

تولید انرژی از جت استریم

چکیده: به دلیل ملاحظات زیست محیطی اهمیت استفاده از انرژی پاک دو چندان شده است. در این راستا، یکی از راهکارهای پیشنهادی، تولید انرژی از بادهای ارتفاع بلند و یا جت استریم است. از سوی دیگر در تحقیقات پیشین موضوعات جت استریم، نحوه تشکیل بادهای ارتفاع بلند، اثرات تغییرات اقلیمی بر جت استریم و چگالی قدرت باد در نقاط مختلف جهان به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته اند. در این مقاله ضمن تجمیع کلیه مباحث مرتبط با این موضوع، در ابتدا با بیان لایه های اتمسفر، حرکت هوا در اطراف زمین و نحوه تشکیل جت استریم، اثرات تغییرات آب و هوایی بر این بادهای مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهند، وجود تغییرات دمایی ناشی از تابش خورشید و ایجاد سه سلول دمایی هادلی، فرل و قطبی همزمان با اثر نیروی کوریولیس بر روی توده های متحرک هوا، موجب ایجاد جت استریم در دو نیم کره شمالی و جنوبی در عرض های ۳۰ درجه و ۶۰ درجه می شود. تغییرات آب و هوایی، باعث افزایش دامنه موج جت استریم و توسعه آن به شمال و جنوب شده است. بررسی ها نشان دهنده این موضوع است که ایران حائز مقام دهم در خاورمیانه به لحاظ چگالی انرژی بادهای ارتفاع بلند در ارتفاع ۵۰۰ متری از سطح زمین است. در ارتفاع ۱۰۰۰ متری نیز، در ۵۰ درصد دوره زمانی، غرب و مرکز ایران دارای چگالی قدرت باد 0.3 kW/m^2 و در ارتفاع ۱۰۰۰۰ متری و در همین دوره زمانی، تمامی نواحی ایران دارای چگالی قدرت باد 3 kW/m^2 هستند.

واژه های راهنما: جت استریم، بادهای ارتفاع بلند، توربین بادی، تولید انرژی، تغییرات آب و هوایی

مونا محمدی*

رئیس گروه سنجش و توزیع آب
شرب و صنعت، سازمان آب و
برق خوزستان، اهواز

صابر علیدادی

معاون آبرسانی، سازمان آب و
برق خوزستان، اهواز

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۱

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۵

Power generation from jet stream

Moona

Mohammadi *

Leader of
Measurement and
Distribution Group of
Drinking and Industrial
water, Khuzestan Water
and Power Authority
(KWPA), Ahvaz

Saber Alidadi

Deputy Director of
Water Supply,
Khuzestan Water and
Power Authority
(KWPA), Ahvaz

Abstract: Due to environmental considerations, the importance of using clean energy has been signified. In this regard, one of the proposed solutions is to generate energy from high-altitude winds or jet streams. On the other hand, in previous research, the issues of the jet stream, the formation of high-altitude winds, the effects of climate change on the jet stream, and wind power density in different parts of the world have been investigated separately. In this paper, while summarizing all topics related to this issue, the effects of climate change on these winds have been investigated by stating the layers of the atmosphere, the movement of air around the earth, and how the jet stream is formed. The results show that the presence of temperature changes caused by solar radiation and the creation of three temperature cells, Hadley, Ferrel, and Polar, simultaneously with the effect of the Coriolis force on moving air masses, causes the creation of a jet stream in the northern and southern hemispheres at latitudes of 30 degrees and 60 degrees. Climate change has increased the amplitude of the jet stream and its expansion to the north and south. Surveys show that Iran ranks 10th in the Middle East in terms of the energy density of high-altitude winds at a height of 500 meters above the ground. At an altitude of 1000 meters, in 50% of the time period, the west and center of Iran have a wind power density of 0.3 kW/m^2 , and at an altitude of 10000 meters and in the same time period, all areas of Iran have a wind power density of 3 kW/m^2 .

Keywords: Jet stream, High altitude winds, Wind turbines, Power generation, Climate change

۱- مقدمه

[۷،۸]. با توجه به این نتیجه، استفاده از باد های ارتفاع بلند می تواند موجب استحصال انرژی قابل توجهی گردد. بادهای در ارتفاعات بالا عموماً در ارتفاع بین ۵۰۰ تا ۱۵۰۰۰ متر از سطح زمین می وزند در حالی که توربین های بادی متداول دارای ارتفاعی بین ۸۰ تا ۱۵۰ متر هستند بنابراین استفاده از این بادهای که به نام جت استریم شناخته می شوند نیازمند تکنولوژی خاصی است [۹]. فناوری های متفاوتی برای به دام انداختن انرژی جنبشی ارتفاعات بلند پیشنهاد شده است که می توان به لادرمیل، کایت جن، فلائی جن و ماجن اشاره کرد [۱۰،۹].

با توجه به مطالب فوق، اساس استحصال انرژی از توربین های ارتفاع بلند استفاده از انرژی جت استریم است. بنابراین شناخت این پدیده و نحوه شکل گیری و نیز نواحی ایجاد و جریان آن کلید بسیار مهمی برای بکارگیری انرژی حاصل از آن است. علاوه بر این موضوع، تغییرات آب و هوایی در کره زمین باعث شده است که این پدیده از این تغییرات متأثر گشته و گستره ی تاثیر گذاری آن تغییر یابد. در این مقاله علاوه بر پرداختن به مساله جت استریم، آخرین تحقیقات در خصوص تاثیرات تغییرات اقلیمی بر روی گستره جریان آن بیان می گردد. همچنین نقشه چگالی قدرت باد در ارتفاع های مختلف و نیز وضعیت این بادهای در اقلیم ایران مورد بررسی قرار می گیرد.

۲- لایه های اتمسفر

اتمسفر زمین دارای چند لایه است، هر یک از آن ها دارای ویژگی های خاص خود می باشد. با حرکت از سطح زمین به طرف بالا، اولین لایه اتمسفر به نام تروپوسفر یا اتمسفر زیرین شکل می گیرد. این لایه دارای ارتفاع ۸ تا ۱۲ کیلومتری بوده که در مناطق مختلف (قطب و استوا) متفاوت است (شکل ۱). تروپوسفر لایه ای متلاطم است و آب و هوای زمین در آن جریان دارد. بیشترین بخار آب و بیشترین درصد اتمسفر در این لایه موجود بوده و ابرها در این ناحیه ایجاد می شوند. بیشترین ارتفاع این لایه بر روی استوا و کمترین آن بر روی قطب قرار دارد. دومین لایه که به استراتوسفر معروف است، از فاصله ۱۲ تا ۵۰ کیلومتری بالای سطح زمین امتداد می یابد. اوزون در این لایه متمرکز است [۱۱]. بر خلاف لایه تروپوسفر که با افزایش ارتفاع، حرارت کاهش می یابد. در این لایه با افزایش ارتفاع درجه حرارت افزایش می یابد. علت افزایش حرارت کاهش آشفتگی جریان هوا و وجود ملکول های اوزن است. ملکول های اوزون نور فرابنفش خورشید (UV) را جذب کرده و به حرارت تبدیل می کنند به همین دلیل در این لایه هر چه ارتفاع افزایش می یابد میزان دما نیز افزایش می یابد.

استفاده از انرژی باد از دیرباز مورد توجه بشر بوده است. ایرانیان در قرن هفتم میلادی نخستین مردم پیشتاز در این راه بوده اند و با نصب دکل های عمودی بلند در سیستان که بر روی آن ها پره هایی مستطیلی نصب بوده موفق شدند با نیروی باد چرخ چاه را به گردش درآورند و آب را از چاه به مزارع برسانند و نخستین نیروگاه بادی جهان را به نام خود ثبت نمایند [۱،۲]. با اینکه سابقه استفاده از آسیاب بادی در ایران به دوپست سال قبل از میلاد بازمی گردد اما نخستین مورد ثبت شده آن در اروپا مربوط به سده های ۱۱ و ۱۲ پس از میلاد است [۳]. نخستین گام برای تولید برق در کلاس مگاوات و با اتصال به شبکه در قالب استفاده از توربین بادی، در بریتانیا و در سال ۱۹۵۱ برداشته شد [۴]. بعد از این پیشرفت انرژی باد به تدریج به یکی از انرژی های تجدید پذیر قدرتمند در جهان تبدیل شده به گونه ای که طبق گزارش های منتشر شده از سال ۲۰۰۰ تا به اکنون متوسط نرخ رشد سالیانه این انرژی ۲۱ درصد بوده است [۵].

