

## Analysis of Seasonal and Annual Variability of the Hadley Cell in the Statistical Period of 1980–2025

Mohammad Moradi<sup>1</sup>  , Gholamreza Barati<sup>2</sup> 

1. (Corresponding author) *Department of Synoptic and Dynamic meteorology, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran*

**Email:** [moradim36@gmail.com](mailto:moradim36@gmail.com)

2. *Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran*

**Email:** [g\\_barati@sbu.ac.ir](mailto:g_barati@sbu.ac.ir)

### Article Info

**Article type:**  
**Research Article**

### Article History:

**Received:**

27 October 2025

**Revised:**

29 January 2026

**Accepted:**

13 March 2026

**Available online:**

7 April 2026

### Keywords:

*Meridional Mass  
Stream Function,  
Hadley Cell,  
Zonal Mean,  
Intertropical  
Convergence Zone.*

### ABSTRACT

This study investigated the variability of the Hadley cell in both hemispheres over recent decades using historical data from the NCEP/NCAR reanalysis dataset provided by the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) and the National Center for Atmospheric Research (NCAR), covering the period from 1980 to 2025. We employed the daily means of meridional and vertical wind components, on 12 pressure levels from 1000 to 100hPa. The data are on a horizontal resolution of  $2.5 \times 2.5$  degrees. Therefore,  $144 \times 37$  points were considered in the regular grid in each hemisphere. The mass stream function was employed to analyze the Hadley cell. The results indicate no consistent trend in the latitudinal positions of the equatorial boundary, subtropical boundary, or central core of the Hadley cell in either hemisphere. In contrast, the intensity of the northern Hadley cell's central core displays a positive trend, whereas that of the southern core exhibits a negative trend. The rate of change per decade, however, remains contingent upon both the chosen data source and the statistical period under consideration. Furthermore, the average area under the 5-unit curve in the southern Hadley cell is about 1.6 times greater than that of the northern Hadley cell. This study revealed that in the summer of each hemisphere, when the Inter-tropical convergence zone is at its highest position in the summer hemisphere, the ascending branch of the Hadley cell is located in the summer hemisphere and its descending branch is located in the winter hemisphere, and the Hadley cell is weaker in the summer hemisphere.

**Cite this article:** Moradi, M., & Barati, G. (2026). Analysis of Seasonal and Annual Variability of the Hadley Cell in the Statistical Period of 1980–2025. *Physical Geography Research Quarterly*, 58 (1), 101-118.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2026.411156.1007919>



© The Author(s).

**Publisher:** University of Tehran Press

## **Extended Abstract**

### **Introduction**

The Hadley circulation is a key element of the global weather and climate systems, responsible for the energy, angular momentum and moisture transport from the equatorial region to the poleward of both hemispheres. Although a circulation consisting of Hadley circulation extending from the equator to the pole in each hemisphere is mathematically possible - in the sense that such a circulation would not violate the laws of physics - the observed Hadley circulation is confined to the tropics. So in three-cell model of the atmospheric circulation in the second half of the 19th century, in each hemisphere were defined Hadley, Ferrel, and Polar cells in which air circulates through the entire depth of the troposphere.

Hadley cell is a large-scale thermally driven enclosed atmospheric circulation over tropics, with warmer air rising around the equator and cooler air sinking over subtropics of both hemispheres. This deep convection circulation is characterized by ascending motions of warm and moist air converging near the equator, followed by poleward flows in the upper troposphere in both hemispheres, which descend over the dry subtropics and return equatorward near the surface in the form of trade winds.

Numerous studies have investigated the intensity and width Hadley cell. Using climate models or statistical methods, these studies have detected varying trends in the intensity and expansion of the Hadley cell during recent decades. The reason for the difference can be attributed to different definitions, different statistical periods, and different data sources. A comprehensive review of previous studies exhibited that the long-term process of Hadley cell changes remains controversial, and the poleward expansion of this cell also remains unclear.

Therefore, this study has attempted to identify some of the Hadley cell changes by using previous methods and supplementing them. What distinguishes this study from previous related studies is the use of new and appropriate definitions for Hadley cell edges.

### **Methodology**

This study investigated the variability of the Hadley cell in both hemispheres over recent decades using the historical data of NCEP/NCAR from the National Centers for Environmental Protection and the National Center for Atmospheric Research, covering 1980 to 2025. We used the daily means of meridional and vertical wind components, on 12 pressure levels from 1000 to 100 hPa. The data are on a horizontal resolution of  $2.5 \times 2.5$  degrees. To analyze Hadley cell and evaluate meridional circulation over 1980-2025 period, we used - similar to previous studies - the mass stream function, average of zonal mean of vertical velocity ( $\Omega$ ) and mass stream function gradient. The mass stream function was being easily obtained via a mass-weighted vertical integral of the zonal mean meridional velocity. These parameters are usually calculated as an annual mean or an average over specific months or seasons. In the analysis of the northern and southern edges of the Hadley cell, the sign change of the meridional mass stream function was utilized in the vertical direction.

The edge of the Hadley cell in the Northern (Southern) Hemisphere was defined in such a way that at each latitude, from 12 points corresponding to different pressure levels, the sign of the meridional mass flow function was positive (negative) at least in 10 points and this sign changes at the next latitude.

The use of the average of zonal mean of vertical velocity ( $\Omega$ ) analysis and the definition of the Hadley cell edge are considered as innovations of this research. To analyze the development or weakening of the Hadley cell during the warm (December, January, and February) and cold (June, July, and August) seasons, the area inside (and outside) the line equal to 5 units (-5 units) of the meridional stream function for the northern (southern) Hadley cell was estimated and its changes with time were examined.

### **Results and Discussion**

From the investigation of average of zonal mean of meridional mass stream function, it was observed that the Hadley cell was

developed in the winter of each hemisphere. In the northern hemisphere winter, the southern Hadley cell is weakened beyond detection, and conversely, in the southern hemisphere winter, the northern Hadley cell is at its weakest compared to other months. The result revealed, in statistical period, in 84.8% of cases the equatorial edge of the northern Hadley cell is at latitude 7.5 degrees north, and in 45.7% of cases its subtropical edge is at latitude 27.5 degrees north.

Moreover, in 80.4% of cases the center of the Hadley cell is located at 15 degrees' north latitude. In addition, in 39.1% of cases the equatorial edge of the southern Hadley cell is at latitude 5 degrees south, and in 80.4% of cases its subtropical edge is at latitude 27.5 degrees south. The location of the center of the southern Hadley cell in 89.1% of cases was estimated at 12.5 degrees' south latitude.

### **Conclusion**

This study indicated that in the summer of each hemisphere, when the Inter-tropical convergence zone is at its highest position in the summer hemisphere, the ascending branch of the Hadley cell is located in the summer hemisphere and its descending branch is located in the winter hemisphere, and the Hadley cell is weaker in the summer hemisphere.

The results also exhibited that the changes in latitudes related to the equatorial, subtropical edges, and central core of the

Hadley cell in both hemispheres do not follow a specific trend. While the intensity of the northern Hadley central core displays a positive trend and the southern core a negative trend, the decadal rate of change remains contingent upon both the data source and the statistical period employed in the study. Furthermore, the intensity in southern Hadley cell is 1.3 times larger than the northern's. In the DJF season, the intensity in the northern Hadley cell is about 4 times greater than the southern Hadley cell, but in the JJA season, the intensity of the southern Hadley cell is estimated to be about 8 times greater than the northern's.

### **Funding**

There is no funding support.

### **Authors' Contribution**

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

### **Conflict of Interest**

Authors declared no conflict of interest.

### **Acknowledgments**

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

## واکاوی تغییرات فصلی و سالانه سلول هادلی در دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۲۵

محمد مرادی<sup>۱</sup>، غلامرضا براتی<sup>۲</sup>

۱- نویسنده مسئول، گروه هواشناسی همدیدی و دینامیکی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران. رایانامه: [moradim36@gmail.com](mailto:moradim36@gmail.com)

۲- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: [g\\_barati@sbu.ac.ir](mailto:g_barati@sbu.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
<b>نوع مقاله:</b> مقاله پژوهشی	در این پژوهش برای آشکارسازی و تحلیل تغییرات سلول هادلی در دو نیمکره شمالی و جنوبی، از داده‌های روزانه مؤلفه نصف‌النهاری و مؤلفه قائم بردار باد در دوازده تراز فشاری استاندارد با کف و سقف به ترتیب ۱۰۰۰ و ۱۰۰ هکتوپاسکال روی یک شبکه منظم دو بعدی که نیمکره شمالی و جنوبی را در برمی‌گیرد، در دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۲۵ استفاده شد و سپس با تحلیل میانگین مداری تابع جریان جرم نصف‌النهاری، میانگین مداری مؤلفه قائم باد و گرادیان نصف‌النهاری تابع جریان، ویژگی‌های سلول هادلی آشکارشده در هر دو نیمکره بررسی گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات عرض‌های جغرافیایی مربوط به لبه‌های استوایی، جنب حاره و نیز هسته مرکزی سلول هادلی در هر دو نیمکره از روند خاصی پیروی نمی‌کند درحالی‌که شدت هسته مرکزی هادلی شمالی (جنوبی) دارای روند صعودی (نزولی) است که مقدار روند در هر دهه به منبع داده و دوره آماری بکار رفته در پژوهش بستگی دارد. همچنین میانگین مساحت زیر منحنی ۵ واحدی در سلول هادلی جنوبی حدود ۱/۶ برابر بیشتر از سلول هادلی شمالی است. بعلاوه در تابستان هر نیمکره، شاخه صعودی سلول هادلی در نیمکره تابستانی و شاخه نزولی آن در نیمکره زمستانی آشکار می‌شود. بررسی‌ها نشان داد که در فصل DJF شدت سلول هادلی شمالی ۴ برابر جنوبی است ولی در فصل JJA، شدت سلول هادلی جنوبی ۸ برابر شمالی هست. بعلاوه شدت سلول هادلی شمالی زمستانه ۸ برابر تابستانه است ولی سلول هادلی جنوبی زمستانه ۴ برابر تابستانه هست. بنابراین سلول هادلی در زمستان هر نیمکره قوی‌تر است.
<b>تاریخ دریافت:</b> ۱۴۰۴/۰۸/۰۵	
<b>تاریخ بازنگری:</b> ۱۴۰۴/۱۱/۰۹	
<b>تاریخ پذیرش:</b> ۱۴۰۴/۱۲/۲۲	
<b>تاریخ چاپ:</b> ۱۴۰۵/۰۱/۱۸	
<b>واژگان کلیدی:</b> تابع جریان جرم نصف‌النهاری، سلول هادلی، میانگین مداری، کمربند همگرایی درون حارهای.	

