



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Antarctic Wind Field anomalies and polar lows

Hossein Farjami^{1*}, Mehdi Esmaili²

1. Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Tehran, Iran.

2. Chabahar Maritime University, Chabahar, Iran.

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 2022/09/10

Revised: 2023/03/11

Accepted: 2022/11/19

Keywords:

Journal
Oceanography
Research
Template
Engineering
Scientific

*Corresponding author:

hfarjami@gmail.com

0000-0001-8163-6753

Doi: 10.52547/joc.13.52.5

Dor:20.1001.1.15621057.1401.13.52.5.0

ABSTRACT

Background and Objectives: Antarctica, the fifth continent on the planet, is a vast region near the South Pole that plays a role like a beating heart in the rhythm of Earth's life by controlling thermal balance and developing the ocean-atmospheric systems. This continent has singular importance in various scientific, political, and economic aspects, which has attracted the attention of different countries. The extreme atmospheric and oceanic phenomena of this area have an effect on the earth's climate. One of the significant extreme phenomena is mesoscale cyclones. These cyclones convert to polar lows in the special conditions that make modeling and forecasting conditions more difficult. In this research, wind field anomalies are evaluated using satellite scatterometry and reanalysis data in the period from 2000-2020. Different parts of Antarctica have been investigated for the formation of mesoscale cyclones and then presented with polar lows in the study area.

Methods: The Antarctic region has a vital role in controlling the climate of our planet. Due to the geographical conditions of Antarctica, various cyclones are formed in this region, and they not only have an effect on the region's climate but also play a determinant role in the earth's climate. Meso-scale cyclones that have a diameter of less than 2000 km and surface winds stronger than 14 m/s as a result of the main fronts at the poles are classified as polar lows. To investigate this issue, the surface wind data of the National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) used a 0.25 degree mesh grid. Then, an anomaly of surface wind is extracted using the Empirical Orthogonal Functions. In the following, different identified polar lows were investigated using the surface wind of satellite scatterometry, the temperature of the surface of 500 hPa and the polar low life stability obtained from the ERA5 post-processing data set. The cyclone tracking algorithm was used to check all the characteristics of meso-scale cyclones.

Findings: Analyzing the anomaly using empirical orthogonal functions shows that the first component represents about 51% of the total surface wind variance. This component has a stronger anomaly pattern in winter seasons than in summer, and this component indicates the dominant wind pattern of the region, and extreme variance is observed in the west of Antarctica. Also, this component shows that in the dry part of the region, the wind anomaly is higher than in the water part, this can happen because of the structure of the Antarctic basin. In the blue part of the study area, on the Amundsen Sea, which is located along the South Pacific Ocean in the west of Antarctica, the wind anomaly is estimated to be higher than other blue areas of Antarctica. This pattern can be caused by hot and cold water currents in the region, which needs serious study and investigation. The second component of the surface wind anomaly accounts for about 20% of the total variance. It shows the highest anomaly in the Weddell Sea. In this region, the Weddell Gyre is dominant and can be caused by the atmosphere-ocean interaction and the atmospheric systems ruling over the region. The third and fourth anomaly components each show about 10% of the total variance. The third component is the most anomaly in Ross Sea and Ross Ice Shelf and the fourth component shows the most changes in Weddell Sea in addition to Ross Sea and Ross Ice Shelf. Accordingly, Ross Gyre and Weddell Gyre play a significant role in determining the Antarctic wind pattern. According to the criteria provided for identifying mesoscale gyres, polar low pressures can be identified and investigated using satellite spectrometric data and reanalysis.

Conclusion: Extreme weather in high latitudes and near the north and south poles of the earth causes air-sea interaction to happen. The strong winds of these regions generate rogue waves in the oceans. Among these phenomena, there are a series of meso-scale phenomena such as polar lows, with limited information. Therefore, such phenomena are not considered in global models and post-processed data. Consequently, it is necessary to modify the global dynamic ocean-atmospheric models in the Southern Ocean by considering different polar lows.

The results of this research show that the first mode, which is about 51% of the total variance, confirms wind anomalies are higher in the mountainous regions and in the southeast of Antarctica than in other parts of the studied region. Although the second and third components show the maximum anomaly happening on the Ross and Ronne ice shelves, which show local effects on the wind speed patterns in the study area, This subject requires further research.



NUMBER OF TABLES

0



NUMBER OF FIGURES

11



NUMBER OF REFERENCES

28

مقاله پژوهشی

بی‌هنجاری میدان باد و کم‌فشارهای قطبی در جنوبگان

حسین فرجامی^{۱*}، مهدی اسماعیلی^۲

۱. پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، ایران

۲. دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۶/۱۹

تاریخ بازبینی: ۱۴۰۱/۱۲/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۸/۲۸

واژگان کلیدی:

بی‌هنجاری باد

الگوریتم تشخیص

کم‌فشار قطبی

جنوبگان

پیشینه و اهداف: جنوبگان، پنجمین قاره روی کره زمین، سرزمین پهناوری در نزدیکی قطب جنوب است که مانند قلبی تپنده در آهنگ زندگی کره زمین در جهت شکل‌گیری و کنترل سلسله‌های جوی اقیانوسی و تعادل گرمایی آن نقش آفرینی می‌کند. همچنین این قاره از جنبه‌های گوناگون علمی، سیاسی و اقتصادی اهمیت ویژه‌ای دارد که روز به روز بیشتر مورد توجه کشورهای مختلف قرار می‌گیرد. پدیده‌های حدی جوی و اقیانوسی این منطقه تأثیر زیادی در کنترل آب و هوایی کره زمین دارند. یکی از این پدیده‌های قابل توجه، چرخندهای میان مقیاس قطبی است. این چرخندها در شرایط ویژه‌ای تبدیل به کم‌فشارهای قطبی می‌گردند که شرایط مدل‌سازی و پیش‌بینی را سخت‌تر می‌کنند. در این تحقیق با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای اسکرومتری و داده‌های بازتحلیل شده ضمن بررسی بی‌هنجاری باد در بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۲۰، مناطق مستعد شکل‌گیری چرخندهای میان مقیاس مورد بررسی قرار گرفت و معیارهای شکل‌گیری کم‌فشارهای قطبی ارائه گردید.

روش‌ها: منطقه جنوبگان نقش ویژه‌ای در کنترل دمایی و تعیین اقلیم کره زمین دارد. به دلیل شرایط جغرافیایی جنوبگان، کم‌فشارهای مختلفی در این منطقه شکل می‌گیرند و نه تنها بر اقلیم آن منطقه تأثیر می‌گذارند بلکه در اقلیم کره زمین نقش آفرینی می‌کنند. چرخندهای میان مقیاس با قطر کمتر از ۲۰۰۰ کیلومتر و سرعت باد سطحی بالاتر از ۱۴ متر بر ثانیه حاصل از جبهه‌های اصلی در قطب‌ها به عنوان کم‌فشارهای قطبی دسته‌بندی می‌گردند. برای بررسی این موضوع از داده‌های باد سطحی مرکز ملی تحقیقات جو (NCEP/NCAR) با دقت مکانی ۰/۲۵ استفاده گردید. سپس با استفاده از روش آماری چند متغیره توابع متعلمد تجری، بی‌هنجاری باد سطحی منطقه مورد مطالعه استخراج شد. در ادامه، ضمن مطالعه روش‌های مختلف شناسایی کم‌فشارهای قطبی، با استفاده از باد سطحی اسکرومتری ماهواره‌ای، دمای سطحی، دمای ۵۰۰ هکتوپاسکال و عمر پایداری کم‌فشار حاصل مجموعه داده‌های پس‌پردازش ERA5 چرخندهای میان مقیاس و کم‌فشارهای منطقه مورد مطالعه، بررسی شد. برای مسیریابی کم‌فشار قطبی از الگوریتم چرخندیلی و ردیابی تلم و ویژگی‌های چرخندهای میان مقیاس استفاده شد.

