

Investigation of jet indices in warm and cold seasons in the northern and southern hemispheres (1948-2023)

Moradi, M.¹ 

1. Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: moradim36@gmail.com

(Received: 16 Sep 2024, Revised: 22 Oct 2024, Accepted: 4 Jan 2025, Published online: 10 June 2025)

Summary

Narrow, rapidly flowing currents of air located near the tropopause are known as jet streams. These jets, often found nearly girdling the globe while exhibiting large meridional meanders, are among the most ubiquitous structural characteristics of Earth's atmosphere and are known to play a substantial role in the production of sensible weather in the mid-latitudes. Jet streams are classified into two different types subtropical jet and polar-front jet streams. Subtropical jets are driven by angular momentum transport from the tropics and are centered at the poleward boundaries of the Hadley cell and polar-front jets are driven by baroclinic eddies and are associated with weather and climate events, such as precipitation and cold wave processes.

To study whether jet streams have been changing in the past decades, we used the historical data of NCEP/NCAR from the National Centers for Environmental Protection and the National Center for Atmospheric Research, covering 1948 to 2023. We have used the daily means of u, v components, temperature and geopotential height, at 6 levels from 400 to 100 hPa and daily means temperature at 4 levels from 1000 to 700 hPa.

In this paper, we firstly calculated the wind speed index, pressure index and latitude index that were defined by Archer and Caldeira (2008) to characterize the strength, the pressure level, and the latitudinal position of a jet stream, respectively. Then after that the variability of the characteristics of jet streams of both hemispheres in warm and cold seasons were investigated.

In addition, the temperature trend in the upper and lower troposphere was determined by calculating the average seasonal temperatures over latitudinal zones 0°-15°, 15°-30°, 30°-45°, 45°-60°, 60°-75°, 75°-90° in northern and southern hemisphere at upper levels of 400, 300, 250, 200, 150, 100 hPa and lower levels of 1000, 925, 850, 700 hPa.

We found that, in general, the jet streams have moved poleward in both hemispheres so that the shift of subtropical jets in the northern hemisphere was 0.061 (0.019) °/decade in DJF poleward (JJA) and in the southern hemisphere was 0.307 (0.223) °/decade in DJF (JJA) for 1948-2023. Also in the southern hemisphere, the subtropical jet in winter and summer is weakening but the polar front jet is strengthening. In the northern hemisphere, in both warm and cold seasons the trend of wind speed is increasing in the poleward side of the jet axis, and is decreasing in the southern side of its axis, while the trend of the maximum wind speed is upward. One of the important factors of these changes can be related to the upward temperature trend in the tropical and subtropical regions of both hemispheres.

In this statistical period, the smallness of the slope of the zonal mean of seasonal temperature trend of the lower levels of the tropical region, compared to the slope of the average temperature trend of the upper levels of the subtropical region, has caused strengthening of the Hadley cell convection which is less than the weakening of its meridional circulation range. This could be one of the factors that lowered the trend of the jet streams speed in both hemispheres. Also, the results show that the mass-flux weighted pressure in the DJF season is minimum around the equator and is minimum in the JJA season around the orbit of 12°N from the west of Mauritania to the southeast of China.

Keywords: Jet speed index, Mass-flux weighted average latitude, Subtropical jet stream.

Cite this article: Moradi, M. (2025). Investigation of jet indices in warm and cold seasons in the northern and southern hemispheres (1948-2023). *Journal of the Earth and Space Physics*, 51(1), 229-246.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.382276.1007625>



بررسی شاخص‌های جریان جتی در فصل‌های گرم و سرد سال در دو نیمکره شمالی و جنوبی (۱۹۴۸-۲۰۲۳)

محمد مرادی^۱ ✉^۱. پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران.رایانامه نویسنده مسئول: moradim36@gmail.com

(دریافت: ۱۴۰۳/۶/۲۶، بازنگری: ۱۴۰۳/۸/۱، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۳/۲۰)

چکیده

در این پژوهش با استفاده از داده‌های دما، ارتفاع و مؤلفه‌های افقی بردار باد در ۶ سطح فشاری زیرین از ۴۰۰ تا ۱۰۰ هکتوپاسکال که در بایگانی NCEP/NCAR در دسترس است، تغییرات فصلی میانگین وزنی سرعت باد، فشار و عرض جغرافیایی در دو نیمکره شمالی و جنوبی در دوره آماری ۱۹۴۸-۲۰۲۳، با اصلاح روش آرچر و کالدیرا (۲۰۰۸) محاسبه و تحلیل شد.

نتایج کلی نشان داد که محور جت‌های جنب‌حاره در هر دو نیمکره به‌سوی قطب جابه‌جا شده و جت جنب‌حاره نیمکره جنوبی در هر دو فصل گرم و سرد، روند تضعیف دارد و سرعت باد در محور این جت کاهشی است در حالی که سرعت باد جت جنب‌قطبی این نیمکره در هر دو فصل گرم و سرد، افزایشی است. در نیمکره شمالی در هر دو فصل گرم و سرد، در بخش شمالی محور جت جنب‌حاره روند سرعت باد افزایشی و در بخش جنوبی محور آن کاهشی است در حالی که سرعت بیشینه جت در هر دو فصل افزایشی می‌باشد. یکی از عوامل مهم این تغییرات را می‌توان به روند افزایشی دما در مناطق حاره و جنب‌حاره در هر دو نیمکره ربط داد. کوچک‌بودن شیب خط روند میانگین مداری دمای سطوح زیرین منطقه حاره در این دوره آماری، نسبت به شیب خط روند میانگین مداری دمای سطوح زیرین منطقه جنب‌حاره سبب شده است که اثر تقویت گستره همرفت سلول هادلی نسبت به واداشت تضعیف گستره گردش نصف‌النهار آن کمتر باشد و این می‌تواند یکی از عوامل روند کاهشی سرعت جریان‌های جتی در هر دو نیمکره باشد.

واژه‌های کلیدی: شاخص سرعت باد جت، میانگین وزنی عرض جغرافیایی بر اساس شار جرم، جریان‌های جت جنب حاره.

۱. مقدمه

باشد که از طریق تقویت یا تضعیف سامانه‌های همدیدی عبوری یا تغییر مسیر آنها میسر می‌شود. دیدبانی‌های روزانه میدان باد در وردسپهر بالا و پژوهش‌های پیشین (پینا-اورتیز و همکاران، ۲۰۱۳؛ هال و همکاران، ۲۰۱۷) دو نوع جت، جت جنب حاره و جت جبهه قطبی، را در هر نیمکره آشکار کرده است. جت جنب حاره که در لبه قطب سوی سلول هادلی در وردسپهر بالای مناطق جنب حاره هر دو نیمکره قرار دارد، در اثر پایداری تکانه زاویه‌ای و اختلاف گرمای دو منطقه حاره و جنب‌حاره ایجاد می‌شود (کوتسوارام، ۱۹۵۳؛ کریشناامورتی، ۱۹۶۱؛ ریحل، ۱۹۶۲) و در نقشه‌های همدیدی در فصل‌های مختلف در سطوح فشاری ۳۰۰، ۲۵۰ و ۲۰۰ هکتوپاسکال در اطراف مدار ۳۰ درجه جغرافیایی قابل تشخیص است. جت جبهه قطبی در بالای منطقه

جت استریم، نوار باریکی از بادهای غربی قوی در نزدیکی وردایست است (والیس، ۲۰۱۹) که با فراز و فرودهای نصف‌النهاری که در مقیاس همدیدی به خود می‌گیرد (فاراندا و همکاران، ۲۰۱۹)، دور تا دور زمین را در بالای وردسپهر عرض‌های جغرافیایی حاره‌ای تحت تاثیر قرار می‌دهد (کریستن‌سن و همکاران، ۲۰۱۷). این جریان از ویژگی‌های اصلی گردش جو در مقیاس بزرگ است که نقش مهمی در تغییرات وضع هوا دارد و می‌تواند فراوانی، شدت و تداوم رخدادهای جوی را در مناطق تحت تاثیر، تعدیل کند (هال و همکاران، ۲۰۱۴؛ روتلیسبرگر و همکاران، ۲۰۱۶؛ روسی و همکاران، ۲۰۲۲) به‌طوری که تغییر در مقدار سرعت و جهت آن می‌تواند عامل تضعیف یا تشدید رخدادهای جوی و افزایش یا کاهش فراوانی آنها

کرده است. این پژوهشگران علت جابه‌جایی منطقه‌ای محور جت جنب حاره در شرق آسیا را در گرمایش دررو فلات تبت در ماه‌های ژوئن-ژوئیه به مناطق بالای وردسپهر میانی می‌دانند.

استرانک و دیویس (۲۰۰۷) با استفاده از داده‌های ۶ ساعته مؤلفه‌های افقی باد که از NCEP/NCAR گرفته شده بود، روند سرعت باد مربوط به جت جنب حاره زمستانه نیمکره شمالی را در دوره آماری ۱۹۵۸-۲۰۰۷ بررسی کردند. آنها با در نظر گرفتن تراز فشاری ۲۵۰ هکتوپاسکال و آستانه سرعت باد ۲۵/۷ متر بر ثانیه برای محور جت جنب حاره در ماه‌های دسامبر تا فوریه، نشان دادند که در غرب و مرکز اقیانوس آرام روند سرعت باد محور جت جنب حاره صعودی است و سرعت محور جت در هر ده سال به مقدار ۱/۷۵ متر بر ثانیه افزایش یافته است. چون سرعت جت به پایداری تکانه زاویه‌ای بستگی دارد و تکانه زاویه‌ای نیز تابعی از عرض جغرافیایی است، از این رو افزایش سرعت جت می‌تواند معرف افزایش عرض جغرافیایی بخش قطب سوی سلول هادلی نسبت به حالت اولیه و در نتیجه افزایش تکانه زاویه‌ای در این منطقه نسبت به حالت قبل از افزایش سرعت جت باشد. همچنین محور جت در این دوره آماری در خاورمیانه و شرق اقیانوس آرام به سوی قطب و در روی اقیانوس اطلس به سوی استوا جابه‌جا شده است.

هادسون (۲۰۱۱)، موقعیت جت جنب حاره نیمکره شمالی و جنوبی را در دوره آماری ۱۹۷۹-۲۰۱۰ بررسی کرد. این پژوهشگر با استفاده از تحلیل وایازی خطی نشان داد که در دوره سی ساله تحت بررسی، جت جنب حاره در نیمکره شمالی ۳/۷ درجه و در نیمکره جنوبی ۶/۵ درجه به سمت قطب جابه‌جا شده است. لی و همکاران (۲۰۱۹)، در دوره آماری ۱۹۷۹-۲۰۱۸، با استفاده از شاخص‌های آرچر و کالدیرا (میانگین وزنی سرعت باد بر اساس جرم، میانگین وزنی فشار و عرض جغرافیایی بر اساس جرم)، ابتدا جت جنب حاره شرق آسیا را به جت زمستانه جنب حاره (از مدار ۱۵ تا ۴۷/۵ درجه شمالی)، جت تابستانه جنب حاره (از ۲۷/۵ تا ۶۰ درجه شمالی) و جت تابستانه جبهه قطبی (از ۶۰ تا ۸۷/۵ درجه شمالی) دسته‌بندی کردند و

کژفشاری قرار دارد که در آن شیو نصف‌النهاری دما، هوای گرم مناطق جنب حاره را از هوای سرد مناطق جنب قطبی جدا کرده است. بیشترین سرعت محور این جت، در نزدیک ۳۰۰ هکتوپاسکال آشکار می‌شود (پالمن و نیوتن، ۱۹۶۹؛ شاپیرو و کیسر، ۱۹۹۰). این جت معرف مرز بین دو توده هوای عرض‌های میانی و جنب قطبی می‌باشد (کروگر، ۲۰۲۰).