**استناد:** مرادی، محمد و براتی، غلامرضا. (۱۴۰۵). واکاوی تغییرات فصلی و سالانه سلول هادلی در دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۲۵. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۸ (۱)، ۱۱۸-۱۰۱.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2026.411156.1007919>

## مقدمه

گردش هادلی نخستین بار در اواخر قرن هفدهم توسط ادmond هالی<sup>۱</sup> در بررسی همگرایی باد سطحی دیدبانی شناسایی شد و پنجاه سال بعد توسط جورج هادلی<sup>۲</sup> که مفهوم پایستاری تکانه را برای توضیح باد سطحی مشاهده شده بکار برد، آشکار گردید. با این وجود حدود دو قرن طول کشید (Lionello et al., 2024:70) تا ساختار آن با استفاده از پژوهش‌های انجام شده مربوط به وردسپهر میانی و فوقانی، تعیین و تکمیل شود. در مدل تک سلول گردش عمومی جو، گردش هادلی، یکی از مؤلفه‌های کلیدی سامانه جو زمین است که انتقال انرژی، تکانه و رطوبت بین مناطق گرمسیری استوایی و عرض‌های جغرافیایی نزدیک قطب در مقیاس بزرگ را در هر دو نیمکره شمالی و نیمکره جنوبی به عهده دارد (Galanti et al., 2022:1; Li et al., 2023:1). این انتقال نصف‌النهاری برای به تعادل رساندن انرژی و تنظیم الگوهای اقلیمی بسیار مهم و حیاتی هست (Zheng et al., 2025:2). توسعه گردش هادلی از استوا به قطب با قوانین ریاضی و فیزیک سازگار بود (Holton, 2004:314) ولی با جریان بادهای دیدبانی مطابقت نداشت، از این رو با تعریف مدل سه سلولی گردش عمومی جو در نیمه دوم قرن نوزدهم، این گردش به سلول‌های هادلی، فرل<sup>۳</sup> و قطبی تبدیل و مورد تأیید پژوهشگران قرار گرفت.

سلول هادلی یک سلول همرفتی بزرگ مقیاس است که از یک شاخه صعودی در منطقه استوایی و یک شاخه نزولی در مناطق جنب حاره هر دو نیمکره تشکیل شده است (Lionello et al., 2024:69). در شاخه صعودی، هوای گرم منطقه استوایی صعود کرده و پس از سرد شدن، در جو بالای منطقه استوایی واگرا می‌شود و به سوی مناطق جنب حاره هر دو نیمکره شمالی و جنوبی که موقعیت شاخه نزولی سلول هادلی است، جابجا شده و سپس به جو پایین نزول می‌کند (Huang, et al., 2018:344). نقش مناطق حاره در دریافت تابش خورشیدی و ایجاد همرفت عمیق تابستانه، برهمکنش با پیچک‌های جت جنب حاره زمستانی و افزایش انتقال تکانه به سوی مناطق جنب حاره از مهم‌ترین عوامل مؤثر تشکیل سلول هادلی می‌باشد (Hoskinse & Yang, 2003:2) در حالی که ناپایداری کُرفشاری عامل محدودکننده توسعه آن محسوب می‌شود.

در گذشته، مطالعات زیادی در مورد ویژگی‌های سلول هادلی انجام شده است ولی از اوایل سال ۱۹۷۰ که شبیه‌سازی عددی گردش عمومی جو امکان پذیر شد (Nguyen et al., 2018:1)، گردش هادلی برای پژوهشگران جذابیت بیشتری پیدا کرد. بیشتر پژوهشگران از اوایل سال ۲۰۰۰ به بعد، نقش گازهای گلخانه‌ای و اثر تغییر اقلیم بر سلول هادلی را مطالعه کردند و مقالات زیادی در این مورد منتشر نمودند که در برخی از آن‌ها روش‌های یکسانی بکار گرفته شده است (Lionello et al., 2024:70). بسیاری از مطالعات به گسترش سلول هادلی و تغییرات شدت هسته آن پرداخته‌اند و با استفاده از مدل‌های اقلیمی (Sun et al., 2019:834; Wu et al., 2024:2; Kim et al., 2022:2) یا روش‌های آماری، روندهای متفاوتی را برآورد کرده‌اند (Huang, et al., 2018:344) که علت تفاوت را می‌توان در تعاریف گوناگون، دوره آماری مختلف و منابع داده‌ای متفاوت جستجو کرد. برخی مطالعات نیز به تغییرپذیری سالانه سلول هادلی و برهمکنش آن با سایر پدیده‌های اقلیمی پرداخته‌اند (Li et al., 2024:1).

برخی پژوهشگران از معیارهای مختلفی برای شناسایی لبه‌های سلول هادلی استفاده کرده‌اند و طیف وسیعی از آن‌ها، گسترش عرضی سلول هادلی را با نرخ‌های متفاوتی آشکار کرده‌اند. فو<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۶:۱۱۷۹)، با ردیابی جریان‌های

1. Edmond Halley  
2. George Hadley  
3. Ferrel Cell  
4. Fu

جت جنب حاره نشان دادند که شاخه گرمسیری سلول هادلی در دوره آماری ۱۹۷۹-۲۰۰۵ حدود دو درجه عرض جغرافیایی گسترش یافته است در حالی که هو و فو<sup>۱</sup> (۲۰۰۷:۵۲۳۹) با استفاده از تابع جریان نصف‌النهاری و تابش موج‌بلند به مقدار ۲۵۰ وات بر مترمربع، ابتدا لبه‌های قطب سوی سلول هادلی را تعریف کردند و سپس نشان دادند که از سال ۱۹۷۹ سلول هادلی بین دو تا چهار و نیم درجه عرض جغرافیایی به سوی عرض‌های جغرافیایی نزدیک قطب توسعه یافته است (Nguyen et al., 2015:1). برخی پژوهشگران نیز بیان کرده‌اند که شاخه فرونشینی سلول هادلی جنوبی در مناطق جنب حاره از سال ۱۹۷۹ بین نیم تا دو درجه عرض جغرافیایی در هر دهه به سوی قطب جابجا شده است که بیشترین جابجایی به فصل گرم مربوط می‌شود (Lucas et al., 2022:257). برخی دیگر با استفاده از مدل‌های اقلیمی نشان داده‌اند که سلول هادلی به‌طور قابل‌توجهی گسترش یافته است ولی بزرگی گسترش سلول شبیه‌سازی شده در مقایسه با مقدار مشاهداتی بسیار کمتر برآورد شده است (Lu et al., 2007:2). پژوهش‌های مربوط به تغییرات شدت هسته سلول هادلی نیز نشان داده‌اند که هسته سلول هادلی در هر دو نیمکره تقویت شده است ولی مقدار روند در این پژوهش‌ها متفاوت بوده است. استاچنیک و شوماخر<sup>۲</sup> (۲۰۱۱:۱) با استفاده از هشت مجموعه داده باز تحلیل نشان داده‌اند که در هر دهه، شدت سلول هادلی شمالی ۰/۱۴۳-۰/۰۳ واحد و شدت سلول هادلی جنوبی ۰/۵۴-۱/۳۹ واحد تقویت شده است. هوانگ<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۸:۳۴۵) نیز با استفاده از دو مجموعه داده، تقویت هسته سلول هادلی را با روندهای متفاوت تأیید کرده‌اند.

بررسی کلی مطالعات پیشین نشان داد که روند بلندمدت تغییرات سلول هادلی همچنان بحث‌برانگیز است و گسترش قطب سوی این سلول نیز هنوز در پرده ابهام باقی مانده است. از این رو در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از روش‌های پیشین و تکمیل آن‌ها، گوشه‌ای از تغییرات سلول هادلی مشخص شود. آنچه این پژوهش را از پژوهش‌های پیشین مرتبط متمایز می‌کند استفاده از تعاریف جدید و متناسب برای لبه‌های سلول هادلی و نیز استفاده از دوره آماری منتهی به ۲۰۲۵ هست.

## روش پژوهش

در این پژوهش برای آشکارسازی سلول هادلی در دو نیمکره شمالی و جنوبی، از داده‌های روزانه مؤلفه نصف‌النهاری و مؤلفه قائم بردار باد در دوازده تراز فشاری استاندارد با کف و سقف به ترتیب ۱۰۰ و ۱۰۰۰ هکتوپاسکال روی یک شبکه منظم دو بعدی که نیمکره شمالی و جنوبی را در برمی‌گیرد، استفاده شد. سقف ۱۰۰ هکتوپاسکال به این دلیل انتخاب شد که داده‌های در دسترس امگا فقط تا این سطح فشاری برآورد شده است. این داده‌ها از بایگانی مرکز ملی پیش‌بینی محیطی و پژوهش‌های جوی آمریکا موسوم به NCEP/NCAR گرفته شد (Kalnay et al. 1996:437) که در قالب‌های مختلف در دسترس می‌باشند. چون گام شبکه‌ای این داده‌ها در راستای افق، دو و نیم درجه است، از این رو در شبکه منظم محدود به هر نیمکره، ۱۴۴×۳۷ نقطه‌ای در نظر گرفته شد. نتیجه حاصل از استفاده از این داده‌ها به سبب به‌کارگیری میانگین زمانی و میانگین مداری تفاوت قابل‌توجهی با منابع داده‌ای دیگر ندارد سان<sup>۴</sup> و همکاران با چهار منبع داده‌ای (NCEP/NCAR, ENCEP/DOE, JRAA, ERA-Interim) تغییرات سلول هادلی را بررسی کردند و نشان دادند که هر چهار مورد داده با هم سازگاری دارند (Sun et al., 2019:833).

1. Hu and Fu  
2. Stachnik and Schumacher  
3. Huang  
4. Sun

برای تحلیل سلول هادلی و ارزیابی گردش نصف‌النهاری در دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۲۵، مشابه مطالعات قبلی، از تابع جریان جرم نصف‌النهاری استفاده شد (Kalik et al., 2024:3 Yun et al., 2021:122;; Hartmann, 2016:159) که با وجود کاستی‌هایی که دارد، به سبب برآورد کردن پایستاری جرم، یک ابزار قدرتمند برای تشخیص سلول هادلی هست. تابع جریان جرم نصف‌النهاری بر پایه میانگین مداری مؤلفه نصف‌النهاری بردار باد، از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Galanti et al., 2022:3; Hess and Chemke, 2024:5; Zheng et al., 2025:2):

$$\Psi(\phi, p) = \frac{2a\pi \cos(\phi)}{g} \int_0^p \bar{V}(\phi, p) dp \quad (1)$$

در این معادله  $\Psi$  تابع جریان جرم نصف‌النهاری (کیلوگرم بر ثانیه)،  $\phi$  عرض جغرافیایی (درجه)،  $a$  شعاع متوسط زمین (متر)،  $g$  شتاب گرانی (متر بر مجذور ثانیه) و  $\bar{V}$  میانگین مداری مؤلفه نصف‌النهاری باد (متر بر ثانیه) است که در هر عرض جغرافیایی محاسبه می‌شود (مرادی، ۱۴۰۲:۴۳؛ مرادی، ۱۴۰۳:۲؛ دریکوند و همکاران، ۱۴۰۱:۵۳۸):

$$\bar{V}_{kj} = \frac{1}{144} \sum_{i=1}^{144} V_{kji} \quad (2)$$

که در آن زیرنویس  $k$ ، شماره تراز فشاری است و از زیرنویس‌های  $i$  و  $j$  به ترتیب برای راستای مداری و نصف‌النهاری استفاده شده است.  $k$  از یک تا دوازده برای ترازهای از ۱۰۰۰ تا ۱۰۰ هکتوپاسکال،  $i$  از یک تا ۱۴۴ برای طول جغرافیایی از صفر تا  $357/5$  و  $j$  در هر نیمکره از یک تا ۳۷ برای عرض جغرافیایی از صفر تا ۹۰ درجه شمالی و جنوبی تعبیر می‌کند. پس تمام طول‌ها در محاسبه میانگین مداری در نظر گرفته شد. از آنجائی که تغییرات مؤلفه مداری باد با ارتفاع خطی نیست، از این رو انتگرال‌گیری معادله (۱) به صورت میانگین‌گیری ظاهر می‌شود و عملگر میانگین‌گیری قائم نیز به صورت زیر تعریف می‌شود (Holton, 2004:21):

