نشریه علمی جغرافیا و برنامه‌ریزی، سال ۲۶، شماره ۸۱، فصل پاییز، سال۱۴۰۱، صفحات ۷۹-۶۳

تاریخ دریافت:۱۴۰۰/۰۶/۰۷ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۰۴/۰۹

ارتباط گردش هدلی و مولفه‌های جوی با خشکسالی‌های نیوار ایران

سید محمود حسینی صدیق[۱]
مسعود جلالی [۲]
حسین عساکره [۳]

چکیده

سلول هدلی به دلیل افزایش گازهای گلخانه ای در حال گسترش به عرض‌های جغرافیایی بالاتر است در نتیجه به افزایش فراوانی خشکسالی در مناطق نیمه گرمسیری منجر شده است. بـه منظـور ارتباط گردش هدلی و مولفه‌های جوی با خشکسالی‌های نیوار ایران از داده‌های بازتحلیل پیش‌بینی میان مدت هواسپهر نسخه (ERA5) با تفکیک مکانی ۰/۲۵×۰/۲۵ و همچنین داده ناهنجاری‌های وزنی بارش استاندارد شده (WASP) از دانشگاه کلمبیا با تفکیک مکانی ۰/۵×۰/۵ در بازه زمانی ۴۰ ساله (۲۰۱۸-۱۹۷۹) استفاده شده است. در این مطالعه، جهت تحلیل نقشه همبستگی و رگرسیون گردش هدلی با جت نیمه گرمسیری، فشار سطح زمین، تابش موج بلند خروجی زمین، رطوبت نسبی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، بارش و داده‌های ناهنجاری‌های وزنی بارش استاندارد شده استفاده شده است. نتایج مطالعه نشان داد رابطه سلول هدلی و جت نیمه‌گرمسیری بر نیوار ایران در تـراز ۲۰۰ هکتوپاسکال همبسـتگی مثبـتی با مقدار ۰/۴ – ۰/۷ تا ۳۵ درجه عرض جغرافیایی را دارد و همچنین تحلیل رگرسیون نشان داد که در عرض‌های جغرافیایی بین ۱۵ تا ۳۵ درجه شمالی جت نیمه‌گرمسیری (m/s) ۱ بیشتر از حالت نرمال است، البته در سال ۲۰۱۷ تا عرض‌های جغرافیایی ۳۰ درجه شمالی ۲ متر در ثانیه افزایش را نشان داد که بر میزان بارش اثر منفی داشته است. رابطه سلول هدلی با تابش موج بلند خروجی زمین در مناطق جنوبی، جنوب‌غربی و جنوب‌شرقی ایران با مقدار ۰/۴ و ارتفاعات زاگرس و شمال‌غرب ایران با مقدار ۰/۷ و رگرسیون با مقدار (w/m^2) ۰/۰۱ بیشتر از حالت نرمال نشان داد که به عنوان یک منبع گرمای محسوس در وردسپهر میانی عمل نموده و گرما مستقیماً به وردسپهر میانی اضافه شده و موجب گرمایش نیمه فوقانی وردسپهر شده است که رابطه سلول هدلی و رطوبت نسبی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در اکثر مناطق ایران به میزان ۰/۴ و مقدار رگرسیون ۲ تا ۱ را نشان داده است. رطوبت نسبی پایین همراه با توده خشک شده هوا در زیر مناطق شاخه نزولی سلول هدلی قرار دارد که شرایط خشکی را حاکم کرده است که شاخص ناهنجاریهای بارش در عرض‌های پایین تر از ۳۵ درجه در مناطق جنوبی، جنوب غرب و جنوب شرقی ایران همبستگی منفی (۰/۷-) را نشان داد که شرایط عدم بارش و خشکسالی را ایجاد می کند.

واژگان کلیدی: همبستگی و رگرسیون زمانی، سلول هدلی، مولفه‌های جوی، خشکسالی، ایران.

مقدمه

گردش هدلی یک عنصر اساسی در سامانه آب و هوایی است (Hartman, 1994) که انرژی حرارتی و رطوبت را از منطقه کمربند حاره به مناطق عرض‌های میانه انتقال می‌دهد (Trenberth et al, 2003)؛ و معمولاً به عنوان میانگین منطقه‌ای گردش

[۱]. دانشجو دکترا آب و هواشناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران(نویسنده مسئول)
Email : seyedmahmoudhoseiny@gmail.com–Tel: 09901623911

[۲]. استادیار اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
[۳]. استاد اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

نصف‌النهاری (ZAHC[1]) در منطقه حاره تعریف می‌شود (Hartmann, 2016)؛ از آنجا که خشکی، اقیانوس و توپوگرافی به طور مساوی توزیع نشده‌اند، میانگین منطقه‌ای نصف‌النهاری ممکن است تنوع منطقه‌ای را به خوبی در نیمکره شمالی نشان ندهد (Ruping et al,2018). در بررسی تغییرات منطقه‌ای میانگین گردش سالانه سلول هدلی در دهه‌های اخیر هفت ناحیه را انتخاب و مشخص کرده‌اند، میانگین منطقه‌ای سلول هدلی به صورت دو سلول ظاهر می‌شود که اولی با حرکت صعودی در مناطق حاره عمدتا بین خط استوا و ۱۰ درجه شمالی است که شاخه صعودی آن منطقه همگرایی بین حاره ای (ITCZ) را تشکیل می‌دهد و با رعد و برق‌های شدید در مناطق حاره همراه است، و شاخه نزولی آن در نیمه گرمسیری در حدود ۳۰ تا ۴۰ درجه شمالی و جنوبی واقع شده است؛ و دومی گردش سلول فرل در هر دو نیمکره است (Xian et al, 2021). مناطق سلول‌های هدلی عبارتند از: آفریقا (۱۰° E–۴۰° E)؛ اقیانوس هند (۱۰۰° E– ۶۰E°)؛ غرب اقیانوس آرام (۱۱۰° E–۱۶۰° E)؛ شرق اقیانوس آرام (۱۱۰° W–۱۵۰° W)؛ آمریکای جنوبی (۴۵° W–۸۰° W) و اقیانوس اطلس (۱۰° W–۴۰° W). در مناطق حاره این هفت منطقه، حرکت رو به بالا و بارش زیاد و در مناطق نیمه گرمسیری آن حرکات نزولی و کمبود بارش اتفاق می‌افتد. این بدان معناست که فعال‌ترین سلول‌های هدلی منطقه‌ای در سراسر جهان در این مناطق واقع شده است. همچنین این هفت منطقه نشان دهنده سامانه‌های مختلف آب و هوایی است. الگوهای سلول هدلی آفریقا، اقیانوس هند و غرب اقیانوس آرام مشابه سلول هدلی میانگین منطقه‌ای است (Zhang et al, 2008; Trenberth et al, 2000). البته، شاخه فرونشینی سلول هدلی آفریقا قویتر و شدیدتر از سلول هدلی اقیانوس هند و غرب اقیانوس آرام است. حرکت فرونشینی قوی بر روی شاخه قطبی سلول هدلی آفریقا در مقایسه با سایر مناطق سلول هدلی متاثر از مقادیر بیشینه تابش موج بلند خروجی زمین در صحرای آفریقا و سطح خشکی‌های خاورمیانه است (Zhang et al, 2004). سلول هدلی منطقه‌ای شرق اقیانوس آرام در نیمکره جنوبی نسبت به سایر مناطق سلول‌های هدلی بسیار ضعیف‌تر است. سلول هدلی منطقه‌ای آمریکای جنوبی بسیار باریک‌تر از سلول هدلی منطقه‌ای است و یک گردش سلول فرل در نیمکره شمالی دارد. سلول هدلی منطقه‌ای در اقیانوس اطلس در نیمکره شمالی و جنوبی باریک‌تر از سلول هدلی منطقه‌ای است و یک گردش سلول فرل در نیمکره جنوبی دارد (Nolan et al, 2007). ژانگ و همکاران (Zhang et al, 2011) گزارش داده‌اند که تغییرات سلول هدلی در غرب اقیانوس آرام (۱۱۰E–۱۶۰E) و شرق اقیانوس آرام (۱۲۰W–۱۸۰W) با تغییرپذیری مانسون زمستانی آسیای شرقی (EAWM) ارتباط تنگاتنگی دارد. وانگ (Wang, 2005) دریافت که سلول هدلی غرب اقیانوس آرام (° ۱۲۰ E–۱۷۰E) تمایل به روند ضعیف‌تر شدن دارد و سلول هدلی شرقی اقیانوس آرام (۱۰۰°W–۱۵۰°W) در سال‌های ال‌نینو قوی‌تر است. تغییرات و گسترش گردش هدلی را به تقویت منطقه همگرایی بین حارهای، جت‌های جنب حاره (Keyser et al, 1989) و تابش موج بلند خروجی زمین (Quan, 2016) که در حاشیه گردش هدلی هستند، مربوط دانسته‌اند. بدیهی است که گردش هدلی در سال‌های رخداد ال‌نینو (EL Nino) قوی‌تر و باریک‌تر، ولی در زمان رخداد سال‌های لانینا (La Nina) ضعیف‌تر و گسترده‌تر است؛ همچنین در حال حاضر هیچ اثری در رابطه بین عرض جغرافیایی گردش سلول هدلی با گردش‌های موسمی وجود ندارد (Yongyun et al, 2018: 640)؛ اما این پژوهش در مغایرت با پژوهش‌های وانگ و همکاران (Wang et al, 2020; Wang et al, 2021) است که در پروژه مقایسه مدل جفت شده (CIMP6; CIMP5) تقویت و گسترش سلول هدلی را با افزایش بارندگی موسمی در نیمکره شمالی مرتبط دانسته‌اند؛ رادول و همکاران (۲۰۰۱) اثر گردش هدلی را در توسعه و تقویت پرفشارهای جنب حاره‌ای تاکید می‌کنند که میانگین مداری گردش نصف‌النهاری هدلی در تابستان نیمکره شمالی نسبت به تابستان نیمکره جنوبی بسیار ضعیف‌تر است و این گردش به اندازه کافی قوی نیست تا بیشینه‌های تابستانه مشاهده شده از شدت پرفشار جنب حاره را ایجاد کند؛ بنابراین آنها به این نتیجه می‌رسند که نظریه گردش هدلی به تنهایی قادر نخواهد بود وجود بیشینه فشار سطح دریا در جنب حاره نیمکره شمالی را تشریح کند. بسیاری از محققین ارتباط تغییرپذیری گردش هدلی با پدیده‌های هواشناختی را مورد توجه قرار داده‌اند. اورت و همکاران (۱۹۹۶) نشان دادند که گردش هدلی همبستگی مثبتی با دمای سطح دریا در منطقه استوایی آرام شرقی دارد. سایر پژوهش‌های نظری و مدل‌سازی‌ها نشان می‌دهند که دمای سطح دریا در منطقه حاره تأثیر مهمی در تغییرپذیری سالانه گردش هدلی دارد. دمای سطح دریا در منطقه حاره تعیین کننده مکان

