

امکان‌سنجی استفاده از محصولات سنجنده مودیس به منظور اقلیم‌شناسی آب قابل‌بارش در ایران

مهدی مدیری^۱، محمد رضایی^۲، مهدی خزائی^{۳*} و رضا عرب صاحبی^۴

۱. استاد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۲. دانش‌آموخته دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳. دانش‌آموخته دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۴. دانش‌آموخته دکتری، گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

(دریافت: ۹۹/۱۰/۲۱، پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۳/۴)

چکیده

در این پژوهش به اعتبارسنجی محصولات آب قابل‌بارش سنجنده مودیس بر روی ایران پرداخته شده است. به این منظور داده‌های ماهانه سطح سوم مودیس در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۵ و داده‌های روزانه سطح دوم، طی ماه ژانویه ۲۰۰۴ و ژوئیه ۲۰۰۸ برای محدوده ایران از وبسایت مودیس اخذ شد. سپس داده‌های ماهانه با داده‌های ERA-Interim و داده‌های روزانه با داده‌های رادیوسوند مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در مقیاس ماهانه، ویژگی‌های داده‌های آب قابل‌بارش مودیس در مقایسه با داده‌های ERA-Interim دارای الگوی فضایی خوشه‌ای‌تر، تغییرپذیری مکانی بالاتر، ارتباط فضایی قوی‌تر با داده‌های ارتفاع و میانگین آب قابل‌بارش سالانه مشابه (۱۲/۲۴ میلی‌متر؛ علی‌رغم اختلاف ماهانه آب قابل‌بارش) می‌باشد. این ویژگی‌ها حاکی از آن است که محصولات سنجنده مودیس، جهت اقلیم‌شناسی آب قابل‌بارش در ایران بسیار کارآمد هستند. همچنین مقایسه آب قابل‌بارش مودیس با داده‌های رادیوسوند در شرایط متفاوت جوی انجام پذیرفت. نتایج نشان داد که در شرایط آسمان صاف و همراه با دید افقی بالا، آب قابل‌بارش حاصل از محصولات مودیس و داده‌های رادیوسوند، ارتباط نزدیکی با یکدیگر دارند (ضریب تعیین = ۷۳٪ در ژوئیه ۲۰۰۸). درحالی‌که ضریب تعیین در طی شرایط ابرناکی و دید افقی پایین (کمتر از ۱۰ کیلومتر) در تمامی ایستگاه‌ها به شدت کاهش می‌یابد (ضریب تعیین = ۰/۰۵٪ در ژوئیه ۲۰۰۸). با توجه به این نتایج، صحت آب قابل‌بارش مودیس در مقایسه با داده‌های رادیوسوند وابسته به شرایط جوی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آب قابل‌بارش، محصولات مودیس، ERA-Interim، رادیوسوند، ایران.

۱. مقدمه

فراهم‌کننده گرمای نهان در فرایندهای جوی است (ترنبرث و استپانیاک، ۲۰۰۳). به‌عنوان مثال در سیکلون‌های برون‌حاره‌ای، به‌طور متوسط حدود ۷۰ درصد بارش، از رطوبتی که قبلاً در جو موجود بوده است، حاصل می‌شود (ترنبرث، ۱۹۹۹). همچنین در فرایندهای آب و گرمای سیستم آب‌وهوا و همچنین تعدیل و موازنه آن نقش مهمی ایفا می‌کند. علاوه بر آن، سهم قابل‌توجهی از اثر گازهای گلخانه‌ای ناشی از وجود بخار آب در جو است (بوکوی و همکاران، ۲۰۰۳؛ مارسدن و الو، ۲۰۰۴). بخار آب برخلاف دیگر گازهای گلخانه‌ای، به لحاظ زمانی و مکانی و همچنین به

بخار آب در بسیاری از فرایندهای جوی از قبیل انتقال گرما، دینامیک چرخندها، تشکیل ابرها، بارش و اثر گازهای گلخانه‌ای مؤثر است. آگاهی از توزیع تغییرات بخار آب در جو، برای فهم این فرایندها به‌منظور کنترل بودجه تابشی و چرخه آب‌شناسی بسیار ضروری است (تیس و بندیکس، ۲۰۱۱). وجود بخار آب برای فعالیت ابرهای همرفتی بسیار مهم است. آگاهی از توزیع و تغییرات زمانی بخار آب جهت پیش‌بینی هوای یک ناحیه و همچنین برای فهم سیستم آب‌وهوای جهان مورد نیاز است (پیمینگ و همکاران، ۲۰۰۳). در تمامی سیستم‌های جوی، بخار آب در جو پایین، منبع اصلی بارش و

لحاظ تغییرات افقی و قائم بسیار تغییرپذیرتر است (کاسوموس و ام سی گریگر، ۲۰۰۶). به لحاظ تغییرات مکانی، بخار آب دارای دامنه‌ای از ۵۰ میلی‌متر در نزدیکی استوا تا کمتر از یک‌دهم میلی‌متر در قطب‌ها را شامل می‌شود (موکلر، ۱۹۹۵).

مجموع بخار آب در یک ستون واحد هوا بین دو سطح فشاری چنانچه مترکم شود و قابلیت تبدیل شدن به بارش را داشته باشند، معرف آب قابل بارش بوده و شاخصی برای بخار آب جو می‌باشد (ام سی گریگر و نیولت، ۱۹۹۸). آب قابل بارش، به‌عنوان مقدار آب مایعی که در صورت تراکم تمام بخار جو درون یک ستون عمودی حاصل می‌شود، تعریف کرده‌اند (دیویونت، ۲۰۰۸). آب قابل بارش الزاماً به مفهوم نزولات جوی نیست؛ اینکه چه مقدار از این آب به سطح زمین خواهد رسید به بسیاری از پارامترهای دیگر مثل مقدار و نوع هواویزها، پروفایل دما و فشار جو، جهت و سرعت باد و غیره بستگی دارد (مباشری و همکاران، ۱۳۸۹). تعدادی از روش‌ها از جمله روش‌های اندازه‌گیری در جا و روش‌های سنجش‌ازدوری به‌منظور برآورد آب قابل بارش استفاده می‌شود. شبکه داده‌های رادیوسوند، ابتدایی‌ترین روش مشاهده زمینی پایش آب قابل بارش می‌باشد. رادیو سوند اطلاعات پروفیل قائم پارامترهای هواشناسی، از قبیل فشار، دما، رطوبت نسبی، جهت و سرعت باد را فراهم می‌کند. استفاده از رادیوسوند به دلیل هزینه بالای بهره‌برداری از آن و همچنین پوشش فضایی کم، دارای محدودیت است (لی و همکاران، ۲۰۰۳). این محدودیت‌ها از یک‌سو و قابلیت‌های داده‌های ماهواره‌ای از سوی دیگر موجب شده که توجه بیشتری به استفاده از تصاویر ماهواره‌ای شود. استخراج آب قابل بارش از سنجنده مودیس در محدوده مادون قرمز از باندهای ۲۴ تا ۳۶ انجام می‌گیرد به‌ویژه باند ۲۶ که هم شب و هم روز قابل دسترس است (سمن و همکاران، ۲۰۰۳). محصولات آب قابل بارش سنجنده مودیس در محدوده مادون قرمز، از مقدار ستون بخار آبی که بر روی خشکی‌های بدون ابر و بر روی خشکی‌ها و

اقیانوس‌ها بر فراز ابرها، تشکیل شده است. استخراج بخار آب وابسته به مقدار جذب بخار آب انرژی خورشیدی بازتاب شده از سطح در محدوده مادون قرمز نزدیک و استفاده از نسبت باندهای جذبی بخار آب (در محدوده ۰/۹۴ میکرومتر) با باندهای پنجره‌های جوی در محدوده ۰/۸۶ و ۱/۲۴ میکرومتر است (کینگ و همکاران، ۱۹۹۲). سنجنده مودیس دارای ۵ باند در محدوده طیف مادون قرمز نزدیک است که در محدوده (باندهای بخار آب) ۰/۹۴ واقع شده و برای بازیابی مقادیر ستون بخار آب استفاده می‌شوند (کینگ و همکاران، ۲۰۰۳). روش‌های ماهواره‌ای غیرفعال برای بازیابی بخار آب (یا به عبارتی انتگرال قائم نسبت آمیزه بخار آب) در سه محدوده طیفی مختلف باندهای جذبی بخار آب انجام می‌گیرد. روش‌های مبتنی بر کانال‌های بازتاب خورشیدی به میزان جذب در محدوده بین ۰/۹ تا ۱ میکرومتر وابسته است (گائو و کافمن، ۲۰۰۳). روش‌های مبتنی بر محدوده‌های مادون قرمز گرمایی وابسته به جذب و انتشار در محدوده بین ۶/۵، ۸/۷ و ۱۲ میکرومتر است (سمن و همکاران، ۲۰۰۳). تکنیک‌های بازیابی بخار آب در محدوده مایکروویو، مبتنی بر خطوط جذبی محدوده ۲۲/۲ یا ۱۸۳/۳ گیگاهرتز می‌باشند (سوهن و اسمیت، ۲۰۰۳). علاوه بر این مطالعات متعددی نشان داده است که اندازه‌گیری در محدوده مرئی، می‌تواند برای استخراج کل ستون بخار آب جو استفاده شود (وگنر و همکاران، ۲۰۰۳؛ بوچویتز و همکاران، ۲۰۰۴).

