد. با در نظر گرفتن طول جغرافیایی ۵۲ درجه شرقی برای تهران و میانگین گیری چهار مقدار  $\beta$  روزانه برای آن، میانگین شاخص  $\beta$  برای مقایسه با شاخص آلودگی هوای تهران تعیین شد. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می شود از روز دهم تا سیزدهم که شاخص آلودگی در وضعیت ناسالم قرار دارد، شاخص  $\beta$  نیز هماهنگ با بروز بندان آبی محلی روی تهران مثبت بوده است. در سایر زیربازه های زمانی با مقدار مثبت شاخص  $\beta$ ، شاخص آلودگی در وضعیت سالم قرار داشته است که علت این ناهماهنگی می تواند بروز بندان در عرض های بسیار بالاتر باشد.

### ۳ نتیجه گیری

به لحاظ رخداد آلودگی هوا در منطقه تهران در دوره آذرماه ۱۳۸۹، به بررسی این رویداد از دو دیدگاه دوشاخه شدگی جت و شکست موج راسبی با فریافت تاوایی پتانسیلی - دمای پتانسیلی در سطوح زیرین جو در حکم مشخصه هایی از ساختار دینامیکی بزرگ مقیاس جو پرداخته شده است. شاخصی برای هریک از دو دیدگاه معرفی و نتایج حاصل از آنها عرضه و مقایسه شده است. تحلیل نقشه های همدیدی بیانگر وجود دو زیربازه زمانی طولانی آلودگی هوا در آذرماه، یکی از سوم تا هشتم و دیگری از نهم تا هجدهم بوده است که هر دو با استقرار پشته ای روی ایران، ناوهای در شرق آن و دوشاخه شدن جت و قرارگیری ایران بین دو شاخه جت همراه بودند. مقدار مثبت شاخص شکست موج  $\beta$  که با محاسبه دمای پتانسیلی روی وردایست دینامیکی به دست می آید، نشان دهنده واژگونی گرادیان نصف النهاری دمای

پتانسیلی و رخداد بندان است. مقادیر مثبت این شاخص در محدوده جغرافیایی ایران (۴۰-۸۰ درجه شرقی) در زیربازه های ۱۴-۱۶، ۲۰-۲۵ و ۲۷-۳۰ آذرماه دیده شده است. زیربازه ۱۴-۱۶ آذرماه با دومین زیربازه آلودگی هوا (۹-۱۸ آذرماه) هم خوانی خوبی را نشان می دهد و می توان آن را در حکم یک بندان آبی محلی در نظر گرفت. با این حال در دو زیربازه دیگر، مقدار مثبت شاخص  $\beta$  از واژگونی گرادیان نصف النهاری دمای پتانسیلی روی وردایست دینامیکی در عرض های جغرافیایی بسیار بالاتر از ایران حاصل می شود. شاخص دوشاخه شدگی شارش، بر پایه میانگین تاوایی نسبی در تراز ۳۰۰ hPa، با ثبت مقادیر منفی برای زیربازه ۱۸-۲۳ آذرماه با آنچه شاخص  $\beta$  برای زیربازه ۲۰-۲۵ آذرماه مبنی بر وجود بندان آبی در عرض های بالاتر جغرافیایی (آسیای میانه) پیش بینی می کند، هم خوانی دارد. زیربازه ۱۸-۲۳ آذرماه به منزله بازه رشد بلوغ و میرایی بندان گذرای امگا بر فراز آسیای میانه شناسایی شده است. این هم خوانی نشان دهنده درستی و امکان کاربرد این دو شاخص در پیش بینی آلودگی هوا برای مناطق شهری در هنگام وقوع بندان و جداشدگی جت است.

محاسبه شاخص برای زیربازه ۱۸-۲۳ آذرماه به ازای دو بازه طول جغرافیایی متفاوت نشان می دهد که هرچه بازه طول جغرافیایی گسترده تر و بازه مورد بررسی طولانی تر باشد، برآورد بهتری از شاخص به دست می آید. مقادیر منفی SFI با حضور مقادیر بزرگ PSI مبنی بر وجود آلودگی زیاد در تهران در آذرماه ۱۳۸۹ انطباق دارد. حضور مقادیر مثبت SFI با کاهش PSI در همان روزها همراه نبوده است. اُفت و خیز بین مقادیر مثبت و منفی SFI با شکل گیری کمینه سرعت در وردسپهر زیرین و از بین رفتن آن هم خوانی دارد. همچنین بین مقادیر منفی SFI و قله مقادیر PSI تاخیر زمانی دیده می شود. این امر با مشاهدات دیگر مبنی بر تاخیر زمانی بین واداشت جوی در

محب‌الحجه، ع. ر.، و مرادی، م.، ۱۳۸۱، فرایابی تاوایی پتانسیلی راسبی-ارتل روی سطوح هم‌دمای پتانسیلی، همایش پیش بینی عددی وضع هوا، تهران: سازمان هواشناسی کشور، ۱۷ مهر ماه، ۱۳۸۱.

Adams, J. C., and Swarztrauber, P. N., 1999, SPHEREPACK 3.0: A model development facility: *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 1872–1878.

Bals-Elsholz, T. M., Atallah, E. H., Bosart, L. F., Wasula, T. A., Cempa, M. J., and Lupo, A. R., 2001, The wintertime Southern Hemisphere split jet: Structure, variability, and evolution: *J. Climate*, **14**, 4191–4215.

Chen, B. C., Smith, S. R., and Bromwich, D. H., 1996, Evolution of the tropospheric split jet over the South Pacific Ocean during the 1986–89 ENSO cycle: *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 1711–1731.

Haynes, P. H., and McIntyre, M. E., 1987, On the evolution of vorticity and potential vorticity in the presence of diabatic heating and other forces: *J. Atmos. Sci.*, **44**, 828–841.

Hoskins, B. J., McIntyre, M. E., and Robertson, A. W., 1985, On the use and significance of isentropic potential vorticity maps: *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **111**, 877–946.

Kidson, J. W., and Sinclair, M. R., 1995, The influence of persistent anomalies on Southern Hemisphere storm tracks: *J. Climate*, **8**, 1938–1950.

Pelly, J. L., 2001, The Predictability of Atmospheric Blocking. Ph.D. Dissertation, The University of Reading, Department of Meteorology, Reading, UK, 198 pp.

Pelly, J., and Hoskins, B. J., 2003: A new perspective on blocking: *J. Atmos. Sci.*, **60**, 743–755.

Taljaard, J. J., 1972, Synoptic meteorology of the Southern Hemisphere. *Meteorology of the Southern Hemisphere: Meteor. Monogr.*, **35**, Amer. Meteor. Soc., 139–211.

Thorncroft, C. D., Hoskins, B. J., and McIntyre, M. E., 1993, Two paradigms of baroclinic-wave life-cycle behavior: *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **119**, 17–55.

Tyrlis, E., and Hoskins, B. J., 2007, Aspects of a Northern Hemisphere atmospheric blocking climatology: *J. Atmos. Sci.*, **65**, 1638–1652.

مقیاس‌های بزرگ‌تر از محلی و وقوع آلودگی هوا هم‌خوانی دارد.

به‌طورکلی، عامل هواشناختی بزرگ‌مقیاس تعیین‌کننده در تشدید آلودگی هوای تهران در آذرماه ۱۳۸۹ را می‌توان جابه‌جایی منطقه فعالیت همدیدی به عرض‌های بالاتر و قرار گرفتن ایران در منطقه غیرفعال دانست که با از بین بردن امکان تهویه هوا شرایط را برای انباشت آلاینده‌ها مساعد کرده است. روشن است که پیش از هرگونه کمی‌سازی ارتباط دو شاخص بزرگ‌مقیاس معرفی شده با شرایط حاد آلودگی هوا، بررسی در مجموعه بزرگی از موارد لازم است که می‌توان در پژوهش‌های بعدی بدان پرداخت.

#### منابع

احمدی گیوی، ف.، محب‌الحجه، ع. ر.، و قرایلو، م.، ۱۳۸۴، مطالعه دینامیک سامانه‌های چرخندی روی ایران از دیدگاه تاوایی پتانسیلی: مطالعه موردی برای آذرماه ۱۳۸۲: *مجله فیزیک زمین و فضا*، جلد ۳۲(۱)، ۱۳۸۵.

بیدختی، ع.، ع. ر.، و شرعی‌پور، ز.، ۱۳۸۸، شرایط هواشناختی جو بالا و وضعیت حاد آلودگی هوا (مطالعه موردی: شهر تهران): *مجله محیط‌شناسی*، **۵۲**، زمستان ۱۳۸۸.

قرایلو، م.، ۱۳۸۳، مطالعه دینامیک سامانه‌های چرخندی بر روی ایران از دیدگاه تاوایی پتانسیلی برای آذرماه ۱۳۸۲: پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.