[1] - Zonally Averaged Hadley Cell

منطقه همگرایی درون حاره می‌باشد که شاخه صعودی گردش هدلی را شامل می‌شود (لیندزن و همکاران، ۱۹۸۷؛ هو و همکاران، ۱۹۹۲؛ نوماگوتی، ۱۹۹۵؛ لوین و همکاران، ۲۰۱۱). تباین گرمایی در راستای طول جغرافیایی نیز می‌تواند شدت و مکان گردش هدلی را دچار تغییر کند (بروکولی و همکاران، ۲۰۰۶؛ لیو و همکاران، ۲۰۰۸؛ جیوین و همکاران، ۲۰۱۳). عزیزی و همکاران (۱۳۹۹) در تحلیل جریان واچرخندی و فرونشست هوا در اطلس و آرام شمالی اظهار داشته‌اند که بیشینه فرونشست در ژوئیه و در جناح شرقی واچرخندهای جنب حاره، منطبق بر بیشینه بادهای شمالی در ترازهای زیرین و ناوه ترازهای فوقانی رخ داده است. همچنین بیشینه نزول هوا در اطلس و آرام شمالی به ترتیب در طولهای جغرافیایی ۱۰ و ۱۲۰ درجه غربی حاکم است که بر بیشینه فشار سطح منطبق نیست؛ و همچنین در پژوهشی دیگر، عزیزی و همکاران (۱۴۰۰) در بررسی گردش کلی جو در اطلس و آرام شمالی و ارتباط آن با توسعه و تقویت واچرخندهای جنب حاره آزورز و هاوایی نشان دادند که انتقال جرم در تابستان نیمکره شمالی به سمت نیمکره جنوبی صورت می‌گیرد و گردش هدلی نمی‌تواند بیشینه فعالیت واچرخندهای جنب حاره را تفسیر و توجیه کند. در حالیکه الگوی گردش نصف‌النهاری در سطح مقطع‌های کوچکتری در شرق اقیانوس‌ها، نشان داد که گردش هدلی نقش مهمی در انتقال جرم به جنب حاره نیمکره شمالی بازی می‌کند. بر اساس نتایج این پژوهش، گردش هدلی در شرق اقیانوس‌ها، گردش مداری (واکر) ناشی از گرمای نهان آزاد شده در غرب اقیانوسها و گردش حاصل از گرمایش بر روی خشکی‌های شرق اقیانوس‌ها نقش مهمی در انتقال جرم به جناح شرقی واچرخندهای جنب حاره دارند. فرایندهای مذکور در شکل‌گیری بادهای شدید شمالی در شرق اقیانوس‌ها و بادهای بسامان در منطقه حاره و در نتیجه آن، توسعه و تقویت واچرخندهای جنب حاره مؤثر هستند. کوتیل و همکاران (Kutile et al, 1998) به منظور تعریف و پایش چرخندها در شرق مدیترانه و رابطه آن با تغییرات دوره‌های خشک و مرطوب، احتمالات مختلفی را با توجه به ضریب همبستگی بالا در هر فصل به دست آورده است. پژوهش‌های منزل و همکاران (Menzel et al, 2019) نشان دادند که گسترش سلول هدلی با جت جنب حاره به عرض‌های جغرافیایی بالاتر هم بستگی مثبتی داشته است و همچنین با افزایش دی اکسید کربن (CO_2)، جت جنب حاره تقویت شده که دلیلی بر گسترش سلول هدلی شده است و شاخه فرونشینی سلول هدلی آب و هوای مناطق عرض‌های میانه را بدون ابر و باران قرار داده است و در نتیجه بخش زیادی از مناطق خشک از جمله بزرگترین بیابان‌های جهان را منطقه شمال آفریقا، خاورمیانه و ایران و جنوب ایالات متحده تشکیل داده است (جلالی و همکاران، ۱۴۰۰). گسترش قطب سوی سلول هدلی ممکن است منجر به گسترش مناطق خشک به عرض‌های جغرافیایی بالاتر شود. به عنوان مثال، کاهش بارندگی‌ها و روند فزاینده خشکسالی‌های مکرر در جنوب غربی آمریکای شمالی و جنوبی (Morales, 2012)، استرالیا، شمال چین، آمازون(IOCI, 2012 ;CSIRO, 2012)[1]، (Feng et al, 2013)، منطقه مدیترانه، خاورمیانه و غرب اقیانوس آرام (D'Agostino et al, 2020) و همچنین در آفریقا و آسیای جنوب شرقی (Dai, 2013)، مشاهده شده است که با گسترش سلول هدلی در چند دهه گذشته مرتبط است. و همچنین مخاطرات امواج گرمایی که در اروپا و آمریکا در سال‌های اخیر رخ داده است به دلیل گسترش سلول هدلی و تغییر جت جنب حاره نسبت داده می‌شوند (Ma et al, 2021). ژائو و همکاران (Zhao et al, 2008) نشان داده اند که روند بارندگی‌های تابستانه غرب آفریقا در نیمه دوم قرن بیستم با تغییرات در سلول هدلی منطقه‌ای (۴۰°E–۱۵°W) ارتباط تنگاتنگی دارد. پیلای و همکاران (Pillai et al, 2008) دریافتند که سلول هدلی محلی (۶۰°E–۹۵°E) در منطقه موسمی آسیا نقش مهمی در چرخه نوسان دوسالانه تروپوسفری ایفا می‌کند. کریشنامورتی و همکاران (Krishnamurthy et al, 2000) نشان داده‌اند که کاهش بارندگی‌های موسمی هند در ارتباط با ال‌نینو به یک ناهنجار منطقه‌ای سلول هدلی (۷۰°E–۱۲۰°E) با حرکت صعودی در نزدیکی خط استوا و حرکت نزولی بر روی شبه قاره هند تبدیل شده است. آمبریزی و همکاران (Ambrizzi et al, 2005) گزارش داده‌اند که تغییرات در سلول هدلی آمریکای جنوبی (۳۵°W–۷۰°W) تأثیر قابل توجهی بر ناهنجاری‌های بارندگی آمریکای جنوبی داشته باشد. جلالی و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی به بررسی گسترش قطب‌سو چرخش سلول هدلی نیمکره جنوبی پرداختند و نتایج آنها نشان داد که هر سال، مرز بیرونی سلول هدلی به طور متوسط به اندازه ۰/۰۳۲

[2] - IOCI= Indian Ocean Climate Initiative - Western Australia; CSIRO= Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization

درجه جنوبی افزایش یافته است که لبه سلول هدلی در نیمکره جنوبی، ۱ تا ۳/۵ درجه عرض جغرافیایی افزایش داشته و همچنین از سال ۱۹۹۹ شدت روند افزایش چرخش سلول هدلی در نیمکره جنوبی به عرض‌های بالاتر بیشتر شده است. با قرارگیری اکثر مناطق خشک در سراسر زمین در زیر شاخه‌های فرونشینی گردش نصف‌النهاری باعث گسترش منطقه خشک نیمه‌گرمسیری شده است. گسترش گردش نصف‌النهاری سلول هدلی از عرض جغرافیایی پایین به طرف عرض‌های جغرافیایی بالاتر، مناطق عرض‌های میانه را به مناطق خشک تبدیل کرده است (Nguyen, 2015). در نتیجه، بیابان‌زایی بیشتر از مرزهای موجود ایجاد شده و به گسترش مزارع خشک منجر شده است (Sche.. & et al, 2012 Feng & et al, 2013) . گسترش سلول هدلی حاکی از گسترش منطقه خشک نیمه‌گرمسیری است که این امر حاکی از افزایش فراوانی خشکسالی در هر دو نیمکره است. هدف از تحقیق حاضر ارتباط گردش هدلی و مولفه های جوی با خشکسالی‌های نیوار ایران است.

داده ها و روش ها

بـه منظـور ارتباط گردش هدلی و مولفه های جوی با خشکسالی‌های نیوار ایران از داده‌های بازتحلیل پیش‌بینی میان مدت هواسپهر نسخه (ERA5) با تفکیک مکانی ۰/۲۵×۰/۲۵ و همچنین داده ناهنجاری‌های وزنی بارش استاندارد شده (WASP) از دانشگاه کلمبیا با تفکیک مکانی ۰/۵×۰/۵ در بازه زمانی ۴۰ ساله (۲۰۱۸-۱۹۷۹) استفاده شده است. در مرحله نخست بـا استفاده از شاخص ناهنجاری‌های بـارش اسـتاندارد شده (WASP) رخداد سالهای خشکسالی مشخص گردید. در مرحله دوم از یک روش همدید دستی و موردی استفاده گردیـد، بدین صورت که برای خشکسالی سالهای ۱۹۹۰-۱۹۸۹، ۱۹۹۹، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۷ شرایط جوی حاکم با استفاده از داده های فشار سطح دریا (slp)، باد مداری (Uwnd)، رطوبت نسبی (Rhum)، تابش موج بلند خروجی زمین (OLR)، بارش (prcip) و تابع جریان نصف النهاری به صورت سالانه مورد تجزیـه و تحلیل قرار گرفت (شکل ۳). در این مطالعه، تحلیل همبستگی و رگرسیون گردش هدلی (از منظر میانگین منطقه‌ای اندازه گیری شده است) با جت نیمه گرمسیری تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال، فشار سطح زمین، تابش موج بلند خروجی زمین، رطوبت نسبی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، بارش و شاخص ناهنجاریهای بارش استاندارد شده (WASP) انجام گرفته است. در این تحقیـق متغیـر گردش نصف النهاری به عنوان متغیر مستقل و دیگر متغیرها بـه عنوان متغیر وابسته انتخاب شده و نقشـه‌های مورد نیـاز تهیه شـده اسـت. در مطالعه حاضر از همبستگی پیرسون جهـت انـدازه گیری میـزان ارتبـاط بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته استفاده شد. در نقشه های تولید شده تنها روابط معنی دار در سطح ۹۵٪ و بیشتر از ۰/۴ نشان داده شده است. میزان تابع جریان نصف النهاری در متوسط منطقه ای تراز ۴۰۰-۶۰۰ هکتوپاسکال تعریف شده است (Galanti et al, 2021: 5). ناحیه متوسط تابع جریان نصف‌النهاری[1] از داده‌های میانگین ماهانه محاسبه می‌شود. سلول هدلی برای تقارن محوری (متوسط منطقه ای) جریان دو بعدی تعریف شده است. در این مورد، بقای جرم در مختصات کروی (Cook, 2004) عبارت است از:

معادله (۱) $$\frac{\partial[\rho v \cos y]}{\partial y} + \frac{\partial[\rho \omega]}{\partial p} = n0.$$

که در آن (v) سرعت باد نصف‌النهاری[2] ، (ω) سرعت باد عمودی[3]، (y) عرض جغرافیایی[4] و (p) فشار به هکتوپاسکال[5] است که اجازه می دهد تا برای Ψ تابع عملکرد جریان[6] تعریف شود:

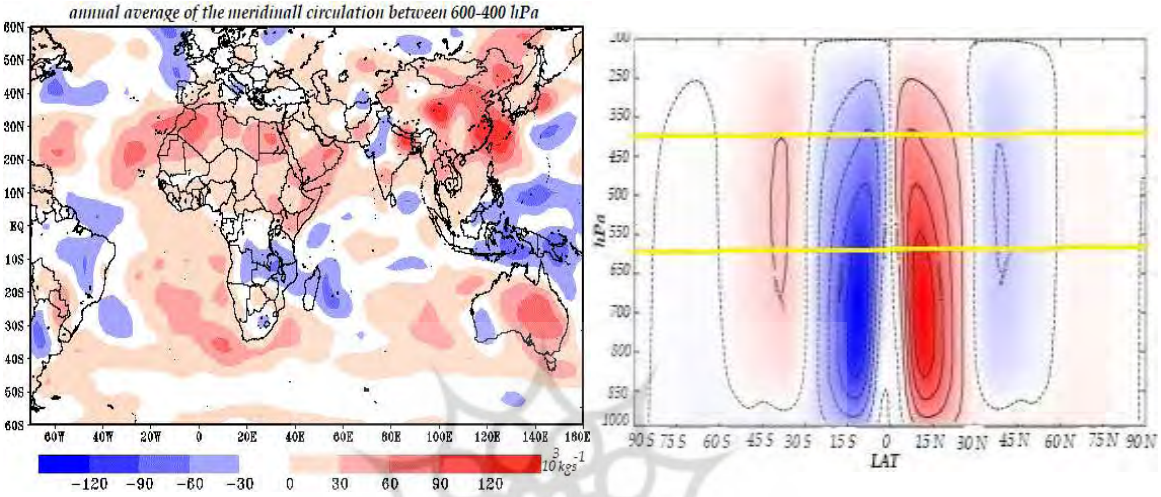
معادله (۲) $$[v] = \frac{1}{a\cos y} + \frac{\partial \Psi}{\partial p} \; and \; [\omega] = \frac{1}{a\cos y} \frac{\partial[\Psi \cos y]}{\partial y} = 0$$

عملکرد جریان Ψ به شرح زیر است:

[1] - zonal-mean meridional stream function
[2] - meridional wind speed
[3] - vertical wind speed
[4] - latitude
[5] - pressure in pa
[6] - mass streamfunction

معادله (۳)
$$\psi[p.y] = \frac{2\pi a cosy}{g}\int_{o}^{600-400}[v]dp$$

در اینجا (v) میانگین باد نصف‌النهاری منطقه ای، (a) شعاع زمین، (y) عرض جغرافیایی و (g) جاذبه زمین است. بدین ترتیب کل پهنای سلول هدلی با فاصله بین عرض های جغرافیایی در هر نیمکره، جایی که میانگین تراز p1=400، p2=600 هکتوپاسکال و ΔP=p2-p1 که $\psi_{600-400} - o\ kg\ s^{-1}$ است، مشخص می‌شود، این منطقه ای است که گردش نصف النهاری به حداکثر خود می رسد (Galanti et al, 2021).



شکل (۱). ساختار عمودی میانگین گردش منطقه ای سلول هدلی، خطوط زرد نشان دهنده تراز ٤٠٠-٦٠٠ هکتوپاسکال (الف)؛ میانگین سال۲۰۱۸-۱۹۷۹ گردش نصف النهاری براساس میانگین بین تراز ٤٠٠-٦٠٠ هکتوپاسکال($10^3 kg^{-1}$) (ب)

در این پژوهش، برای محاسبه خشکسالی از شاخص (WASP) استفاده شده است، ناهنجاریهای وزنی بارش استاندارد شده (WASP) ابتدا توسط دانشمند آب و هواشناس، براد لیون (Lyon, 2004) برای بررسی میزان فضایی خشکسالی گرمسیری مورد ارزیابی قرار گرفته است و از آن زمان برای استفاده در ارزیابی اثرات مالاریا اصلاح شده است. شاخص WASP یک معیار استاندارد از میزان بارش اضافی یا کسری در طول دوره انباشت انتخاب شده را ارائه می دهد. این برآورد کسری نسبی یا مازاد بارش را در فواصل زمانی مختلف بین ۱ تا ۱۲ ماه ارائه می دهد. برای محاسبه شاخص، مجموع بارش سالانه با تقسیم بر انحراف استاندارد بارندگی ماهانه است و سپس ناهنجاریهای استاندارد ماهانه با ضرب در کسری از میانگین بارندگی سالانه برای ماه معین وزن می شوند. این ناهنجاری های وزنی سپس در بازه های زمانی مختلف، جمع بندی می شوند که به شرح زیر بدست می آید:

معادله (۴)
$$WASP_N = \frac{SUM_N}{\delta SUM_N}$$

With

معادله(۵)
$$WASP_N = \sum_{i=1}^{N}\left(\frac{P_i - \bar{P_i}}{\delta_i}\right)\frac{\bar{P}_i}{P_A}$$

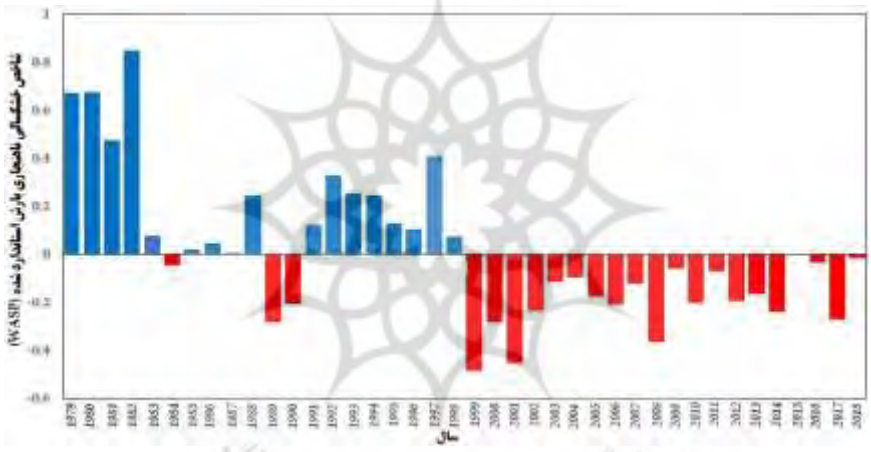
که در آن P_i میزان بارش ماهانه، $\bar{P}_i$ بارش پایه (۲۰۱۸-۱۹۷۹) برای این ماه نسبت به ماه و سال، δ_i انحراف استاندارد بارندگی ماهانه، $\bar{P}_A$ میانگین بارندگی سالانه در یک نقطه مشخص، SUM_N برای یک ماه معین با توجه به تعداد (N) ماه های قبل (جایی که i=1، i=2، i=3) بدست می آید.

جدول ۲. طبقات شاخص خشکسالی ناهنجاری های وزنی بارش استاندارد شده (WASP)، منبع (http://iridl.ldeo.columbia.edu)

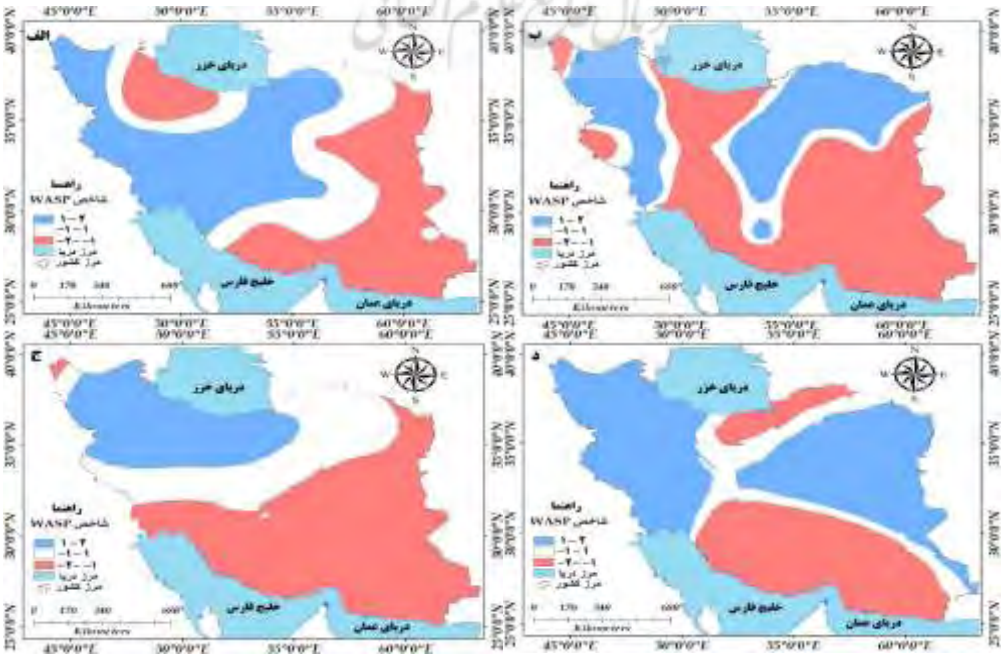
ردیف	طبقات شاخص خشکسالی ناهنجاری وزنی بارش استاندارد	مقادیر شاخص	رنگ مشخصه
۱	خشکسالی بسیار شدید	۳ >	
۲	خشکسالی شدید	۲ : ۳	
۳	خشکسالی متوسط	۱ : ۲	

۴	نرمال	۱ : ۱-	
۵	ترسالی متوسط	۱- : ۲-	
۶	ترسالی شدید	۲- : ۳-	

شکل (۲) میانگین نمودار سری زمانی ناهنجاریهای وزنی بارش استاندارد شده ایران را از سال ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۸ نشان می دهد که کشور ایران در سال ۱۹۸۴، ۱۹۹۰-۱۹۸۹ و همچنین از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۸ شرایط خشکسالی را سپری نموده است (رنگ قرمز) و سالهای ۱۹۸۳-۱۹۷۹، ۱۹۸۸-۱۹۸۵ و همچنین از سال ۱۹۹۸-۱۹۹۱ شرایط ترسالی را گذارنده است (رنگ آبی). شکل (۳) نقشه پراکندگی خشکسالی ناهنجاریهای وزنی بارش استاندارد شده سالهالی ۱۹۹۰-۱۹۸۹، ۱۹۹۹، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۷ را نشان می دهد. اکثر خشکسالیها در مناطق جنوبی، جنوب غربی و جنوبی شرقی با شاخص ۲- تا ۱- است و به طور پراکنده در مناطق سواحلی شمال خزری مشاهده شده است. در این مطالعه سعی شد ارتباط سلول هدلی و مولفه های جوی با خشکسالی نیوار ایران مورد ارزیابی قرار گیرد. بدین منظور میزان همبستگی زمانی مهم ترین مولفه های جوی در ترازهای مختلف (۱۰۰۰ تا ۲۰۰ هکتوپاسکال) و همچنین شاخص ناهنجاریهای بارش استاندارد شده در سالهای ۱۹۹۰-۱۹۸۹، ۱۹۹۹، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۷ بر اساس مقیاس روزانه محاسبه شد. در ادامه سالهای مورد بررسی و ترازهایی که بیشترین همبستگی را داشتند به عنوان نماینده ای از آن مولفه در پژوهش ذکر شده است.