یافته‌ها: بررسی بی‌هنجاری باد سطحی با استفاده از توابع متعلمد تجری نشان می‌دهد، مولفه اول آن بیابگر حدود ۵۱٪ از کل واریانس باد سطحی است. این مولفه الگوی بی‌هنجاری قوی‌تری را در فصول زمستان نسبت به تابستان دارد (نتایج در این مقاله آورده نشده است) و این مولفه نشان‌دهنده الگوی باد غالب منطقه است و واریانس شدید در سمت غرب جنوبگان مشاهده می‌شود. همچنین این مولفه نشان می‌دهد در بخش خشکی منطقه بی‌هنجاری باد بیشتر از بخش اقیانوسی است. این مولفه به دلیل ساختار منطقه جنوبگان اتفاق بیفتد. بر این اساس در بخش اقیانوسی منطقه مورد مطالعه، بر روی دریای آموندسن ۲ که در امتداد اقیانوس آرام جنوبی در غرب جنوبگان قرار دارد، بی‌هنجاری باد بیشتر از مناطق دیگر اقیانوسی جنوبگان برآورد می‌شود. این الگو می‌تواند ناشی از جریانات آب گرم و سرد منطقه باشد که نیاز به مطالعه و بررسی جدی دارد. مولفه دوم بی‌هنجاری باد سطحی حدود ۲۰٪ از واریانس کل را به خود اختصاص داده است. بیشترین مقدار آن را بر روی دریای وادل^۳ نشان می‌دهد. در این منطقه پیچیده وادل^۴ غالب است و می‌تواند ناشی از اندرکنش جو اقیانوس و سلسله‌های جوی حاکم بر روی منطقه باشد. مولفه‌های سوم و چهارم بی‌هنجاری هر کدام حدود ۱۰٪ از کل واریانس باد سطحی را نشان می‌دهند. مولفه سوم بیشترین تغییرات را نشان می‌دهد. بر این اساس دو پیچیده راس و وادل نقش بسزایی در تعیین الگوی باد جنوبگان بازی می‌کنند. با توجه به معیارهای ارائه شده برای شناسایی چرخندهای میان مقیاس، کم‌فشارهای قطبی با استفاده از داده‌های اسکرومتری ماهواره‌ای و بازتحلیل قابل شناسایی و بررسی است.

نتیجه‌گیری: پدیده‌های حدی در عرض‌های بالا و نزدیک قطب شمال و جنوب کره زمین با شدت بیشتری باعث اندرکنش جو اقیانوس می‌شوند. سرعت بالای باد سطحی در این مناطق باعث شکل‌گیری امواج خیلی بلند در سطح اقیانوس‌های این مناطق می‌گردد. در بین این پدیده‌ها یک سری پدیده‌های کمتر شناخته شده‌ای مانند کم‌فشارهای قطبی وجود دارد که اطلاعات کمی از آنها در دسترس است. به طوری که در خیلی از موارد در داده‌های پس‌پردازش شده در نظر گرفته نشده است. بنابراین لازم است ضمن استخراج و دسته‌بندی این کم‌فشارها عملکرد مدل‌های دینامیکی جوی و اقیانوسی را ارتقا داد.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، اولین مولفه بی‌هنجاری که حدود ۵۱٪ از کل واریانس را به خود اختصاص داده است، در مناطق کوهستانی و نیز جنوب شرقی قطب جنوب بی‌هنجاری باد بیشتر از دیگر بخش‌های منطقه مورد مطالعه است. در حالی که مولفه‌های دوم و سوم بیشترین بی‌هنجاری را بر روی صفحات یخی راس^۷ و ران^۸ نشان می‌دهند که ناشی از اثر پدیده‌های محلی است و نیاز به مطالعه بیشتر دارد.

*نویسنده مسئول:

hfarjami@gmail.com

0000-0001-8163-6753

Doi: 0.52547/joc.13.52.5

Dor:20.1001.1.15621057.1401.13.52.5.0

1. National Center for Atmospheric Research
2. Amundsen Sea
3. Weddell Sea
4. Weddell Gyre
5. Ross Sea
6. Ross Ice Shelf
7. Ross Ice Shelf
8. Ronne Ice Shelf

مقدمه

جنوبگان یا قطب جنوب سرزمین پهناوری است که پنجمین قاره بزرگ روی کره زمین محسوب می‌گردد. این قسمت از کره زمین و دریاهای پیرامونی آن از جنبه‌های گوناگون علمی، سیاسی و اقتصادی دارای اهمیت ویژه‌ای برای کشورهای مختلف دارد. وجود منابع عظیم معدنی و شرایط منحصر به فرد جنوبگان در جهت تحقیقات علمی مختلف در زمینه هوا-فضا و تحقیقات ماهواره‌ای، نجوم و مغناطیس، توفان‌های خورشیدی، تنوع زیستی، یخ‌شناسی و اقلیم‌شناسی و پدیده‌های جوی و اقیانوسی، تحقیقات پزشکی و غیره باعث شده است مورد توجه ویژه کشورهای پیشرفته و در حال توسعه جهان قرار گیرد. بنابراین طبیعت دست نخورده، سرمای طبیعی، حجم عظیم یخ‌ها، سقوط شهاب‌سنگ‌ها و ده‌ها عامل دیگر دست به دست هم داده‌اند تا قاره جنوبگان به یک مرکز تحقیقاتی بزرگ بین‌المللی تبدیل شود. در این بین شناسایی پدیده‌های حدی جوی و اقیانوسی از جنبه‌های مختلف بویژه بررسی اقلیم منطقه و تاثیر آن بر آب و هوای کره زمین و نیز به عنوان سنسور تغییرات اقلیمی جهان دارای اهمیت ویژه‌ای است.

مطالعات مختلفی در زمینه میدان باد سطحی در منطقه جنوبگان و دریاهای اطراف آن انجام شده است. در سال ۲۰۲۰ محققان چینی روند باد سطحی و تغییرات آن در قطب جنوب و اقیانوس جنوبی را با استفاده از داده‌های بازتحلیل ERA-Interim در بازه زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۷ مورد بررسی قرار دادند. سپس اثرات این تغییرات بر انرژی باد منطقه با استفاده از هوش مصنوعی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد به طور کلی، در مناطق ساحلی جنوب شرقی و در کوهستان سراسری جنوبگان^۱ باد سطحی قوی‌تر؛ در حالی که بر روی صفحات یخی راس^۲ و ران^۳ و همین‌طور شبه جزیره جنوبگان^۴ باد سطحی ضعیف‌تر هستند. از طرفی در فصل زمستان سرعت وزش باد بیشتر از فصل تابستان است. بادهای جنوب اقیانوس هند و آرام و در امتداد مناطق ساحلی تغییرات سالانه قوی را نسبت به دیگر بخش از خود نشان می‌دهند که به نظر می‌رسد با شاخص نوسان قطب جنوب (AAO)^۵ مرتبط باشد [۱].

در مناطقی از حوضه‌های دریایی و اقیانوسی که بالاتر از عرض‌های میانی کره زمین قرار دارند، میدان باد سطحی حاصل از چرخندها، پارامترهای اقیانوسی مانند امواج و جریان‌ها را به شدت تحت تاثیر خود قرار می‌دهند. در مناطق نزدیک قطب برخی از چرخندها در مقیاس کوچک‌تر تبدیل به کم‌فشارهای قطبی می‌شوند. به عبارتی کم‌فشارهای قطبی^۶ چرخندهای میان مقیاس با سرعت باد بالا، روی دریاها و اقیانوس‌ها است که در سمت قطب‌های جغرافیایی کره زمین تشکیل می‌شوند [۲]. این کم‌فشارها به دلیل شکل‌گیری و توسعه سریع و مدت زمان کم فعالیت آنها، که حدود ۱۸ تا ۳۶ ساعت است، شناخته می‌شوند [۳]. بادهای تند و باران‌های همرفتی شدید حاصل از کم‌فشارهای قطبی باعث می‌شود این پدیده جزو مخاطرات دریایی محسوب شود و هنگام رسیدن به مناطق خشک، خطری جدی برای جوامع ساحلی محسوب گردد [۴]. مقیاس کوچک و شرایط حدی کم‌فشارهای قطبی باعث می‌شود نتوان به راحتی آنها را در مدل‌های جهانی بررسی آب و هوا اعمال کرد [۵]. همین‌طور سازوکار دینامیکی واحدی وجود ندارد که بر شدت و توسعه کم‌فشارهای قطبی حاکم باشد [۶].

