

Analysis of the role of Hadley Cell in Variability of the Moist Static Energy flux in the Statistical Period of 1980–2025

Moradi, M.¹  | Barati, GH.² 

1. Professor, Department of Synoptic and Dynamic meteorology, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran.
2. Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, University of shahid beheshti, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: moradim36@gmail.com

(Received: 19 May 2026, Revise: 20 Jun 2026, Accepted: 22 Jun 2026, Published online: 21 Mar 2026)

Abstract

The 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 the hemispheres, which descend over the dry subtropics and return equatorward near the surface in the form of trade winds.

In this study we were used 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 temperature, height, specific humidity and meridional wind component, on 8 pressure levels from 1000 to 300 hPa. We first the average moist static energy and the meridional circulation of this quantity were estimate, and then the role of the Hadley cell in the transfer of moist static energy was analyzed.

The results showed that part of the moist static energy that is transferred to different regions by the meridional mean circulation is limited to levels below 700hPa in the cold and warm seasons of both hemispheres, and the values of the moist static energy flux by the Hadley cell in the cold months of the northern and southern hemispheres in the northern and southern tropical regions are positive and negative, respectively, indicating poleward transfer in this part of both hemispheres.

During these months, when the solar declination angle is negative in the winter hemisphere and the belt of intertropical convergence zone (ITCZ) is located in the summer hemisphere, the transfer of moist static energy by the Hadley cell is from the equator of the summer hemisphere to the equator of the winter hemisphere.

In this process, in the Northern Hemisphere winter, the presence of southern currents causes moist static energy to be transferred from the southern tropical regions to the northern tropical regions.

Keywords: Moist static energy, Hadley cell, Poleward energy flux, Mean meridional circulation

Cite this article: Moradi, M and Barati, G . (2026). Analysis of the role of the Hadley Cell in the variability of the moist static energy flux in the statistical period of 1980–2025. Nivar, 50(132-133), 186-199. doi: 10.30467/nivar.2026.582354.1380

E-mail: (1) G_barati@sbu.ac.ir



بررسی نقش گردش هادلی در تغییرات شار انرژی ایستای مرطوب در دوره آماری ۲۰۲۵-۱۹۸۰

محمد مرادی^۱ | غلامرضا براتی^۲

۱. استاد، گروه هواشناسی همدیدی و دینامیکی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران.

۲. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: moradim36@gmail.com

(دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۹، بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱، انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱)

چکیده

سلول هادلی یک سلول همرفتی بزرگ مقیاس است که از یک شاخه صعودی در منطقه استوایی و یک شاخه نزولی در مناطق جنب‌حاره هر دو نیمکره تشکیل شده است و انتقال انرژی، تکانه و رطوبت نسبی بین مناطق گرمسیری استوایی و عرض‌های جغرافیایی بالاتر را در هر دو نیمکره شمالی و جنوبی به عهده دارد. در این پژوهش از داده‌های روزانه دما، ارتفاع، نم‌ویژه و مولفه نصف‌النهاری بردار باد در هشت تراز فشاری استاندارد از ۱۰۰۰ تا ۳۰۰ هکتوپاسکال روی یک شبکه منظم دو بعدی که نیمکره شمالی و جنوبی را در بر می‌گیرد، استفاده شد. این داده‌ها از بایگانی مرکز ملی پیش‌بینی محیطی و پژوهش‌های جوی آمریکا گرفته شد و در دوره آماری ۲۰۲۵-۱۹۸۰، ابتدا میانگین انرژی ایستای مرطوب، محاسبه شد و سپس بخش مربوط به گردش میانگین نصف‌النهاری این کمیت برآورد و نقش سلول هادلی در انتقال انرژی ایستای مرطوب تحلیل گردید.

نتایج نشان داد که بخشی از انرژی ایستای مرطوب که بوسیله گردش میانگین نصف‌النهاری به مناطق مختلف انتقال یافته است، در دو فصل سرد و گرم هر دو نیمکره به ترازهای زیر ۷۰۰ هکتوپاسکال محدود شده است و مقادیر شار انرژی ایستای مرطوب توسط سلول هادلی در ماه‌های سرد دو نیمکره شمالی و جنوبی در مناطق حاره شمالی و جنوبی، به ترتیب مثبت و منفی است و بیانگر انتقال قطب‌سو در این بخش از هر دو نیمکره می‌باشد. در این ماه‌ها که زاویه میل خورشیدی در نیمکره زمستانی منفی است و کمربند همگرایی درون حاره‌ای در نیمکره تابستانی قرار گرفته است، انتقال انرژی ایستای مرطوب توسط سلول هادلی از استوای نیمکره تابستانی به سوی استوای نیمکره زمستانی می‌باشد. در این فرایند، در زمستان نیمکره شمالی وجود جریان‌های جنوبی سبب می‌شود تا انرژی ایستای مرطوب از مناطق حاره جنوبی به مناطق حاره شمالی منتقل گردد.

واژه‌های کلیدی: انرژی ایستای مرطوب، سلول هادلی، شار انرژی قطب‌سو، گردش میانگین نصف‌النهاری

۱. مقدمه

ایجاد می‌شود (لینگ و ایوان، ۲۰۱۶). از آنجایی که این اختلاف دما خیلی بیشتر از ۵۰-۳۰ درجه است که از داده‌های دپدبانی برآورد شده است، چنین بر می‌آید که بخشی از گرمای مناطق گرمسیری بوسیله گردش‌های جوی به ویژه سلول هادلی به مناطق قطبی منتقل می‌شود. گردش هادلی، یکی از مولفه‌های کلیدی سامانه جو زمین است که در مدل

تابش خورشیدی رسیده به زمین، در عرض‌های جغرافیایی گرمسیری بیشتر از مناطق نزدیک قطب است که با فرض سپیدایی^۱ یکسان سطح، در مناطق گرمسیری هفتاد درصد و در مناطق قطبی سی درصد مقدار آن جذب می‌شود و در اثر گرمای تولید شده، اختلاف دمای ۹۷ درجه بین استوا و قطب

¹ Albedo

استناد: مرادی، محمد و براتی، غلامرضا. (۱۴۰۵). بررسی نقش گردش هادلی در تغییرات شار انرژی ایستای مرطوب در دوره آماری ۲۰۲۵-۱۹۸۰. نیوار، ۵۰ (۱۳۲-۱۳۳)،

doi: 10.30467/nivar.2026.582354.1380.۱۹۹-۱۸۶

رایانامه: G_barati@sbu.ac.ir (۱)



بر اساس قانون پایداری انرژی، انرژی کل از مجموع انرژی پتانسیل گرانشی^۳، انرژی جنبشی^۴، گرمای نهان^۵ و گرمای محسوس^۶ بدست می‌آید. در غیاب جمله انرژی جنبشی، انرژی ایستای مرطوب تعریف می‌شود که مجموع انرژی‌های پتانسیل گرانشی، گرمای محسوس و انرژی حاصل از گرمان نهان می‌باشد (هایل و همکاران، ۲۰۱۵؛ هوانگ و همکاران، ۲۰۲۱). انرژی ایستای خشک نیز مجموع انرژی پتانسیل گرانشی و انرژی درونی یا گرمای محسوس تعریف شده است (والس و هوبس، ۲۰۰۶).

انتقال انرژی افقی از طریق میانگین نصف‌النهاری، پیچک‌های گذرا^۷ و پیچک‌های ساکن^۸ انجام می‌شود (پیکسوتو و اوورت، ۱۹۹۲). انتقال انرژی بوسیله پیچک‌ها در عرض‌های جغرافیایی بالاتر از اهمیت بیشتری برخوردار است و در عرض‌های جغرافیایی گرمسیری سهم انتقال میانگین نصف‌النهاری برجسته‌تر می‌شود (هوانگ و همکاران، ۲۰۲۱). پژوهشگران برای برآورد مقدار انتقال انرژی از مناطق گرمسیری به مناطق جنب‌حاره، شار گردش میانگین نصف‌النهاری را مطرح کرده‌اند که حاصلضرب میانگین مداری متوسط زمانی مولفه نصف‌النهاری باد و میانگین مداری متوسط زمانی انرژی ایستای مرطوب است (آدام و همکاران، ۲۰۱۶).

انتقال انرژی قطب سو از مناطق گرمسیری توسط پژوهشگران زیادی بررسی شده است که در زیر بطور کوتاه به چند مورد اخیر اشاره می‌شود.

هایل و همکاران (۲۰۱۵) در بررسی تغییرات شار انرژی نصف‌النهاری منطقه حاره، انتقال انرژی بوسیله گردش نصف‌النهاری میانگین، پیچک‌های گذرا و پیچک‌های ساکن را در ماه‌های مختلف منطقه حاره هر دو نیمکره برآورد کردند و نشان دادند که بیشینه قدرمطلق شار انرژی قطب سو توسط گردش هادلی در زمستان‌های هر دو نیمکره در محدوده ۲۰ درجه جنوبی تا ۲۰ درجه شمالی قرار دارد و

تک سلولی گردش عمومی جو، انتقال انرژی، تکانه و رطوبت بین مناطق گرمسیری استوایی و عرض‌های جغرافیایی نزدیک قطب را در هر دو نیمکره شمالی و جنوبی به عهده دارد (گالانتی و همکاران، ۲۰۲۲). این انتقال نصف‌النهاری برای به تعادل رساندن انرژی و تنظیم الگوهای اقلیمی بسیار مهم و حیاتی می‌باشد (زینگ و همکاران، ۲۰۲۵).

با تعریف مدل سه سلولی گردش عمومی جو، سه سلول هادلی، فرل^۲ و قطبی برای انتقال انرژی به سوی قطب مطرح شد. سلول هادلی یک سلول همرفتی بزرگ مقیاس است که از یک شاخه صعودی در منطقه استوایی و یک شاخه نزولی در مناطق جنب‌حاره هر دو نیمکره تشکیل شده است (لیونلو و همکاران، ۲۰۲۴). 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 جنب‌حاره هر دو نیمکره که موقعیت شاخه نزولی سلول هادلی است، جابجا شده سپس به جو پایین نزول می‌کند (هوتنگ و همکاران، ۲۰۱۸). پژوهشگران زیادی نشان داده‌اند که مناطق گرمسیری در دریافت تابش خورشیدی و ایجاد همرفت عمیق تابستانه، برهمکنش با پیچک‌های جت جنب‌حاره زمستانی و افزایش شار انرژی و تکانه به سوی مناطق جنب‌حاره از مهمترین عوامل موثر تشکیل سلول هادلی می‌باشند (هاسکینز و یانگ، ۲۰۲۳). انرژی مکانیکی یکی از انرژی‌های جوی است که در اثر گردش‌های جوی و حرکت سامانه‌های همدیدی تغییر می‌کند و بر تغییرات وضع هوا و اقلیم تاثیر بیشتری دارد. لورنس با ارائه یک چرخه انرژی که به نام خود او معروف است، اولین تصویر مدرن از انرژی مکانیکی و تبدیل آنها را در جو ارائه کرد (لورنتس، ۱۹۵۵). چرخه انرژی لورنز به طور گسترده در مطالعات جو زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد و در تشخیص فعالیت سامانه‌های هواشناسی و اقلیم‌شناسی نقش موثری دارد.

⁶ Sensible Heat

⁷ Transient Eddies

⁸ Stationary Eddies

² Ferrel

³ Gravitational Potential Energy

⁴ Kinetic Energy

⁵ Latent Heat

آدامز و میتا (۲۰۲۳)، با استفاده از چند مجموعه داده (ERA5, DYNAMO, NSA)، بودجه انرژی ایستای مرطوب در چهار جزیره در منطقه استوایی اقیانوس هند در محدوده صفر تا ۷ درجه شمالی و ۷۳ تا ۸۱ درجه شرقی بررسی کردند. آنها نشان دادند که بادهای افقی ضعیف و کمتر از ۱۰ متر بر ثانیه، شار انرژی جنبشی کوچک و رطوبت زیاد، سه عاملی هستند که در بودجه انرژی ایستای مرطوب نقش مهمی دارند و در مناطق که این شرایط وجود نداشته باشد، مانند مناطقی که تحت تاثیر توفان‌های گرمسیری قوی هستند، بودجه انرژی ایستای مرطوب دقت کمتری خواهد داشت.

در ایران انرژی و تغییرات آن با فعالیت سامانه‌های همدیدی و نیز تغییرات اقلیمی سلول هادلی توسط پژوهشگران زیادی مانند مرادی (۱۳۸۲)، مرادی و براتی (۱۴۰۵) و حسینی صدیق و جلالی (۱۴۰۰) بررسی شده است ولی نقش سلول هادلی در انتقال انرژی ایستای مرطوب مورد توجه قرار نگرفته و همچنان در پرده ابهام باقی مانده است.

در این پژوهش که برای اولین بار در ایران انجام شده است، در دوره آماری ۲۰۲۵-۱۹۸۰، تغییرات عناصر تشکیل دهنده انرژی ایستای مرطوب و شار انرژی نصف‌النهاری که توسط سلول هادلی می‌تواند انجام شود، بررسی شد.

۲. روش پژوهش

برای محاسبه و تحلیل انتقال انرژی ایستای مرطوب، از داده‌های روزانه دما، ارتفاع، نم و ویژه و مولفه نصف‌النهاری بردار باد در هشت تراز فشاری استاندارد از ۱۰۰۰ تا ۳۰۰ هکتوپاسکال روی یک شبکه منظم دو بعدی که نیمکره شمالی و جنوبی را در بر می‌گیرد، استفاده شد. این داده‌ها از بایگانی مرکز ملی پیش‌بینی محیطی و پژوهش‌های جوی آمریکا موسوم به NCEP/NCAR گرفته شد که در قالب‌های مختلف در دسترس است (کالنا و همکاران، ۱۹۹۶). چون گام شبکه‌ای این داده‌ها در راستای افق، دو و نیم درجه است، از این رو در شبکه محدود به هر نیمکره، در روی هر مدار که طول جغرافیایی از صفر تا ۳۵۷/۵ درجه تغییر می‌کند، ۱۴۴

مقدار آن حدود سه پتاوات ($3 \times 10^{15} \text{ kgm}^2\text{s}^{-3}$) است و در سایر ماه‌های سال این مقدار کاهش می‌یابد. آنها همچنین نشان دادند که انتقال انرژی قطب‌سو در بیرون از منطقه حاره بوسیله پیچک‌های گذرا بیشتر از بقیه روش‌ها است بطوری که در پاییز و زمستان عرض‌های میانی هر دو نیمکره، این مقدار از ۵ پتاوات بیشتر می‌شود.

آدام و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از چند مجموعه داده (ECMWF, ERA-Interim) در دوره آماری ۲۰۱۴-۱۹۷۹، تغییرات فصلی و سالانه موقعیت کمربند همگرایی درون حاره‌ای (ITCZ) و شار انرژی ایستای مرطوب توسط روش‌های مختلف انتقال انرژی نصف‌النهاری را برآورد کردند و ضمن تایید نتایج هایل و همکاران (۲۰۱۵) در ارتباط با الگو و مقادیر شار انرژی ایستای مرطوب بوسیله گردش میانگین نصف‌النهاری، پیچک‌های گذرا و پیچک‌های ساکن، نشان دادند که تغییرات موقعیت کمربند همگرایی درون حاره‌ای به تغییرات شار انرژی ایستای مرطوب در مناطق حاره بستگی دارد.

رین کورال و رز (۲۰۱۸) در بررسی کارایی پاسخ سلول هادلی به تغییرات گسترده انتقال گرمای اقیانوسی، ضمن بررسی تغییرات شار انرژی ایستای مرطوب از طریق گردش میانگین نصف‌النهاری و پیچک‌های گذرا، وابستگی بین انتقال انرژی و تکانه و سلول هادلی را مشخص کردند و نشان دادند که پاسخ سلول هادلی به طور ذاتی به الگوی فضایی انتقال گرمای اقیانوسی و مکانیسم‌های دینامیکی بستگی دارد. لیاو و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از مدل WRF، تغییرات انرژی ایستای مرطوب در هنگام فعالیت ابر توفان یوتو (Yutu) که در هفدهام می سال ۲۰۰۷ در غرب اطلس شمالی شکل گرفته بود را بررسی کردند و نشان دادند که تغییرات ستون انرژی ایستای مرطوب با تغییرات شدت توفان یوتو به طور قابل توجهی همبستگی دارد به طوری که افزایش فعالیت توفان با افزایش ناگهانی انرژی ایستای مرطوب همراه است. این پژوهشگران نشان دادند که افزایش شار گرمای نهان و شار گرمای محسوس سطح زیرین سبب افزایش انرژی ایستای مرطوب شده است.

$$[\bar{X}] = \frac{1}{144} \sum_{i=1}^{144} \bar{X}_i$$

(۳)

۴- گردش میانگین نصف‌النهاری بر اساس شار نصف‌النهاری از رابطه $MMC = [\bar{m}][\bar{v}]$ محاسبه شد و سپس سهم سلول هادلی در انتقال نصف‌النهاری انرژی ایستای مرطوب از رابطه زیر برآورد گردید (هایل و همکاران، ۲۰۱۵؛ رین کورال و رز، ۲۰۲۰):

$$F_{HC}(\phi, p) = \frac{2a\pi \cos(\phi)}{g} \int_{P_{Top}}^{P_{Surf}} [\bar{m}][\bar{v}] dp$$

(۴)

در این معادله $F_{HC}(\phi, p)$ شار نصف‌النهاری انرژی ایستای مرطوب (کیلوگرم بر ثانیه)، ϕ عرض جغرافیایی (درجه)، a شعاع متوسط زمین (متر)، g شتاب گرانی (متر بر مجذور ثانیه)، m انرژی ایستای مرطوب برای واحد جرم (ژول بر کیلوگرم) و V مولفه نصف‌النهاری بردار باد (متر بر ثانیه) است. سطح فشاری کف و سقف به ترتیب ۱۰۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال در نظر گرفته شد. شایان توجه است که علامت بار معرف میانگین زمانی هر کمیت در هر عرض جغرافیایی است و از علامت کروه نیز برای مشخص کردن میانگین مداری استفاده شده است. برای مشخص کردن شار قطب سوی انرژی ایستای مرطوب، از $[\bar{v}]_+$ و $[\bar{v}]_-$ استفاده شد. علامت مثبت و منفی بکار رفته به ترتیب در نیمکره شمالی و جنوبی معرف باد قطب سو می‌باشند.

۳. بحث و نتایج

شکل‌های ۱ نیمرخ قائم میانگین مداری متوسط زمانی جمله‌های مختلف انرژی ایستای مرطوب در دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۲۵ را نشان می‌دهد. شکل ۱-الف میانگین مداری متوسط زمانی گرمای نهان را نشان می‌دهد. از این شکل دیده می‌شود که مقادیر بیشینه این کمیت در مناطق نزدیک استوا

نقطه و در روی هر نصف‌النهار که عرض جغرافیایی از استوا تا قطب متغیر است، ۳۷ نقطه در نظر گرفته شد. بنابراین برای هر نیمکره، یک شبکه ۱۴۴×۳۷ نقطه‌ای طراحی شد. روش کار به ترتیب در مراحل زیر آورده شده است:

۱- بر اساس تعریف انرژی ایستای مرطوب، جملات این کمیت در هشت تراز فشاری معیار و سپس برای ماه‌های مختلف سال محاسبه شد (بارپاندا و شاو، ۲۰۱۷؛ هوانگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۲؛ آدامز و میتا، ۲۰۲۳):

$$m = g_0 z + C_p T + L_v q \quad (۱)$$

که در آن $MSE = m$ انرژی ایستای مرطوب، $PE = g_0 z$ انرژی پتانسیل گرانشی، $SE = C_p T$ انرژی درونی یا گرمای محسوس، $LE = L_v q$ گرمای نهان و $DSE = g_0 z + C_p T$ انرژی ایستای خشک می‌باشد. محاسبات برای واحد جرم و بر حسب ژول بر کیلوگرم انجام شده است. شایان ذکر است که $g_0 = 9.81 \text{ ms}^{-2}$ شتاب گرانی مبنا، $C_p = 1005 \text{ JK}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ ثابت ویژه گازها در فشار ثابت، $L_v = 2.25 \times 10^6 \text{ Jkg}^{-1}$ گرمای نهان تبخیر، z ارتفاع ژئوپتانسیل (m)، T دما (K) و q نم ویژه (kgkg^{-1}) می‌باشند.

۲- با استفاده از تعریف میانگین زمانی، ابتدا برای مولفه نصف‌النهاری باد و انرژی ایستای مرطوب میانگین ماهانه در هر سال و سپس میانگین ماهانه در طول دوره آماری ۴۶ ساله، محاسبه شد. این میانگین برای هر کمیت از رابطه زیر بدست آمد (مرادی، ۱۴۰۲):

$$\bar{X} = \frac{1}{46} \sum_{y=1}^{46} X_y \quad (۲)$$

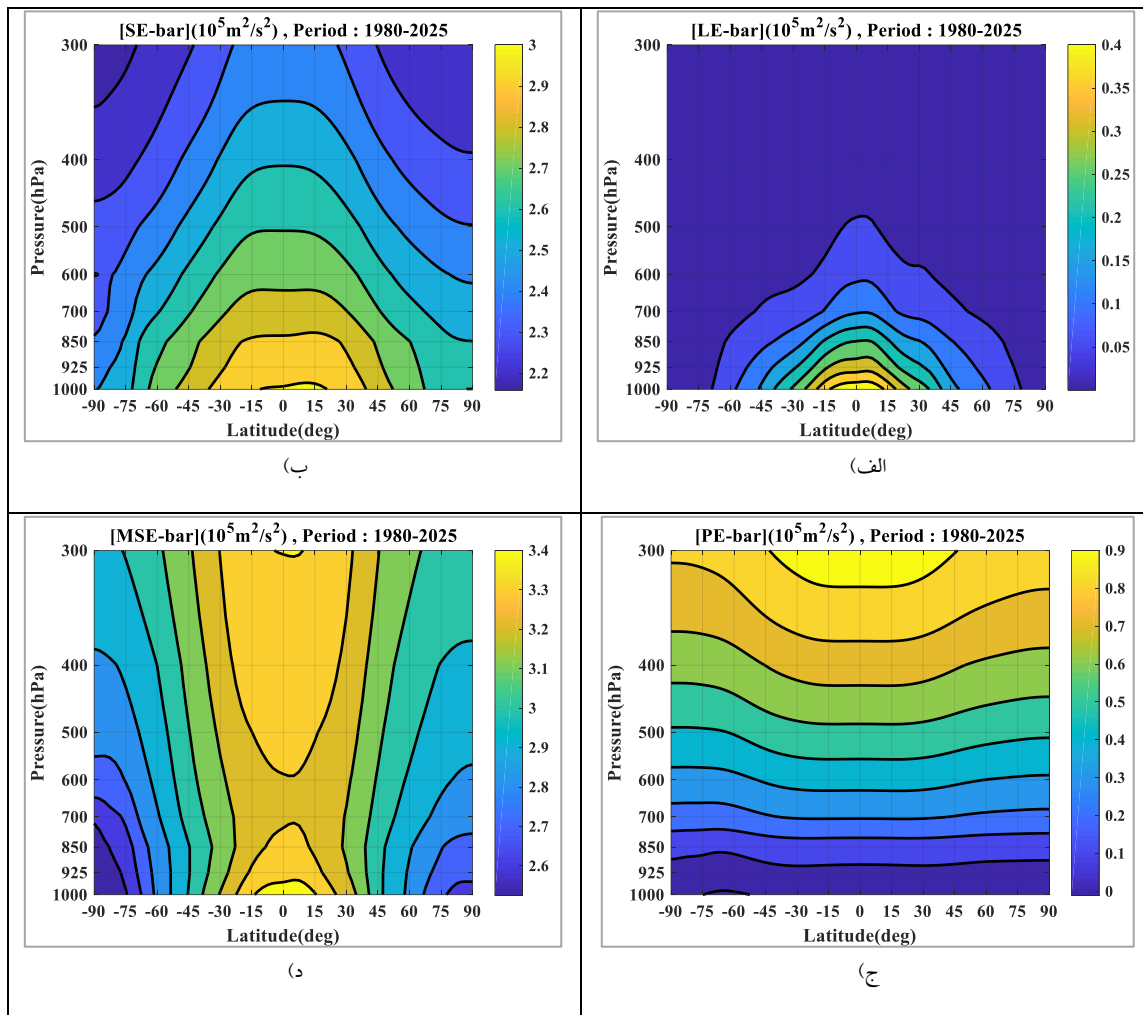
۳- با استفاده از تعریف میانگین مداری، میانگین مداری مولفه نصف‌النهاری باد و انرژی ایستای مرطوب برای هر عرض جغرافیایی از رابطه زیر محاسبه شد (مرادی، ۱۴۰۳):

سبب وابستگی آن به میانگین مداری دما، از الگوی آن تبعیت می‌کند.

شکل ۱-ج میانگین مداری متوسط زمانی انرژی پتانسیل گرانشی را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که مقادیر بیشینه در سطوح فوقانی مناطق حاره و مقادیر کمینه در سطوح زیرین همه مناطق جای گرفته است که علت آن وابستگی انرژی پتانسیل گرانشی به ارتفاع ترازهای فشاری می‌باشد. از مقایسه مقادیر ارائه شده در سه جمله انرژی ایستای مرطوب دیده می‌شود که مقادیر کمتر در الگوی گرمای نهان و مقادیر بیشتر در الگوی گرمای محسوس محاسبه شده است. مقادیر انرژی پتانسیل گرانشی نیز در بین این دو جمله جای گرفته است.

شکل ۱-د میانگین مداری متوسط زمانی انرژی ایستای مرطوب را نشان می‌دهد. از این شکل دیده می‌شود که مقادیر بیشینه آن در ترازهای زیرین و فوقانی مناطق حاره و جنب حاره قرار گرفته است و مقدار آن در این مناطق در بین دو تراز فشاری ۷۰۰ تا ۶۰۰ هکتوپاسکال کمتر می‌باشد. در عرض‌های جغرافیایی میانی و مناطق جنب قطبی هر دو نیمکره نیز مقادیر کمینه این کمیت برآورد شده است. این شکل نشان می‌دهد که در هر تراز فشاری مشخص، در هر دو نیمکره از استوا به قطب مقدار این کمیت کاهش می‌یابد. با وجودیکه انتقال انرژی توسط میانگین نصف‌النهاری، پیچک‌های گذرا و پیچک‌های ساکن انجام شده است ولی مقادیر در قطب و استوا همچنان متفاوتند و اختلاف حدود ۰/۸ واحد می‌باشد.

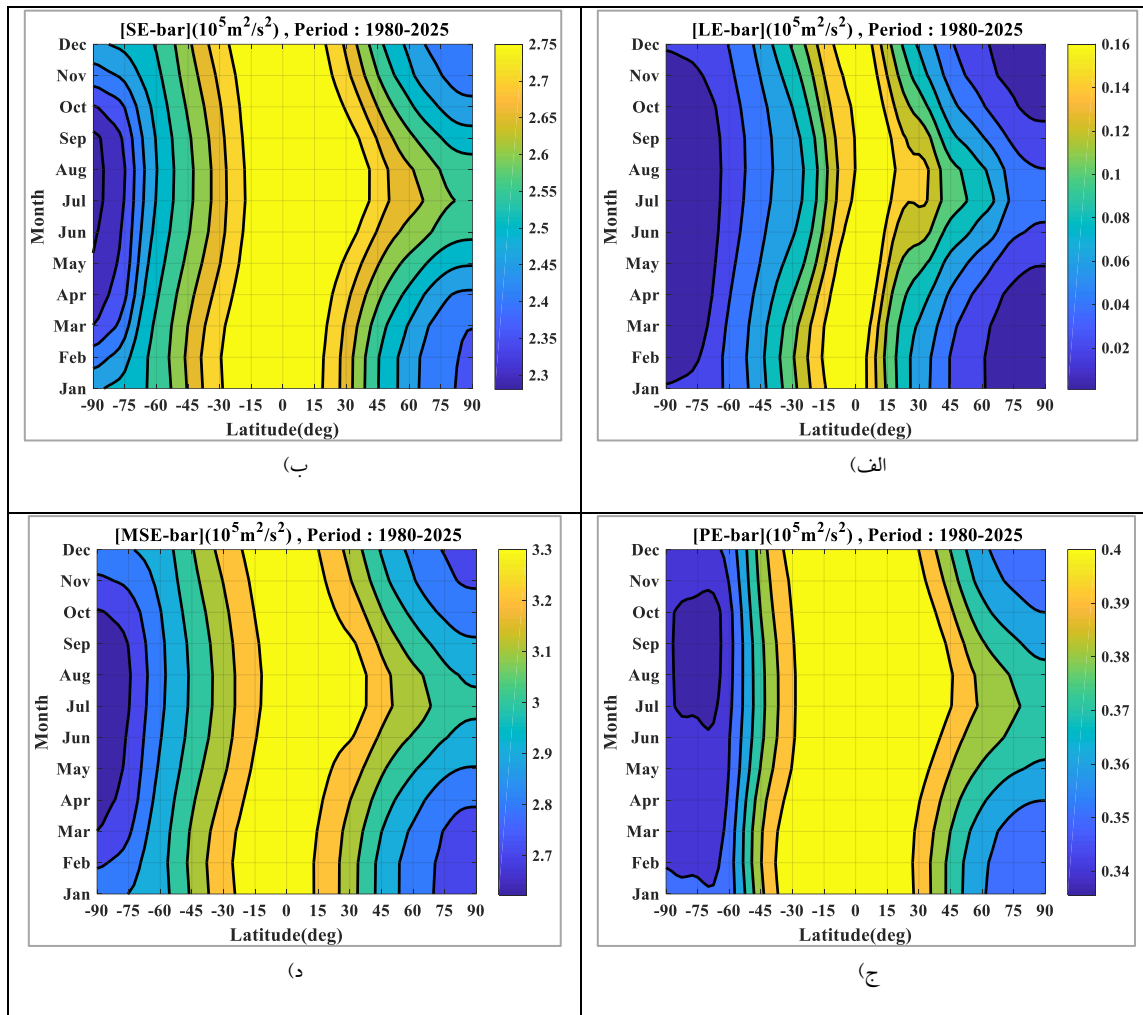
بین دو مدار ۱۵ درجه شمالی تا ۱۵ درجه جنوبی در ترازهای زیرین قرار گرفته است که با افزایش ارتفاع و نیز با افزایش عرض جغرافیایی، این مقدار به سرعت کاهش یافته است به طوری که در بالای تراز ۶۰۰ هکتوپاسکال و نیز در عرض‌های جغرافیایی جنب قطبی این مقدار کمتر از ۰/۱ واحد برآورد شده است. علت کاهش این کمیت با ارتفاع این است که گرمای نهان به طور مستقیم به نم ویژه وابسته است و نم ویژه نیز در ترازهای فشاری زیرین بیشینه است. همچنین تغییرات این کمیت با عرض جغرافیایی را باید در مقدار پوشش اقیانوسی و میزان تبخیر این مناطق جستجو کرد. پژوهشگران نشان داده‌اند که در منطقه محدود به ۲۰ درجه شمالی تا بیست درجه جنوبی که حدود ۷۶ درصد آن پوشش اقیانوسی است، بطور متوسط ۱۳۵۳ میلیمتر در سال تبخیر برآورد شده است که با افزایش عرض جغرافیایی این مقدار به سرعت کاهش یافته است به طوری که میزان آن در محدوده ۸۰ تا ۹۰ درجه شمالی به طور متوسط به ۳۶ میلیمتر در سال و در محدوده ۸۰ تا ۹۰ درجه جنوبی به ۱۲ میلیمتر در سال رسیده است (سلس، ۱۹۶۵؛ پیکسوتو و اوورت، ۱۹۹۲). شکل ۱-ب میانگین مداری متوسط زمانی گرمای محسوس را نشان می‌دهد. از این شکل دیده می‌شود که مقادیر بیشینه در سطوح زیرین مناطق حاره قرار دارد که با افزایش ارتفاع، در ترازهای فشاری بالاتر مقدار آن کاهش یافته است. همچنین مقادیر کمینه این کمیت نیز در سطوح فشاری بالا در مناطق جنب قطبی هر دو نیمکره برآورد شده است که به



شکل ۱: نيمرخ قائم میانگین مداری متوسط زمانی الف) گرمای نهان، ب) گرمای محسوس، ج) انرژی پتانسیل گرانشی، د) انرژی ایستای مرطوب در دوره آماری ۲۰۲۵-۱۹۸۰.

شکل ۲ میانگین مداری متوسط زمانی جمله‌های مختلف انرژی ایستای مرطوب در ماه‌های مختلف دوره آماری ۲۰۲۵-۱۹۸۰ را نشان می‌دهد. از این شکل دیده می‌شود که در همه ماه‌های سال، در مناطق جنب قطبی نیمکره جنوبی، مقادیر همه جمله‌ها به طور پیوسته کمینه است. در مناطق جنب حاره و هر دو نیمکره در همه ماه‌ها نیز مقادیر بیشینه ایجاد شده است که در نیمکره شمالی پشته‌ای از آن در ماه‌های گرم به سوی مناطق جنب قطبی امتداد یافته است. این پشته سبب شده است تا در مناطق جنب قطبی نیمکره شمالی دو هسته کمینه مجزا ایجاد شود که یکی از آنها به ماه‌های

اکتبر، نوامبر و دسامبر و دیگری به ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس مربوط شود (شکل‌های ۲-الف تا ۲-د). در شکل ۲-الف محدوده مربوط به مقادیر بیشینه به منطقه حاره اختصاص دارد در حالی که در شکل ۲-ج این منطقه وسیع‌تر است و مناطق جنب حاره را نیز در بر گرفته است. علت تفاوت این دو شکل در تعریف گرمای نهان و انرژی پتانسیل گرانشی نهفته است که اولی به نم و یخ و دومی به ارتفاع ترازهای فشاری وابسته می‌باشد. مقدار نم و یخ در مناطق حاره بیشتر از مناطق دیگر است و ارتفاع ترازهای فشاری در مناطق حاره و جنب حاره بیشتر از مناطق دیگر دو نیمکره می‌باشد.



شکل ۲: میانگین مداری متوسط زمانی جمله‌های مختلف انرژی ایستای مرطوب در ماه‌های مختلف دوره آماری ۲۰۲۵-۱۹۸۰. الف) گرمای نهان، ب) گرمای محسوس، ج) انرژی پتانسیل گرانشی، د) انرژی ایستای مرطوب.

ایستای مرطوب افزایش یافته است که این افزایش می‌تواند سلول هادلی را دستخوش تغییر کند. روند صعودی بخش زیرین انرژی ایستای مرطوب سبب تقویت همرفت در شاخه استوایی سلول هادلی و روند صعودی سطوح زیرین آن می‌تواند فرونشینی و شار استواسوی شاخه جنب‌حاره آنرا تقویت نماید. بررسی معادله خط روند بر میانگین مداری گرمای نهان نشان داد که شیب خط روند این کمیت در مناطق گرمسیری صعودی است و فقط در ماه ژوئیه عرض جغرافیایی ۱۵ درجه جنوبی مورد تایید قرار نگرفت. این شرایط نشان دهنده روند صعودی بخش زیرین میانگین مداری انرژی ایستای مرطوب می‌باشد. جدول ۲ ویژگی‌های

شایان ذکر است که بررسی تغییرات سالانه میانگین مداری انرژی ایستای مرطوب نشان داد که شیب خط روند در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال در عرض‌های جغرافیایی ۱۵ درجه جنوبی، استوا و ۱۵ درجه شمالی در دو ماه ژانویه و ژوئیه در سطح اطمینان ۹۵ درصد، صعودی است که با آزمون من-کندال تایید شد. ویژگی‌های آماری خط روند در این سطح فشاری در جدول ۱ آورده شده است. در سطح فشاری ۵۰۰ هکتوپاسکال روند صعودی خط روند در استوا در هر دو ماه ژانویه و ژوئیه تایید نشد. بیشترین شیب خط روند در هر دو ماه در استوا و عرض جغرافیایی ۱۵ درجه شمالی برآورد شد. افزایش شیب خط روند در سطح زیرین منطقه حاره نشان می‌دهد که در دوره آماری انتخابی میانگین مداری انرژی

آماري معادله خط روند میانگین مداری گرمای نهان را نشان

می دهد.

جدول ۱: کمیت‌های معادله خط روند بر میانگین مداری انرژی ایستای مرطوب در دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۲۵

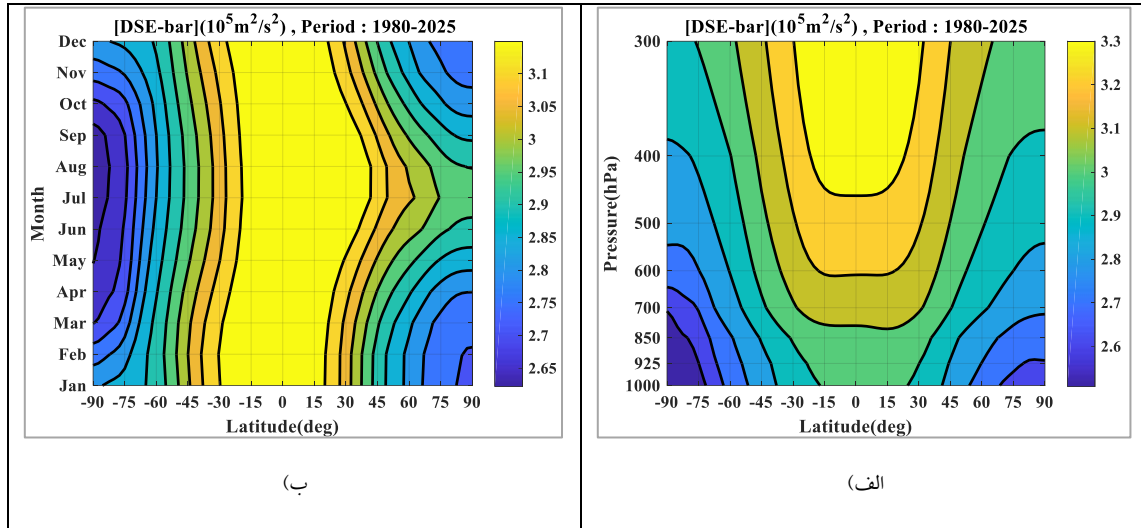
۸۵۰ هکتوپاسکال						سطح فشاری
۱۵ درجه شمالی		صفر درجه		۱۵ درجه جنوبی		منطقه
ژوئیه	ژانویه	ژوئیه	ژانویه	ژوئیه	ژانویه	ماه
						کمیت
+ ۰/۰۴۹	+ ۰/۰۴۶	+ ۰/۰۵۷	+ ۰/۰۵۴	+ ۰/۰۲۵	+ ۰/۰۳۳	شیب خط روند (درجه بر سال)
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۳۰	مقدار P
صعودی	صعودی	صعودی	صعودی	صعودی	صعودی	نوع روند
تایید	تایید	تایید	تایید	تایید	تایید	نتیجه روند