شدت و موقعیت جت‌ها تابعی از شیو دما است. در زمستان که شیو دما بیشتر است، سرعت باد در مرکز هر دو جت افزایش می‌یابد و جهت جت جبهه قطبی در راستای نصف‌النهاری به سوی جنوب تغییر می‌کند و ممکن است در برخی مناطق هر دو نیمکره با بخش شمالی جت جنب حاره ادغام شود. در نتیجه، هر دو جت نمی‌توانند به صورت مجزا ظاهر شوند و یک نوار پهن یکسان سرعت بیشینه باد ایجاد می‌شود (لی و کیم، ۲۰۰۳). به علاوه هنگام استفاده از میانگین بلندمدت سرعت باد برای آشکارسازی جت‌ها نیز هر دو جت به ندرت ظاهر می‌شوند. در این حالت برای نامیدن این نوار پهن سرعت بیشینه باد، از عبارت جفت شدگی دو جت استفاده می‌شود (آرچر و کالدیرا، ۲۰۰۸). سامانه‌های همدیدی گرایش دارند که با جریان‌های جتی همراهی کنند (هادسون، ۲۰۱۱؛ بلمچری و همکاران، ۲۰۱۷)، بنابراین تغییر موقعیت جت‌ها می‌تواند سبب تغییر در مسیر سامانه‌های همدیدی و در نتیجه تغییر در الگوی بارش، دما و چرخه آب در مناطق مختلف شود و در ایجاد خشکسالی یا ترسالی نقش موثری داشته باشد. از این رو جریان‌های جتی همواره مورد توجه پژوهشگران مختلفی قرار گرفته است که در این بخش به‌طور کوتاه به چند پژوهش که در ده‌های اخیر انجام شده است، اشاره می‌شود. کوانگ و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از داده‌های NCEP/NCAR، تغییرات فصلی شدت و موقعیت جت جنب حاره در منطقه شرق آسیا را در دوره آماری ۱۹۶۱-۲۰۰۰ بررسی کردند. آنها نشان دادند که نه تنها محور جت جنب حاره در شرق آسیا در راستای مداری به شمال جابه‌جا شده است بلکه موقعیت منطقه‌ای محور این جت در ماه‌های ژوئن-ژوئیه در راستای نصف‌النهاری نیز به سوی شرق تغییر

سپس روندهای حاکم بر شاخص‌های انتخابی را تحلیل کردند. این پژوهشگران یک روند نزولی ضعیف در جت تابستانه جنب حاره با شیب خط ۰/۱۳ متر بر ثانیه در هر دهه و یک جابه‌جایی شمال‌سوی قابل ملاحظه در جت جنب حاره زمستانه با شیب ۰/۲۲ درجه در هر دهه را آشکار کردند.

وولینگ و همکاران (۲۰۲۳)، با استفاده از چهار مجموعه داده بازتحلیل ERA5، NCEP/NCAR، JRA55 و MERRA-2، اثر گرمایش منطقه حاره بر جت جنب حاره در دوره‌آماري ۲۰۱۹-۱۹۷۹ را بررسی کردند. این پژوهشگران با به‌کارگیری داده‌های میانگین روزانه مؤلفه مداری و نصف‌النهاری سرعت باد و دما در دو فصل زمستان (DJF) و تابستان (JJA)، روند جابه‌جایی جت جنب حاره به‌سوی قطب در اثر گرمایش مناطق حاره را در هر دو نیمکره تحلیل کردند. آنها نشان دادند که اگرچه مقدار جابه‌جایی قطب‌سوی جت‌ها به انتخاب دوره‌آماري و منابع داده‌ای بستگی دارد و منابع داده‌ای متفاوت، مقادیر جابه‌جایی متفاوتی را به‌دست می‌دهد، ولی مسیر جابه‌جایی در هر دو نیمکره با هر منبع داده‌ای، به‌سوی قطب است و مقدار آن نیز قابل توجه می‌باشد. این پژوهشگران گرمایش مناطق حاره در اثر تغییر اقلیم را یکی از عوامل اصلی موثر بر جابه‌جایی جت‌ها معرفی کرده‌اند و بیان کرده‌اند که این عامل بهتر است که با جزئیات بیشتری مطالعه شود.

در ایران جت‌ها از دیدگاه هواشناسی و اقلیم‌شناسی همواره مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است. برخی پژوهشگران ارتباط جریان‌های جتی با تغییرات بارش مناطق مختلف ایران را بررسی کرده‌اند (محمدی و همکاران، ۱۳۹۸؛ کیخسروی و همکاران، ۱۴۰۱؛ درستکار و همکاران، ۱۴۰۲)، برخی موقعیت جت جنب حاره را در فصل‌های گرم و سرد ارزیابی کرده‌اند (قانقره، ۱۳۹۹؛ حسینی صدیق و همکاران، ۱۴۰۰) و برخی نیز با استفاده از مدل‌های اقلیمی و سناریوهای مختلف، موقعیت و سرعت هسته جت را برای دوره‌های آماری گوناگون شبیه‌سازی کرده‌اند (عالمزاده و همکاران، ۱۳۹۶) که در زیر به‌طور کوتاه فقط به چند نمونه اشاره می‌شود.

عالمزاده و همکاران (۱۳۹۶)، در یک مطالعه، ساختار هندسی جت آفریقا-آسیا در وردسپهر زیرین و پاسخ آن به گرمایش زمین را با انتخاب دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 برای مدل‌های اقلیمی CMIP5 در دوره ۲۰۹۹-۲۰۷۶ شبیه‌سازی کردند. آنها در این بررسی، ناحیه آفریقا-آسیا را به دو قطاع شمال آفریقا و جنوب غرب آسیا تقسیم کردند و ویژگی‌های جت‌های هر قطاع را به‌طور جداگانه در فصل‌های مختلف بررسی کردند. این پژوهشگران برای ارزیابی نتایج حاصل از شبیه‌سازی از دوره تاریخی ۲۰۰۵-۱۹۸۰ استفاده کردند. نتایج این پژوهشگران نشان داد که در قطاع جنوب غرب آسیا، در بهار تندی جت افزایش می‌یابد، در تابستان جت به‌سوی استوا جابه‌جا می‌شود و در پاییز تندی جت کاهش می‌یابد. در مطالعه این پژوهشگران برای فصل زمستان تغییر پایداری در هیچ یک از شاخص‌های جت آشکار نشده است و فقط پهنای جت در قطاع آفریقا حدود ۰/۲ درجه افزایش نشان داده است.

محمدی و همکاران (۱۳۹۸)، جریان‌های جتی محدوده صفر تا ۱۲۰ درجه طول جغرافیایی شرقی و صفر تا ۸۰ درجه عرض جغرافیایی شمالی را در ۵ تراز ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال در دوره‌آماري ۲۰۱۶-۱۹۶۵ بررسی کردند و نشان دادند که در دوره سرد سال، جت جنب حاره در عرض‌های جغرافیایی ۲۰ تا ۳۰ درجه شمالی و در دوره گرم سال در عرض‌های جغرافیایی ۳۵ تا ۴۵ درجه شمالی قرار دارند. این پژوهشگران همچنین نشان دادند که در همه ترازهای تحت بررسی، دو کمربند پیوسته بادهای شدید در عرض جغرافیایی ۲۰ تا ۳۰ درجه شمالی و ۵۰ تا ۶۰ درجه شمالی وجود دارند.

قانقره (۱۳۹۹)، تغییر موقعیت جت جنب حاره روی ایران را بر اساس مدل‌های اقلیمی ارزیابی کرد. این پژوهشگر نشان داد که در دوره تاریخی ۲۰۰۵-۱۹۴۸، در طول سال، سرعت هسته جت در نواحی شرقی ایران روند صعودی معنی‌داری دارد در حالی که در نواحی غربی ایران این روند نزولی می‌باشد. او در ادامه با انتخاب دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 برای مدل‌های اقلیمی CamESM2 و GFDI- CM3 نشان داد که در دوره‌آماري ۲۱۰۰-۲۰۰۶، موقعیت

جت جنب حاره در نیمکره شمالی به شمال جابه‌جا خواهد شد. حسینی صدیق و همکاران (۱۴۰۰)، با استفاده از داده‌های ERA5 در بازه زمانی ۲۰۱۸-۱۹۷۹، گسترش قطب سوی جت جنب حاره نیمکره شمالی را بررسی کردند و نشان دادند که وضعیت میانگین ساختار افقی جت جنب حاره نیمکره شمالی در فصل تابستان در شمالی‌ترین عرض جغرافیایی قرار گرفته است و در فصل زمستان به جنوبی‌ترین عرض جغرافیایی جابه‌جا شده است. آنها همچنین نشان دادند که این جت در سال‌های ۱۹۷۹ تا ۱۹۹۷ و ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۷ دو روند جابه‌جایی به عرض‌های جغرافیایی بالاتر را داشته است.

کیخسروی و همکاران (۱۴۰۱) در تحلیل الگوهای همدیدی منجر به بارش ابرسنگین در حوضه آبریز کرخه با استفاده از جت ترازهای ۲۰۰ و ۲۵۰ هکتوپاسکال در دوره آماری ۲۰۱۸-۲۰۰۵، نشان دادند که برای ریزش بارش‌های ابرسنگین در حوضه آبریز کرخه، مناسب‌ترین حالت قرارگیری هسته جت جنب حاره در موقعیت ۲۴ درجه عرض جغرافیایی شمالی و ۴۲ درجه طول جغرافیایی شرقی می‌باشد. این پژوهشگران به عوامل دیگری که در فرایند بارش می‌تواند نقش داشته باشد، اشاره نکرده‌اند. درستکار و همکاران (۱۴۰۲)، نقش جت جنب حاره‌ای در ترسالی‌های جنوب غرب ایران را بررسی کردند و نشان دادند که در بیش از ۷۵ تا ۸۰ درصد از ترسالی‌های شدید، محور جت در روی کویت و استان خوزستان قرار گرفته است. آنها بیان کردند که محورهای جت در محدوده شمالی دریای سرخ کاملاً تغییر جهت داده و امتدادی جنوب غربی-شمال شرقی پیدا کرده و مؤلفه نصف‌النهاری آن تقویت می‌شود. این سازوکار سبب تزریق تاوایی مناسب به سامانه‌های بارشی ورودی شده و از طریق تشدید ناپایداری‌ها، سبب تشدید جریانات همرفتی و در صورت وجود رطوبت مناسب، سبب افزایش بارش می‌شوند.

از بررسی پژوهش‌های پیشین خارجی دیده شد که با افزایش دما در سطوح زیرین و اثر آن به سطوح میانی و بالای جو، جریان‌های جتی بر اساس معادله باد گرمایی، دستخوش تغییر می‌شوند. از این رو با به‌روزرکردن

دوره آماری و شیوه‌های بررسی، شاید بتوان تغییرات ویژگی‌های جت را بهتر آشکار کرد. بر این اساس، پژوهش حاضر در ادامه پژوهش آرچر و کالدیرا (۲۰۰۸) و لی و همکاران (۲۰۱۹) برای بررسی جریان‌های جتی انتخاب شد با این تفاوت که در محاسبه جرم ترازهای فشاری از ارتفاع و دمای سطوح فشاری انتخابی استفاده شد و در تعیین مرزهای افقی سطوح زیرین و زیرین جت، آستانه‌های بر اساس محاسبه میانگین مداری متوسط اندازه سرعت باد در طول یک دوره آماری مشخص، انتخاب شد و روابط ارائه شده به وسیله پژوهشگران فوق، اصلاح شد. همچنین طول دوره آماری بیشتری که منتهی به سال ۲۰۲۳ است، در نظر گرفته شد. در ایران تا کنون، مطالعه‌ای بر اساس میانگین وزنی بر اساس شار جرم و به‌روزرکردن شیوه‌های برآورد ویژگی‌های جریان‌های جت انجام نشده است و اولین بار است که با این شیوه، سعی شده است تا شاخص‌های مربوط به جریان‌های جت با داده‌های بروزتر تحلیل شود. همچنین اثر افزایش دما و گرم شدن لایه‌های مختلف جو در مناطق حاره و جنب حاره، در تغییرات سرعت و مکان جریان‌های جتی نیز در این پژوهش، بررسی شده است.