توربین های بادی تجاری در سال ۱۹۸۰ دارای قطر روتور و ارتفاع هاب ۲۰ متر و توان نامی ۱۰۰ کیلووات بودند. در سال ۲۰۱۷، با توسعه فناوری، قطر روتور و ارتفاع هاب به ترتیب ۱۱۳ متر و ۱۲۸ متر و قدرت نامی به ۲/۹۷ مگاوات رسید. قیمت تمام شده انرژی و اندازه توربین دو فاکتور مهم، موثر و محدود کننده در طراحی و همچنین توسعه تکنولوژی توربین های بادی هستند. به لحاظ تئوری افزایش ارتفاع هاب موجب دسترسی به سطح پایدارتری از انرژی باد است زیرا در ارتفاع های بالاتر، باد، کمتر تحت تاثیر عواملی نظیر ساختمان ها، درختان و یا دیگر موانعی است که همگی موجب کاهش قدرت آن می شوند. اما افزایش ارتفاع هاب دارای محدودیت هایی نظیر افزایش قیمت و نیز مشکلات حمل و نقل است. افزایش میزان فولاد بکار رفته یکی از عوامل مهم موثر بر افزایش قیمت تمام شده خواهد بود [۶]. به دلیل مشکلات یاد شده، دانشمندان از سال ۲۰۰۷ به دنبال راهکاری جدید بودند تا بتوانند علاوه بر گذر از مشکلات افزایش هزینه و حمل و نقل، به منابع پایدار و جدید انرژی باد دست یابند. این سیستم شامل استفاده از تجهیزاتی است که در ارتفاع بسیار بالاتری از سطح دریا قرار دارند. باد در ارتفاعات بالا، پایدارتر، ماندگارتر و دارای سرعت بالاتر است. همچنین قدرت تولید در توربین های بادی متناسب با توان سوم سرعت است. بنابراین با فرض ثابت بودن دیگر پارامترها که شامل چگالی و سطح می باشد، به عنوان مثال اگر سرعت باد دو و یا سه برابر شود، میزان توان استحصالی به ترتیب ۸ و ۲۷ برابر خواهد شد

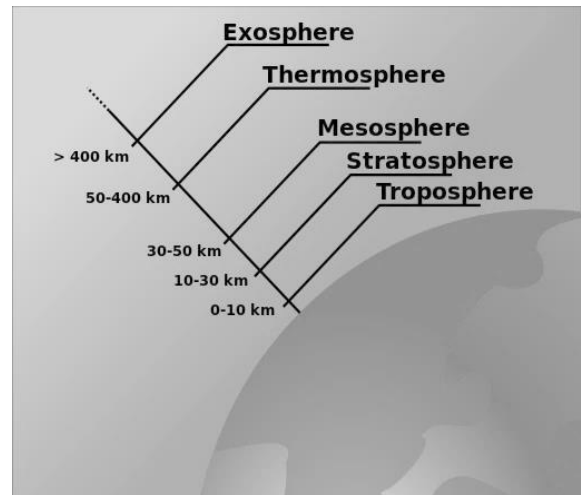
۳- حرکت هوا در اطراف زمین

محور زمین یک خط فرضی است که از مرکز کره زمین می‌گذرد زاویه ای که محور زمین در فضا نسبت به خورشید ایجاد می‌کند، اندکی مایل بوده و در حدود ۲۳/۴۵ درجه است. حرکت زمین به دور خود (حرکت وضعی) باعث ایجاد شب و روز و حرکت زمین به دور خورشید (حرکت انتقالی) باعث ایجاد فصل‌ها می‌شود. به دلیل انحراف محور زمین، اثر حرکت انتقالی زمین بر روی بخش‌های مختلف کره زمین متفاوت بوده و باعث ایجاد چهار فصل در طی سال می‌شود. چرخش زمین به دور محور خود مانع از حرکت مستقیم هوا از طرف استوا به سوی قطب‌ها شده است (شکل ۲). علاوه بر این، حرکت وضعی زمین منجر به ایجاد نیروی کوریولیس می‌شود. اثر این نیرو به صورت انحراف بادها نمایان می‌گردد [۱۴].

نیروی کوریولیس، یک شبه نیرو است. عملکرد این نیرو منجر به انحراف اجسام در حال حرکت به بیرون از خط راست، از دید یک ناظر درون یک دستگاه چرخان می‌شود. شکل ۳ حرکت گلوله در دو دستگاه مرجع لخت و غیر لخت را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در دستگاه مرجع لخت که در بخش بالای تصویر نشان داده شده است، گلوله شماره ۱ در بخش بالای تصویر در مسیری مستقیم، در صفحه چرخان با اصطکاک ناچیز حرکت می‌کند، اما بیننده که با شماره ۲ نشان داده شده است که بر روی مرجع چرخان یا غیر لخت قرار دارد، بخش پایینی تصویر، به دلیل نیروی کوریولیس که متناسب با سرعت چرخش و توان دوم نیروی گریز از مرکز می‌باشد، گلوله شماره ۱ را در حال حرکت در مسیری خمیده می‌بیند. [۱۵].



شکل ۲ جریان هوا در صورت عدم چرخش زمین به دور خود [۱۳]

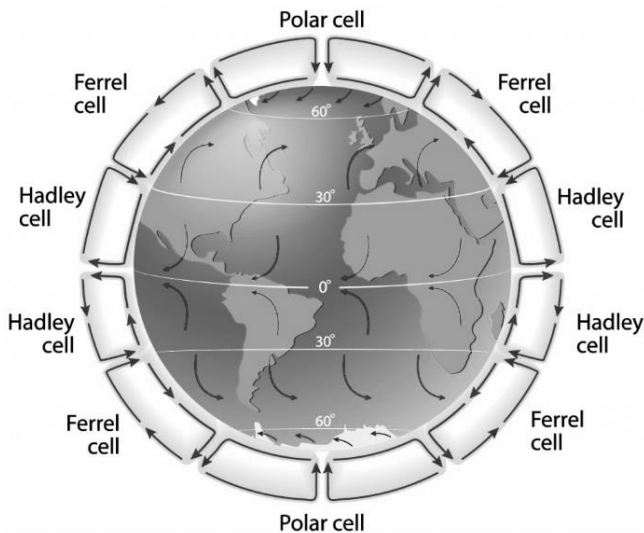


شکل ۱ لایه‌های مختلف اتمسفر زمین [۱۱]

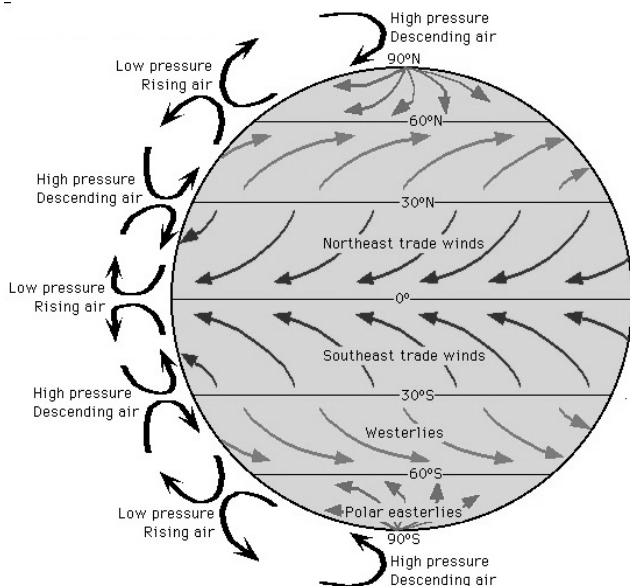
به دلیل آشفتگی کم، جت‌های مسافری تجاری در این لایه پرواز می‌کنند. لایه سوم اتمسفر زمین مزوسفر است. این لایه در ارتفاع ۵۰ تا ۸۰ کیلومتری از سطح زمین قرار دارد. شهاب سنگ‌هایی که به اتمسفر زمین می‌رسند در این لایه می‌سوزند. روند کاهش دمایی در مزوسفر مانند تروپوسفر است و با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد. سردترین نقطه جو زمین با دمای ۹۰ درجه زیر صفر در این لایه قرار دارد. علاوه بر روند کاهشی دما، با افزایش ارتفاع، فشار نیز در این لایه کاهش می‌یابد. میزان فشار هوا در این لایه کمتر از یک درصد فشار هوا در سطح دریا است. لایه چهارم تروپوسفر بوده که در ارتفاع ۸۰ تا ۷۰۰ کیلومتری از سطح زمین قرار دارد. این لایه، پرتوهای پر انرژی ایکس و فرابنفش ساطع شده از خورشید را جذب می‌کند به همین دلیل دمای این لایه از ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد متغیر است. پنجمین و آخرین لایه زمین به نام اگزوسفر شناخته می‌شود و در ارتفاع ۷۰۰ تا ۱۰ هزار کیلومتری از سطح زمین قرار دارد. در این لایه هوا بسیار رقیق بوده و به فضای خارج از جو زمین بیشتر شباهت دارد و به طور پیوسته هوا به بیرون جو زمین نشت پیدا می‌کند. به دلیل نشت مداوم هوا از این لایه کارشناسان ارتفاع ۱۰۰ هزار تا ۱۹۰ هزار کیلومتری از سطح زمین را انتهای لایه اگزوسفر اتمسفر زمین می‌دانند [۱۱].