شکل (۲)، نمودار میانگین سری زمانی ناهنجاری های وزنی بارش استاندارد شده (WASP) (۲۰۱۸-۱۹۷۹)



شکل (۳). شاخص ناهنجاریهای بارش استاندارد شده (WASP) ایران، سال های (۱۹۹۰-۱۹۸۹، الف؛ ۱۹۹۹، ب؛ ۲۰۰۸، ج، ۲۰۱۷، د)

در این تحقیق جهت بررسی بیشتر ارتباط گردش سلول هادلی و مولفه های جوی با خشکسالی‌های نیوار ایران از همبستگی و رگرسیون زمانی استفاده شده است، برای بررسی سری زمانی الگوهای گردشی و همچنین برای بررسی سیستم های آب و هوایی پیوند از دور از تجزیه و تحلیل رگرسیون و همبستگی استفاده می شود (TCC, 2018:64-77; TCC, 2015:31)؛ جهت تحلیل همبستگی (Corrolation) و رگرسیون (Regression) گردش هادلی (متغیر مستقل تحقیق x) با مولفه های جوی (متغیر اصلی یا وابسته تحقیق y)، از جمله: جت نیمه گرمسیری در تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال، فشار سطح زمین، تابش موج بلند خروجی زمین، رطوبت نسبی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، بارش و شاخص ناهنجاری‌های بارش استاندارد شده (WASP) در میانگین طول جغرافیایی ۹۰E-۱۰E درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۶۰N-۱۰Nدرجه شمالی در نرم افزار GrADS مورد بررسی قرار داده شده است. در این تحقیق متغیر گردش نصف النهاری به عنوان متغیر مستقل (x) و دیگر متغیرها به عنوان متغیر وابسته (y) انتخاب شده و نقشه های مورد نیاز برای این تحقیق تهیه شده است. در این تحقیق از همبستگی پیرسون جهت ارتباط سلول هادلی و مولفه های جوی با خشکسالی ایران مورد ارزیابی قرار گرفته شد. ضریب هم‌بستگی پیرسون بین یک متغیر یا شاخص‌های آن (F_j) و زمان (t) است که از معادله (۶) ذیل محاسبه می شود:

$$r_{Ft} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(t_i - \bar{t})(F_i - \overline{F})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(t_i - \bar{t})^2 \sum_{i=1}^{n}(F_i - \overline{F})^2}}$$

وقتی مقادیر زمان (t) و فراسنج (F_j) در این جا مقادیر هر یک از مشاهدات مولفه های جوی با گردش هادلی با هم تغییر کنند، بالاترین ضریب ممکن (شاخص عددی ۱+) و ضریب هم‌بستگی کامل و مثبت بین متغیرها حاصل می‌شود. ضریب هم‌بستگی (۱-) نشان دهنده رابطه کامل و منفی است. اگر ضریب هم‌بستگی زمان و نمایه صفر باشد، گفته می‌شود آن دو متغیر ناهمبسته است. در این تحقیق هر چند همبستگی را برای نشان دادن رابطه گردش هادلی (متغیر مستقل: معیاری که ممکن است روی متغیر وابسته تاثیر بگذارد) با مولفه های جوی (متغیر وابسته: معیاری که میخواهیم ارتباط آن را با سایر متغیرها کشف و پیش بینی نماییم) است، ولی مدل هم بستگی رابطه مولفه های جوی را به خوبی نشان نمی دهد. و در همین زمینه در جهت تشخیص بیشترین تاثیر ارتباط گردش هادلی و مولفه های جوی با خشکسالیهای نیوار ایران از مدل رگرسیون (Regression) استفاده شده است. رگرسیون از معادله (۷) ذیل محاسبه می شود:

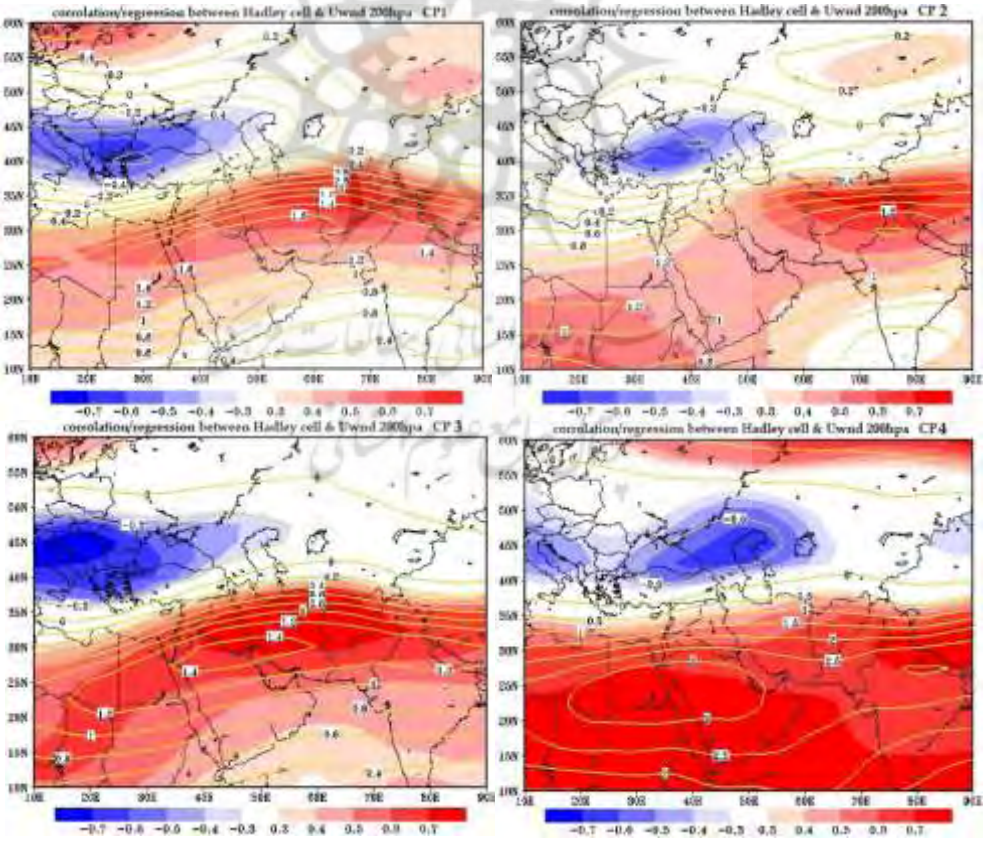
$$y = a\,x + b$$

y، مقدار مورد انتظار (متغیر وابسته)؛ x، مقدار متغیری که بر اساس آن پیش‌بینی صورت می‌گیرد (متغیر مستقل)؛ a، ضریب ثابت که به عنوان عرض از مبدا خوانده می‌شود؛ b، شیب خط.

بحث و بررسی

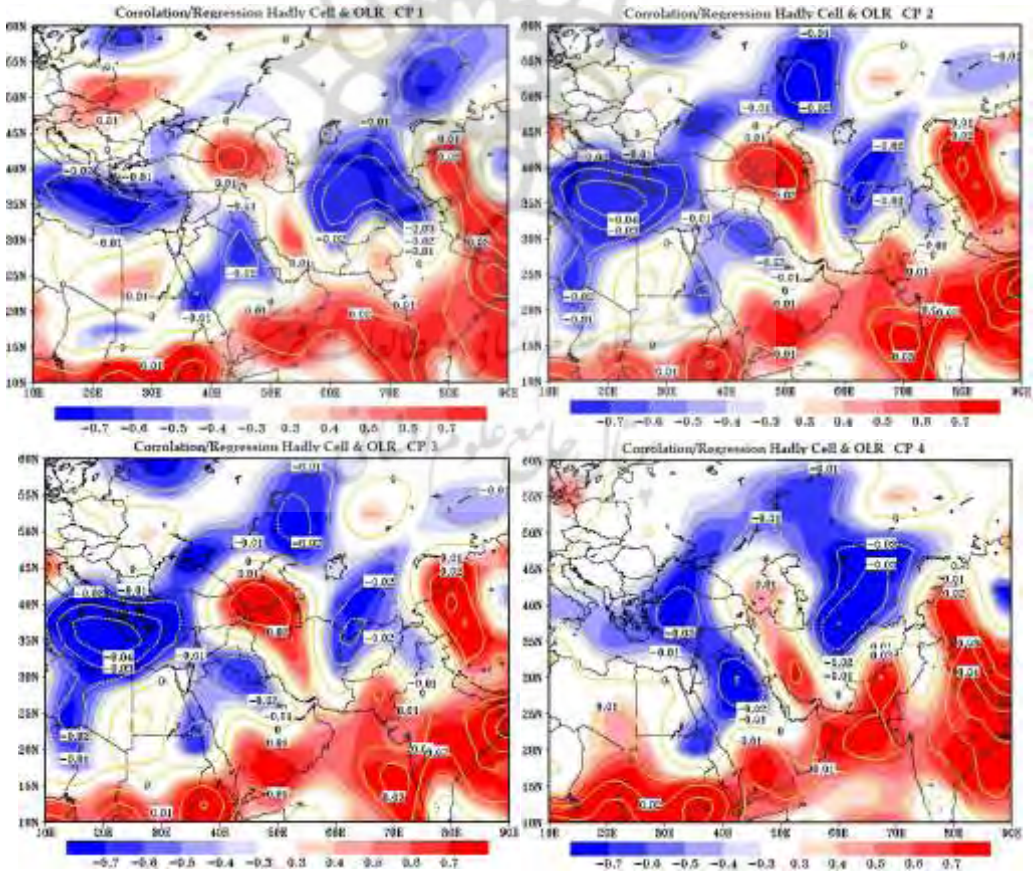
شکل (۴) همبستگی مثبت و قوی بین جریان جت نیمه گرمسیری و سلول هدلی با خشکسالی‌های نیوار ایران با فرونشینی و شرایط خشک نشان می‌دهد. بر اساس این شکل افزایش فرونشینی سلول هدلی با جت نیمه گرمسیری بر نیوار ایران در تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال در ارتباط است. همبستگی مثبت نشان می‌دهد لبه سلول هدلی با جت نیمه گرمسیری در سطح ۹۵٪ و با مقدار ۰/۴ تا ۰/۷ همبستگی دارد و تا عرض جغرافیایی ۳۵ درجه گسترش داشته است و فقط بخشی از ناحیه شمال غرب ایران را در طی سال‌های