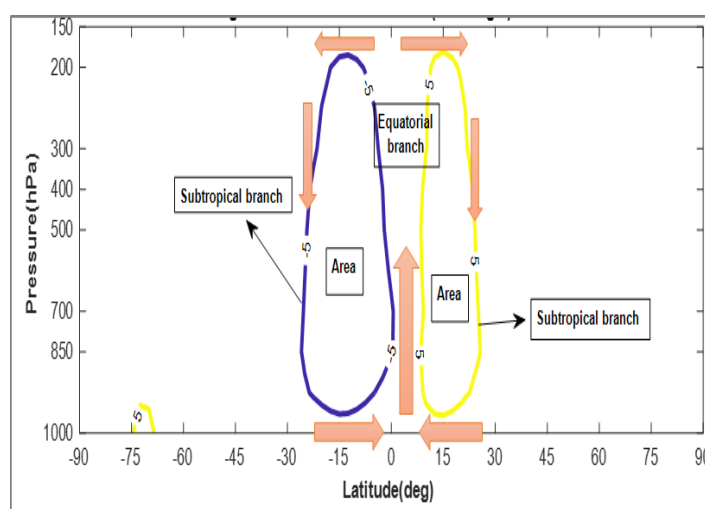
$$\int_{p_1}^{p_2} (\bar{V}) dp = (p_2 - p_1) \langle \bar{V} \rangle \quad (3)$$

در این معادله  $\langle \bar{V} \rangle$ ، معرف میانگین قائم متوسط مؤلفه نصف‌النهاری باد روی سطوح فشاری است. معادله (۱) نشان می‌دهد که در مختصات عرض-فشار، مقادیر مثبت تابع جریان جرم نصف‌النهاری معرف گردش در جهت واچرخندی و علامت منفی بیانگر گردش در جهت چرخندی است (Sun et al., 2019:835). بنابراین با استفاده از تغییر علامت تابع جریان جرم نصف‌النهاری می‌توان سلول هادلی را در هر دو نیمکره مشابه فلش‌های رنگی روی شکل ۱، آشکار نمود (Holton and Hakim, 2012:331). همچنین از تحلیل بیشترین (کمترین) مقدار در نیمکره شمالی (نیمکره جنوبی) نیز، شدت هسته و پهنای سلول هادلی قابل بررسی هست. تابع جریان جرم نصف‌النهاری ممکن است نتواند جزئیات کامل باد افقی و قائم را برآورده کند و در تعیین گردش‌های جوی مناطق گرمسیری کارا نباشد، از این رو برای کاهش این محدودیت‌ها (Sun et al., 2019:831)، از متوسط میانگین مداری مؤلفه قائم باد مشاهداتی و گرادیان نصف‌النهاری تابع جریان نصف‌النهاری استفاده شد. با فرض آنکه گردش نصف‌النهاری ناواگرا است، از معادله پیوستگی در دو راستای نصف‌النهاری و قائم، ارتباط بین تابع جریان جرم نصف‌النهاری و میانگین مداری مؤلفه قائم باد تعیین به دست می‌آید (Oort and Yienger, 1996:2752; Nguyen et al., 2018:3):

$$\bar{\omega} = -\frac{g}{2a^2 \pi \cos(\phi)} \frac{\partial \Psi}{\partial \phi} \quad (4)$$

این معادله نشان می‌دهد که چون  $\bar{\omega} \approx -\frac{\partial \Psi}{\partial \phi} < 0$  معرف حرکت صعودی و  $\bar{\omega} \approx -\frac{\partial \Psi}{\partial \phi} > 0$  بیانگر حرکت نزولی است، از این رو در اطراف استوای دو نیمکره، مقادیر این کمیت منفی و در مناطق جنب حاره دو نیمکره، مقادیر آن مثبت

هست. در این پژوهش از تابع جریان جرم نصف‌النهار برای تحلیل شاخه‌های شمالی (مقادیر مثبت) و جنوبی (مقادیر منفی) سلول هادلی استفاده شد. برای اطمینان از درستی تحلیل‌ها و مقایسه نتایج، از متوسط امگا و آهنگ تغییر تابع جریان جرم نصف‌النهار در راستای نصف‌النهار نیز استفاده شد. در تحلیل لبه‌های شمالی و جنوبی سلول هادلی هر نیمکره، از تغییر علامت تابع جریان جرم نصف‌النهار در راستای قائم استفاده شد. لبه سلول هادل در نیمکره شمالی (جنوبی) به‌گونه‌ای تعریف شد که در عرض جغرافیایی آن محل، از ۱۲ نقطه مربوط به سطوح فشاری مختلف، دست‌کم در ۱۰ نقطه علامت تابع جریان جرم نصف‌النهار مثبت (منفی) باشد و در عرض جغرافیایی بعدی این علامت تغییر کند. استفاده از تحلیل میانگین مداری امگا و تعریف لبه سلول هادلی، از نوآوری‌های این پژوهش محسوب می‌شود. برای تحلیل توسعه یا تضعیف سلول هادلی در دو فصل گرم (ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه) و سرد (ماه‌های ژوئن، ژوئیه و اوت)، مساحت درون خط هم‌مقدار ۵ واحدی (-۵) واحدی تابع جریان نصف‌النهار برای سلول هادلی شمالی (جنوبی) که در شکل ۱ نشان داده شده است، برآورد و تغییرات آن با زمان بررسی شد.



شکل ۱. شمای ساده‌ای از سلول هادلی شمالی و جنوبی بر اساس تابع جریان جرم نصف‌النهار. محور مختصات عرض جغرافیایی بر حسب درجه و سطح فشاری بر حسب هکتوپاسکال است. فلش‌ها گردش و اچرخندی و چرخندی را نشان می‌دهند.

به‌طور کلی مراحل این پژوهش به شرح زیر است:

- ۱- محاسبه روزانه میانگین مداری مؤلفه‌های نصف‌النهاری ( $\bar{V}$ ) بردار باد بر اساس معادله ۲
- ۲- برآورد روزانه تابع جریان جرم نصف‌النهاری ( $\Psi_v$ ) از معادله ۱ و ۳ و محاسبه آهنگ تغییر آن در راستای نصف‌النهاری
- ۳- محاسبه و تحلیل میانگین مداری تابع جریان جرم نصف‌النهاری و آهنگ تغییر آن در راستای نصف‌النهاری در سال‌های مختلف و فصل‌های گرم و سرد دوره آماری و برآورد لبه‌های سلول هادلی شمالی و جنوبی بر اساس تابع جریان جرم نصف‌النهاری در دوره آماری و فصل‌های سرد و گرم
- ۴- برآورد و تحلیل مساحت درون خط هم‌مقدار ۵ واحدی میانگین فصلی تابع جریان جرم نصف‌النهاری و برآورد مقادیر بیشینه (کمینه) میانگین فصلی تابع جریان جرم نصف‌النهاری برای تحلیل موقعیت مرکز سلول هادلی شمالی (جنوبی) و سپس تحلیل وجود روند کمیت‌های برآورد شده با استفاده از آزمون من-کندال<sup>۱</sup> در سطح اطمینان ۹۵ درصد

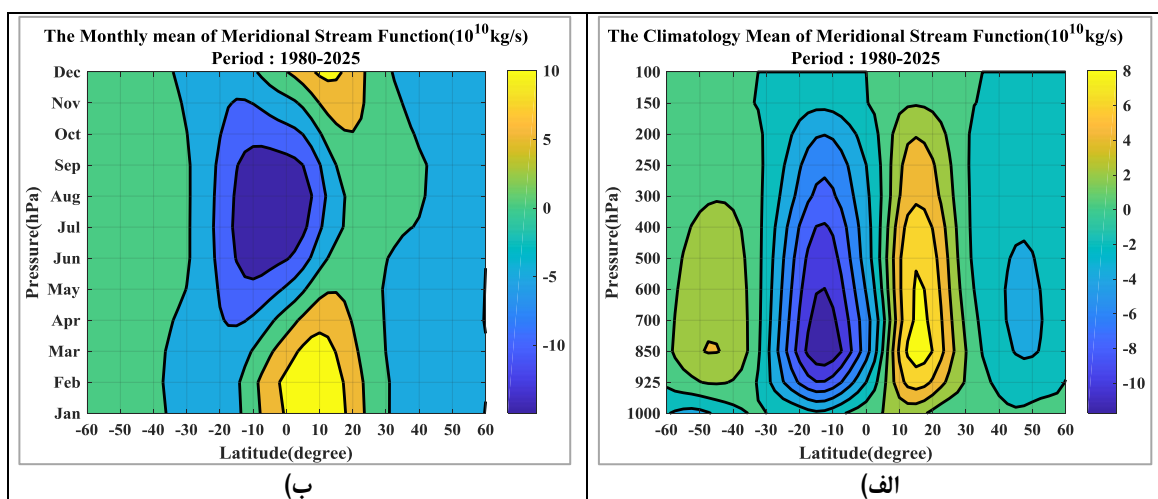
1. Mann-Kendall

## یافته‌ها

شکل ۲-الف) نیمرخ قائم میانگین سالانه تابع جریان جرم نصف‌النهاری در دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۲۵ را نشان می‌دهد. مقادیر مثبت این کمیت در اطراف استوای شمالی و مقادیر منفی آن در اطراف استوای جنوبی معرف سلول هادلی در هر دو نیمکره است که در راستای قائم از سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال تا سطح ۱۰۰ هکتوپاسکال گسترش یافته است. چون وردایست در عرض‌های جغرافیایی مناطق حاره و جنب حاره در فصل‌های مختلف کمتر از ۱۰۰ هکتوپاسکال است، می‌توان ترازهای فشاری بالاتر را نیز به‌عنوان سقف انتخاب کرد ولی به دلیل محدودیت در داده‌های امگا، این سطح فشاری به‌عنوان سقف محاسبات در نظر گرفته شد. در حالت میانگین و با داده‌های بکار رفته در این پژوهش، مقادیر بیشینه نیمکره شمالی و کمینه نیمکره جنوبی که معرف هسته مرکزی سلول هادلی است، در سطوح میانی و زیرین وردسپهر قرار گرفته است. بعد افقی سلول هادلی در هر دو نیمکره، از عرض جغرافیایی صفر تا سی درجه شمالی و جنوبی آشکار شده است که در فصل‌های مختلف سال تغییر می‌کند.

بررسی موقعیت سلول هادلی شمالی در دوره آماری نشان داد که در ۸/۸۴ درصد موارد، موقعیت لبه استواسوی آن در عرض جغرافیایی ۷/۵ درجه شمالی و لبه جنب حاره آن در ۷/۴۵ درصد موارد در عرض جغرافیایی ۵/۲۷ درجه شمالی قرار گرفته است. همچنین مرکز سلول در ۴/۸۰ درصد موارد در عرض جغرافیایی ۱۵ درجه شمالی جای گرفته است. بعلاوه لبه استواسوی سلول هادلی جنوبی در ۱/۳۹ درصد موارد، در عرض جغرافیایی ۵ درجه جنوبی و لبه جنب حاره آن در ۴/۸۰ درصد موارد در عرض جغرافیایی ۵/۲۷ درجه جنوبی هست. موقعیت مرکز سلول هادلی جنوبی، در ۱/۸۹ درصد موارد در عرض جغرافیایی ۵/۱۲ درجه جنوبی برآورد شد. مقادیر فوق در جدول ۱ آورده شده است.

شکل ۲-ب) میانگین ماهانه تابع جریان جرم نصف‌النهاری را در دوره آماری انتخابی نشان می‌دهد. از این شکل دیده می‌شود که سلول هادلی در زمستان هر نیمکره کاملاً توسعه یافته است. در زمستان نیمکره شمالی که سلول هادلی شمالی توسعه یافته است، سلول هادلی جنوبی به نحوی تضعیف شده است که قابل تشخیص نیست و برعکس در زمستان نیمکره جنوبی در حالی که سلول هادلی جنوبی گسترش یافته است، سلول هادلی شمالی در ضعیف‌ترین حالت خود نسبت به ماه‌های دیگر هست.



شکل ۲. الف) نیمرخ قائم میانگین سالانه تابع جریان جرم نصف‌النهاری و ب) تغییرات میانگین ماهانه تابع جریان نصف‌النهاری بر حسب ۱۰۱۰ کیلوگرم بر ثانیه در دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۲۵

شکل ۳-الف) نیمرخ قائم میانگین سالانه  $\frac{\partial \psi_p}{\partial \phi}$  را در دوره آماری انتخابی نشان می‌دهد. از این شکل دیده می‌شود که در اطراف استوای دو نیمکره در حدفاصل دو مدار ۱۵ درجه شمالی و جنوبی، مقادیر منفی این کمیت قرار گرفته است که معرف حرکت صعودی در این محدوده است. این مقادیر در استوای شمالی قوی‌تر از استوای جنوبی هست. در عرض‌های جغرافیایی جنب حاره دو نیمکره مقادیر مثبت این کمیت جای گرفته است که بیانگر حرکت نزولی و فرونشینی هوا در این منطقه هست. شکل ۳-ب) نیمرخ قائم متوسط دوره آماری میانگین مداری مؤلفه قائم باد در دستگاه مختصات  $p$  را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که در اطراف استوا در محدوده ۱۰ درجه عرض جغرافیایی شمالی و جنوبی مقادیر این کمیت منفی و در مناطق جنب حاره هر دو نیمکره، مقادیر آن مثبت هست. بیشترین فراوانی عرض جغرافیایی هسته کمینه این کمیت در عرض جغرافیایی ۷/۵ درجه است که منطبق بر لبه استواسوی میانگین مداری تابع جریان جرم نصف‌النهار شمالی هست. بیشترین فراوانی عرض جغرافیایی مربوط به هسته بیشینه متوسط میانگین مداری امگا در نیمکره جنوبی ۲۷/۵- درجه و در نیمکره شمالی ۲۵ درجه است. اگر چه در برخی سال‌ها مقادیر کمتر از هسته مرکزی نیز در سطوح پایین فشاری و عرض جغرافیایی ۳۷/۵ درجه شمالی مشاهده شده است. این شکل‌ها نشان می‌دهند که شرایط برای ایجاد شاخه صعودی در مناطق استوایی و شاخه نزولی در مناطق جنب حاره سلول هادلی در هر دو نیمکره وجود دارد.

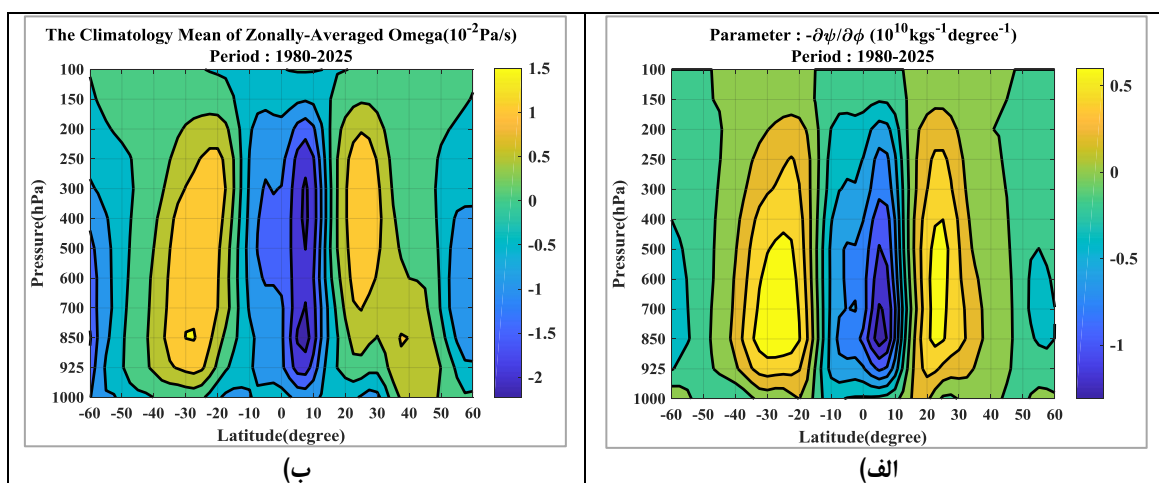
شکل ۴ نیمرخ قائم متوسط میانگین تابع جریان جرم نصف‌النهار در دوره آماری انتخابی در دو فصل سرد (شکل ۴-الف) و گرم (شکل ۴-ب) را نشان می‌دهد. از شکل ۴-الف) دیده می‌شود که در فصل سرد، سلول هادلی شمالی کاملاً توسعه یافته است و شاخه استوایی آن در عرض‌های جغرافیایی جنوبی قرار گرفته است. در این فصل سلول هادلی جنوبی نسبت به همتای شمالی خود ضعیف‌تر است و شاخه استوایی آن در عرض‌های جغرافیایی جنوبی قرار گرفته است. شکل ۴-ب) نشان می‌دهد که در فصل گرم، سلول هادلی جنوبی نسبت به شمالی قوی‌تر ظاهر شده است. شاخه استوایی این سلول در عرض‌های جغرافیایی شمالی قرار گرفته است و شاخه جنب حاره آن نزدیک به مدار سی درجه جنوبی می‌باشد. در این فصل سلول هادلی شمالی در ضعیف‌ترین حالت خود قرار گرفته است. این تغییرات به سبب تغییر زاویه میل خورشیدی و جابجایی کمربند همگرایی درون حاره‌ای رخ می‌دهد. در فصل پاییز که زاویه میل خورشیدی از صفر به مقادیر منفی تغییر می‌کند و در زمستان به کمترین مقدار (۲۳/۵- درجه) می‌رسد، کمربند همگرایی درون حاره‌ای به نیمکره جنوبی انتقال می‌یابد و اطراف استوای جنوبی نسبت به شمالی بیشتر گرم می‌شود. بنابراین در فصل سرد، شاخه صعودی سلول هادلی شمالی و شاخه صعودی سلول هادلی جنوبی، هر دو در نیمکره جنوبی شکل می‌گیرند و اختلاف عرض جغرافیایی بخش جنب حاره سلول هادلی شمالی بیشتر از سلول هادلی جنوبی است. شکل ۴ همچنین نشان می‌دهد که در فصل سرد سلول هادلی جنوبی نسبت به سلول هادلی شمالی همین فصل، خیلی ضعیف‌تر است ولی نسبت به سلول هادلی شمالی در فصل گرم آشکارتر و قوی‌تر هست. این تفاوت به سبب اختلاف دما بین مناطق حاره و جنب حاره دو نیمکره ایجاد شده است. در فصل سرد تضاد دمایی بین مناطق حاره و جنب حاره نیمکره جنوبی بیشتر از نیمکره شمالی است. بنابراین سلول هادلی جنوبی در فصل سرد قوی‌تر از سلول هادلی شمالی در فصل گرم است. مقادیر متوسط فرین هسته مرکزی نیز نشان می‌دهد که هسته مرکزی سلول هادلی شمالی ضعیف‌تر از سلول هادلی جنوبی است (جدول ۱). از برآورد نسبت شدت‌های هسته سلول هادلی که ستون آخر جدول ۱ نشان داده شده است، دیده می‌شود که در دوره آماری شدت سلول هادلی جنوبی ۱/۳ برابر سلول هادلی شمالی است. در فصل DJF شدت در سلول هادلی شمالی حدود ۴ برابر سلول هادلی جنوبی است ولی در فصل JJA، شدت سلول هادلی جنوبی حدود ۸ برابر سلول هادلی شمالی هست. همچنین شدت سلول هادلی شمالی زمستانه حدود ۸ برابر تابستانه است در حالی که سلول هادلی جنوبی زمستانه حدود ۴ برابر تابستانه هست. بنابراین سلول هادلی در زمستان هر نیمکره از سلول هادلی در تابستان آن نیمکره

قوی‌تر است. به روش مشابه در بهار که زاویه میل خورشیدی از صفر به مقادیر مثبت تغییر می‌یابد و در تابستان به بیشترین مقدار (۲۳/۵+ درجه) می‌رسد و کمربند همگرایی درون حاره‌ای از نیمکره جنوبی به نیمکره شمالی منتقل می‌شود، مناطق خشکی اطراف استوای شمالی بیشتر از استوای جنوبی گرم می‌شود و حرکت صعودی در این مناطق بیشتر می‌شود. از این رو در فصل گرم حرکت صعودی مربوط به سلول هادلی جنوبی و شمالی در نیمکره شمالی ایجاد می‌شود اختلاف عرض جغرافیایی بخش جنب حاره سلول هادلی جنوبی بیشتر از سلول هادلی شمالی است. این شرایط سبب شده است تا در فصل سرد سلول هادلی شمالی و در فصل گرم سلول هادلی جنوبی بهتر توسعه یابند و مقادیر متوسط تابع جریان جرم نصف‌النهاری در مرکز آن‌ها به مقادیر فرین برسند. این تحلیل با بررسی موقعیت لبه‌های هر دو سلول هادلی مطابقت دارد. بررسی موقعیت سلول هادلی شمالی در فصل سرد دوره آماری، نشان داد که موقعیت لبه استواسوی آن در عرض جغرافیایی ۱۰/۰ درجه جنوبی و لبه جنب حاره آن در عرض جغرافیایی ۲۷/۵ درجه شمالی قرار گرفته است. همچنین مرکز سلول در عرض جغرافیایی ۱۰/۰ درجه شمالی جای گرفته است. در فصل گرم، لبه استواسوی سلول هادلی جنوبی در عرض جغرافیایی ۷/۵ درجه شمالی و لبه جنب حاره آن در عرض جغرافیایی ۲۵/۰ درجه جنوبی هست. موقعیت مرکز سلول هادلی جنوبی، در عرض جغرافیایی ۷/۵ درجه جنوبی برآورد شد (جدول ۱).

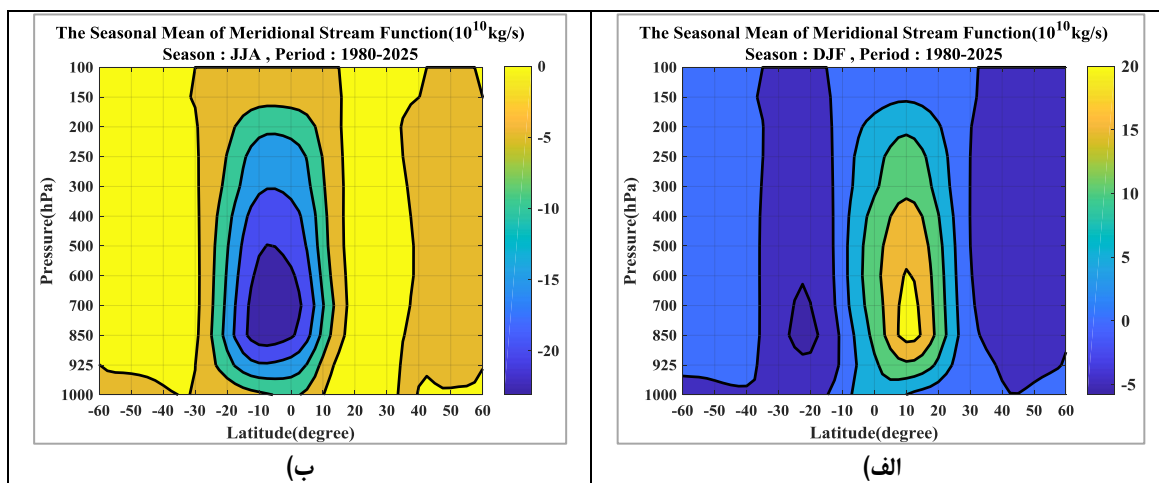
جدول ۱. موقعیت جغرافیایی لبه‌های استوایی و جنب حاره و هسته مرکزی سلول هادلی شمالی و جنوبی در فصل‌های گرم و سرد و کل سال در دوره

آماري ۱۹۸۰-۲۰۲۵

موقعیت سلول هادلی	عرض جغرافیایی (درجه) و بیشترین فراوانی (درصد)							
	بخش استوایی		بخش جنب حاره		هسته مرکزی		مقدار میانگین هسته (۱۰ <sup>۱۰</sup> کیلوگرم بر ثانیه)	
	شمالی	جنوبی	شمالی	جنوبی	شمالی	جنوبی	شمالی	جنوبی
سال	۷/۵	-۵/۰	۲۷/۵	-۲۷/۵	۱۵/۰	-۱۲/۵	۹/۱	-۱۱/۸
بیشترین فراوانی	۸۴/۸	۳۹/۱	۴۵/۷	۸۰/۴	۸۰/۴	۸۹/۱		
دسامبر تا فوریه	-۱۰/۰	-	۲۷/۵	-	۱۰/۰	-	۲۱/۹	-۵/۸
بیشترین فراوانی	۶۹/۶	-	۳۷/۰	-	۵۶/۵	-		
ژوئیه تا اوت	-	۷/۵	-	-۲۵/۰	-	-۷/۵	۲/۹	-۲۳/۴
بیشترین فراوانی	-	۷۱/۷	-	۵۸/۷	-	۵۰/۰		



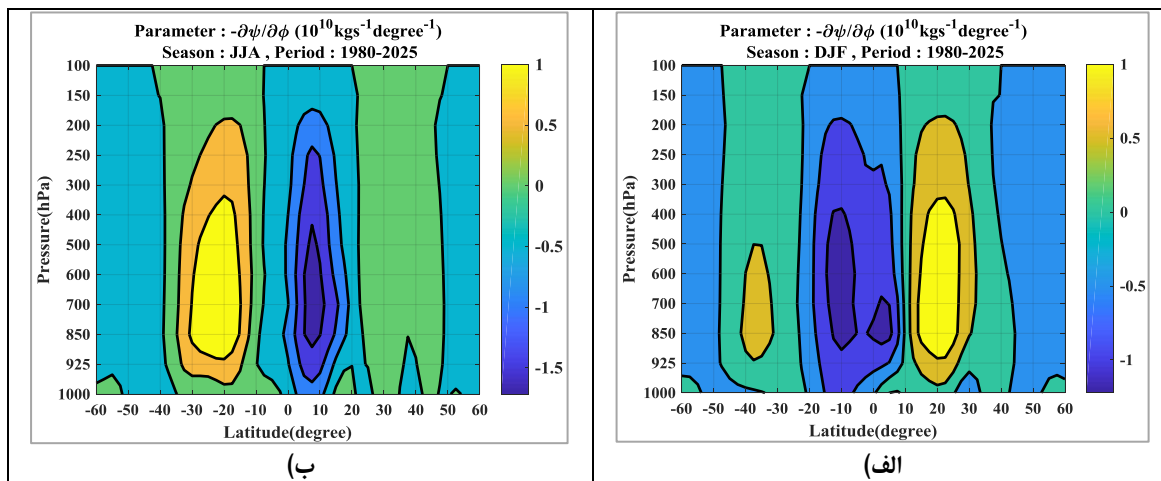
شکل ۳. الف) نیمرخ قائم میانگین سالانه  $-\frac{\partial \psi_v}{\partial \phi}$  (۱۰<sup>۱۰</sup> کیلوگرم بر ثانیه بر درجه) و ب) نیمرخ قائم میانگین سالانه میانگین مداری مؤلفه قائم باد (۲-۱۰ پاسکال بر ثانیه) در دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۲۵



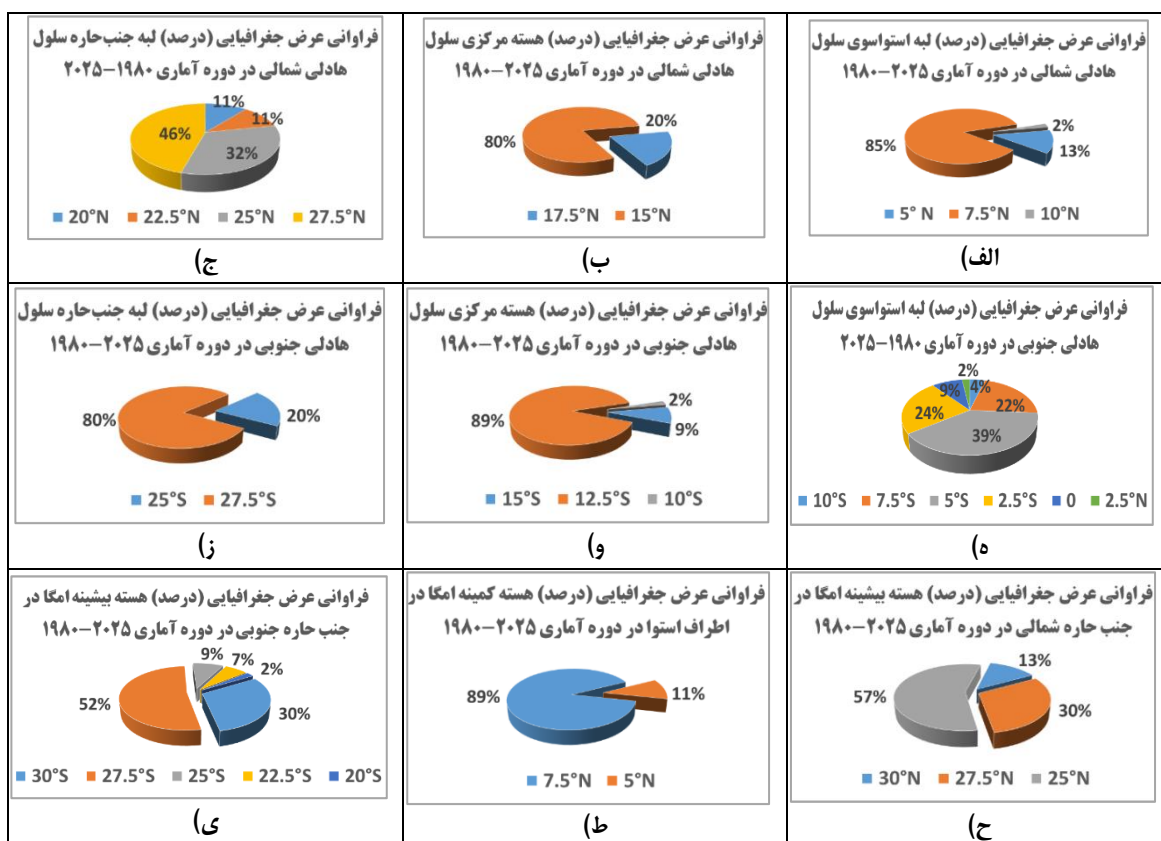
شکل ۴. نیمرخ قائم متوسط میانگین تابع جریان جرم نصف‌النهاری (۱۰۱۰ کیلوگرم بر ثانیه) در ماه‌های الف) ژانویه تا فوریه و ب) ژوئیه تا اوت دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۲۵

شکل ۵ نیمرخ قائم میانگین  $-\frac{\partial \psi_s}{\partial \phi}$  در دو فصل سرد (شکل ۵-الف) و گرم (شکل ۵-ب) دوره آماری را نشان می‌دهد. شکل ۵-الف) نشان می‌دهد که در فصل سرد در اطراف استوای جنوبی و شمالی دو هسته کمینه قرار دارد که معرف صعود هوا در این مناطق و تشکیل شاخه صعودی سلول هادلی شمالی و جنوبی هست. هسته کمینه نیمکره جنوبی وسیع‌تر از نیمکره شمالی است و بیانگر گرم‌تر شدن این منطقه هست. در اطراف جنب حاره شمالی و جنوبی نیز مقادیر این کمیت مثبت است که معرف فرونشینی هوا در این مناطق هست. این شکل نشان می‌دهد که در این فصل هسته بیشینه این کمیت بیشتر از مقادیر آن در مناطق جنب حاره جنوبی است. در فصل گرم (شکل ۵-ب) هسته کمینه در اطراف استوای شمالی است و هسته بیشینه مربوط به منطقه جنب حاره جنوبی خیلی بیشتر از منطقه جنب حاره شمالی هست. این اختلاف به سبب کم بودن تضاد دمایی بین منطقه جنب حاره و حاره شمالی است.

برای بررسی نحوه تغییرات موقعیت سلول هادلی، عرض جغرافیایی لبه استواسو، لبه جنب حاره و هسته مرکزی سلول هادلی شمالی و جنوبی و نیز موقعیت جغرافیایی کمترین متوسط میانگین مداری امگا در اطراف استوا و بیشترین مقدار آن در اطراف جنب حاره هر دو نیمکره در دوره آماری بررسی شد. شکل ۶ فراوانی عرض جغرافیایی موقعیت‌های مختلف سلول هادلی را نشان می‌دهد. از این شکل دیده می‌شود که در ۴۶ سال دوره آماری تغییرات عرض جغرافیایی لبه استواسو، هسته مرکزی و لبه جنب حاره هر دو سلول هادلی شمالی و جنوبی قابل توجه نبوده است و وجود روند این کمیت‌ها از نظر آماری تأیید نشد. بعلاوه روند تغییرات عرض جغرافیایی مربوط به کمترین مقدار متوسط میانگین مداری امگا در اطراف استوا و بیشترین مقدار آن در مناطق جنب حاره هر دو نیمکره مورد تأیید قرار نگرفت ولی روند نزولی مقادیر کمینه این کمیت در اطراف عرض جغرافیایی ۷/۵ درجه شمالی و روند صعودی مقادیر بیشینه آن در جنب حاره شمالی مورد تأیید قرار گرفت که بیانگر تقویت این هسته‌ها در دوره آماری هست. شایان‌ذکر است که مقدار جابجایی ویژگی‌های سلول هادلی شمالی و جنوبی در راستای نصف‌النهاری در طول دوره آماری در پرده ابهام باقی ماند.



شکل ۵. نیمرخ قائم میانگین  $-\frac{\partial\psi}{\partial\phi}$  (۱۰<sup>۱۰</sup> کیلوگرم بر ثانیه بر درجه) در ماه‌های الف) دسامبر تا فوریه و ب) ژوئیه تا اوت

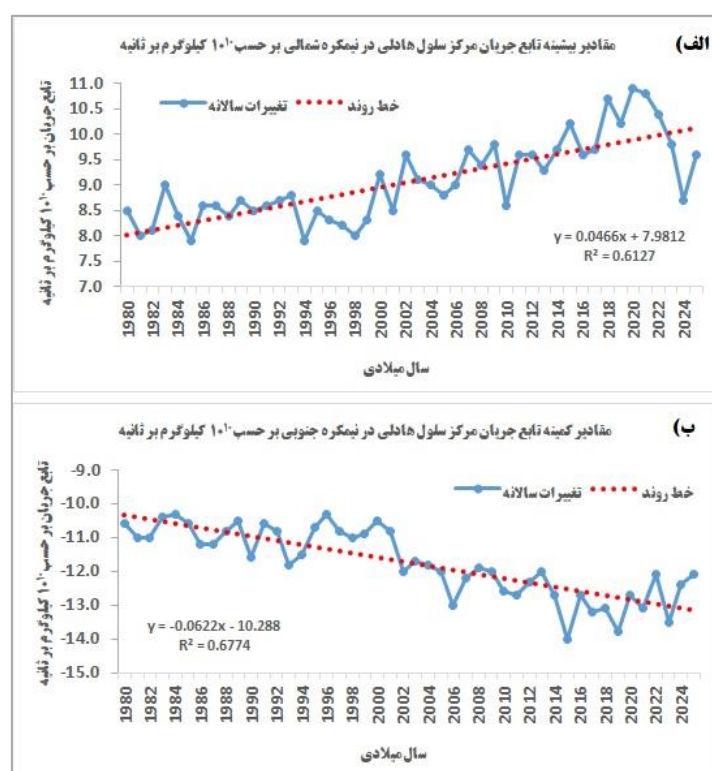


شکل ۶. فراوانی (درصد) عرض جغرافیایی لبه استوا سوا (الف، ه) هسته مرکزی (ب، و)، لبه جنب حاره (ج، ز) سلول هادلی شمالی و جنوبی، (ح) هسته بیشینه امگا در جنب حاره شمالی، (ط) هسته کمینه امگا در اطراف استوا، (ی) هسته بیشینه امگا در جنب حاره جنوبی (۱۹۸۰-۲۰۲۵)

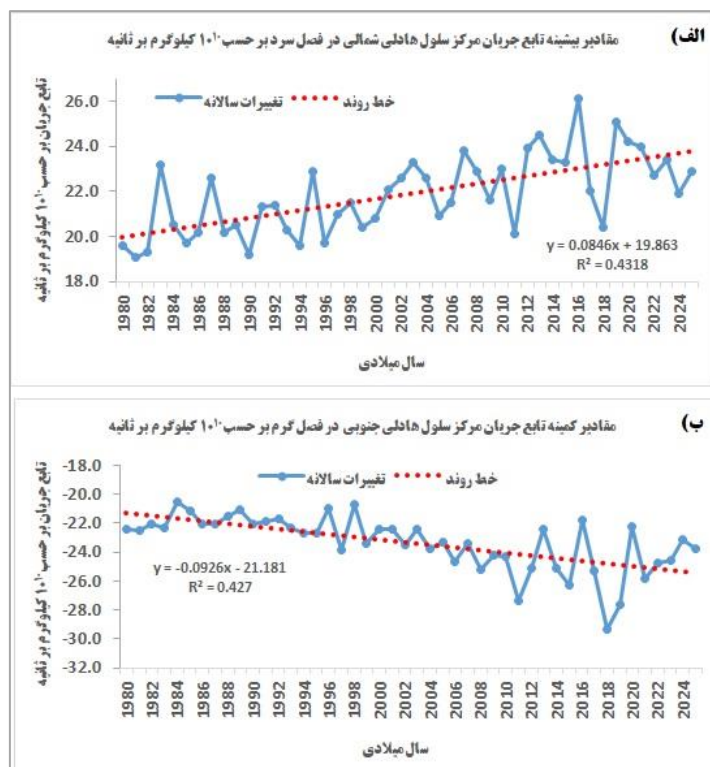
در ادامه تغییرات مقادیر بیشینه و کمینه متوسط تابع جریان جرم نصف‌النهاری در هسته مرکزی سلول هادلی بررسی شد. شکل ۷ تغییرات سالانه تابع جریان جرم نصف‌النهاری در مرکز سلول هادلی در هر دو نیمکره شمالی (شکل ۷-الف) و جنوبی (شکل ۷-ب) را نشان می‌دهد. از این شکل دیده می‌شود که خط روند در نیمکره شمالی، صعودی و در نیمکره جنوبی نزولی است و وجود روند در سطح اطمینان ۹۵ درصد در هر دو مورد، تأیید شده است. ویژگی‌های آماری روند در

جدول ۲ آورده شده است. بر این اساس می‌توان گفت مرکز سلول هادلی در هر دو نیمکره تقویت شده است به طوری که این مرکز، مطابق شیب خط روند در هر ده سال در نیمکره شمالی ۰/۴۷ واحد و در نیمکره جنوبی ۰/۶۲ واحد به ترتیب افزایش و کاهش یافته است. چون روند نزولی شدت هسته جنوبی و روند صعودی شدت هسته شمالی هر دو به معنی افزایش شدت فعالیت سلول هادلی است، از این رو به نظر می‌رسد که در هر دو حالت در منطقه حاره دو نیمکره، به سبب روند افزایش دما، شیو دمایی و در نتیجه همرفت در شاخه استوایی هر دو سلول افزایش یافته و فعالیت هسته سلول نیز افزایش یافته است.

در شکل ۸ تغییرات سالانه مساحت هسته مرکزی سلول هادلی شمالی در فصل سرد (شکل ۸-الف) و سلول هادلی جنوبی در فصل گرم (شکل ۸-ب) و معادله خط روند بر آن‌ها نشان داده شده است. از شکل ۸-الف دیده می‌شود که روند تغییرات سالانه هسته مرکزی سلول هادلی شمالی در فصل سرد صعودی است و از نظر آماری مورد تأیید قرار گرفت. در شکل ۸-ب روند نزولی بر تغییرات هسته مرکزی سلول هادلی جنوبی در فصل گرم آشکار شد که از نظر آماری تأیید شد (جدول ۲). از بررسی شیب خط روند دیده شد که در هر ده سال، مقدار هسته مرکزی سلول هادلی شمالی در فصل سرد ۰/۸۵ واحد افزایش یافته است و طی این مدت هسته مرکزی سلول هادلی جنوبی نیز ۰/۹۳ واحد کاهش یافته است. این بررسی نیز نشان می‌دهد که مرکز سلول هادلی شمالی در فصل سرد نیمکره شمالی و مرکز سلول هادلی جنوبی در فصل گرم (سرد نیمکره جنوبی) تقویت شده است.



شکل ۷. تغییرات سالانه تابع جریان نصف‌النهاری در مرکز سلول هادلی و معادله خط روند در دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۲۵ بر حسب ۱۰<sup>۱۰</sup> کیلوگرم بر ثانیه در (الف) نیمکره شمالی و (ب) نیمکره جنوبی. خط‌چین‌های قرمز خط روند را نشان می‌دهند

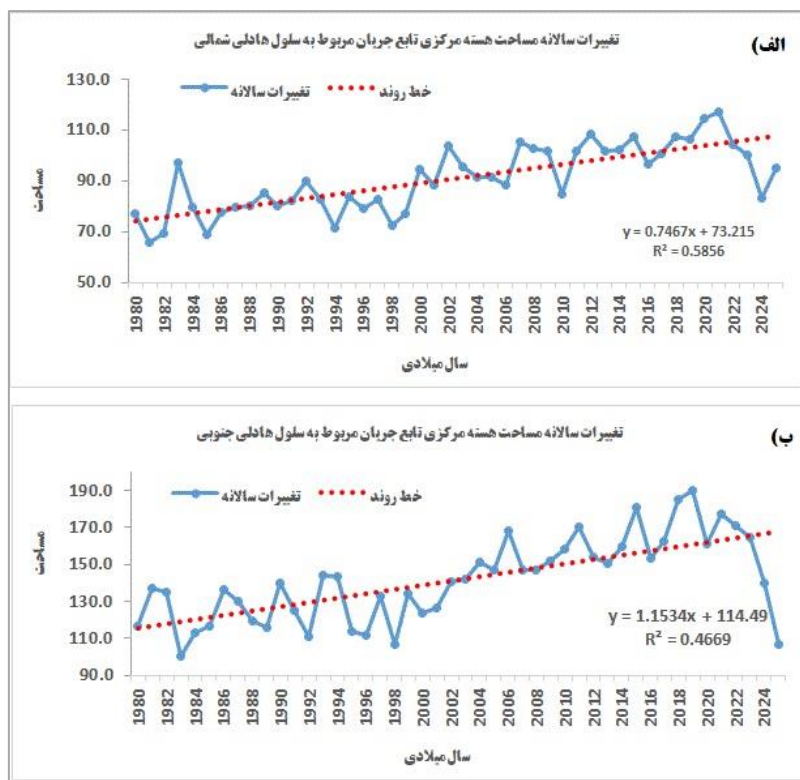


شکل ۸. تغییرات تابع جریان نصف‌النهاری در مرکز سلول هادلی و معادله خط روند در دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۲۵ بر حسب ۱۰۱۰ کیلوگرم بر ثانیه در الف) فصل سرد نیمکره شمالی (DJF) و ب) فصل سرد نیمکره جنوبی (JJA). خط‌چین‌های قرمز خط روند را نشان می‌دهند.

جدول ۲. نتایج آزمون من-کندال برای تأیید یا رد وجود روند در عرض جغرافیایی لبه‌های سلول هادلی و مقادیر هسته مرکزی

بخش‌های مختلف سلول هادلی	نوع روند	شیب سن	P-value	نتیجه آزمون
مقادیر سالانه هسته مرکزی هادلی شمالی	صعودی	+۵/۷۵۱۱۲	۰/۰	تأیید
مقادیر سالانه هسته مرکزی هادلی جنوبی	نزولی	-۶/۱۲۷۲۴	۰/۰	تأیید
هسته مرکزی هادلی شمالی در فصل سرد	صعودی	+۴/۸۶۹۹۸	۰/۰۰۰۰۰۰۶	تأیید
هسته مرکزی هادلی جنوبی در فصل گرم	نزولی	-۴/۸۰۶۸۹	۰/۰۰۰۰۰۰۸	تأیید

در شکل ۹ تغییرات سالانه مساحت هسته مرکزی محدود به خط هم‌مقدار ۵ واحدی (۵- واحدی) نشان داده شده است. از این شکل دیده می‌شود که در هر دو نیمکره روند تغییرات مساحت درون خط هم‌مقدار ۵ و ۵- واحدی صعودی است و روند صعودی در هر دو مورد از نظر آماری با ویژگی‌های آماری که در جدول ۳ آورده شده است، تأیید شد. از معادله شیب خط روند دیده می‌شود که در نیمکره شمالی خط روند با شیب کمتری نسبت شیب خط روند در نیمکره جنوبی افزایش یافته است. بعلاوه از معادله خط روند در شکل‌های ۹-الف و ۹-ب دیده می‌شود که میانگین مساحت زیر منحنی ۵ واحدی در سلول هادلی شمالی ۷۳/۲۱۵ واحد و میانگین مساحت زیر منحنی ۵- واحدی در سلول هادلی جنوبی ۱۱۴/۴۹ واحد است که نسبت مساحت جنوبی به شمالی ۱/۶ برآورد شد. این نشان می‌دهد که در طول دوره آماری انتخابی، سلول هادلی جنوبی مساحت بیشتری (۱/۶ برابر) داشته است. از آنجایی که عرض جغرافیایی لبه‌های سلول هادلی جنوبی و شمالی روند معنی‌داری نشان نداد، از این رو به نظر می‌رسد که سلول هادلی در راستای قائم توسعه یافته است. شایان ذکر است که چون توزیع خشکی و دریا در مناطق مختلف کره زمین یکسان نیست و در این مطالعه از میانگین مداری استفاده شده است، از این رو ممکن است که گسترش قطب سوی لبه‌های سلول هادلی در هر دو نیمکره به‌طور منطقه‌ای معنی‌دار باشد. این موضوع با نتایج این پژوهش منافاتی ندارد.



شکل ۹. تغییرات سالانه مساحت هسته مرکزی سلول هادلی (درجه-سطح) در دوره آماری ۲۰۲۵-۱۹۸۰ در نیمکره الف) شمالی و ب) جنوبی. خطچین‌های قرمز خط روند را نشان می‌دهند.

جدول ۳. نتایج آزمون من-کنندال برای تأیید یا رد وجود روند در مساحت محصور به خط ۵ و ۵- واحدی تابع جریان

کمیت	نوع روند	شیب سن	P-value	نتیجه آزمون
مساحت بیش از ۵ واحد برای سلول هادلی شمالی	صعودی	+۵/۵۸۶۲۱	۰/۰	تأیید
مساحت کمتر از ۵- واحد برای سلول هادلی جنوبی	صعودی	+۵/۳۳۰۸۱	۰/۰	تأیید

## بحث

در این پژوهش با تحلیل میانگین مداری تابع جریان جرم نصف‌النهار، میانگین مداری مؤلفه قائم باد و گرادیان نصف‌النهار تابع جریان، ویژگی‌های سلول هادلی در دو نیمکره شمالی و جنوبی بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات عرض‌های جغرافیایی مربوط به لبه‌های استوایی، جنب حاره و نیز هسته مرکزی سلول هادلی در هر دو نیمکره از روند خاصی پیروی نمی‌کند. این بخش از نتایج با پژوهش‌های حسینی صدیق و همکاران (۱۴۰۰a، ۱۴۰۰b، ۱۴۰۱) و لوکاس<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۲) مقایسه شد و تفاوت‌های بسیاری آشکار شد. حسینی صدیق و همکاران نشان دادند که گسترش لبه بیرونی سلول هادلی نیمکره جنوبی در فصل‌های زمستان و پاییز به اندازه دو تا سه و نیم درجه عرض جغرافیایی افزایش یافته است (۱۵:۱۴۰۰a) و به‌طورکلی، گردش سلول هادلی در هر دو نیمکره، یک تا سه و نیم درجه عرض جغرافیایی (۱:۱۴۰۰b) افزایش یافته است و سلول هادلی به سمت قطب گسترش یافته است. این پژوهشگران همچنین در مقاله "ارتباط گردش هادلی و مؤلفه‌های جوی با خشک‌سالی‌های نیوار ایران" به این نتیجه رسیده‌اند که به‌طورکلی، سلول هادلی از عرض جغرافیایی پایین به عرض جغرافیایی بالاتر گسترش یافته و باعث افزایش مناطق گرمسیری شده است (۶۳:۱۴۰۱). این تفاوت‌ها نمی‌تواند به سبب استفاده از

1. Lucas

داده‌های متفاوت و دوره آماری مختلف ظاهر شده باشد. چنین به نظر می‌رسد که این پژوهشگران لبه بیرونی سلول هادلی را به سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال محدود کرده‌اند. در حالی که این لبه در راستای قائم دست کم می‌تواند هشت سطح فشاری معیار از ۸۵۰ تا ۱۵۰ هکتوپاسکال را در برگیرد که در این پژوهش از آن استفاده شده است.

شایان ذکر است که هوانگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۸:۳۴۴) نیز نشان داده‌اند که تغییرپذیری عرض جغرافیایی سلول هادلی و مکانیسم‌های مرتبط با آن هنوز مشخص نشده است. پژوهش حاضر نیز مانند پژوهش‌های پیشین نشان داد که (Zhang 1-16-2011; Stachnik & Schumacher, 2013:8529-8544; & Wang, 2013) شدت هسته مرکزی هادلی شمالی (جنوبی) دارای روند صعودی (نزولی) است ولی مقدار روند در هر دهه به منبع داده و دوره آماری بکار رفته در پژوهش بستگی دارد. بخشی از تغییرات هسته مرکزی سلول هادلی در هر دو نیمکره ممکن است در اثر برهم‌کنش‌های غیرخطی و پیچیده عوامل مختلف مثل اثر پیچک‌ها در انتقال انرژی و تکانه آشکار شده باشد و بخش دیگر نیز احتمال دارد به سبب تغییرات اقلیمی ناشی از فعالیت‌های بشری رخ داده باشد. تفکیک این دو بخش بسیار دشوار است و در این پژوهش بررسی نشده است.

بررسی‌ها نشان داد که در تابستان هر نیمکره که کمربند همگرایی درون‌حاره‌ای در بالاترین موقعیت خود در نیمکره تابستانی است، شاخه صعودی سلول هادلی در نیمکره تابستانی و شاخه نزولی آن در نیمکره زمستانی قرار می‌گیرد و سلول هادلی ضعیف‌تر در نیمکره تابستانی آشکار می‌شود. این نتیجه در پژوهش لیونلو<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۲۴:۷۱) نیز آورده شده است. بعلاوه در فصل سرد، کمترین (بیشترین) مقدار تابع جریان نصف‌النهاری مربوط به هسته سلول هادلی جنوبی (شمالی) به مقدار ۲۰- (۲۰) واحد برآورد شد که این مقدار بدون توجه به اختلاف منبع داده‌ای و دوره آماری، با نتایج لیونلو و همکاران (۲۰۲۴:۷۱) هماهنگ بود.

نتایج این پژوهش نشان داد که در دوره آماری انتخابی، شدت سلول هادلی جنوبی ۱/۳ برابر سلول هادلی شمالی است. در فصل DJF شدت در سلول هادلی شمالی حدود ۴ برابر سلول هادلی جنوبی است ولی در فصل JJA، شدت سلول هادلی جنوبی حدود ۸ برابر سلول هادلی شمالی برآورد شده است. بعلاوه شدت سلول هادلی شمالی زمستانه حدود ۸ برابر تابستانه است در حالی که سلول هادلی جنوبی زمستانه حدود ۴ برابر تابستانه هست. بنابراین سلول هادلی در زمستان هر نیمکره از سلول هادلی در تابستان آن نیمکره قوی‌تر است. این نتیجه نتایج محلوبو<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۹:۳۱) هماهنگ بود. آن‌ها در دوره آماری ۲۰۱۵-۱۹۸۰ و استفاده از داده‌های ERA-Interim نشان دادند که سلول هادلی در زمستان نیمکره جنوبی قوی‌تر از تابستان آن هست. همچنین میانگین مساحت زیر منحنی ۵ واحدی در سلول هادلی جنوبی حدود ۱/۶ برابر بیشتر از سلول هادلی شمالی است که می‌تواند به سبب بیشتر بودن اختلاف عرض جغرافیایی لبه‌های استوایی و جنب حاره سلول هادلی جنوبی (۲۲/۵ درجه) نسبت به شمالی (۲۰ درجه) باشد. این نتیجه با برخی از نتایج پژوهش آقائی و همکاران (۲۰۲۴:۶۵) هماهنگ است. آن‌ها نشان دادند که در جنوب غرب آسیا، شدت گردش نصف‌النهاری زمستانه ۵ برابر و وسعت آن ۲ برابر نسبت به حالت تابستانه بیشتر است.

1. Huang  
2. Lionello  
3. Mahlobo

## نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات عرض‌های جغرافیایی مربوط به لبه‌های استوایی، جنب حاره و نیز هسته مرکزی سلول هادلی در هر دو نیمکره از روند خاصی پیروی نمی‌کند. درحالی‌که شدت هسته مرکزی هادلی شمالی (جنوبی) دارای روند صعودی (نزولی) است ولی مقدار روند در هر دهه به منبع داده و دوره آماری بکار رفته در پژوهش بستگی دارد. بخشی از تغییرات هسته مرکزی سلول هادلی در هر دو نیمکره ممکن است در اثر برهم‌کنش‌های غیرخطی و پیچیده عوامل مختلف مثل اثر پیچک‌ها در انتقال انرژی و تکانه آشکار شده باشد و بخش دیگر نیز احتمال دارد به سبب تغییرات اقلیمی ناشی از فعالیت‌های بشری رخ داده باشد. تفکیک این دو بخش بسیار دشوار است و در این پژوهش بررسی نشده است.

بررسی‌ها نشان داد که در تابستان هر نیمکره که کمربند همگرایی درون‌حاره‌ای در بالاترین موقعیت خود در نیمکره تابستانی است، شاخه صعودی سلول هادلی در نیمکره تابستانی و شاخه نزولی آن در نیمکره زمستانی قرار می‌گیرد و سلول هادلی ضعیف‌تر در نیمکره تابستانی آشکار می‌شود. بعلاوه دیده شد که سلول هادلی در زمستان هر نیمکره از سلول هادلی در تابستان آن نیمکره قوی‌تر است. همچنین در این دوره آماری میانگین مساحت زیر منحنی ۵ واحدی در سلول هادلی جنوبی حدود ۱/۶ برابر بیشتر از سلول هادلی شمالی است که می‌تواند به سبب بیشتر بودن اختلاف عرض جغرافیایی لبه‌های استوایی و جنب حاره سلول هادلی جنوبی نسبت به شمالی باشد.

در پایان پیشنهاد می‌شود که سایر پژوهشگران با تحلیل منطقه‌ای سلول هادلی و استفاده از منابع داده‌ای با مقیاس افقی ریزتر، نقش اقیانوس آرام و اقیانوس اطلس را در تغییرات فعالیت سلول هادلی شمالی و جنوبی بررسی کرده و نتایج را با نتایج این پژوهش مقایسه نمایند.

## حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

## سهام نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمام مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشتند.

## تضارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

## تقدیر و تشکر

نویسندگان از همه کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به‌ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقاله را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

## منابع

آقائی، مجتبی؛ احمدی‌گیوی، فرهنگ؛ محب‌الحجه، علیرضا و میرزائی، محمد. (۱۴۰۴). نقش یاخته هادلی در گردش کلی جو و شکل‌گیری واچرخند جنب‌حاره‌ای بر روی جنوب غرب آسیا. فیزیک زمین و فضا، ۵۱(۱)، ۶۵-۸۶.

doi: 10.22059/jesphys.2024.371042.1007586.

حسینی صدیق، سیدمحمود؛ جلالی، مسعود و جعفری، تیمور. (۱۴۰۰). تغییرات لبه بیرونی چرخش فصلی سلول هادلی نیمکره

جنوبی در کمربند گرمسیری. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۲(۵)، ۱۵-۲۶. doi: 10.30488/ccr.2020.248931.1024.

- حسینی صدیق، سید محمود و جلالی، مسعود. (۱۴۰۰). بررسی ساختار دینامیکی گردش نصف‌النهاری سلول هادلی در کمربند حاره. *نیوار*، ۱۱۲(۱۵)، ۱-۱۵. doi: 10.30467/NIVAR.2021.237927.1164.
- حسینی صدیق، سید محمود؛ جلالی، مسعود و عساکره، حسین. (۱۴۰۱). ارتباط گردش هادلی و مؤلفه‌های جوی با خشک‌سالی‌های نیوار ایران. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۶(۸۱)، ۶۳-۷۹. doi: 10.22034/gp.2022.47673.2886.
- دریکوند، ثریا؛ نصیری، بهروز؛ قائمی، هوشنگ؛ کرمپور، مصطفی و مرادی، محمد. (۱۴۰۱). تحلیل آماری مؤلفه مداری باد در رخ داد گرمایش ناگهانی پوشش سپهری. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۴(۴)، ۵۳۳-۵۴۸. doi: 10.22059/jphgr.2023.349716.1007726.
- مرادی، محمد. (۱۴۰۲). بررسی آماری ویژگی‌های وردیست در تهران و شیراز در ماه‌های ژانویه و ژوئیه (۲۰۲۲-۲۰۰۰). *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۵(۱)، ۳۹-۵۵. doi: 10.22059/jphgr.2023.354992.1007747.
- مرادی، محمد. (۱۴۰۳). بررسی اثر گرمایش جهانی بر روند گردش‌های وردسپهری در خاورمیانه در دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۶۱. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۶(۳)، ۱-۱۷. doi: 10.22059/jphgr.2024.366330.1007791.

## References

- Aghaie, M., Ahmadi-Givi, F., Mohebalhojeh, A. R. & Mirzaei, M. (2025). The role of the Hadley cell in the general circulation of the atmosphere and the formation of a subtropical anticyclone over Southwest Asia. *Journal of the Earth and Space Physics*, 51(1), 65-86. doi: 10.22059/jesphys.2024.371042.1007586. [in Persian].
- Derikvand, S., Nasiri, B., Ghaemi, H., Karampoor, M., & Moradi, M. (2022). Statistical Analysis of Zonal Wind Component in the Occurrence of Sudden Stratospheric Warming. *Physical Geography Research Quarterly*, 54 (4), 533-548. doi: 10.22059/jphgr.2023.349716.1007726. [in Persian].
- Fu, Q., Johanson, C. M., Wallace, J. M. & Reichler, T. (2006). Enhanced mid-latitude tropospheric warming in satellite measurements. *Science*, 312 (5777), 1179-1179. <https://doi.org/10.1126/science.1125566>.
- Hu, Y. & Fu, Q. (2007). Observed poleward expansion of the Hadley circulation since 1979. *Atmos Chem Phys*, 7, 5229-5236. doi.org/10.5194/acp-7-5229-2007.
- Galanti, E., Raiter, D., Kaspi, Y., & Tziperman, E. (2022). Spatial patterns of the tropical meridional circulation: Drivers and teleconnections. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, 1-15. <https://doi.org/10.1029/2021JD035531>.
- Hartmann, D. L. (2016). Chapter 6 - Atmospheric general circulation and climate. In *Global physical climatology* (2nd ed., pp. 159-193). Elsevier. doi.org/10.1016/b978-0-12-328531-7.00006-2.
- Hess, O., & Chemke, R. (2024). Anthropogenic forcings reverse a simulated multi-century naturally-forced Northern Hemisphere Hadley cell intensification. *Nat. Commun*, 15(1), 1-8. doi:10.1038/s41467-024-48316-y.
- Holton, J. R. (2004). An Introduction to Dynamic Meteorology. Fourth edition, *Elsevier, Academic Press*, 553.
- Holton, J.R. & Hakim, G.J. (2012). An Introduction to Dynamic Meteorology. Fifth edition, *Academic Press*, 552.
- Hosseini Seddigh, S. M., Jalali, M., & Jafarie, T. (2021a). External edge changes of the seasonal carcolation of the southern hemisphere Hadley cell in the tropical belt. *Climate Change Research*, 2(5), 15-26. doi: 10.30488/ccr.2020.248931.1024. [in Persian].
- Hosseini Seddigh, S. M. & Jalali, M. (2021b). Analysis dynamic structure of Hadley Cell circulation in tropical belt. *Journal of The Nivar*, 45(112-113), 1-15. doi: 10.30467/NIVAR.2021.237927.1164. [in Persian].
- Hosseini seddigh, S. M., jalali, M., & Asakereh, H. (2022). Correlation and Regression Hadley Circulation and Atmospheric Components with Atmosphere Droughts in IRAN. *Journal of Geography and Planning*, 26(81), 79-63. doi: 10.22034/gp.2022.47673.2886. [in Persian].
- Hoskins, B. J. & Yang, G.Y. (2023). A global perspective on the upper branch of the Hadley Cell. *Journal of Climate*, 36 (19), 6749-6762. doi: 10.1175/JCLI-D-22-0537.1.

- Huang, R., Chen, S., Chen, W., & Hu, P. (2018). Inter annual variability of regional Hadley circulation intensity over western Pacific during boreal winter and its climatic impact over Asia Australia region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 344–366. doi/abs/10.1002/2017JD027919.
- 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. Am. Meteorol. Soc.*, 77, 437–472. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)
- Kalik, V., Krishnan, R., Ayantika, D.C., Swapna, P., Manmeet, S., Sandeep, N., Vellore, R. & Rao, V.B. (2024). Understanding the response of tropical overturning circulations to greenhouse gas and aerosol forcing. *Environmental Research: Climate*, 3, 1-21. Doi: 10.1088/2752-5295/ad6f3c.
- Kim, D., Kim, H., Kang, S.M. Kang, S.M., Stuecker, M.F. & Merlis, T.M. (2022). Weak Hadley cell intensity changes due to compensating effects of tropical and extratropical radiative forcing. *Npj. Clim. Atmos. Sci.*, 5(61),1-10. doi.org/10.1038/s41612-022-00287-x.
- Li, Y., Xie, S.P., Lian, T., Zhang, G., Feng, J., Ma, J., Peng, Q., Wang, W., Hou, Y. & Li, X. (2023). Interannual variability of regional Hadley circulation and El Niño interaction. *Geophysical Research Letters*, 50, 1-11. doi.org/10.1029/2022GL102016.
- Li, Y., Li, X., Feng, J., Zhou, Y., Wang, W. & Hou, Y. (2024). Uncertainties of ENSO-related Regional Hadley Circulation Anomalies within Eight Reanalysis Datasets. *Adv. Atmos. Sci*, 41, 115–140. doi.org/10.1007/s00376-023-3047-0.
- Lionello, P., D'Agostino, R., Ferreira, D., Nguyen, H. and Singh, M. S. (2024). The Hadley circulation in a changing climate. *Annals of New York Academy of Science*, 1534 (1), 69-93. doi: 10.1111/nyas.15114.
- Lu, J., Vecchi, G.A. & Reichler, T. (2007). Expansion of the Hadley cell under global warming. *Geophysical Research*, 34(6). doi:10.1029/2006GL028443.
- Lucas, C., Rudeval, I., Nguyen, H., Boschat, G & Hope, P. (2022). Variability and changes to the mean meridional circulation in isentropic coordinates. *Climate Dynamics*, 58,257–276. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05903-9>.
- Mahlobo, D.D., Ndarana, T., Grab, S. & Engelbrecht, F. (2019). Integrated climatology and trends in the subtropical Hadley cell, sunshine duration and cloud cover over South Africa. *International Journal of Climatology*, 39 (4), 1805-1821.
- Moradi, M., (2023). A Statistical Analysis of the Tropopause Characteristic over Tehran and Shiraz in January and July (2000-2022). *Physical Geography Research Quarterly*, 55(1), 39-55. doi: 10.22059/jphgr.2023.354992.1007747. [in Persian].
- Moradi, M. (2024). Investigation the Role of Global Warming on the Tropospheric Circulation in the Middle East from 1961 to 2020. *Physical Geography Research Quarterly*, 56 (3), 1-17. doi.org/10.22059/jphgr.2024.366330.1007791. [in Persian].
- Nguyen, H., Lucas, C., Evans, A., Timbal, B. & Hanson, L. (2015). Expansion of the southern hemisphere Hadley cell in response to greenhouse gas forcing. *Journal of Climate*, 28, 8067–8077. doi:10.1175/JCLI-D-15-0139.1.
- Nguyen, H., Hendon, H.H., Lim, E.P. Boschat, G., Maloney, E., & Timbal, B. (2018). Variability of the extent of the Hadley circulation in the southern hemisphere: a regional perspective. *Clim. Dyn.*, 50, 129–142. doi.org/10.1007/s00382-017-3592-2.
- Oort, A. H., & Yienger, J. J. (1996). Observed interannual variability in the Hadley circulation and its connection to ENSO. *Journal of Climate*, 9(11), 2751–2767. doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009<2751:oivith>2.0.co;2
- Stachnik, J. P. & Schumacher, C. (2011). A comparison of the Hadley circulation in modern reanalysis. *J. Geophys. Res.*, 116, D22102. <https://doi.org/10.1029/2011JD016677>.
- Sun, Y., Li, L.Z.X., Ramstein, G., Zhou, T., Tan, N., Kageyama, M & Wang, S. (2019). Regional meridional cells governing the interannual variability of the Hadley circulation in boreal winter. *Clim. Dyn.*, 52, 831–853. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4263-7>.

- Wu, M., Li, C. & Zhang, Z. (2024). Recalibrated projections of the Hadley circulation under global warming. *Environmental Research Letters*, 19(10), 1-10. DOI 10.1088/1748-9326/ad751f.
- Yun, K.S., Timmermann, A. & Stuecker, M. F. (2021). Synchronized spatial shifts of Hadley and Walker circulations. *Earth System Dynamics*, 12(1), 121-132. doi.org/10.5194/esd-12-121-2021.
- Zhang, G., & Wang, Z. (2013). Interannual Variability of the Atlantic Hadley Circulation in Boreal Summer and Its Impacts on Tropical Cyclone Activity. *Journal of Climate*, 26(21), 8529-8544. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00802.1>.
- Zheng, Y., Sun, B., Li, W., Zhou, S., Cay, J., Li, H. & He, S. (2025). Attribution of regional Hadley circulation intensity changes in the Northern Hemisphere. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 18(6), 1-6. doi.org/10.1016/j.aosl.2025.100613.