همان‌گونه که در تشریح لایه‌های مختلف زمین مشخص گردید مرطوب‌ترین لایه اتمسفر که ابرها نیز در آن شکل می‌گیرند تروپوسفر است. ارتفاع تروپوسفر بر فراز نواحی استوایی تا ۲۰ کیلومتر نیز می‌تواند افزایش یابد. اما ارتفاع آن در زمستان‌های نقاط قطبی می‌تواند تا ۷ کیلومتر کاهش یابد. این لایه نقش مهمی را در ایجاد تغییرات جوی بر روی کره زمین دارد [۱۲].

شرق می‌گردد. با رسیدن به عرض جغرافیایی ۳۰ درجه، هوای خنک شده و خشک شروع به فرو رفتن می‌کند و در نزدیکی سطح یک جریان برگشتی حلقه را کامل می‌کند و در طول مسیر شروع به جذب رطوبت می‌نماید. در این ضلع چرخشی اثر کوریولیس منجر به انحراف بادها به سمت غرب می‌شود [۱۷، ۱۶]:

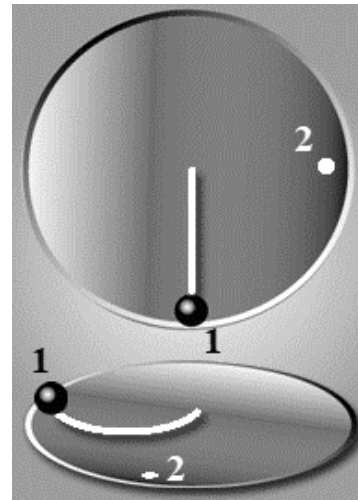


شکل ۴ سلول‌های هوایی سه‌گانه در اتمسفر [۱۸]



شکل ۵ نحوه چرخش هوا در عرض‌های مختلف جغرافیایی [۱۹]

علت فرو رفتن هوا در عرض ۳۰ درجه را می‌توان با بقای ممنتم زاویه ای بیان کرد. در یک سامانه چرخشی اگر هیچ گشتاور خالصی بر سیستم اثر نکند، ممنتم زاویه ای کل سیستم



شکل ۳ حرکت گلوله در دستگاه مرجع لخت و مرجع چرخان (غیر لخت) [۱۵]

خورشید تنها منبع گرمایی زمین است. از سویی دیگر به دلیل انحراف در محور زمین و انحنای آن، وجود اتمسفر، ابرها، وجود برف و یخ‌های قطبی، بخش‌های مختلف زمین به شکل‌های متفاوتی گرم می‌شوند. این وضعیت باعث تفاوت دمایی زیادی میان استوا و قطب‌ها می‌گردد، اما وجود چرخش در اتمسفر مانع از افزایش دمایی مداوم در استوا و نیز کاهش دمایی مداوم در قطب‌ها شده و این چرخش باعث انتقال انرژی و ایجاد باد در بخش‌های عمده‌ای از سطح زمین شده است. چرخش در اتمسفر در دو نیمکره شمالی و جنوبی در سه سلول به نام‌های هادلی، فرل^۲ و قطبی‌گر لایه تروپوسفر زمین اتفاق می‌افتد. شکل‌های ۴ و ۵ نحوه چرخش هوا در این سه سلول را نشان می‌دهد [۱۷، ۱۶].

در میان این سه سلول چرخشی، سلول هادلی بزرگترین سلول بوده که میان استوا تا عرض ۳۰ درجه شمالی و جنوبی در چرخش است. وجود هوای گرم و مرطوب در نزدیکی استوا موجب بارش شدید می‌شود. ایجاد بارش منجر به آزاد شدن گرمای نهان شده و در نتیجه باعث ایجاد حرکات بالارونده قوی هوا می‌گردد. این هوا در ارتفاع لایه تروپوسفر اتمسفر بالا می‌رود. با رسیدن هوا به انتهای تروپوسفر و رسیدن به استراتوسفر که هوا در آن شناور نیست، هوا قادر به ادامه حرکت بالارونده خود نخواهد بود. از سویی دیگر هوا به طور مدام از سطح استوا بالا می‌آید، بنابراین به دلیل فشاری که به آن وارد می‌گردد به سمت قطب سوق داده می‌شود. انحراف هوا به سمت قطب و همچنین وجود اثر کوریولیس منجر به انحراف این هوا به سمت

³ Polar Cell

¹ Hadley Cell

² Ferrel Cell

می گردد و به این ترتیب حلقه چرخش هوا تکمیل می شود [۲۰، ۱۶].

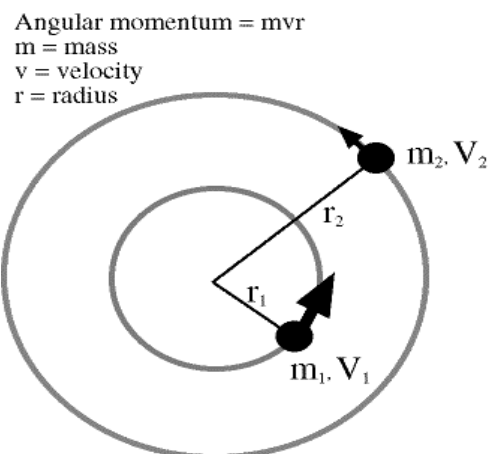
وجود سرعت های کم و سرعت های بالا در سطح زمین به ترتیب در عرض های ۳۰ درجه و ۶۰ درجه باعث ایجاد کمربند های پر فشار و کم فشار می شود. به این ترتیب کمترین بارش ها در عرض ۳۰ درجه و بیشترین بارش ها و هوای طوفانی در عرض های ۶۰ درجه اتفاق می افتد (شکل های ۴ و ۵) [۱۷، ۱۶].

۴- نحوه ایجاد جت استریم

پس از آشنایی با لایه های مختلف اتمسفر و نحوه گردش هوا در اطراف زمین، درک پدیده جت استریم آسان تر خواهد شد. همان گونه که در بخش ۳ اشاره شد، وجود گرادیان دمایی و اثر کوریولیس منجر به ایجاد سه سلول دمایی و ایجاد نواحی با بیشترین تغییرات دمایی در نواحی اطراف ۳۰ درجه شمالی/ جنوبی و ۵۰ تا ۶۰ درجه شمالی/ جنوبی می شود. زمانی که تغییرات دمایی میان دو منطقه افزایش یابد، قدرت باد نیز افزایش خواهد یافت. بنابراین این نواحی دارای قوی ترین باد در اتمسفر فوقانی هستند. این باد در ۵۰ تا ۶۰ درجه شمالی/ جنوبی به نام جت استریم قطبی^۴ و در ۳۰ درجه شمالی/ جنوبی به نام جت استریم جنب حاره ای^۵ نامیده می شود (شکل ۷). ارتفاع جت استریم از ۶ تا ۱۲ کیلومتر و سرعت آن می تواند به بیش از ۴۴۲ کیلومتر بر ساعت برسد [۲۳، ۲۲].

با توجه به اینکه جت استریم انرژی جنبشی خود را از تضاد دمایی میان نواحی استوایی و نواحی قطبی کسب می کند، در زمستان که این تضاد دمایی قوی تر است، جت استریم نیز قوی تر بوده و به سمت استوا کشیده می شود و بر عکس در تابستان با تضعیف این تضاد دمایی، به عرض های بالا کشیده خواهد شد [۲۴]. جریان های جت ایجاد شده، معمولاً در یک مسیر مستقیم از غرب به شرق جریان ندارند، بلکه در فرورفتگی و برآمدگی های متناوب، شکل پرو پیچ و خم پیدا می کنند [۲۵]. شکل ۸ این جریان پر پیچ و خم را برای جت استریم قطبی نشان می دهد. همان گونه که ملاحظه می شود در این نوع جریان، بادهای سرد قطبی و بادهای گرم استوایی با یکدیگر مواجه می شوند که منجر به ایجاد جریانی با قله های گرم و دره هایی سرد با گردابه هایی مثبت و یا منفی در دره و یا قله های جریان می گردد. گردابه های انتقالی مثبت^۶ و منفی^۷ منجر به ایجاد جریان های چرخشی

نسبت به زمان ثابت می ماند. در سلول هادلی با حرکت کردن جرم هوا به سمت عرض های بالا، شعاع چرخشی کوچک خواهد شد (شکل ۶) بنابراین به دلیل بقای ممتمم زاویه ای با توجه به اینکه جرم ثابت است، سرعت افزایش می یابد. سرعت جریان به قدری افزایش می یابد که دیگر قادر به افزایش سرعت نیست در این زمان حرکت آن به سمت قطب متوقف می شود و فرو می ریزد و با برگشت جریان به سمت استوا حلقه چرخشی کامل می گردد [۲۰].