اخیراً توجه زیادی به بخار آب شده است؛ این امر نه تنها به دلیل اثرات تابشی، بلکه به دلیل روند محتوای آب تروپوسفر (که ممکن است منجر به تغییرات در چرخه هیدرولوژی در ارتباط با رخداد گرمایش جهانی شود) می‌باشد (اوهمورا و ویلد، ۲۰۰۲؛ ترنبرث، ۲۰۰۴). به‌عنوان نمونه به چند مورد از تحقیقات خارجی و داخلی اشاره خواهد شد. آلبرت و همکاران (۲۰۰۵) نتایج نخستین اعتبارسنجی الگوریتم ایجادشده برای استخراج بخار آب از سنجنده مودیس را ارائه کردند. اساس این الگوریتم

در منطقه تهران را بررسی کردند. آنها پس از محاسبه آب قابل‌بارش به روش ترمودینامیکی از روی نمودارهای هواشناختی Skew-T و مقایسه آن با بارش اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های زمینی منطقه تهران، رابطه‌ای برای پیش‌بینی کمی بارش به دست آوردند؛ نتایج آنها نشان می‌دهد که آستانه ۷ میلی‌متر آب قابل‌بارش ابر، برای احتمال وقوع بارش به دست آمده است، بدین معنا که هنگامی که آب قابل‌بارش کمتر از ۷ میلی‌متر باشد، انتظار رخداد بارش بر روی تهران نمی‌رود. همچنین بررسی تکمیلی آنها نشان داد که برای ۴۰ میلی‌متر آب قابل‌بارش، می‌تواند منجر به وقوع سیل در تهران شود. پورباقر و همکاران (۱۳۸۸) نشان دادند که در شرایط عادی جو، نسبت‌های باندی ۱۹ و ۱۷ به باند ۲ سنجنده مودیس، بهترین و مناسب‌ترین باندها در برآورد آب قابل‌بارش به کمک تصاویر ماهواره‌ای مودیس و نسبت باندی ۱۸ به ۲ نامناسب‌ترین نسبت باندی بخار آب برای منطقه گرگان رود، در مقایسه با داده‌های رادیوسوند بوده‌اند. همچنین بین آب قابل‌بارش رادیوسوند و مودیس، اختلاف زیادی وجود نداشته است.

مباشری و همکاران (۱۳۸۹) پس از انتخاب چند تصویر سنجنده مودیس در شرایط صاف و جو پایدار، اقدام به اعتبارسنجی داده‌های آب قابل‌بارش این سنجنده با داده‌های رادیوسوند کردند. رابطه رگرسیون بین آب قابل‌بارش ماهواره‌ای و آب قابل‌بارش محاسبه شده از داده‌های رادیوسوند، نشان داده است که باندهای ۱۸ و ۱۹ سنجنده مودیس برای استخراج آب قابل‌بارش در شرایط جوی ایستگاه مهرآباد مناسب می‌باشند. عساکره و دوستکامیان (۱۳۹۳) با استفاده از داده‌های آب قابل‌بارش مرکز ملی پیش‌بینی محیطی و مرکز ملی پژوهش‌های جوی ایالات متحده با قدرت تفکیک ۲/۵ درجه جغرافیایی نشان دادند که تغییرپذیری آب قابل‌بارش در ایران بسیار زیاد و تحت تأثیر ناهمواری‌ها است. علاوه بر این، آنها نتیجه گرفتند که عوامل محلی، به خصوص ارتفاعات و دوری و نزدیکی به دریاها و بعضاً عرض

مبتنی بر جذب انرژی خورشیدی بازتاب شده به وسیله بخار آب جو که امکان بازیابی کل بخار آب بر روی زمین‌های بدون ابر را فراهم می‌آورد، می‌باشد. ریشه میانگین مربعات خطای این داده‌ها در مقایسه با داده‌های رادیوسوند استفاده شده در اروپای مرکزی طی ماه ژوئیه ۲۰۰۲ تا آوریل ۲۰۰۳، میزان ۲ کیلوگرم بر متر مربع و انحراف ۰/۰۸ کیلوگرم بر متر مربع را نشان داده است.

سدر دجت و همکاران (۲۰۰۵) به مقایسه داده‌های آب قابل‌بارش مرکز پیش‌بینی‌های محیطی، پروژه بخار آب سازمان فضایی آمریکا (NVAP) و داده‌های مرکز اروپایی پیش‌بینی هوا در مقیاس متوسط (ECMWF) پرداختند. نتایج کار آنها نشان داد اگرچه همه پایگاه داده‌ها برای تحلیل چرخه آب و آب و هوا ضروری است اما داده‌های ERA-40 و پروژه بخار آب ناسا نسبت به داده‌های باز کاوی شده مرکز پیش‌بینی محیطی برای یک دوره ۱۲ ساله دقیق‌تر بوده‌اند. چن و همکاران (۲۰۰۸) به مقایسه داده‌های آب قابل‌بارش مستخرج از سنجنده مودیس با داده‌های GPS و رادیوسوند پرداختند. اختلاف بین داده‌های GPS و سنجنده مودیس به ترتیب برای محدوده‌های مادون قرمز و مادون قرمز نزدیک به میزان ۵/۲ و ۳/۳ میلی‌متر بر روی ایالات متحده بوده است. همچنین آنها نشان دادند که آب قابل‌بارش مودیس در محدوده مادون قرمز در جو خشک، بیش از حد برآورد می‌کند اما در جو مرطوب، کمتر از حد مقدار واقعی برآورد می‌کند. کرن و همکاران (۲۰۰۸) نیز به این نتیجه رسیدند که محدوده مادون قرمز نزدیک مودیس (باند ۰/۹ میکرومتر) یا باند جذبی بخار آب، برای برآورد بخار آب روش صحیحی است.

علی‌رغم اهمیت بحث آب قابل‌بارش، مطالعات در این رابطه اندک می‌باشند. در مطالعات صورت گرفته نیز توجهی به محصولات آب قابل‌بارش سنجنده مودیس در بلندمدت و ارزیابی دقت آن با داده‌های زمینی (رادیوسوند) نشده است. صادقی حسینی و همکاران (۱۳۸۴) ارتباط آب قابل‌بارش ابر و بارندگی دیدبانی شده

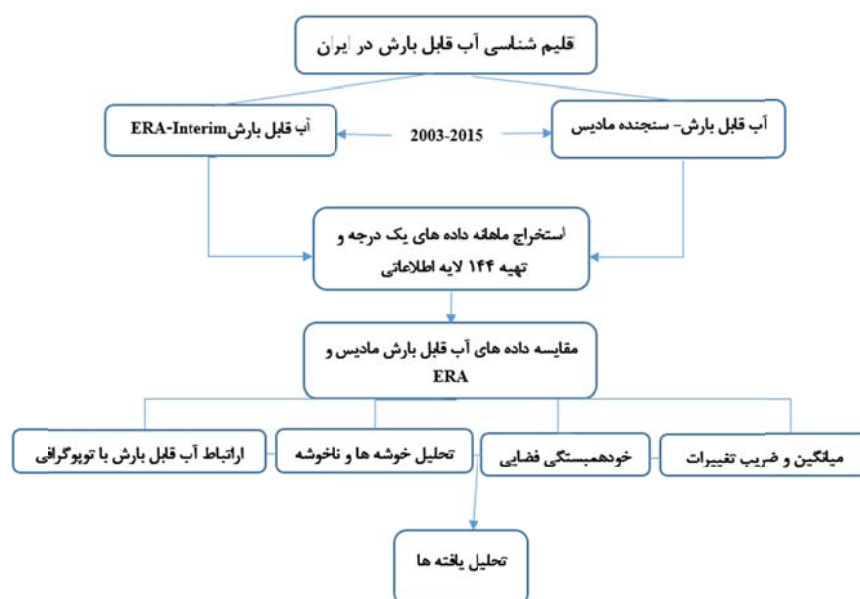
ایران در مقیاس زمانی ماهانه، در یک دوره بلندمدت بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۵ مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این بخش داده‌های ماهانه سنجنده مودیس و داده‌های ERA-Interim هردو با وضوح فضایی یک درجه جغرافیایی از منظر ویژگی‌های آمار توصیفی و آمار فضایی (روش‌های خودهمبستگی فضایی) مورد بررسی قرار گرفته است. مراحل انجام تحقیق در مرحله اول پژوهش، در شکل ۱ ارائه شده است. مقادیر ماهانه محصولات مودیس، ترکیبی است از داده‌هایی که در روز و شب ثبت شده است، اما مقادیر آب قابل بارش حاصل از داده‌های ERA، میانگینی از تمامی ساعات دیده‌بانی می‌باشد. به منظور تحلیل اثر ناهمواری‌ها و عرض جغرافیایی بر مقدار آب قابل بارش، در امتداد طول جغرافیایی ۵۲/۵ درجه شرقی، بین عرض‌های ۲۸ تا ۳۸ درجه شمالی (در امتداد بوشهر تا مازندران) که از رشته کوه‌های زاگرس و البرز نیز عبور می‌کند، تغییرات آب قابل بارش مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، نقش ارتفاع نیز بر توزیع فضایی اقلیم‌شناسی آب قابل بارش برای داده‌های مودیس و ERA مورد بررسی قرار گرفته است.

جغرافیایی از عوامل اصلی در تنوع مکانی آب قابل بارش در ایران زمین است، به طوری که بیشترین میانگین آب قابل بارش در نوار ساحلی شمال و جنوب کشور و کمترین مقدار آب قابل بارش، به صورت نواری در امتداد کوه‌های زاگرس مشاهده شده است.

یکی از محاسن قابل توجه داده‌های ماهواره‌ای نسبت به داده‌های ایستگاهی، قابلیت نمایش مکانی پیوسته آنهاست، اما نکته‌ای که در استفاده از محصولات سنجنش از دور وجود دارد، ارزیابی صحت آنها می‌باشد. هدف اصلی این پژوهش ارزیابی قابلیت داده‌های آب قابل بارش سنجنده مودیس بر اساس داده‌های مرکز اروپایی پیش‌بینی هوا در مقیاس متوسط (ECMWF) و داده‌های رادیوسوند می‌باشد. نتایج این پژوهش در دو بخش اصلی ارائه شده است، در بخش نخست محصولات سطح سوم مودیس در مقیاس ماهانه با داده‌های ERA مقایسه شده است و در بخش دوم محصولات سطح دوم مودیس در مقیاس روزانه با داده‌های رادیوسوند مقایسه شده است.

۲. داده‌ها و روش

پژوهش حاضر به دو بخش اصلی تقسیم می‌شود. در بخش نخست ویژگی‌های زمانی و مکانی آب قابل بارش در

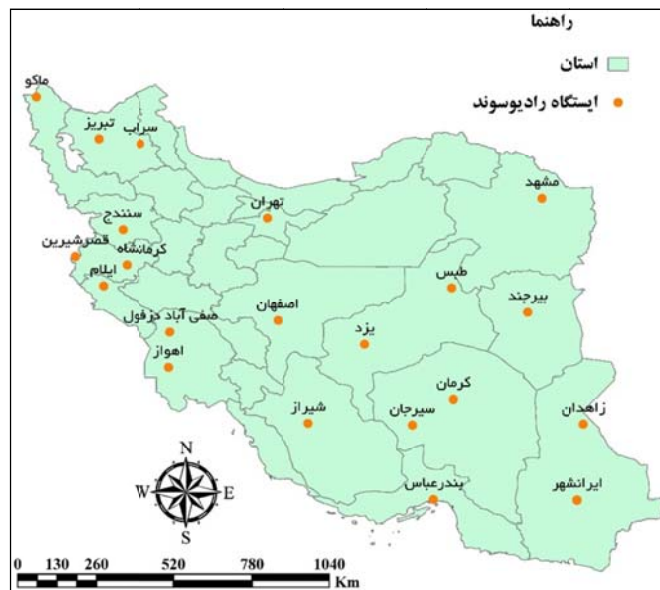


شکل ۱. روند نمای مراحل انجام تحقیق به منظور اقلیم‌شناسی آب قابل بارش در ایران با استفاده از داده‌های ERA و مودیس در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۵.

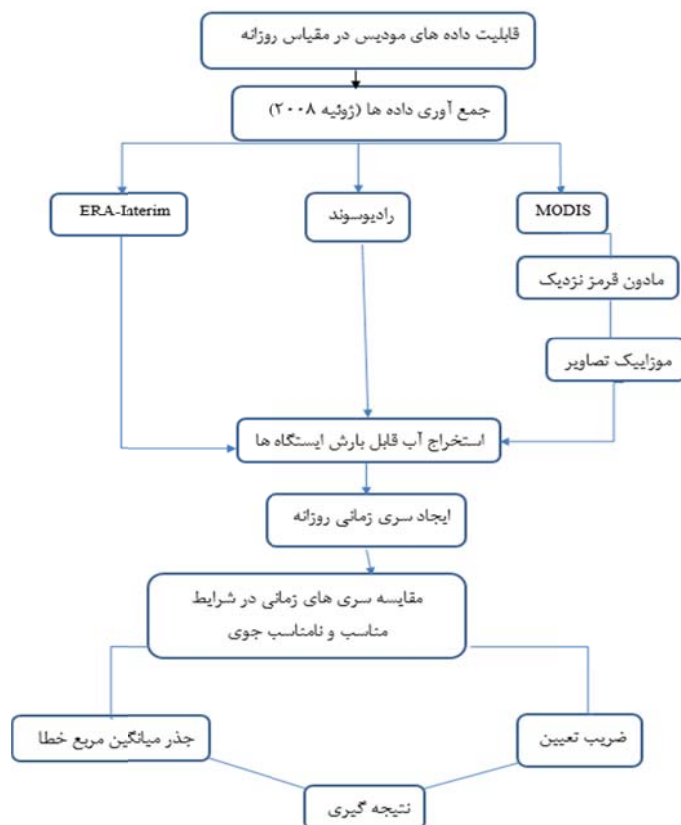
اصفهان، شیراز، تهران، کرمان، مشهد، زاهدان، اهواز و بیرجند است.

شکل ۳ مراحل انجام تحقیق را نشان می‌دهد. در این بخش، از محصولات مودیس و همچنین داده‌های آب قابل‌بارش رادیوسوند در مقیاس زمانی روزانه استفاده شده است. پس از دریافت داده‌های سطح دوم مودیس با نام اختصاری MOD05-L2، داده‌های آب قابل‌بارش از آنها استخراج و در محیط نرم‌افزار ENVI زمین مرجع شد. در مرحله بعد با توجه به اینکه هر قطعه از تصویر مودیس تنها بخشی از ایران را تحت پوشش قرار می‌دهد جهت ایجاد یک پوشش سرتاسری برای ایران، اقدام به موزاییک‌سازی تصاویر در محیط نرم‌افزار ENVI شد. در نهایت با استخراج عددی داده‌ها در نرم‌افزار GIS بر مبنای موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌ها، یک پایگاه داده از سری زمانی داده‌های آب قابل‌بارش مودیس و رادیوسوند، در محیط نرم‌افزار اکسل تهیه شد و برای اعتبار سنجی داده‌های مودیس از روش‌های آماری از قبیل جذر میانگین مربعات خطا، ضریب تعیین استفاده شد. با توجه به تأثیر ابرناکی و دید افقی نامناسب در بازیابی صحیح بخار آب، توسط سنجنده مودیس، مقایسه بین آب قابل‌بارش مودیس و رادیوسوند، یک‌بار برای تمامی روزها و یک‌بار نیز در شرایط مناسب جوی انجام گرفته است.

در بخش دوم، به منظور اعتبارسنجی مقدار عددی آب قابل‌بارش داده‌های مودیس در مقیاس روزانه، از بین ۱۲ ماه سال، ماه ژوئیه به علت اینکه اولاً کمیت بخار آب در این ماه به لحاظ عددی از مقدار بالایی برخوردار است و در ثانی پوشش ابرناکی که به عنوان یک عامل مزاحم در برآورد آب قابل‌بارش جو مطرح است، در این ماه به کمینه می‌رسد، انتخاب شد. از سوی دیگر ژانویه سال ۲۰۰۴ نیز به عنوان یکی از پرباران‌ترین ماه‌های دوره مورد مطالعه، جهت اعتبار سنجی داده‌های آب قابل‌بارش مودیس بر اساس مقادیر به دست آمده از داده‌های رادیوسوند انتخاب شد. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های دارای رادیوسوند در شکل ۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که داده‌های آب قابل‌بارش رادیوسوند از وب‌سایت دانشگاه وایومینگ (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>) اخذ شد. داده‌های این وب‌سایت بر اساس داده‌های رادیوسوند ارسالی از سازمان هواشناسی تمامی کشورها از جمله ایران، بارگزاری می‌شود. شکل ۲ موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های دارای رادیوسوند در ایران را نشان می‌دهد. در این پژوهش از ۱۰ ایستگاه رادیوسوند که سری زمانی کامل‌تر و به نوعی تمام پهنه کشور را پوشش داده‌اند، استفاده شده است. این ایستگاه‌ها شامل کرمانشاه، تبریز،



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های دارای رادیوسوند در ایران.

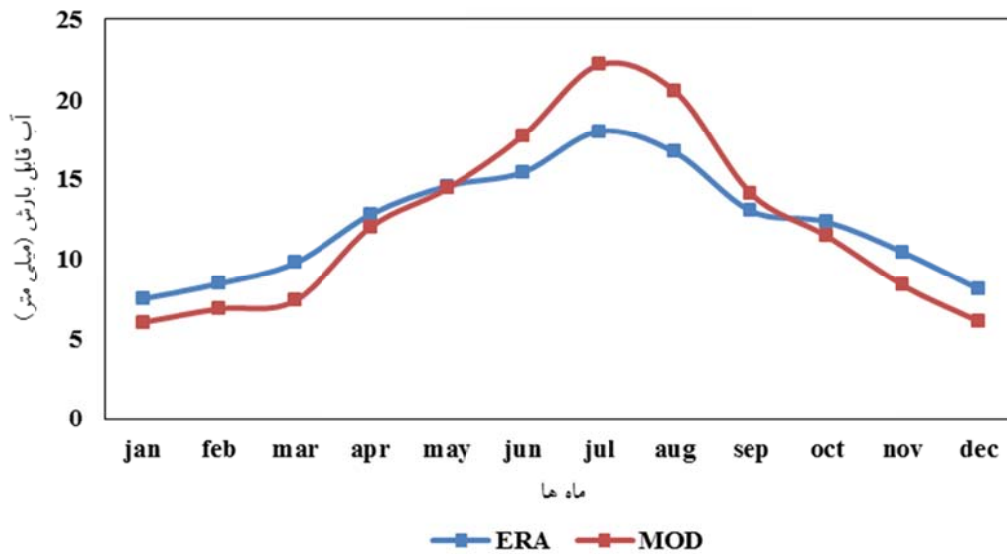


شکل ۳. مراحل انجام تحقیق به منظور اعتبارسنجی مقدار عددی آب قابل بارش سنجنده مودیس در مقایسه با داده های رادیسوند در مقیاس روزانه.

۳. نتایج و بحث

ایستگاه رادیسوند در سراسر جهان نشان داد که ماه های فوریه و ژوئیه به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار آب قابل بارش را دارا می باشند اما برخی مواقع، ماه آگوست جایگزین ژوئیه می شود و همچنین در برخی مواقع، ماه ژانویه جایگزین فوریه می شود. نتایج به دست آمده با مشاهدات مغربی و دجانی (۲۰۱۴) بر روی عربستان سعودی یکسان می باشد. آنها گزارش کردند که کمینه مقدار آب قابل بارش در ماه های دسامبر و ژانویه و بیشینه آن در ماه های ژوئن و ژوئیه مشاهده می شود. آنها اشاره کردند که در طی دوره گرم، افزایش در دمای هوا و افزایش ارتفاع تراز هم فشارها، منجر به افزایش ظرفیت برای نگه داشتن بخار آب در یک توده هوا می شود. در مقابل، در دوره سرد، کاهش ارتفاع تراز هم فشار منجر به کاهش ظرفیت نگه داشتن بخار آب جو می شود که این امر منجر به تسهیل در فرایند تراکم شده و نهایتاً باعث کاهش در مقدار بخار آب می شود.

میانگین سالانه آب قابل بارش داده های مودیس و ERA هر دو یکسان می باشد (۱۲/۴۳ میلی متر؛ علی رغم تفاوت ماهانه آب قابل بارش)؛ در دوره گرم سال، داده های آب قابل بارش مودیس مقادیر بیشتر و در دوره سرد سال، مقادیر کمتری را نسبت به داده های ERA است (شکل ۴). این مقادیر به آنچه که توسط عساکره و همکاران (۲۰۱۵) از داده NCEP/NCAR به دست آورده اند (۱۴/۳ میلی متر) نزدیک می باشد. همچنین بررسی فرنسز و پونگرا (۲۰۰۸) نشان می دهد که داده های ERA-Interim با داده های مودیس، ارتباط نزدیکی دارند؛ به طوری که بیشینه مقدار آب قابل بارش در ماه ژوئیه و کمینه آن در ماه ژانویه مشاهده شد. بررسی میانگین ماهانه آب قابل بارش ایران بین سال های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۵ نشان داد که تغییرات زمانی هر دو سری از داده شبیه به یکدیگر بوده است (بیشینه تابستانه و کمینه زمستانه). تالار (۱۹۶۸) در مطالعه ای با بررسی ۱۸۳



شکل ۴. میانگین آب قابل‌بارش در طی دوره (۲۰۱۵-۲۰۰۳) از دو پایگاه داده ERA و مودیس بر روی ایران.

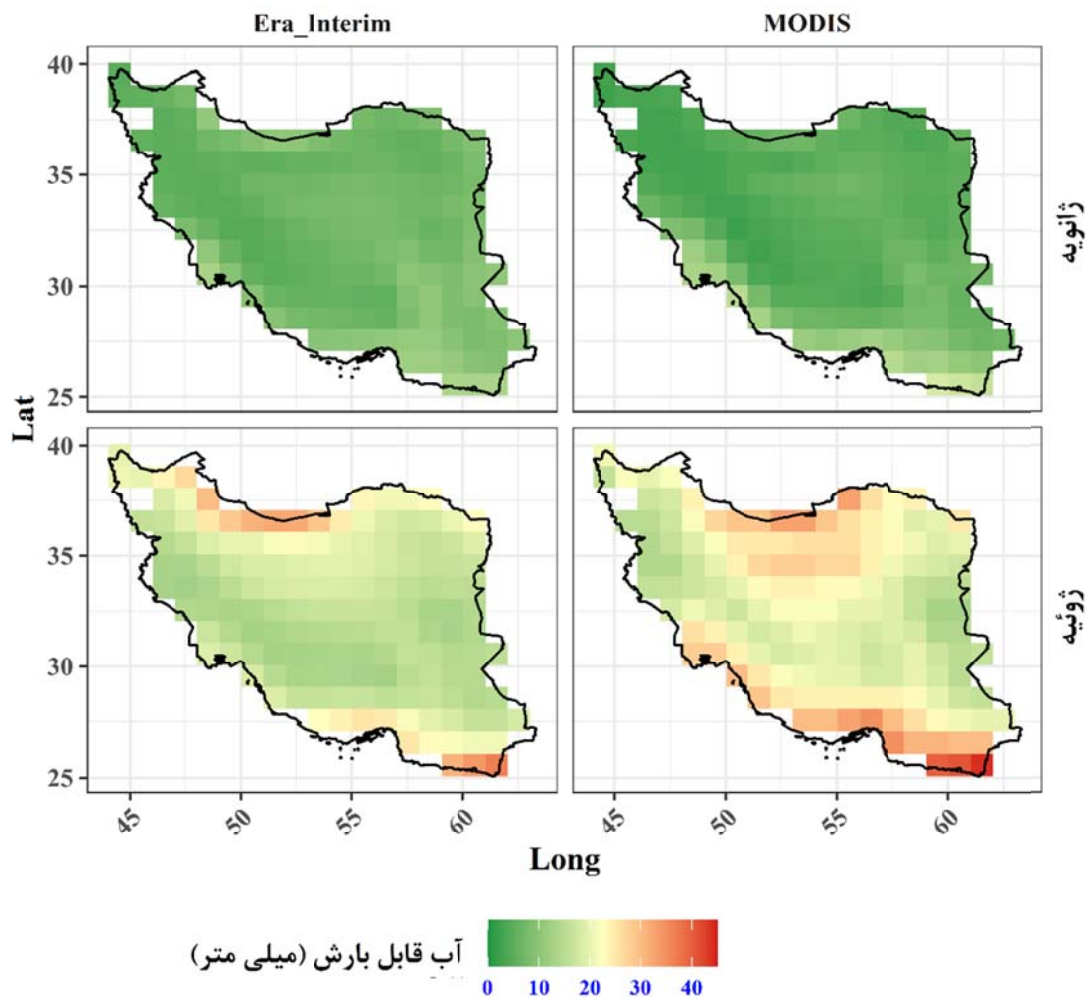
تا ۳۸ درجه جغرافیایی، در ماه ژانویه (شکل ۶-الف) نشان می‌دهد که در عرض جغرافیایی ۲۹/۵ درجه شمالی، مقادیر آب قابل‌بارش مودیس، کمتر از داده‌های ERA است. در عرض ۳۰/۵ درجه شمالی در هر دو سری از داده، با توجه به فاصله از دریا، این مقدار دچار افت می‌شود، سپس یک روند بدون تغییری را طی می‌کند و در محدوده ۳۵/۵ درجه شمالی، به سبب وجود کوه‌های البرز، دچار افت می‌شود و مجدداً در سواحل شمالی افزایش پیدا می‌کند. داده‌های ERA مقادیر آب قابل‌بارش عرض‌های شمالی‌تر را بیشتر از عرض‌های جنوبی‌تر نشان می‌دهد؛ اما داده‌های مودیس این مقدار را برای عرض‌های جنوبی‌تر بیشتر نشان می‌دهد (در راستای طول جغرافیایی ۵۲/۵ درجه شرقی). در ماه ژوئیه، میانگین آب قابل‌بارش برای داده‌های مودیس و ERA به ترتیب ۲۲/۶ و ۱۸/۰۲ میلی‌متر بوده است. بیشینه مقدار آب قابل‌بارش در داده‌های ERA و مودیس به ترتیب به میزان ۳۶/۷ و ۴۴ میلی‌متر هر دو در یک پیکسل بر روی جنوب شرق ایران در سواحل دریای عمان مشاهده شده است. از سوی دیگر کمینه مقدار آب قابل‌بارش به میزان ۱۳ میلی‌متر برای داده‌های مودیس و ۱۲/۴ میلی‌متر برای داده‌های ERA به ترتیب بر روی ارتفاعات خراسان جنوبی و ارتفاعات

۳-۱. تغییرات مکانی آب قابل‌بارش

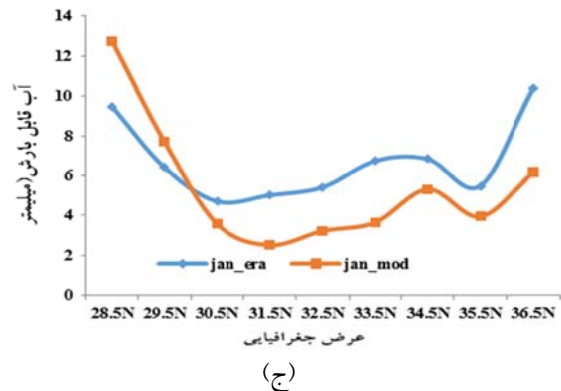
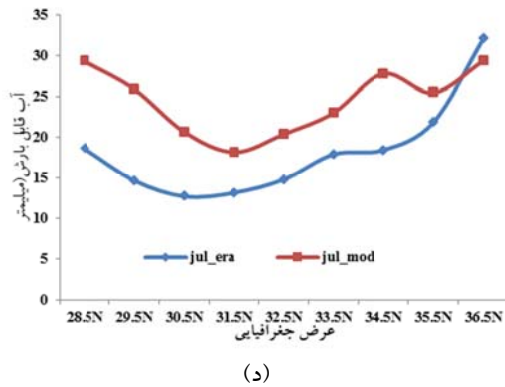
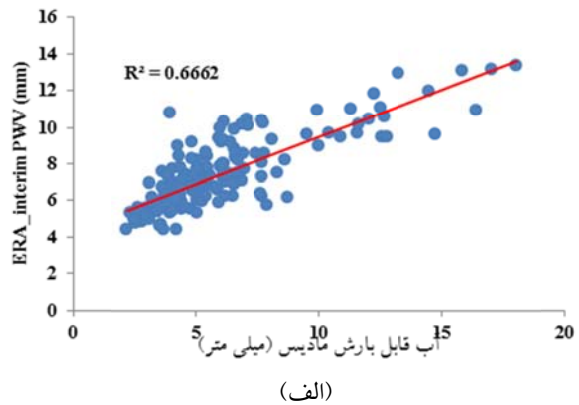
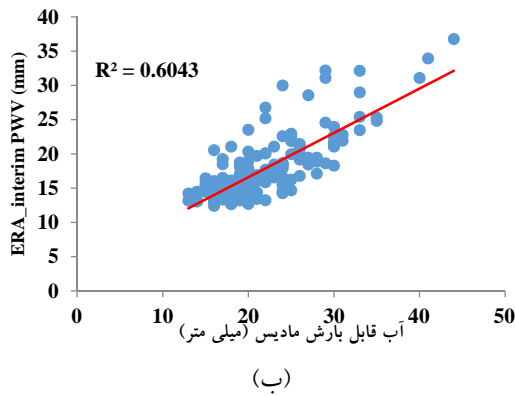
با توجه به حجم بالای نقشه‌ها و نمودارها در این بخش تغییرات مکانی آب قابل‌بارش برای ماه‌های ژانویه (نماینده دوره سرد سال) و ژوئیه (نماینده دوره گرم سال) بررسی شده است. در ماه ژانویه بر اساس داده‌های مودیس و ERA، مقادیر آب قابل‌بارش ایران به ترتیب ۶/۰۸ و ۷/۵ میلی‌متر بوده است. بیشینه آب قابل‌بارش به میزان ۱۸/۰۴ میلی‌متر در سواحل جنوب شرق (دریای عمان) و کمترین مقدار آن به میزان ۲/۲ میلی‌متر در بلندی‌های زاگرس (بر روی استان چهارمحال و بختیاری) مشاهده شده است. در داده‌های ERA، بیشینه و کمینه آب قابل‌بارش به مانند مودیس در جنوب شرق و ارتفاعات زاگرس (بر روی استان چهارمحال و بختیاری) به ترتیب به میزان ۱۳/۴ و ۳/۱ میلی‌متر بوده است. ضریب تغییرات مکانی آب قابل‌بارش داده‌های مودیس به ۵۲/۱ و ERA به ۲۶/۲ می‌رسد که نشان می‌دهد داده‌های مودیس از تغییرپذیری مکانی بیشتری برخوردار می‌باشند. همبستگی بین دو نقشه ۰/۸۱ است که ۶۶ درصد تغییرات آب قابل‌بارش دو سری از داده در ماه ژانویه با یکدیگر قابل تبیین است. تغییرات آب قابل‌بارش در راستای طول جغرافیایی ۵۲ درجه شرقی، بین عرض‌های جغرافیایی ۲۸

یکدیگر بوده اما در عرض جغرافیایی ۳۴/۵ درجه شمالی، داده‌های مودیس با شیب تندتری نسبت به عرض جغرافیایی ۳۳/۵ درجه شمالی افزایش می‌یابد و سپس در عرض جغرافیایی ۳۵/۵ درجه شمالی دچار کاهش می‌شود، این در حالی است که در داده‌های ERA، روند تغییر از عرض جغرافیایی ۳۴/۵ به ۳۵/۵ درجه شمالی، افزایشی (برعکس داده‌های مودیس) بوده است. عساکره و همکاران (۲۰۱۵) نتیجه گرفتند که عواملی چون نزدیکی به پهنه‌های آبی جنوب و شمال ایران، ناهموارهای داخلی همچون البرز و زاگرس و وجود بیابان‌های داخلی، می‌تواند الگوی پراکنش آب قابل بارش در ایران را تعیین کند.

زاگرس در استان لرستان مشاهده شده است. ضریب تغییرات مکانی در داده‌های مودیس ۲۴/۷ و برای داده‌های ERA مقدار ۲۶/۰۸ به دست آمده است. ارتباط و ضریب همبستگی فضایی بین دو نقشه ۰/۷۷ بوده است که ۶۰ درصد تغییرات فضایی دو نقشه با یکدیگر در ارتباط است (شکل ۶-ب). نمودار هاف مولر نیز در راستای طول جغرافیایی ۵۲/۵ درجه شرقی (شکل ۶-د) نشان می‌دهد که در ماه ژوئیه به جز در عرض جغرافیایی ۳۶/۵ درجه شمالی در تمامی نقاط، مقادیر آب قابل بارش داده‌های مودیس، بیشتر از داده‌های ERA می‌باشد. روند مکانی داده‌ها از عرض جغرافیایی ۲۸/۵ تا ۳۳/۵ درجه شمالی تقریباً شبیه به



شکل ۵. مقادیر میانگین آب قابل بارش طی دوره ۲۰۰۳-۲۰۱۵ در محدوده ایران به ترتیب برای ماه‌های ژانویه و ژوئیه برای داده‌های ERA-Interim و داده‌های مودیس.



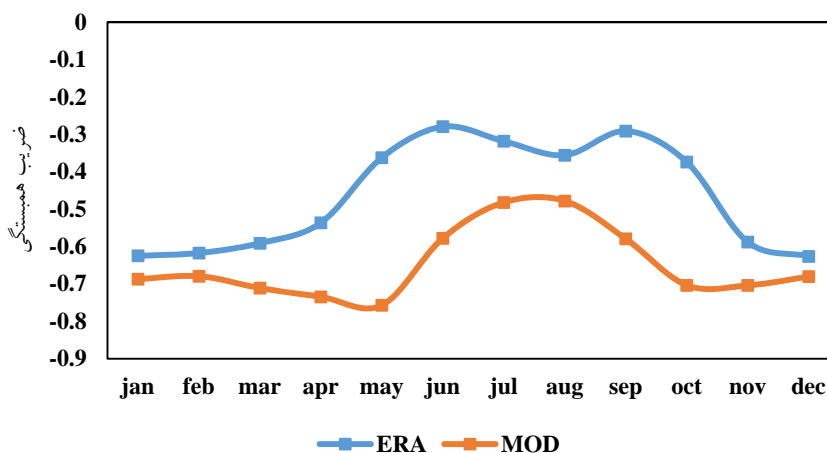
شکل ۶. نمودار پراکنندگی ارتباطی بین داده‌های آب قابل‌بارش (برحسب mm) مودیس و ERA-Interim طی دوره ۲۰۰۳-۲۰۱۵ برای ماه‌های ژانویه (الف) و ژوئیه (ب)؛ تغییرات مقادیر آب قابل‌بارش در راستای طول جغرافیایی ۵۲/۵ درجه شرقی (بین عرض‌های ۲۸ تا ۳۷ درجه شمالی برای ماه‌های ژانویه (ج) و ژوئیه (د)).

قابل‌بارش دو پایگاه داده مودیس و ERA با داده‌های ارتفاع مورد بررسی قرار گرفت که ضرایب همبستگی به تفکیک هرماه در جدول ۱ ارائه شده است. ضرایب همبستگی نشان می‌دهد در تمامی ماه‌ها هر دو سری از داده، ارتباط منفی و معنی‌داری با ارتفاع داشته‌اند. این به آن معناست که در مناطق با ارتفاع کم، مقادیر آب قابل‌بارش، بیشتر و در ارتفاعات، مقادیر آب قابل‌بارش، کمتر می‌شود. در داده‌های ERA از ماه ژانویه تا آوریل، ضریب همبستگی کمتر از ۰/۵- بوده و از ماه می تا اکتبر، این ارتباط منفی کاهش می‌یابد و مجدد در ماه‌های نوامبر و دسامبر این ارتباط منفی، قوی‌تر می‌شود. در داده‌های مودیس از ماه ژوئن تا سپتامبر، ضریب همبستگی منفی به کمتر از ۰/۶- می‌رسد. در مجموع داده‌های مودیس در تمامی ماه‌ها، ارتباط منفی قوی‌تری با داده‌های ارتفاع نشان می‌دهد (شکل ۷).

۳-۱-۱. ارتباط فضایی بین آب قابل‌بارش و ارتفاع
 عساکره و همکاران (۲۰۱۵) نتیجه می‌گیرند که کمترین مقادیر آب قابل‌بارش در مناطق مرتفع ثبت شده است. علیجانی (۱۳۹۲) اشاره می‌کند که این امر می‌تواند به دلیل رطوبت بسیار پایین این مناطق باشد. وانگ و همکاران (۲۰۱۳) ارتباط آب قابل‌بارش و ارتفاع را بررسی کردند آنها نتیجه گرفتند که ایستگاه‌های واقع در ارتفاعات بلندتر، مقادیر فصلی آب قابل‌بارش پایین‌تری دارند. درحالی‌که ایستگاه‌های واقع در مناطق کم ارتفاع، دارای آب قابل‌بارش بیشتری هستند. تالر (۱۹۶۸) نشان داد که ارتفاع و فاصله از دریا فاکتور مهمی در توزیع جغرافیایی آب قابل‌بارش می‌باشند. بر این اساس توپوگرافی یک عامل کلیدی در توزیع جغرافیایی آب قابل‌بارش می‌باشد. با توجه به اهمیت نقش توپوگرافی در توزیع فضایی آب قابل‌بارش، همبستگی فضایی بین میانگین ماهانه آب

جدول ۱. ضریب همبستگی فضایی بین داده‌های آب قابل‌بارش ماهانه مودیس و ERA با مقادیر ارتفاع.

پایگاه داده	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
ERA	-۰/۶۲	-۰/۶۱	-۰/۵۹	-۰/۵۳	-۰/۳۶	-۰/۲۷	-۰/۳۱	-۰/۳۵	-۰/۲۹	-۰/۳۷	-۰/۵۸	-۰/۶۲
مودیس	-۰/۶۸	-۰/۶۷	-۰/۷۱	-۰/۷۳	-۰/۷۵	-۰/۵۷	-۰/۴۸	-۰/۴۷	-۰/۵۷	-۰/۷	-۰/۷	-۰/۶۸



شکل ۷. تغییرات مقادیر ضریب همبستگی ماهانه داده‌های میانگین ماهانه آب قابل‌بارش مودیس و ERA با ارتفاع.

۲-۳. الگوی فضایی آب قابل بارش

در این بخش با استفاده از آماره موران عمومی به بررسی الگوی فضایی مقادیر میانگین آب قابل بارش به تفکیک هرماه و مقایسه دو پایگاه داده مودیس و ERA پرداخته شده است. شاخص موران عمومی بازگوکننده الگوی کلی توزیع داده‌های فضایی است. مقادیر نزدیک به عدد یک این آماره، نشان از الگوی خوشه‌ای و مقادیر نزدیک به صفر، حاکی از الگوی فضایی پراکنده می‌باشد. اگر مقدار شاخص مثبت باشد بدین معناست که عارضه مورد نظر توسط عوارض مشابه خود احاطه شده و اگر مقدار آن منفی باشد، نشان می‌دهد که توسط عوارض نامشابه احاطه شده است که این نوع عوارض ناخوشه نامیده می‌شوند. بنابراین آماره مذکور می‌تواند در تحلیل الگوی فضایی ماهانه آب قابل بارش و مقایسه داده‌های ERA و مودیس مفید واقع شود. جدول ۲ مقادیر ماهانه آماره موران را نشان می‌دهد. روند بسیار نزدیکی بین مقادیر

خودهمبستگی فضایی داده‌های مودیس و ERA دیده می‌شود. بیشینه مقدار آماره موران در داده‌های مودیس و ERA به ترتیب به میزان ۰/۷۴ و ۰/۶۹ در ماه ژوئن دیده می‌شود. کمترین مقدار آماره موران در داده‌های مودیس به میزان ۰/۵۶ برای ماه آوریل و در داده‌های ERA ۰/۴۹ برای ماه نوامبر مشاهده می‌شود. بر این اساس، در تمامی ماه‌ها، مقادیر خودهمبستگی فضایی نشان می‌دهد که مقادیر آب قابل بارش در سطح کشور دارای الگوی خوشه‌ای است که الگوی مذکور در ماه‌های تابستان دارای نظم فضایی بهتری (با توجه به مقادیر بالای شاخص موران) می‌باشد. مقدار شاخص موران بین دو سری از داده‌های مودیس و ERA از ماه‌های ژانویه تا می تقریباً با یکدیگر برابر بوده اما از ماه‌های ژوئن تا دسامبر، مقادیر خودهمبستگی فضایی داده‌های مودیس به نسبت داده‌های ERA بیشتر بوده است؛ به عبارتی دیگر در این ماه‌ها، داده‌های مودیس نظم فضایی بیشتری به نسبت داده‌های ERA داشته‌اند.

جدول ۲. مقادیر ماهانه شاخص موران عمومی برای داده‌های آب قابل بارش ERA و مودیس.

پایگاه داده	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
مودیس	۰/۶۳	۰/۶۶	۰/۶۳	۰/۵۶	۰/۶۴	۰/۷۴	۰/۶۸	۰/۶۹	۰/۶۷	۰/۵۸	۰/۶۱	۰/۶۱
ERA	۰/۶۲	۰/۶۶	۰/۶۳	۰/۵۶	۰/۶۵	۰/۶۹	۰/۶۶	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۵۷	۰/۴۹	۰/۵۴

(حداقل ۱۰ کیلومتر) انجام گرفته است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، در تمامی ایستگاه‌ها، ضرایب تعیین در شرایط جوی مناسب، به‌طور معنی‌داری نسبت به تمامی روزها افزایش یافته است. در طی ژانویه ۲۰۰۴ دامنه مقادیر خطا بین ۵/۵ میلی‌متر (تبریز) و ۱۶/۰۲ میلی‌متر در اهواز مشاهده شده است. در تمامی ایستگاه‌ها مقادیر ضریب تعیین ناچیز است. در حالی که در شرایط مناسب جوی، مقدار خطا در تمامی ایستگاه‌ها کاهش می‌یابد. در طی ژوئیه ۲۰۰۸ در ایستگاه‌هایی مثل زاهدان، کرمان و اصفهان، وضعیت پوشش ابر و شرایط دید افقی بسیار مناسب بوده است. اما برعکس در ایستگاه بندرعباس در تمامی روزها دید افقی کمتر از ۵ کیلومتر بوده است. به نظر می‌رسد که مشاهده ضریب تعیین بالا در ایستگاه‌های کرمان، زاهدان و اصفهان به ترتیب با ۸۰، ۶۶ و ۷۷ درصد، و ضریب تعیین پایین در ایستگاه بندرعباس، نشان‌دهنده تأثیر شرایط ابرناکی و دید افقی در برآورد آب قابل بارش مودیس می‌باشد.

جدول ۲ بیانگر عدم تغییر در همه فصول است؟ فقط ماه ژوئن کمی متفاوت است.

۳-۳. مقایسه داده‌های آب قابل بارش مودیس و رادیوسوند در مقیاس روزانه

در بخش دوم این پژوهش داده‌های آب قابل بارش سنجنده مودیس با داده‌های آب قابل بارش رادیوسوند در مقیاس روزانه برای ماه ژانویه سال ۲۰۰۴ (نماینده دوره سرد) و ژوئیه سال ۲۰۰۸ (نماینده دوره گرم سال) مورد مقایسه قرار گرفت. این کار به منظور پاسخ به این سؤال که با چه سطح اطمینانی می‌توان از داده‌های سنجنده مودیس به منظور تهیه نقشه‌های آب قابل بارش در ایران استفاده کرد؟ انجام شده است.

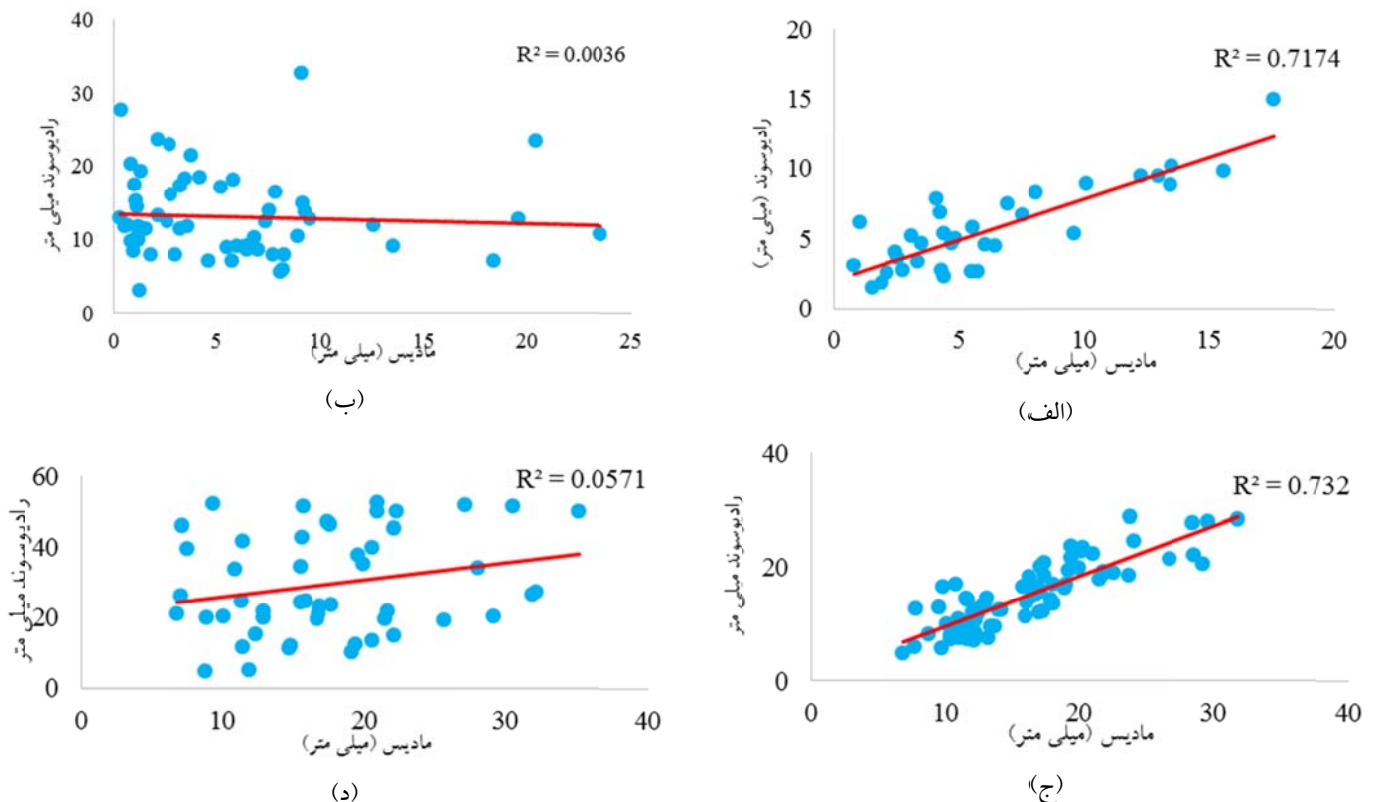
ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب تعیین بین آب قابل بارش به دست آمده از رادیوسوند و مودیس برای ژانویه ۲۰۰۴ و ژوئیه ۲۰۰۸ در جدول ۳ نشان داده شده است. این محاسبات یک‌بار برای تمامی روزها و یک‌بار برای روزهای با آسمان صاف و با دید افقی مناسب

جدول ۳. مقادیر میانگین مربعات خطا و ضریب تعیین بین داده‌های آب قابل بارش مودیس و رادیوسوند در شرایط مناسب جوی نسبت به تمامی روزها در طی ماه‌های ژانویه ۲۰۰۴ و ژوئیه ۲۰۰۸.

ایستگاه	ژانویه ۲۰۰۴				ژوئیه ۲۰۰۸			
	تمامی روزها		شرایط مناسب جوی		تمامی روزها		شرایط مناسب جوی	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²
بیرجند	۱۱/۱	۰/۰۵	۵/۸	۵	۱/۶	۴۲	۳/۶	۷۱
تبریز	۵/۵	۰/۰۳	۶	۹	۱/۲	۴۹	۳	۶۲
مشهد	۷/۴	۰/۰۰	۲/۸	۷۷	۱/۹	۹۸	-	-
اصفهان	۷/۴	۰/۰۱	۱۱/۹	۴۸	۱/۹	۸۱	-	-
شیراز	۱۳/۱	۰/۰۰	۶/۰۸	۳۶	۲/۷	۲۶	۳/۲	۴۱
اهواز	۱۶/۰۲	۰/۰۲	۷/۴	۴۹	۶/۲	۱۰	۲/۸	۸۰
بندرعباس	۱۱/۷	۰/۰۹	۲/۳	۸۰	۳/۹	۱۰	-	-
تهران	۶/۶	۰/۰۳	۶/۱	۵۰	۲/۱	۲۵	۴/۵	۵۶
کرمانشاه	۷/۸	۰/۰۳	۲/۴	۶۶	۱/۲	۸۵	-	-
کرمان	۶/۷	۰/۰۱	۴/۵	۷۳	۳/۵	۴۹	۱/۲	۹۱

که داده‌های آب قابل‌بارش مودیس در محدوده مادون‌قرمز نزدیک، در شرایط ابرناکی ارتباط بسیار ضعیفی با دیگر پایگاه داده‌ها نشان می‌دهد. برای مثال ضرایب تعیین به‌دست آمده توسط پراساد و سینگ (۲۰۰۹) بر روی ایالت‌های هندوستان بسیار ناچیز می‌باشد (ضریب تعیین = $0/33$ ؛ $0/40$ و $0/10$). این محققان اشاره کردند که بخار آب به‌دست آمده از ماهواره، به‌شدت تحت‌تأثیر فصل و شرایط جوی می‌باشند. خطاهای به‌وجود آمده به‌دلیل حضور ابرها به این دلیل است که کانال‌های مودیس در محدوده $0/8$ تا $5/2$ میکرومتر حاوی اطلاعاتی از جذب تنها درون و بر روی ابرها می‌باشد (گاتو و یرام، ۱۹۹۲). در این پژوهش در شرایط مناسب جوی، مقدار خطای کلی $2/46$ و $3/3$ میلی‌متر به‌ترتیب در ماه ژوئیه و ژانویه به‌دست آمده است؛ این مقادیر به مقادیر خطای به‌دست آمده توسط چن و همکاران (۲۰۰۸) بر روی بخش‌هایی از ایالات متحده نزدیک می‌باشد.

روش دیگر برای مقایسه داده‌های رادیوسوند و مودیس، ادغام داده‌های تمامی ایستگاه‌ها، بدون در نظر گرفتن موقعیت جغرافیایی آنها است. بدین‌منظور روزهای با آسمان صاف و دید افقی مناسب با روزهای ابری و با دید افقی نامناسب با یکدیگر به تفکیک برای ژانویه ۲۰۰۴ و ژوئیه ۲۰۰۸ مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود در شرایط مناسب جوی، ضرایب تعیین بین داده‌های مودیس و رادیوسوند به‌طور معنی‌داری با روزهای با شرایط نامساعد جوی متفاوت است. مقدار ضریب تعیین در ژانویه ۲۰۰۴ به‌ترتیب ۷۱ و $0/003$ درصد در شرایط مناسب و نامناسب جوی می‌باشد (شکل ۸-الف و ب). چنین وضعیتی در ژوئیه ۲۰۰۸ نیز مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که ضرایب تعیین به‌ترتیب ۷۳ و $0/05$ درصد در شرایط مناسب و نامناسب جوی مشاهده شده است (شکل ۸-ج و د). نتایج مقایسه روزانه با نتایج سایر مطالعات مشابه می‌باشد. گاتو و کافمن (۲۰۰۳)، فرنسز و پونگرا (۲۰۰۸) و پراساد و سینگ (۲۰۰۹) نتیجه گرفتند



شکل ۸. مقایسه بین آب قابل‌بارش رادیوسوند و مودیس در دو شرایط متفاوت جوی در ژانویه ۲۰۰۴ (شرایط مناسب جوی (الف)؛ ژانویه ۲۰۰۴ شرایط نامناسب جوی (ب)؛ ژوئیه ۲۰۰۸ شرایط مناسب جوی (ج)؛ ژوئیه ۲۰۰۸ شرایط نامناسب جوی (د)).

مطالعه بسیار قوی است (۰/۸۱ و ۰/۶ به‌ترتیب برای ژانویه ۲۰۰۴ و ژوئیه). به‌عبارت دیگر در ایستگاه‌هایی که ضریب تغییرات آب قابل‌بارش بالاست، درصد خطا نیز بالاست. برای مثال در ژانویه ۲۰۰۴ بیشینه مقدار ضریب تغییرات آب قابل‌بارش (۵۹/۱ درصد) و درصد خطا (۹۱/۱ درصد) هر دو در ایستگاه کرمانشاه مشاهده شده است. بنابراین می‌توان گفت که بخشی از خطای محاسباتی مودیس نسبت به رادیوسوند، ناشی از همزمان نبودن اندازه‌گیری‌های رادیوسوند و سنجنده مودیس می‌باشد. به‌طوری‌که در ایستگاه‌هایی که ماهیت آب قابل‌بارش در آن دارای ضریب تغییرپذیری بالا بوده است، درصد خطا نیز بیشتر بوده است.

۳-۴. تأخیر زمانی بین داده‌های مودیس و رادیوسوند یک تأخیر زمانی بین مشاهدات ماهواره (غالباً در محدوده زمانی بین ۶ تا ۸ UTC) و داده‌های رادیوسوند (ساعت ۱۲ UTC) وجود دارد. در ایستگاه‌هایی که ضریب تغییرات روزانه آب قابل‌بارش در آنها بسیار بالا می‌باشد، این تأخیر زمانی می‌تواند منجر به اشتباه گمراه‌کننده شود. مقادیر ضریب تغییرات روزانه آب قابل‌بارش رادیوسوند (به‌عنوان یک منبع قابل‌اعتماد) در جدول ۴ به صورت جداگانه برای روزهای ژانویه ۲۰۰۴ و ژوئیه ۲۰۰۸ نشان داده شده است. ضرایب همبستگی بین ضریب تغییرات روزانه آب قابل‌بارش رادیوسوند و درصد خطا (خطا در مقایسه با میانگین آب قابل‌بارش رادیوسوند) در ایستگاه‌های مورد

جدول ۴. ضرایب تغییرات آب قابل‌بارش رادیوسوند و مقادیر درصد خطای آب قابل‌بارش مودیس در طی ژانویه ۲۰۰۴ و ژوئیه ۲۰۰۸ (در مقیاس روزانه).

ایستگاه	ژانویه ۲۰۰۴		ژوئیه ۲۰۰۸	
	ضریب تغییرات آب قابل‌بارش رادیوسوند	درصد خطای آب قابل‌بارش مودیس	ضریب تغییرات آب قابل‌بارش رادیوسوند	درصد خطای آب قابل‌بارش مودیس
کرمانشاه	۵۹/۱	۹۱/۱	۴۱	۲۸
تبریز	۳۳/۰۶	۴۸/۴	۲۲	۱۴
اصفهان	۴۰/۸	۶۶/۸	۲۸	۲۶
شیراز	۴۷/۶	۷۵/۹	۳۱	۲۶
تهران	۴۶/۷	۸۲/۷	۲۳	۱۹/۳
کرمان	۴۴/۷	۷۲/۹	۳۰/۵	۴۴
مشهد	۳۷/۵	۵۹/۱	۲۰	۲۱
زاهدان	۴۰	۳۰/۴	۲۵	۲۴
اهواز	۳۴	۴۶/۰۵	۲۶	۹
بیرجند	۵۱	۷۷/۱	۳۵	۴۱

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش محصولات سطح سوم و سطح دوم آب قابل بارش سنجنده مودیس در دو مقیاس زمانی ماهانه (۲۰۱۵-۲۰۰۳) و روزانه به ترتیب با داده‌های ERA-Interim و رادیوسوند مقایسه شده است. از میان عواملی که منجر به بروز خطا در داده‌های مودیس می‌شوند تأثیر شرایط جوی شامل ابرناکی و هواویزها مورد بررسی قرار گرفت که مهم‌ترین نتایج به صورت زیر می‌باشد.

- در مقیاس ماهانه، داده‌های آب قابل بارش مودیس، الگوی فضایی خوشه‌ای‌تر، تغییرپذیری مکانی بالاتر، ارتباط فضایی قوی‌تر با داده‌های ارتفاع و میانگین سالانه مشابهی با داده‌های ERA نشان می‌دهد. این حالات بیانگر آن است که محصولات سنجنده مودیس جهت اقلیم‌شناسی آب قابل بارش در ایران بسیار کارآمد هستند.

- در مقیاس روزانه، مقادیر ضریب تعیین بین آب قابل بارش مودیس و رادیوسوند در شرایط متفاوت جوی، متفاوت است. در روزهای با آسمان صاف و دید افقی مناسب (علی‌رغم تأخیر زمانی بین دو سری از داده) مقادیر ضریب تعیین نسبت به روزهای ابری و با دید افقی پایین، بالاتر است. بنابراین صحت مقدار بازیابی شده آب قابل بارش مودیس، نسبت به رادیوسوند به شرایط جوی وابسته است. به طوری که در شرایط ابرناکی و دید افقی مناسب، مقدار آب قابل بارش مودیس به داده‌های رادیوسوند نزدیک‌تر است.

- در مجموع می‌توان گفت که در فصل سرد سال به علت ابرناکی زیاد، بازیابی آب قابل بارش نسبت به تابستان از

صحت کمتری برخوردار است. به لحاظ فضایی نیز در ایستگاه‌های مناطق خشک مثل کرمان، زاهدان و اصفهان که تعداد روزهای ابری کمتری دارند نسبت به ایستگاه‌هایی همچون بندرعباس (که تعداد روزهای دارای دید افقی نامناسب بالایی است) بازیابی آب قابل بارش توسط مودیس از دقت بالاتری برخوردار است.

مراجع

پورباقر، س. م.، عسکری، ق.، مومن زاده، ح. و پاول، م.، ۱۳۸۸، محاسبه آب قابل بارش رادیوسوند با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای MODIS در جو گرگانرود، فصلنامه تحقیقات علوم آب، ۱(۱)، ۵۶-۴۹.

صادقی حسینی، س. ع.، حجام، س. و تفنگ ساز، پ.، ۱۳۸۴، ارتباط آب قابل بارش ابر و بارندگی دیدبانی شده در منطقه تهران. م. فیزیک زمین و فضا، ۳۱(۲)، ۲۱-۱۳.

عساکره، ح. و دوستکامیان، م.، ۱۳۹۳، تغییرات زمانی و مکانی آب قابل بارش در جو ایران زمین. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۰(۱)، ۸۶-۷۲.

علیجانی، ب.، ۱۳۹۲، آب و هوای ایران، انتشارات دانشگاه پیام نور.

مباشری، م.، پورباقر کردی، س. م.، فرج زاده اصل، م. و صادقی، ع.، ۱۳۸۹، برآورد آب قابل بارش کلی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS و داده‌های رادیوساوند: ناحیه تهران، فصلنامه مدرس علوم انسانی، ۱۴(۱)، ۱۲۶-۱۰۷.

Albert, P., Bennartz, R., Preusker, R., Leinweber, R., and Fischer, J., 2005, Remote sensing of atmospheric water vapor using the moderate resolution imaging spectroradiometer. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22(3), 309-314.

Asakereh, H., Doostkamian, M. and Sadrafshary, S., 2015, Anomalies and cycles of precipitable water over Iran in recent decades. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(11), 9569-9576. <http://doi.org/10.1007/s12517-015-1888-2>

Bokoye, A. I., Royer, A., O'Neill, N. T., Cliche, P., McArthur, L. J. B., Teillet, P. M., and

Thériault, J. M., 2003, Multisensor analysis of integrated atmospheric water vapor over Canada and Alaska. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D15).

Bokoye, A. I., Royer, A., O'Neill, N. T., Cliche, P., McArthur, L. J. B., Teillet, P. M. and Thériault, J. M., 2003, Multisensor analysis of integrated atmospheric water vapor over Canada and Alaska. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D15).

Chen, S.-H., Zhao, Z., Haase, J. S., Chen, A. and Vandenberghe, F., 2008, A Study of the Characteristics and Assimilation of Retrieved

- MODIS Total Precipitable Water Data in Severe Weather Simulations. Monthly weather review, 136, 3608–3628. <http://doi.org/10.1175/2008MWR2384.1>
- Dupont, J. H., 2008, Parametric model to estimate clear-sky long wave irradiance at the surface on the basis of vertical distribution of humidity and temperature. *J. Geophys. Res.*, 113, D07203.
- Ferencz, C. and Pongra, R., 2008, Estimation of vertically integrated water vapor in Hungary using MODIS imagery, 41, 1933–1945. <http://doi.org/10.1016/j.asr.2007.06.048>.
- Gao, B. C. and Kaufman, Y. J., 2003, Water vapor retrievals using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) near-infrared channels. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D13), 4389–4398.
- Gao, B.-C. and Yoram J., K., 1992, The MODIS Near-IR Water Vapor Algorithm Product ID : MOD05 - Total Precipitable Water. Algorithm Technical Background Document, 1–25. Retrieved from [\Biblioteca_Digital_SPR\Gao1992_ATBD.pdf](http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html)
- Kern, A., Bartholy, J., Borbás, É. E., Barcza, Z., Pongrácz, R. and Ferencz, C., 2008, Estimation of vertically integrated water vapor in Hungary using MODIS imagery. *Advances in space research*, 41(11), 1933–1945.
- King, M. D., Kaufman, Y.J., Menzel, W.P. and Tanre, D., 1992, Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the moderate resolution imaging spectrometer (MODIS). *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 30(1), 2–27.
- King, M. D., M. W., 2003, Cloud and aerosol properties, precipitable water, and profiles of temperature and water vapor from MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 442–458.
- Li, Z., Muller, J.P. and Cross, P., 2003, Comparison of precipitable water vapor derived from radiosonde, GPS, and Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D20).
- Maghrabi, A. H. and Dajani, H. M. Al., 2014, ScienceDirect Time distribution of the precipitable water vapor in central Saudi Arabia and its relationship to solar activity. *Advances in Space Research*, 53(8), 1169–1179. <http://doi.org/10.1016/j.asr.2014.02.006>
- Marsden, D. and Valero, F.P., 2004, Observation of water vapor greenhouse absorption over the Gulf of Mexico using aircraft and satellite data. *Journal of the atmospheric sciences*, 61(6), 745–753.
- McGregor, G.R. and Nieuwolt, S., 1998, *Tropical climatology: an introduction to the climates of the low latitudes* (No. Ed. 2). John Wiley & Sons Ltd.
- Mockler, S. B., 1995, Water vapor in the climate system. *Amer. Geophys. Union Special Rep.*, 50–63.
- Ohmura, A. and Wild, M., 2002, Is the hydrological cycle accelerating?. *Science*, 298(5597), 1345–1346.
- Kassomenos, P.A. and McGregor, G.R., 2006, The interannual variability and trend of precipitable water over southern Greece. *Journal of Hydrometeorology*, 7(2), 271–284.
- Prasad, A. K. and 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(5), 1–20. <http://doi.org/10.1029/2008JD011230>.
- Seemann, S.W., Li, J., Menzel, W.P. and Gumley, L.E., 2003, Operational retrieval of atmospheric temperature, moisture, and ozone from MODIS infrared radiances. *Journal of applied meteorology*, 42(8), 1072–1091.
- Sohn, B. J. and Smith, E.A., 2003, Explaining sources of discrepancy in SSM/I water vapor algorithms. *Journal of climate*, 16(20), 3229–3255.
- Sudradjat, A., Ferraro, R. R. and Fiorino, M., 2005, A comparison of total precipitable water between reanalyses and NVAP. *Journal of climate*, 18(11), 1790–1807.
- Thies, B. and Bendix, J., 2011, Satellite based remote sensing of weather and climate: Recent achievements and future perspectives. *Meteorological Applications*, 18(3), 262–295. <http://doi.org/10.1002/met.288>
- Trenberth, K.E. and Stepaniak, D.P., 2003, Covariability of components of poleward atmospheric energy transports on seasonal and interannual timescales. *Journal of climate*, 16(22), 3691–3705.
- Trenberth, K. E., 1999, Atmospheric moisture recycling: Role of advection and local evaporation. *J. Climate*, 12, 1368–1381.
- Trenberth, K. E., 2004, Manifestations of global climate change on accelerating the hydrological cycle: Prospects for increases in extremes. *Proc. Second Int. CAHMDA Workshop on the Terrestrial Water Cycle: Modelling and Data Assimilation across Catchment Scales*. Princeton, NJ., 37–39.
- Tuller, S.E., 1968, World distribution of mean monthly and annual precipitable water. *Monthly weather review*, 96(11), 785–797.

- Wagner, T., Heland, J., Zöger, M. and Platt, U., 2003, A fast H₂O total column density product from GOME–Validation with in-situ aircraft measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 3(3), 651-663.
- Wang, H., Wei, M., Li, G., Zhou, S. and Zeng, Q., 2013, Analysis of precipitable water vapor from GPS measurements in Chengdu region : Distribution and evolution characteristics in autumn. *Advances in Space Research*, 52(4), 656–667.
<http://doi.org/10.1016/j.asr.2013.04.005>.
- Wu, P., Hamada, J.I., Mori, S., Tauhid, Y.I., Yamanaka, M.D. and Kimura, F., 2003, Diurnal variation of precipitable water over a mountainous area of Sumatra Island. *Journal of Applied Meteorology*, 42(8), 1107-1115.

Feasibility of the use of MODIS products for climatology of precipitable water vapor over Iran

Modiri, M.¹, Rezaei, M.², Khazaei, M.^{3*} and Arab Sahebi, R.⁴

1. Professor, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

2. Ph.D. Graduated, Department of Physical Geography, Faculty of Humanities, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3. Ph.D. Graduated, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

4. Ph.D. Graduated, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 10 Jan 2021, Accepted: 25 May 2021)

Summary

Water vapor is the dominant greenhouse gas in the Earth's atmosphere and, at the same time, highly variable in the atmosphere. Observations of its spatial and temporal variations is a major objective of climate. It is important in several major areas in the atmospheric sciences, on scales from turbulence to synoptic-scale systems, and including cloud formation and maintenance, radiation and climate. The intent of this paper is to demonstrate the ability of MODIS PWV products for use in monthly and daily variability of climatological scales over Iran. Therefore, the results are presented in two sections. The first section compares the long term (2003-2015) Monthly mean MODIS Level 3 and ERA-Interim PWV data sets. The second section validates the level 2 MODIS PWV products by Radiosonde daily data. For a better comparison of MODIS level 2 PWV products with Radiosonde data, we used data from 10 Radiosonde stations over Iran. We consider the sky conditions (cloudiness and visibility) in our comparison.

There are no microwave radiometers (MWR) and Global Positioning System (GPS) sites in Iran hence, in the absence of these data, we used the measurements of Radiosonde and ERA-Interim as reference data for the comparison of the MODIS PWV estimates. These data were obtained at monthly and daily scales. In the first section, long-term (2003- 2015) spatial and temporal characteristics of monthly mean PWV are investigated over Iran. For this, Level-3 MODIS terra (MOD08_M3) products and ERA-Interim data were obtained with the 1-degree resolution for Iran. In the second section, January (as a month with low values of PWV and unstable atmosphere) of 2004 and July (as a month with high values of PWV and Stable atmosphere) of 2008 were selected for comparison of MODIS daily (MOD05-L2) PWV product with Radiosonde data for 10 Radiosonde stations in Iran.

The average annual MODIS and ERA-Interim PWV data are 12.248 and 12.243 mm, respectively. These values are very close to each other. These values are also close to those derived by Asakereh et al. (2015) from NCEP data reanalysis (about 14.3 mm). Also, Ferencz and Pongra (2008) concluded that the ERA-Interim and the MODIS PWV fields are very similar. The maximum and minimum values of PWV for both data sets is observed during July and January, respectively. Tuller (1968) indicated that February and July are the months of highest and lowest precipitable water at most stations. At some, August replaces July, and at a smaller number, January replaces February. Also, our result is the same with the study of Maghrabi & Dajani, (2014) over Saudi Arabia. They reported that the lowest PWV values were in December and January, whereas the highest values were in June and July. They pointed that during warm periods, increases in the temperature and height of constant pressure levels result in an increased capacity for water vapor of the air mass, keeping it away from the saturation point and consequently preserving high PWV values. In contrast, in cold periods, the decrease in the height of constant- pressure levels, reduce the capacity for water vapor of the air mass and facilitates the condensation process, resulting in a decrease in the amount of PWV. The topography is a key factor in the spatial distribution of PWV. PWV from both data sets has a significant negative relationship with the distribution of topography in all months. This means that the concentration of PWV is high in the highland regions and vice versa. During January 2004, the ranges of errors are in the best case 5.53 mm (Tabriz) and in the worst case (Ahwaz) 16.02 mm. In all stations, the coefficient of determinations are negligible. While in the suitable weather condition, RMSE is decreased in all stations. During July of 2008 at many stations such as Zahedan, Kerman and Esfahan cloud cover and visibility condition have been appropriate, while in Bandar Abbas in all days the visibility was poor (less than 5 KM). It seems that the cloud cover and visibility conditions result in the high coefficient of determinations in Esfahan, Kerman and Zahedan (77, 80 and 66%, respectively) and with high error in Bandar Abbas station.

Annual average MODIS PWV and ERA-Interim are close to each other (12.24), in addition, MODIS has a higher negative correlation coefficient with topography compared to ERA-Interim PWV data. This suggests that MODIS level-3 monthly PWV data are valuable for the monthly long-term climatology of PWV over Iran. In daily scale, a comparison of MODIS and radiosonde PWV data in different atmospheric conditions are significantly different. During clear days with appropriate visibility (despite the time lag between two data sets) values of R2 is higher compared to cloudy days with poor visibility. Hence, accuracy of the MODIS PWV data over Iran is strongly dependent on weather conditions.

Keywords: precipitable water vapor, MODIS products, ERA-Interim, Radiosonde, Iran.

* Corresponding author:

m.khazaei14@ut.ac.ir