تعریف‌های کمی متفاوتی در مطالعات مختلف برای کم‌فشارهای قطبی ارائه شده است، اما در دو دهه گذشته محققان این زمینه تا حدودی به یک اجماع نظری در مورد این پدیده رسیده‌اند، آنها به چرخندهای دریایی حاصل از جبهه‌های اصلی در قطب‌ها با قطر کمتر از ۲۰۰۰ کیلومتر و سرعت باد سطحی بالاتر از ۱۴ متر بر ثانیه را به عنوان کم‌فشارهای قطبی دسته‌بندی کرده‌اند [۷]. کم‌فشارهای قطبی معمولاً در طول هجوم توده^۷ هوای عظیم سرد از سمت قطب به سمت عرض‌های میانی شکل می‌گیرند. این توده‌های هوا از نواحی یخ‌زده دریاها یا قسمت‌های داخلی قطب‌ها که دارای هوای سرد و خشک هستند، سرچشمه می‌گیرند و به دلیل تشعشعات سرد به شدت لایه‌بندی می‌شوند. از طرفی دمای نسبی بالاتر اقیانوس نسبت به خشکی باعث فرارفت بر روی سطح آن شده و شارهای شدید گرمایی و رطوبتی به سمت بالا شکل می‌گیرند [۸]. این امر باعث ناپایداری توده‌های هوا در منطقه شده و خطوط (رودخانه‌های) ابری همرفتی کم عمق را ایجاد می‌کنند. هنگامی که شار گرمایی و رطوبت سطحی قوی با نیروهای دیگری مانند بی‌هنجاری پتانسیل تاوایی^۸ در سطوح بالا و یا چگال‌گرایی کم‌عمق ترکیب

1. Transantarctic Mountains
2. Ross Ice Shelf
3. Ronne Ice Shelf
4. Antarctic Peninsula
5. The Antarctic Oscillation (AAO)

6. Polar Lows
7. Air outbreak
8. Potential Vorticity (PV)

می‌شوند، می‌توانند باعث شکل‌گیری کم‌فشار قطبی گردند [۹]. کم‌فشارهای قطبی پدیده‌های زمستانی هستند، زیرا شب‌های قطبی شرایطی را فراهم می‌کند تا توده هوای قطبی به اندازه کافی سرد شده و انتقال انرژی عظیم هوا-دریا باعث می‌شود انرژی مورد نیاز شکل‌گیری چرخند تامین گردد. کم‌فشارهای قطبی انرژی خود را از ترکیب فرآیندهای کژفشار^۱ و بی‌درو^۲ تامین می‌کنند و نقش نسبی این فرآیندها بسیار متفاوت است که بر ساختار و شدت کم‌فشارها تأثیر می‌گذارند. ساختار ابر یک کم‌فشار قطبی، طیفی از کم‌فشارهای ماریچی شکل در انتهای آنهاست، و ابر کاما شکل در سمت دیگر آن تشکیل می‌شود [۸].

تا همین دهه اخیر، هیچ داده عددی جوی بلند مدت جهت بررسی و تحلیل کم‌فشارهای قطبی وجود نداشت، و داده‌های بازتحلیل فقط برای بررسی رابطه شرایط سینوپتیکی با توسعه کم‌فشارهای قطبی، مورد استفاده قرار می‌گرفت [۹، ۱۰]. در دو دهه گذشته، توانایی‌های محاسباتی کافی برای پدیده‌های ریزمقیاس و میان‌مقیاس مانند کم‌فشارهای قطبی فراهم گردیده است. در حال حاضر چندین مجموعه داده اقلیم‌شناسی کم‌فشارهای قطبی تولید شده است و مطالعاتی صورت گرفته است [۱۱-۱۴]. این مطالعات از لحاظ منطقه مورد بررسی، و پیش‌فرض‌های تعیین کم‌فشارهای قطبی بر اساس میانگین فشار سطحی دریا^۳، تلاویی نسبی، پایداری، و یا حتی مسافت طی شده و جهت حرکت آنها انجام می‌شود، با همدیگر متفاوت هستند. مفروضات اعمالی مختلف در الگوریتم، دقت تشخیص چرخند را تعیین می‌کند.

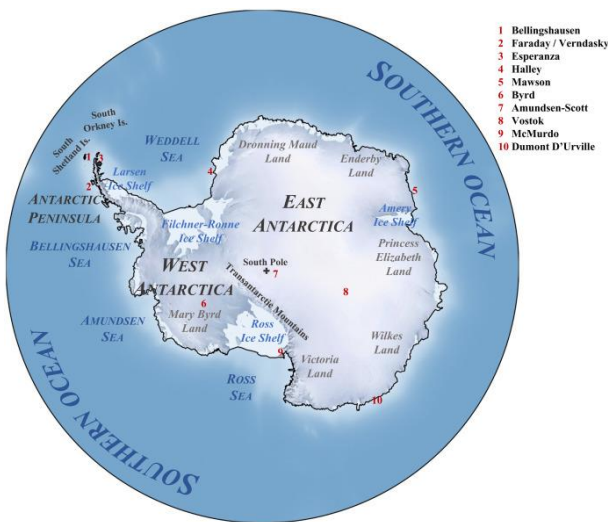
جهت بررسی اقلیم کم‌فشارهای قطبی با استفاده از روش عددی برای اولین بار جهت تعیین کمیت دینامیک آنها، توسط براسگردل و گرای (۲۰۰۸) و کرزه (۲۰۱۳) مطرح شد [۱۱، ۱۴]. اولین مورد از این مطالعات، فرکانس کم‌فشارهای قطبی نوع A، B و C را از لحظه شروع در سطوح بالا و پایین تخمین می‌زند و یک ارزیابی شرایط باروکلینیکی و ناپایداری (معیاری از فرایند همرفتی) را بر اساس منطقه ارزیابی می‌کند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که حدود یک سوم کم‌فشارهای قطبی دریای شمال اروپا از نوع C هستند که به شکل همرفتی کنترل می‌شوند، همچنین نشان می‌دهد که پایداری عمودی در کم‌فشارهای قطبی با افزایش طول بادگیر^۴ از لبه یخ کاهش می‌یابد و شرایط کژفشاری در نزدیکی لبه یخ اتفاق می‌افتد، جایی که جبهه‌های کم‌عمق قطب شمال اغلب به چرخندهای میان‌مقیاس قطبی تبدیل می‌شوند. مطالعات کرزه

روش پژوهش

در این تحقیق ضمن شناسایی کم‌فشارهای قطبی از داده‌های اسکرومتری ماهواره‌ای به مطالعه این پدیده‌های میان‌مقیاس پرداخته شده است.

منطقه مورد مطالعه

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شده است، منطقه جنوبگان مسئولیت ویژه‌ای در کنترل دمایی و اقلیم کره زمین دارد. به دلیل شرایط جغرافیایی خاص منطقه، کم‌فشارهای مختلفی در آن شکل می‌گیرند و آب و هوای آن را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند. در شکل ۱ نقشه جغرافیایی منطقه مورد مطالعه آورده شده است.