Angular momentum = mvr
 m = mass
 v = velocity
 r = radius

Conservation of angular momentum
 $m_1 v_1 r_1 = m_2 v_2 r_2$

شکل ۶ ممتمم زاویه ای و قانون بقای ممتمم زاویه ای [۲۰]

سلول فرل در میانه ی عرض جغرافیایی در ۳۰ درجه تا ۶۰ درجه شمالی و جنوبی در جریان بوده و جهت حرکت هوا در آن عکس سلول های هادلی و قطبی است و بیشتر شبیه یک چرخ دنده عمل می کند. در نیمکره شمالی، باد سطحی از جهت جنوبی، جریان می یابد، اما به دلیل وجود اثر کوریولیس به سمت غرب منحرف می شود و با برگشت جریان به سمت عرض ۳۰ درجه حلقه چرخشی بسته می شود [۱۷، ۱۶].

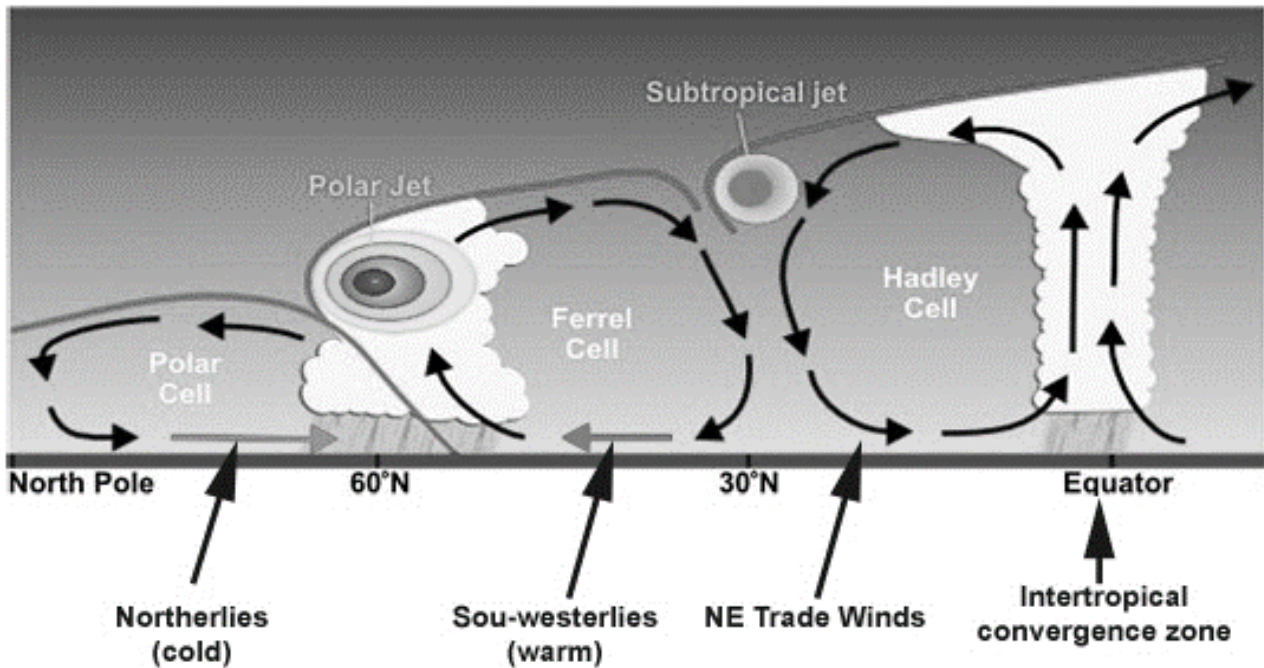
سلول قطبی در میان سه سلول اتمسفر، ضعیف ترین و کوچک ترین سلول است که در عرض های میان ۶۰ تا ۹۰ درجه در دو نیمکره شمالی و جنوبی در جریان است. این سلول به دلیل مراکز پر فشار قطبی و جنب قطبی به وجود آمده است. هوای سرد پرفشار به عرض های پایین تر ریزش می کند. با کاهش عرض، بر اساس بقای ممتمم زاویه ای، با افزایش شعاع چرخشی سرعت به تدریج کاهش می یابد به طوری که هوا نمی تواند پایین تر از عرض ۶۰ درجه گسترش یابد و به سمت قطب باز

⁶ Positive Vorticity Advection
⁷ Negative Vorticity Advection

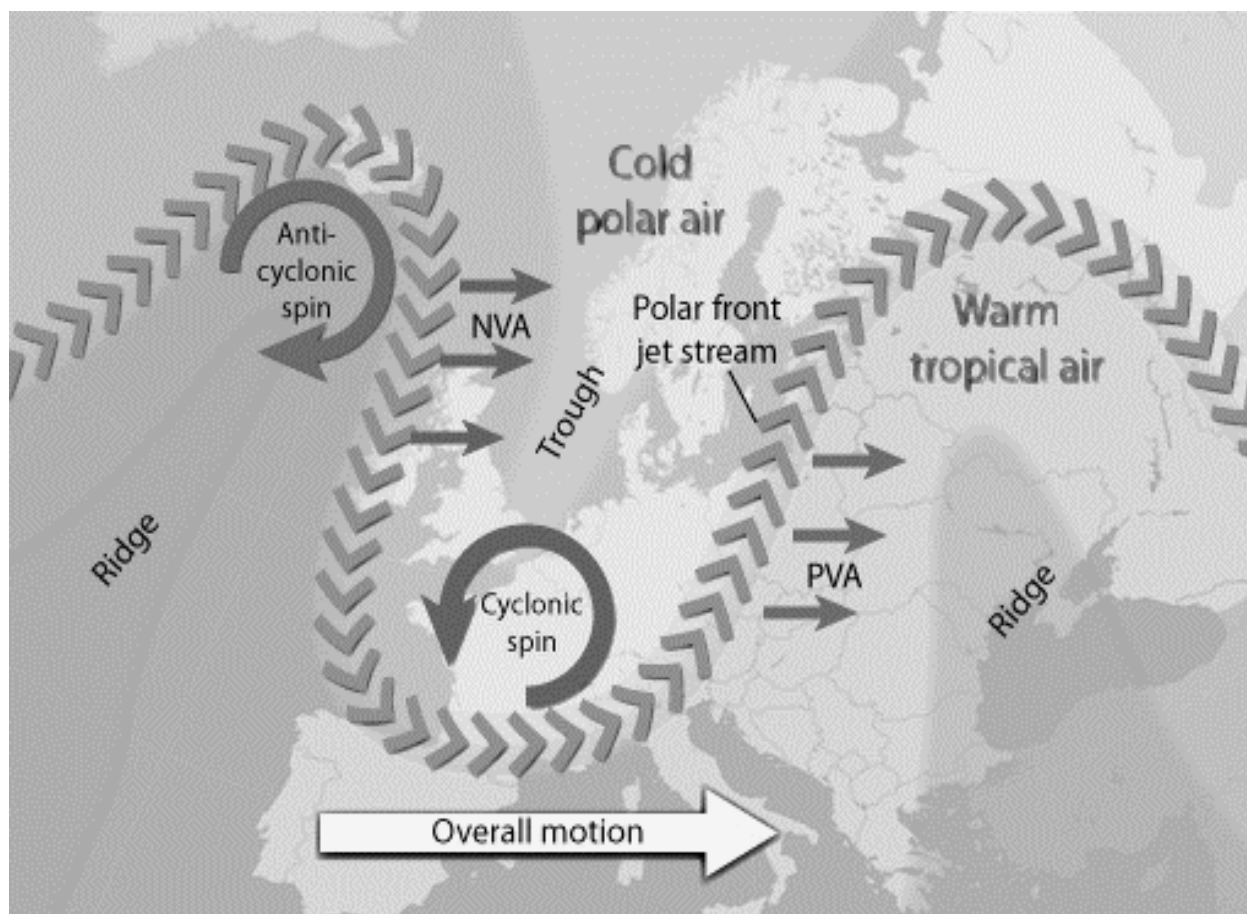
⁴ Polar Cell
⁵ Subtropical Jet Stream

صعود هوا در لایه های بالایی اتمسفر و قوی تر شدن سیستم های کم فشار می شود.

