

صص ۱۰۴-۸۹

واکاوی تغییرات زمانی - مکانی سرعت باد سطحی در گستره جغرافیایی ایران با استفاده از مدل MERRA-2

کوهزاد رئیس پور*

استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

هاله فهیمی

دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

رؤیا پور کریم

دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۵/۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۲

چکیده

باد یکی از متغیرهای پیچیده اقلیمی است که تغییرات آن می‌تواند بر ویژگی‌های اقلیمی در مقیاس جهانی، منطقه‌ای و محلی اثرگذار باشد. گرچه این متغیر از جمله عوامل مهم در تغییر اقلیم به شمار می‌رود اما به ندرت به منظور کشف تغییرات آب و هوایی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این پژوهش، واکاوی توزیع زمانی- مکانی سرعت باد سطحی در گستره جغرافیایی ایران (۱۹۸۲-۲۰۱۹) می‌باشد. به این منظور؛ از میانگین داده‌های ساعتی، روزانه و ماهانه سرعت باد سطحی مربوط به مدل MERRA-2 استفاده شد. نتایج حاصله بیانگر افت و خیزهایی در سرعت باد بوده و روند آن با افزایش 0.2m/s همراه است. تحلیل‌های آماری نیز تفاوت‌های معناداری را به لحاظ زمانی و مکانی نشان داد. در میان، بیشترین میانگین سرعت باد مربوط به (ژوئن، ژولای و آگوست) و کمترین میزان مربوط به (اکتبر، نوامبر، دسامبر و ژانویه) و در میان فصول نیز بیشترین و کمترین در تابستان و زمستان اتفاق افتاده است. به لحاظ مکانی نیز بیشترین شدت و تداوم جریان باد در شرق ایران و ایران مرکزی است. رابطه رگرسیون بین سرعت باد و متغیرهای دما و فشار نشان داد، سرعت باد با دما ارتباط مستقیم ($R=81\%$) و با فشار ارتباط معکوس ($R=70\%$) دارد.

واژگان کلیدی: واکاوی، زمانی - مکانی، سرعت باد، مدل MERRA-2، ایران.

مقدمه

بررسی روند سرعت باد و تحلیل اثر آن می‌تواند شاخص مناسبی برای بیان تغییرات محیطی مرتبط با حرکت هوا باشد. هرگونه افزایش یا کاهش سرعت باد در طی زمان می‌تواند بر کشاورزی، فرسایش خاک، تولید انرژی بادی، ساختمان سازی، سلامت روانی و غیره تأثیرگذار باشد (قائدی، ۱۳۹۸). این فرا سنج در نتیجه اختلافات مکانی موجود در فشار

اتم سفری به علت عدم جذب یک سان تابش خورشیدی شکل می‌گیرد (جهانبخش و همکاران، ۱۳۸۸: ۱۲۵). وزش باد باعث جابجایی دما و رطوبت گردیده، میزان تبخیر را افزایش داده و تعدیل کننده مهمی در طبیعت است (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۴: ۱۲۹). گرچه در میان عنا صر اقلیمی، عنا صری مانند دما و بارش بیشتر مورد برر سی پژوهشگران قرار گرفته‌اند، اما اخیراً متغیر باد نیز به منظور کشف تغییرات آب و هوایی مورد مطالعه قرار گرفته است (الکساندرسون و همکاران، ۲۰۰۰). برر سی تغییرات باد از جنبه‌های مختلف اهمیت می‌شود. افزایش سرعت ناگهانی باد نیز، سبب وقوع تندبادها، گردبادها و وقوع خسارت خواهد شد (طاووسی و همکاران، ۱۳۹۲). از نقطه نظر دیگر، استفاده فزاینده از سوخت های فسیلی توأم با آلودگی های زیست محیطی، موجب توسعه کاوش برای منابع پاک و تجدید پذیر انرژی شده که باد از مهم ترین آنها است. اطلاع از پراکنش مکانی سرعت باد در مطالعاتی از قبیل مکان یابی نیروگاه های بادی، احداث ساختمان ها، برآورد خسارت وارده به بناها و محاسبات نیاز آبی گیاهان و برآورد تبخیر و تعرق ضروری است (شوجی و کیتارا، ۲۰۰۶؛ ایرماک و همکاران، ۲۰۰۶؛ گونگ و همکاران، ۲۰۰۶)؛ بنابراین افزایش یا کاهش سرعت باد در بستر زمان، می تواند بر بسیاری از فعالیت های زیستی و محیطی اثرگذار باشد. مطالعه ویژگی های باد توسط پژوهشگران پرشماری در جهان انجام شده است. از جمله این مطالعات می توان به (بورخاردت و همکاران، ۲۰۰۷؛ جیانگ یانگ و همکاران، ۲۰۱۰؛ لاریسا و همکاران، ۲۰۰۵؛ روها و همکاران، ۲۰۱۹) و در ایران نیز به مطالعات (گندمکار، ۱۳۸۸؛ پورکریم و همکاران، ۱۳۹۲؛ مجرد و همکاران، ۱۳۹۲؛ رضازاده و همکاران، ۱۳۹۲؛ خسروی و همکاران، ۱۳۹۴؛ معروفی و همکاران، ۱۳۹۴؛ کارگر و همکاران، ۱۳۹۵؛ حمیدیان پور و همکاران، ۱۳۹۵؛ بنفشه و همکاران، ۱۳۹۶؛ رئیس پور، ۱۳۹۷ و ...) اشاره کرد. اغلب مطالعات بر روی چند ویژگی باد از قبیل ماهیت، ساختار، سرعت و سمت بیش از سایر ویژگی ها تمرکز داشته و بر تفاوت های مکانی - زمانی و تغییرپذیری باد اذعان داشته اند. از این رو به نظر می رسد که پهنه های بادخیز مختلف، حاوی الگوهای متنوعی باشند که تغییرات سمت و سرعت باد را به وجود می آورند. کشور ایران نیز به دلیل موقعیت و ویژگی های خاص جغرافیایی، دارای پهنه های بادخیز ویژه ای با رفتار متفاوت باد است (م سعودیان ۱۳۸۸: ۹۱)، به طوری که از نواحی تقریباً بدون باد تا نواحی با حاکمیت شدیدترین و پردوام ترین بادها در سطح کشور برخوردار بوده و در عین حال تنوع مکانی و تغییرات زمانی باد نیز در این گستره بسیار بارز است (قائدی، ۱۳۹۶). نتایج حاکی از پژوهش های ارائه شده در ارتباط با عوامل مرتبط با تکوین، ماهیت، ساختار و توزیع باد در ایران، از متنوع ترین و پویاترین مطالعات این ویژگی اقلیمی بوده است. تعداد زیادی از پژوهشگران نقش مراکز کم فشار و پرفشار را در شکل گیری جریان های بادی در گستره ایران تشریح کرده اند (علیجانی و همکاران، ۱۳۹۲). برخی نیز بر ویژگی های توپوگرافی، موقعیت جغرافیایی و ماهیت فیزیکی نواحی مختلف به عنوان عوامل اصلی رخداد باد تمرکز داشته اند (رضایی بنفشه و همکاران، ۱۳۹۴). امروزه ماهیت و رفتار باد های شاخص ایران از قبیل باد منجیل، باد صدویست روزه سیستان، باد شمال و سموم مطالعه شده اند (حسین زاده، ۱۳۸۶؛ رئیس پور و همکاران، ۱۳۸۶؛ رضایی، ۱۳۸۲؛ حمیدیان پور و همکاران، ۱۳۹۵). برر سی داده های به کار رفته در اغلب مطالعات فوق، بیانگر استفاده از داده های ایستگاه های هواشناسی (نقطه ای) بوده که با توجه به تغییرپذیری زیاد