ساختار این مقاله به شرح زیر است. در بخش ۲ ابتدا داده‌های مورد استفاده برای شناسایی ویژگی‌های جت در هر دو نیمکره معرفی شده است و سپس شیوه تعیین و محاسبه شاخص‌های جت شرح داده شده است. بخش ۳ به بحث و بررسی نتایج به دست آمده اختصاص دارد و در انتها، در بخش ۴، نتایج کلی تحقیق بیان شده است.

۲. روش پژوهش

جریان‌های جتی همواره تحت تاثیر تغییرات مداری و نصف‌النهاری دما قرار دارند و افزایش دما و گرم شدن لایه‌های مختلف جو از طریق انتقال جرم و تغییر فشار هوا، سبب تغییر در سرعت و مکان جریان‌های جتی می‌شود. از این رو شناسایی موقعیت مکانی جت‌ها در یک زمان مشخص می‌تواند دشوار و مبهم باشد. پژوهشگران برای غلبه بر این مشکل، از روش میانگین وزنی کمیت‌ها استفاده

شده است. بر این اساس، شاخص میانگین وزنی سرعت باد بر اساس جرم (بر حسب متر بر ثانیه) که از این پس به اختصار میانگین وزنی سرعت باد نامیده می شود، برای هر نقطه از شبکه از رابطه زیر به دست آمد (لی و همکاران، ۲۰۱۹):

$$WS_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^6 m_{i,j,k} \times \sqrt{u_{i,j,k}^2 + v_{i,j,k}^2}}{\sum_{k=1}^6 m_{i,j,k}} \quad (1)$$

که در آن u و v به ترتیب مؤلفه های مداری و نصف النهاری باد افقی و m جرم تراز فشاری برای هر متر مربع است که به چگالی، دما و ارتفاع سطح فشاری بستگی دارد. برای مشخص کردن تغییر هر کمیت در راستای مداری (λ)، راستای نصف النهاری (ϕ) و در ترازهای فشاری (p)، به ترتیب از زیرنویس های i ، j و k استفاده شد که مقادیر آن در زیر مشخص شده است.

$k = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \rightarrow p(k) = 400, 300, 250, 200, 150, 100 \text{ hPa}$
 $j = 1, 2, 3, \dots, 72, 73 \rightarrow \phi(j) = -90.0, -87.5, -85.0, \dots, +87.5, +90.0$
 $i = 1, 2, 3, \dots, 143, 144 \rightarrow \lambda(i) = -180.0, -177.5, -175.0, \dots, +177.5, +180.0$
 برای محاسبه جرم هوا در هر تراز فشاری، با استفاده از تعریف چگالی و معادله حالت، در هر نقطه از شبکه افقی، ستونی از هوا به مساحت قاعده یک متر مربع و ارتفاع آن تراز فشاری، از رابطه زیر استفاده شد:

$$m_{i,j,k} = \frac{p_k}{R_d \times T_{i,j,k}} \times Z_{i,j,k} \quad (2)$$

در این رابطه Z ارتفاع (متر)، T دمای تراز فشاری (کلوین) و R_d ثابت ویژه گازها برای هوای خشک می باشد.

برای تعیین مرزهای بالا و پایین و موقعیت عرض جغرافیایی جریان های جتی از نیمرخ قائم تغییرات میانگین مداری سرعت باد در عرض های جغرافیایی مختلف استفاده شد. برای تعیین دامنه عرض جغرافیایی جریان های جت دو نیمکره در دو فصل گرم و سرد، از تغییرات میانگین سالانه سرعت باد در دامنه ۱۰۰-۴۰۰ هکتوپاسکال استفاده شد. شکل ۲ تغییرات سالانه عرض جغرافیایی لبه

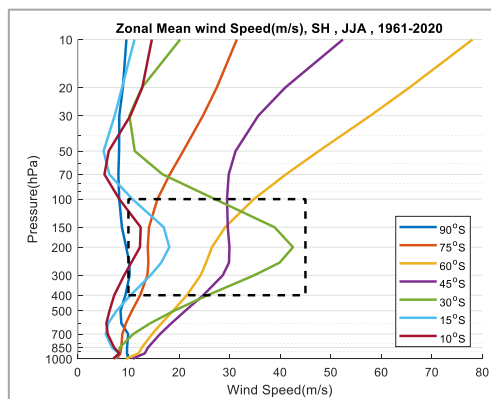
کرده و شاخص هایی تعریف کرده اند تا بتوانند ناپیوستگی مکانی و زمانی جت ها را به کمترین مقدار کاهش دهند. این شاخص ها که به راستاهای نصف النهاری و قائم بستگی دارند و در این پژوهش به عنوان شاخص های اصلی بررسی می شوند، میانگین وزنی سرعت باد بر اساس جرم، میانگین وزنی فشار و عرض جغرافیایی بر اساس شار جرم است که به وسیله آرچر و کالدیرا (۲۰۰۸) تعریف شده است. در این مقاله با بررسی نیمرخ قائم میانگین مداری سرعت باد، پهنای جت در حالت میانگین و تغییرات محور آن در دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۶۱، شرایط مناسب برای استفاده از این شاخص ها فراهم شد که به طور کوتاه به آن اشاره می شود. در این مطالعه، فصل های سرد نیمکره شمالی و گرم نیمکره جنوبی با نماد DJF نشان داده شده است که معرف ماه های دسامبر، ژانویه و فوریه است و فصل های گرم نیمکره شمالی و سرد نیمکره جنوبی با JJA مشخص شده است که نماد ماه های ژوئن، ژوئیه و اوت می باشد.

بررسی میانگین مداری سرعت باد در ترازهای مختلف فشاری در عرض های جغرافیایی مختلف دو نیمکره در فصل های DJF و JJA در طول دوره آماری نشان داد که در هر دو نیمکره، جریان های جت پیوسته نیستند و در ترازهای فشاری زیرین بین سطوح فشاری ۴۰۰ و ۱۰۰ هکتوپاسکال قرار دارند (شکل ۱). از این رو برای تحلیل ویژگی های جریان های جتی و محاسبه شاخص ها، از شش تراز فشاری ۴۰۰، ۳۰۰، ۲۵۰، ۲۰۰، ۱۵۰ و ۱۰۰ هکتوپاسکال استفاده شد.

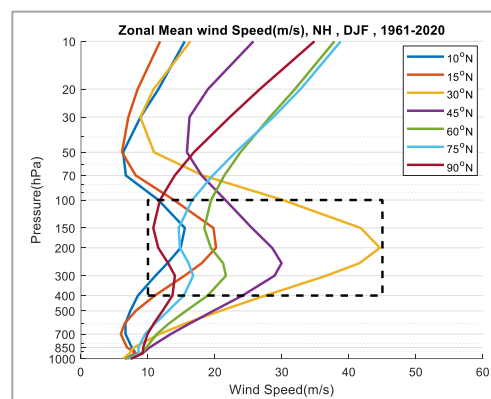
از آنجایی که هنگام استفاده از میانگین بلندمدت میانگین مداری سرعت باد برای آشکارسازی جت ها نیز هر دو جت به ندرت ظاهر می شوند، از این رو در این مقاله به جای تحلیل مجزای جت جنب حاره و جت جبهه قطبی، یک نوار پهن سرعت بیشینه در نظر گرفته شد (بلمجری و همکاران، ۲۰۱۷؛ فاراندا و همکاران، ۲۰۱۹) که در فصل DJF هر دو نیمکره به صورت یک جت منفرد آشکار می شود و در فصل JJA در نیمکره شمالی به صورت یک نوار نازک و کوتاه و در نیمکره جنوبی به صورت دو نوار نازک و بلند در اطراف مدار ۳۰ و ۶۰ درجه جنوبی ظاهر

بنابراین در محاسبات پایین‌ترین لبه استواسوی جت در نیمکره شمالی در فصل سرد ۱۰ درجه و در نیمکره جنوبی در فصل گرم ۳۰- درجه در نظر گرفته شد. مشابه این بررسی، برای فصل گرم نیمکره شمالی و فصل سرد نیمکره جنوبی و همچنین لبه استواسوی جت در هر دو نیمکره در فصل‌های مختلف انجام شد. نتایج در جدول ۱ آورده شده است.

استواسوی جت در ماه‌های DJF در نیمکره شمالی (شکل ۲-الف) و نیم کره جنوبی (شکل ۲-ب) را نشان می‌دهد. از شکل ۲-الف دیده می‌شود که در فصل سرد نیمکره شمالی لبه استواسوی جت از عرض جغرافیایی ۱۰ تا ۲۲ درجه شمالی تغییر کرده است. شکل ۲-ب نیز نشان می‌دهد که در فصل گرم نیمکره جنوبی لبه استواسوی جت از عرض جغرافیایی ۳۰- تا ۴۲- درجه جنوبی تغییر کرده است.

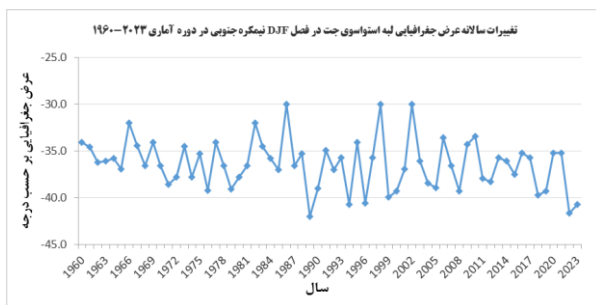


ب) نیمکره جنوبی



الف) DJF نیمکره شمالی

شکل ۱. نیمرخ قائم میانگین مداری سرعت باد (متر بر ثانیه) در عرض‌های جغرافیایی مختلف دوره آماری ۱۹۶۱-۲۰۲۰ در ماه‌های الف) DJF نیمکره شمالی و ب) JJA نیمکره جنوبی.



ب) نیمکره جنوبی



الف) نیمکره شمالی

شکل ۲. تغییرات سالانه عرض جغرافیایی لبه استواسوی جت در ماه DJF. الف) نیمکره شمالی و ب) نیمکره جنوبی.

جدول ۱. تغییرات عرض جغرافیایی لبه‌های جت در دو فصل گرم و سرد نیمکره شمالی و جنوبی.

کمیت	تغییرات عرض جغرافیایی لبه‌های جت بر حسب درجه			
	نیمکره شمالی		نیمکره جنوبی	
	DJF	JJA	DJF	JJA
لبه استواسوی جت	۱۰	۲۷/۵	-۳۰	-۱۷/۵
لبه قطب سوی جت	۷۰	۴۲/۵	-۶۵	-۷۰/۰

محاسباتی آرچر و کالدیرا (۲۰۰۸) در شکل ۳ نشان داده شده است.