در جهت و یا خلاف جهت عقربه های ساعت می شوند. یک چرخش و یا سیکلون مثبت (سمت راست شکل ۸) منجر به



شکل ۷ مکان تشکیل دو جت استریم قطبی و جنب حاره‌ای [۲۱]



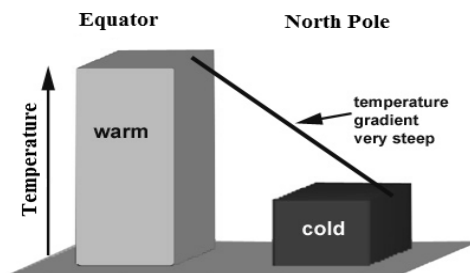
شکل ۸ پیچ و خم ایجاد شده در جت استریم قطبی [۲۶]

این موضوع باعث جذب بیشتر اشعه خورشید شده و میزان یخ بیشتری، آب خواهد شد. علت این موضوع را باید در اثرات بازگشت نور در سطوح روشن و تیره جستجو کرد. هنگامی که نور خورشید به سطوحی سفید مانند برف و یا یخ برخورد می کند، بیشتر آن بدون اینکه محیط اطراف خود را گرم کند به فضا بازتاب می شود. در حالی که اگر این نور به سطوح تاریک تری برخورد کند انعکاس کمتر خواهد بود. به عبارت دیگر بازتاب نور از سطوح روشن بیش از سطوح تیره است و سطوح تیره تمایل دارند گرمای بیشتری را جذب نمایند. این اثر، یعنی درصد بازتاب نور از سطح یک جسم را، سپیدایی یا آلبیدو^۸ می نامند. میزان انعکاس نور از سطح برف ۷۵ تا ۹۰ درصد بوده در حالی که میزان انعکاس از سطح آب ۵ تا ۱۵ درصد است. بنابراین در صورت ذوب برف و یخ در اثر گرمایش زمین، میزان جذب نور خورشید بیشتر شده و به دنبال آن ذوب برف بیشتری صورت خواهد گرفت که در مقایسه با سایر موارد انعکاس از سطوح، دارای بیشترین مقدار خود است [۲۷، ۲۸]. با کاهش سطح یخ، میزان جذب گرما و اشعه خورشید بیشتر شده و در نتیجه سرعت گرمایش در قطب بیشتر از استوا خواهد شد. افزایش دمای قطب باعث می شود که میزان گرادیان دمایی ایجاد شده میان نواحی جنب قطبی با جنب حاره‌ای کاهش یابد. شکل ۱۰ علت این پدیده را نشان می دهد. همان گونه که ملاحظه می شود با بالا رفتن دما در قطب، دما در آن منطقه افزایش می یابد، به دنبال آن اختلاف دمایی ایجاد شده میان دو ناحیه قطبی و جنب حاره ای نیز کاهش خواهد یافت. به دنبال این پدیده بادهای غربی تضعیف شده و دامنه موج جت استریم افزایش می یابد. این رفتار غیر عادی جت استریم باعث توسعه پیچ و خم‌ها به سمت جنوب و شمال می شود (شکل ۱۱) [۲۶].

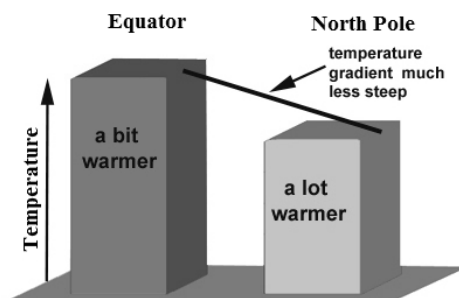
در این مناطق طوفان های همرفتی ایجاد شده و منجر به بارش شدید و سیل می گردد. در مقابل در بخش چرخش و یا سیکلون منفی (بخش چپ شکل ۸) حجم هوا به جای صعود پایین می آید. فرود هوا موجب از بین رفتن همرفت و طوفان های سیکلونی می گردد. بنابراین با عبور این ناحیه از جت، پایداری هوا در آن مناطق به وجود می آید [۲۶].

۵- تاثیر تغییرات آب و هوایی بر جت استریم

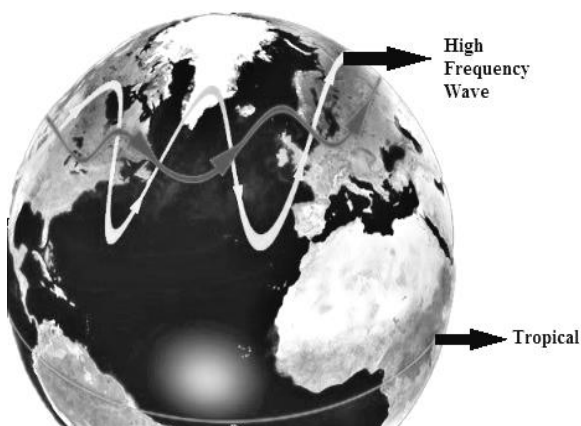
منبع انرژی برای جریان جت استریم وجود گرادیان دمایی میان نواحی جنب قطبی^{۱۰} و جنب حاره‌ای است (شکل ۹). در این پدیده، جت تشکیل شده یک جریان پیوسته و یکنواخت از سیستم هوایی است که از یک سوی زمین به سوی دیگر آن حرکت می کند. این موضوع به این معنی است که هر سیستم فشار پایین و یا فشار بالا که باعث پدیده‌های مختلف آب و هوایی می شود تنها برای چند روز دوام دارد و با آمدن سیستم بعدی، مختل می گردد [۲۷]. به دلیل گرمایش جهانی، میزان گرم شدن در مناطق قطبی سریعتر از مناطق با عرض جغرافیایی پایین و نزدیک استواست (شکل ۱۰). یکی از دلایل این موضوع، بازتاب اشعه خورشید توسط یخ است. در حالی که دمای متوسط جهانی افزایش یابد یخ های قطب به صورت نیمه ذوب تغییر شکل می یابند [۲۶].



شکل ۹ اختلاف میان هوای استوا و قطب در شرایط قطبی (پیش از گرمایش زمین) [۲۶]



شکل ۱۰ اختلاف میان هوای استوا و قطب در شرایط فعلی (پس از گرمایش زمین) [۲۶]



شکل ۱۱ جت استریم (قطبی) موجی شکل ناشی از گرمایش زمین [۲۶]

⁸ Albedo

بررسی رفتار ۱۲۵۰ سال گذشته جریان جت اقیانوس اطلس شمالی، با استفاده از حفاری عمیق در ورقه یخی گرینلند، توانسته است راهی جهت پیش بینی موقعیت جت استریم تا سال ۲۰۶۰ میلادی به وجود آورد. لایه های بررسی شده میزان بارندگی در یک سال معین و همچنین دمایی که توده های هوا در معرض آن بوده اند را نشان می دهند. تحقیقات انجام شده نشان می دهند که انتشار گازهای گلخانه ای می تواند پیامد های شدیدی بر رفتار جت استریم در دو سوی اقیانوس اطلس شمالی ایجاد نماید. هر چند تا کنون، تنوع طبیعی، اثر گرمایش ایجاد شده ناشی از انسان را در بازه های زمانی طولانی پنهان کرده است. گرم شدن مداوم می تواند باعث انحراف های قابل توجهی در حالت طبیعی جت گردد و ادامه این روند طی چند دهه مسیر حرکت و رفتار آن را متفاوت خواهد نمود. یافته ها نشان می دهد که در صورت ادامه گرمایش شدید جهانی در دهه های آینده، ممکن است جریان جت اقیانوس شمالی به سمت شمال حرکت کند. در صورت وقوع این وضعیت، عواقب ناشی از آن چشمگیر خواهد بود و می تواند منجر به تغییر در الگو های بارندگی در عرض های میانی و افزایش خشکسالی، امواج گرما، سیل و سایر رویداد های شدید آب و هوایی گردد [۳۲،۳۱].

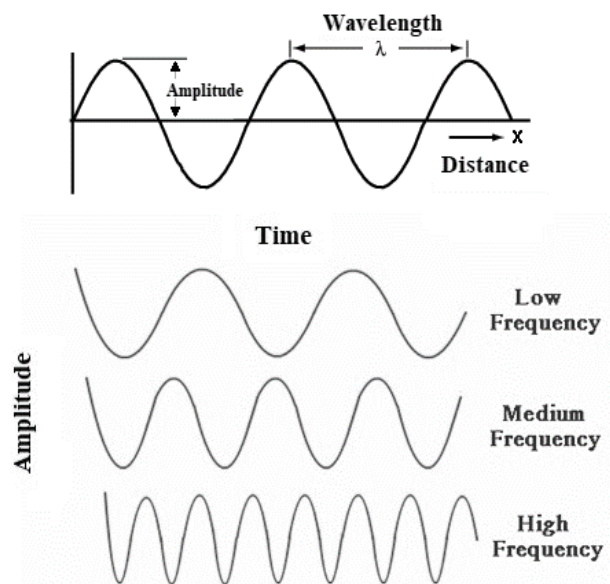
۶- بررسی پتانسیل تولید انرژی از بادهای ارتفاع بلند

میزان انرژی در بادهای ارتفاع بلند و تناوب آن ها، به توزیع چگالی قدرت باد بستگی دارد، زیرا چگالی قدرت باد متناسب با توان سوم سرعت باد است. بنابراین نوسان های سرعت باد به شدت بر قدرت خروجی باد تاثیر گذار است. علاوه بر موارد ذکر شده، به طور معمول، توربین ها نمی توانند انرژی شدید ترین و ضعیف ترین باد ها را در دام بیندازند. شکل ۱۳ میانگین جهانی چگالی انرژی باد در ۵، ۵۰، ۶۸ و ۹۵ درصد دوره زمانی در فاصله سال های ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۶ میلادی را نشان می دهد. در این شکل محور افقی میزان چگالی قدرت باد بر حسب کیلو وات بر متر مربع، محور عمودی مقدار ارتفاع از سطح زمین بر حسب کیلومتر، و اعداد مندرج در شکل درصد دوره زمانی را نشان می دهند. بررسی ها نشان می دهند بیشترین چگالی قدرت باد در ارتفاعی میان ۸۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ متر بالاتر از سطح زمین یافت شده است که این مقدار تقریباً با ارتفاع تروپوسفر مطابقت دارد. همان گونه که در شکل ۱۳ مشاهده می شود، ارتفاع ۱۰۰۰۰ متر، بالاترین ارتفاعی است که ارزش کاوش برای تکنولوژی های ارتفاع بلند را داراست [۳۳].

همان گونه که در شکل ۱۱ مشاهده می شود موج جدید ایجاد شده دارای طول موجی کمتر در مقایسه با موج جت استریم قبل از گرمایش زمین است. این بدین معنی است که این موج دارای فرکانس و سرعت بالاتری است. علت این موضوع در شکل ۱۲ و معادله (۱) نشان داده شده است [۲۹]:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

در معادله فوق c سرعت موج بر حسب متر بر ثانیه، f فرکانس بر حسب هرتز و λ طول موج بر حسب متر است. همان گونه که از شکل ۱۲ و معادله فوق ملاحظه می شود طول موج و فرکانس نسبت عکس با یکدیگر دارند و فرکانس و سرعت دارای نسبت مستقیم هستند. بنابراین هر چه طول موج کاهش یابد فرکانس نیز افزایش می یابد.



شکل ۱۲ تغییرات فرکانس، دامنه موج و طول موج [۲۹]

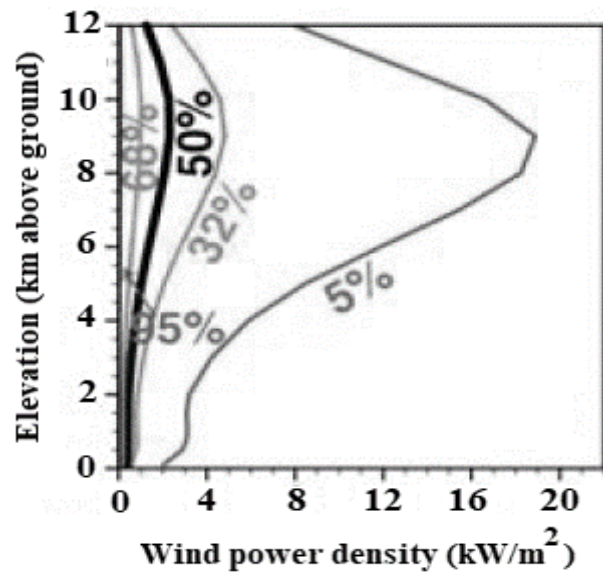
از سوی دیگر تحقیقات اخیر نشان می دهند که میزان پیشروی نقاط اوج منحنی مسیر جت استریم، به سمت شمال بیش از پیشروی نقاط مینیمم منحنی به سمت جنوب است. این موضوع به این معنی است که جت استریم قطبی به سمت شمال حرکت کرده است. تغییر دامنه جت استریم باعث اختلاط بیشتر هوای گرم و سرد با یکدیگر می شود. این اختلاط می تواند باعث ایجاد طوفان های عظیم و مخرب شود. همچنین به علت کاهش سرعت موج ایجاد شده، ماندگاری وضعیت های آب و هوایی از جمله هوای سرد، مرطوب، گرم یا خشک، هفته ها به طول می انجامد. این وضعیت تهدید کننده تنوع زیستی، ایجاد کننده و تداوم آتش سوزی ها و همچنین از بین برنده محصولات کشاورزی خواهد بود [۳۰].

قدرت باد بر حسب کیلو وات بر متر مربع و اعداد مندرج در هر شکل درصد دوره زمانی را نشان می دهد. بررسی نقشه ها در ارتفاع ۱۰۰۰ متری نشان می دهد که بر فراز اقیانوس ها، بهترین مکان برای تولید انرژی دریای آتلانتیک شمالی، اطلس شمالی و کارائیب است. بر فراز خشکی ها نیز، بهترین مکان برای تولید انرژی آمریکای جنوبی با متوسط بیش از یک کیلو وات بر متر مربع و شاخ آفریقا و غرب آمریکای جنوبی با متوسط بیش از ۰/۵ کیلو وات بر متر مربع است. همچنین در دوره زمانی کمتر از ۵ درصد و بر فراز خشکی ها، چگالی قدرت باد صفر است. برای پهنه ایران نیز، نتایج حاصل نشان می دهند که در ارتفاع ۱۰۰۰ متری، در ۵۰ درصد دوره زمانی، غرب ایران و در ۶۸ درصد دوره زمانی، نواحی مرکزی ایران دارای چگالی قدرت باد ۰/۳ کیلو وات بر متر مربع هستند.

چگالی قدرت باد در ارتفاع ۱۰۰۰۰ متری به طور متوسط در حدود پنج برابر بیش از ارتفاع ۱۰۰۰ متری از سطح دریا است. در این ارتفاع مکان هایی که بیشترین مواجهه با جت استریم را داشته باشند، دارای بیشترین چگالی قدرت باد هستند مانند، شرق آمریکای شمالی و آسیا، اقیانوس جنوبی میان آفریقا و جنوبگان، آفریقای شمالی و شرق استرالیا. بررسی نقشه ها نشان می دهد فراز ژاپن دارای بهترین وضعیت برای تولید انرژی در این ارتفاع است به گونه ای که در ۵ درصد دوره زمانی به مقدار متوسط بیش از ۱۰ کیلو وات بر متر مربع می رسد. در این ارتفاع برای پهنه ایران نیز، در ۵۰ درصد دوره زمانی، همه نواحی ایران دارای چگالی قدرت باد ۳ کیلو وات بر متر مربع و در ۶۸ درصد دوره زمانی، شمال ایران دارای چگالی قدرت باد، ۳ کیلووات بر متر مربع و نواحی مرکز، غرب و شرق ایران دارای چگالی قدرت باد ۱ کیلو وات بر متر مربع هستند. در این ارتفاع در ۹۵ درصد دوره زمانی از جانب مرکز به شمال ایران دارای چگالی قدرت باد ۰/۱ کیلو وات بر متر مربع است.

بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده در ارتفاع ۱۰۰۰ متری (یک کیلومتری) از سطح زمین که ارتفاعی قابل دسترس تر برای استفاده از توربین های ارتفاع بلند است، در ۵۰ درصد دوره زمانی غرب و مرکز ایران در وضعیت مشابهی قرار دارد و در هر متر مربع می توان ۰/۳ کیلو وات انرژی استحصال نمود.

اهمیت این موضوع برای نواحی کویری ایران قابل توجه تر است. زیرا در ۶۸ درصد دوره زمانی، این انرژی قابل دسترس است. بنابراین گزینه استحصال انرژی از بادهای ارتفاع بلند می تواند همزمان با بررسی استحصال انرژی خورشیدی در نواحی مرکزی ایران قابل بررسی و قابل مطالعه باشد.



شکل ۱۳ میانگین جهانی چگالی قدرت باد در ارتفاعات مختلف جو (اعداد بر روی منحنی ها درصد دوره زمانی هستند) [۳۳]

همچنین شکل ۱۳ نشان می دهد، علی رغم اینکه چگالی قدرت باد در ارتفاع های بالاتر از ۲۰۰۰ متر به طور یکنواخت با ارتفاع افزایش می یابد، در محدوده ارتفاعی میان ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر، چگالی قدرت باد ثابت است. در ارتفاع ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ متری در ۵۰ درصد مواقع، باد های آرام در دسترس بوده و بادهای بالاتر از ۵۰۰ متر نیز دارای ارزش تولید انرژی پایینی هستند مگر اینکه به ارتفاع بالاتر از ۲۰۰۰ متر دست یافت. بیشترین افزایش چگالی قدرت باد در فاصله ارتفاعی ۶۰۰ تا ۷۰۰ متری و به میزان ۰/۳۷ وات بر متر مربع به ازای هر متر افزایش ارتفاع اتفاق می افتد. با این همه در ارتفاع های بین ۸۰ تا ۵۰۰ متری افزایش معنا داری در چگالی قدرت باد به میزان ۰/۲۵ وات بر متر مربع به ازای هر متر ایجاد می شود.

با وجودی که بادهای ارتفاع بلند پایدارتر از بادهای ارتفاع پایین هستند، اما این بادهای در همه زمان ها ثابت و قدرتمند نیستند. به عنوان مثال در ۵ درصد دوره زمانی چگالی قدرت باد در بیشتر مکان ها پایین است (حدود ۰/۱ کیلو وات بر متر مربع). همچنین چگالی باد نیز به ازای ارتفاع های مختلف غیر متقارن است [۳۳].

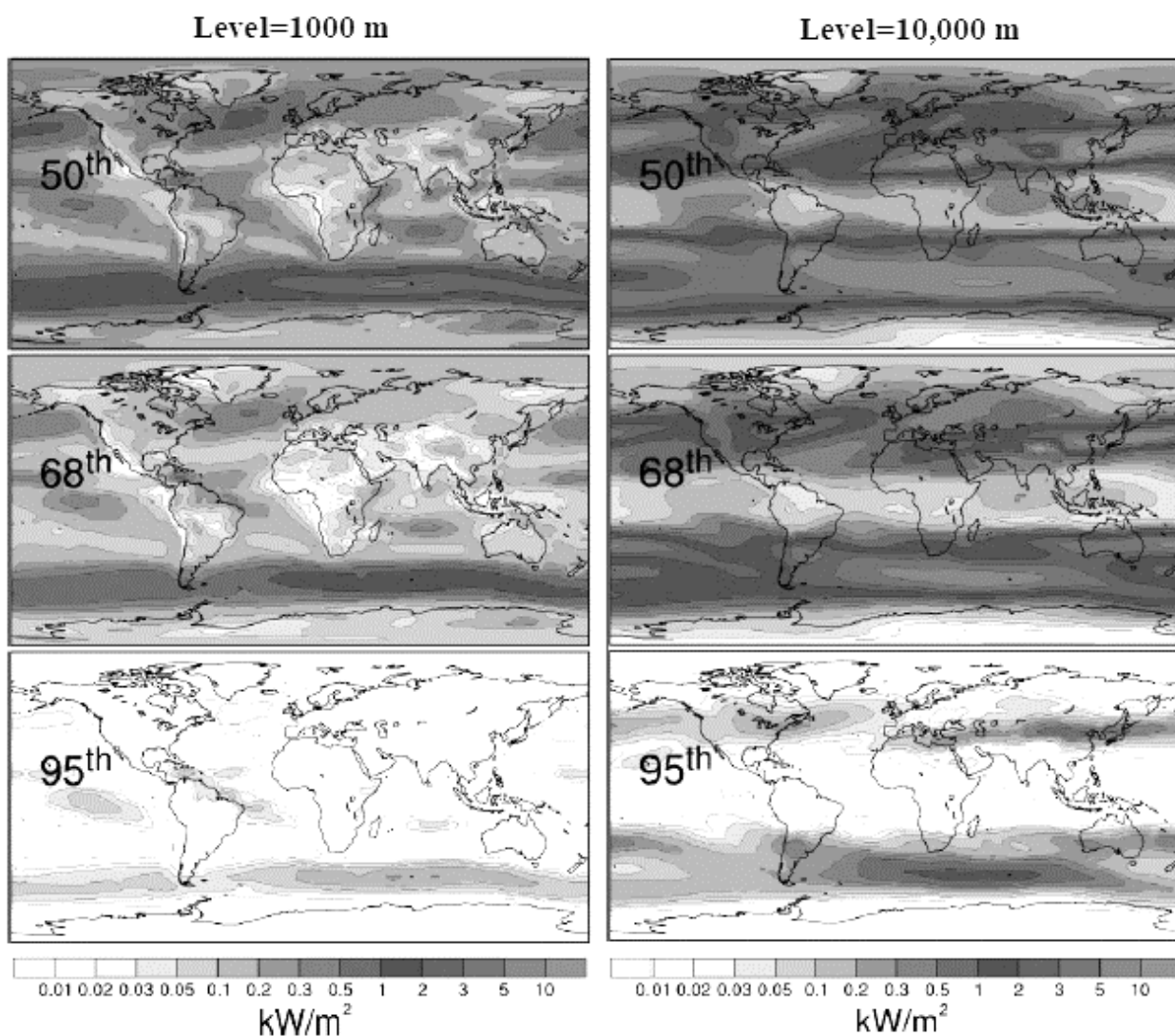
۶-۱- بررسی نقشه بادهای ارتفاع بلند

مطالعات مختلفی در خصوص تهیه نقشه هایی از پتانسیل باد های ارتفاع بلند به منظور تولید انرژی انجام شده است. شکل ۱۴ یکی از این نقشه ها را برای دو ارتفاع ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ متری نشان می دهد [۳۳]. در این شکل محور افقی میزان چگالی

می دهند چگالی انرژی تولیدی به ازای هر ۱۰۰ کیلومتر مربع دارای بیشترین مقدار برای کشورهای عربستان سعودی و مصر با مقدار ۰/۹۶ است و پس از آن عمان در رتبه سوم قرار دارد. ایران با میزان چگالی ۰/۷۸ بعد از کشورهای چینی، سوریه و ترکیه، مقام دهم خاور میانه برای چگالی انرژی تولیدی از بادهای ارتفاع بلند در هر ۱۰۰ کیلومتر مربع را داراست [۳۴].

همچنین نتایج حاصل از این تحقیق نشان می دهد به لحاظ ارتفاع بهینه برای تولید انرژی نیز در ۵۰ درصد و ۶۸ درصد دوره زمانی، در تمامی ایران، ارتفاع ۸ تا ۱۰ کیلومتری و در ۹۵ درصد دوره زمانی، شمال ایران در ارتفاع ۴ تا ۶ کیلومتری از سطح زمین دارای چگالی قدرت باد مناسبی برای تولید انرژی می باشد [۳۳].

در سال ۲۰۱۷ مطالعه ای در خصوص بادهای ارتفاع بلند در منطقه خاور میانه انجام شده است. نتایج حاصل نشان



شکل ۱۴ چگالی قدرت باد در دو ارتفاع ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ متری از سطح زمین در درصدهای مختلف دوره زمانی [۳۳]

سطح زمین قابل دسترس و وزش هستند. بنابراین شناخت چگونگی تشکیل این پدیده و مکان تشکیل و یافتن توزیع آن در نقاط مختلف جغرافیایی اهمیت بسزایی در افزایش بهره وری در استفاده از این نوع انرژی را دارد. با توجه به هدف مورد نظر، در این مقاله، در ابتدا لایه‌های مختلف اتمسفر بیان شده و چگونگی تشکیل سلول‌های هوایی تشریح گردیده و نواحی کم فشار و پر

۷- نتیجه گیری

استفاده از انرژی باد از دیرباز مورد توجه بشر بوده است. در سال‌های اخیر استفاده از بادهای لایه‌های بالایی جو که دارای شدت باد و استمرار در وزش هستند مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است. این بادهای که به جت استریم شناخته می شوند در تمامی

- [2] Nir Noori, A, Iran's Contribution in World Civilization, *Histrolcal Studies- Special Number*, pp. 235-300, (1972). (in Persian فارسی)
- [3] Redlinger, R.Y., Anderson, P.N., Morthorst, P.E, Wind Energy in the 21st Ecntury: Economics, Policy, Technology and the Changing Electricity Industry, *UNEP Collaborating Centre on Energy and Environment*, (2002)
- [4] Graham, R., Wind Energy (Alternative Energy), New York: *Gareth Stevens Pub*, (1991).
- [5] Ebrahimzadeh, M., Wind Energy Growth will be Stormy by 2050, Accessed on 16 June (2020); <https://www.tahlilbazaar.com/news/16629/>. (in Persian فارسی)
- [6] Lantz, E., Owen R., Jake N., Edgar D., Katherine D., George S., Increasing Wind Turbine Tower Heights: Opportunities and Challenges, *Technical Report, National Renewable Energy Laboratory*, (2019).
- [7] Airborne Wind Energy, Accessed on 14 November (2021); https://en.wikipedia.org/wiki/Airborne_wind_energy.
- [8] Lyatkher, V., M., Rahman, Z., High Altitude Turbine (HAT): The Future of Wind Energy, New York: *Wiley Online Library*, (2022).
- [9] Qazi Shahzad A., Man-Hoe K., Design and Performance Analysis of an Airborne wind turbine for high altitude energy harvesting, *Energy Journal*, Vol. 230, No. 120829, (2021).
- [10] Mohammadi M. Mohammadi M., Mohammadi A., High Altitude Turbine, *ISME Journal*, No. 89, Vol. 22, (2013).
- [11] NIWA, Education & Training, Accessed on 14 May (2021); <https://niwa.co.nz/education-and-training/schools/students/layers>.
- [12] Danielson E.D., Levin J., Abrams E. Meteorology, New York: *McGraw-Hill Higher Education*, (2002).
- [13] National Weather Service, Global Circulation, Accessed on 22 July (2019); <https://www.weather.gov/jetstream/circ>.
- [14] Barber, D, The Effects of Revolution and Rotation on Climate and Weather, Accessed on 22 November (2019); <https://sciencing.com/about-6737591-effect-revolution-rotation-climate-weather.html>
- [15] What Is Coriolis Force or Coriolis Effect, Accessed on 11 September (2020); <https://maharfanabzar.com>.
- [16] Global Circulation Patterns-Met Office, Met Office College, Accessed on 17 April (2022);

فشار بر پهنه‌ی زمین مشخص شده است. علاوه بر این اثر نیروی کوریولیس بر انحنا‌ی جریان باد در عرض‌های مختلف جغرافیایی تشریح شده است. نتایج بررسی دانشمندان نشان می‌دهد که در اثر گردش هوای زمین در دو عرض شمالی و جنوبی، ۳۰ درجه و ۶۰ درجه به ترتیب جت استریم جنب حاره‌ای و قطبی تشکیل می‌شود. همچنین مطالعات اخیر نشان می‌دهد به دلیل تغییرات آب و هوایی ناشی از افزایش دمای زمین، دامنه موج جت استریم افزایش یافته و باعث توسعه آن به شمال و جنوب شده است. تحقیقات دیگری نشان می‌دهند که در نیمکره شمالی، پیشروی نقاط اوج منحنی حرکتی جت استریم به سمت شمال بیش از پیشروی نقاط مینیمم به سمت جنوب است. به عبارت دیگر، جت استریم قطبی به سمت شمال حرکت کرده است و این موضوع میزان بارش در فصل زمستان در نواحی با عرض‌های پایین‌تر، که ناشی از جت استریم است را کاهش خواهد داد. همچنین افزایش دامنه جت استریم در اختلاط هر چه بیشتر هوای گرم و سرد تاثیر گذار بوده و باعث ایجاد باد‌های با سرعت بالا و طوفان می‌گردد. با کاهش سرعت جت استریم ماندگاری شرایط مختلف آب و هوایی نظیر هوای گرم، سرد، مرطوب و یا خشک افزایش یافته می‌یابد.

تحقیقات انجام شده بر روی نقشه‌های باد‌های ارتفاع بلند نشان می‌دهند که ایران دارای مقام دهم در خاور میانه به لحاظ چگالی انرژی باد‌های ارتفاع بلند در ارتفاع ۵۰۰ متری از سطح زمین است. همچنین در ارتفاع یک کیلومتری از سطح زمین و در پهنه ایران، در ۵۰ درصد دوره زمانی، غرب ایران و در ۶۸ درصد دوره زمانی نواحی مرکزی ایران دارای چگالی قدرت باد ۰/۳ کیلو وات بر متر مربع هستند. در ارتفاع ۱۰۰۰۰ متری نیز، در ۵۰ درصد دوره زمانی، همه نواحی ایران و در ۶۸ درصد زمانی شمال ایران دارای چگالی قدرت باد ۳ کیلو وات بر متر مربع هستند. در این ارتفاع نواحی مرکز، غرب و شرق ایران دارای چگالی قدرت باد ۱ کیلو وات بر متر مربع می‌باشند. به لحاظ ارتفاع بهینه برای تولید انرژی نیز در ۵۰ درصد و ۶۸ درصد دوره زمانی، در تمامی ایران، ارتفاع ۸ تا ۱۰ کیلومتری و در ۹۵ درصد زمانی، شمال ایران ارتفاع ۴ تا ۶ کیلومتری از سطح زمین دارای چگالی قدرت باد مناسبی برای تولید انرژی می‌باشند.

۸- مراجع

- [1] Hasan, A.Y., Hill D.R., Islamic Technology: An Illustrated History, *Cambridge University Press*, (1992).

- [27] The Loss of Ice Reduces the reflection of Heat from the Arctic, Accessed on 21 November (2018); <https://zistonline.com/vdcefv8v.jh8zzi9bbj.html>.
- [28] Ashourzadeh A., What is Albedo or Whiteness?, Accessed on 28 December (2021); <https://weather.mashhad.ir/7192/>.
- [29] Frequency to Wavelength Calculator, , Accessed on 1 April (2020); <https://www.everythingrf.com/rf-calculators/frequency-to-wavelength>.
- [30] Woolings, T, Jet Stream, *Oxford University Press*, (2019).
- [31] Osman, M., Jet Stream Changes that Could Amplify Extreme Weather Phenomena by 2026, *Postdoctoral Research, University of Arizona Climate System Center*, (2021).
- [32] Shaffie S., Mozaffari G., Khosravi Y., Climatic Analysis of Effective Jet Streams Frequency on Extreme Precipitations in West of Iran, *Journal of Water and Climate Change*, Vol. 12, No.3, pp. 787-800, (2021).
- [33] Archer C.L., Caldeira K., Global Assessment of High Altitude Wind Power, *Energies*, Vol. 2, pp. 307-319, (2009).
- [34] Yip C.M.A, Gunturu U.B., Stenchikov G.L, High Altitude Wind Resource in the Middle East, *Scientific Reports*, Vol. 7, Article No. 9885, DOI: 10.1038/s41598-017-10130-6, (2017).
- [17] Hung J., Mcelroy M.B., Contributions of the Hadley and Ferrel Circulations to the Energetics of the Atmosphere over the Past 32 Year, *Journal of Climate*, Vol. 27, No.7, pp: 2656-2666, (2014).
- [18] What is Global Atmosphere Circulation, Accessed on 18 January (2022); <https://www.Internetgeography.net/topics/what-is-global-atmospheric-circulation/>.
- [19] The Discovery of Global Warming, Accessed on 1 February (2011); <https://history.aip.org/climate/xGenCirc.htm>.
- [20] Piana M.E., Hadley Cells, Accessed on 7 July (2022); <https://groups.seas.harvard.edu/climate/eli/research/equable/hadley.html>
- [21] Mason J., A Rough Guide to the Jet Stream, Accessed on 22 May (2013); <https://skepticalscience.com/jetstream-guide.html>
- [22] Toole E.O. The Jet Stream and Weather in UK. Accessed on 10 March (2011); <https://www.Netweather.tv/charts-and-data/jetstream/tutorial>.
- [23] National Weather Service, the Jet Stream, Accessed on 22 July (2019); <https://www.weather.gov/jetstream/jet>.
- [24] Habibi, F., Investigation on the Effects of Indian Monsoon on Iran, *Geographical Research*, No. 39, pp. 29-45, (2000). (in Persian فارسی)
- [25] Stendel M., Francis J., White R., Williams P.D., Woollings T., The Jet Stream and Climate Change. Chapter 15, U.K: *Elsevier*, pp. 327:357, (2021).
- [26] Keel T., Examining the Link Between Changes in the Mid-Latitude Jet Stream in the northern Hemisphere and a Recent Amplification of Surface Temperature in the Arctic, *BSc Degree, Kings College London*, 2018.