کمیت برداری باد در مکان و زمان، پایش آن را در مقیاس‌های منطقه‌ای دشوار می‌نماید. به همین دلیل هنگامی که پوشش مکانی وسیعی جهت واکاوی کمیت باد مورد نیاز باشد، توزیع نامساوی ابزارهای بادسنجی استقرار یافته در ایستگاه‌های هواشناسی و فاصله بسیار زیاد آن‌ها بخصوص در نواحی بیابانی که یکی از عرصه‌های مهم تاخت‌وتاز باد است، یکی از مشکلات اساسی است. از سویی دیگر باد در میان دیگر پارامترهای اقلیم‌شناسی و هواشناسی، به خاطر نوسان زیاد زمانی - مکانی و ناپوستگی آن، یکی از مشکل‌ترین فرا سنج‌ها از نظر اندازه‌گیری است. بر همین اساس با شناسایی این محدودیت‌های کاربردی در ایستگاه‌های زمینی، دانشمندان شگردهای مبتنی بر داده‌های سنجش از دور را به‌عنوان ابزاری توانا برای تعیین کمی بادهای نزدیک سطح زمین به کار گرفته‌اند. مطالعه پایش کمیت باد توسط داده‌های ماهواره‌ای که در برگیرنده پوشش زمانی و مکانی متفاوت می‌باشد، ابزار مناسبی برای غلبه بر مشکل فوق است. از این‌رو استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با تفکیک مکانی بالا توصیه شده است. در چند دهه اخیر داده‌های ماهواره‌ای باد، برون‌داد منتج از مدل‌های مبتنی بر این داده‌ها و روش‌های مبتنی بر تکنیک‌های دورکاوی مورد توجه دانشمندان علوم مختلف محیطی قرار گرفته و با توسعه ماهواره‌های هواشناسی، شناخت ویژگی‌های کمیت باد (تخمین توزیع باد) در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف امکان‌پذیر شده است (تدورا و همکاران، ۲۰۱۷؛ کاروالهو، ۲۰۱۹). به‌طوری که استفاده از داده‌های ماهواره مبنای مدل MERRA-2 مورد توجه محققین متعددی از قبیل (بوسیلویچ و همکاران، ۲۰۱۱؛ ریچل و همکاران، ۲۰۱۱؛ رینکر و همکاران، ۲۰۱۱؛ روبرتسون و همکاران، ۲۰۱۱؛ لیلنو و همکاران، ۲۰۱۱؛ مولود و همکاران، ۲۰۱۵؛ اولایسون و همکاران، ۲۰۱۵؛ مک کارتی و همکاران، ۲۰۱۶؛ گلارو و همکاران، ۲۰۱۷) قرار گرفته است. گام‌های زمانی — مکانی مناسب و جهانی بودن داده‌های مدل MERRA-2، آن را در ردیف یکی از پرکاربردترین مدل‌ها در زمینه تخمین متغیرهای محیطی قرار داده‌است. بر همین اساس؛ علیرغم مطالعات متعدد انجام شده در زمینه شناخت ویژگی‌های باد در کشور ایران، تاکنون مطالعه که هم به واکاوی زمانی — فضایی بلندمدت سرعت باد در کل گستره ایران پرداخته و هم مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای باشد انجام نشده است؛ بنابراین هدف از انجام این پژوهش؛ بررسی توزیع زمانی، فضایی بلندمدت سرعت باد (۲۰۱۹ - ۱۹۸۲) در گستره ایران با استفاده از داده‌های ماهواره مبنای مدل MERRA-2 می‌باشد.

داده‌ها و روش‌ها

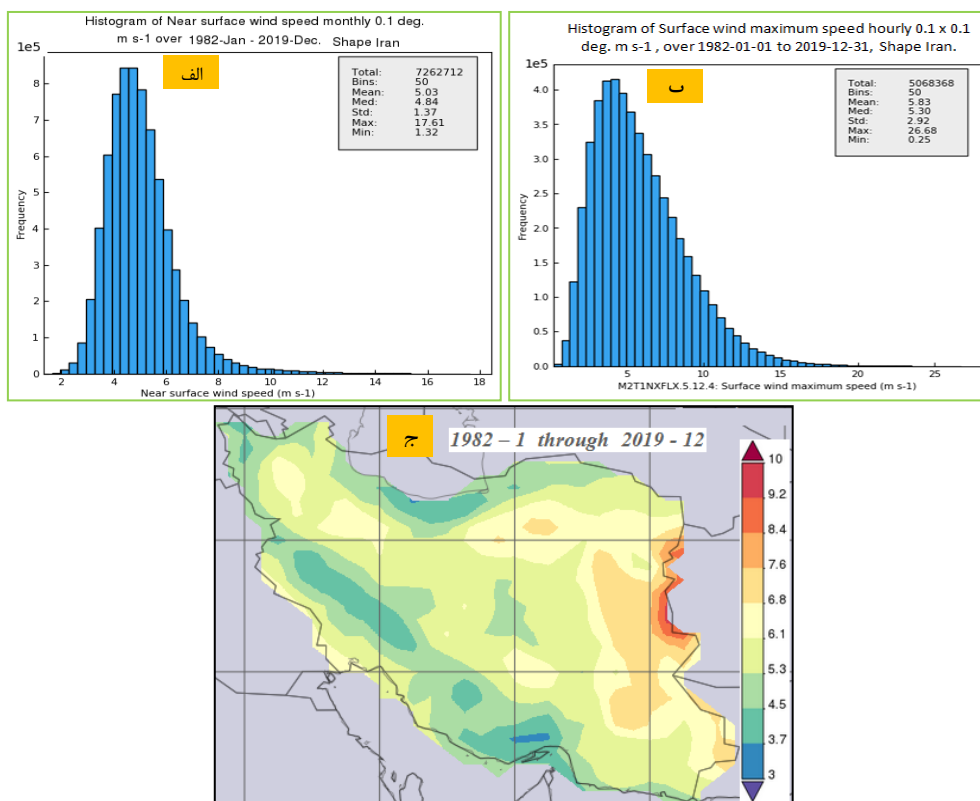
مدل (The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2) که به مدل (MERRA-2) معروف است، یکی از قابل اعتمادترین مدل‌هایی می‌باشد که با هدف کمک به پژوهشگران مختلف از جمله اقلیم‌شناسی و محیط‌زیست برای پاسخگویی به مسائل مربوط به پژوهش‌های آب‌وهوایی و تغییرات اقلیمی برای بهره‌برداری بهینه از مشاهدات ماهواره‌ای، به کار گرفته شده است. این مدل که باهدف تجزیه و تحلیل مجدد مدرن دوره‌ای برای پژوهش‌ها و برنامه‌های کاربردی (بررسی مجدد اتمسفر ناسا بر اساس داده‌های ماهواره‌ای) راه‌اندازی شده است با استفاده از داده‌های نسخه ۵ سیستم مشاهدات زمین گودارد سازمان فضایی ناسا (GEOS-5) به همراه داده‌های سیستم Assimilation Data Accident (ADAS) پشتیبانی می‌شود. پروژه MERRA که بر روی تجزیه‌وتحلیل آب

و هوای تاریخی (روند بلند مدت) شرایط آب و هوایی تمرکز نموده است برای طیف وسیعی از مقیاس‌های آب و هوا، مجموعه‌ای از مشاهدات و نتایج اتمسفری بازکاوی شده مبتنی بر پیش‌های ماهواره‌ای و الگوریتم‌های سنجش از دور را در اختیار کاربران و محققین قرار می‌دهد. داده‌های این مدل که از قدرت تفکیک $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ برخوردار بوده از کیفیت و دقت بسیار بالاتری نسبت به ابزارهای مشابه (NCEP/NCAR, ECMWF, ...) برخوردار می‌باشند. خروجی حاصل از فرا سنج‌های مطالعه شده تو سطر مدل مذکور، عمدتاً مبتنی بر مشاهدات ماهواره‌ای می‌باشند که تو سطر سنجنده‌های مختلف، در راستای دید ماهواره و در دو عبور بالارو (Ascending) و پایین‌رو (Descending) دریافت می‌شوند. مدل مذکور می‌تواند با دقت زیادی نمایه‌های کمیت باد را اندازه‌گیری نموده و روند بلندمدت تغییرات زمانی - مکانی آن را پیش‌نماید (کاروالهو، ۲۰۱۹). در این پژوهش نیز از فرآورده‌های بازکاوی شده سرعت باد و دما مربوط به ارتفاع ۲ متری از سطح زمین و فشار تراز دریا مدل MERRA-2 در گستره جغرافیایی ایران (۲۰۱۹ - ۱۹۸۲) استفاده گردید. داده‌های این مدل (M2T1NXSLV: MERRA-2 avg1_2d_slv_Nx: 2d,1-Hourly,Time-Averaged,Single-Level, Assimilation, Single-Level Diagnostics V5.12.4) از وبگاه Earth data و از طریق لینک زیر https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M2TMNXSLV_5.12.4 قابل دریافت است. در ابتدا داده‌های مورد نیاز با فرمت NetCDF و با گام‌های زمانی ماهانه و فصلی و مکانی $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ استخراج شد. سپس عملیات کنترل کیفی و پیش‌پردازش بر روی آن‌ها اعمال و در محیط دو نرم‌افزار کاربردی ArcGIS و Grads مورد استفاده قرار گرفتند. پس از استدلال‌ها و استنباط‌های مربوط به خروجی‌های حاصله، بررسی ارتباط بین متغیر سرعت باد (متغیر وابسته) با متغیرهای مستقل دما و فشار با استفاده از رابطه رگرسیونی، در گام نهایی پژوهش جای گرفت.

بحث و نتایج

برخی از پارامترهای آماری (توصیفی) میانگین سرعت کمیت برداری باد در گستره جغرافیایی کشور ایران (۲۰۱۹-۱۹۸۲) بر اساس مدل MERRA-2 در شکل ۱ مشخص شده است. همان‌طوری که هیستوگرام‌های مربوط به میانگین ماهانه سرعت باد و میانگین ماکزیمم سرعت باد ساعتی نشان می‌دهد؛ میانگین سرعت باد سطحی در تروپوسفر تحتانی (مجاور سطح زمین) ایران به لحاظ ماهانه و ساعتی از توزیع همگنی برخوردار نیست. برخی از پارامترهای آمار تو صیفی مربوط سرعت باد در بازه زمانی ماهانه به صورت؛ میانگین سرعت باد 5.03 m/s ، میانه سرعت باد 4.83 m/s ، حداکثر سرعت باد 17.61 m/s و حداقل سرعت باد 1.62 m/s بوده و بیشترین فراوانی میانگین سرعت بادهای به وقوع پیوسته (ماهانه) دارای سرعتی بین $6 - 5 \text{ m/s}$ بوده است (جدول ۱). به لحاظ ساعتی نیز میانگین سرعت باد 5.83 m/s ، میانه سرعت باد 5.30 m/s ، حداکثر سرعت باد 26.68 m/s و حداقل سرعت باد 0.25 m/s بوده است. بر اساس این هیستوگرام؛ بیشترین فراوانی بادهای به وقوع پیوسته در گستره جغرافیایی ایران با سرعتی بین $6 - 4 \text{ m/s}$ رخ داده است (شکل ۱: الف-ب). همچنین توزیع (پراکندگی) جغرافیایی میانگین کلی سرعت باد در گستره ایران، بیانگر کمترین میزان سرعت

باد بر فراز سلسله جبال زاگرس، البرز و سواحل دریای خزر (کمتر از ۵ m/s و بیشترین میزان آن در شرق ایران (دشت سیستان) و نواحی بیابانی ایران مرکزی با سرعتی حدود ۱۰ m/s می باشد (شکل ۱: ج). از سویی دیگر سری زمانی ماهانه سرعت باد (۲۰۱۹ - ۱۹۸۲) با استفاده از داده های مدل MERRA-2 حاکی از افزایشی بودن روند سرعت باد می باشد به طوری که میانگین سرعت باد در طی دوره آماری حدود ۰/۰۲ متر بر ثانیه افزایش یافته است (شکل ۲). البته مقادیر سالانه دارای افت و خیزهایی می باشد که توجیه آن را در خشک سالی های مفرط، کاهش پوشش گیاهی و شدت بادهای محلی و منطقه ای می توان یافت.



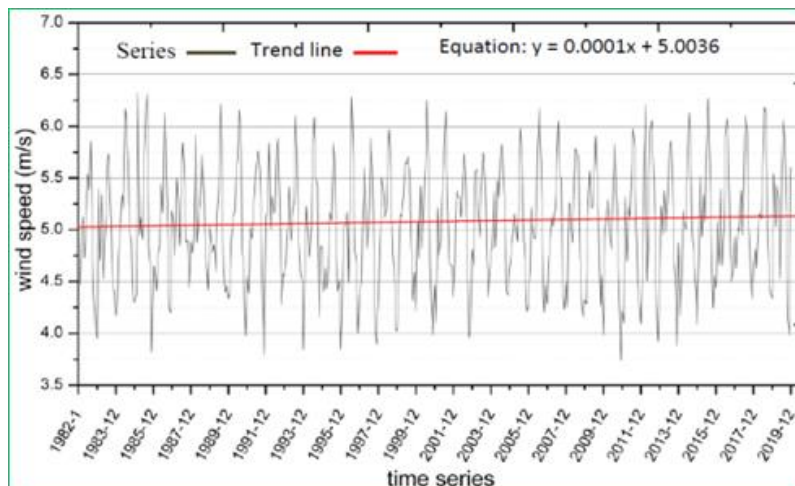
مآخذ: نگارندگان

شکل ۱: هیستوگرام سرعت باد سطحی ماهانه (الف) - هیستوگرام ماکزیمم سرعت باد سطحی ساعتی (ب) - میانگین بلندمدت سرعت باد سطحی (ج) - جدول آمار توصیفی سرعت باد سطحی ماهانه و حداکثر سرعت ساعتی باد طی دوره آماری (۲۰۱۹ - ۱۹۸۲)

جدول ۱: آمار توصیفی میانگین سرعت باد ساعتی و ماهانه طی دوره آماری (۲۰۱۹ - ۱۹۸۲)

آمار توصیفی میانگین سرعت باد ساعتی و ماهانه		
پارامتر آماری	ماهانه	ساعتی
میانگین	۵,۰۳	۵,۸۳
میانه	۴,۸۳	۵,۳۰
واریانس	۱,۳۷	۲,۹۲
حداکثر سرعت	۱۷,۶۱	۲۶,۶۸
حداقل سرعت	۱,۳۲	۰,۲۵

مآخذ: نگارندگان

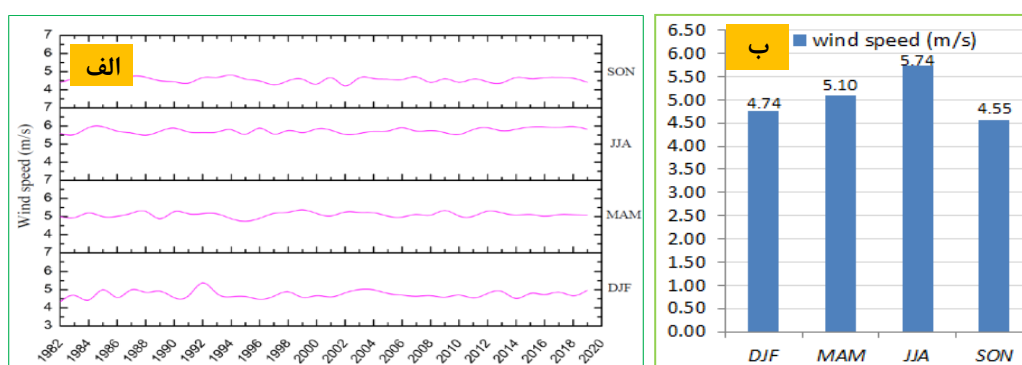


شکل ۲: سری زمانی میانگین ماهانه سرعت باد و روند آن در طول دوره آماری (۱۹۸۲-۲۰۱۹)

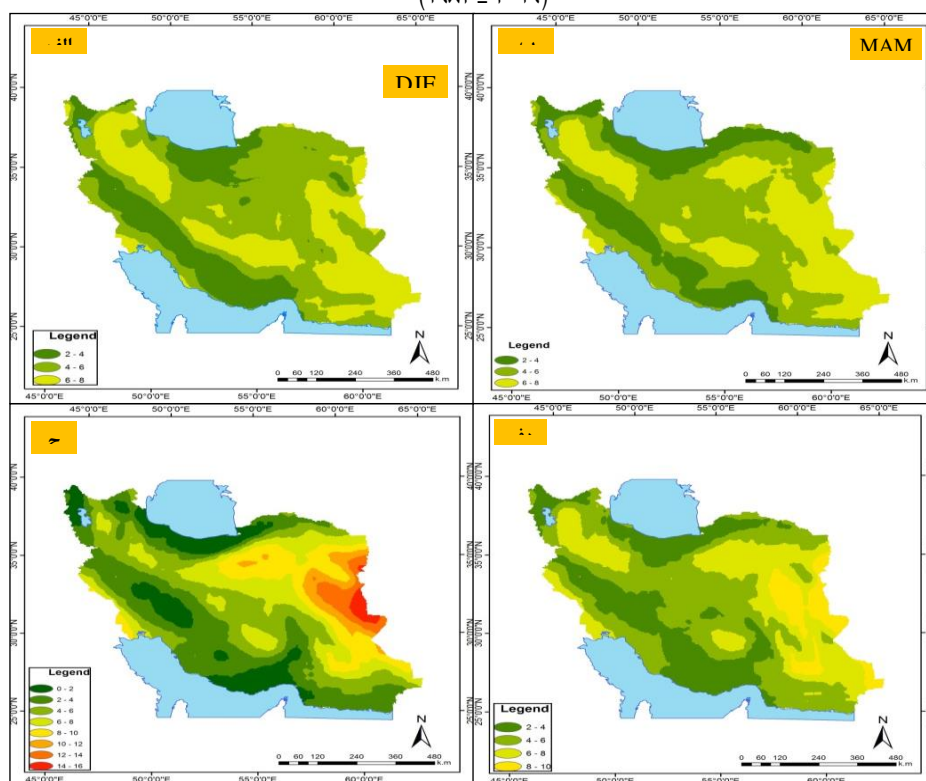
الف: تحلیل فصلی

شکل ۳ و ۴ میانگین سرعت باد را برای فصول چهارگانه زمستان (DJF)، بهار (MAM)، تابستان (JJA) و پاییز (SON) نشان می‌دهد. آنالیز حاصله بیانگر بیشترین میزان سرعت باد سطحی در فصل تابستان و کمترین میزان آن در فصل پاییز بوده است (شکل ۳: الف و ب). بر اساس این نقشه‌ها؛ در فصل زمستان بادهای شدید بر ایران حاکم نبوده به طوری که بیشترین میانگین سرعت باد ۸-۶ m/s می‌باشد که بر مناطقی از شرق، جنوب شرق، شمال غرب، ایران مرکزی، جنوب استان خوزستان و بخشی از کرانه‌های ساحلی دریای عمان جریان دارد. در فصل بهار اگرچه وسعت پهنه بادی با سرعت ۸-۶ m/s نسبتاً همانند فصل زمستان بوده و میدان‌های باد قابل ملاحظه‌ای مشهود نیست ولی تندی باد در نواحی شرقی ایران نسبت به فصل زمستان افزایش یافته است. در این فصل کمینه سرعت باد منطبق بر نواحی کوهستانی البرز و زاگرس و بیشینه آن منطبق بر نواحی پست بیابانی می‌باشد. همچنین سواحل دریای خزر و شمال خراسان شمالی، آذربایجان غربی و شرقی از جوی نسبتاً آرام ۴-۲ m/s برخوردار می‌باشند. بررسی سرعت باد در فصل تابستان بیانگر افزایش قابل ملاحظه سرعت آن و تفاوت چشمگیر آن با سایر فصول می‌باشد. در این فصل سرعت باد در گستره وسیعی از شرق ایران ۱۶-۱۰ m/s بوده و شدیدترین پهنه بادی را به خود اختصاص می‌دهد. همچنین سرعت باد در دشت لوت و کویر نسبت به سایر فصول افزایش محسوس یافته و باد با تندی ۱۴-۶ m/s بر استان‌های خراسان مرکزی، خراسان جنوبی و شمال سیستان و بلوچستان در جریان است. با شروع فصل پاییز به تدریج از سرعت باد در گستره ایران کاسته شده و میانگین سرعت باد کاهش محسوس یافته است. در این فصل بیشینه سرعت باد با سرعتی بین ۱۰-۸ m/s قسمتی از ناحیه شرقی ایران (دشت سیستان) را در بر گرفته که دامنه آن با سرعت ۸-۶ m/s تا بخش‌های از استان‌های خراسان رضوی، خراسان جنوبی و شرق استان سیستان و بلوچستان کشیده شده است. همچنین در این فصل، سرعت باد در بخش‌هایی از نواحی شمال غرب (استان‌های آذربایجان شرقی، کردستان، زنجان، قم، همدان) ۸-۶ m/s جریان دارد. کمینه سرعت باد در فصل پاییز همانند دیگر فصول منطبق بر ارتفاع‌های البرز، زاگرس، ناحیه پست ساحلی دریا خزر و

نواحی کوهپایه‌ای واقع در شرق و غرب زاگرس می‌باشد (شکل ۴: الف تا د). همان‌طوری که در مباحث بالا اشاره گردید؛ از جمله مهم‌ترین عوامل اقلیمی (جغرافیایی) مؤثر بر افزایش سرعت باد در دوره گرم سال، می‌توان به تفاوت‌های دمایی در نواحی مختلف جغرافیایی و شکل‌گیری میدان‌های فشار، افزایش گرادیان فشار، عریان بودن سطح زمین به دلیل حاکمیت دوره خشک و به حداقل رسیدن میزان پوشش گیاهی اشاره کرد. این شرایط از ویژگی‌های اصلی شرایط آب و هوایی ایران در دوره گرم سال می‌باشد. به همین دلیل سرعت باد فصلی در گستره ایران از توزیع همگنی برخوردار نیست. به‌طور کلی در تمام فصول اولین پهنه بادی مربوط به دشت سیستان، دومین مربوط به ناحیه شمال غرب کشور، سومین در ایران مرکزی و چهارمین پهنه بادی در بخش‌هایی از استان‌های خوزستان و ایلام می‌باشد. ارتفاعات البرز، زاگرس و کرانه‌های دریای خزر نیز دارای کمترین میزان سرعت (۲-۴ m/s) می‌باشد.



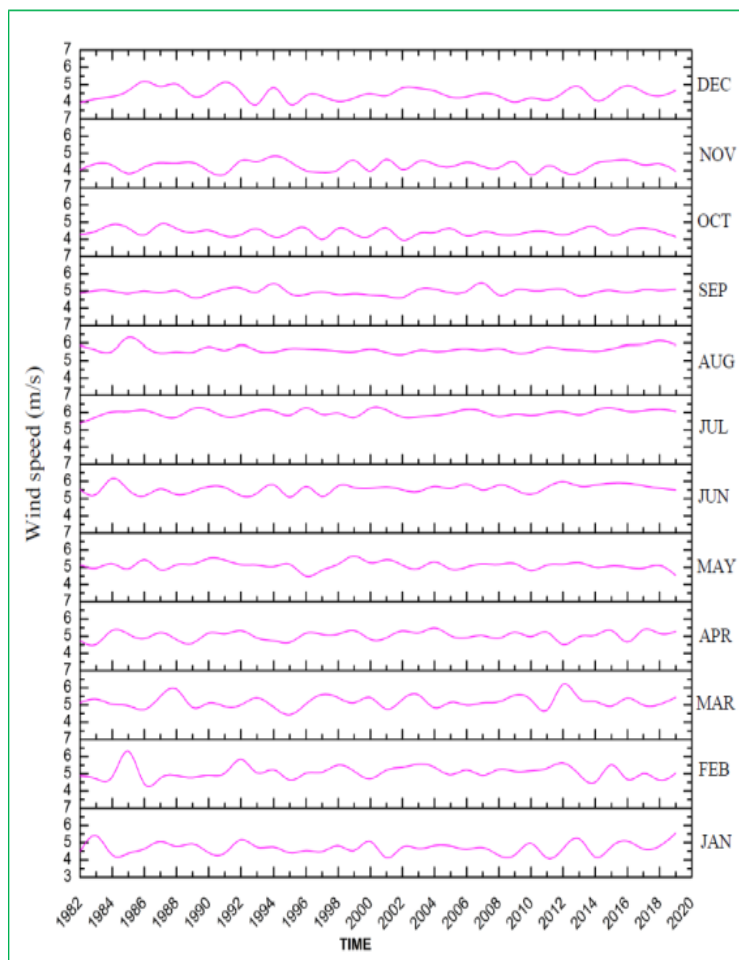
شکل ۳: سری زمانی میانگین فصلی سرعت باد سطحی (الف) - و نمودار میانگین فصلی سرعت باد سطحی (ب) در ایران طی دوره آماری (۱۹۸۲ - ۲۰۱۹)



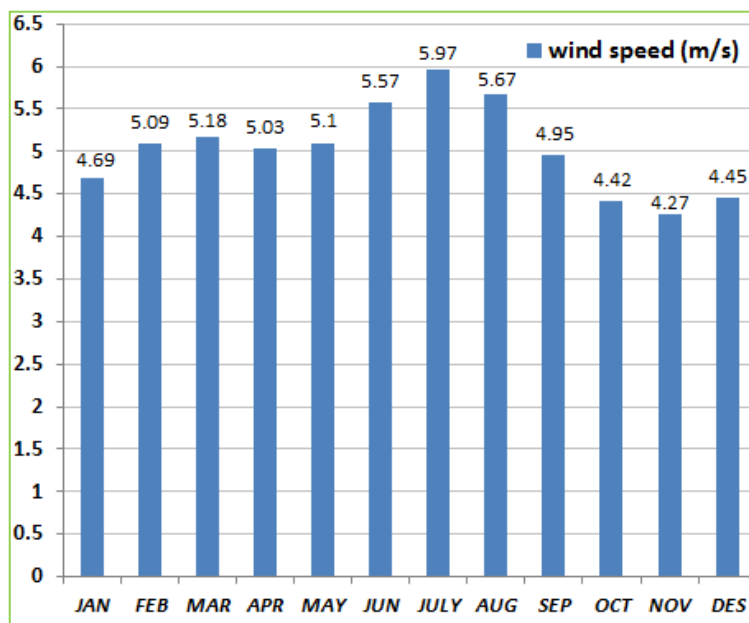
شکل ۴: توزیع فضایی میانگین فصلی سرعت باد سطحی در ایران: شامل زمستان (الف) - بهار (ب) - تابستان (ج) و پاییز (د) طی دوره آماری (۱۹۸۲ - ۲۰۱۹)

ب: تحلیل ماهانه

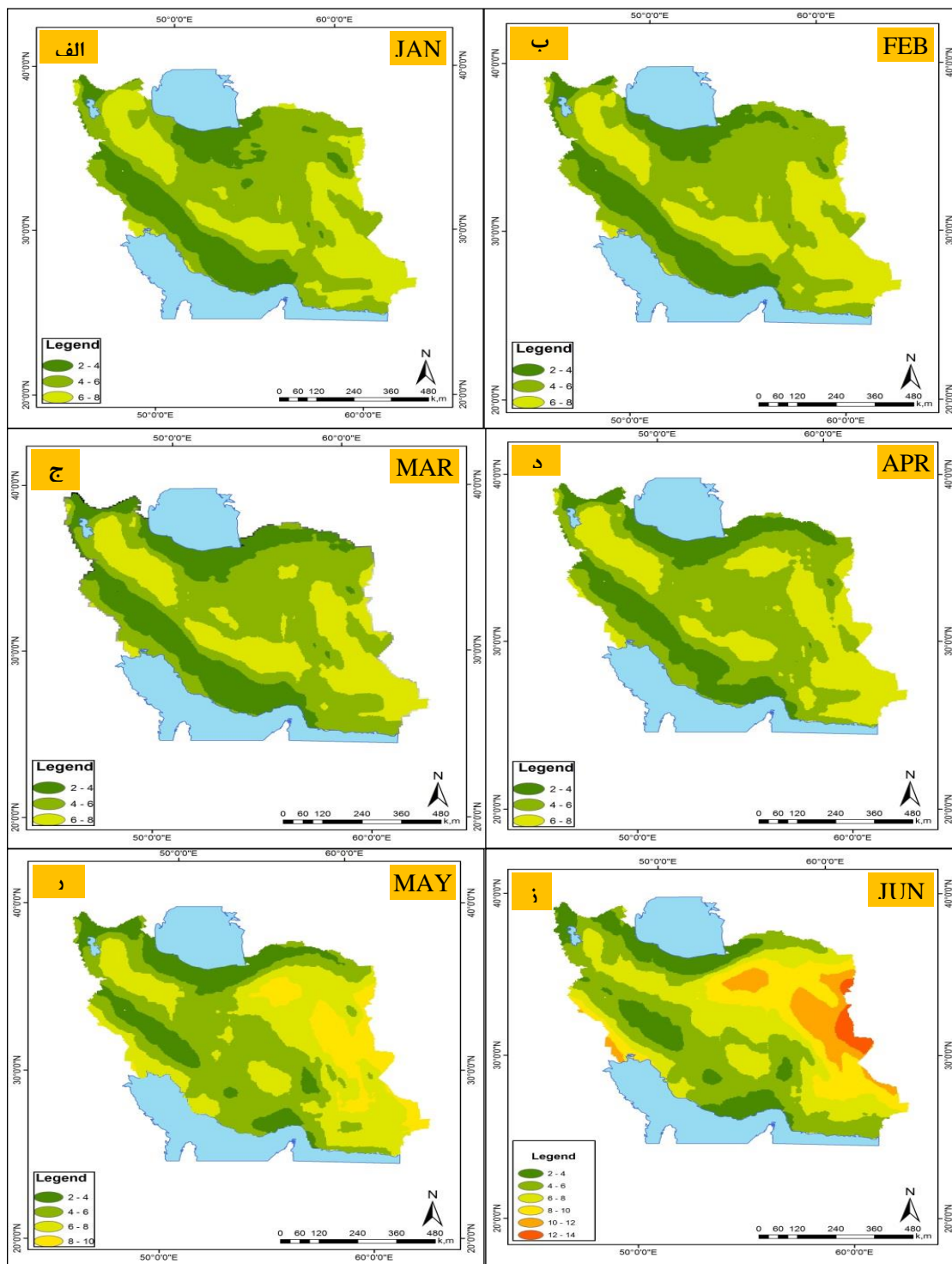
برای ارائه شناخت کلی از میانگین ماهانه سرعت باد در ایران (۲۰۱۹ - ۱۹۸۲) شکل‌های ۵ تا ۸، ترسیم شدند. براین اساس؛ کمترین میزان سرعت باد مربوط به ماه‌های سرد (اکتبر، نوامبر، دسامبر و ژانویه) و بیشترین مربوط به ماه‌های گرم (ژوئن، ژولای و آگوست) بوده است (شکل‌های ۵ و ۶). با شروع فصل گرم (آوریل) روند افزایشی سرعت باد در کل ایران کم‌کم آغاز شده و در فصل تابستان به اوج خود می‌رسد. سپس از ماه سپتامبر به بعد مجدداً روند کاهش‌ی به خود گرفته و در فصل زمستان به کمترین میزان خود می‌رسد. افزایش تدریجی سرعت باد در ماه‌های مربوط به فصل انتقالی بهار و به اوج رسیدن آن در ماه‌های مربوط به فصل تابستان؛ در مرحله اول به معنای افزایش گرادیان فشار بین مراکز کم فشار و پرفشار و در مرحله دوم کاهش اثر اصطکاک سطح زمین بر روی جریان باد می‌باشد؛ زیرا در این دوره از سال، به دلیل محدودیت پوشش گیاهی در بخش و سیعی از کشور ایران، شرایط محیطی برای افزایش سرعت باد مهیاتر است؛ بنابراین باد می‌تواند یکی از عوامل مهم فرسایش خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب شود که پوشش گیاهی به‌عنوان یک عامل مهم، پتانسیل لازم را برای ایفای نقشی اصلی در حفظ خاک و کاهش یا جلوگیری از فرسایش را دارد. به همین دلیل پهنه‌های دارای بیشینه سرعت باد که عمدتاً در شرق ایران و ایران مرکزی شکل می‌گیرند حاکی از افزایش گرادیان فشار بین مناطق مرتفع کوهستانی البرز و مناطق بیابانی جنوب و عربان بودن این نواحی از پوشش گیاهی می‌باشد. این فرایند خود نیز بیانگر افزایش دمای مناطق جنوبی و گرادیان شدیدتر فشار در این مناطق است. البته عوامل دیگری نیز بر سمت و سرعت باد اثرگذار می‌باشند که از جمله آن‌ها می‌توان به ناهمواری زمین، شرایط جغرافیایی محلی (همسایگی دریا و خشکی یا کوهستان و دره) اشاره کرد. بر همین اساس بسته به پیدایش، اوج و زوال الگوهای محلی و منطقه‌ای فشار، پهنه‌های بادخیز نیز در دوره زمانی معینی در بخش‌هایی از کشور ایران شکل گرفته، به اوج رسیده و ناپدید می‌شوند. پهنه‌های بادخیز مذکور از نظر مدت فعالیت، قلمرو فعالیت، تندی و جهت وزش باد با یکدیگر تفاوت دارند. به همین دلیل در نقشه‌های ماهانه مربوط به کمیت باد در گستره ایران، پهنه‌های بادی متفاوتی مشاهده می‌شود (شکل‌های ۷ و ۸). از جمله پهنه‌های مهم پرباد می‌توان به پهنه بادی دشت سیستان در شرق ایران اشاره نمود که به علت عرصه تاخت و تاز بادهای ۱۲۰ روزه در ماه‌های گرم سال (خرداد تا مهر) تمایز ویژه‌ای نسبت به سایر نواحی ایران دارد؛ بنابراین پهنه‌های بادی همانند دیگر متغیرهای اقلیمی یکپارچگی جغرافیایی ندارند و به همین دلیل در برخی از ماه‌های سال گاهی پهنه‌های بادی مشابه در مناطق جغرافیایی مختلف مشاهده می‌شوند. به‌عنوان مثال می‌توان به پهنه‌های کم‌باد اشاره کرد که در اغلب نواحی ایران از جمله آذربایجان، جلگه خزر، کرانه‌های خلیج فارس و دریای عمان، جلگه خوزستان، ایران مرکزی و خراسان مشاهده می‌شوند. از سوی دیگر باز ممکن است یک پهنه بادی به دلیل شرایط خاص جغرافیایی آن چنان کوچک باشد که تنهای در ناحیه محدودی از کشور (دشت سیستان و دشت قزوین) مشاهده شود.



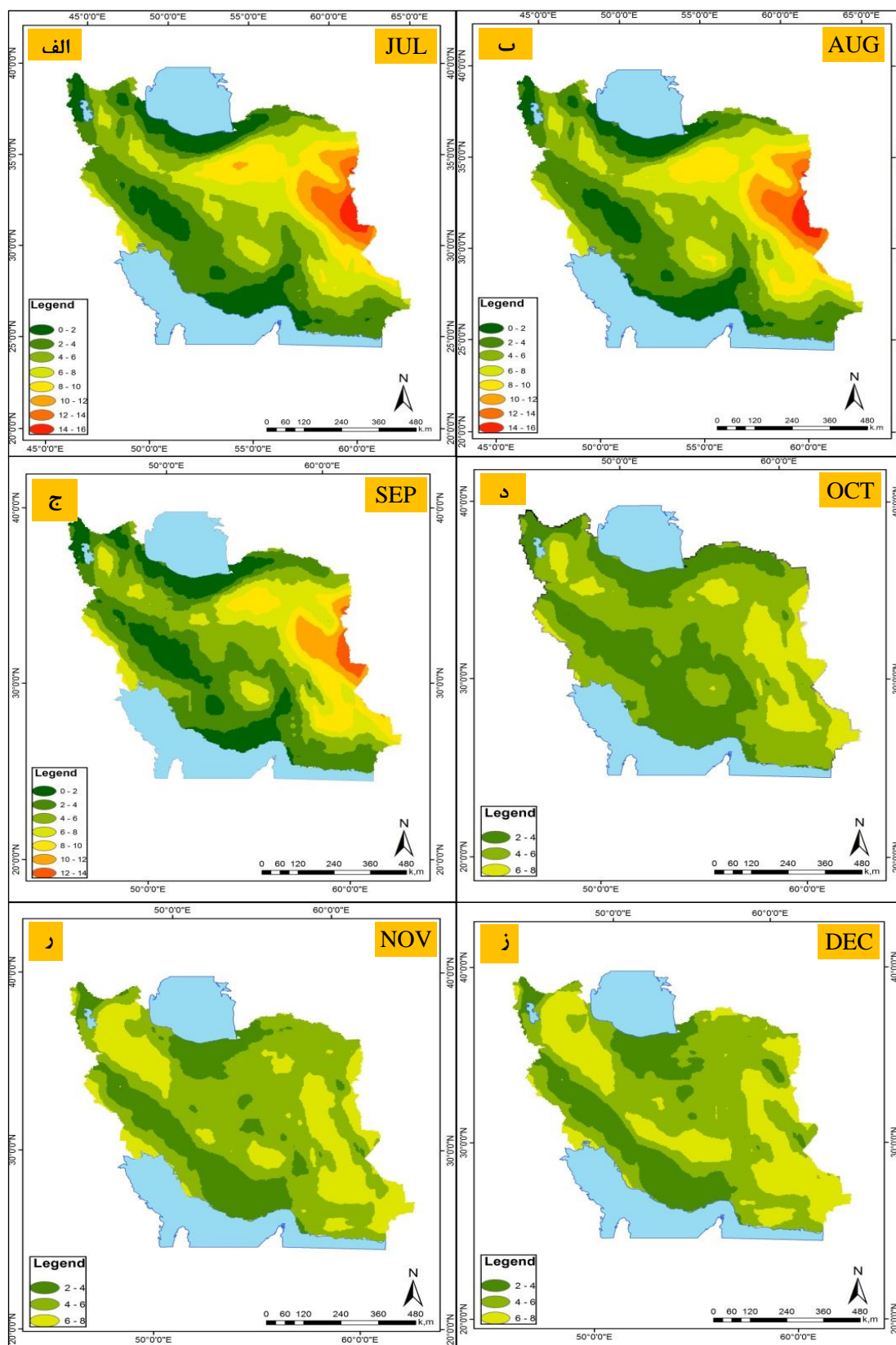
شکل ۵: سری زمانی میانگین ماهانه سرعت باد سطحی در ایران طی دوره آماری (۲۰۱۹ - ۱۹۸۲)



شکل ۶: نمودار میانگین ماهانه سرعت باد سطحی طی دوره آماری (۲۰۱۹ - ۱۹۸۲)



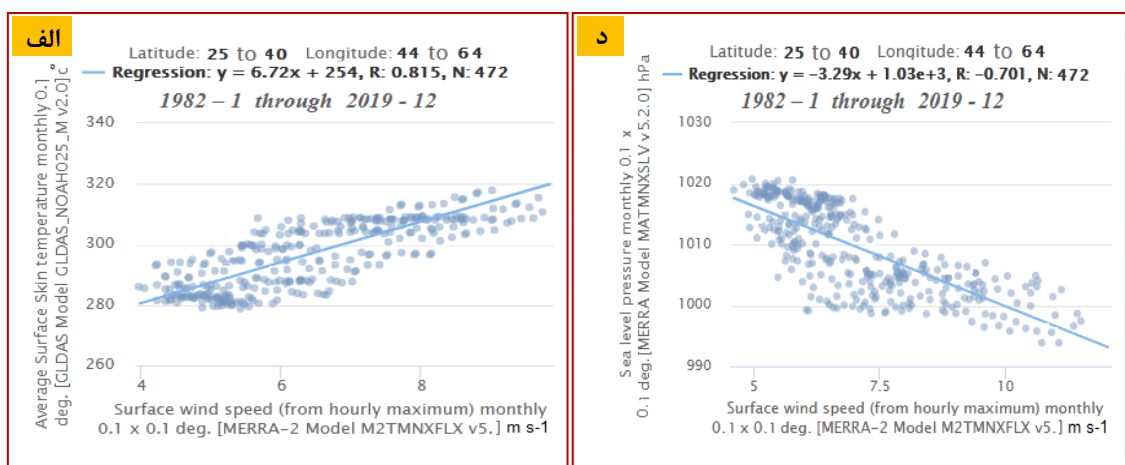
شکل ۷: توزیع فضایی میانگین ماهانه سرعت باد سطحی در ایران: شامل ماه‌های زانویه (الف) - فوریه (ب) - مارس (ج) آوریل (د) - می (ر) و ژوئن (ز) طی دوره آماری (۲۰۱۹ - ۱۹۸۲)



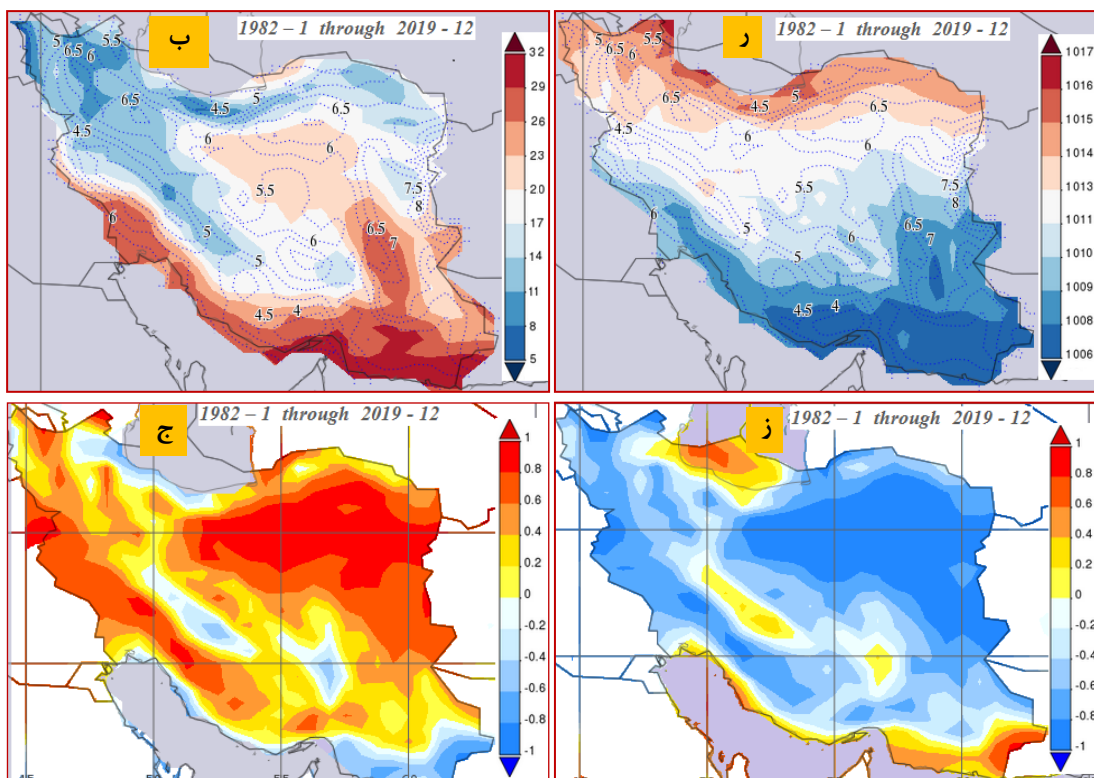
شکل ۸: توزیع فضایی میانگین ماهانه سرعت باد سطحی در ایران: شامل ماه‌های ژوئیه (الف) - اوت (ب) - سپتامبر (ج) - اکتبر (د) - نوامبر (ر) و دسامبر (ز) طی دوره آماری (۲۰۱۹ - ۱۹۸۲)

ج: تحلیل رگرسیون

تفاوت انرژی دریافتی در نقاط مختلف کشور ایران سبب تفاوت در گرمایش سطح زمین شده و تغییرات فشار را به وجود می‌آورد. فشار جو یکی از فرا سنج‌های هواشناختی است که از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و تغییرات آن عامل اصلی شکل‌گیری باد می‌باشد؛ بنابراین با شکل‌گیری الگوهای فشار متأثر از تغییرات دما، جریان هوا از محلی به محل دیگر برقرار گردیده و جریان باد به وجود می‌آید. با این تفاسیر، فشار با دما و باد با فشار دارای رابطه می‌باشد. بر همین اساس، به تعیین میزان رابطه بین متغیر سرعت باد (متغیر وابسته) با متغیرهای مستقل دما و فشار با استفاده از رابطه رگرسیونی اقدام گردید. نقشه و نمودارهای رابطه رگرسیونی به‌خوبی بیانگر این است که باد در ایران با دما رابطه مستقیم و با فشار رابطه معکوس دارد. این بدان معناست که متغیر باد، در دوره گرم سال که گستره ایران اغلب تحت حاکمیت میدان‌های کم‌فشار قرار دارند از شدت و تداوم بیشتری برخوردار می‌باشد؛ زیرا که در این دوره از سال بر اثر استقرار پرفشار جنب‌حاره‌ای آزور بر فراز ایران، آسمان بدون ابر ایران و تابش مستقیم آفتاب به سطح زمین سبب گرمایش زمین گردیده و شرایط مطلوبی را برای شکل‌گیری مراکز کم‌فشاری در اغلب نقاط ایران از جمله نواحی پست جنوبی، مرکزی و شرق ایران فراهم می‌نماید. این تفاوت‌های محلی فشار منجر به برقراری جریان‌های محلی می‌گردد که از جمله آن‌ها می‌توان به بادهای صدوبیست روزه در شرق ایران، بادهای شمال و سموم در خوزستان و باد منجیل در دره منجیل (دشت قزوین) اشاره کرد؛ بنابراین کمیت باد در گستره جغرافیایی کشور ایران با دما رابطه مستقیم و با فشار رابطه معکوس دارد. طبق رابطه رگرسیونی خطی؛ ۸۱٪ ارتباط مثبت معنی‌دار بین میانگین سرعت باد با دما و ۷۰٪ ارتباط منفی معنی‌دار بین میانگین سرعت باد و فشار وجود داشت (شکل ۹: الف - د). به‌طور کلی می‌توان گفت رابطه معنی‌دار مستقیم میان دما و سرعت باد و رابطه معنی‌دار معکوس میان فشار و سرعت باد در اغلب نقاط ایران وجود دارد (شکل ۱۰: ب - ج - ر - ز). به همین دلیل بیشترین میزان سرعت باد منطبق بر دوره گرم سال (دمای حداکثر - فشار حداقل) و کمترین میزان آن منطبق بر دوره سرد سال (دمای حداقل - فشار حداکثر) است.



شکل ۹: نمودار پراکنش و رابطه رگرسیونی میان دمای سطح زمین و سرعت باد سطحی (الف) - نمودار پراکنش و رابطه رگرسیونی میان دمای سطح زمین و فشار هوا (ب) طی دوره آماری (۲۰۱۹ - ۱۹۸۲)



شکل ۱۰: نقشه برهم‌نهی میانگین دمای سطح زمین (پالت رنگی) و میانگین سرعت باد سطحی (کانتور) (ب) - نقشه رابطه رگرسیونی میان میانگین دمای سطح زمین و میانگین سرعت باد سطحی (ج) - نقشه برهم‌نهی میانگین فشار سطح دریا (پالت رنگی) و میانگین سرعت باد سطحی (کانتور) (د) - نقشه رابطه رگرسیونی میان میانگین فشار سطح دریا و میانگین سرعت باد سطحی طی دوره آماری (۲۰۱۹ - ۱۹۸۲)

نتیجه‌گیری

صرف نظر از سازوکارهای تکوین، ماهیت و رفتار باد در نواحی مختلف ایران، شناخت رفتار این متغیر مهم در بستر زمان، استنباط‌های نسبتاً دقیقی از ویژگی‌های این سازوکارها در اختیار مدیران و برنامه‌ریزان محیطی قرار می‌دهد؛ زیرا شناخت ویژگی‌های باد می‌تواند اشراف کامل بر تبعات منفی محیطی از یک‌سو و از سوی دیگر برنامه‌ریزی برای استفاده از پتانسیل انرژی بادی را به‌عنوان یکی از مهم‌ترین انرژی‌های پاک، جدید و تجدید پذیر به دنبال داشته باشد. واکاوی روند سرعت باد در گستره ایران نشان می‌دهد که روند سری زمانی سرعت باد در طول دوره آماری مورد مطالعه (۲۰۱۹ - ۱۹۸۲) مثبت بوده است. روند مثبت سرعت باد در وهله اول به معنای افزایش گرادیان فشار بین میدان‌های کم‌فشار و پرفشار و پس از آن کاهش اثر اصطکاک بر روی سرعت می‌باشد. در بررسی سری‌های زمانی ماهانه و فصلی مربوط به باد در کشور ایران نیز، مشخص گردید که باد در و فصول مختلف از توزیع زمانی و مکانی متفاوتی برخوردار است؛ اما به‌طور کلی در و فصول گرم سال سرعت باد و پهنه‌های بادخیز در کشور ایران بسیار بارزتر است. بدین مفهوم که سرعت باد در ماه‌های گرم (به‌خصوص تابستان) به اوج می‌رسد و در دیگر ماه‌ها از سرعت آن کاسته می‌شود. این ویژگی تقریباً در کل گستره ایران مشهود بوده؛ اما در مناطقی از قبیل دشت سیستان و ایران مرکزی نمود بیشتری دارد. به‌طور کلی

ویژگی ماهانه و فصلی در رفتار باد در تمامی گستره ایران دیده می‌شود. این نتایج به‌خوبی بر نتایج مطالعات مسعودیان و کاویانی (۱۳۸۷) که به بررسی سرعت باد و پهنه‌های بادخیز ایران پرداختند صحت گذاشته و با نتایج پژوهش حنفی و همکاران (۱۳۹۶) در خصوص ارزیابی و پهنه‌بندی پتانسیل سرعت باد در کشور به‌منظور برنامه‌ریزی جهت تولید برق بادی مطابقت دارد. از سویی دیگر، تحلیل رابطه رگرسیون میان سرعت باد با متغیرهای اقلیمی دما و فشار در گستره جغرافیایی ایران، به‌خوبی بیانگر ارتباط معنی‌دار میان سرعت باد با دما ($R=81\%$) و منفی معنی‌دار با فشار ($R=70\%$) است. این بدان معناست که کمیت باد، در دوره گرم سال که گستره ایران اغلب تحت حاکمیت میدان‌های کم‌فشار قرار دارند از شدت و تداوم بیشتری برخوردار می‌باشد؛ اما به‌طور کلی به‌استثنای مناطق شرقی و مرکزی، ایران کشوری بادخیز محسوب نمی‌شود به‌طوری که در اغلب نواحی آن در طول سال سرعت باد کمتر از ۶ متر بر ثانیه را تجربه می‌نماید.

منابع

- ۱- پورکریم برآبادی، رؤیا (۱۳۹۲): ارتباط متقابل رژیم بادهای شرق خراسان با بادهای صد و بیست روزه سیستان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، به راهنمایی دکتر محمود خسروی، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- ۲- جهانبخش، سعید و رجبی، معصومه (۱۳۸۸): مبانی جغرافیای طبیعی، انتشارات دانشگاه تبریز، چاپ اول.
- ۳- حسین‌زاده، سید رضا (۱۳۷۶): بادهای ۱۲۰ روزه سیستان، فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۴۶، ص ۱۰۳.
- ۴- حمیدیان پور، محسن، مفیدی، عباس و سلیقه، محمد (۱۳۹۵): تحلیل ماهیت و ساختار باد سیستان، مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۱۰، شماره ۲، صص ۱۰۹-۸۳.
- ۵- حمیدیان پور، محسن، مفیدی، عباس، سلیقه، محمد و علیجانی، بهلول (۱۳۹۵): نقش توپوگرافی بر شبیه‌سازی ساختار باد سیستان، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال شانزدهم، شماره ۴۳، صص ۵۳-۲۵.
- ۶- حنفی، علی و ایران پور، فخرالدین (۱۳۹۶): ارزیابی و پهنه‌بندی پتانسیل سرعت باد در کشور به‌منظور برنامه‌ریزی جهت تولید برق بادی، نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، شماره ۳۱، صص ۸۸-۷۳.
- ۷- خسروی، محمود، ابراهیمی، محمد و بهروزی، محمود (۱۳۹۴): بررسی وضعیت انرژی باد در استان خوزستان به‌منظور استفاده از توربین‌های بادی، فصل‌نامه برنامه‌ریزی منطقه‌ای، سال ۶، شماره پیاپی ۲۲، صص ۴۲-۲۹.
- ۸- رضازاده، مریم، ایران‌نژاد، پرویز و شائو، یاپینگ (۱۳۹۲): شبیه‌سازی گسیل غبار با مدل پیش‌بینی عددی وضع هوا و داده‌های جدید سطح در منطقه خاورمیانه، مجله فیزیک زمین و فضا، شماره ۱، صص ۲۱۲-۱۹۱.
- ۹- رضایی، پرویز (۱۳۸۲): بررسی اقلیمی باد منجیل، فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۶۸، صص ۱۱۳-۱۰۱.
- ۱۰- رضایی بنفشه، مجید، جوان، خدیجه و زینالی، بتول (۱۳۹۰): بررسی روند تغییرات سرعت باد در شمال غرب ایران، نشریه جغرافیای طبیعی، شماره ۱۳، پاییز ۱۳۹۰، صص ۴۱-۲۵.
- ۱۱- رئیس پور، کوهزاد (۱۳۹۷): تحلیلی بر رویدادهای کنترل‌ناپذیر گردوغبار در جنوب غرب ایران با استفاده از پایش ماهواره‌ای و تحلیل همدیدی، دومین همایش بین‌المللی گرد و غبار، ایلام، دانشگاه ایلام، اردیبهشت ۱۳۹۷.
- ۱۲- رئیس پور، کوهزاد (۱۳۸۶): تحلیل آماری - همدیدی پدیده گردوغبار در استان خوزستان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، به راهنمایی دکتر تقی طاووسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