شکل ۱. نقشه جنوبگان همراه با ایستگاه‌های تحقیقاتی (16).

داده‌های مورد نیاز

در این مطالعه داده‌های سرعت و جهت باد سطحی از مرکز ملی تحقیقات جو NCEP/NCAR^۵ (https://climatedataguide.ucar.edu) در بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۲۰ با دقت مکانی ۰/۲۵ در منطقه مورد مطالعه استخراج

9. Baroclinity
2. Adiabatic
3. Mean Sea Level Pressure (MSLP)
4. Fetch

5. National Center for Atmospheric Research

روش‌های شناسایی و ردیابی خودکار، ابزار مناسبی برای تجزیه و تحلیل سامانه‌های جوی و اقیانوسی در مجموعه داده‌های بلندمدت جهت تعیین اقلیم یا تغییرات اقلیمی محسوب می‌شود [۲۵، ۲۶]. استفاده از الگوریتم‌های عددی ردیابی خودکار، جهت تشخیص تغییرات توفان‌ها یا چرخندها امری ضروری است. همچنین این الگوریتم‌ها ما را قادر می‌سازد به مطالعه شکل‌گیری و تحلیل انرژی توفان‌ها یا چرخندها و نیز ادغام یا جدایی احتمالی آن‌ها در طول دوره دوامشان بپردازیم [۲۷].

کم‌فشار قطبی یک سیستم کم‌فشار میان مقیاس جوی (مقیاس افقی بین ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتر) است که دارای طول عمر کوتاه بوده و سرعت باد نزدیک به ۱۵ متر بر ثانیه یا بالاتر دارد. این نوع کم‌فشار جوی در در نواحی اقیانوسی قطب‌های کره زمین و نیز بر روی دریای ژاپن شکل می‌گیرد [۲۸].

شناسایی کم‌فشارهای قطبی در دو مرحله جداگانه صورت می‌گیرد. در مرحله اول تمام توفان‌ها در مقیاس کم‌فشارهای قطبی با بکارگیری الگوریتم ردیابی توفان با استفاده از داده‌های اسکترومتري شناسایی شدند. سپس با بکارگیری معیارهای تشخیصی، کم‌فشارهای قطبی از دیگر کم‌فشارهای میان مقیاس متمایز گردید.

به طور کلی روش‌های ردیابی لاگرانژی خودکار را می‌توان به سه بخش پیش پردازش (فیلتر کردن)، تشخیص و ردیابی تقسیم‌بندی کرد. علاوه بر این، مسیرها بر اساس شدت، ساختار و فعالیت طبقه‌بندی می‌شوند. سپس یک بخش دیگر اضافه می‌گردد یعنی یک فیلتر فضایی اغلب برای تشخیص و ردیابی پدیده‌های میان‌مقیاس و ریزمقیاس مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۳].

برای ردیابی کم‌فشار قطبی، در مرحله اول از فیلترهایی همچون باند گذر فضایی^۴ برای استخراج چرخندهای میان مقیاس از میدان‌های کامل زمینه استفاده می‌شود. با این حال فیلترهای دیگری از جمله تبدیل کسینوسی گسسته^۵ و فیلتر دیجیتالی فضای دو بعدی تقریباً همسانگرد^۶ نیز استفاده می‌گردد. نقاطی که برای ردیابی استفاده می‌شوند، معمولاً به‌عنوان نقاط حدی محلی میدان پارامترها انتخاب می‌گردند، برای مثال، کمینه میدان فشار سطح دریا^۷ [۲۵]، و یا سطح ارتفاع ژئوپتانسیل^۸ ۱۰۰۰ هکتوپاسگال، بیشینه میدان تاوایی نسبی در نیمکره شمالی و کمینه میدان تاوایی نسبی در نیمکره جنوبی و تاوایی ژئوستروفیک بر اساس لاپلاسن

گردید. سپس با استفاده از روش آماری چند متغیره توابع متعامد، بی‌هنجاری مکانی-زمانی خطی غالب و سری‌های زمانی آن‌ها استخراج گردید. این روش مجموعه‌ای از متغیرهای همبسته را با تبدیل به توابع متعامد به مجموعه‌ای از متغیرهای غیر همبسته تبدیل می‌کند و الگوهای غالب پارامترهای فیزیکی و مهمترین آن‌ها را تشخیص می‌دهد [۱۷]. سپس با استفاده از این داده‌ها چرخند میان مقیاس و کم‌فشارهای منطقه مورد مطالعه استخراج گردیده است. الگوریتم مسیریابی چرخند [۱۸-۲۰]. برای شناسایی و ردیابی تمام ویژگی‌های چرخندهای میان مقیاس در میدان تاوایی نسبی ۸۵۰ هکتوپاسگال در بازتحلیل سیستم موقتی قطب شمال^۱ استفاده می‌شود. کم‌فشارهای قطبی از طریق اعمال معیارهای طراحی شده برای شناسایی سامانه‌های مولد تندباد^۲ در توده‌های هوای ناپایدار استخراج می‌شود. این نتایج توسط هرت (۲۰۰۳) مورد بررسی قرار گرفته است [۲۱].

گاهی برای سادگی کم‌فشارهای قطبی میان مقیاس را به عنوان "چرخندهای میان مقیاس"^۳ مطرح می‌کنند. کم‌فشارهای قطبی از روی شدت آنها از سایر چرخندهای میان مقیاس قطبی متمایز می‌شوند، اگرچه این تمایز دلخواه است و هیچ آستانه شدت طبیعی واضح یا سازوکار توسعه‌ای خاصی وجود ندارد که پدیده‌ها را از هم جدا کند. دسته‌بندی کم‌فشارهای قطبی از چرخندهای میان مقیاس قطبی به دلایل متعددی مفید و کاربردی است. معیار شدت آستانه سامانه جوی از نقطه نظر پیش‌بینی مورد توجه است. همچنین در نظر گرفتن چرخندهای میان مقیاس با شدت کم در همه شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌ها باعث طولانی شدن محاسبات در مدل‌سازی می‌گردد.

خود چرخندهای میان مقیاس قطبی زیاد مورد مطالعه قرار نگرفته است، تنها دو مورد مطالعه اقلیم‌شناسی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای انجام شده است [۲۲، ۲۳] و یکی دیگر از مطالعات با استفاده از داده‌های پس‌پردازش شده [۲۴] بوده است. بسته به مقیاس کم‌فشارهای قطبی حدود ۲۰ تا ۸۰ درصد از آنها در داده‌های بازتحلیل ERA-Interim در نظر گرفته نشده است. زیرا تحلیل چنین داده‌هایی تا همین اواخر از نظر محاسباتی بسیار سنگین و مشکل بودند.

– شناسایی و ردیابی کم‌فشارهای قطبی

4 Spatial bandpass
5 Discrete Cosine Transform, DCT
6 Near-Isotropic Two-Dimensional Spatial Digital Filter
7 Minima Of The Mean Sea Level Pressure (MSLP)
8 Geopotential Height Surface

1. the Interim Arctic System Reanalysis (ASR, Bromwich et al. 2012)
2. Gale-Producing
3. Mesocyclones

منطقه جنوبگان و چرخه حرکت یک نمونه چرخند از مرحله شکل‌گیری تا از بین رفتن در منطقه نشان داده شده است.

فشار یا ژئوپتانسیل به عنوان نقاط حدی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۷].

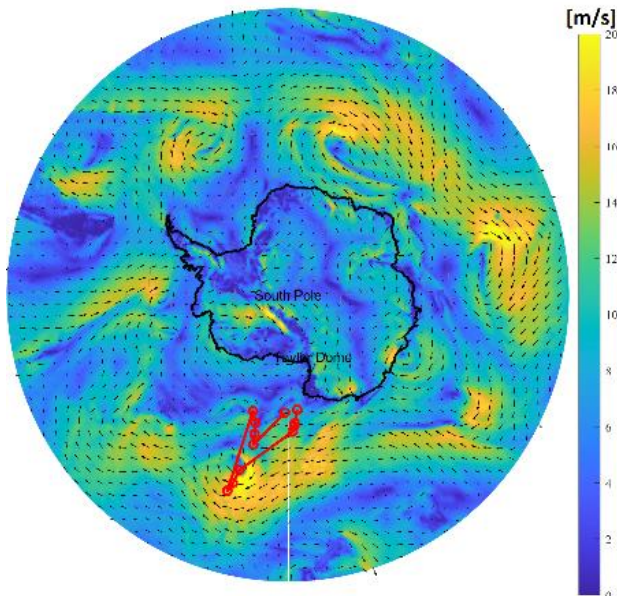
نتایج و بحث

– باد سطحی

اقیانوس جنوب، با گستره وسیعی از آب‌های آزاد و بادهای مداوم و معمولاً بسیار شدید، منطقه‌ای است که بزرگترین امواج اقیانوسی در آن ثبت شده است. امواج ایجاد شده در این اقیانوس می‌توانند در هزاران کیلومتر دورتر در بخش ساحلی جزایر گرمسیری باعث تشدید آلودگی به ویژه آلودگی پلاستیک‌ها در سراسر اقیانوس‌های جهان می‌شوند و نقش کلیدی در تبادل انرژی گرمایی کره زمین و اندرکنش جو-اقیانوس بازی می‌کنند. شرایط جوی و اقیانوسی حاکم بر منطقه و وزش بادهای تند باعث شکل‌گیری انواع مختلفی از چرخندهای قطبی می‌شوند. در این بین چرخندهای میان مقیاسی نیز شکل گرفته و آب و هوای قطب را تحت تاثیر خود قرار می‌دهند. همچنین در مقیاس کوچکتر کم فشارهای قطبی شکل گرفته که تاثیر بسزایی در کنترل آب و هوای منطقه‌ای دارند در صورتی که تا به امروز کمتر مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته اند.

تا به حال، کم‌فشارهای قطبی، یا بر اساس مشخصه ابر یا بر اساس سازوکار تشکیل آنها طبقه‌بندی می‌شوند [۲]. همچنین چندین طبقه‌بندی بر اساس شکل و اجزای متفاوت کم فشارها با استفاده از داده‌های باند فرورسرخ ماهواره‌ای ارائه شده است، اگرچه مدل‌سازی عددی تا حد زیادی جایگزین این روش شناسایی شده است [۲۹]. کم‌فشارهای قطبی زمانی ایجاد می‌شوند که در آن کژفشاری محیط با انتشار گرمای نهان دست به دست هم می‌دهند که می‌توانند بین سامانه‌های مختلف و حتی در طول عمر یک کم فشار قطبی بسیار متفاوت باشند. مطالعات خیلی محدود در زمینه دینامیک اقلیمی کم‌فشارهای قطبی انجام شده است [۱۲، ۱۵] و حتی کمتر چرخه‌های زندگی یا تداوم آنها مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان نمونه ابر کامای کم‌فشارهای قطبی به حالت مارپیچ همرفتی این کم‌فشارها تبدیل می‌شوند. اما تابحال مشخص نشده است که کجا، چند وقت یک‌بار و تحت چه شرایطی این اتفاق می‌افتد.

در دنیای امروزی وقت آن رسیده که به شکل دقیق پدیده‌های جوی – اقیانوسی جنوبگان مورد رصد و مطالعه قرار گیرد تا چگونگی فرایندهای میان مقیاس و ریزمقیاس و اثر آنها بر تغییر اقلیم مشخص گردد. در شکل ۲ میدان باد سطحی

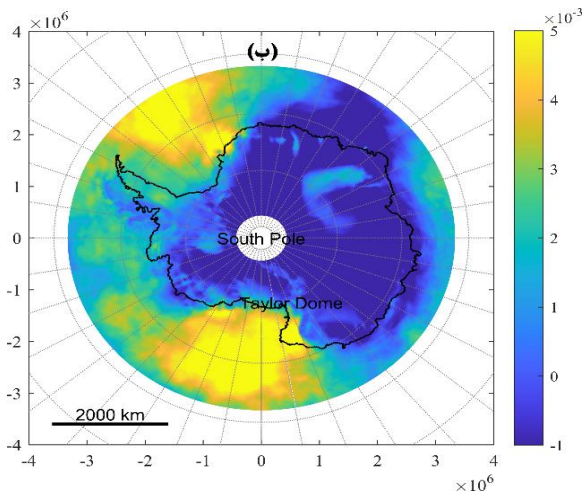
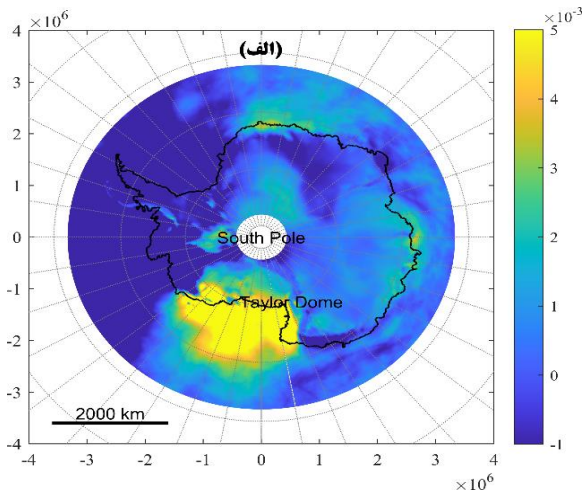


شکل ۲. میدان باد و چرخه شکل‌گیری و از بین رفتن یک چرخند (خط قرمز) در نزدیکی قطب جنوب در تاریخ ۲۳ مارس ۲۰۰۳.

برای بررسی بی‌هنجاری میدان باد از توابع متعامد تجربی در بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۲۰ استفاده شده است. بررسی بلند مدت بی‌هنجاری باد نشان می‌دهد، مولفه اول نمایشگر حدود ۵۱٪ از کل واریانس است (شکل ۳). این مولفه الگوی بی‌هنجاری قوی‌تری را در فصول زمستان نسبت به تابستان نشان می‌دهد که حاکمیت باد غالب منطقه است. واریانس شدید در سمت غرب منطقه جنوبگان مشاهده می‌گردد که می‌تواند ناشی از الگوی جریان‌ات در منطقه باشد. بی‌هنجاری میدان باد بر روی سطح خشکی منطقه بیشتر از بی‌هنجاری باد روی سطح اقیانوس است. این امر می‌تواند به دلیل ساختار حوضه جنوبگان باشد بی‌هنجاری باد بر روی دریای آموندسن که در امتداد اقیانوس آرام جنوبی در غرب جنوبگان قرار دارد، بیشتر از دیگر بخش‌های اقیانوس مشاهده می‌شود. این الگو می‌تواند ناشی از جریان‌های آب گرم و سرد منطقه مانند پیچه راس، جریان برزیل^۱، جبهه قطبی^۲، جبهه جریان پیراقطبی جنوبگان^۱ و جبهه جنب جنوبگان^۲ باشد که نیاز به مطالعه و بررسی دقیق دارد.

1. Brazil current
2. Polar front

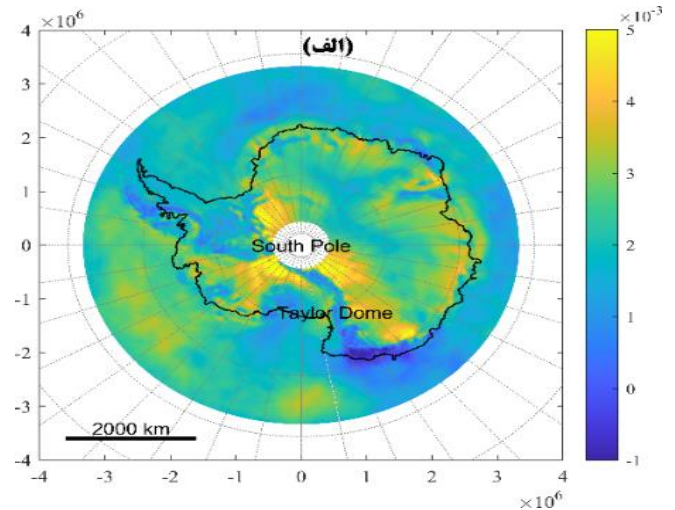
دریای راس و لایه یخی راس غالب است (شکل ۵ الف) و مولفه چهارم علاوه بر دریای راس و لایه یخی راس در دریای ودل نیز بیشترین تغییرات را نشان می‌دهد (شکل ۵ ب). بر این اساس پیچه راس و پیچه ودل نقش بسزایی در تعیین الگوی باد جنوبگان بازی می‌کنند.



شکل ۵. بی‌هنجاری میدان باد سطحی در جنوبگان؛ مولفه سوم (الف) و مولفه چهارم (ب).

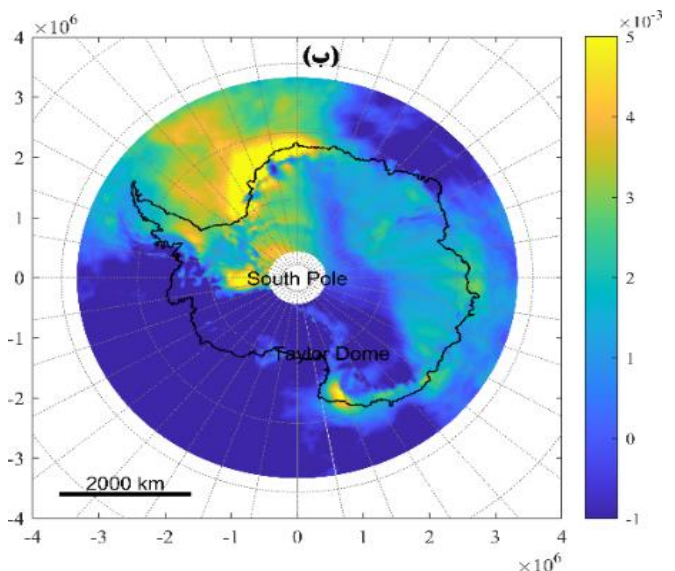
-کم فشار قطبی

همانطور که قبلاً نیز ذکر شده است، یکی از پدیده‌های جوی میان مقیاس تاثیرگذار بر الگوی باد منطقه مورد مطالعه کم‌فشارهای قطبی است. به طور معمول، نقاط حدی محلی بر اساس مقایسه با نقاط شبکه اطراف همدیگر شناسایی می‌شوند و با جستجوی کامل در کل داده‌های شبکه میدان مورد نظر استخراج می‌گردد. با استفاده از داده‌های مختلف، از بین چرخندهای میان مقیاس که دارای قطر بین ۲۰۰-۶۰۰ کیلومتر؛ اختلاف ۴۳ درجه سلسیوس بین دمای سطح دریا و دمای سطح ۵۰۰ هکتوپاسگال حداقل یک بار در طول مسیر حرکت آن؛ در



شکل ۳. مولفه اول بی‌هنجاری میدان باد سطحی در جنوبگان؛

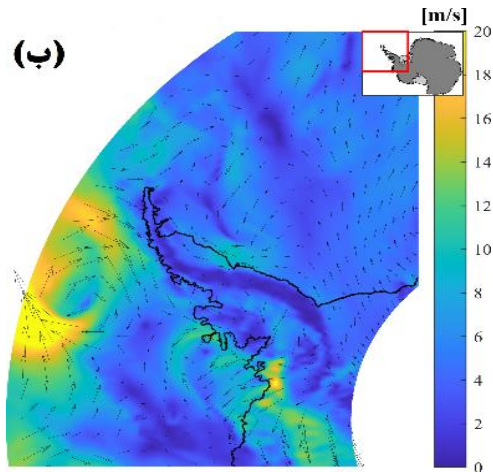
مولفه دوم بی‌هنجاری باد سطحی حدود ۲۰٪ از واریانس کل را به خود اختصاص داده است. بیشترین بی‌هنجاری را در دریای ودل نشان می‌دهد در این منطقه پیچه ودل غالب است و می‌تواند ناشی از اندرکنش جو-اقیانوس و سامانه‌های جوی حاکم بر روی منطقه باشد (شکل ۴).



شکل ۴. مولفه دوم بی‌هنجاری میدان باد سطحی در جنوبگان؛

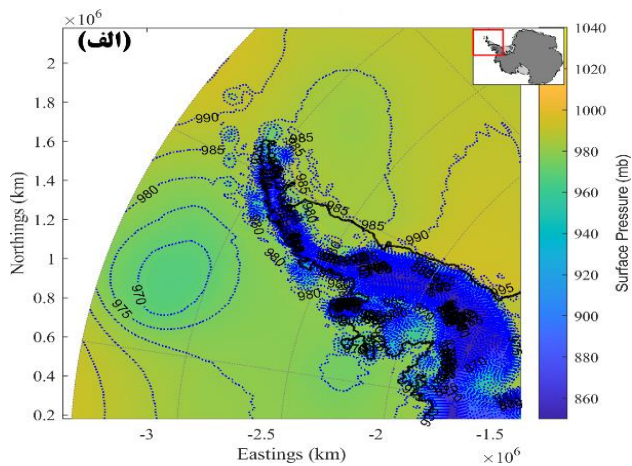
مولفه‌های سوم و چهارم بی‌هنجاری هر کدام حدود ۱۰٪ از واریانس کل را نشان می‌دهند. مولفه سوم بیشترین بی‌هنجاری در

1. Southern Antarctic Circumpolar Current Front
2. Subantarctic Front



شکل ۶. میدان بادهای سطحی کم فشار قطبی در تاریخ ۳۱ مارس ۲۰۲۰. بر اساس داده‌های باد اسکترومتري ماهواره‌ای

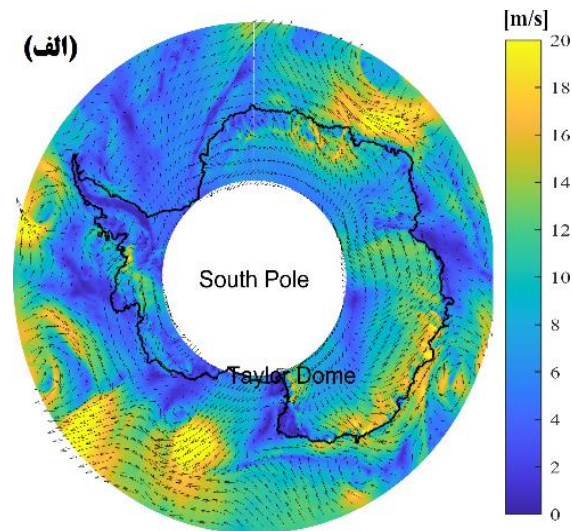
از ویژگی کم فشارهای قطبی این است که در محدوده ۱۵۰ کیلومتری از مرکز کم فشار حداقل یک بار فشار جوی باید کمینه باشد. همانطور که در شکل ۷ الف آمده است، در محدوده مورد نظر فشار سطحی کمینه در حدود ۹۳۰ هکتوپاسگال نیز می‌رسد. همچنین برای بررسی شرایط دمایی شکل‌گیری این پدیده اختلاف دمایی سطح دریا و سطح ۵۰۰ هکتوپاسگال محاسبه گردید و مشخص شد در بازه مورد نظر همواره اختلاف دمایی بالای ۴۳ درجه سلسیوس در موقعیت کم فشار قطبی اتفاق افتاده است. این اختلاف دمایی در شکل ۷ ب آمده است.



محدوده ۱۵۰ کیلومتری از مرکز کم فشار سرعت باد ارتفاع ۱۰ متری باید در بخش‌هایی بیش از ۱۴ متر بر ثانیه بوده؛ در محدوده ۱۵۰ کیلومتری مرکز کم فشار حداقل باید یک کمینه فشار محلی یا موضعی در بازه طول عمر خود داشته باشد؛ همین‌طور باید یک کم فشار قطبی حداقل ۵۰ درصد از عمر خود را در روی سطح اقیانوس گذرانده باشد، تا به عنوان کم فشارهای قطبی تلقی گردد.

وجود انواع مختلف کم فشارهای قطبی، از نظر محیط‌های پیدایش و دینامیک شروع آن روشن می‌سازد که منابع انرژی کم فشارهای قطبی خیلی متنوع بوده و بین موارد مختلف بسیار متفاوت هستند. در این بخش می‌توان نقش فرآیندهای دینامیکی و ترمودینامیکی مختلف در شکل‌گیری و ادامه حیات کم فشارهای قطبی را با جزئیات بیشتری مورد بحث قرار می‌دهد و اساس فرورفتگی‌های سطح بالایی، ناپایداری باروکلینیک، ناپایداری باروتروپیک و انتشار گرمای نهان در توسعه کم فشار قطبی را بررسی کرد.

برای همین منظور یک نمونه از این کم فشارها بر اساس شرایط ذکر شده در بخش قبلی مورد مطالعه و بررسی قرار داده شده است. الگوی باد این کم فشار قطبی در شکل ۶ نشان داده شده است، برخلاف نیمکره شمالی، در نیمکره جنوبی جهت چرخندها ساعتگرد است. این کم فشار در ۳۰ تا ۳۱ مارس ۲۰۲۰، در سمت شمال غرب منطقه و نزدیک شبه جزیره جنوبگان^۱ که بخش شمالی سرزمین جنوبگان به‌شمار می‌آید شکل گرفته است. سرعت باد این کم فشار در مرکز حدود ۲ متر بر ثانیه بوده ولی با دور شدن از مرکز سرعت باد به بالای ۲۰ بر ثانیه هم می‌رسد (شکل ۴).

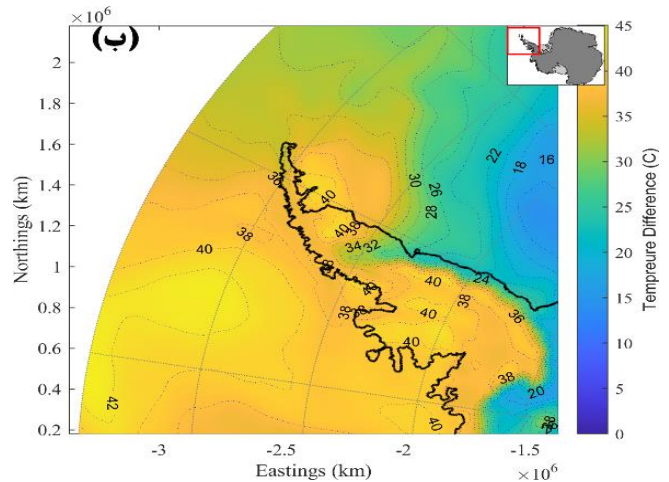


در نیمکره جنوبی بازی می‌کنند. چراکه بادهای قوی و مداوم ناشی از حرکت چرخندها باعث شکل‌گیری امواج خیلی بلند در این مناطق می‌گردد. اقلیم امواج بلند و توفان‌ها در عرض‌های مذکور می‌تواند چشم‌اندازی از تغییرات وقوع امواج حدی در اختیار پژوهشگران قرار دهد که حاصل از شکل‌گیری و حرکت سامانه‌های قوی جوی منطقه است. در بین این پدیده‌ها یک سری پدیده‌های کمتر شناخته شده‌ای وجود دارد که می‌توانند نه تنها نقش تعیین کننده در اقلیم منطقه، بلکه اقلیم کره زمین را نیز تحت تأثیر خود قرار دهند. یکی از این پدیده‌ها کم‌فشارهای قطبی در این منطقه است که اطلاعات کمی در این منطقه در دسترس است. به طوری که در خیلی از موارد در داده‌های پس پردازش شده در نظر گرفته نشده است. برای پاسخ‌گویی به این بحث، از مجموعه داده‌های اسکرومتری ماهواره‌ای برای شناخت و ردیابی کم‌فشارهای قطبی استفاده شده است.

در مرحله اول کار، با بکار بردن روش تحلیل آماری توابع متعامد مولفه‌های مختلف بی‌هنجاری باد سطحی جنوبگان استخراج گردید. برای دستیابی به این هدف از داده‌های پس‌پردازش شده باد سطحی در بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۲۰ از عرض جغرافیایی ۶۳ تا ۹۰ درجه جنوبی که شامل اقیانوس جنوب و مناطق یخی و خشکی است، استفاده شد و مناطق پتانسیل تشکیل چرخندهای قطبی شناسایی گردید.

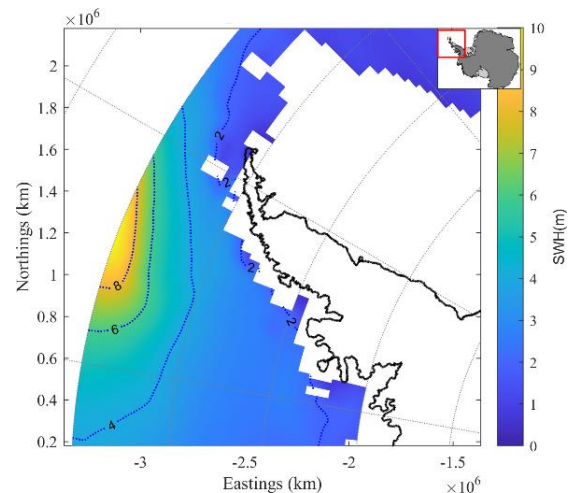
نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، اولین مولفه بی‌هنجاری، که بیشترین درصد را به خود اختصاص داده است، در مناطق کوهستانی و نیز جنوب شرقی قطب جنوب بی‌هنجاری باد بیشتر از دیگر بخش‌های منطقه مورد مطالعه است که با مطالعه لچیانگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ همخوانی خوبی دارد [۱]. در حالی که مولفه‌های دوم و سوم بیشترین بی‌هنجاری را بر روی صفحات یخی راس^۱ و ران^۲ نشان می‌دهند که ناشی از اثر پدیده‌های محلی است و نیاز به مطالعه بیشتر دارد.

سپس با استفاده از داده‌های اسکرومتری ماهواره‌ای و داده‌های بازتحلیل کم‌فشارهای قطبی شناسایی و مورد بررسی قرار گرفت. در این زمینه می‌توان به تحقیقات موردی مانند تحقیق گوندرو و هینیمن سال ۱۹۹۰ [۳۰] در دریای ودل^۳ اشاره کرد که با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای تعدادی از چرخندهای میان مقیاس را استخراج نموده‌اند. در تحقیق دیگری زنیو و همکارانش در سال ۲۰۰۲ به بررسی دینامیک تاوایی این کم‌فشارها پرداخته است [۳۱]. با



شکل ۷. میدان فشار هوای سطح دریا در زمان حرکت کم‌فشار قطبی در تاریخ ۳۱ مارس ۲۰۲۰. بر اساس داده‌های ERA5 (الف). اختلاف دمای سطح دریا و سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال (ب)

اثری که کم‌فشارهای قطبی در این منطقه دارد باعث اندرکنش جو، اقیانوس و یخ می‌گردد. مدل‌سازی امواج ناشی از باد در این منطقه در بازه گذر کم‌فشار قطبی و بعد از آن ترسیم گردید. نتیجه شکل‌گیری و عبور این کم‌فشار و اندرکنشی که بین جو و اقیانوس اتفاق افتاده باعث شکل‌گیری امواج بلند در منطقه می‌گردد بطوری که در برخی ساعت ارتفاع موج بالاتر از ۱۰ متر هم می‌رسد. انتقال انرژی موج بر روی یخ‌های منطقه باعث آب شدن یخ‌های منطقه می‌گردد.



شکل ۸. امواج بلند حاصل از شکل‌گیری و حرکت کم‌فشار قطبی در منطقه مورد مطالعه در ساعت ۰۶ تاریخ ۳۱ مارس ۲۰۲۰.

نتیجه‌گیری

پدیده‌های حدی به ویژه چرخندها نقش اساسی در اندرکنش جو- اقیانوس در عرض‌های بالا در نیمکره شمالی و در عرض‌های پایین‌تر

1. Ross Ice Shelf
2. Ronne Ice Shelf
3. Weddell Sea

- [10]. Kolstad EW. A global climatology of favourable conditions for polar lows. *Q J R Meteorol Soc.* 2011;137(660):1749–61.
- [11]. Claud C, Duchiron B, Terray P. Associations between large-scale atmospheric circulation and polar low developments over the North Atlantic during winter. *J Geophys Res Atmos.* 2007;112(D12).
- [12]. Bracegirdle TJ, Gray SL. An objective climatology of the dynamical forcing of polar lows in the Nordic seas. *Int J Climatol A J R Meteorol Soc.* 2008;28(14):1903–19.
- [13]. Zahn M, von Storch H. Climatological differences of reproduced North Atlantic Polar Lows in long term simulations with CLM. submitted; 2008.
- [14]. Chen F, von Storch H. Trends and variability of North Pacific polar lows. *Adv Meteorol.* 2013;2013.
- [15]. Crezee S. An objective climatology of Polar Lows: structure and forcing mechanisms. 2013.
- [16]. Panel ME. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. *Ecosyst Serv.* 2014;
- [17]. Liu H, Jezek K, Li B, Zhao Z. Radarsat Antarctic Mapping Project digital elevation model version 2. *Radarsat Antarct Mapp Proj Digit Elev Model version 2.* 2001;
- [18]. Hodges KI. Feature tracking on the unit sphere. *Mon Weather Rev.* 1995;123(12):3458–65.
- [19]. Hodges KI. A general method for tracking analysis and its application to meteorological data. *Mon Weather Rev.* 1994;122(11):2573–86.
- [20]. Hodges KI. Adaptive constraints for feature tracking. *Mon Weather Rev.* 1999;127(6):1362–73.
- [21]. Hart RE. A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. *Mon Weather Rev.* 2003;131(4):585–616.
- [22]. Harold JM, Bigg GR, Turner J. Mesocyclone activity over the Northeast Atlantic. Part 2: An investigation of causal mechanisms. *Int J Climatol A J R Meteorol Soc.* 1999;19(12):1283–99.
- [23]. Yarnal B, Henderson KG. A climatology of polar low cyclogenetic regions over the North Pacific Ocean. *J Clim.* 1989;2(12):1476–91.
- [24]. Condon A, Bigg GR, Renfrew IA. Polar Mesoscale Cyclones in the Northeast Atlantic: Comparing Climatologies from ERA-40 and Satellite Imagery. *Mon Weather Rev [Internet].* 2006;134(5):1518–33. Available from: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/134/5/mwr3136.1.xml>
- [25]. Zahn M, von Storch H. A long-term climatology of North Atlantic polar lows. *Geophys Res Lett [Internet].* 2008 Nov 1;35(22). Available from: <https://doi.org/10.1029/2008GL035769>
- [26]. Murray RJ, Simmonds I. A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. *Aust Meteorol Mag.* 1991;39(3):155–66.
- [27]. Inatsu M. The neighbor enclosed area tracking algorithm for extratropical wintertime cyclones. *Atmos Sci Lett.* 2009;10(4):267–72.
- [28]. Stoll PJ. A global climatology of polar lows

استخراج و دسته‌بندی این کم‌فشارهای قطبی می‌توان اطلاعات کاملی جهت بهبود عملکرد مدل‌های جوی و مدل‌های دینامیکی موج و جریان در اقیانوس جنوبی را در اختیار محققین قرار داد. همچنین می‌توان دقت مدل‌های جهانی پیش‌بینی آب و هوا را بهبود بخشید.

تشکر و قدردانی

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته از طرح شماره «۹۹۰۰۶۴۸۹» در مرکز ملی تحقیقات جنوبگان تحت نظر پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی انجام شده است. داده‌های استفاده شده در این پژوهش از سایت (<https://cds.climate.copernicus.eu>) و (<https://podaac.jpl.nasa.gov>) استخراج شده است.

تعارض منافع

این مقاله بر اساس «تعارض حرفه‌ای و مالکیت فکری: ارتقای سازمانی و نظریات تخصصی شخصی اینجانب به‌عنوان نویسنده مسئول گردآوری شده است.»

منابع

- [1]. Yu L, Zhong S, Sun B. The climatology and trend of surface wind speed over Antarctica and the Southern Ocean and the implication to wind energy application. *Atmosphere (Basel).* 2020;11(1):108.
- [2]. Rasmussen EA. Polar lows. In: *A Half Century of Progress in Meteorology: A Tribute to Richard Reed.* Springer; 2003. p. 61–78.
- [3]. Grønås S, Foss A, Lystad M. Numerical simulations of polar lows in the Norwegian Sea. *Tellus A.* 1987;39(4):334–53.
- [4]. Terpstra A, Watanabe S. Polar lows. In: *Oxford research encyclopedia of climate science.* 2020.
- [5]. Zahn M, von Storch H. Decreased frequency of North Atlantic polar lows associated with future climate warming. *Nature.* 2010;467(7313):309–12.
- [6]. Sardie JM, Warner TT. On the Mechanism for the, Development of Polar Lows. *J Atmos Sci.* 1983;40(4):869–81.
- [7]. Wilson DK, Shaw MJ, Ostashev VE, Muhlestein MB, Alter RE, Swearingen ME, et al. Numerical modeling of mesoscale infrasound propagation in the Arctic. *J Acoust Soc Am.* 2022;151(1):138–57.
- [8]. Fairless C. A climatology of North Atlantic polar lows and their phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. *The University of Manchester (United Kingdom);* 2016.
- [9]. Riedel CP, Cavallo SM, Parsons DB. Mesoscale prediction in the Antarctic using cycled ensemble data assimilation. *Mon Weather Rev.* 2021;149(2):443–62.

- [30]. Heinemann G. Mesoscale vortices in the Weddell Sea region (Antarctica). *Mon Weather Rev.* 1990;118(3):779–93.
- [31]. Zuev V V, Savelieva E. Antarctic polar vortex dynamics during spring 2002. *J Earth Syst Sci.* 2022;131(2):1–9.
- investigated for local differences and wind-shear environments. *Weather Clim Dyn.* 2022;3(2):483–504.
- [29]. Troup AJ, Stretten NA. Satellite-observed Southern Hemisphere cloud vortices in relation to conventional observations. *J Appl Meteorol Climatol.* 1972;11(6):909–17.

 AUTHOR(S) BIOSKETCHES


Farjami, H., *Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Tehran, Iran.*

✉ hfarjami@gmail.com

0000-0001-8163-6753

Esmaeili, M, Chabahar Maritime University, Chabahar, Iran.



 این قسمت توسط نشریه تکمیل می‌گردد:

HOW TO CITE THIS ARTICLE



Dor:20.1001.1.15621057.1401.13.52.5.0



<http://doi.org/10.52547/joc.13.52.5>



<http://joc.inio.ac.ir/article-1-1733-fa.html>



<https://orcid.org/0000-0001-8163-6753>

COPYRIGHTS



©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.