جدول ۲: کمیت‌های معادله خط روند بر میانگین مداری گرمای نهان در دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۲۵

۸۵۰ هکتوپاسکال						سطح فشاری
۱۵ درجه شمالی		صفر درجه		۱۵ درجه جنوبی		منطقه
ژوئیه	ژانویه	ژوئیه	ژانویه	ژوئیه	ژانویه	ماه
						کمیت
+ ۰/۰۳۲۸	+ ۰/۰۳۲۷	+ ۰/۰۳۶	+ ۰/۰۳۱	+ ۰/۰۰۸۵	+ ۰/۰۱۶۳	شیب خط روند (درجه بر سال)
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۹۴	۰/۱۱۲	۰/۰۲۷۵	مقدار P
صعودی	صعودی	صعودی	صعودی	صعودی	صعودی	نوع روند
تایید	تایید	تایید	تایید	رد	تایید	نتیجه روند

پایین عرض‌های جغرافیایی میانی و مناطق جنب قطبی هر دو نیمکره نیز مقادیر کمینه قرار گرفته است. از شکل ۳-ب نیز دیده می‌شود که تغییرات ماهانه انرژی ایستای خشک نیز تقریباً مشابه انرژی ایستای مرطوب (شکل ۲-د) می‌باشد و فقط مقادیر بیشینه و کمینه آن کمتر شده است.

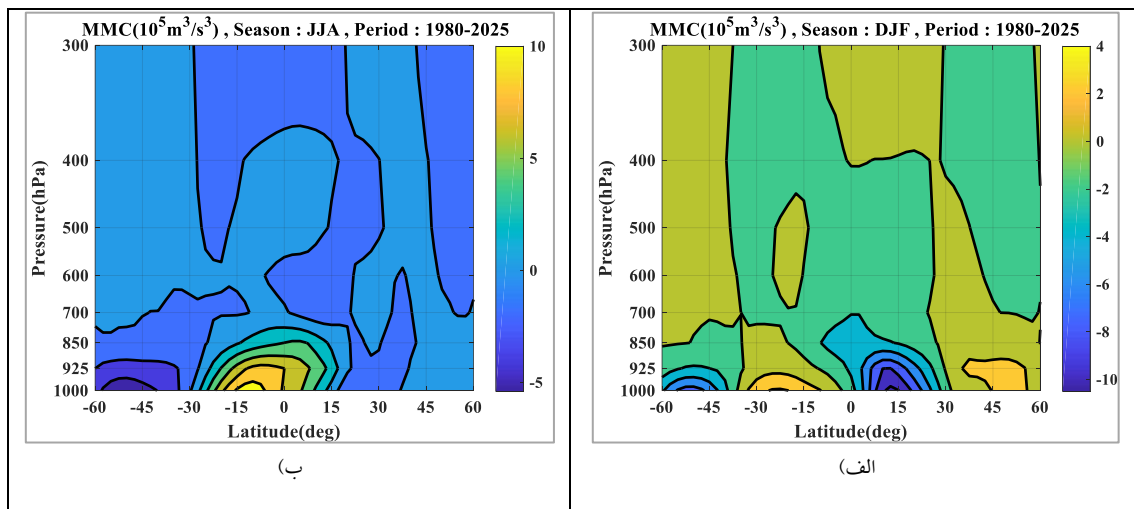
شکل ۳-الف نیمرخ قائم میانگین مداری متوسط زمانی انرژی ایستای خشک را نشان می‌دهد. در شکل ۳-ب نیز میانگین مداری متوسط زمانی این کمیت در ماه‌های مختلف دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۲۵ آورده شده است. از شکل ۳-الف دیده می‌شود که با حذف گرمای نهان همچنان مقادیر بیشینه در ترازهای فوقانی مناطق حاره و جنب‌حاره بیشینه و در ترازهای



شکل ۳: میانگین مداری متوسط زمانی انرژی ایستای خشک در دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۲۵ در الف) ترازهای فشاری معیار و ب) در ماه‌های مختلف سال.

جنب‌حاره نیمکره جنوبی مقادیر این کمیت مثبت برآورد شده است که معرف شار قطب‌سو در نیمکره جنوبی می‌باشد. در فصل گرم نیمکره شمالی (شکل ۴-ب)، مقادیر مثبت در مناطق جنب‌حاره هر دو نیمکره معرف شار شمال‌سو می‌باشد. این مقادیر بخشی از انرژی ایستای مرطوب است که بوسیله گردش میانگین نصف‌النهاری به مناطق مختلف انتقال یافته است.

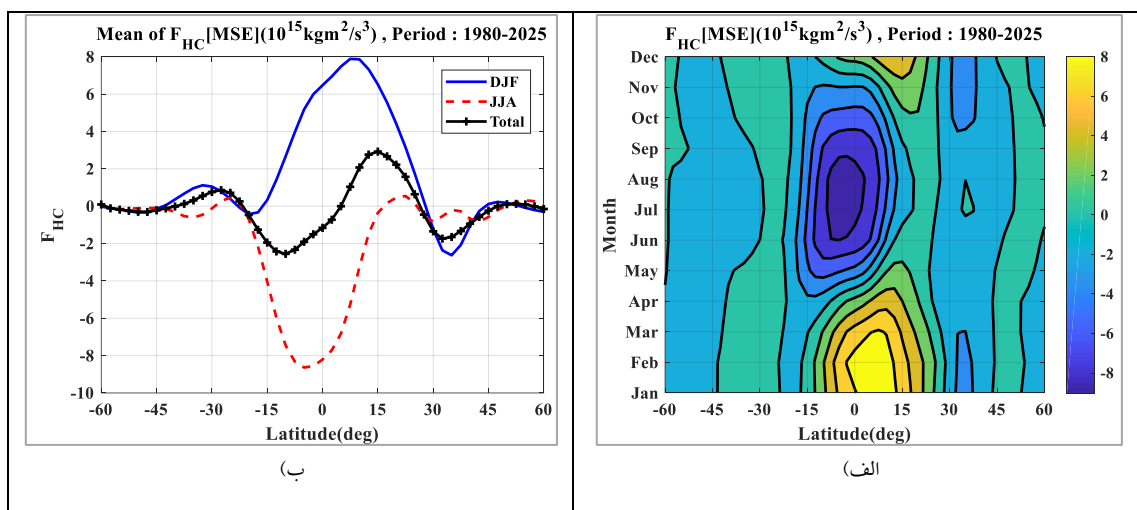
شکل ۴ نیمرخ قائم گردش میانگین نصف‌النهاری در فصل سرد و گرم نیمکره شمالی در دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۲۵ را نشان می‌دهد. از شکل ۴ دیده می‌شود که گردش میانگین نصف‌النهاری در هر دو فصل به ترازهای زیر ۷۰۰ هکتوپاسکال در هر دو نیمکره محدود شده است. در فصل سرد نیمکره شمالی (شکل ۴-الف)، مقادیر منفی این کمیت که معرف شار استوا سو است، در محدوده مناطق حاره و جنب‌حاره قرار گرفته است. در این فصل در مناطق حاره و



شکل ۴: نیمرخ قائم گردش میانگین نصف‌النهاری در دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۲۵ در فصل‌های الف) و ب) JJA.

شکل ۵-ب، نشان می‌دهد که در حالت کلی مقدار انرژی ایستای مرطوب که توسط سلول هادلی انتقال یافته است را نشان می‌دهد. تغییرات ماهانه این کمیت در ماه‌های مختلف سال در شکل ۵-الف و تغییرات فصلی (فصل‌های DJF و JJA) و کلی آن در شکل ۵-ب آورده شده است. شکل ۵-الف نشان می‌دهد که مقادیر شار انرژی ایستای مرطوب توسط سلول هادلی در ماه‌های سرد دو نیمکره شمالی و جنوبی در مناطق حاره شمالی و جنوبی، به ترتیب مثبت و منفی است و بیانگر انتقال قطب‌سو در این بخش از هر دو نیمکره می‌باشد. در این ماه‌ها که زاویه میل خورشیدی در نیمکره زمستانی منفی است و کمربند همگرایی درون حاره‌ای در نیمکره تابستانی قرار گرفته است، انتقال انرژی ایستای مرطوب توسط سلول هادلی از استوای نیمکره تابستانی به سوی استوای نیمکره زمستانی می‌باشد. در این فرایند، در زمستان نیمکره شمالی که $[\overline{m}][\overline{v}] > 0$ ، وجود جریان‌های جنوبی ($[\overline{v}] > 0$) سبب می‌شود تا انرژی ایستای مرطوب از مناطق حاره جنوبی به مناطق حاره شمالی منتقل گردد. به طریق مشابه، در زمستان نیمکره جنوبی نیز که $[\overline{m}][\overline{v}] < 0$ ، وجود جریان‌های شمالی ($[\overline{v}] < 0$) سبب انتقال انرژی ایستای مرطوب از مناطق حاره شمالی به مناطق حاره جنوبی می‌شود.

شکل ۵-ب، نشان می‌دهد که در حالت کلی مقدار انرژی ایستای مرطوب که توسط سلول هادلی انتقال یافته است را نشان می‌دهد. تغییرات ماهانه این کمیت در ماه‌های مختلف سال در شکل ۵-الف و تغییرات فصلی (فصل‌های DJF و JJA) و کلی آن در شکل ۵-ب آورده شده است. شکل ۵-الف نشان می‌دهد که مقادیر شار انرژی ایستای مرطوب توسط سلول هادلی در ماه‌های سرد دو نیمکره شمالی و جنوبی در مناطق حاره شمالی و جنوبی، به ترتیب مثبت و منفی است و بیانگر انتقال قطب‌سو در این بخش از هر دو نیمکره می‌باشد. در این ماه‌ها که زاویه میل خورشیدی در نیمکره زمستانی منفی است و کمربند همگرایی درون حاره‌ای در نیمکره تابستانی قرار گرفته است، انتقال انرژی ایستای مرطوب توسط سلول هادلی از استوای نیمکره تابستانی به سوی استوای نیمکره زمستانی می‌باشد. در این فرایند، در زمستان نیمکره شمالی که $[\overline{m}][\overline{v}] > 0$ ، وجود جریان‌های جنوبی ($[\overline{v}] > 0$) سبب می‌شود تا انرژی ایستای مرطوب از مناطق حاره جنوبی به مناطق حاره شمالی منتقل گردد. به طریق مشابه، در زمستان نیمکره جنوبی نیز که $[\overline{m}][\overline{v}] < 0$ ، وجود جریان‌های شمالی ($[\overline{v}] < 0$) سبب انتقال انرژی ایستای مرطوب از مناطق حاره شمالی به مناطق حاره جنوبی می‌شود.



شکل ۵: میانگین مداری شار انرژی ایستای مرطوب (شکل الف) در ماه‌های مختلف سال و تغییرات آن (شکل ب) در فصل‌های DJF و JJA در دوره آماری ۲۰۲۵-۱۹۸۰.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش برای بررسی میانگین مداری انرژی ایستای مرطوب و سهم سلول هادلی در انتقال آن به مناطق جنب‌حاره دو نیمکره شمالی و جنوبی، از داده‌های روزانه ارتفاع، دما، نم و یژه و مولفه نصف‌النهاری بردار باد در هشت تراز فشاری استاندارد با کف و سقف به ترتیب ۱۰۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال در یک شبکه منظم دو بعدی که نیمکره شمالی و جنوبی را پوشش می‌دهد، در دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۲۵ استفاده و میانگین مداری انرژی ایستای مرطوب برآورد شد. سقف ۳۰۰ هکتوپاسکال به این دلیل انتخاب شد که داده‌های در دسترس نم‌ویژه فقط تا این سطح فشاری برآورد شده است. بررسی‌ها نشان داد که مقادیر بیشینه میانگین مداری انرژی حاصل از گرمای نهان و گرمای محسوس در سطوح زیرین مناطق حاره هر دو نیمکره قرار داشت که با افزایش ارتفاع مقدار آنها کاهش یافته است در حالیکه مقادیر میانگین مداری انرژی پتانسیل گرانشی و انرژی ایستای خشک در سطوح زیرین مناطق حاره بیشتر می‌باشد. علت کاهش انرژی حاصل از گرمای نهان و گرمای محسوس با ارتفاع را می‌توان به وابستگی اولی به نم‌ویژه و دومی به دمای سطح دانست که هر دو به شدت با افزایش ارتفاع، کاهش می‌یابند در حالیکه انرژی پتانسیل گرانشی و انرژی ایستای خشک هر دو به ارتفاع ژئوپتانسیل سطوح فشاری وابسته هستند و هر چه ارتفاع افزایش یابد، این دو کمیت نیز افزایش می‌یابند. بنابراین مقادیر بیشینه میانگین مداری انرژی ایستای مرطوب که ترکیبی از جملات فوق است، در دو سطح زیرین و زیرین مناطق جنب‌حاره برآورد شده است. بعلاوه دیده شد که میانگین مداری کمیت‌های فوق با افزایش عرض جغرافیایی کاهش می‌یابند که علت آن را می‌توان به وابستگی آنها به مقدار پوشش اقیانوسی و میزان تبخیر از اقیانوس‌ها نسبت داد. واکاوی میانگین مداری انرژی ایستای مرطوب در ماه‌های مختلف دوره آماری نشان داد که در مناطق جنب‌حاره و حاره هر دو نیمکره در همه ماه‌ها، مقادیر بیشینه قرار گرفته است که در نیمکره شمالی پشته‌ای از آن در ماه‌های گرم به سوی مناطق جنب‌قطبی امتداد یافته است و سبب شده است تا در

مناطق جنب‌قطبی نیمکره شمالی دو هسته کمینه مجزا ایجاد شود که یکی از آنها به ماه‌های اکتبر، نوامبر و دسامبر و دیگری به ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس مربوط شود. در مناطق جنب‌قطبی نیمکره جنوبی نیز مقادیر طور پیوسته کمینه می‌باشد. علت اختلاف در مناطق جنب‌قطبی دو نیمکره در ماه‌های مختلف سال را می‌توان به دریافت کمتر انرژی خورشید در این مناطق نیمکره جنوبی دانست که سبب کاهش انرژی پتانسیلی گرانشی و انرژی حاصل از گرمای محسوس در این منطقه شده است.

بررسی روند تغییرات سالانه میانگین مداری انرژی ایستای مرطوب نشان داد که شیب خط روند در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال در عرض‌های جغرافیایی ۱۵ درجه جنوبی، استوا و ۱۵ درجه شمالی در دو ماه ژانویه و ژوئیه در سطح اطمینان ۹۵ درصد، صعودی است که با آزمون من-کندال تایید شد. علت وجود روند صعودی این کمیت را می‌توان به گرمایش جهانی نسبت داد که علاوه بر افزایش گرمای نهان و محسوس، سبب توسعه لایه‌های جو و افزایش ارتفاع آنها شده است. بیشترین شیب خط روند در هر دو ماه در استوا و عرض جغرافیایی ۱۵ درجه شمالی برآورد شد. افزایش شیب خط روند در سطح زیرین منطقه حاره نشان می‌دهد که در دوره آماری انتخابی میانگین مداری انرژی ایستای مرطوب افزایش یافته است که این افزایش را می‌تواند سلول هادلی را دستخوش تغییر کند. روند صعودی بخش زیرین انرژی ایستای مرطوب سبب تقویت همرفت در شاخه استوایی سلول هادلی و روند صعودی سطوح زیرین آن می‌تواند فرونشینی و شار استواسوی شاخه جنب‌حاره آنرا تقویت نماید.

از تحلیل نیمرخ قائم گردش میانگین نصف‌النهاری در دو فصل سرد و گرم که به ترازهای زیر ۷۰۰ هکتوپاسکال در هر دو نیمکره محدود شده است، دیده شد که در فصل سرد نیمکره شمالی، مقادیر منفی این کمیت، در محدوده مناطق حاره و جنب‌حاره قرار گرفته است. در این فصل در مناطق حاره و جنب‌حاره نیمکره جنوبی مقادیر این کمیت مثبت برآورد شده است. در فصل گرم نیمکره شمالی، مقادیر مثبت در مناطق جنب‌حاره هر دو نیمکره می‌باشد. این مقادیر بخشی

- energy flux change. *J. Climate*, 28, 1725–1742, doi:10.1175/JCLI-D-14-00165.1.
6. Hosseini Seddigh, S.M., & Jalali, M. (2021). Analysis dynamic structure of Hadley Cell circulation in tropical belt. *Journal of The Nivar*, 45(112-113), 1-15 [in Persian]. doi: 10.30467/NIVAR.2021.237927.1164
 7. Hoskins, B.J., and 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.
 8. Huang, R., Chen, S., Chen, W., and 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: 10.1002/2017JD027919.
 9. Hwang, Y.T., Teseng, H.Y., Li, K.C., Jang, S.M., Chen, Y.J., and Chiang, J.C.H. (2021). Relative Roles of Energy and Momentum Fluxes in the Tropical Response to Extratropical Thermal Forcing. *Journal of climate*, 34, 3771-3786. doi: 10.1175/JCLI-D-20-0151.1.
 10. 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., and Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 77, 437–472. doi: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
 11. Laing, A., and Evans, J.L. (2016). An introduction to tropical meteorology. 2nd edition.
 12. 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.
 13. Liao, X., Li, T., and Ma, C. (2022). Moist Static Energy and Secondary Circulation Evolution Characteristics during the Rapid Intensification of Super Typhoon Yutu (2007). *Atmosphere* 2022, 13, 1105. doi: 10.3390/atmos13071105.
 14. Lorenz, E.N. (1955). Available potential energy and the maintenance of the general

از انرژی ایستای مرطوب است که بوسیله گردش میانگین نصف‌النهاری به مناطق مختلف انتقال یافته است. بررسی مقادیر شار انرژی ایستای مرطوب توسط سلول هادلی در ماه‌های سرد دو نیمکره شمالی و جنوبی در مناطق حاره شمالی و جنوبی، به ترتیب مثبت و منفی است و بیانگر انتقال قطب‌سو در این بخش از هر دو نیمکره می‌باشد. در این ماه‌ها که زاویه میل خورشیدی در نیمکره زمستانی منفی است و کمربند همگرایی درون حاره‌ای در نیمکره تابستانی قرار گرفته است، انتقال انرژی ایستای مرطوب توسط سلول هادلی از استوای نیمکره تابستانی به سوی استوای نیمکره زمستانی می‌باشد. در این فرایند، در زمستان نیمکره شمالی وجود جریان‌های جنوبی سبب می‌شود تا انرژی ایستای مرطوب از مناطق حاره جنوبی به مناطق حاره شمالی منتقل گردد. به طریق مشابه، در زمستان نیمکره جنوبی وجود جریان‌های شمالی سبب انتقال انرژی ایستای مرطوب از مناطق حاره شمالی به مناطق حاره جنوبی می‌شود. شایان ذکر است که شکل‌های ارائه شده نیز از نتایج این تحقیق به شمار می‌رود.

منابع

1. Adam, O., Bischoff, T., and Schneider, T. (2016). Seasonal and interannual variations of the energy flux equator and ITCZ. Part I: Zonally averaged ITCZ position. *J. Climate*, 29, 3219–3230, doi: 10.1175/JCLI-D-15-0512.1.
2. Adames, A.F., and Mayta, V.C. (2023). On the Accuracy of the Moist Static Energy Budget When Applied to Large-Scale Tropical Motions. *Journal of the atmospheric science*, 80, 2365-2376. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0512.1.
3. Barpanda, P., and Shaw, T. (2017). Using the moist static energy budget to understand storm-track shifts across a range of time scales. *J. Atmos. Sci.*, 74, 2427–2446. doi:10.1175/JAS-D-17-0022.1.
4. Galanti, E., Raiter, D., Kaspi, Y., and Tziperman, E. (2022). Spatial patterns of the tropical meridional circulation: Drivers and teleconnections. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127,1-15. Doi: 10.1029/2021JD035531.
5. Hill, S.A., Ming, Y., and Held, I.M. (2015). Mechanisms of forced tropical meridional

19. Peixoto, J. P., and Oort, A. H. (1992). *Physics of Climate*. American Institute of Physics: New York.
20. Rencurrel, M. C., and Rose, B.E.J. (2018). The Efficiency of the Hadley Cell Response to Wide Variations in Ocean Heat Transport *Journal of Climate*, 33, 1643–1658. doi: 10.1175/JCLI-D-17-0856.1.
21. Sellers, W.D. 1965: *Physical climatology*. Chicago: University of Chicago Press, 272 pp.
22. Wallace, J.M., and Hobbs, P.V. (2006). *Atmospheric Science, An Introductory Survey, Second Edition*, University of Washington, Academic Press is an imprint of Elsevier, pp 505.
23. Zheng, Y., Sun, B., Li, W., Zhou, S., Cay, J., Li, H., and He, S. (2025). Attribution of regional Hadley circulation intensity changes in the Northern Hemisphere. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 18(6), 1-6. doi: 10.1016/j.aosl.2025.100613.
- circulation. *Tellus*, 7, 157–167. doi: 10.3402/tellusa.v7i2.8796.
15. Moradi, M. (2003). Energy calculation in a case study. 03rd Conference of Numerical Weather Prediction, Iran, Tehran, 15 December 2003, [in Persian]. <https://civilica.com/doc/10386/>.
16. 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. [in Persian]. doi: 10.22059/jphgr.2023.354992.1007747.
17. 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. [in Persian]. doi: 10.22059/jphgr.2024.366330.1007791.
18. Moradi, M., and Barati, G. (2026). Analysis of annual and seasonal variability of the Hadley cell in 1980-2025. *Physical Geography Research*, 58(1), 101-118, [in Persian]. doi: 0.22059/jphgr.2026.411156.1007919.