مورد بررسی در سیطره نداشته است؛ البته بیشینه همبستگی مثبت با مقدار ۰/۷ در شرق، شمال شرق و تا مرکز ایران کشیده شده که می تواند بر سامانه‌های رطوبت‌زای گذری از روی ایران و بر میزان بارش‌ها اثر منفی داشـــته باشـد؛ و همچنین تحلیل رگرسیون گردش هدلی با جت نیمه گرمسیری نشان داد که در عرض‌های جغرافیایی بین ۱۵ تا ۳۵ درجه شمالی، جت نیمه گرمسیری (m/s) ۱ بیشتر از حالت نرمال است، البته در سال ۲۰۱۷ جت نیمه گرمسیری تا عرض های جغرافیایی ۳۰ درجه شمالی ۲ متر در ثانیه افزایش داشته است، که جا به جایی مکانی قطب سوی رودباد جنب حاره‌ای را در پی خواهد داشت و پیامدی از دگرگونی و مخاطرات آب و هوایی گسترش قطب سوی کمربند حاره‌ای به شمار می‌رود، این مطالعه با تحقیقات جلالی و همکاران (۱۴۰۰) مطابقت دارد که نشان داده اند لبه عرض جغرافیایی گردش سلول هدلی در نیمکره شمالی در عرض جغرافیایی ۳۰ درجه شمالی با جت جنب حاره همراه هستند و هسته سلول هدلی از تراز ۶۵۰ تا ۴۵۰ هکتوپاسکال با سرعت m/s ۱۰ تا ۱۵ مشاهده شده است که در واقع منابع عمده انرژی جنبشی اتمسفر ناشی از دگرگونی های بزرگ مقیاس در سلول‌های هدلی می باشند که رودباد قوی جت جنب حاره را در هر دو نیمکره به وجود می آورند و همچنین جت‌های سطح بالایی قوی در عرض‌های جغرافیایی که گردش هدلی فرو می‌نشیند، قوی‌ترین آن در نزدیکی ۳۰° عرض جغرافیایی در نیمکره شمالی در سطح ۲۰۰ هکتوپاسکال در ارتفاع حدود ۱۰ کیلومتری و با میانگین سرعت حدود m/s^{-1} ۴۰ قرار دارد که این نتایج با تحقیقات قانقرمه (۱۳۹۹)، با عنوان ارزیابی تغییر موقعیت رودباد جنب حاره‌ای مستقر بر روی ایران و آینده نگری آن، مطابقت دارد. نتایج ایشان نشان داد زمانی که رودباد در موقعیت جنوبی ایران قرار می‌گیرد، بادهای غربی به راحتی سامانه‌های رطوبتی را وارد کشور می کنند اما زمانی که به عرض‌های شمالی جا به جا شود از قدرت بادهای غربی و همچنین مقدار رطوبتی وارد به ایران کاسته می‌شود. ضمنا تغییرات موقعیت رودباد جنب حاره در نواحی شرقی ایران از روند تغییرات افزایشی معنی‌داری برخودار است.



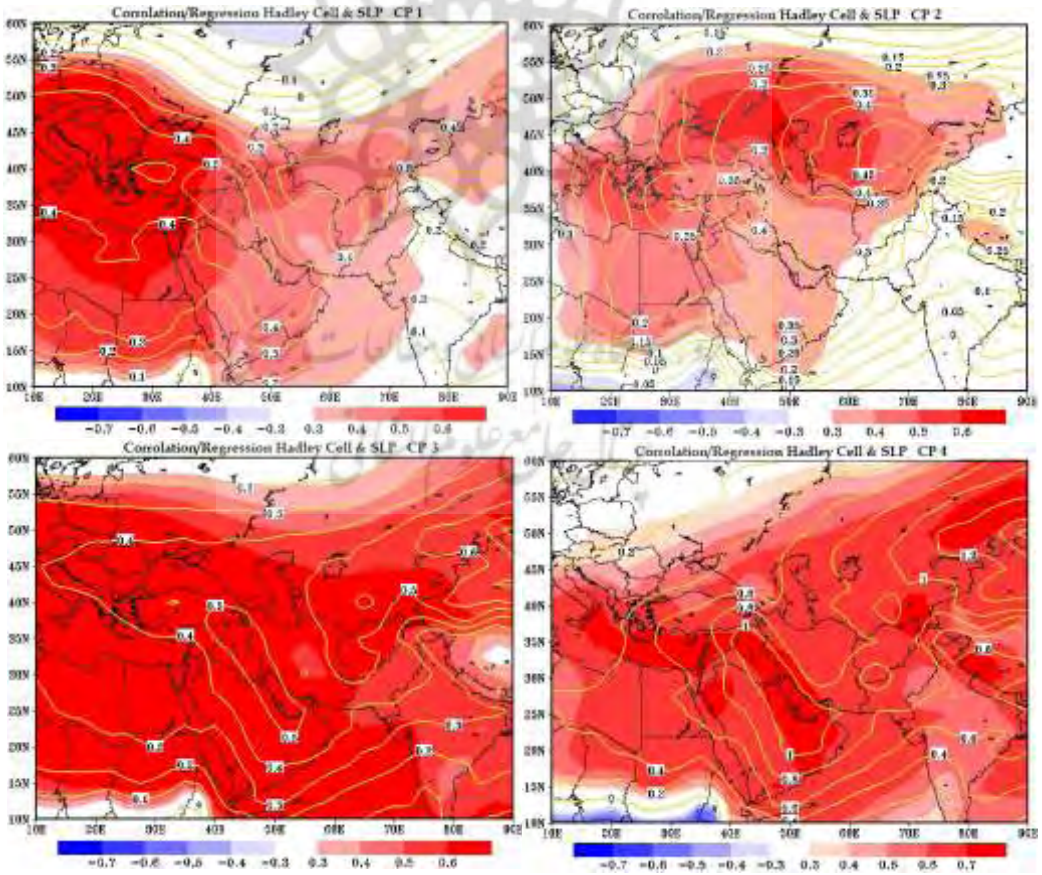
شکل (۴). همبستگی (سایه رنگی) و رگرسیون (خطوط زرد رنگ) زمانی بین سلول هدلی و جت نیمه گرمسیری در تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال در چهار گروه

بـــرای درک بهتـــر، لازم است به صـــورت همدیدی ارتباط سلول هدلی و تابش موج بلند خروجی زمین بررسی شود. در این نقشه محـدوده آبـی رنگ، همبسـتگی منفی (نشـاندهنده محـدوده دارای افزایش بارش و ابرناکی) و محـدوده قرمـز رنگ، همبسـتگی مثبـت (نشان دهنده کاهش بارش و ابرناکی و شرایط خشکی وگرما) را نشان می‌دهد. مناطق فرونشست گردش هدلی، به دلیل خشکی تروپوسفر و فقدان ابرهای زیاد می‌باشد که به عنوان منطقه‌ای با تابش موج بلند خروجی بالا شناخته می‌شود. نقشه شکل (۵) روابط همبستگی و رگرسیون گردش سلول هدلی با تابش موج بلند خروجی زمین را نشان می‌دهد. مناطق جنوب، جنوب غربی و جنوب شرقی ایران با هم بستگی مثبت ۰/۴ و ارتفاعات زاگرس و شمال غرب ایران با هم بستگی مثبت ۰/۷ و همچنین رگرسیون با مقدار ۰/۰۱ نشان می دهد که به عنوان یک منبع گرمای محسوس در وردسپهر میانی عمل نموده و گرما مستقیماً به وردسپهر میانی اضافه شده و موجب گرمایش نیمه فوقانی وردسپهر می‌شود که می‌تواند دلیلی بر افزایش گرما و شرایط خشکی و عدم بارش باشد. در نتیجه آن خشک شدن ظاهری تروپوسفر فوقانی و کاهش میزان خفیف ابر در سطح پایین را به دنبال داشته است. ولی غرب و شرق ایران همبستگی و رگرسیون منفی را نشان می دهد. چن و همکاران (Chen et al, 2002)؛ سو و همکارن (Su et al, 2014)؛ میتاس و همکاران (Mitas and Clement, 2005)؛ هو و همکاران (Hu and Fu, 2007) نشان داده‌اند که تغییرات آب و هوایی، از قبیل گرمایش تروپوسفری عرض‌های میانه و تغییرات مناطق معتدل نیمه گرمسیری به منطقه خشک، همراه با روند تقویت و گسترش انبساط سلول هدلی بر اثر تابش موج بلند خروجی زمین مرتبط هستند. تابش طول موج بلند خروجی زمین افزایش یافته و دلیلی بر افزایش گرما در تروپوسفر فوقانی گردیده است و این باعث افزایش خشکی و کاهش خفیف ابر در ترپوسفر فوقانی شده است (Chen & et al, 2002) و همچنین باعث افزایش چرخش هدلی به سمت عرض‌های جغرافیایی بالاتر شده است (Qian, 2016; Wielicki & et al 2002).



