



همبستگی بخار آب قابل بارش سنجنده AIRS و داده‌های ۲۹ ایستگاه سینوپتیک ایران

علی بیات^{۱*}، سعید مشهدی زاده ملکی^{۲،۳}

۱- استادیار دانشکده علوم، گروه فیزیک دانشگاه زنجان،

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ژئودزی، دانشگاه تبریز

۳- عضو پژوهشکده تغییر اقلیم و گرمایش زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه، زنجان

چکیده:

بخار آب قابل بارش (PWV) یکی از کمیت‌های مهم در هواشناسی و تغییرات اقلیم است. شیدسنج خورشیدی، سنجنده AIRS و رادیسونداهای ابزارهایی هستند که PWV را از سطح، فضا و داخل جو زمین اندازه‌گیری می‌کنند. در این مقاله از داده‌های PWV اندازه‌گیری شده با شیدسنج خورشیدی دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان، سنجنده AIRS و داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک شامل دما، دمای نقطه شبنم، فشار و رطوبت نسبی ۲۹ ایستگاه سینوپتیک ایران استفاده شده است. داده‌های شیدسنج خورشیدی در بازه اندازه‌گیری دسامبر ۲۰۰۹ تا دسامبر ۲۰۱۳ و داده‌های سنجنده AIRS و ۲۹ ایستگاه سینوپتیک از سپتامبر ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۵ می‌باشد. برای اعتبارسنجی داده‌های سنجنده AIRS از اندازه‌گیری‌های شیدسنج خورشیدی استفاده شد که همبستگی ۹۰ بین آنها به دست آمد. میانگین PWV اندازه‌گیری شده با شیدسنج خورشیدی و سنجنده AIRS به ترتیب برابر ۹/۸ و ۱۰/۸ میلی‌متر است. مقدار PWV بیشترین مقدار را در سواحل دریای عمان، خلیج فارس و دریای خزر دارد و کمترین مقدار آن در داخل ایران و در بالای رشته کوه‌های زاگرس می‌باشد. میانگین همبستگی PWV و دما، دمای نقطه شبنم، فشار و رطوبت نسبی به ترتیب ۷۳، ۷۴، ۴۰ و ۳۰ درصد به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: آب قابل بارش، سنجنده AIRS، شیدسنج خورشیدی، همبستگی.

۱- مقدمه

بخار آب بیشترین مقدار گاز گلخانه‌ای جو زمین را تشکیل می‌دهد، بنابراین با اندازه‌گیری گسترده توزیع‌های افقی و قائم بخار آب در جو زمین می‌توان درک بهتری از تغییرات چرخه آبی و تغییرات اقلیم و گرمایش زمین به دست آورد [۱]. بخار آب تاثیر زیادی در وقوع بارش در یک منطقه دارد [۲، ۳]. کل بخار آب موجود در ستونی از جو از سطح زمین تا نقطه پایانی بخار آب در جو که قابلیت بارش دارد، بخار آب قابل بارش (PWV) می‌گویند [۴]. تخمین دقیق PWV می‌تواند تاثیر زیادی در پیش‌بینی وضعیت جوی و نیز برآورد میزان بارش و رواناب داشته باشد. یکی از پارامترهای مهم در محاسبات مربوط به مخازن و پیش‌بینی وقوع سیلاب، PWV است [۵]. البته، بخار آب قابل بارش به مفهوم نزولات جوی نیست. میزان بارش به پارامترهای زیادی مثل مقدار و نوع هواویزها، نمایه دما و فشار جو، جهت و سرعت باد و غیره بستگی دارد [۶].

عساکره و همکاران (۱۳۹۳ و ۲۰۱۵) با استفاده از داده‌های NCEP/NCAR در بازه‌ی ۲۰۱۰-۱۹۵۰ بخار آب قابل بارش بر روی ایران را مورد بررسی قرار دادند. آنها با استفاده از روش‌های آماری به تحلیل ناهنجاری‌های بارش بر اساس روش تحلیل همسازها پرداختند و چرخه‌های مختلف بارش را محاسبه و بررسی کردند [۸]. نتایج بدست آمده در این مقاله حاضر با نتایج مقاله عساکره و همکاران همخوانی دارد. اما در این مقاله بخار آب قابل بارش استخراج شده از اندازه‌گیری‌های زمین پایه‌شیدسنج خورشیدی و ماهواره AIRS و داده‌های ۲۹ ایستگاه سینوپتیک بررسی شده است.

جذب نور خورشید در برخی از طول‌موج‌ها توسط بخار آب موجود در جو زمین، چندین دهه مورد مطالعه قرار گرفت. بر همین اساس، شیدسنج خورشیدی جهت اندازه‌گیری PWV در ستون قائم جو زمین طراحی شد [۹]. شیدسنج خورشیدی از اندازه‌گیری مستقیم نور خورشید، PWV را به روش ساده‌تر و ارزان‌تری استخراج می‌کند. داده‌های شیدسنج خورشیدی تفکیک زمانی زیادی (هر ۱۵ دقیقه یک اندازه‌گیری در طول روز) دارند. شیدسنج خورشیدی تنها در طول روز اندازه‌گیری می‌کند. البته در لحظه اندازه‌گیری نباید ابر در مسیر نور وجود داشته باشد [۱۰]. ماهواره‌های متعددی از فضا PWV جو زمین را اندازه‌گیری می‌کنند. سنسور ماوراء بنفش، AIRS^۱ یکی از ابزارهای نصب شده بر روی ماهواره Aqua است که بخار آب قابل بارش را با دقت زیادی اندازه‌گیری می‌کند [۱۱].

سامانه موقعیت‌یابی جهانی^۲ (جی پی اس)، مجموعه‌ای از ۲۴ ماهواره است که در حال دوران به دور زمین هستند. سیگنال‌های فرستاده شده با ماهواره‌های جی پی اس از جو زمین عبور می‌کنند. جو زمین بر سیگنال‌های ارسالی اثر می‌گذارد. از اندازه‌گیری‌های ثبت شده جی پی اس زمینی می‌توان میزان بخار آب قابل بارش را استخراج کرد [۱۲]. راجا و همکاران (۲۰۰۸) ضریب همبستگی ۰/۹۴ بین اندازه‌گیری‌های بخار آب قابل بارش جی پی اس و سنجنده AIRS در کشور آمریکا بدست آورد. پراساد و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از اندازه‌گیری‌های بخار آب قابل بارش توسط شبکه جی پی اس و شبکه Aeronet، اندازه‌گیری‌های PWV سنجنده AIRS را اعتبارسنجی کردند و به ترتیب ۰/۹۱ و ۰/۹۵ ضریب همبستگی بین اندازه‌گیری‌های جی پی اس و شیدسنج خورشیدی بدست آوردند [۱۳]. بنابراین ماهواره AIRS ابزار مناسب و دقیقی برای مطالعه بخار آب در یک منطقه است.

در این مقاله ابتدا شیدسنج خورشیدی واقع در دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان - تنها طیف‌سنج موجود در ایران که توانایی اندازه‌گیری بخار آب قابل بارش از سطح زمین را دارد- معرفی می‌شود. سپس داده‌های سنجنده AIRS با

^۱ Atmospheric Infrared Sounder

^۲ Global Positioning System

اندازه‌گیری‌های شیدسنج خورشیدی صحت‌سنجی می‌شود. میانگین PWV را در کل ایران به‌دست آورده و نقشه میانگین PWV با استفاده از اندازه‌گیری‌های AIRS ترسیم می‌شوند. در ادامه همبستگی بخار آب با داده‌های ثبت شده در ۲۹ ایستگاه سینوپتیک محاسبه و تفسیر می‌شود. در آخر، به بحث و نتیجه‌گیری خواهیم پرداخت.

کنفرانس مهندسی فناوری اطلاعات مکانی با هدف انتشار دستاوردهای علمی و پژوهشی پژوهشگران در کلیه شاخه‌های مهندسی نقشه‌برداری آماده پذیرش مقاله در این زمینه می‌باشد. زمینه‌های مورد نظر برای پذیرش مقاله در این کنفرانس عبارتند از مهندسی نقشه‌برداری و ژئودزی، سیستم‌های اطلاعات مکانی، سنجش از دور و فتوگرامتری. همچنین دستاوردهای مرتبط با کاربرد این علوم در سایر زمینه‌ها نیز در صورتی که حاوی نوآوری‌های علمی و پژوهشی شناخته شوند، مرتبط با موضوع نشریه می‌باشند.

۲- مواد و روش

۲-۱- شیدسنج خورشیدی

شیدسنج خورشیدی نوعی تابش‌سنج خورشیدی زمین-پایه است که از شدت نور مستقیم رسیده از خورشید (مد خورشید) و نور پراکنده شده خورشید از ذرات جوی (مد آسمان) در طول موج‌های معین با پهنای کم‌تر از ۱۰ نانومتر و با میدان دید ۱.۲ درجه در سطح زمین اندازه‌گیری می‌کند [۱۴]. از داده‌های شیدسنج خورشیدی می‌توان مشخصات اپتیکی و فیزیکی ذرات معلق در جو زمین را استخراج کرد. شیدسنج خورشیدی مستقر در دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان نوع CE-318 است که از شرکت Cimel فرانسه خریداری شده است. این شیدسنج دارای ۵ طول موج ۴۴۰، ۶۷۰، ۸۷۰، ۹۴۰ و ۱۰۲۰ نانومتر است که بجز طول موج ۹۴۰ نانومتر بقیه برای مطالعه هواپیزها در نظر گرفته شده‌اند [۱۵]. بخار آب قابل بارش یا PWV پارامتری است که از اندازه‌گیری در طول موج ۹۴۰ نانومتر استخراج می‌شود.

در مد خورشید برای هر طول موج سه بار اندازه‌گیری می‌شود که با الگوریتم اسمیرنو^۱، اثر ابر از داده‌ها حذف می‌شود [۱۶]. به دلیل تفکیک زمانی (در هر ۱۵ دقیقه یک اندازه‌گیری در طول روز) و دقت زیاد داده‌های شیدسنج خورشیدی، می‌توان از داده‌های آن برای صحت‌سنجی اندازه‌گیری‌های رادیوسوند و ماهواره‌ها استفاده کرد [۱۷]. در این مقاله، اندازه‌گیری‌های PWV شیدسنج خورشیدی در بازه زمانی دسامبر ۲۰۰۹ تا دسامبر ۲۰۱۳ برای صحت‌سنجی PWV استخراج شده از داده‌های سنجنده AIRS استفاده شده است.

۲-۲- داده‌های سنجنده AIRS

سنجنده AIRS، یکی از ابزارهایی است که با هدف کمک به محققین تغییر اقلیم و بهبود پیش‌بینی هوا ساخته شده است. سنجنده AIRS یکی از شش سنجنده‌ی ماهواره Aqua است که در سال ۲۰۰۲ به مدار زمین پرتاب شد. AIRS دارای ۲۳۷۸ بازه طیفی است. قدرت تفکیک آن ۱۰۰ برابر بیشتر نسبت به ابزارهای مشابه قدیمی است که می‌تواند با دقت زیادی نمایه‌های قائم دما و رطوبت جوی را اندازه‌گیری کند. AIRS گازهای گل‌خانه‌ای همانند ازن، منواکسیدکربن، دی‌اکسیدکربن و متان را نیز اندازه‌گیری می‌کند. در این مقاله داده‌های روزانه PWV بین سپتامبر ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۵ با تفکیک مکانی یک درجه بالا سر ۲۹ ایستگاه سینوپتیک استفاده شده است [۱۸].

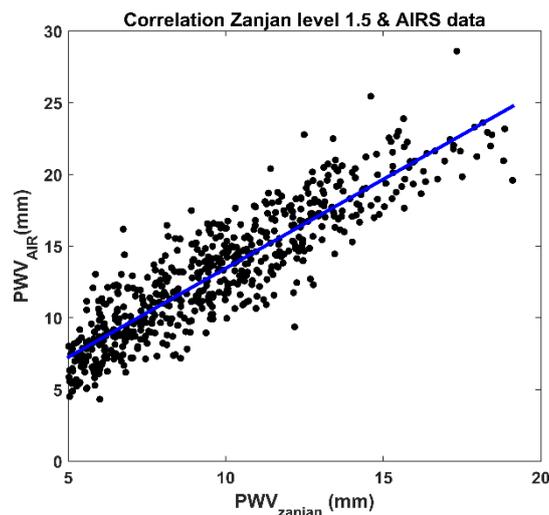
¹ Smirnov

۲-۳- داده‌های ایستگاه سینوپتیک

در ایستگاه‌های سینوپتیک به طور همزمان در سراسر دنیا، بر اساس ضوابط و مقررات سازمان جهانی هواشناسی داده‌های مختلف جوی مانند دما، دمای نقطه شبنم، رطوبت نسبی، فشار، سرعت و جهت باد اندازه‌گیری می‌شوند. داده‌های سینوپتیک به صورت هر سه ساعته اندازه‌گیری می‌شوند. ابتدا سری زمانی سه ساعته ایستگاه‌ها تشکیل شدند. سپس سری زمانی میانگین روزانه آنها به منظور محاسبه همبستگی محاسبه شد. در این مقاله از اندازه‌گیری‌های ۲۹ ایستگاه هواشناسی ایران استفاده شده است.

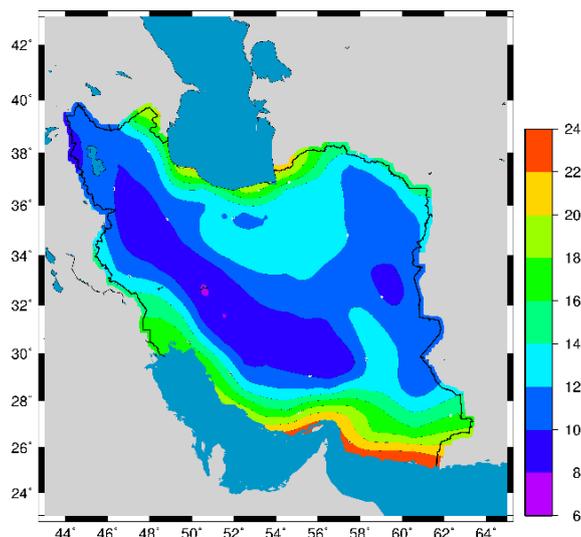
۳- یافته‌های پژوهش

شیدسنج‌خورشیدی یکی از ابزارهای قدرتمند زمین پایه برای مطالعه PWV در طول روز است [۲۰، ۱۹، ۱۷]. شکل (۱)، همبستگی PWV شیدسنج‌خورشیدی و سنجنده AIRS را در بازه زمانی دسامبر ۲۰۰۹ تا دسامبر ۲۰۱۳ نشان می‌دهد. تفکیک زمانی سنجنده AIRS و شیدسنج‌خورشیدی به ترتیب روزانه و هر ۱۵ دقیقه یک اندازه‌گیری است. در شکل (۱)، از میانگین روزانه داده‌های شیدسنج‌خورشیدی استفاده شده است. در داده‌های سطح ۱/۵ شیدسنج‌خورشیدی اثر ابر از اندازه‌گیری‌ها حذف شده است. داده‌های AIRS مربوط به پیکسل متناظر ایستگاه زنجان می‌باشد. ضریب همبستگی PWV برای این دو اندازه‌گیری برابر ۰/۹۰ است.



شکل ۱: همبستگی بخار آب قابل بارش (PWV) شیدسنج‌خورشیدی و سنجنده AIRS.

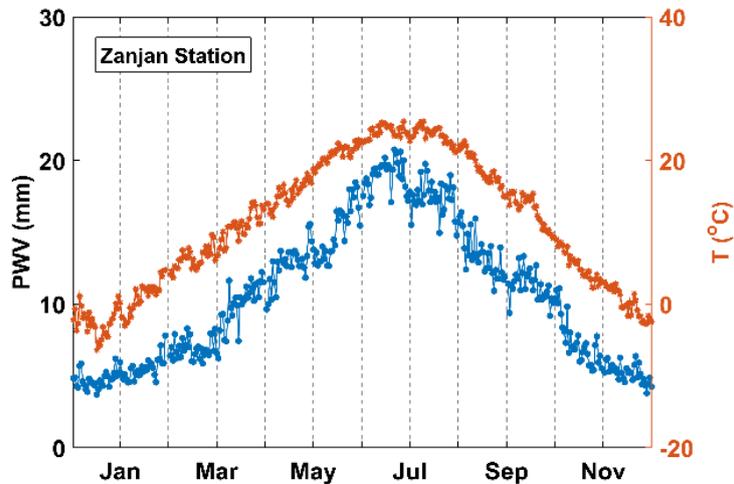
با توجه به همبستگی بالا و از آنجایی که سنجنده AIRS قادر به اندازه‌گیری PWV در کل ایران با دقت مکانی یک درجه است؛ در ادامه به تحلیل رفتار زمانی و مکانی PWV با پارامترهای اندازه‌گیری شده در ۲۹ سایت ایران می‌پردازیم. پس از اطمینان حاصل کردن از اعتبار داده‌های سنجنده AIRS سری‌های زمانی PWV این سنجنده برای پیکسل‌های متناظر ۲۹ ایستگاه سینوپتیک تشکیل شدند. در ادامه مقاله به بررسی و تحلیل توزیع جغرافیایی بخار آب قابل بارش و توزیع مکانی همبستگی بخار آب قابل بارش با دمای هوا، دمای نقطه شبنم، فشار هوا و رطوبت نسبی در سطح ایران خواهیم پرداخت.



شکل ۲: میانگین بخار آب قابل بارش AIRS بین سپتامبر ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۵.

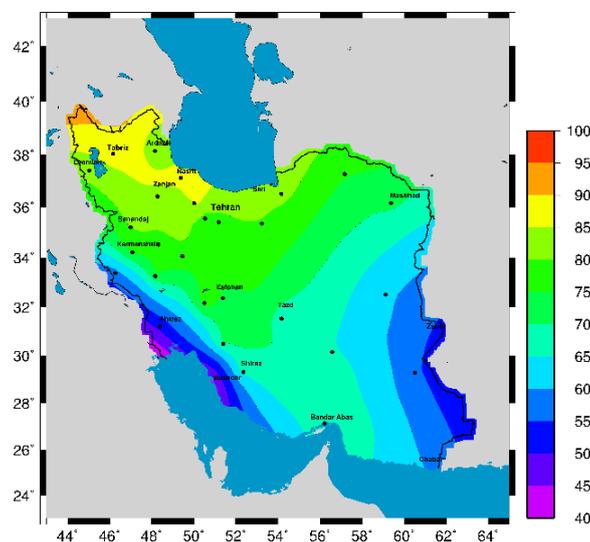
شکل (۲)، میانگین سنجنده PWV AIRS در بازه اندازه‌گیری ذکر شده را نشان می‌دهد. میانگین PWV در نواحی مرکزی ایران با وجود خشکی و دوری از منابع رطوبتی (دریای خزر، دریای عمان و خلیج فارس) از ناحیه مرتفع زاگرس بیشتر است. این واقعیت به دلیل دمای افزون‌تر نواحی مرکزی است که به تبع آن ظرفیت بخار آب قابل بارش جو افزایش می‌یابد. همچنین ارتفاع بالای کوه‌ها باعث کاهش ضخامت ستون هوا و دمای پایین‌تر آنها موجب کاهش ظرفیت گنجایش بخار آب در ارتفاعات زاگرس می‌شود [۸ و ۷].

در شکل (۳)، سری زمانی روزانه PWV سنجنده AIRS برای پیکسل بالا سر زنجان و دمای هوای سطح زمین ایستگاه سینوپتیک زنجان در بازه اندازه‌گیری سپتامبر ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۵ رسم شده است. هر نقطه میانگین داده‌های ثبت شده در آن روز در طی بازه زمانی ذکر شده است. نقاط آبی (قرمز) PWV بر حسب میلی‌متر (دمای هوای سطح زمین بر حسب سانتی‌گراد) را نشان می‌دهند. کمترین مقدار PWV در فصل زمستان و بیشترین مقدار آن در فصل تابستان است. همبستگی این دوسری زمانی ۹۶ درصد است که نشان دهنده رفتار مشابه بخار آب قابل بارش و دما در طول سال است. بنابراین دما بیشترین تاثیر را بر بخار آب قابل بارش در جو زمین دارد [۲۲]. دوره تناوب سالیانه در سری‌های زمانی دما برای نقاط مختلف کشور ایران مشاهده شده است. در شکل (۵) نیز دوره تناوب سالیانه بخار آب قابل بارش به وضوح مشاهده می‌شود.



شکل ۳: سری زمانی بخار آب قابل بارش سنجنده AIRS و دمای هوای سطح زمین ایستگاه سینوپتیک برای زنجان. نقاط آبی (قرمز) میانگین روزانه بخار آب قابل بارش بر حسب میلی‌متر (دمای هوای سطح زمین بر حسب سانتی‌گراد) در بازه اندازه‌گیری سپتامبر ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۵ را نشان می‌دهد.

برای بررسی توزیع مکانی همبستگی دمای هوا برای ۲۹ ایستگاه سینوپتیک و PWV با سنجنده AIRS بالا سر ایستگاه‌ها، نقشه همبستگی با نرم افزار GMT^۱ ترسیم شد. شکل (۴) نشان می‌دهد که مقدار همبستگی دما و PWV به عرض جغرافیایی بستگی دارد. بیشترین (کمترین) مقدار همبستگی در شمال غرب (جنوب غربی و جنوب شرقی) مشاهده می‌شود.



شکل ۴: نقشه همبستگی دمای هوا در ۲۹ ایستگاه سینوپتیک و بخار آب قابل بارش سنجنده AIRS بالا سر ایستگاه‌ها. نقاط سیاه رنگ محل ایستگاه‌های سینوپتیک را نشان می‌دهند.

رگرسیون خطی بین مقادیر همبستگی دما و بخار آب قابل بارش هر ایستگاه و عرض جغرافیایی متناظر آن برآزش داده شد؛ به ازای با افزایش عرض جغرافیایی، این همبستگی (با شیب ۲/۸ درصد به ازای یک درجه عرض جغرافیایی) افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل تغییرات دمایی با افزایش عرض جغرافیایی است که به دلیل مایل‌تر تابیدن نور آفتاب در عرض‌های بالاتر است.

¹ Generic Mapping Tools

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله بخار آب قابل بارش در ایران مورد بررسی قرار گرفته است. آب قابل بارش بدست آمده از اندازه‌گیری‌های سنجنده AIRS با داده‌های شیدسنج خورشیدی مستقر در دانشگاه تحصیلات تکمیلی صحت‌سنجی شد. این صحت‌سنجی برای داده‌های مشترک روزانه از دسامبر ۲۰۰۹ تا دسامبر ۲۰۱۳ انجام شد. شکل (۱) نشان می‌دهد که بخار آب قابل بارش اندازه‌گیری شده از سنجنده AIRS و شیدسنج خورشیدی همبستگی بالایی (ضریب همبستگی ۰/۹۰) دارند. سنجنده AIRS از سال ۲۰۰۲ در مدرا زمین قرار گرفته است. PWV اندازه‌گیری شده با سنجنده AIRS در بازه زمانی بین سپتامبر ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۵ استخراج شد. میانگین روزانه PWV در ایران نشان می‌دهد که بیشترین مقدار آن در سواحل دریا و در ارتفاعات پایین اتفاق می‌افتد و با دور شدن از دریاها و رفتن به ارتفاعات از مقدار میانگین PWV کاسته می‌شود (شکل ۲). همبستگی PWV با دمای هوا برای ۲۹ ایستگاه نشان می‌دهد که با افزایش عرض جغرافیایی بخار آب و دمای هوا نیز افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش تغییرات دمای هوا در طول سال می‌باشد (شکل ۴). رگرسیون خطی بین مقادیر همبستگی دما و بخار آب قابل بارش هر ایستگاه و عرض جغرافیایی متناظر نشان می‌دهد این همبستگی با شیب ۲/۸ درصد به ازای یک درجه عرض جغرافیایی افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش تغییرات دمایی با افزایش عرض جغرافیایی است.

مراجع

- [1] Schmid, B., Michalsky, J. J., Slater, D. W., Barnard, J. C., Halthore, R. N., Liljegren, J. C., ... & Ingold, T. (2001). Comparison of columnar water-vapor measurements from solar transmittance methods. *Applied Optics*, 40(12), 1886-1896.
- [2] Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., ... & Miller, H. L. (2007). Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, No. 9, pp. 5-13.
- [3] صادقی حسینی، علیرضا؛ حجام، سهراب؛ تفنگ‌ساز، پوریا (۱۳۸۴). ارتباط آب قابل بارش ابر و بارندگی دیدبانی شده در منطقه تهران، مجله فیزیک زمین و فضا، شماره ۱۳، صص. ۲۱-۱۳.
- [4] Carlson, T. N. (1991). Mid-latitude weather systems.
- [5] مباحثی، محمد رضا؛ پورباقرکردی، مهدی؛ فرج‌زاده اصل، منوچهر؛ صادقی نائینی، علی (1387). برآورد آب قابل بارش کلی با استفاده از تصاویر ماهواره‌های MODIS و داده‌های رادیوساوند: ناحیه تهران، برنامه ریزی و آمایش فضا، شماره ۱۴، صص. ۱۰۷-۱۲۶.
- [6] مباحثی، محمد رضا (۱۳۷۹). آشنائی با فیزیک هوا، انتشارات آستان قدس رضوی، شرکت به نشر.
- [7] عساکره، حسین؛ دوستکامیان، مهدی؛ قائمی، هوشنگ (۱۳۹۳). تحلیل تغییرات ناهنجاری‌ها و چرخه‌های آب قابل بارش جو ایران، پژوهش جغرافیای طبیعی، دوره ۴۶، شماره ۴، صص. ۴۴۴-۴۳۵.
- [8] Asakereh, H., Doostkamian, M., & Sadrafshary, S. (2015). Anomalies and cycles of precipitable water over Iran in recent decades. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(11), 9569-9576.
- [9] Halthore, R. N., Eck, T. F., Holben, B. N., & Markham, B. L. (1997). Sun photometric measurements of atmospheric water vapor column abundance in the 940-nm band. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-ALL SERIES-*, 102, 4343-4352.
- [10] Holben, B. N., Eck, T. F., Slutsker, I., Tanre, D., Buis, J. P., Setzer, A., ... & Lavenu, F. (1998). AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote sensing of environment*, 66(1), 1-16.

- [11] Bedka, S., Knuteson, R., Revercomb, H., Tobin, D., & Turner, D. (2010). An assessment of the absolute accuracy of the Atmospheric Infrared Sounder v5 precipitable water vapor product at tropical, midlatitude, and arctic ground-truth sites: September 2002 through August 2008. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D17).
- [12] Raja, M. R. V., Gutman, S. I., Yoe, J. G., McMillin, L. M., & Zhao, J. (2008). The validation of AIRS retrievals of integrated precipitable water vapor using measurements from a network of ground-based GPS receivers over the contiguous United States. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25(3), 416-428.
- [13] Prasad, A. K., & Singh, R. P. (2009). Validation of MODIS Terra, AIRS, NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis-2, and AERONET Sun photometer derived integrated precipitable water vapor using ground-based GPS receivers over India. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D5).
- [14] Bayat, A., Masoumi, A., & Khalesifard, H. R. (2011). Retrieval of atmospheric optical parameters from ground-based sun-photometer measurements for Zanjan, Iran. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(5), 857-863.
- [15] Masoumi, A., Khalesifard, H. R., Bayat, A., & Moradhaseli, R. (2013). Retrieval of aerosol optical and physical properties from ground-based measurements for Zanjan, a city in Northwest Iran. *Atmospheric Research*, 120, 343-355.
- [16] Smirnov, A., Holben, B. N., Eck, T. F., Dubovik, O., & Slutsker, I. (2000). Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database. *Remote Sensing of Environment*, 73(3), 337-349.
- [17] Campmany, E., Bech, J., Rodríguez-Marcos, J., Sola, Y., & Lorente, J. (2010). A comparison of total precipitable water measurements from radiosonde and sunphotometers. *Atmospheric Research*, 97(3), 385-392.
- [18] Hagan, D. E., Webster, C. R., Farmer, C. B., May, R. D., Herman, R. L., Weinstock, E. M., ... & Newman, P. A. (2004). Validating AIRS upper atmosphere water vapor retrievals using aircraft and balloon in situ measurements. *Geophysical research letters*, 31(21).
- [19] Dubovik, O. and King, M. D. (2000): A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from sun and sky radiance measurements, *J. Geophys. Res.*, 105, 20673–20696.
- [20] Raj, P. E., Devara, P. C. S., Saha, S. K., Sonbawne, S. M., Dani, K. K., Pandithurai, G., & Murthy, A. R. (2008). Temporal variations in sun photometer measured precipitable water in near IR band and its comparison with model estimates at a tropical Indian station. *Atmósfera*, 21(4), 317-333.
- [21] بیات، علی (۱۳۸۷). مطالعه پارامترهای اپتیکی جو زنجان با استفاده از شیدسنج خورشیدی، پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان.
- [22] مشهدی زاده ملکی، سعید؛ عباسی، مجید (۱۳۹۳). تحلیل هارمونیک دمای هوا در ۱۵۰ ایستگاه هواشناسی ایران، مجموعه مقالات شانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، صص. ۱-۴.