بر پایه مبانی ذکر شده در این بند، در زیر به طور کوتاه روش پژوهش نشان داده شده است:

۱- محاسبه میانگین مداری اندازه سرعت باد در هر تراز فشاری و تعیین سطوح فشاری مطالعاتی بر اساس این کمیت
۲- محاسبه میانگین جرم از رابطه ۲ و برآورد میانگین وزنی سرعت باد بر اساس جرم از رابطه ۱

۳- تعیین آستانه برای لبه های زیرین و زیرین جت در صفحه افقی

۴- محاسبه تغییرات میانگین وزنی عرض جغرافیایی در هر دو نیمکره بر اساس معادله های ۳ و ۴

۵- محاسبه شاخص میانگین فشار از رابطه ۵

۶- برآورد میانگین مداری متوسط دما در سطوح زیرین (۱۰۰۰ تا ۷۰۰ هکتوپاسکال) و زیرین (۴۰۰ تا ۱۰۰ هکتوپاسکال) در دو منطقه ۱۵-۰ و ۱۵-۳۰ درجه در هر دو نیمکره شمالی و جنوبی

۷- رسم الگوهای محاسبه شده، تعیین روند بر اساس معادله خط روند و تفسیر الگوها

۳. داده ها

در این مطالعه از داده های روزانه دما، ارتفاع و مؤلفه های مداری و نصف النهاری باد افقی در دوره آماری ۲۰۲۳-۱۹۴۸ استفاده شد. این داده ها در روی یک شبکه افقی منظم که منطقه محدود به طول جغرافیایی از ۱۸۰ درجه غربی تا ۱۸۰ درجه شرقی و عرض جغرافیایی از ۹۰ درجه جنوبی تا ۹۰ درجه شمالی را شامل می شود، از NCEP/NCAR گرفته شد (کلانی و همکاران، ۱۹۹۶). تفکیک افقی این داده ها ۲/۵ درجه است و شبکه انتخابی دارای ۱۴۴×۷۳ نقطه می باشد.

بنابراین پهنای جت در طول سال در نیمکره شمالی بین ۱۰ تا ۷۰ درجه عرض جغرافیایی (زیرنویس J از ۴۱ تا ۶۵) تغییر می کند و فرمول برآورد تغییرات میانگین وزنی عرض جغرافیایی (بر حسب درجه) بر اساس شار جرم که از این پس به اختصار میانگین وزنی عرض جغرافیایی نامیده می شود، در نیمکره شمالی نسبت به مطالعات لی و همکاران (۲۰۱۹) و آرچر و کالدیرا (۲۰۰۸)، اصلاح شد:

$$L_i^{NH} = \frac{\sum_{j=41}^{65} \left\{ \sum_{k=1}^6 [m_{i,j,k} \times \sqrt{u_{i,j,k}^2 + v_{i,j,k}^2}] \times \varphi(j) \right\}}{\sum_{j=41}^{65} \left\{ \sum_{k=1}^6 [m_{i,j,k} \times \sqrt{u_{i,j,k}^2 + v_{i,j,k}^2}] \right\}} \quad (3)$$

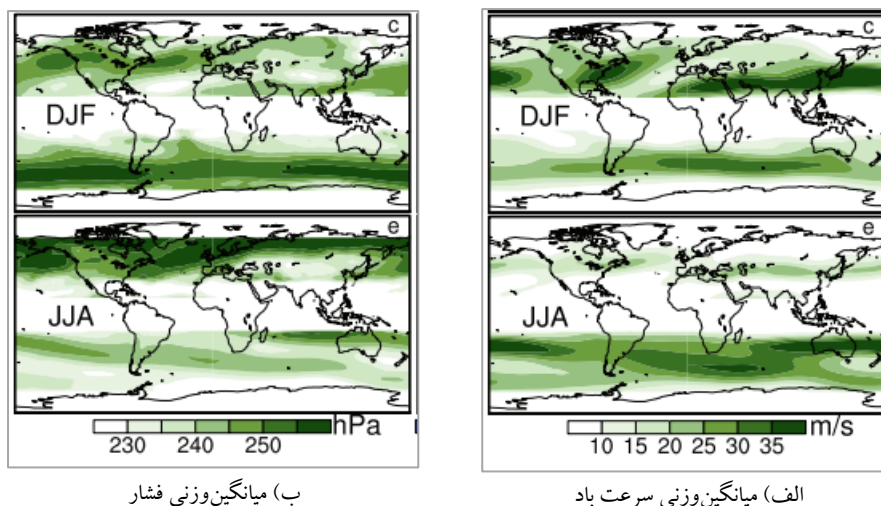
در نیمکره جنوبی پهنای جت در طول سال بین ۱۷/۵ تا ۷۰ (زیرنویس J از ۴۴ تا ۹) درجه جنوبی تغییر می کند. از این رو معادله تغییرات میانگین وزنی عرض جغرافیای محور جت در این نیمکره به صورت زیر نوشته شد:

$$L_i^{SH} = \frac{\sum_{j=9}^{44} \left\{ \sum_{k=1}^6 [m_{i,j,k} \times \sqrt{u_{i,j,k}^2 + v_{i,j,k}^2}] \times \varphi(j) \right\}}{\sum_{j=9}^{44} \left\{ \sum_{k=1}^6 [m_{i,j,k} \times \sqrt{u_{i,j,k}^2 + v_{i,j,k}^2}] \right\}} \quad (4)$$

شاخص میانگین وزنی فشار بر اساس شار جرم (بر حسب هکتوپاسکال) که از این پس به طور کوتاه میانگین وزنی فشار نامیده می شود، نیز با رابطه زیر تعریف شد:

$$P_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^6 [m_{i,j,k} \times \sqrt{u_{i,j,k}^2 + v_{i,j,k}^2}] \times p(k)}{\sum_{k=1}^6 [m_{i,j,k} \times \sqrt{u_{i,j,k}^2 + v_{i,j,k}^2}]} \quad (5)$$

نمونه ای از الگوهای میانگین وزنی سرعت باد و میانگین وزنی فشار برای ماه های فصل سرد و گرم بر اساس



شکل ۳. الف) میانگین وزنی سرعت باد (متر بر ثانیه) و ب) میانگین وزنی فشار (هکتوپاسکال) بر اساس پژوهش آرچر و کالدیرا (۲۰۰۸).

۴. نتایج و بحث

شکل ۴ میانگین وزنی سرعت باد در فصل DJF، (۴-الف) و JJA، (شکل ۴-ب) در دو نیمکره شمالی و جنوبی را نشان می‌دهد. هم مقدارهای این شاخص از ۲۵ متر بر ثانیه با فاصله ۵ واحد رسم شده است تا پیوستگی جریان جت بهتر نشان داده شود. شکل ۴-الف) نشان می‌دهد که در فصل زمستان نیمکره شمالی، یک نوار پیوسته میانگین وزنی سرعت باد از شرق اقیانوس اطلس در روی موریتانی شروع و با حرکت به سوی شرق، در امتداد مدار ۳۰ درجه عرض جغرافیایی با عبور از شمال آفریقا، جنوب ایران، شمال هند، جنوب چین، جنوب ژاپن، غرب اقیانوس آرام، جنوب ایالات متحده آمریکا، کره زمین را دور می‌زند و در غرب بریتانیا پایان می‌یابد. این نوار طولانی میانگین وزنی سرعت باد دارای دو هسته بیشینه در غرب ژاپن و غرب ایالات متحده آمریکا است که هسته بیشینه غرب ژاپن (۵۵ تا ۶۵ متر بر ثانیه) از هسته بیشینه غرب ایالات متحده آمریکا (۴۰ تا ۴۵ متر بر ثانیه) خیلی قویتر می‌باشد. این وضعیت با مبانی همدیدی هماهنگ است. در زمستان نیمکره شمالی که شار تابش خورشیدی در مناطق حاره بیشتر از مناطق جنب حاره است، گرما در منطقه حاره شمالی بیشتر است و تعدیل گرما از طریق سلول هادلی با جابه‌جایی نصف‌النهاری آن تشدید می‌شود. بنابراین فرونشینی هوا در اطراف مدار ۳۰ درجه شمالی رخ می‌دهد و به دلیل

پایستاری تکرانه زاویه‌ای، سرعت باد در این محدوده افزایش می‌یابد. در نتیجه این سازوکار جت جنب‌حاره در اطراف مدار ۳۰ درجه شمالی آشکار می‌شود. همچنین به سبب ایجاد گرادیان دمایی بین مناطق خشکی و آبی، سرعت جریان جتی در شرق قاره‌ها بیشتر است و چون گرادیان دما بین مناطق آبی و خشکی در غرب ژاپن بیشتر از غرب ایالات متحده آمریکا است، از این رو اختلاف سرعت جریان‌های جتی در این دو منطقه قابل توجه می‌باشد. در تابستان نیمکره جنوبی (شکل ۴-الف)، دیده می‌شود که یک نوار پیوسته از این شاخص در اطراف مدار ۵۵ درجه جنوبی از غرب نیمکره جنوبی به سوی شرق آن امتداد یافته است. هسته بیشینه مقدار این کمیت ۳۰ تا ۳۵ متر بر ثانیه است که بین دو نصف‌النهار ۳۵ درجه غربی تا ۱۳۷ درجه شرقی قرار گرفته است. در حد فاصل دو نصف‌النهار سی درجه غربی و شرقی هسته بیشینه میانگین وزنی سرعت باد، بیش از ۳۵ متر بر ثانیه برآورد شده است. در فصل گرم نیمکره جنوبی شار تابش خورشیدی در مناطق جنب حاره بیشتر از مناطق حاره است و انتقال گرما از طریق سلول هادلی تضعیف می‌شود. شایان ذکر است که در فصل گرم نیمکره جنوبی، تغییر نصف‌النهاری دما بنا به معادله باد گرمایی نیز می‌تواند عامل افزایش سرعت باد جت شود. چون در این فصل زاویه میل خورشیدی به ۲۳/۵- گرایش می‌یابد، از این رو بخش همرفت سلول هادلی هماهنگ با

تغییرات زاویه میل خورشیدی به عرض‌های جغرافیایی شمالی این نیمکره جابه‌جا و گستره شمالی آن به اطراف مدار ۴۵ درجه جنوبی محدود می‌شود. در نتیجه جت جنب‌حاره در اطراف این مدار آشکار شده است.

شکل ۴-ب) نشان می‌دهد که در تابستان نیمکره شمالی، میانگین وزنی سرعت باد کمتر از ۲۵ متر بر ثانیه است که در شکل مشخص نشده است. بررسی‌ها نشان داد که در این فصل در نیمکره شمالی، یک نوار طولانی پیوسته با مقدار ۱۷ تا ۲۴ متر بر ثانیه در اطراف مدار ۴۵ درجه شمالی دور تا دور کره زمین را فرا گرفته است و دو هسته کوچک بیشینه ۲۰ تا ۲۴ متر بر ثانیه در شمال غرب چین و شمال شرق ایالات متحده آمریکا وجود دارد. همچنین در این فصل یک هسته کوچک ۱۷ تا ۱۸ متر بر ثانیه نیز در جنوب دریای سرخ به‌سوی شرق آن دریا قابل رویت است. علت کاهش سرعت میانگین مداری سرعت باد در این فصل، اختلاف دمای معکوس بین مناطق حاره و جنب‌حاره است که به سبب دریافت انرژی خورشیدی بیشتر مناطق جنب‌حاره ایجاد شده است. از این رو گردش نصف‌النهار سلول هادلی تضعیف و مقدار سرعت باد به خوبی افزایش نیافته است. به‌علاوه چون در طول این فصل زاویه میل خورشیدی به $23/5^{\circ}$ گرایش می‌یابد، بنابراین گستره شمالی سلول هادلی نیز به عرض‌های جغرافیایی شمالی‌تر منتقل می‌شود و در نتیجه بادهای غربی این نیمکره اطراف مدار ۴۵ درجه شمالی آشکار شده است.

در نیمکره جنوبی، دو نوار باریک پیوسته در اطراف مدار ۳۰ و ۶۰ درجه جنوبی گرداگرد کره زمین را در بر گرفته است. این دو نوار، از اقیانوس آرام جنوبی به‌سوی شرق امتداد یافته است و از آرژانتین، اقیانوس اطلس جنوبی، آفریقای جنوبی، اقیانوس هند جنوبی، استرالیا و نیوزلند عبور کرده است با این تفاوت که نوار اطراف مدار ۶۰ درجه جنوبی نیز مناطق جنوبی‌تر را تحت تاثیر قرار داده است و همچنین مقادیر آن از نوار اطراف ۳۰ درجه جنوبی کمتر می‌باشد. هسته بیشینه میانگین وزنی سرعت باد اطراف مدار ۳۰ درجه جنوبی با مقدار ۴۰ تا ۴۵ متر بر ثانیه، استرالیا، شمال نیوزلند و شرق اقیانوس آرام جنوبی را در بر گرفته

است. یک هسته ۳۵ تا ۴۰ متر بر ثانیه نیز در امتداد مدار ۴۵ درجه جنوبی، در جنوب آفریقای جنوبی محدود به طول جغرافیایی ۱۸ درجه غربی تا ۸۰ درجه شرقی قابل رویت است که می‌تواند به سبب گرادیان دمای ایجاد شده ناشی از جریان‌های گرم اقیانوسی باشد. در این فصل از نیمکره جنوبی نیز، شار تابش خورشیدی در مناطق حاره خیلی بیشتر از مناطق جنب‌حاره این نیمکره است. از این رو انتقال نصف‌النهار سلول هادلی برای تعدیل گرما تقویت شده است و در نتیجه میانگین وزنی سرعت باد در اطراف مدار ۳۰ درجه جنوبی آشکار شده است. از آنجا که در نیمکره جنوبی تابش خورشیدی به عرض‌های جغرافیایی بیشتر از $66/5^{\circ}$ درجه جنوبی نمی‌رسد و پوشش این منطقه تا قطب خشکی است، از این رو به سبب گرادیان دمایی شدیدی که بین منطقه جنب‌حاره و منطقه قطبی ایجاد می‌شود، گستره جنوبی جت جنب قطبی نیز می‌تواند در اطراف مدار ۶۰ درجه جنوبی آشکار شود.

از مقایسه میانگین وزنی سرعت باد در دو فصل گرم و سرد، در نیمکره شمالی مشخص شد که میانگین وزنی سرعت باد در فصل سرد این نیمکره (DJF)، بیشتر از فصل گرم (JJA) آن است. در نیمکره جنوبی میانگین وزنی سرعت باد در فصل گرم (DJF) بیشتر از فصل سرد (JJA) می‌باشد. علت این تفاوت را می‌توان در منطقه شروع همرفت و خاتمه گردش نصف‌النهار سلول هادلی جستجو کرد. در فصل گرم (سرد) نیمکره شمالی همرفت از مدار شمالی بالاتری (پایین تری) شروع و گردش نصف‌النهار سلول هادلی به اطراف مدار ۴۵ درجه (۳۰ درجه) شمالی ختم می‌شود که چون شعاع مدار استوا بیشتر از عرض‌های جغرافیای بالاتر است، از این رو پایداری تکانه زاویه‌ای از طریق افزایش عرض جغرافیایی نسبت به فصل سرد افزایش یافته و سبب افزایش سرعت باد در این فصل می‌شود. این شرایط در نیمکره جنوبی نیز وجود دارد. در فصل گرم (سرد) نیمکره جنوبی همرفت از منطقه حاره‌ای جنوب (شمال) استوا شروع و گردش نصف‌النهار سلول هادلی به اطراف مدار ۴۵ درجه (۳۰ درجه) جنوبی ختم می‌شود.

همچنین از مقایسه الگوی میانگین وزنی سرعت باد در فصل

از نصف‌النهار ۱۱۰ درجه شرقی به سوی شرق تا نصف‌النهار ۵ درجه غربی در شرق اقیانوس اطلس نیز روند کاهشی برآورد شد که شیب خط روند بین ۰/۴- تا ۱/۲- متر بر ثانیه بر دهه است. در این فصل (JJA)، در نیمکره جنوبی در اطراف مدار ۶۰ درجه جنوبی روند افزایشی با شیب خط روند بین ۰/۴ تا ۱/۲ متر بر ثانیه بر دهه، و در اطراف مدار ۳۰ درجه جنوبی روند کاهشی با شیب خط روند بین ۰/۴- تا ۱/۶- متر بر ثانیه بر دهه آشکار شد.

از مقایسه نتایج آشکار شده در فصل گرم و سرد نیمکره شمالی دیده شد که روند میانگین‌وزنی سرعت باد در این نیمکره افزایشی است ولی شیب خط روند در فصل سرد بیشتر از فصل گرم است. در نیمکره جنوبی نیز در هر دو فصل سرد و گرم، روند میانگین‌وزنی سرعت باد در اطراف مدار ۶۰ درجه جنوبی افزایشی و در اطراف مدار ۳۰ درجه نزولی می‌باشد و شیب خط روند تغییر قابل‌توجهی نشان نمی‌دهد. از آنجایی که اختلاف دمای زیاد بین مناطق جنب‌قطبی و قطبی عامل ایجاد جریان‌های جتی اطراف مدار ۶۰ درجه جنوبی است، از این رو هر عاملی که بتواند گرادیان دمای بین این دو منطقه را تقویت کند، می‌تواند سرعت باد جت اطراف این مدار را افزایش دهد. بررسی روند میانگین فصلی میانگین مداری متوسط دمای لایه زیرین در مناطق قطبی و جنب‌قطبی نشان داد که این کمیت در مناطق قطبی (۷۵ تا ۹۰ درجه جنوبی) بدون روند و در مناطق جنب‌قطبی (۶۰ تا ۷۵ درجه جنوبی) دارای روند صعودی معنی‌داری می‌باشد به‌طوری‌که شیب خط روند در فصل سرد ۰/۲۵ درجه بر دهه و در فصل گرم ۰/۳۰ درجه بر دهه برآورد شد. بنابراین این عامل سبب تقویت تضاد دمایی و افزایش سرعت باد اطراف مدار ۶۰ درجه جنوبی شده است.

از بررسی شیب خط روند میانگین فصلی میانگین مداری متوسط دمای لایه‌های مختلف جو دیده شد که در فصل گرم نیمکره جنوبی، شیب خط روند این کمیت در سطوح زیرین عرض‌های جنب‌حاره (۰/۲۶۵ درجه بر دهه) بیشتر از شیب خط روند دما در سطوح زیرین (۰/۱۷۶ درجه بر دهه) عرض‌های حاره جنوبی است که اولی سبب تضعیف

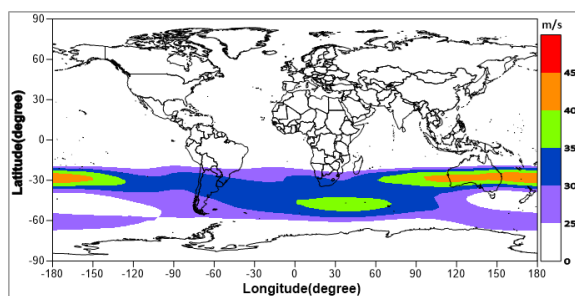
سرد نیمکره شمالی (DJF) و نیمکره جنوبی (JJA) دیده شد که در اطراف مدار ۳۰ درجه، مقدار بیشینه این کمیت در نیمکره شمالی بیشتر از نیمکره جنوبی است در حالی که این بیشینه در فصل گرم نیمکره جنوبی (DJF) بیشتر از فصل گرم نیمکره شمالی (JJA) می‌باشد. علت این اختلاف در فصل سرد را می‌توان به گرادیان دمای زیاد بین منطقه حاره و جنب‌حاره نیمکره شمالی نسبت به نیمکره جنوبی نسبت داد. در فصل گرم دمای منطقه جنب‌حاره نسبت به منطقه حاره نیمکره شمالی بیشتر است و تضاد دمایی در این نیمکره کاهش یافته و سرعت باد جریان‌های جتی نیز کاهش می‌یابد.

شکل ۵ مقدار شیب خط روند بر میانگین‌وزنی سرعت باد در فصل سرد DJF (شکل ۵-الف) و گرم JJA (شکل ۵-ب) در هر دو نیمکره شمالی و جنوبی را نشان می‌دهد. در فصل سرد نیمکره شمالی (DJF) که در شکل ۵-الف نشان داده شده است، در اطراف مدار ۴۰ درجه شمالی به‌طور ناپیوسته، روند میانگین‌وزنی سرعت باد افزایشی است و شیب خط روند ۰/۵ تا ۱/۶ متر بر ثانیه بر دهه برآورد شد. در اطراف مدار ۲۰ درجه شمالی نیز به‌طور ناپیوسته روند کاهشی برآورد شد که مقدار شیب خط روند بین ۰/۵- تا ۱/۶- متر بر ثانیه بر دهه مشخص شد. در این فصل که فصل گرم نیمکره جنوبی (DJF) است، در اطراف مدار ۶۰ درجه جنوبی یک نوار پیوسته روند افزایشی با شیب خط روند ۰/۵ تا ۱/۶ متر بر ثانیه بر دهه دیده شد که سرتاسر نیمکره را فرا گرفته است و در محدوده بین نصف‌النهار ۸۰ تا ۱۵۰ درجه غربی شیب خط روند بیشتر از ۱/۶ متر بر ثانیه بر دهه آشکار شد. در این نیمکره در اطراف مدار ۴۰ درجه نیز روند نزولی است که از جنوب موریتانی تا جنوب استرالیا، اقیانوس آرام جنوبی و آفریقای جنوبی را پوشش داده است و ناپیوستگی آن در روی اقیانوس اطلس جنوبی می‌باشد. در فصل گرم نیمکره شمالی (JJA) که در شکل ۵-ب آورده شده است، از شرق ایالات متحده آمریکا در اقیانوس اطلس از مدار ۴۰ تا ۴۵ درجه شمالی در شمال دریای سیاه روند افزایشی ضعیف با شیب خط روند ۰/۴ تا ۰/۸ متر بر ثانیه بر دهه برآورد شد. در این فصل در اطراف خط استوا

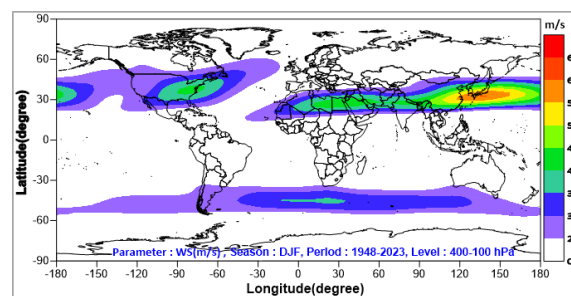
و در اطراف مدار ۳۰ درجه در هر دو نیمکره شمالی و جنوبی، مقدار این کمیت ۲۲۵ تا ۲۴۵ هکتوپاسکال برآورد شده است. در اطراف مدار ۶۰ درجه جنوبی نیز مقدار این کمیت ۲۴۵ تا ۲۶۵ هکتوپاسکال به دست آمده است. در فصل JJA که در شکل ۵-ب نشان داده شده است، در اطراف مدار ۱۲ درجه شمالی از غرب موریتانی تا جنوب شرق چین مقدار میانگین وزنی فشار کمینه است. نتایج به دست آمده این بخش با نتایج آرچر و کالدیرا (۲۰۰۸) کمی تفاوت دارد. علت تفاوت در انتخاب دوره آماری، منابع داده‌ای و برآورد نکردن میانگین وزنی فشار در منطقه حاره می‌باشد. این پژوهشگران در این بخش، دوره آماری ۱۹۷۹-۲۰۰۱ و از داده‌های ERA-40 استفاده کرده بودند.

گردش نصف النهاری و دومی سبب تقویت همرفت سلول هادلی می‌شود. بنابراین تضعیف گردش نصف النهاری سلول هادلی بیشتر از تقویت همرفت آن است و این فرایند می‌تواند سبب کاهش سرعت باد عرض‌های جنب حاره جنوبی را در فصل گرم توجیه کند. همین شرایط در فصل سرد نیز وجود دارد به طوری که شیب خط روند سطوح زیرین عرض‌های جنب حاره (۰/۲۷۱ درجه بر دهه) بیشتر از شیب خط روند سطوح زیرین (۰/۱۷۷ درجه بر دهه) عرض‌های حاره شمالی است.

شکل ۶ میانگین وزنی فشار در فصل DJF (شکل ۶-الف) و JJA (شکل ۶-ب) در دو نیمکره شمالی و جنوبی را نشان می‌دهد. در فصل DJF که در شکل ۶-الف نشان داده شده است، در اطراف خط استوا میانگین وزنی فشار کمینه است

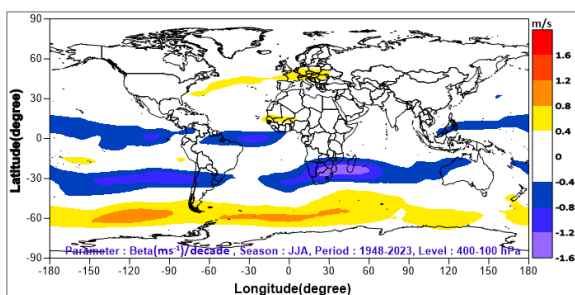


JJA (ب)

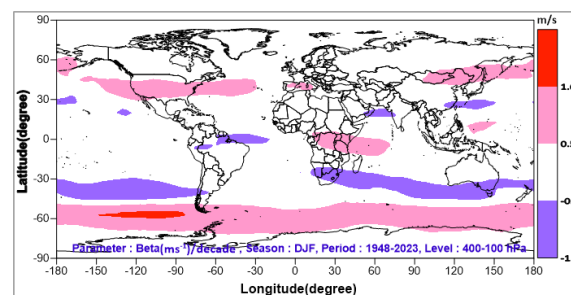


DJF (الف)

شکل ۴. الگوی میانگین وزنی سرعت باد (متر بر ثانیه) در دوره آماری ۱۹۴۸-۲۰۲۳ در ماه‌های الف) DJF و ب) JJA.

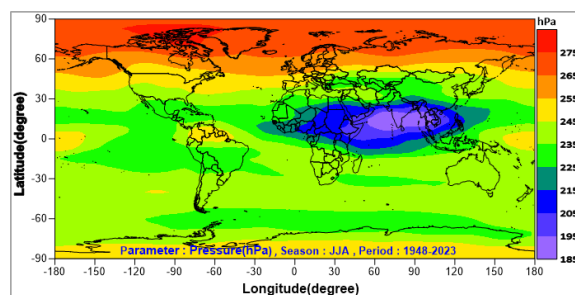


JJA (ب)

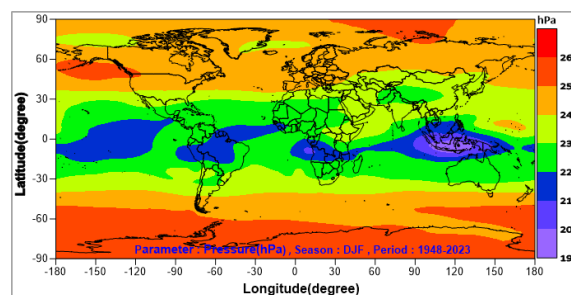


DJF (الف)

شکل ۵. الگوی شیب خط روند بر میانگین وزنی سرعت باد (متر بر ثانیه بر دهه) در دوره آماری ۱۹۴۸-۲۰۲۳ در ماه‌های الف) DJF و ب) JJA.



JJA (ب)



DJF (الف)

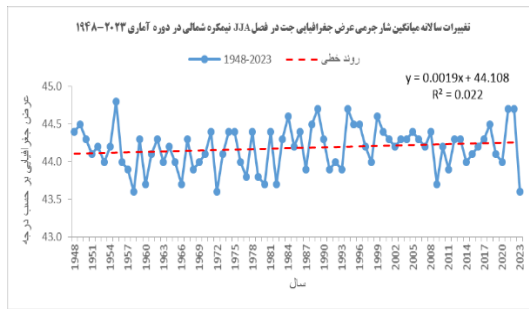
شکل ۶. الگوی میانگین وزنی فشار (هکتوپاسکال) در دوره آماری ۱۹۴۸-۲۰۲۳ در ماه‌های الف) DJF و ب) JJA.

است و معرف افزایش دمای سطوح زیرین و زیرین در این منطقه می‌باشد. افزایش دما و گرم شدن منطقه حاره می‌تواند گستره همرفت سلول هادلی را تقویت کند و از این طریق سبب افزایش سرعت باد و نیز افزایش عرض جغرافیایی محور جت جنب‌حاره در هر دو فصل گرم و سرد دو نیمکره شمالی و جنوبی شود. همچنین روند افزایشی دمای سطوح زیرین در منطقه حاره نیز می‌تواند بنا به معادله باد گرمایی، بر مقدار سرعت باد بیافزاید. از جدول ۳ دیده می‌شود که خط روند میانگین مداری متوسط دمای سطوح زیرین و زیرین در هر دو نیمکره و در فصل‌های مختلف گرم و سرد منطقه جنب‌حاره افزایشی است و معرف افزایش دمای سطوح زیرین و زیرین در این منطقه می‌باشد. افزایش دما و گرم شدن سطوح زیرین منطقه جنب‌حاره می‌تواند اختلاف دمای مناطق حاره و جنب‌حاره را کاهش دهد و از طریق تضعیف گستره گردش نصف‌النهار سلول هادلی سبب کاهش سرعت جریان‌های جتی شود و ممکن است بتواند افزایش سرعت جریان که در اثر گرم شدن سطوح زیرین منطقه حاره رخ می‌دهد را خنثی کند.

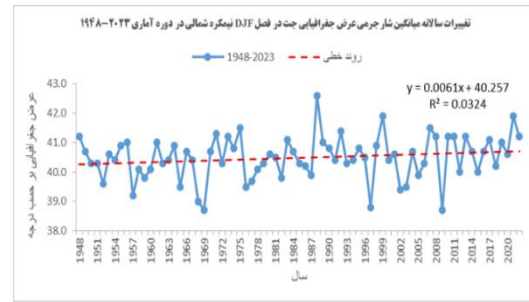
به عبارت دیگر چون هر چه دمای سطوح زیرین در منطقه جنب‌حاره بیشتر شود، گستره بخش نصف‌النهار سلول نیز کمتر می‌شود که در نتیجه آن عرض جغرافیایی فرونشینی کاهش می‌یابد. بنابراین سرعت جریان جت در اثر این سازوکار، می‌تواند نسبت به حالت اولیه، کاهش داشته باشد. هر چه دمای سطوح زیرین در منطقه حاره نیز بیشتر شود همرفت سلول هادلی نیز تقویت می‌شود و این سازوکار به تنهایی می‌تواند عامل افزایش سرعت جریان جت شود. از آنجای که دمای سطوح زیرین منطقه حاره و سطوح زیرین منطقه جنب‌حاره روند افزایشی دارند که مقدار شیب خط روند اولی کمتر از دومی است، از این رو چون روند کاهش در سرعت جریان جت برآورد شده است، چنین به نظر می‌رسد که اثر تقویت گستره همرفت سلول هادلی نسبت به تضعیف گستره گردش نصف‌النهار آن کمتر بوده است.

شکل ۷ میانگین وزنی عرض جغرافیایی جت در دو نیمکره را نشان می‌دهد. در نیمکره شمالی در هر دو فصل، روند میانگین وزنی عرض جغرافیایی افزایشی است. شیب خط روند در فصل DJF (شکل ۷-الف) به مقدار ۰/۰۶۱ درجه بر دهه و در فصل JJA (شکل ۷-ب) به مقدار ۰/۰۱۹ درجه بر دهه به سوی قطب می‌باشد. شیب خط روند در فصل DJF نیمکره جنوبی (شکل ۷-ج) مقدار ۰/۳۰۷ و در فصل JJA این نیمکره (شکل ۷-د) مقدار ۰/۲۲۳ درجه در هر ده سال به سوی قطب می‌باشد. شایان ذکر است که ویژگی‌های آماری مربوط به خط روند میانگین وزنی عرض جغرافیایی برای کاهش حجم مطالب آورده نشده است. روند افزایشی در هر دو فصل نیمکره جنوبی و نیز فصل سرد نیمکره شمالی از نظر آماری تأیید شده است ولی در فصل گرم نیمکره شمالی تأیید نشده است. این تحلیل نشان داد که روند افزایشی در فصل سرد هر دو نیمکره (DJF نیمکره شمالی و JJA نیمکره جنوبی) معرف انتقال قطب‌سوی جت است که می‌تواند معرف جابه‌جایی شمال‌سوی مسیر توفان‌ها از طریق جابه‌جایی شمال‌سوی انتشار پیچک‌ها باشد که شرایط آب‌وهوایی مناطق جنوبی و شمالی جت‌ها را در هر دو نیمکره تغییر می‌دهد.

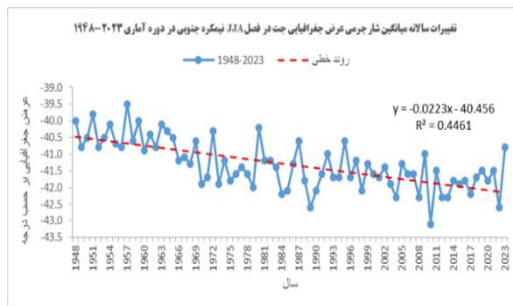
از آنجایی که واداشت گرمایش دررو بیشترین سهم را در گردش نصف‌النهار سلول هادلی به عهده دارد و مؤلفه فرارفت قائم دمای گرمایش دررو $(\omega \frac{\partial T}{\partial p})$ اطراف مدار ۵ درجه شمالی و جنوبی و سرمایش اطراف مدار ۳۰ درجه شمالی و جنوبی محرک اصلی این گردش است (زولوتف و همکاران، ۲۰۱۸)، از این رو برای بررسی اثر افزایش دما بر جریان‌های جتی، تغییرات دمای سطوح زیرین و زیرین جو در منطقه حاره و جنب‌حاره در دوره آماری بررسی شد که نتایج آن به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده است. از جدول ۲ دیده می‌شود که خط روند میانگین مداری متوسط دمای سطوح زیرین و زیرین در هر دو نیمکره و در فصل‌های مختلف گرم و سرد منطقه حاره افزایشی است که از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد نیز تأیید شده



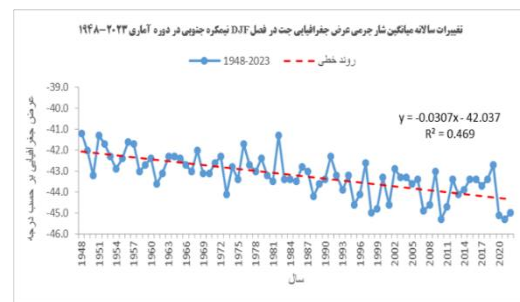
(ب) JJA نیمکره شمالی



(الف) DJF نیمکره شمالی



(د) JJA نیمکره جنوبی



(ج) DJF نیمکره جنوبی

شکل ۷. تغییرات سالانه میانگین وزنی عرض جغرافیایی جت (درجه در دوره آماری ۱۹۴۸-۲۰۲۳). (الف) DJF نیمکره شمالی، (ب) JJA نیمکره شمالی، (ج) DJF نیمکره جنوبی و (د) JJA نیمکره جنوبی.

(شکل ۸-ب)، فصل DJF نیمکره جنوبی (شکل ۹-ج) و فصل JJA نیمکره جنوبی (شکل ۹-د) را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها دیده می‌شود که در هر دو فصل نیمکره شمالی (جنوبی) روند بیشترین میانگین سرعت باد افزایشی (کاهش) است. بررسی‌های آماری نشان داد که روند افزایشی فصل زمستان نیمکره شمالی تأیید شد در حالی که در فصل گرم تأیید نشد. در فصل سرد نیمکره شمالی، شیب خط روند ۰/۴۵ متر بر ثانیه در هر دهه برآورد شده است. شایان ذکر است که روند کاهشی فصل زمستان نیمکره جنوبی با مقدار شیب سن ۴/۲۴- تأیید شد ولی در فصل گرم تأیید نشد. در فصل سرد نیمکره جنوبی، شیب خط روند ۰/۶۶- متر بر ثانیه در هر دهه برآورد شده است. از بررسی تغییرات بیشترین میانگین سرعت باد دیده شد که در فصل سرد هسته جت در نیمکره شمالی روند افزایشی و در نیمکره جنوبی روند کاهشی دارد.

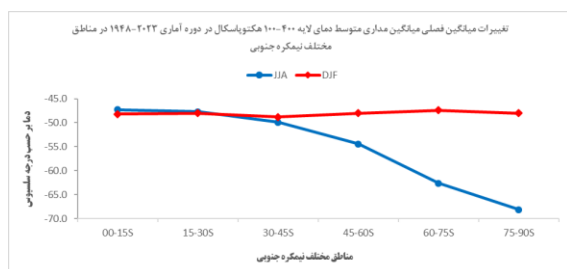
شکل ۸ میانگین فصلی میانگین مداری متوسط دمای لایه زیرین در دو نیمکره شمالی (شکل ۸-الف) و جنوبی (شکل ۸-ب) را نشان می‌دهد. از این شکل‌ها دیده می‌شود که در فصل گرم هر دو نیمکره متوسط دما در مناطق جنب‌حاره بیشتر از مناطق حاره است. بنابراین در لایه‌ای که جریان‌های جتی می‌توانند شکل بگیرند، تغییرات دمای نصف‌النهاری مثبت است و بنا به معادله باد گرمایی، مثبت بودن اختلاف دمای نصف‌النهاری می‌تواند عامل ایجاد افزایش سرعت باد در لایه فوق شود. این شرایط در زمستان رخ نمی‌دهد. شایان ذکر است که علت فاصله خطوط این شکل در مناطق جنب قطبی هر دو نیمکره به سبب اختلاف در رسیدن تابش خورشیدی به مناطق بالای ۶۶/۵ درجه عرض جغرافیای می‌باشد. شکل ۹ تغییرات سالانه بیشترین میانگین سرعت باد ترازهای فشاری ۴۰۰ تا ۱۰۰ هکتوپاسکال در فصل DJF نیمکره شمالی، (شکل ۹-الف)، فصل JJA نیمکره شمالی

جدول ۲. کمیت‌های معادله خط روند بر میانگین مداری متوسط دمای سطوح زیرین و زیرین در منطقه صفر تا ۱۲/۵ درجه عرض جغرافیایی در دو فصل گرم و سرد برای دوره آماری ۱۹۴۸-۲۰۲۳.

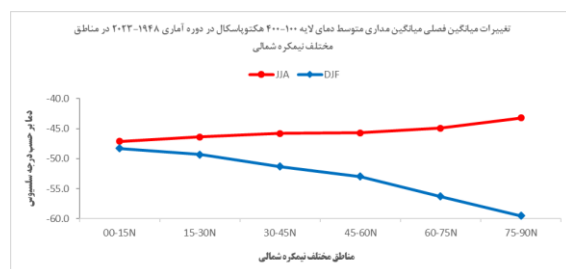
منطقه : صفر تا ۱۲/۵ درجه عرض جغرافیایی، نوع روند : در همه حالت‌ها افزایشی، نتیجه روند : تایید، مقدار P : ۰/۰۰۰								
منطقه				سطوح زیرین (۱۰۰۰ تا ۷۰۰ هکتوپاسکال)				سطوح زیرین (۴۰۰ تا ۱۰۰ هکتوپاسکال)
نیم کره		شمالی		جنوبی		شمالی		جنوبی
فصل		شمالی		جنوبی		شمالی		جنوبی
		DJF	JJA	DJF	JJA	DJF	JJA	JJA
شیب خط روند (درجه بر ۱۰۰ سال)		+ ۱/۶۰	+ ۱/۷۷	+ ۱/۷۶	+ ۱/۴۶	+ ۱/۴۳	+ ۱/۱۳	+ ۱/۲۳
شیب سن		+ ۶/۷۴۷	+ ۸/۷۶۱	+ ۶/۷۹۸	+ ۶/۲۸۴	+ ۴/۴۴۷	+ ۴/۲۵۱	+ ۴/۴۲۱

جدول ۳. کمیت‌های معادله خط روند بر میانگین مداری متوسط دمای سطوح زیرین و زیرین در منطقه ۱۵ تا ۳۰ درجه عرض جغرافیایی در دو فصل گرم و سرد برای دوره آماری ۱۹۴۸-۲۰۲۳.

منطقه : ۱۵ تا ۳۰ درجه عرض جغرافیایی، نوع روند : در همه حالت‌ها افزایشی، مقدار P : ۰/۰۰۰								
منطقه				سطوح زیرین (۱۰۰۰ تا ۷۰۰ هکتوپاسکال)				سطوح زیرین (۴۰۰ تا ۱۰۰ هکتوپاسکال)
نیم کره		شمالی		جنوبی		شمالی		جنوبی
فصل		شمالی		جنوبی		شمالی		جنوبی
		DJF	JJA	DJF	JJA	DJF	JJA	JJA
شیب خط روند (درجه بر ۱۰۰ سال)		+ ۱/۰۳	+ ۱/۸۳	+ ۱/۴۶	+ ۱/۴۴	+ ۱/۱۶	+ ۰/۳۹	+ ۱/۵۹
شیب سن		+ ۴/۹۴۹	+ ۸/۹۸۰	+ ۶/۷۲۷	+ ۸/۶۴۶	+ ۴/۵۴۸	+ ۱/۶۱۳	+ ۵/۳۰۰
نتیجه روند		تایید	تایید	تایید	تایید	تایید	رد	تایید

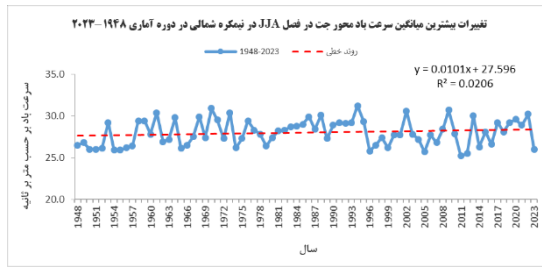


ب) نیمکره جنوبی

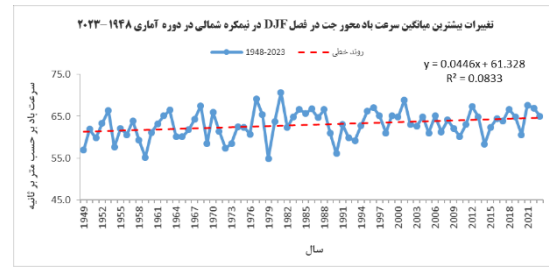


الف) نیمکره شمالی

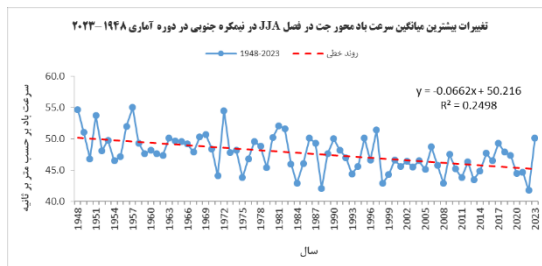
شکل ۸. تغییرات سالانه میانگین فصلی میانگین مداری متوسط دمای لایه زیرین در دوره آماری ۱۹۴۸-۲۰۲۳ در مناطق مختلف الف) نیمکره شمالی و ب) نیمکره جنوبی.



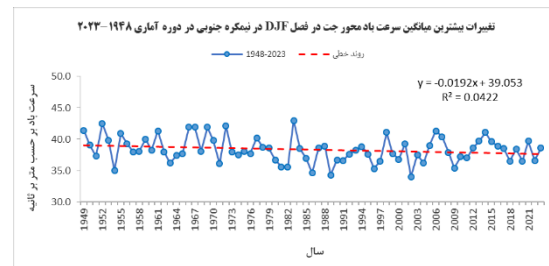
ب) JJA نیمکره شمالی



الف) DJF نیمکره شمالی



د) JJA نیمکره جنوبی



ج) DJF نیمکره جنوبی

شکل ۹. تغییرات سالانه بیشترین میانگین سرعت باد ترازهای فشاری ۴۰۰ تا ۱۰۰ هکتوپاسکال در دوره آماری ۱۹۴۸-۲۰۲۳. الف) DJF نیمکره شمالی، ب) JJA نیمکره شمالی، ج) DJF نیمکره جنوبی و د) JJA نیمکره جنوبی.

۵. نتیجه گیری

در این مطالعه با استفاده از داده‌های روزانه دما، ارتفاع و مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد افقی در دوره آماری ۱۹۴۸-۲۰۲۳، که از بایگانی NCEP/NCAR گرفته شد، میانگین وزنی سرعت باد، فشار و عرض جغرافیایی جریان‌های جتی در دو نیمکره شمالی و جنوبی محاسبه شد و با استفاده از مقادیر به دست آمده، روند تغییرات ویژگی‌های جریان جت تحلیل شد.

نتایج کلی نشان داد که به طور متوسط، محور جت‌ها در هر دو نیمکره به سمت قطب جابه‌جا شده‌اند. همچنین جت جنب‌حاره نیمکره جنوبی در هر دو فصل گرم و سرد، در حال تضعیف است و سرعت باد در محور این جت دارای روند کاهشی است در حالی که جت جنب‌قطبی این نیمکره در هر دو فصل گرم و سرد، تمایل دارد که تقویت شود و سرعت باد در محور این جت روند افزایشی دارد. در نیمکره شمالی در هر دو فصل گرم و سرد، در بخش شمالی محور جت جنب‌حاره روند سرعت باد افزایشی و در بخش جنوبی محور آن روند کاهشی است در صورتی که در محور جت روند سرعت باد در هر دو فصل افزایشی می‌باشد. یکی از عوامل مهم این تغییرات را می‌توان به روند افزایشی دما در سطوح زیرین و زبرین مناطق حاره و جنب‌حاره هر دو

نیمکره مربوط کرد.

پس از برآورد شاخص‌های تعیین شده، الگوی نتایج به دست آمده با نتایج آرچر و کالدیرا (۲۰۰۸) مقایسه شد. الگوهای مربوط به شاخص‌ها هماهنگ بودند ولی تفاوت‌هایی از نظر مقدار در شاخص‌ها مشاهده شد که در شاخص میانگین وزنی سرعت باد و میانگین وزنی عرض جغرافیایی جزئی و در میانگین وزنی فشار قابل توجه بود. علت تفاوت‌های جزئی را می‌توان به انتخاب دوره آماری، منابع داده‌ای مختلف و به روز کردن روابط به کار گرفته ربط داد. این پژوهشگران از داده‌های ERA-40 و دوره آماری ۱۹۷۹-۲۰۰۱ استفاده کرده بودند. تفاوت قابل توجه مقدار میانگین وزنی فشار به منطقه گرمسیری دو نیمکره مربوط بود که در پژوهش آرچر و کالدیرا (۲۰۰۸) برای این مناطق میانگین وزنی فشار کمتر از ۲۳۰ هکتوپاسکال ثبت شده است در حالی که در پژوهش حاضر مقدار این شاخص در فصل JJA در نیمکره شمالی از جنوب دریای سرخ به سوی شرق هند و برمه و در فصل DJF در جنوب استرالیا کمتر از ۲۱۵ هکتوپاسکال برآورد شده است. این اختلاف ممکن است به سبب برآورد نشدن میانگین وزنی فشار در منطقه حاره دو نیمکره ایجاد شده باشد. همچنین میانگین وزنی سرعت باد در فصل سرد

هموار کردن سرعت باد می‌شود، از این رو استفاده از این شیوه می‌تواند عامل کوچک‌بودن مقادیر روند در این پژوهش و علت تفاوت با پژوهش‌های فوق باشد. شایان ذکر است که این پژوهش اگر با منابع داده‌ای متفاوت و دوره‌های آماری دیگری انجام شود، می‌تواند نتایج متفاوتی داشته باشد ولی الگوهای به‌دست آمده تغییر قابل توجهی نخواهند داشت.

مراجع

- حسینی صدیق، س. م.؛ جعفری، ت. و جلالی، م. (۱۴۰۰). گسترش قطب سوی رودباد جنب حاره نیمکره شمالی در عرض‌های میانه. *پژوهش‌های تغییرات آب‌وهوایی*، ۲(۷)، ۱-۱۲.
- درستکار، ه.؛ لشکری، ح. و محمدی، ز. (۱۴۰۲). تحلیل همدیدی نقش جت جنب‌حاره‌ای در ترسالی‌های جنوب غرب ایران. *مجله پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۱۴۰۲(۵۴)، ۱-۱۸.
- عالمزاده، ش.؛ احمدی‌گیوی، ف.؛ محب‌الحجه، ع. ر. و یازجی، د. (۱۳۹۶). ساختار هندسی جت آفریقا-آسیا در وردسپهر زبرین و پاسخ آن به گرمایش زمین در مدل‌های CMIP5. *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۱(۳)، ۱-۲۶.
- قانقرمه، ع. (۱۳۹۹). ارزیابی تغییر موقعیت رودباد جنب حاره ای مستقر بر روی ایران و آینده نگری آن بر اساس دو مدل اقلیمی CanESM2 و GFDL-CM3. *نشریه علمی-پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی*، ۹(۲۵)، ۱۰۱-۱۲۴.
- کیخسروی، ق.؛ شکیب، ع. ر. و حمیدپور، پ. (۱۴۰۱). تحلیل الگوهای همدیدی و ترمودینامیک منجر به بارش‌های ابر سنگین و برآورد پهنه آبی حاصل از بارش‌ها در حوضه آبخیز کرخه. *مجله مطالعات جغرافیایی نواحی ساحلی*، ۳(۸)، ۸۳-۱۰۰.
- محمدی، ب.؛ علیجانی، ب. و عمر صالح، آ. (۱۳۹۸). اقلیم شناسی رودبادها در خاورمیانه، *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۱(۲)، ۲۰۱-۲۲۱.
- نیمکره شمالی با نتایج لی و همکاران (۲۰۱۹) مقایسه شد. نتایج نشان داد که الگوی فصل سرد نیمکره شمالی با نتایج این پژوهشگران هماهنگ است. آنها نیز در دوره‌آماری ۱۹۷۹-۲۰۱۸ در فصل سرد نیمکره شمالی، دو هسته بیشینه میانگین وزنی سرعت باد را در غرب ژاپن و غرب ایالات متحده آمریکا محاسبه کرده‌اند و نشان داده‌اند که بیشینه میانگین وزنی سرعت باد در شرق ژاپن در روی نصف‌النهار ۱۴۰ درجه شرقی بیش از ۶۰ متر بر ثانیه است. به‌علاوه نتایج این مطالعه با بخشی از پژوهش‌های هادسون (۲۰۱۱)، لی و همکاران (۲۰۱۹)، وولینگ و همکاران (۲۰۲۳)، مانی و هگلین (۲۰۱۸) و زولوتف و همکاران (۲۰۱۸) نیز مقایسه شد. نتایج از نظر جابه‌جایی قطب‌سوی جت جنب‌حاره در دو نیمکره مختلف با پژوهش‌های مانی و هگلین (۲۰۱۸)؛ وولینگ و همکاران، (۲۰۲۳) و عالمزاده و همکاران، (۱۳۹۶) هماهنگ بود ولی از نظر مقدار شیب روند تفاوت‌های با پژوهش‌های دیگر دیده شد. در پژوهش هادسون (۲۰۱۱)، جابه‌جایی شمال‌سوی جت جنب‌حاره نیمکره شمالی ۳/۵ درجه بر سی سال (۱/۲ درجه بر دهه) و در نیمکره جنوبی ۶/۵ درجه در هر سی سال (۲/۲ درجه بر دهه) برآورد شده است که در مقایسه با بیشترین شیب خط روند برآوردشده در این پژوهش تفاوت قابل توجهی دارد. این تفاوت نمی‌تواند به دلیل منابع داده‌ای، دوره‌آماری و فصل‌های مختلف باشد و احتمالاً به سبب تفاوت در شیوه کار و نحوه محاسبات شیب خط ایجاد شده است که به نظر می‌رسد غیر قابل استناد باشد.
- لی و همکاران (۲۰۱۹) و نیز زولوتف و همکاران (۲۰۱۸)، شیب خط روند برای زمستان نیمکره شمالی را به‌ترتیب ۰/۲۲ و ۰/۱۶ درجه بر دهه برآورد کرده‌اند که با نتایج این پژوهش (۰/۰۶۱ درجه بر دهه)، اختلاف قابل توجهی (حدود سه برابر) دارد و تفاوت را می‌توان در انتخاب منابع داده‌ای و دوره‌آماری متفاوت نسبت داد. یکی دیگر از علت‌های اختلاف در مقدار روندهای به‌دست آمده را می‌توان در نحوه استفاده از شاخص‌ها دانست. چون میانگین وزنی سرعت باد سبب حذف نوسانات و

- Archer, C.L., & Caldeira, K. (2008). Historical trends in the jet streams, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L08803, <https://doi.org/10.1029/2008GL033614>, 2008.
- Belmecheri, S., Babst, F., Hudson, A.R., Betancourt, J., & Trouet, V. (2017). Northern Hemisphere jet stream position indices as diagnostic tools for climate and ecosystem dynamics. *Earth Interact.* 21, 1–23.
- Christenson, C.E., Martin, J.E., & Handlos, Z.J. (2017). A Synoptic Climatology of Northern Hemisphere, Cold season Polar and Subtropical Jet Superposition Events. *Journal of Climate*, 30(18), 7231–7246.
- Faranda, D., Sato, T., Messori, G., Moloney, N.R., & Yiou, P. (2019). Minimal dynamical systems model of the Northern Hemisphere jet stream via embedding of climate data, *Earth Syst. Dynam.*, 10, 555–567.
- Hall, R.J., Erdélyi, R., Hanna, E., Jones, J., & Scaife, A. (2014). Drivers of north atlantics polar front jet stream variability. *International Journal of Climatology*, 35, 1–25.
- Hall, R.J., Jones, J.M., Hanna, E., Scaife, A.A., & Erdélyi, R. (2017). Drivers and potential predictability of summer time north atlantics polar front jet variability. *Climate Dynamics*, 48(11), 3869–3887.
- Hudson, R. (2011). Measurements of the movement of the jet streams at mid-latitudes, in the Northern and Southern Hemispheres, 1979 to 2010. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 11, 31067–31090.
- Lee, S., & Kim, H.K. (2003). The dynamical relationship between subtropical and eddy-driven jets. *J. Atmos. Sci.*, 60(12), 1490–1503.
- Li, Z., Fan, K., & Xu, Z. (2019). Modified Three-Dimensional Jet Indices and Their Application to East Asia. *Atmosphere*, 10(12), 776, 1–17.
- Manney, G.L., & Hegglin, M.I. (2018). Seasonal and regional variations of long-term changes in upper-tropospheric jets from reanalysis. *J. Climate*, 31, 423–48.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., & Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437–470.
- Krishnamurti, T. N. (1961). The subtropical jet stream of winter. *J. Meteor.*, 18, 172–191.
- Koteswaram, P. (1953). An analysis of the high tropospheric wind circulation over India in winter. *Indian J. Meteor. Geophys.*, 4, 13–21.
- Krüger, J. (2020). Characteristic Jet Stream patterns related to European Heat Waves, (Master thesis), Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel, Germany, 57 pp.
- Kuang, X.Y., Zhang, Y.C., & Liu, J. (2007). Seasonal variations of the East Asian subtropical westerly jet and the thermal mechanism. *Acta Meteorologica Sinica*. 21. 192–203.
- Palmén, E., & Newton, C.W. (1969). Atmospheric Circulation Systems: Their Structure and Physical Interpretation, Academic Press, 603 pp.
- Pena-Ortiz, C., Gallego, D., Ribera, P., Ordonez, P., & Alvarez-Castro, M.D.C. (2013). Observed trends in the global jet stream characteristics during the second half of the 20th century. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118 (7), 2702–2713.
- Riehl, H. (1962). Jet streams of the atmosphere. *Colorado State University Dept. of Atmospheric Science Tech. Rep.*, 32, 117 pp.
- Röthlisberger, M., Pfahl, S., & Martius, O. (2016). Regional-scale jet waviness modulates the occurrence of mid-latitude weather extremes. *Geophys. Res. Lett.*, 43, 10989–10997.
- Rousi, E., Kornhuber, K., Beobide-Arsuaga, G., Luo, F., & Coumou, D. (2022), Accelerated western European heatwave trends linked to more-persistent double jets over Eurasia. *Nat Commun*, 13, 3851, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31432-y>.
- Shapiro, M. A.m & Keyser, D. (1990). Fronts, jet streams and the tropopause, Extratropical Cyclones: The Erik Palmén Memorial Volume, C. Newton and E. O. Holopainen, Eds., Amer. Meteor. Soc., 167–191.
- Strong, C., & Davis, R. (2007). Winter jet stream trends over the Northern Hemisphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133, 2109–2115.
- Vallis, G. K. (2019). *Essentials of Atmospheric and Oceanic Dynamics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1st edn.
- Woollings, T., Drouard, M., O'Reilly, C.H., Sexton, D.M.H., & Mcsweeney, C. (2023). Trends in the atmospheric jet streams are emerging in observations and could be linked to tropical warming. *Commun Earth Environ*, 4, 125.
- Zolotov, S., Ippolitov, I., & Loginov, S. (2018). Characteristics of the subtropical jet stream over the North Atlantic from reanalysis data, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 211.