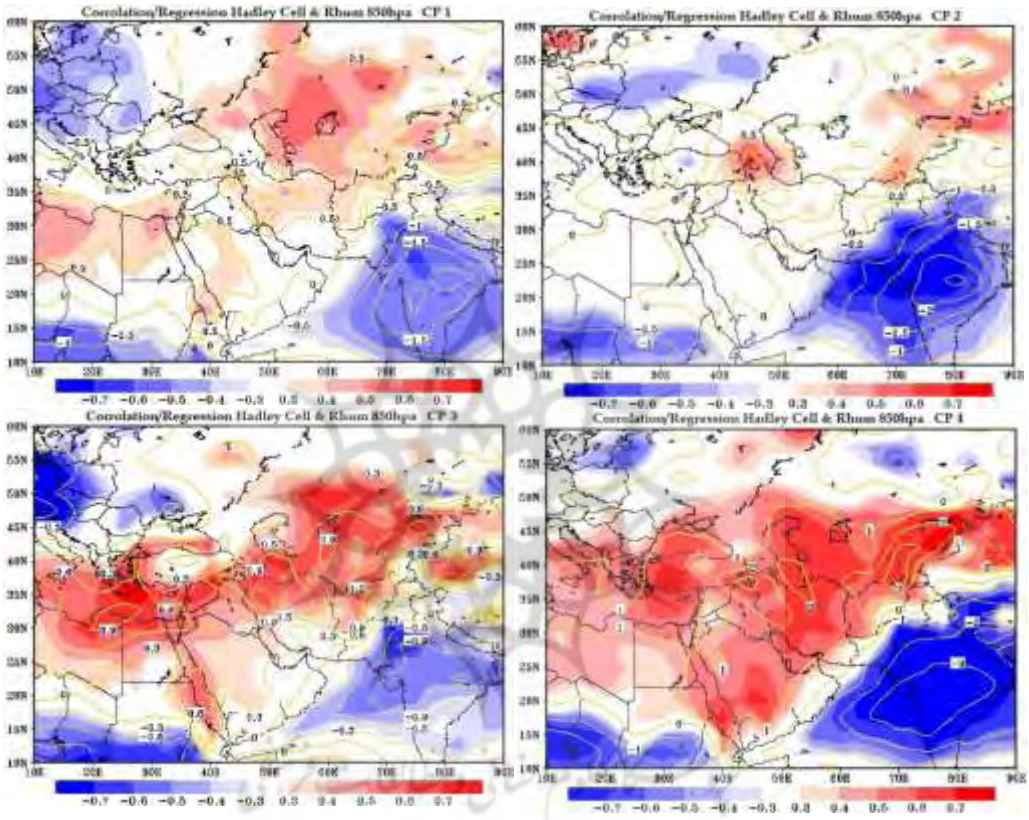
شکل (۵). همبستگی (سایه رنگی) و رگرسیون (خطوط زرد رنگ) زمانی بین سلول هادلی و تابش موج بلند خروجی زمین در چهار گروه

گسترش بزرگ مقیاس گردش سلول هدلی، افزایش فشار تراز دریا در عرض‌های میانه و جنب حاره و کاهش فشار تراز دریا در عرض‌های بالا را به ویژه در منطقه فعالیت شاخص نوسان اطلس شمالی در پی داشته است (Gillet & et al, 2003: 292-294). بر اساس نتایج وایق و همکاران (Waugh et al, 2018: 7574) روند افزایش فشار سطح دریا همراه با تغییر قطب سوی سلول هدلی بر روی اقیانوس ها بیش از سطح زمین است. این مطلب با تحقیقات اشمیت و گریس (Schmidt and Grise, 2017) مطابقت دارد که با تحلیل رگرسیونی و شبیه سازی مدل CMIP5 نشان دادند که گسترش قطب سوی سلول هدلی در نیمکره جنوبی با افزایش فشار سطح دریا بر روی اقیانوس ها بیش از سطح زمین توام است، امّا نیمکره شمالی با افزایش فشار سطح دریا پاسخ جزئی از طرف اقیانوس ها و پاسخ ضعیفی از جانب سطح زمین در مورد گسترش قطب سوی سلول هدلی است از خود نشان داده است. گسترش اخیر سلول هدلی را می توان به بخش زیادی از روندهای صعودی فشار سطح زمین در اقیانوس آرام جنوبی و بخش کوچکی از آن را در حوضه اقیانوس آرام شمالی دانست، اما روندهای صعودی فشار سطح زمین در حوزه آتلانتیک شمالی با گسترش سلول هدلی سازگار نیست؛ به طور کلی الگوی فضایی ناهنجاری های فشار سطح دریا در نیمکره شمالی مرتبط با گسترش سلول هدلی به نظر می رسد (Schmidt et al, 2017). در تفسیر نقشه شکل (۶) فشار سطح دریا همبستگی و رگرسیون مثبتی را با سلول هدلی نشان می‌دهد که بیشینه همبستگی با مقدار ۰/۶ تا ۰/۷ بر روی نیوار ایران را طی سال های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۷ نشان داده است و خطوط رگرسیون (رنگ زرد) نشان دهنده افزایش ۱ تا ۰/۸ هکتوپاسکال فشار سطح زمین است. به طور کلی، مرکز بیشینه همبستگی در سال ۱۹۹۰– ۱۹۸۹ و ۲۰۰۸ بر روی دریای سیاه و در سال ۱۹۹۹ بر روی شمال خزری و در سال ۲۰۱۷ بر روی عربستان قرار دارد؛ و همچنین تحلیل رگرسیون گردش هدلی با فشار سطح زمین نشان داده که ۰/۴ تا ۰/۵ هکتوپاسکال فشار سطح زمین بر روی نیوار ایران افزایش داشته است.



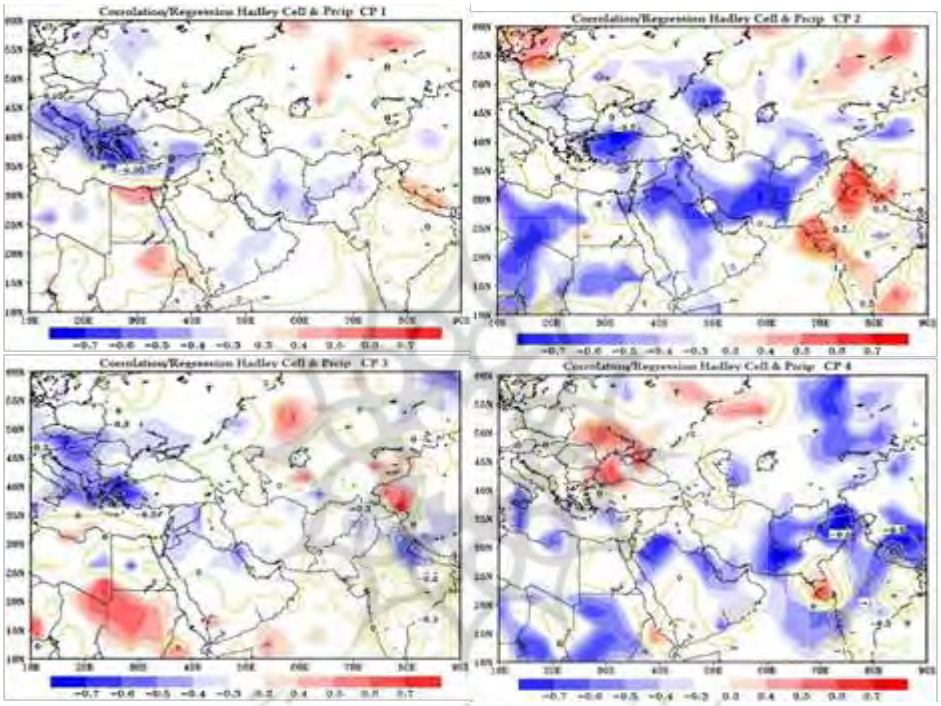
شکل (۶). همبستگی (سایه رنگی) و رگرسیون (خطوط زرد رنگ) زمانی بین سلول هدلی و فشار سطح زمین در چهار گروه

شکل (۷) همبستگی سلول هدلی را با رطوبت نسبی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد. بیشینه همبستگی با سطح معناداری ۹۵٪ با مقدار ۰/۴ است که البته رگرسیون مثبتی را با مقدار ۰/۹ در سال ۲۰۰۸ در عرض های بالاتر از ۳۰ درجه شمالی در کشور ایران مشاهده شده است و همچنین در سال ۲۰۱۷ در اکثر مناطق ایران رابطه مثبتی و با مقدار رگرسیون ۲ تا ۱ را نشان داده است، این رطوبت نسبی پایین همراه با توده خشک شده هوا در شرایط نزولی شاخه سلول هدلی قرار دارد و شرایط خشکی را حاکم کرده است. این امر منجر به بارندگی بسیار کمی در این مناطق و در نتیجه شرایط جوی می شود. در سال ۱۹۹۹در شمال غرب ایران و در سال۱۹۹۰-۱۹۸۹ از عرض های بالاتر از ۳۰ درجه شمالی با همبستگی ۰/۳ مشاهده شده است.

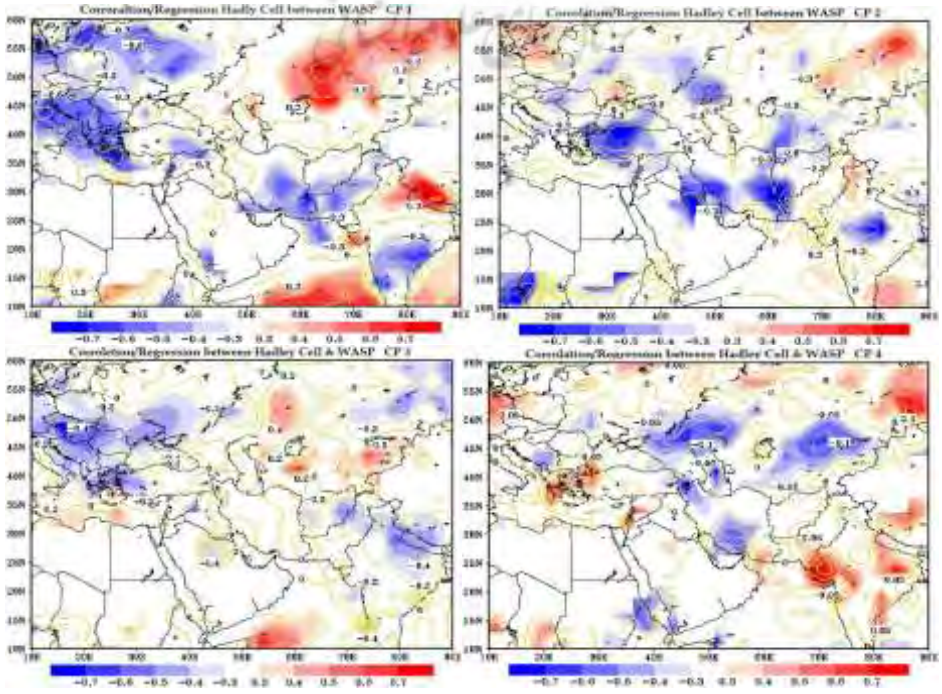


شکل (۷). همبستگی (سایه رنگی) و رگرسیون (خطوط زرد رنگ) زمانی بین سلول هادلی و رطوبت نسبی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در چهار گروه