- ۱۳- طاووسی، تقی، رئیس پور، کوهزاد و بیگ رضایی، احسان (۱۳۹۲): تحلیل آماری و پیش‌بینی احتمال وقوع بادهای شدید و طوفانی در استان کرمانشاه، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۴، شماره ۳، صص ۹۳-۱۰۶.
- ۱۴- علیجانی، بهلول (۱۳۸۱): آب و هوای ایران، انتشارات دانشگاه پیام نور، تهران.
- ۱۵- علیزاده، امین، گلامعلی و موسوی، فرهاد (۱۳۸۴): هوا و اقلیم‌شناسی، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.
- ۱۶- قائدی، سهراب (۱۳۹۸): روند سرعت باد در ایران، نشریه مدیریت بیابان، شماره ۱۳، صص ۲۸-۱۵.
- ۱۷- کارگر، الهام، بلاق جمالی، جواد، رنجبر سعادت آبادی، عباس (۱۳۹۵): شبیه‌سازی و تحلیل عددی طوفان گردوغبار شدید شرق ایران، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال سوم، شماره ۴، صص ۱۱۹-۱۰۱.
- ۱۸- گندمکار، امیر (۱۳۸۸): ارزیابی انرژی پتانسیل باد در کشور ایران، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی سال ۲۰، شماره پیاپی ۳۶، شماره ۴، صص ۸۵-۱۰۰.
- ۱۹- مجرد، فیروز و همتی، شهرام (۱۳۹۲): ارزیابی قابلیت‌های انرژی باد در استان‌های کرمانشاه و کردستان، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال سیزدهم، شماره ۲۹، صص ۱۵۷-۱۳۷.
- ۲۰- مسعودیان، سید ابوالفضل و کاویانی، محمدرضا، ۱۳۸۷، اقلیم‌شناسی ایران، انتشارات دانشگاه اصفهان، ص ۴۰.
- ۲۱- مسعودیان، سید ابوالفضل، (۱۳۸۸): آب و هوای ایران، انتشارات شریعت توس مشهد، ص ۹۱.
- ۲۲- معروفی، صفر، سقایی، صبا، ارشاد فتح، فرناز (۱۳۹۶): بررسی توزیع مکانی سرعت باد با استفاده از روش‌های زمین‌آماري و کلاس‌بندی آن بر اساس روش تحلیل خوشه‌ای، نشریه علوم و مهندسی آبیاری، دوره ۴۰، صص ۱۴-۱.
- 23- Alexanderson, H. Tuomenvirta, H. Schmith, T. And Iden, K. (2000): Trends Of Storms In NW Europe Derived From An Updated Pressure Data Set. *Climate Research*, 14 (1), Pp. 71-73.
- 24- Bosilovich, M. Grobertson, F. R. And Chen, J. (2011): Global Energy And Water Budgets In MERRA. *J. Climate*, 24, Pp. 5721-5739.
- 25- Burkhardt, R And Katja W. (2007): Extremes Of Near-Surface Wind Speed Over Europe And Their Future Changes As Estimated From An Ensemble Of RCM Simulations, *Climatic Change*. 81, Pp.267-280.
- 26- Carvalho, D. (2019): An Assessment Of NASA's GMAO MERRA-2 Reanalysis Surface Winds. *J. Climate*, 32 (23), Pp. 8261-8281.
- 27- Gelaro, R. And Coauthors, H. (2017): The Modern-Era Retrospective Analysis For Research And Applications, Version 2 (MERRA-2). *J. Climate*, 30, Pp. 5419-5454.
- 28- Gong, L. Xu C. Chen, D. Halldin, S. And Chen, Y. D. (2006) Sensitivity Of The Penman-Monteith Reference Evapotranspiration To Key Climatic Variables In The Changjiang (Yangtze River) Basin. *Journal Of Hydrology*, 329 (3-4), Pp. 620-629.
- 29- Irmak, S. Payero, J. O. Martin, D. L. And Howell, T. A. (2006): Sensitivity Analyses And Sensitivity Coefficients. *Journal Of Irrigation And Drainage Engineering*, 132 (6), Pp. 564-578.
- 30- *J Clim*, 24 (14) (2011), Pp. 3624-3648.
- 31- Jiang, Y. Luo, Y. Zhao, Z. And Tao, S. (2010): Changes In Wind Speed Over China During 1956-2004. *Theory Appl Climatol*, 99(3), Pp. 421-430.
- 32- Larissa, E. B. And Christopher, S. B. (2005): The Relationship Between Wind Speed And Precipitation In The Pacific ITCZ, Washington, Seattle. 46, Pp.426 - 4251.
- 33- Liléo, S. And Petrik, O. (2011): Investigation On The Use Of NCEP/NCAR, MERRA And CEP/CFSR Reanalysis Data In Wind Resource Analysis Presented At EWEA. Brussels, Belgium, 14, Pp. 1214 - 1229.
- 34- Mccarty, W. L. Coy, R. Gelaro, A. Huang, D. Merkova, E. B. Smith, M. Sienkiewicz, And Wargan, K. (2016): MERRA-2 Input Observations: Summary And Assessment. NASA Rep. NASA/TM-2016-104606, Vol. 46, P. 61.

- 35- Molod, A. L. Takacs, M. Suarez. And Bacmeister, J.(2015): Development Of The GEOS-5 Atmospheric General Circulation Model: Evolution From MERRA To MERRA-2. *Geosci. Model Dev.* 8, Pp. 1339–1356.
- 36- Olauson, J. Bergkvist, M. (2015): Modelling The Swedish Wind Power Production Using MERRA Reanalysis Data, *Renew Energy*, 76,Pp. 717-725.
- 37- Reichle, R. H. Koster, R. D. Lannoy. G. J. And Touré, A. (2011): Assessment And Enhancement Of MERRA Land Surface Hydrology Estimates. *J. Climate*, 24, Pp. 6322–6338.
- 38- Rienecker, M. And Coauthors, M. (2011): MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis For Research And Applications. *J. Climate*, 24, Pp. 3624–3648.
- 39- Rienecker, M.J. Suarez, R. Gelaro, R. Todling, J. Bacmeister, E. (2012): MERRA-NASA's Modern-Era Retrospective Analysis For Research And Applications
- 40- Robertson, F. R. Bosilovich, M. G. Chen, J. And Miller, T. L. (2011): The Effect Of Satellite Observing System Changes On MERRA Water And Energy Fluxes. *J. Climate*, 24,Pp. 5197–5217.
- 41- Ruha, Z. Shiyan, Z. Jiali, L. Yuanyuan, H. And Junxia, Z. (2019): Analysis Of Near-Surface Wind Speed Change In China During 1958–2015, *Theoretical And Applied Climatology* Volume 137, P. 2785–2801.
- 42- Shoji, T. And Kitaura, H. (2006): Statistical And Geostatistical Analysis Of Rainfall In Central Japan. *Computers And Geosciences*, 32, PP. 1007-1024.
- 43- Teodora, D.G. And Robert, S. (2017): Meteorological Data Acquisition From MERRA-2 Reanalysis For Wind Energy Systems Modeling Support. *J. Climate*, 76, Pp. 451-460.
- 44- Wargan, K. (2016): MERRA-2 Input Observations: Summary And Assessment. NASA Rep. NASA/TM-2016-104606, Vol. 46, Pp. 61.
- 45- Zhao, Z And Jinhong, Z. (2010): Projections Of Wind Changes For 21st Century In China By Three Regional Climate Models *Chin. Geogra. Sci.* 20 (3), Pp. 226–235.