

بررسی اقلیم‌شناختی بندال‌های آسیا و اروپا با دو شاخص در دوره ۱۹۵۰-۲۰۱۰

سارا فهیمی^۱، فرهنگ احمدی گیوی^{۲*} و مجید مزرعه‌فراهانی^۲

^۱دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران

^۲موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۸/۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۴/۱۸)

چکیده

در این مقاله، بررسی اقلیم‌شناختی پدیده بندال طی یک دوره ۶۱ ساله (۱۹۵۰-۲۰۱۰) در بخشی از نیمکره شمالی، شامل آسیا و اروپا و قسمت شرقی اقیانوس اطلس با به‌کارگیری داده‌های شبکه‌ای NCEP-NCAR صورت گرفته است. با استفاده از دو روش آشکارسازی بندال یک‌بعدی و دو‌بعدی، به‌ترتیب تعداد ۱۰۵۴ و ۷۲۹ رویداد بندال در دوره زمانی و ناحیه موردنظر، شناسایی شد. براساس نتایج این بررسی، تعداد رویدادهای بندال این دوره دارای یک روند نسبتاً کاهشی برای کل منطقه مورد بررسی و منطقه ایران است. همچنین توسط این دو روش، یعنی شاخص‌های باریو پدرو و همکاران (۲۰۰۵) و دیپاو و همکاران (۲۰۰۶)، ویژگی‌های رویدادهای بندال از قبیل بسامد، طول عمر، محل وقوع، شدت و مراکز آنها بررسی و نتایج ویژگی‌های اقلیمی، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. طبق بررسی‌های صورت گرفته، بیشترین وقوع بندال‌ها در منطقه مورد بررسی از نظر توزیع مکانی و در همه فصل‌ها، در محدوده طول جغرافیایی $47/5^{\circ}E$ تا $30^{\circ}W$ و از نظر وقوع بیشینه شدت‌ها روی شرق اطلس واقع در $5^{\circ}E$ تا $30^{\circ}W$ قرار دارد. از طرفی، در فصل‌های زمستان و بهار بسامد وقوع بندال و دوره استمرار آن مقادیر بیشتری دارند، درحالی که در فصل تابستان این مقادیر کمینه است. نتایج بسامد وقوع در عرض‌های جغرافیایی و فصل‌های گوناگون نشان می‌دهد که برای شاخص اول، عرض جغرافیایی ثابت همراه با بیشینه‌های بدون تغییر در فصل‌های گوناگون است، اما برای شاخص دوم، این بازه متغیر است و محل بیشینه وقوع بندال‌ها در عرض $55^{\circ}N$ در فصل‌های بهار، زمستان و پاییز، و در فصل تابستان با جابه‌جایی به سمت عرض‌های بالاتر، در عرض $62/5^{\circ}N$ قرار دارد. به‌علاوه، در مقایسه نتایج دو شاخص دیده می‌شود که بندال‌های شناسایی شده در بازه طول جغرافیایی با شاخص دوم، دارای درصد بسامد وقوع کمتری نسبت به شاخص اول در فصل‌های زمستان و بهار هستند، حال آنکه الگوهای مربوط به دو شاخص در فصل‌های تابستان و پاییز تقریباً مشابه هستند.

واژه‌های کلیدی: بررسی اقلیم‌شناختی، شاخص بندال جوئی، آسیا، اروپا، ویژگی‌ها، فصل‌ها

Climatological study of Asian and European blockings by means of two indices in the period of 1950 -2010

Sara Fahimi¹, Farhang Ahmadi-Givi^{2*} and Majid Mazraeh Farahani²

¹Science and Research Tehran Branch, Azad University, Iran

²Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 29 October 2012, accepted: 9 July 2013)

*Corresponding author:

ahmadig@ut.ac.ir

*نگارنده رابط:

Summary

Blocking is one of the most important weather systems in mid-latitudes that have significant effects on atmospheric air flow and regional weather conditions. In this study, climatology of Asian and European blockings was investigated for the period of 1950–2010. The data used in this study were 500-hPa geopotential heights from the National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) reanalysis dataset with $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ resolution. The blocking events were detected using two indices; the first one, a one-dimensional index, was the new version of the Tibaldi and Molteni (1990) index presented by Barriopedro et al. (2005) and the second one, a two-dimensional index, was presented by Diao et al. (2006). Then, applying these indices, the characteristics of detected blockings such as frequency, duration, intensity, position of center and extension were obtained and compared with each other.

In the period of this study, 1054 and 729 blocking events were identified using the first and second indices, respectively. The spatial and temporal distribution analysis showed that blocking was most prevalent in the longitude band between 30°W and 47.5°E and most of the maximum intensity occurrence was in the east of Atlantic sector between 30°W and 5°E .

It was found that blocking events were more frequent in the Atlantic-European sector than in the other sectors in winter, spring and autumn, but more persistent in the Atlantic-European sector than in the Asian sector for all seasons. Additionally, the maximum amplitude of intensity was 3.0 for the first index and 150 gpm for the second index. A comparison of the blocking events in the Asian sector with the Atlantic-European sector indicated that the intensity of winter events in the European sector was higher than that of the other seasons. This may be due to synoptic-scale eddies and planetary waves which are more active and stronger in winter compared to the other seasons.

The trend analysis displayed that the number of blocking events in the period of this study was decreasing slightly in the entire region, including Iran. The number of events was significantly more in the west and northwest of Iran than in the central and eastern parts.

Also, the results of two indices showed that the latitude band of blocking occurrence and its maximum frequency was similar in the different seasons for the first index, whereas this band changed for the second index. The maximum frequency of blocking event was seen in latitude 55°N for winter, spring and autumn and in latitude 62.5°N for summer. Thus, it indicated that blockings occurred in a higher-latitude band in summer than the other seasons. In addition, it was found that there was a good consistency between the longitude band of blocking event, including the Asian and European sectors, and its frequency in summer and autumn using the two indices. In the other seasons, the longitude band of the Asian and European blocking events, especially in the eastern part of the Asian sector, was different for the two indices. The other noticeable point was that the activity centers of blocking events in winter, spring, and autumn obtained by the second index were located more westward of the Atlantic-European sector and more eastward of the Asian sector than those obtained by the first index.

The main conclusion was that since the Diao et al. (2006) index is a two-dimensional one, it is able to identify better and more precisely the blocking events and their characteristics as compared to the Barriopedro et al. (2005) index.

Keywords: Climatology, blocking index, Asia, Atlantic-European region, characteristics, season

۱ مقدمه

دانش جوّ یکی از دانش‌هایی است که ارتباط تنگاتنگی با زندگی انسان‌ها دارد و هر روزه می‌توان تاثیر آن را بر زمینه‌های گوناگون فعالیت بشری مشاهده کرد. از این رو بررسی پدیده‌های جوّی و درک سازوکار آنها برای پی بردن به ویژگی‌های آب‌وهوایی مناطق گوناگون و پیش‌بینی بهتر و دقیق‌تر وضعیت جوّی، اهمیت بسیاری دارد. بندال یکی از پدیده‌های بزرگ‌مقیاس است که طول عمری بین ۵ تا ۱۰ روز و گسترش مکانی بیش از ۱۰۰۰ کیلومتر دارد. این پدیده با حرکت از عرض‌های پایین به سمت عرض‌های بالا در آنجا ساکن می‌شود و چندین روز، بدون آنکه حرکت محسوسی به سمت غرب یا شرق داشته باشد، شارش‌های جوّی در سطوح گوناگون را تحت‌تاثیر قرار می‌دهد. به همین علت، بندال از آن دسته پدیده‌هایی است که پیش‌بینی‌های میان‌مدت یک هفته‌ای را دچار مشکل می‌سازد و مدل‌های پیش‌بینی را با خطا مواجه می‌کند. بندال در هنگام وقوع، تاثیر قابل‌توجهی بر وضعیت جوّی منطقه تحت نفوذش می‌گذارد و نواحی مجاور کم‌فشار (یا کم‌فشارهای) بندال همراه با بارش‌های متوالی است، درحالی‌که شرایط آب‌وهوایی نواحی مجاور پُرفشار بندال، پایدار و تقریباً خشک است. در نتیجه این پدیده می‌تواند در مواردی، زمینه را برای وقوع ناپایداری‌های جوّی شدید و بارش‌های سیل‌آسا فراهم کند. شناخت این پدیده از جنبه‌های گوناگون و به‌ویژه امکان پیش‌بینی‌پذیری آن در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه متخصصان هواشناسی و اقلیم‌شناسی قرار داشته و پژوهش‌های بسیاری در این زمینه صورت گرفته است.

نخستین بار الیوت و اسمیت (۱۹۴۹) تحقیقاتی در مورد بندال را عملی ساختند. آنها مشاهده کردند که واچرخندهای قوی با دامنه بلند شبه‌ایستا هستند و مانند یک اغتشاش در شارش میانگین غربی ظاهر می‌شوند. بررسی آنها فقط به بیان ویژگی‌های مشاهداتی و فرایابی

بندال محدود بوده و هیچ بحث نظری روی دینامیک بندال صورت نگرفته است. اولین گام اساسی در شناخت پدیده بندال را رکس (۱۹۵۰) برداشت. وی به بررسی اقلیم‌شناختی بندال و ویژگی‌هایی از قبیل توزیع زمانی و مکانی وقوع آن پرداخت. لژانس و اوکلند (۱۹۸۳) با استفاده از شاخص مداری سعی در شناخت بیشتر بندال داشتند و رابطه‌ای برای شدت بندال تعریف کردند. به دنبال آن، تیالدی و مولتنی (۱۹۹۰) ضمن تکمیل این روش، شاخص مداری TM90 را برای تشخیص بندال‌ها عرضه کردند.

از کارهای صورت گرفته در دهه اخیر، می‌توان به باریو پدرو و همکاران (۲۰۰۵) و دیاو و همکاران (۲۰۰۶) اشاره کرد. باریو پدرو و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از روش الگوریتم خودکار به تشخیص ساختار بندال براساس یک نسخه اصلاح شده از شاخص مداری TM90 پرداختند. دیاو و همکاران (۲۰۰۶) نیز ویژگی‌های بندال از قبیل بسامد، مدت و شدت وقوع را با استفاده از یک شاخص دو بُعدی جدید مورد بررسی قرار دادند. به این ترتیب، تحقیقات اقلیم‌شناختی کامل‌تری در مورد پدیده بندال عرضه شد که در این مقاله نیز از دو روش اخیر برای آشکار سازی بندال استفاده شده است.

در ایران نیز پژوهش‌هایی در ارتباط با بندال صورت گرفته است که برای نمونه احمدی‌گیوی و همکاران (۱۳۸۵) به بررسی دینامیکی پدیده بندال با استفاده از تاوایی پتانسیلی شبه‌زمین‌گرد پرداختند. یکی از نتایج حاصل از این تحقیق آن است که شارش‌های مداری در هنگام برخورد با بندال به شارش‌های نصف‌النهاری تبدیل می‌شوند. آزاد (۱۳۸۶) پدیده بندال در اوراسیا را از دیدگاه دینامیکی و اقلیم‌شناختی بررسی کرد و نتایج او حاکی از آن است که برهم‌کنش بین امواج سیاره‌ای و سامانه‌های همدیدی به گونه‌ای است که باعث پایداری بی‌هنجاری کم تاوایی پتانسیلی شبه‌زمین‌گرد میانگین در

بارش شدید و مداوم (محب‌الحجه و همکاران، ۱۳۷۴)، هوای ابری طولانی مدت همراه با بارش در آذرماه ۱۳۸۲ (قرایلو و همکاران، ۱۳۸۵)، بارش شدید برف در شهر رشت در اسفند ۱۳۸۳ و آلودگی بسیار شدید هوای تهران و برخی از شهرها در آبان ۱۳۸۴ اشاره کرد. با توجه به مطالب فوق، هرگونه پژوهش در راستای شناخت بیشتر و دقیق‌تر این پدیده و سازوکارهای گوناگون آن ضروری است و نتایج این نوع پژوهش‌ها می‌تواند علاوه بر درک بهتر پدیده، در امکان پیش‌بینی صحیح آن نیز مفید باشد. از آنجا که عمده بندال‌های موثر بر کشور ایران در منطقه اوراسیا شکل می‌گیرند، در پژوهش حاضر سعی شده است با انتخاب یک دوره بلندمدت ۶۱ ساله به بررسی اقلیم‌شناختی بندال‌های منطقه آسیا، اروپا و بخشی از اقیانوس اطلس با تعیین ویژگی‌های آنها پرداخته شود. معرفی داده‌ها و دو روش آشکارسازی بندال در منطقه موردنظر در بخش ۲ عرضه می‌شود. در بخش ۳ با استفاده از بندال‌های آشکار شده، ویژگی‌های آنها از قبیل توزیع زمانی و مکانی و شدت بررسی می‌شود. بخش ۴ اختصاص به تحلیل اقلیم‌شناختی رویدادهای بندال با توجه به نتایج بخش قبل دارد. مقایسه نتایج مربوط به دو شاخص و نتیجه‌گیری نهایی در بخش ۵ صورت می‌پذیرد.

۲ داده‌ها و روش آشکارسازی رویدادهای بندال

۱-۲ داده‌ها

در این پژوهش، از داده‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال مربوط به مرکز ملی پیش‌بینی محیطی - مرکز ملی پژوهش‌های جوئی (NCEP-NCAR) در ساعت 0000 UTC برای هر روز از دوره زمانی ۶۱ ساله (۱۹۵۰-۲۰۱۰)، روی شبکه‌ای با تفکیک افقی $2/5 \times 2/5$ درجه استفاده شده است. منطقه مورد بررسی بین عرض‌های جغرافیایی $90^{\circ}\text{N} - 0^{\circ}\text{N}$ و طول‌های جغرافیایی 180°E

دوره فعالیت بندال می‌شود. همچنین آزاد و همکاران (۱۳۸۶) با استفاده از تابع پتانسیل $\Lambda \equiv \frac{d\psi}{dq}$ ، تابع جریان و q ، تاوایی پتانسیلی شبه‌زمین‌گرد) پایداری ساختار جای‌گرفته دو قطبی بندال را بررسی کردند. از آنجا که پربندهای ψ و q به هنگام وقوع بندال دو قطبی الگویی مشابه با مودون‌ها به خود می‌گیرند، لذا با استفاده از چارچوب شبه‌زمین‌گرد که جواب‌های مودونی در آن وجود دارد این دو ساختار با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان می‌دهد که مشابه با ساختار مودون‌ها، تابع پتانسیل دارای مقادیر منفی‌تر در نواحی داخل بندال است و منجر به جای‌گزینی و در نتیجه پایداری ساختار آن می‌شود. اخیراً، زربو (۱۳۹۰) با آشکارسازی بندال‌ها با شاخص باریو پدرو و همکاران (۲۰۰۵) به بررسی موردی این پدیده روی اروپا و آسیا با استفاده از فعالیت موج و شار آن پرداخته است. یکی از نتایج وی این است که در بیشتر موارد از بندال‌های رخ داده، فعالیت موج و شار آنها در منطقه تحت‌تاثیر، نسبت به زمان نبود بندال، بسیار کاهش می‌یابد و انتقال انرژی در آن ناحیه با مانع مواجه می‌شود. در موارد معدود، مسیر انتقال انرژی به شمال یا جنوب منحرف می‌شود. در تحقیق احمدی حجت (۱۳۹۰) به‌منظور یافتن عوامل موثر در تقویت پرفشار سیبری از شاخص دیاو و همکاران (۲۰۰۶) برای اولین بار در ایران استفاده شد. وی در این تحقیق روشن ساخت که در مراحل تقویت پرفشار سیبری، در بخش پادجریان‌سوی آن در ترازهای میانی و بالاتر جو، یک پشته ارتفاع ژئوپتانسیلی روی آن دیده می‌شود که محاسبه شاخص بندال حاکی از رخداد این پدیده در این منطقه است.

کشور ایران نیز مانند مناطق بسیاری از آسیا و اروپا به دفعات در هر سال متأثر از پدیده بندال است، و رخداد آن اثر قابل‌توجهی بر وضعیت آب‌وهوایی کشور دارد. برای نمونه می‌توان به رخداد بندال در اردیبهشت ۱۳۷۱ همراه با

سنجه‌ای از شدت شارش مداری برای هر طول جغرافیایی است. مقادیر مثبت این شاخص حاکی از بادهای شرقی است که در استواسوی پُرفشار بندال مشاهده می‌شوند. شاخص (Geo-potential Height Gradient، GHGN Northern) بدین منظور به کار می‌رود تا پُرفشارهای بندال به صورت یک بی‌هنجاری مثبت ارتفاع در راستای طول جغرافیایی موردنظر باشند. مقادیر مثبت و منفی نزدیک به صفر این شاخص نشان از حضور کم‌فشار بریده دارد که در φ_S قرار گرفته است. یعنی با وجود مقادیر مثبت شاخص GHGS، پُرفشاری در عرض φ_0 حضور ندارد و علت آن قرار گرفتن کم‌فشار بریده در φ_S است. در نتیجه مقدار شاخص GHGN باید منفی و از صفر فاصله داشته باشد. شرایط سه‌گانه برای اینکه در یک عرض و طول جغرافیایی خاص و در یک روز معین بندال داشته باشیم، به صورت زیر است (باریوپدرو و همکاران، ۲۰۰۵):

$$GHGS > 0, \quad (3-الف)$$

$$GHGN < -10 \frac{gpm}{lat^\circ}, \quad (3-ب)$$

$$Z(\lambda, \varphi_0) - Z(\lambda, \varphi_S) > 0, \quad (3-ج)$$

که در شرط (۳-ج) علامت بار به معنای میانگین ماهانه ارتفاع ژئوپتانسیلی است. این شرط برای کمینه کردن احتمال در نظر گرفتن کم‌فشارهای بریده به جای پُرفشارهای بندال، اضافه شده است. این شرط بدین معنی است که در صورت برقراری دو شرط اول، باید مقدار ارتفاع ژئوپتانسیلی در مکان موردنظر از میانگین ارتفاع ژئوپتانسیلی ماهانه بیشتر باشد (باریوپدرو و همکاران، ۲۰۰۵). پس از اِعمال شرایط سه‌گانه فوق برای همه طول‌های جغرافیایی در طی دوره مورد بررسی (۶۱ سال)، رویدادهای بندال با توجه به ویژگی‌های زیر مشخص شدند:

۳۰ °W قرار دارد و شامل آسیا، اروپا و بخشی از اقیانوس اطلس است.

۲-۲ روش آشکارسازی بندال

همان‌طور که در بخش مقدمه ذکر شد، در این کار، بندال‌ها با شاخص یک‌بُعدی باریوپدرو و همکاران (۲۰۰۵) و شاخص دو‌بُعدی دیاو و همکاران (۲۰۰۶) آشکارسازی شده‌اند که در ادامه هر یک از این شاخص‌ها شرح داده می‌شود.

الف) شاخص اول (باریوپدرو و همکاران، ۲۰۰۵):

در این روش آشکارسازی از شاخص‌هایی استفاده می‌شود که بر مبنای تعریف همدیدی پدیده بندال بنا شده‌اند (تیبالدی و مولتینی، ۱۹۹۰). این تعریف، به بیانی ساده بدین صورت است که بندال به شکل یک پشته قوی در عرض‌های میانی یا بالا است که در نتیجه آن، در یک بازه طول جغرافیایی، ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در عرض‌های بالا مقادیر بیشتری از عرض‌های پایین‌تر دارد. شاخص‌های مداری به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$GHGS = \frac{Z(\lambda, \varphi_0) - Z(\lambda, \varphi_S)}{\varphi_0 - \varphi_S}, \quad (1)$$

$$GHGN = \frac{Z(\lambda, \varphi_N) - Z(\lambda, \varphi_0)}{\varphi_N - \varphi_0}, \quad (2)$$

$$\varphi_N = 80.0^\circ N + \Delta$$

$$\varphi_0 = 60.0^\circ N + \Delta$$

$$\varphi_S = 40.0^\circ N + \Delta$$

$$\Delta = -5.0^\circ, -2.5^\circ, 0^\circ, 2.5^\circ, 5.0^\circ$$

که $Z(\lambda, \varphi)$ ارتفاع ژئوپتانسیلی در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال برای عرض جغرافیایی φ و طول جغرافیایی λ است. Δ بازه‌هایی است که با استفاده از آنها، مقادیر گوناگونی برای مراکز بندال تعریف می‌شود. شاخص (Geo-potential Height Gradient، GHGS Southern) متناسب با مولفه مداری باد زمین‌گرد و

$$\begin{aligned} h_{\min} &= \min[h(\lambda, \varphi)] & 0 \leq \varphi \leq \varphi_{\max} \\ h_{\max} &= \max[h(\lambda, \varphi)] & \varphi \in \varphi_b \\ h_d(\lambda) &= h_{\max}(\lambda) - h_{\min}(\lambda) \\ \lambda_R &= \lambda_h = \max[h_d(\lambda)] & \lambda \in (\lambda_w, \lambda_e) \end{aligned} \quad (۴)$$

که در روابط فوق، λ طول جغرافیایی، λ_R طول جغرافیایی ثبت شده در هر روز، φ_b عرض جغرافیایی ناحیه بندال و φ_{\max} عرض جغرافیایی مکان ارتفاع ژئوپتانسیلی بیشینه در هر نصف النهار است. λ_e و λ_w به ترتیب نصف النهارهای دو لبه غربی و شرقی منطقه بندال هستند.

$$BI_j(\lambda, \varphi, t) = h(\lambda, \varphi_{ij}, t) - h(\lambda, \varphi, t)$$

اگر

$$h(\lambda, \varphi, t) > h(\lambda, \varphi_{ij}, t), \quad \text{و} \quad \varphi > \varphi_{ij} \quad (۵)$$

$$BI_j(\lambda, \varphi, t) = 0 \quad \text{در غیر این صورت،}$$

$$BI(\lambda, \varphi, t) = \min |BI_j(\lambda, \varphi, t)|, \quad j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

در رابطه (۵)، شاخص $BI_j(\lambda, \varphi, t)$ که دارای مقادیر منفی است، از تفاضل ارتفاع‌های ژئوپتانسیلی مربوط به نقاط تقاطع هر نصف النهار و عرض مرجع با ارتفاع‌های ژئوپتانسیلی مربوط به عرض‌های بزرگ‌تر از عرض مرجع محاسبه می‌شود. سپس، کمینه مقدار $BI_j(\lambda, \varphi, t)$ برای هر نصف النهار در حکم $BI(\lambda, \varphi, t)$ انتخاب می‌شود (دیاو و همکاران، ۲۰۰۶). در رابطه (۵)، z معرف تعداد تقسیمات منطقه مورد بررسی است که در این پژوهش منطقه مورد بررسی به ۶ بخش مطابق جدول ۱ تقسیم شده است. φ_{ij} یا عرض‌های جغرافیایی مرجع، وابسته به موقعیت جغرافیایی و فصل‌های گوناگون است که مقادیر آن نیز در جدول ۱ آورده شده است. این مقادیر براساس معیار بندال عرضه شده رکس (۱۹۵۰b) و لژانس و اوکلند (۱۹۸۳) تعیین شده‌اند و دارای ماندگاری زمانی حداقل ۵ روزه از داده‌های دوره ۶۱ ساله مورد بررسی هستند.

(۱) برای هر روز باید حداقل ۵ واحد طول جغرافیایی (هر واحد معادل ۲/۵ درجه) متوالی واقع در یک عرض جغرافیایی، دارای شرایط سه‌گانه فوق باشند.

(۲) دوره استمرار شرایط سه‌گانه، به‌طور پیوسته باید مساوی یا بیشتر از ۵ روز باشد.

(۳) در طول دوره استمرار، باید عمل بندالی حداقل برای یکی از طول‌های جغرافیایی و برای دو روز متوالی وجود داشته باشد.

(۴) فقط یک ناپیوستگی برای شرایط ۱ و ۲ مجاز است؛ منظور از ناپیوستگی این است که فقط وجود یک جافتادگی (معادل دو واحد طول جغرافیایی ۲/۵ درجه) بین طول‌های جغرافیایی متوالی بندال و همچنین روزهای متوالی اتفاق افتاده مجاز است.

(ب) شاخص دوم (دیاو و همکاران، ۲۰۰۶):

شاخص استفاده شده در این قسمت (دیاو و همکاران، ۲۰۰۶) نیز براساس متداول‌ترین شاخص بندال یعنی TM90 است که در قسمت پیشین شرح داده شد، با این تفاوت که این شاخص دو بُعدی است و با استفاده از آن می‌توان توزیع جغرافیایی منطقه بندال و تحول زمانی آن را دقیق‌تر به دست آورد. در هر روز مورد نظر، روی هر یک از نصف النهارهای محدوده مورد بررسی، تفاضل بین مقادیر بیشینه و کمینه ارتفاع ژئوپتانسیلی در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال محاسبه می‌شود، مشروط بر آنکه عرض جغرافیایی بیشینه از عرض جغرافیایی کمینه بیشتر باشد. سپس نصف النهاری که این مقدار تفاضل روی آن نسبت به سایر نصف النهارها بیشتر است، در حکم نصف النهار مرجع λ_r تعیین می‌شود. در نهایت، یک عرض جغرافیایی واقع بر نصف النهار مرجع که دارای کمترین مقدار ارتفاع ژئوپتانسیلی نسبت به سایر نقاط واقع روی آن باشد، در حکم عرض جغرافیایی مرجع φ_r انتخاب می‌شود.

۳ تعیین ویژگی‌های بندال

از قبیل گسترش مکانی، طول دوره استمرار و همچنین مرکز و شدت آن به صورت زیر انجام پذیرفته است.

پس از آشکارسازی همه رخدادهای بندال با دو شاخص معرفی شده در قسمت پیشین، تعیین ویژگی‌های هر بندال

جدول ۱. عرض‌های جغرافیایی مرجع شمالی (برحسب درجه) برای رخدادهای بندال در فصل‌های گوناگون و مناطق ۶ گانه.

فصل مناطق	زمستان، بهار، پاییز	تابستان
اقیانوس اطلس، اروپا و کوه‌های اورال	۳۵، ۳۷/۵، ۴۰	۴۰، ۴۲/۵، ۴۵
شرق آسیا، دریای اختسک و اقیانوس آرام	۳۲/۵، ۳۵، ۳۷/۵	۴۰، ۴۲/۵، ۴۵

۳-۱ تعیین ویژگی‌ها با استفاده از شاخص اول

برای تعیین ویژگی بندال‌های آشکار شده با شاخص اول، نخستین گام، تشخیص مرکز بندال است که به دو علت دارای اهمیت است. اول اینکه با استفاده از آن می‌توان مسیر حرکت بندال در طول دوره استمرار را مشخص کرد و دوم، ارتفاع ژئوپتانسیلی مرکز پُرفشار معیاری مناسب برای شدت رویداد بندال است. مرکز بندال دارای بیشینه ارتفاع ژئوپتانسیلی از درون پُرفشار بندال است که گاهی امکان دارد در داخل ناحیه بلاک شده قرار نگیرد. این حالت اغلب وقتی اتفاق می‌افتد که الگوی بندال در نقشه ارتفاع ژئوپتانسیلی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال، شکل امگا (Ω) داشته باشد (باریوپدرو و همکاران، ۲۰۰۵). برای اینکه بتوان مرکز بندال را برای همه موارد مشخص کرد، کادری با مشخصات زیر در نظر گرفته می‌شود:

- طول کادر معادل گستره طول‌های جغرافیایی بلاک شده به اضافه ۵ درجه طول جغرافیایی در دو سمت شرق و غرب آن است.

- عرض کادر برابر عرض جغرافیایی بیشینه φ_0 به اضافه ± 10 درجه عرض جغرافیایی است که برای آن شرایط سه‌گانه صدق می‌کند. بعد از تعیین مرکز بندال در هر روز از دوره استمرار آن، به محاسبه شدت پرداخته می‌شود.

$$BI = 100.0 \left[\frac{z(\lambda_C, \varphi_C)}{RC} - 1.0 \right] \quad (6)$$

$$RC = \left[\frac{Z(\lambda_U, \varphi_C) + Z(\lambda_D, \varphi_C)}{2} \right]$$

شدت بندال شاخصی از بزرگی جریان‌های نصف‌النهاری است که قدرت آن در انحراف جریان‌های مداری غربی به جریان‌های مداری شرقی و نصف‌النهاری را نشان می‌دهد. محاسبه شدت با استفاده از اختلاف ارتفاع ژئوپتانسیلی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال بین مرکز بندال (محل بیشینه ارتفاع پُرفشار بندال) و نزدیک‌ترین ناوه‌های دو طرف آن واقع در شرق و غرب صورت می‌گیرد. هرچه این اختلاف زیادتر باشد، شارش‌های جوئی بیشتر منحرف می‌شوند و در نتیجه بندال، تاثیر بیشتری روی جریان‌های معمول دارد. در روابط فوق، BI معرف شدت هر رویداد بندال و RC میانگین ارتفاع ژئوپتانسیلی عمیق‌ترین ناوه‌های دو طرف ناحیه بندال است. $Z(\lambda_U, \varphi_C)$ و $Z(\lambda_D, \varphi_C)$ به ترتیب کمترین ارتفاع ژئوپتانسیلی ناوه‌های واقع در پادجریان سو و جریان‌سوی ناحیه بندال است که در عرض جغرافیایی مرکز بندال قرار دارد. $Z(\lambda_C, \varphi_C)$ نیز ارتفاع ژئوپتانسیلی مرکز بندال در روز موردنظر است. λ_U و λ_D از روابط زیر به دست می‌آیند (باریوپدرو و همکاران، ۲۰۰۵):

$$D = \left| \frac{(x_L^{t+1} + x_R^{t+1})}{2} - \frac{(x_L^t - x_R^t)}{2} \right|, \quad (10)$$

که x_L^t و x_R^t به ترتیب نصف النهار لبه‌های سمت چپ و راست هریک از منطقه‌های جدا از هم با مقادیر BI منفی در هر t است.

(۳) روزی که میدان نوسان لحظه‌ای دارای شرط $M'(t) < 50$ است، به منزله روز پایانی یک رویداد بندال فرض می‌شود.

(۴) تعداد روزهای طول عمر هر رویداد بندال باید مساوی یا بیشتر از ۵ باشد.

شدت هر رویداد بندال در طول عمر آن نیز به صورت زیر تعریف شود:

$$M = \max[M'(t)], \quad t \in T \quad (11)$$

که T نشان‌دهنده طول عمر بندال است. روش محاسباتی فوق برای شدت بندال با روش محاسبه آن در شاخص باریو پدرو و همکاران (۲۰۰۵)، متفاوت است. روش شاخص اول برای محاسبه شدت بندال بر مبنای شاخص لویسو و اسمیت (۱۹۹۵) است که ویندمن و همکاران (۲۰۰۲) این روش را اصلاح کردند. در این روش، شدت بندال با بهنجارسازی مقدار ارتفاع ژئوپتانسیلی مرکز بندال و استفاده از یک خط هم‌ارتفاع ذهنی که نشان‌دهنده جریان بندال است، تعیین می‌شود. اما در شاخص دوم، شدت بندال به جای مقایسه با حالت میانگین، با جریان زمینه مقایسه می‌شود، زیرا بندال‌های گوناگون دارای جریان‌های زمینه متفاوت هستند.

۴ تحلیل اقلیم‌شناختی بندال‌ها در دوره ۱۹۵۰-۲۰۱۰ با استفاده از شاخص‌های اول و دوم به ترتیب، ۱۰۵۴ و ۷۲۹ رویداد بندال در منطقه مورد بررسی و در طی دوره زمانی ۶۱ ساله آشکارسازی شد. در مقایسه تعداد بندال‌ها می‌توان گفت که دو علت، (۱) قادر نبودن شاخص اول در هم‌پوشانی از نظر توزیع عرض جغرافیایی (یک‌بعدی

$$\begin{aligned} \lambda_U &= \lambda_C + \frac{S}{2} + 10^\circ \\ \lambda_D &= \lambda_C + \frac{S}{2} + 10^\circ, \end{aligned} \quad (7)$$

که λ_C طول جغرافیایی و S گسترش مکانی بندال در روز مورد نظر است.

۲-۳ تعیین ویژگی‌ها با استفاده از شاخص دوم

از آنجا که رویداد بندال در این روش با مقادیر BI منفی همراه است (رابطه ۵)، بنابراین یک بندال با تعیین سطح BI منفی قابل تشخیص است. برای راحتی تعیین مسیر رویداد بندال، یکی از شدیدترین سطح‌های BI منفی (کمینه مقدار BI یا بیشینه مقدار $|BI|$) در حکم یک هدف انتخاب و سپس میدان نوسان BI منفی برای هر سطح مجزا در ناحیه بندال به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$M'_i(t) = \max |BI(\lambda, \varphi, t)|, \quad (8)$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad \lambda, \varphi \in \Omega_i$$

که n تعداد سطوح با BI منفی در ناحیه بندال و Ω_i مساحت هر سطح به طور مجزا است. در یک رویداد بندال، بزرگ‌ترین مقدار $M'_i(t)$ در حکم میدان نوسان لحظه‌ای در نظر گرفته و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$M'(t) = \max[M'_i(t)], \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

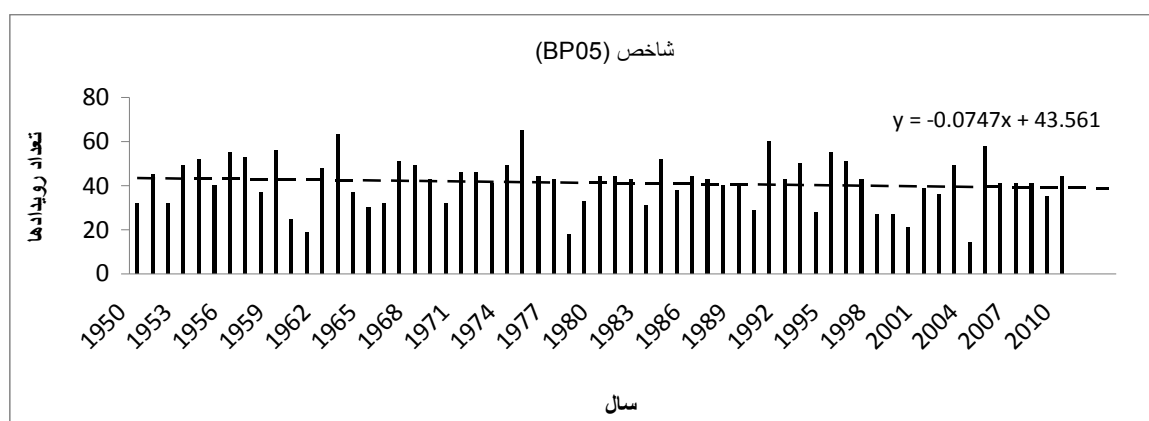
مراحل شناسایی بندال با استفاده از شاخص دوم به شرح زیر است:

(۱) در هر سطح BI منفی، روزی که میدان نوسان لحظه‌ای دارای شرایط $M'(t) \geq 50$ gpm است، به منزله روز آغاز یک رویداد بندال فرض می‌شود.

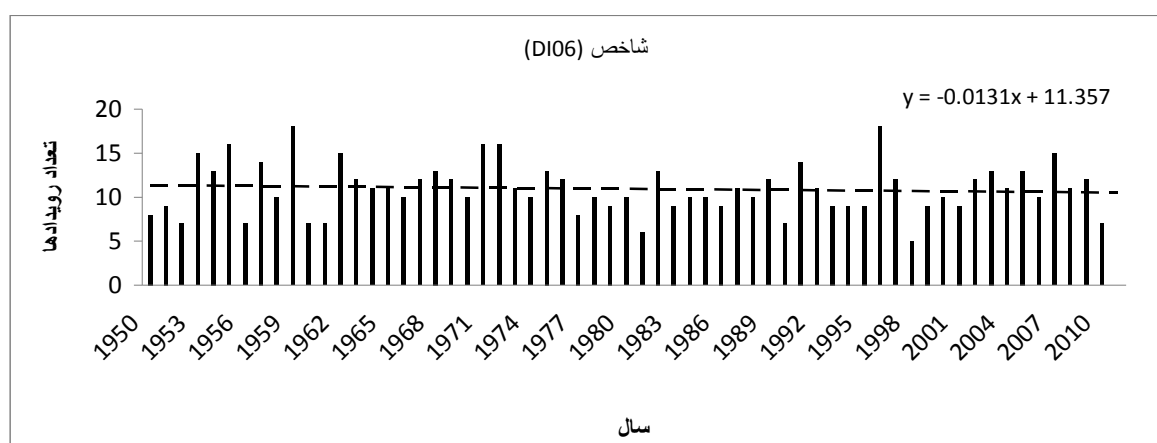
(۲) مناطق دارای مقادیر BI منفی، در هر دو روز متوالی یا باید با یکدیگر هم‌پوشانی داشته باشند و یا چنانچه شامل دو منطقه جدا از هم هستند، فاصله نسبی بین آنها که با رابطه زیر به دست می‌آید، کمتر از ۱۰ درجه نصف‌النهاری باشد:

در نیمکره شمالی در ناحیه مورد بررسی این پژوهش رخ می‌دهد. در این بخش، بررسی‌هایی روی روند تعداد رخدادهای بندال با استفاده از دو شاخص صورت گرفته است. از اینجا به بعد برای سهولت و اختصار، شاخص باریوپدرو و همکاران (۲۰۰۵) با BP05 و شاخص دیاو و همکاران (۲۰۰۶) با DI06 عنوان خواهند شد. مطابق شکل ۱، این روند در دوره مورد بررسی روندی کاهشی بوده است که با نتایج بین‌دهه‌ای باریوپدرو و همکاران (۲۰۰۵) مطابقت دارد. از سوی دیگر، روند تعداد رخدادهای بندال در دهه اخیر، برخلاف روند کلی در دوره مورد بررسی،

بودن) و ۲) مجاز دانستن الگوریتم شاخص اول در وجود یک ناپیوستگی هم در طول جغرافیایی و هم در طول دوره استمرار، سبب افزایش تعداد رخدادهای آشکارسازی شده با شاخص اول شده است. بنابراین به‌طور میانگین در هر سال با استفاده از شاخص‌های اول و دوم، به ترتیب ۱۷ و ۱۲ رویداد بندال در منطقه مورد بررسی که نیمی از نیمکره شمالی را در بر می‌گیرد، اتفاق افتاده است. از طرفی، تحقیقات اخیر نشانگر آن است که سالانه به‌طور میانگین ۲۵ رخداد بندال در کل نیمکره شمالی روی می‌دهد (ویندمن، ۲۰۰۲). مقایسه این عددها حاکی از آن است که بخش قابل‌توجهی از پدیده بندال

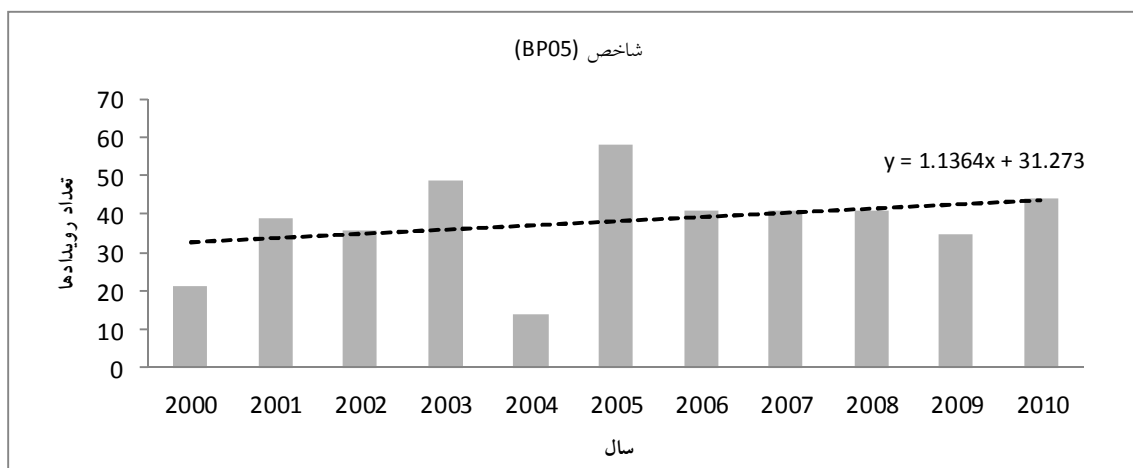


(الف)

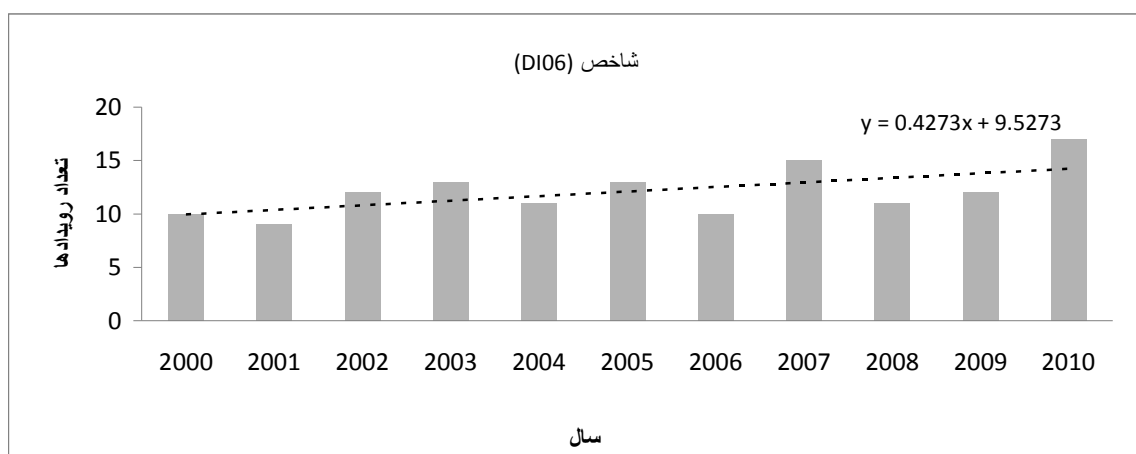


(ب)

شکل ۱. روند تعداد رخدادهای بندال (خط‌چین) با استفاده از شاخص BP05 (الف) و شاخص DI06 (ب) در دوره زمانی ۱۹۵۰-۲۰۱۰.



(الف)



(ب)

شکل ۲. روند تعداد رخداد های بندال (خط چین) با استفاده از شاخص BP05 (الف) و شاخص DI06 (ب) در دوره زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۰.

و دیگری در $15^{\circ}W$ قرار دارد و برای شاخص دوم، بیشترین مقادیر بسامد و وقوع در طول های جغرافیایی $15^{\circ}W$ و $17/5^{\circ}W$ واقع شده اند. بنابراین بیشینه های توزیع بسامد و وقوع هر دو شاخص، تقریباً یکسان است. نکته دیگر آنکه هرچه به سمت شرق نمودار پیش می رویم، بسامد و وقوع کاهش می یابد. علت احتمالی ممکن است کاهش فعالیت کز فشار در شرق منطقه مورد بررسی باشد که در بین دو مسیر توفان اطلس و آرام قرار دارد. گرین (۱۹۷۷) و شوتس (۱۹۸۳) روشن ساختند که مکان بیشینه رخداد بندال در انتهای جریان سوی مسیر توفان (در این

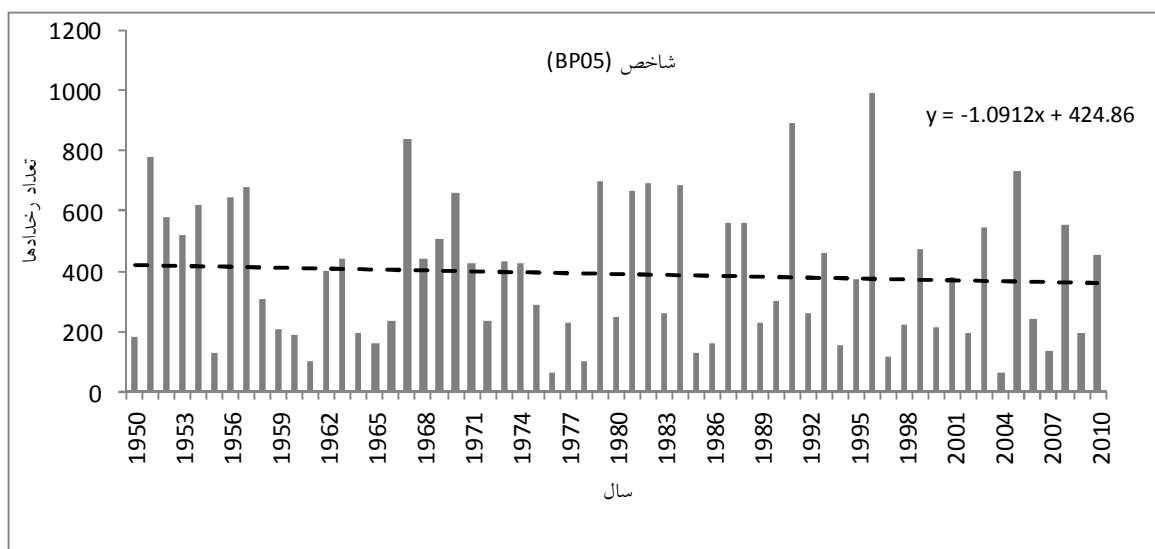
روند افزایشی است (شکل ۲). بنابراین می توان گفت که با وجود روند کاهشی تعداد این پدیده در طی دوره ۶۱ ساله، جو این منطقه از نیمکره شمالی در دهه اخیر تحت تاثیر تعداد بیشتری از رویدادهای بندال بوده است.

۱-۴ توزیع مکانی بندال ها

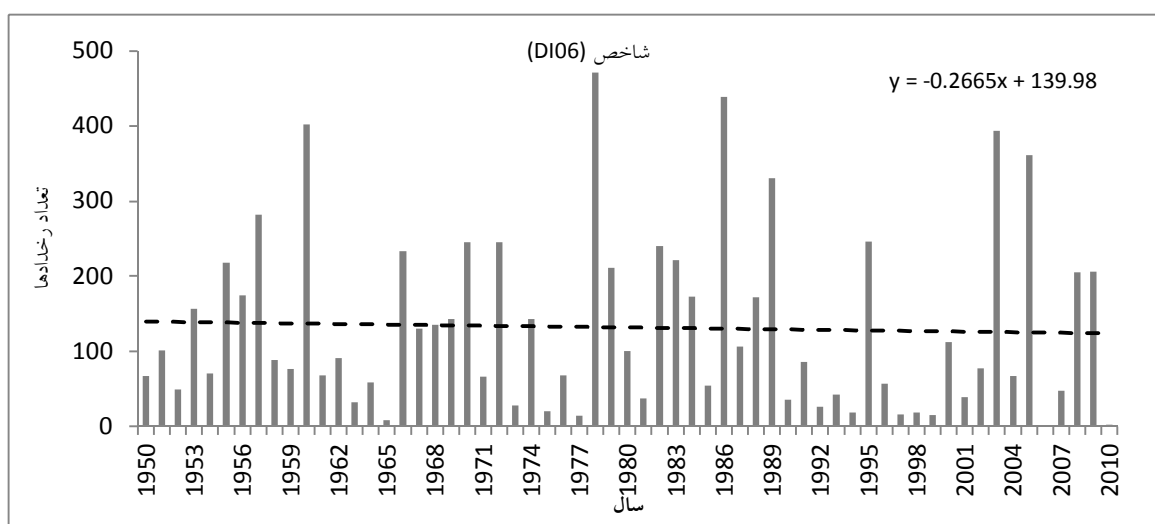
توزیع بسامد (روزهای) وقوع بندال بر حسب طول جغرافیایی در دوره ۱۹۵۰-۲۰۱۰ برای هر دو شاخص در شکل ۳ نشان داده شده است. مشاهده می شود که برای شاخص اول، دو قله بیشینه، یکی در طول جغرافیایی $0^{\circ}E$

در شکل ۳، آورده شده است. با توجه به شکل، دیده می‌شود که قله‌های دو منحنی اندکی به سمت غرب، نسبت به منحنی بسامد وقوع، جابه‌جا شده‌اند که این نشانگر ویژگی بندال است؛ یکی ماهیت شبه‌ایستور بودن آن و دیگری حرکت غرب‌سوی ضعیفی که اغلب مراکز قوی پُرفشار بندال‌ها در نواحی بیشینه وقوع، دارند. نمودار توزیع جغرافیایی دیگری که در شکل ۳ آورده شده،

مورد، اطلس) واقع شده است. با توجه به نمودارهای مربوط به هر دو شاخص، مقادیر بیشتر از مقدار میانگین بسامد وقوع بندال در محدوده $47/5^{\circ}E$ تا $30^{\circ}W$ قرار دارند که بدین معنی است که بخش‌های غربی منطقه مورد بررسی بیشتر تحت‌تأثیر این پدیده هستند. توزیع بسامد (روزهای) مراکز بندال برحسب طول جغرافیایی در ۶۱ سال مورد بررسی برای دو شاخص نیز

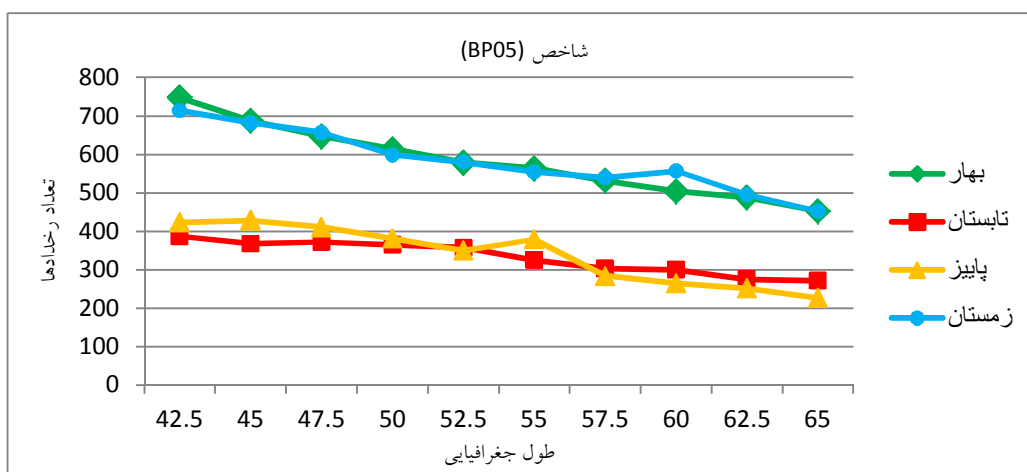


(الف)

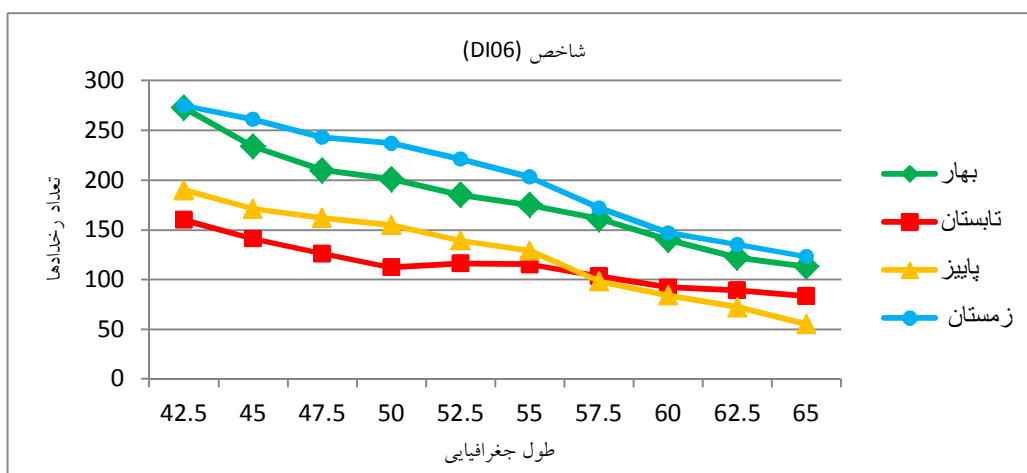


(ب)

شکل ۳. روند تغییرات بسامد رخداد بندال (خط‌چین) با استفاده از شاخص BP05 (الف) و شاخص DI06 (ب) برای منطقه ایران در دوره زمانی ۱۹۵۰-۲۰۱۰.



(الف)

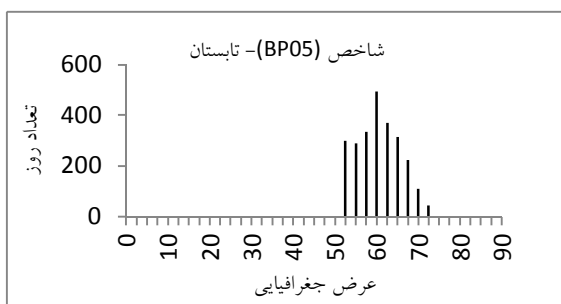


(ب)

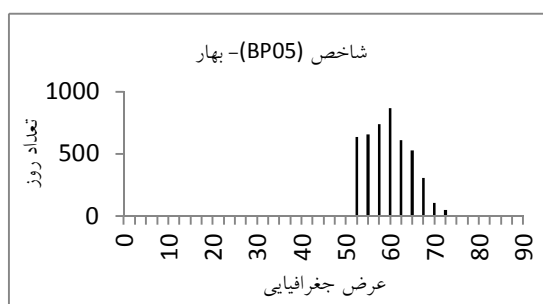
شکل ۴. بسامد رخداد بندال برحسب طول جغرافیایی در فصل‌های بهار (با علامت لوزی)، تابستان (با علامت مربع)، پاییز (با علامت مثلث) و زمستان (با علامت دایره) برای منطقه ایران با استفاده از شاخص BP05 (الف) و شاخص DI06 (ب) در دوره زمانی ۱۹۵۰-۲۰۱۰.

سوی مسیر توفان اطلس است. با توجه به محدوده مقادیر بزرگ‌تر از میانگین بسامد وقوع رخداد‌های بندال در شکل ۳، انتظار می‌رود که وضعیت جوی کشور ما نیز در طول دوره ۶۱ ساله بارها متاثر از پدیده بندال بوده باشد. نتایج شکل ۴، حاکی از آن است که روند تعداد رویدادهای بندال در این دوره زمانی روی ایران (حدود طول جغرافیایی ۴۲/۵ تا ۶۵ درجه شرقی و عرض

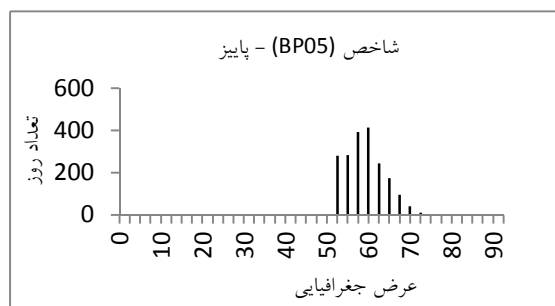
مربوط به شدت بندال‌ها است. همان‌طور که انتظار می‌رود، بیشینه‌های شدت با بیشینه‌های بسامد مراکز بندال تقریباً مطابقت دارد. از سویی، بیشینه‌های شدت نیز نسبت به منحنی بسامد وقوع، به سمت غرب به‌ویژه در محدوده $5^{\circ}E$ تا $30^{\circ}W$ روی اقیانوس اطلس انتقال یافته‌اند. همچنین در هر دو شکل مشاهده می‌شود که مقادیر شدت روی منطقه فوق دارای عددهای بزرگ‌تری هستند که علت احتمالی آن بیشینه فعالیت کز فشار در بخش جریان-



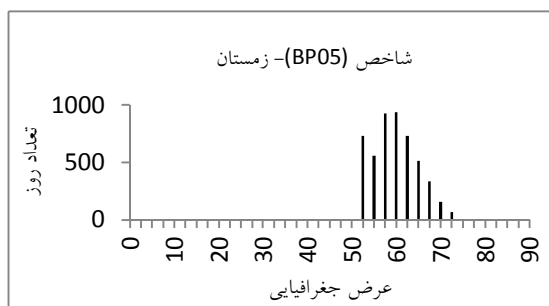
(ب)



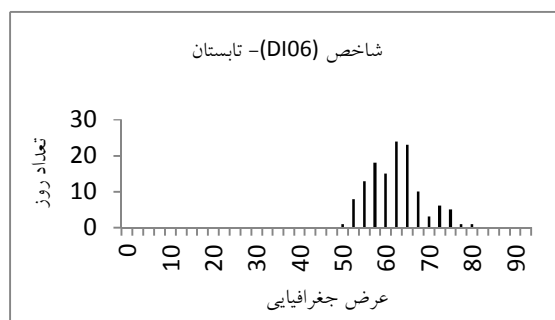
(الف)



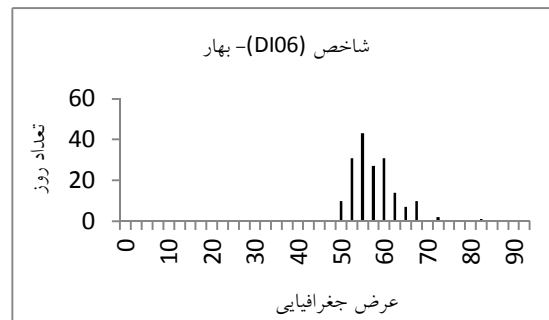
(د)



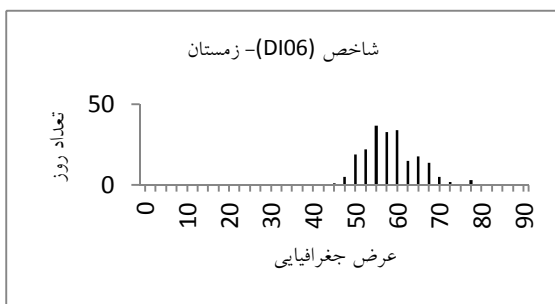
(ج)



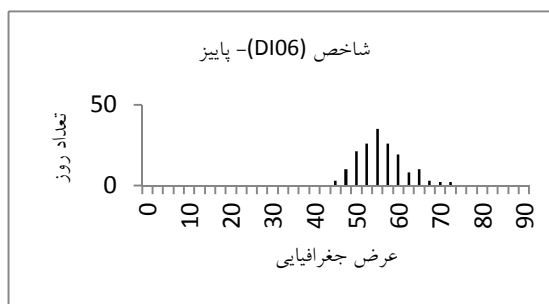
(و)



(ه)

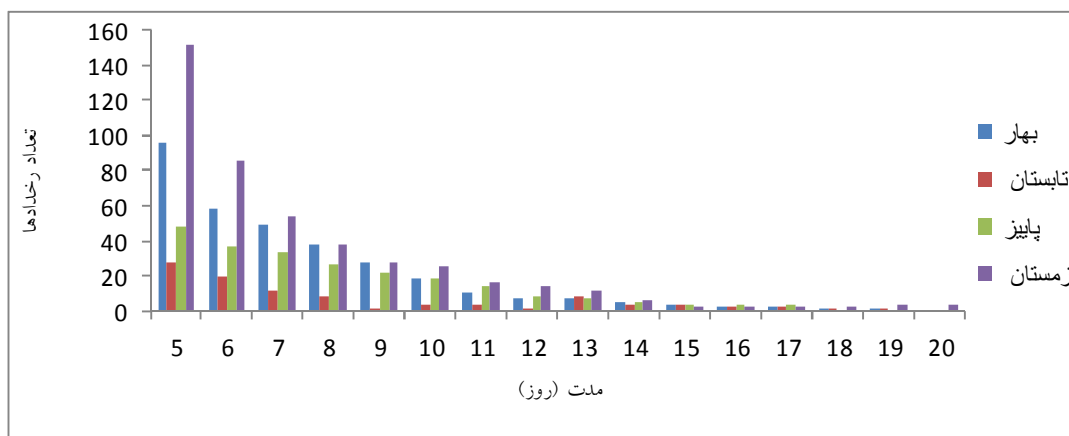


(ح)



(ز)

شکل ۵. توزیع بسامد (روزهای) رخداد بندها برحسب عرض جغرافیایی در فصل‌های گوناگون از دوره مورد بررسی با استفاده از نتایج شاخص BP05 (الف تا د) و با استفاده از شاخص DI06 (ه تا ح).



شکل ۶. توزیع بسامد رخداد بندال برحسب طول عمر آن در فصل‌های گوناگون از دوره مورد بررسی با استفاده از شاخص BP05.

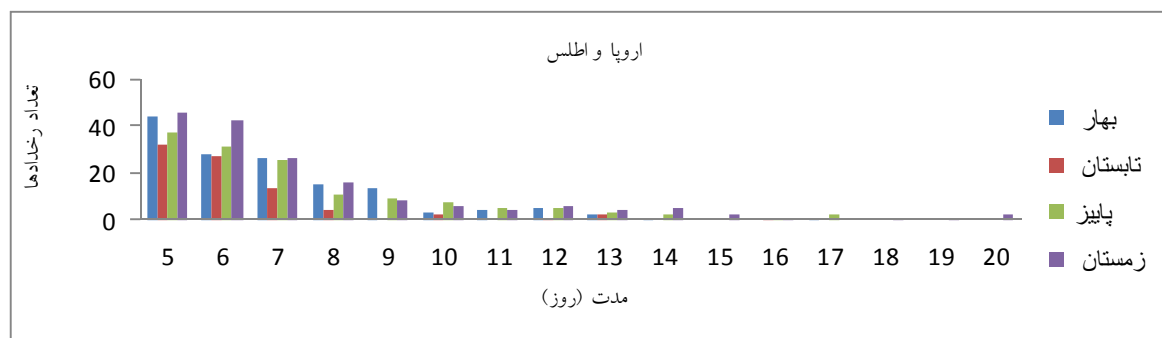
شاخص BP05 در هر چهار فصل یکسان و بازه آن بین $72/5^{\circ}N$ تا $52/5^{\circ}N$ است. همچنین، بیشینه رخدادها در همه فصل‌ها برای این شاخص در عرض $60^{\circ}N$ است. اما در مورد شاخص DI06، با توجه به دُبعدی بودن این شاخص، انتظار می‌رود که توزیع رخداد بندال نسبت به عرض جغرافیایی در فصل‌های گوناگون سال، متفاوت باشد. مطابق شکل ۶، در فصل‌های زمستان، بهار و پاییز بیشینه رخدادها در عرض جغرافیایی $55^{\circ}N$ و در فصل تابستان بیشینه در عرض جغرافیایی $62/5^{\circ}N$ است. به نظر می‌رسد که یکی از علت‌های آن، جابه‌جا شدن منطقه کُرفشاری و مسیر توفان به عرض‌های بالاتر در تابستان باشد که با خود، محل تشکیل بندال و در نتیجه مرکز آن را به سمت عرض‌های بالاتر می‌برد.

جغرافیایی 25° تا 39° درجه شمالی) نیز کاهش یافته که با روند کلی منطقه مورد بررسی سازگار است. نتایج مربوط به بسامد رخداد در بازه طول جغرافیایی محدوده ایران برای فصل‌های گوناگون در شکل ۵ آورده شده است. این نمودارها نشان می‌دهند که تعداد رخدادهای بندال در نواحی شمال‌غرب و غرب کشور بیشتر از نواحی مرکزی و شرقی بوده است. به علاوه، بیشینه رویدادهای بندال در فصل‌های بهار و زمستان و کمینه آنها در فصل تابستان است. سیر نزولی این نمودارها نیز حاکی از کاهش وقوع این پدیده در همه فصل‌ها در نواحی شرق ایران است.

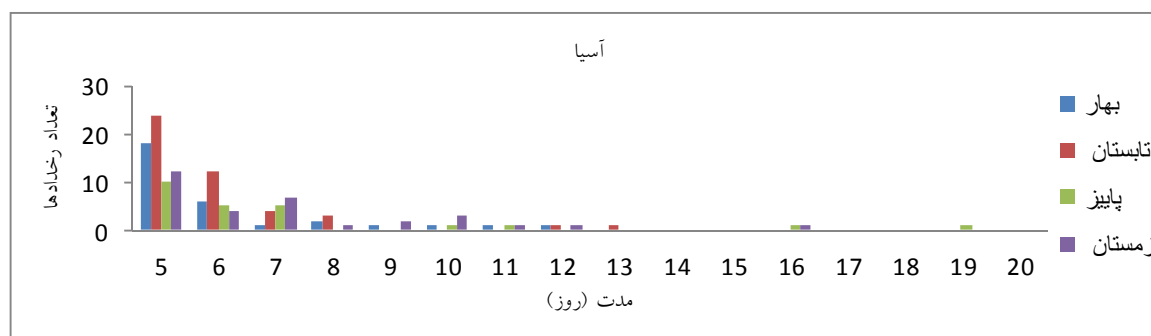
در شکل ۶، توزیع بسامد روزهای وقوع رخدادهای بندال برحسب عرض جغرافیایی در فصل‌های گوناگون سال طی دوره مورد بررسی برای دو شاخص نشان داده شده است. با توجه به شکل، توزیع رخدادها مربوط به

جدول ۲. میانگین شدت رویدادهای بندال آشکار شده برای فصل‌های گوناگون در دوره ۱۹۵۰-۲۰۱۰ با استفاده از دو شاخص. مقادیر شاخص BP05 بدون واحد و شاخص DI06 برحسب واحد ژئوپتانسیل متر (gpm) است.

شاخص \ فصل	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	میانگین کل دوره
BP05	۳/۲۷	۲/۱۰	۴/۱۸	۴/۹۴	۳/۶۲
DI06	۱۴۶/۴۸	۱۲۴/۰	۱۷۳/۰۸	۱۹۰/۵۷	۱۵۸/۵۳



(الف)



(ب)

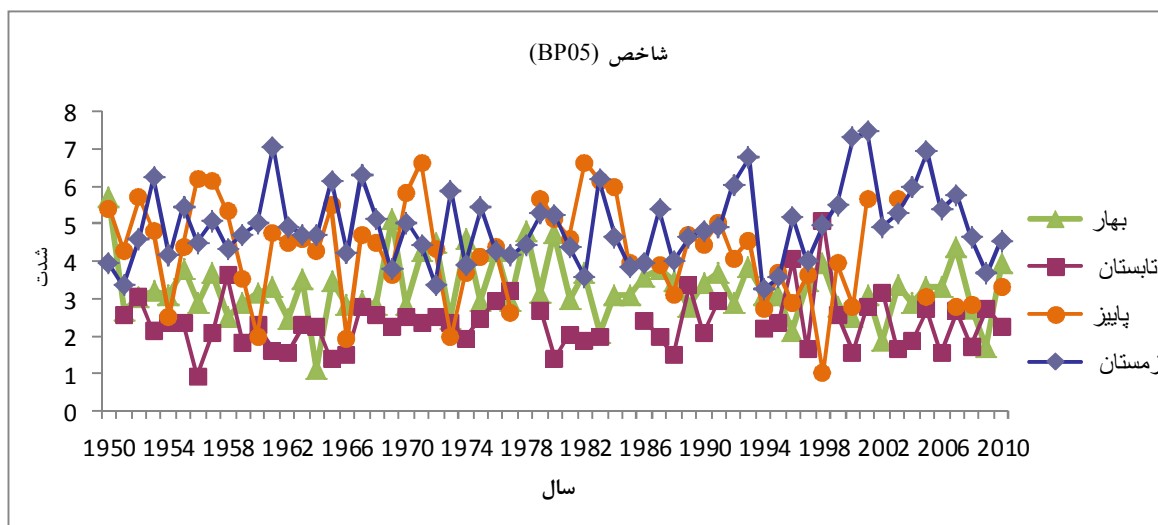
شکل ۷. توزیع بسامد رخداد بندال برحسب طول عمر آن در فصل‌های گوناگون از دوره‌ی مورد بررسی برای منطقه اروپا و اطلس (الف) و منطقه آسیا (ب) با استفاده از شاخص DI06.

۴-۲ توزیع زمانی بندال‌ها

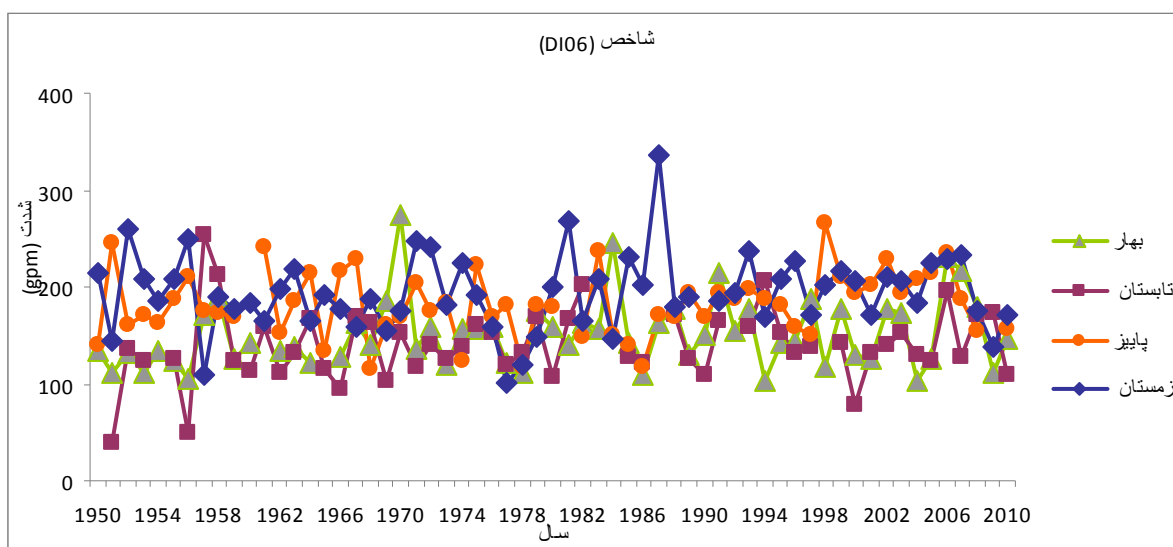
بسامد رخداد بندال در فصل‌های گوناگون از دوره مورد بررسی، با توجه به طول عمر آنها، در شکل ۷ آورده شده است (شکل مربوط به نتایج شاخص دوم نشان داده نشده است). با توجه به شکل، بیشینه رویدادها در فصل‌های زمستان و بهار و کمینه آنها در فصل تابستان است. این نتیجه با نتایج تحقیقات دینامیکی سال‌های اخیر درباره بندال، مطابقت دارد (باریوپدرو و همکاران، ۲۰۰۵). نتایج تحقیقات فوق حاکی از آن است که بندال را می‌توان نشانگر برهم‌کنش توده‌های هوای واقع در عرض‌های بالا و عرض‌های پایین دانست که این خود نوعی پاسخ جو به این برهم‌کنش‌ها است. از آنجا که این برهم‌کنش‌ها در فصل‌های زمستان و بهار بیشینه و در تابستان کمینه هستند، انتظار می‌رود که رویداد بندال نیز از این واقعیت پیروی

کند (باریوپدرو و همکاران، ۲۰۰۵). نمودارهای تغییر تعداد رخداد پدیده بندال با دوره دوام آن (شکل ۷) به صورت نمایی است و با نتایج تحقیقات پیشین روی کل نیمکره شمالی (مانند ویندمن و همکاران، ۲۰۰۲) همخوانی دارد. به علاوه، مشاهده می‌شود که در همه فصل‌ها، بیشترین بسامد وقوع مربوط به بندال‌های با کمترین طول عمر است.

شکل ۸، نمودارهای بسامد رخداد بندال برحسب طول عمر، به تفکیک منطقه آسیا و منطقه اروپا و اطلس، با استفاده از شاخص DI06 را نشان می‌دهد. در شکل ۸، منطقه آسیا به تقریب بین $35^{\circ}E$ تا $180^{\circ}W$ و منطقه اطلس و اروپا بین $30^{\circ}W$ تا $35^{\circ}E$ در نظر گرفته شده است. مطابق این نمودارها، بندال‌های واقع در منطقه اروپا و اطلس دارای تداوم بیشتری نسبت به بندال‌های منطقه



(الف)



(ب)

شکل ۸. میانگین شدت رخداد بندال در فصل‌های بهار (خط با علامت مثلث)، تابستان (خط با علامت مربع)، پاییز (خط با علامت دایره) و زمستان (خط با علامت لوزی) در دوره مورد بررسی با استفاده از (الف) شاخص BP05 و (ب) شاخص DI06.

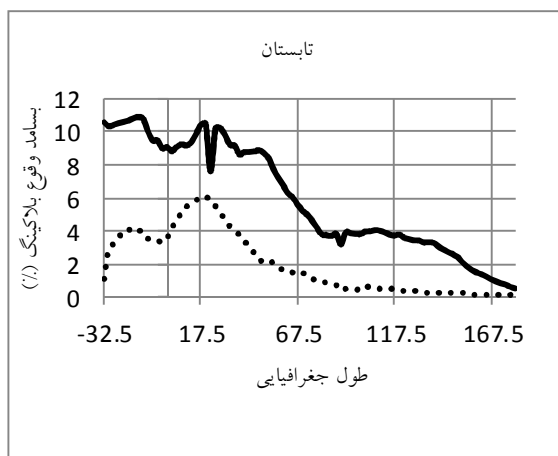
شدت بندال پارامتری مهم در شناخت این پدیده است. در شکل ۹ توزیع زمانی میانگین شدت بندال‌های آشکارسازی شده در دوره زمانی ۱۹۵۰-۲۰۱۰ با استفاده از دو شاخص آمده است. با توجه به شکل، بندال‌ها در فصل‌های زمستان و پاییز دارای بیشینه شدت و در فصل

آسیا در همه فصل‌ها، به‌ویژه در فصل زمستان هستند. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، به علت اینکه منطقه آسیا در فواصل بسیار دور از بخش جریان‌سوی مسیر توفان اطلس قرار دارد، دارای بسامد رخداد بندال کوچک‌تر و همچنین شدت و طول عمر کمتر است.

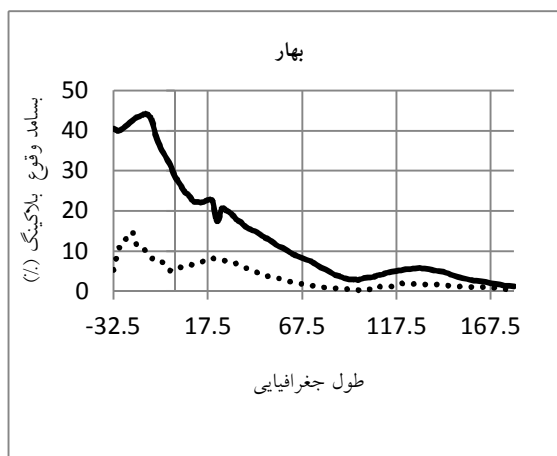
است. از سوی دیگر، بیشینه شدت مربوط به شاخص دوم، در زمستان ۱۹۸۷ دارای مقدار 336 gpm است و میانگین شدت بندال‌ها مقدار $158/53 \text{ gpm}$ است. به نظر می‌رسد که علت تفاوت در سال‌های بیشینه شدت بندال، مربوط به دو شاخص، شیوه‌های گوناگون محاسبه شدت بندال‌ها است که در بخش پیش به آن اشاره شد.

روند تغییرات میانگین شدت بندال‌ها برای دوره ۶۱ ساله مربوط به دو شاخص، نشانگر وجود روند افزایشی در هر دو مورد است (شکل نشان داده نشده است). این مطلب

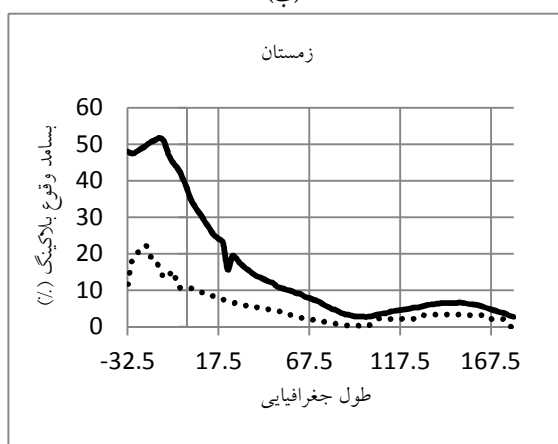
تابستان، کمینه شدت هستند. جدول ۲ میانگین فصلی شدت رویدادهای بندال را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مقادیر این جدول مطابق با نتایج حاصل از شکل ۹ است. این در حالی است که نتیجه فوق تفاوت آشکار با بسامد وقوع بندال‌های آشکارسازی شده در فصل‌های گوناگون، مبنی بر بیشینه رخداد در فصل‌های زمستان و بهار و کمینه آن در فصل تابستان دارد. طبق بررسی‌های این دوره، بیشینه شدت رخداد بندال مربوط به شاخص اول دارای مقدار $7/47$ است و در زمستان سال ۲۰۰۱ اتفاق افتاده است. همچنین میانگین شدت بندال‌ها مقدار $3/62$



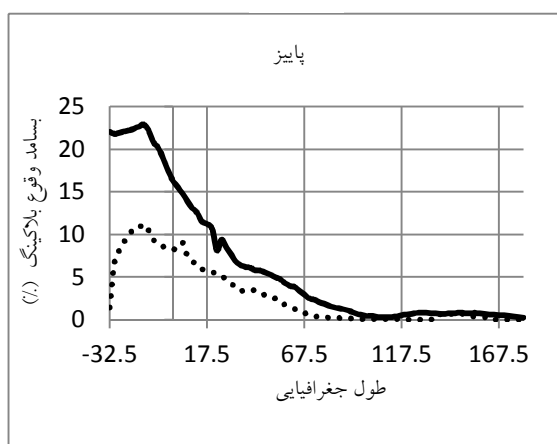
(ب)



(الف)

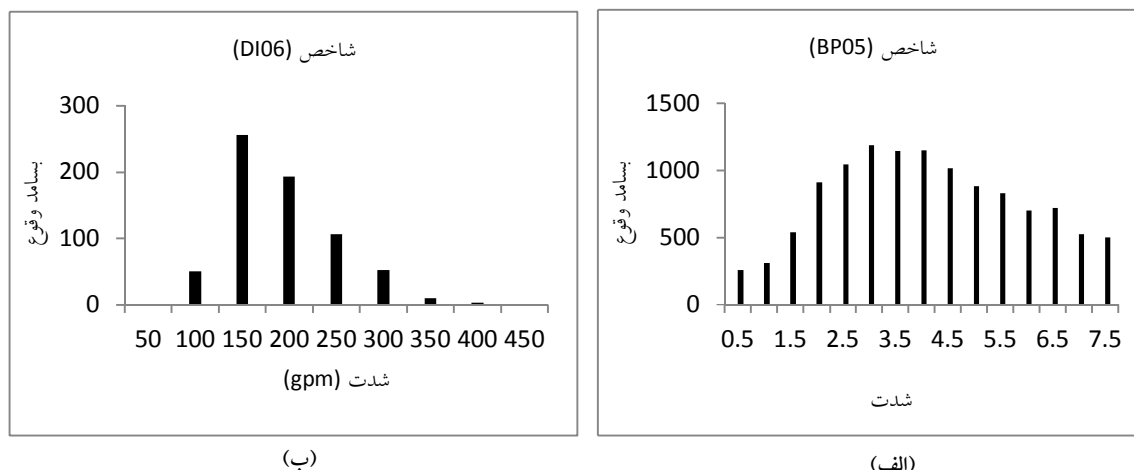


(د)



(ج)

شکل ۹. درصد روزهای بندال هر فصل، به کل روزهای آن در دوره مورد بررسی برای بهار (الف)، تابستان (ب)، پاییز (ج) و زمستان (د) با استفاده از شاخص BP05 (خط ضخیم) و شاخص DI06 (نقطه‌چین).



شکل ۱۰. (الف) بسامد وقوع شدت‌های گوناگون بندال در دوره مورد بررسی با استفاده از شاخص BP05، (ب) و شاخص DI06.

و حتی محدوده قله‌های این نمودار تا $50^{\circ}E$ نیز می‌رسد. همان‌گونه که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، منحنی‌های هر دو شاخص در محدوده آسیا تقریباً یکسان و دارای سیر نزولی هستند که این نمایانگر رخدادهای بندال بیشتری در غرب منطقه مورد بررسی است. با توجه به نمودارها، اگرچه شاخص اول که نسخه اصلاح شده شاخص تیبالدی TM90 است و در حال حاضر بیشتر از آن استفاده می‌شود، اما به علت یک‌بُعدی بودن در مقایسه با شاخص دوم، برای تشخیص ساختار فضایی و گسترش رویدادهای بندال ضعیف است.

۳-۴ بسامد رخداد بندال با شدت‌های گوناگون

بسامد رخداد شدت‌های گوناگون بندال در شکل ۱۱ برای هر دو شاخص با شدت‌های متفاوت نشان داده شده است. با توجه به شکل، بیشینه بسامد رخداد برای شاخص اول مربوط به بزرگی ۳ و سپس مقادیر نزدیک به آن با شدت ۳/۵ و ۴ است و برای شاخص دوم، بیشینه بسامد رخداد مربوط به 150 gpm است. این عددها با مقادیر میانگین شدت بندال‌های به دست آمده در بخش قبل برای شاخص‌های اول و دوم (به ترتیب $3/62$ و $158/53 \text{ gpm}$)، همخوانی دارند. همچنین، بررسی شدت بندال در

بیانگر آن است که برخلاف روند کاهشی بسامد رخداد بندال در این دوره زمانی، شدت این پدیده روندی به نسبت صعودی دارد. روند میانگین شدت بندال‌ها برای دهه اخیر نیز رسم شده که روندی نزولی دارد (شکل نشان داده نشده است). این روند، عکس روند بسامد رخداد بندال در دهه اخیر است که روندی افزایشی دارد. در واقع می‌توان نتیجه گرفت که یک همبستگی منفی بین روند تغییرات بسامد رخداد بندال و شدت آن وجود دارد. بنابراین به نظر می‌رسد که بسامد زیاد رخداد بندال در منطقه مورد بررسی، موجب کاهش میانگین شدت رویدادهای بندال شده است.

برای مقایسه نتایج دو شاخص مورد استفاده در تحقیق حاضر، نمودار درصد روزهای بندال به کل روزهای هر فصل از دوره ۶۱ ساله، برحسب طول جغرافیایی در شکل ۱۰ رسم شده است. با توجه به شکل، شاخص دوم نسبت به شاخص اول، درصد بسامد رخداد کمتری در همه فصل‌ها دارد و الگوهای فصل تابستان و پاییز هر دو شاخص نسبت به سایر فصل‌ها به هم نزدیک‌ترند. همچنین در فصل‌های زمستان، بهار و پاییز بیشینه‌های بسامد در محدوده $20^{\circ}E$ تا $32/5^{\circ}W$ واقع است، درحالی که در فصل تابستان این الگوها اندکی تمایل به سمت شرق دارند

آشکارسازی شد. ویژگی‌های تعیین شده بندال‌ها با دو شاخص، تقریباً مشابه بود و نشان از وجود مقادیر بزرگ‌تر از میانگین بسامد رخداد این پدیده، در بازه طول جغرافیایی $47/5^{\circ}E$ تا $30^{\circ}W$ داشت. از سوی دیگر، بیشینه شدت بندال‌های رخ داده، روی بخش شرقی اقیانوس اطلس در محدوده $5^{\circ}E$ تا $30^{\circ}W$ قرار دارد، که علت آن می‌تواند بیشینه فعالیت کژ فشار در بخش جریان سوی مسیر توفان اطلس باشد. همچنین تعداد رویدادهای بندالی در طی دوره ۶۱ ساله، هم در کل منطقه مورد بررسی و هم روی ایران، نشانگر وجود روند کاهشی است.

بررسی روند میانگین شدت بندال با استفاده از دو شاخص، روندی افزایشی در دوره زمانی مورد بررسی و روندی یکسان و کاهشی را در دهه اخیر نشان می‌دهد. بنابراین از مقایسه نتایج روند میانگین شدت بندال‌ها و نتایج روند بسامد رخدادها می‌توان گفت که این دو با یکدیگر همبستگی منفی دارند. البته تعیین رابطه بین این دو کمیت، نیازمند پژوهش‌های بیشتر در مورد بندال و ارتباط آن با دیگر پدیده‌های جوئی در حال وقوع است. از نظر بسامد رخداد بندال در عرض‌های جغرافیایی متفاوت، نتایج شاخص اول دارای بازه عرض جغرافیایی ثابت با بیشینه‌های بدون تغییر در فصل‌های گوناگون است. در حالی که برای شاخص دوم، این بازه متغیر است و بیشینه وقوع آن در فصل‌های بهار، زمستان و پاییز، در عرض $55^{\circ}N$ و در فصل تابستان با جابه‌جایی به سمت عرض‌های بالاتر در $62/5^{\circ}N$ قرار دارد.

نتایج توزیع زمانی بندال‌ها نشان می‌دهد که بیشینه وقوع آنها در فصل‌های زمستان و بهار و مقادیر کمینه آنها در تابستان رخ می‌دهد. توزیع زمانی شدت بندال‌ها نیز حاکی از آن است که شدت رخدادها در زمستان نسبت به سایر فصل‌ها قوی‌تر است. به علاوه، در فصل‌های زمستان و بهار، رخدادهای بندال به نسبت دارای طول عمر بیشتری نسبت به سایر فصل‌ها هستند. بررسی طول عمر بندال‌های

فصل‌های گوناگون و در منطقه آسیا و منطقه اروپا و اطلس نشان می‌دهد که بیشترین رخدادهای بندال روی مناطق اروپا و اطلس دارای شدت بین 200 gpm تا 400 gpm در زمستان، 150 gpm تا 300 gpm در بهار و تابستان و 200 gpm تا 350 gpm در منطقه آسیا این مقادیر کمتر و بین 150 gpm تا 400 gpm در فصل زمستان، 150 gpm تا 300 gpm در پاییز و 150 gpm تا 250 gpm در بهار و تابستان است (شکل‌های مربوط نشان داده نشده است). مقایسه نمودارهای شدت بندال در دو منطقه یادشده حاکی از آن است تعداد رخدادهای بندال در هر چهار فصل، در بخش اروپا و اطلس از منطقه آسیا بیشتر است. با توجه به نتایج، شدت رخدادها در زمستان قوی‌تر از سایر فصل‌ها است که این مطلب با نتایج لوپو و اسمیت (۱۹۹۵) و ویندمن و همکاران (۲۰۰۲) سازگاری دارد. احتمال زیاد رخداد بندال در زمستان، ممکن است ناشی از فعال‌تر و قوی‌تر بودن پیچک‌های همدیدمقیاس و امواج سیاره‌ای در مقایسه با سایر فصل‌ها باشد (کالوکی، ۱۹۸۵). در چنین شرایطی، رویدادهای بندال به آسانی در اثر واداشت پیچک‌های همدیدمقیاس واقع در بالادست جریان، فعال می‌شوند (لو، ۲۰۰۵a).

۵ نتیجه‌گیری

بندال از نمونه پدیده‌های جوئی کم‌بسامد و دارای طول عمر بالا است که به واسطه تاثیرات چشمگیر روی شرایط جوئی و آب‌وهوایی عرض‌های میانی، می‌تواند در مواقعی منجر به وضعیت حاد جوئی مانند بروز سیل یا خشکسالی در یک منطقه شود. در تحقیق حاضر سعی شده است تا از دیدگاه اقلیم‌شناختی این پدیده در دوره ۶۱ ساله (۱۹۵۰-۲۰۱۰) و روی منطقه آسیا و اروپا و بخشی از اطلس مورد بررسی قرار گیرد. با استفاده از دو شاخص عرضه شده باریوپدرو و همکاران (۲۰۰۵) و دیاو و همکاران (۲۰۰۶)، همه رخدادهای بندال در ناحیه و دوره زمانی موردنظر،

- تاوایی پتانسیل شبه زمین گرد، مجموعه مقالات همایش پیش‌بینی عددی وضع هوا، تهران، ۲۹ آذر ۱۳۸۵.
- زربو، ا. م.، ۱۳۹۰، بررسی موردی پدیده بندال روی اروپا- آسیا با استفاده از فعالیت موج و شار آن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد هواشناسی، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- قرایلو، م.، احمدی گیوی، ف. و محب‌الحجه، ع.، ۱۳۸۵، مطالعه دینامیک سامانه‌های چرخندی روی ایران از دیدگاه تاوایی پتانسیلی: مطالعه موردی برای آذرماه ۱۳۸۲، مجله فیزیک فضا و زمین، ۳۲(۱)، صفحه ۱-۱۳.
- محب‌الحجه، ع.، احمدی گیوی، ف. و قائمی، ه.، ۱۳۷۴، بررسی بی‌هنجاری فشار زیاد مستقر در اروپا و تاثیر آن بر روی آب‌وهوای ایران در اردیبهشت ۱۳۷۱، گزارش نهایی طرح پژوهشی، سازمان هواشناسی کشور.
- Barriopedro, D., R. Garcia-Herrera, A. R., Lupo, and Hernandez, E., 2005, Climatology of Northern Hemisphere blocking: *J. Climate*, **19**, 1042-1063.
- Colucci, S. J., 1985, Explosive cyclogenesis and large-scale circulation changes: Implications for atmospheric blocking: *J. Atmos. Sci.*, **42**, 2701-2717.
- Diao, Y., Li, J., and Luo, D., 2006, A New Blocking index and its Application: Blocking Action in the Northern Hemisphere: *J. Climate*, **19**, 4819-4839.
- Elliott, R. D., and Smith, T. B., 1949, A study of the effects of large blocking highs on the general circulation in the Northern Hemisphere westerlies: *J. Meteor.*, **6**, 67-85.
- Green, J. S. A., 1977, The weather during July 1976: Some dynamical considerations of the drought: *Weather*, **32**, 120-126.
- Lejena's, H., and Økland, H., 1983, Characteristics of Northern Hemisphere blocking as determined from a long series of observational data: *Tellus*, **35A**, 350-362.
- Luo, D., 2005a, A barotropic envelope Rossby soliton model for block-eddy interaction. Part I: Effect of topography: *J. Atmos. Sci.*, **62**, 5-21.

اتفاق افتاده، به تفکیک منطقه آسیا از منطقه اروپا و اطلس، نشانگر آن است که بندال‌های واقع در منطقه اروپا و اطلس دارای تداوم بیشتری نسبت به بندال‌های منطقه آسیا و آسیای شرقی در همه فصل‌ها، به‌خصوص در فصل زمستان هستند. به این علت که منطقه آسیا در فواصل بسیار دور از بخش جریان‌سوی مسیر توفان اطلس قرار دارد، بنابراین بسامد رخداد بندال کوچک‌تر و همچنین دارای شدت و طول عمر کمتری است. از مقایسه نتایج مربوط به دو شاخص دیده می‌شود که شاخص دوم نسبت به اول درصد بسامد رخداد کمتری در بازه طول جغرافیایی در فصل‌های زمستان و بهار دارد، اما الگوهای فصل تابستان و پاییز برای دو شاخص تقریباً مشابه است. به‌طور کلی، اگرچه نسخه اصلاح شده شاخص اول TM90 می‌تواند رخداد‌های بندال را شناسایی کند، اما قادر نیست عرض جغرافیایی ارتفاع‌های ژئوپتانسیلی در منطقه بندال را با دقت تعیین کند و به‌وضوح روند تحول فضایی و زمانی فرایند بندال را نشان دهد؛ زیرا فقط سه عرض جغرافیایی ثابت برای محاسبات این شاخص به کار می‌رود. از سوی دیگر، با توجه به تحول زمانی و مکانی بندال، ضرورت دارد که عرض‌های مرجع نیز تابع زمان و مکان باشند و از یک روز به روز دیگر، تغییر کنند. بنابراین شاخص دوم که شاخصی دو بُعدی است، می‌تواند برای شناسایی بندال‌ها، بهتر و دقیق‌تر عمل کند.

منابع

- احمدی حجت، م.، ۱۳۹۰، مطالعه دینامیکی و ترمودینامیکی ساختار پرفشار سبیری و عوامل موثر در تقویت آن در دوره ۱۹۴۸ تا ۲۰۰۸، رساله دکتری هواشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.
- احمدی گیوی، ف.، آزاد، ر. و محب‌الحجه، ع.، ۱۳۸۵، مطالعه دینامیکی پدیده بندال با استفاده از

- blocking flow fields: Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **109**, 737-761.
- Tibaldi, S., and Molteni, F., 1990, On the operational predictability of blocking: Tellus, **42A**, 343-365.
- Wiedenmann, J. M., Lupo, A. R., Mokhov, I. I., and Tikhonova, E. A., 2002, The climatology of blocking anticyclones for the Northern and Southern Hemisphere: Block intensity as a diagnostic: J. Climate, **15**, 3459-3473.
- Lupo, A. R., and Smith, P. J. 1995, Climatological features of blocking anticyclones in the Northern Hemisphere: Tellus, **47A**, 439-456.
- Rex, D. F., 1950b, Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate. Part II: The climatology of blocking action: Tellus, **2**, 275-301.
- Shutts, G. J., 1983, The propagation of eddies in diffluent jet streams: Eddy vorticity forcing of