الگوی دینامیک سلول‌های هدلی بسیار ساده است، اما این الگوی ساده جوی دارای پیامدهای عظیمی برای سامانه آب و هوایی زمین و زندگی بر روی زمین است. مهمترین تأثیر آن بر توزیع بارش است. بر اساس شکل (۸) هم بستگی سلول هدلی و بارش نشان داده شده است. هم بستگی منفی نشان دهنده عدم بارش و شرایط خشک حاکم است. در سال ۱۹۹۰-۱۹۸۹، ۱۹۹۹ و ۲۰۱۷ در مناطق جنوبی، جنوب غرب و شرقی ایران بیشینه هم بستگی منفی ۹۵٪ با مقدار ۰/۷ مشاهده می‌شود. در سال ۲۰۰۸ در شمال شرق ایران مقدار هم بستگی منفی ۰/۳ است. شکل (۹) رابطه سلول هدلی با شاخص خشکسالی ناهنجاری‌های بارش استاندارد شده نشان می‌دهد. بر اساس شکل مذکور در سال ۱۹۹۰-۱۹۸۹، ۱۹۹۹ و ۲۰۱۷ در مناطق جنوبی، جنوب غرب و شرقی ایران بیشینه هم بستگی منفی ۹۵٪ با مقدار ۰/۷ دیده می‌شود که شرایط خشکسالی را در این مناطق حاکم نموده است.



شکل (۸). همبستگی (سایه رنگ) و رگرسیون (خطوط زرد رنگ) زمانی بین سلول هادلی و بارش در چهار گروه



شکل (۹). همبستگی (سایه رنگی) و رگرسیون (خطوط زرد رنگ) زمانی بین سلول هدلی و شاخص ناهنجاریهای وزنی بارش استاندارد شده در چهار گروه

نتیجه گیری

گردش حرارتی سلول هدلی برای سامانه آب و هوایی از اهمیّت اساسی برخوردار است و تغییرات آن تأثیرات مهمی بر آب و هوای جهانی دارد. با قرارگیری اکثر مناطق خشک در سراسر زمین در زیر شاخه‌های نزولی سلول‌های هدلی منطقه خشک نیمه‌گرمسیری گسترش یافته و منجر به آب و هوای نیمه‌گرمسیری خشک‌تر می‌شود. گسترش سلول هدلی از عرض جغرافیایی پایین به عرض جغرافیایی بالاتر باعث افزایش سطح مناطق گرمسیری شده است. در نتیجه، باعث بیابان‌زایی و گسترش اراضی خشک می‌شود. به منظور بررسی اثر گردش نصف النهاری سلول هدلی بر خشکسالی های نیوار ایران از داده‌های بازتحلیل پیش‌بینی میان مدت هواسپهر نسخه (ERA5) با تفکیک مکانی ۰/۲۵×۰/۲۵ و همچنین داده ناهنجاری‌های وزنی بارش استاندارد شده (WASP) از دانشگاه کلمبیا با تفکیک مکانی ۰/۵×۰/۵ در بازه زمانی ۴۰ ساله (۲۰۱۸-۱۹۷۹) استفاده شده است. در این مطالعه، جهت تحلیل نقشه همبستگی و رگرسیون گردش هدلی با جت نیمه گرمسیری، فشار سطح زمین، تابش موج بلند خروجی زمین، رطوبت نسبی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، بارش و داده‌های ناهنجاری‌های وزنی بارش استاندارد شده استفاده شده است. نتایج نشان داد که افزایش فرونشینی سلول هدلی با جت نیمه گرمسیری بر نیوار ایران در تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال در ارتباط است. همبستگی مثبت نشان می دهد لبه سلول هدلی با جت نیمه گرمسیری با مقدار ۰/۴ تا ۰/۷ همبستگی دارد و تا عرض جغرافیایی 35^{o} درجه جغرافیایی گسترش داشته است و تنها بخشی از ناحیه شمال غرب ایران را در طی سال‌های مورد بررسی در سیطره نداشته است و همچنین تحلیل رگرسیون گردش هدلی با جت نیمه گرمسیری نشان داد که در عرض های جغرافیایی بین ۱۵ تا ۳۵ درجه شمالی جت نیمه گرمسیری (m/s) ۱ بیشتر از حالت نرمال است، البته در سال ۲۰۱۷ جت نیمه گرمسیری تا عرض های جغرافیایی ۳۰ درجه شمالی ۲ متر در ثانیه افزایش داشته است که می‌تواند بر سامانه‌های رطوبت‌زای گذری از روی ایران و همچنین بر میزان بارش‌ها اثر منفی داشته باشد. روابط همبستگی سلول هدلی با تابش موج بلند خروجی زمین نشان می دهد که مناطق جنوب، جنوب غربی و جنوب شرقی ایران با مقدار ۰/۴ هم بستگی مثبت و همچنین ارتفاعات زاگرس و شمال غرب ایران همبستگی مثبتی با مقدار ۰/۷ را نشان می دهد و همچنین رگرسیون با مقدار ۰/۰۱ نشان می دهد که به عنوان یک منبع گرمای محسوس در وردسپهر میانی عمل نموده و گرما مستقیماً به وردسپهر میانی اضافه شده و موجب گرمایش نیمه فوقانی وردسپهر می‌شود که می تواند دلیلی بر افزایش گرما و شرایط خشکی و عدم بارش باشد. ولی غرب و شرق ایران همبستگی منفی را نشان می دهد. فشار سطح دریا همبستگی مثبتی را با سلول هدلی بر نیوار ایران نشان می‌دهد که بیشینه همبستگی با مقدار ۰/۶ تا ۰/۷ را طی سال های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۷ نشان داده است و تحلیل رگرسیون نشان دهنده افزایش ۱ تا ۰/۸ هکتوپاسکال فشار سطح زمین است. به طور کلی، مرکز بیشینه همبستگی در سال ۱۹۹۰- ۱۹۸۹ و ۲۰۰۸ بر روی دریای سیاه و در سال ۱۹۹۹ بر روی شمال خزری و در سال ۲۰۱۷ بر روی عربستان قرار دارد؛ و همچنین تحلیل رگرسیون گردش هدلی با فشار سطح زمین نشان داده که ۰/۴ تا ۰/۵ هکتوپاسکال فشار سطح زمین بر روی نیوار ایران افزایش داشته است. همبستگی سلول هدلی را با رطوبت نسبی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد. بیشینه همبستگی با سطح معناداری ۹۵٪ با مقدار ۰/۴ است که البته رگرسیون مثبتی را با مقدار ۰/۹ در سال ۲۰۰۸ در عرض های بالاتر از ۳۰ درجه شمالی در کشور ایران مشاهده شده است و همچنین در سال ۲۰۱۷ در اکثر مناطق ایران رابطه مثبتی و با مقدار رگرسیون ۲ تا ۱ را نشان داده است، این رطوبت نسبی پایین همراه با توده خشک شده هوا در شرایط نزولی شاخه سلول هادلی قرار دارد و شرایط خشکی را حاکم کرده است. این امر منجر به بارندگی بسیار کمی در این مناطق و در نتیجه شرایط جوی می شود. در سال ۱۹۹۹در شمال غرب ایران و در سال۱۹۹۰-۱۹۸۹ از عرض های بالاتر از ۳۰ درجه شمالی با همبستگی ۰/۳ مشاهده شده

است. همبستگی سلول هادلی با رطوبت نسبی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد که بیشنه همبستگی با سطح معناداری ۹۵ درصد با مقدار ۰/۴ در سال ۲۰۰۸ در عرض‌های بالاتر از ۳۰ درجه شمالی در ایران مشاهده می‌شود. در سال ۱۹۹۹در شمال غرب ایران و در سال۱۹۹۰-۱۹۸۹ از عرض‌های بالاتر از ۳۰ درجه شمالی با همبستگی ۰/۳ مشاهده می‌شود و همچنین در سال ۲۰۱۷ در اکثر مناطق ایران رابطه مثبتی را نشان می‌دهد. رطوبت نسبی پایین همراه با توده خشک شده هوا در شرایط نزولی شاخه سلول هادلی قرار دارد و شرایط خشکی را حاکم کرده است. و این امر منجر به عدم بارش نیوار ایران شده است که شاخص خشکسالی را با مقدار ۰/۷- در مناطق جنوب، جنوب غرب و جنوب شرقی ایران نشان داده است. این مطالعه با تحقیقات محب الحجه و همکارانش (۱۳۹۶) که با مطالعه ساختار هندسی رودباد آفریقا-آسیا و واکنش آن به گرمایش جهانی ثابت نموده‌اند، کاهش شدت رودباد در قطاع آفریقا می‌تواند به معنای کاهش ناپایداری رودباد و در نتیجه ناپایداری مدیترانه و نیز تضعیف انتشار شرق سوی سامانه‌ها به ایران شوند. همچنین قانقرمه (۱۳۹۹) که به ارزیابی تغییر موقعیت رودباد جنب حاره‌ای مستقر بر روی ایران و آینده نگری آن انجام داده‌اند مطابقت دارد، نتایج ایشان نشان داد زمانی که رودباد در موقعیت جنوبی ایران قرار گیرد، بادهای غربی به راحتی سامانه‌های رطوبتی را وارد کشور می‌کنند اما زمانی که به عرض‌های شمالی جا به جا شود از قدرت بادهای غربی و همچنین مقدار رطوبتی وارد به ایران کاسته می‌شود. همچنین تغییرات موقعیت رودباد جنب حاره در نواحی شرقی ایران از روند تغییرات افزایشی معنی‌داری برخودار است و با تحقیقات هارتمن و همکاران (Hartman & et al, 1982) مطابقت دارد که نتایج آنها نشان داد که تغییرات سالانه چرخش گرمسیری مربوط با OLR است و شرایط گرم و خشکی را در وردسپهر فوقانی ایجاد کرده است.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

منابع

- جلالی، مسعود؛ حسینی صدیق، سید محمود (۱۳۹۸)، *گسترش قطب سو چرخش سلول هادلی در نیمکره شمالی*، هواشناسی و علوم جو، جلد ۲، شماره ۲، تابستان، صص ۱۲۹-۱۴۲.
- حسینی صدیق، سید محمود؛ جلالی، مسعود (۱۴۰۰)، بررسی ساختار دینامیکی گردش نصف النهاری سلول هادلی در کمربند حاره، نیوار، دوره ۴۵، شماره ۱۱۳-۱۱۲، بهار و تابستان، صص ۱-۱۵.
- عالمزاده، شاهین. احمدی گیوی، فرهنگ. محب الحجه، علیرضا. یازجی، دانیال (۱۳۹۶). ساختار هندسی جت آفریقا-آسیا در وردسپهر زبرین و پاسخ آن به گرمایش زمین در مدل های *CMIP5*. *مجله ژئوفیزیک ایران*، جلد۱۱، شماره ۳، صفحه ۱ تا ۲۶.
- قانقرمه، عبدالعظیم (۱۳۹۹). ارزیابی تغییر موقعیت رودباد جنب حاره ای مستقر بر روی ایران و آینده نگری آن بر اساس دو مدل اقلیمی CanESM2 و GFDL-CM3T، *جغرافیا و مخاطرات محیطی*.
- گرمسیری مهوار، علی اکبر؛ عزیزی، قاسم، محمدی، حسین؛ کریمی احمدآباد، مصطفی (۱۴۰۰)، *گردش کلی جو در اطلس و آرام شمالی و ارتباط آن با توسعه و توقویت واچرخندهای جنب حاره آزورز و هاوایی*، فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۷، شماره ۳، پاییز.
- گرمسیری مهوار، علی اکبر؛ عزیزی، قاسم، محمدی، حسین؛ کریمی احمدآباد، مصطفی (۱۳۹۹)، *تحلیلی بر واچرخندهای جنب حاره در ترازهای میانی جو از شما آفریقا تا ایران*، *نشریه هواشناسی و علو جو*، جلد ۳، شماره ۲، تابستان، صص ۱۲۹-۱۴۷.
- Bin Wang, Michela Biasutti, Michael P. Byrne, Christopher Castro, Chih-Pei Chang, Kerry Cook, Rong Fu, Alice M. Grimm, Kyung-Ja Ha, Harry Hendon, Akio Kitoh, R. Krishnan, June-Yi Lee, Jianping Li, Jian Liu, Aurel Moise, Salvatore Pascale, M. K. Roxy, Anji Seth, Chung-Hsiung Sui, Andrew Turner, Song Yang, Kyung-Sook Yun, Lixia Zhang, and Tianjun Zhou (2021). **Monsoons Climate Change Assessment**. American Meteorological society. https://doi.org/DOI:10.1175/BAMS-D-19-0335.1.
- Broccoli, A. J., Dahl, K. A. and Stouffer, R. J., (2006), **Response of the ITCZ to Northern Hemisphere cooling**. Geophysical Research Letters, 33(1).
- Chen JY, Carlson BE, Del Genio AD (2002) **Evidence for strengthening of the tropical general circulation in the 1990s**. Science 295:838–841. doi:10.1126/science.1065835.
- Cook, Celia, Chris J.C. Reason, and Bruce C. Hewitson.(2004). "**Wet and dry spells within particularly wet and dry summers in the South African summer rainfall region**." Climate Research, 26: 17–31.
- Cook, K.H., (2004). **Hadley Circulation Dynamics: Seasonality and the Role of Continents. In "The Hadley Circulation: Past, Present, and Future**". Series: Advances in Global Change Research, Vol.21. Diaz, Henry F.; Bradley, Raymond S. (Eds.), 511 p., SBN: 1-4020-2943-8.
- CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) (2012) **Climate and water availability in South-Eastern Australia**: a synthesis of findings from phase 2 of the South Eastern Australian climate initiative (SEACI). 41.
- D'Agostino, R., J. Bader, S. Bordoni, D. Ferreira, and J. Jungclaus, (2020). **Northern Hemisphere monsoon response to mid-Holocene orbital forcing and greenhouse gas-induced global warming**. Geophys. Res. Lett., *46*, 1591–1601, https://doi.org/10.1029/2018GL081589.

- Dai, A (2013). **Increasing drought under global warming in observations and models. Nat. Climate Change**, 3, 52–58, doi: 10.1038/ nclimate1633.
- Feng, S., and Q. Fu, (2013). **Expansion of global drylands under a warmer climate.** Atmos. Chem. Phys., 13, 10081–10094, doi: 10.5194/acp-13-10081-2013.
- Gillet, N. P., Zwiers, F. W., Weaver, A. J. And Stott, P.A., 2003. **Detection of Human Influence on Sea-Level Pressure**, Nature, Vol. 40, No. 422, PP. 292-294.
- Hartmann, D. L., (1994). **Global Physical Climatology**, Academic Press.
- Hartmann, D. L., (2016). Chapter 6 - **atmospheric general circulation and climate, in Global Physical Climatology (Second Edition)**, second edition ed., pp. 159 – 193, Elsevier, Boston.
- Hou, A. Y. and Lindzen, R. S., (1992), **The influence of concentrated heating on the Hadley circulation**. Journal of the atmospheric sciences, 49(14), 1233-1241. http://iridl.ldeo.columbia.edu/.
- Hu YY, Fu Q (2007) **Observed poleward expansion of the Hadley circulation since 1979**.Atmos Chem Physics 7:5229–5236. doi:10.5194/acp-7-5229-2007.
- IOCI (2012). **Western Australia's weather and climate: A synthesis of Indian Ocean Climate Initiative (IOCI)** stage 3 research. CSIRO and BoM, 119 pp.
- Kutile, H., Maheras, P., and Guika, S. (1998). **Singularity of Atmospheric Pressure in the Eastern Mediterranean and its Relevance to Internal Variations of Dry and Wet Spells**. Int. J. Climatol, 18(3): 317-327.
- Levine, X. J. and Schneider, T., (2011), **Response of the Hadley circulation to climate change in an aquaplanet GCM coupled to a simple representation of ocean heat transport**. Journal of the Atmospheric Sciences, 68(4), 769-783.
- Lindzen, R. S. and Hou, A. V., (1988), **Hadley circulations for zonally averaged heating centered off the equator**. Journal of the Atmospheric Sciences, 45(17), 2416-2427
- Lu, J., Chen, G. and Frierson, D. M., (2008), **Response of the zonal mean atmospheric circulation to El Niño versus global warming**. Journal of Climate, 21(22), 5835-5851.
- Ma, S., and Coauthors, (2021). **Detectable anthropogenic shift toward heavy precipitation over eastern China**. J. Climate, *30*, 1381–1396, https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0311.1.
- Menzel, M. E., Waugh, D., & Grise, K. (2019). **Disconnect between Hadley cell and subtropical jet variability and response to increased CO2**. Geophysical Research Letters, 46, 7045–7053. https://doi.org/10.1029/ 2019GL083345.
- Mitas CM, Clement A (2005). **has the Hadley cell been strengthening in recent decades?** Geophys Res Lett 32(3):L03809. Doi: 10.1029/2004GL021765.
- Morales MS, Christie DA, Villalba R et al (2012). **Precipitation changes in the South American Altiplano since 1300AD reconstructed by tree-rings**. Clim Past 8:653–666. Doi: 10.5194/ cp-8-653-2012.
- Nguyen, H., C. Lucas, A. Evans, B. Timbal, and L. Hanson (2015). **Expansion of the Southern Hemisphere Hadley Cell in REsponse to Greenhouse Gas Forcing**. J. Climate, 28, 8067–8077, doi:0.1175/JCLI-D-15-0139.1.
- Numaguti, A.,(1995), **Dynamics and energy balance of the Hadley circulation and the tropical precipitation zones. Part II: Sensitivity to meridional SST distribution**. Journal of the atmospheric sciences, 52(8), 1128-1141.
- Oort, A. H. and Yienger, J. J.,(1996) **bserved interannual variability in the Hadley circulation and its connection to ENSO**. Journal of Climate, 9(11), 2751-2767.
- Ru-Ping HUANG, Shang-Feng CHEN, Wen CHEN & Peng HU (2018). **Has the regional Hadley circulation over western Pacific during boreal winter been strengthening in recent decades?,** Atmospheric and Oceanic Science Letters, 11:6, 454-463, DOI: 10.1080/16742834.2018.1507412

- Sche.., J., and D. M. W. Frierson (2012). **Robust future precipitation declines in CMIP5 largely relfect the poleward expansion of model subtropical dry zones. Geoph** Res. Lett., 39, L18704, doi: 10.1029/2012GL052910.
- Su, H., Jiang, J. H., Zhai, C., Shen, T. J., Neelin, J. D., Stephens, G. L., & Yung, Y. L. (2014). **Weakening and strengthening structures in the Hadley Circulation change under global warming and implications for cloud response and climate sensitivity**. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119, 5787–5805. https://doi.org/10.1002/2014JD021642.
- Trenberth, K., and D. Stepaniak, (2003). **Seamless poleward atmospheric energy transports and implications for the Hadley circulation**, J. Climate, 16(22), 3706–3722, doi:10.1175/1520-0442(2003)016<3706:SPAETA>2.0.CO;2.
- Wang, B; Jin, C; Liu, J (2020), **Understanding Future Change of Global Monsoons Projected by CMIP6 Models**. Journal of Climate.volume 3. p:6471-6488. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0993.1.
- Waugh, D. W., Coauthors. (2018). **Revisiting the relationship among metrics of tropical expansion**. J. Climate, https://doi.org/ 10.1175/JCLI-D-18-0108, in press.
- Wielicki BA, Wong T, Allan RP, Slingo A, Kiehl JT, Soden BJ, Gordon CT, Miller AJ, Yang SK, Randall DA, Robertson F, Susskind J, Jacobowitz H (2002). **Evidence for large decadal variability in the tropical mean radiative energy budget**. Science 295:841–843. Doi: 10.1126/ science.1065837.
- Wielicki BA, Wong T, Allan RP, Slingo A, Kiehl JT, Soden BJ, Gordon CT, Miller AJ, Yang SK, Randall DA, Robertson F, Susskind J, Jacobowitz H (2002) **Evidence for large decadal variability in the tropical mean radiative energy budget**. Science 295:841–843. doi:10.1126/ science.1065837.
- Xian, T.; Xia, J.; Wei, W.; Zhang, Z.; Wang, R.; Wang, L.-P.; Ma, Y.-F. (1699). **Is Hadley Cell Expanding?** Atmosphere *2021*, 12. https://doi.org/10.3390/ atmos12121699.
- Xian, T.; Xia, J.; Wei, W.; Zhang, Z.; Wang, R.; Wang, L.-P.; Ma, Y.-F. **Is Hadley Cell Expanding?** Atmosphere (2021). 12, 1699. https://doi.org/10.3390/ atmos12121699.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی