

مقاله پژوهشی

ارزیابی کیفیت محصولات بخار آب باندهای IR و Near-IR مادیس در ایران

علی سام خانیانی^{۱*} - ذهیر نیکرفتار^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۴

چکیده

بخار آب به عنوان یکی از گازهای گلخانه‌ای مهم نقش اساسی در بسیاری از پروسه‌های هواشناسی و اقلیمی دارد. تهیه محصولات بخار آب قابل بارش (PWV) سنجنده مادیس روی ماهواره‌های ترا و آکوا به عنوان یکی از ابزارهای سنجش از دور، با تفکیک مکانی مناسب و به صورت روزانه امکان پذیر است. دقت و کارایی این محصولات در هر منطقه متفاوت است، بنابراین مقادیر PWV سنجنده مادیس در کشور ایران مورد ارزیابی قرار گرفت. در این مطالعه، یک سال از مشاهدات شبکه‌ی گیرنده‌های GPS دائمی کشور به منظور ارزیابی صحت داده‌های PWV سنجنده مادیس در باندهای مختلف Near-IR و IR مورد استفاده قرار گرفتند. مقایسه سری‌های زمانی PWV در باند Near-IR با مقادیر متناظر GPS نشان داد که این دو روش موافقت بالایی با یکدیگر با میانگین همبستگی ۰/۹۵ دارند. آنالیزها نشان داد که محصولات باند Near-IR مقادیر بخار آب را در منطقه بیشتر برآورد می‌کند. همچنین، آنالیزهای مشابه روی داده‌های ماهواره‌های ترا و آکوا برای باند Near-IR نشان دادند که تقریباً هر دو مجموعه داده بخار آب دارای دقت و صحت یکسانی هستند. از طرف دیگر، ارزیابی‌های آماری روی محصولات بخار آب باند IR به طور مجزا در طول روز و شب نسبت به GPS PWV در همه ایستگاه‌ها صورت گرفت. براساس مقادیر RMSE، دقت محصولات باند IR در شب بهتر از روز بدست آمد. به طور میانگین در کل منطقه برای یک سال، RMSE محصولات باند IR در طول روز و شب به ترتیب ۹/۱۵ و ۷/۹۰ میلی‌متر برآورد شدند. علاوه بر این، با بررسی کارایی محصولات بخار آب این سنجنده در طول روز، مشاهده شد که دقت و صحت محصولات این سنجنده برای روز در باند Near-IR بسیار بهتر از باند IR می‌باشد. بنابراین، بخار آب باند IR قبل از استفاده باید کالیبره شود.

واژه‌های کلیدی: باند IR، باند Near-IR، بخار آب قابل بارش، مادیس، GPS

مقدمه

فشرده شود، به عمق آب مایع در این ستون از جو PWV گویند (۱۳). این پارامتر به شدت در مقیاس‌های مختلف مکانی و زمانی متغیر است و مقادیری متغیر از حدود ۸۰ میلی‌متر در نزدیکی استوا و کمتر از ۱ میلی‌متر در قطبین را به خود اختصاص می‌دهد (۱۵ و ۲۶). روش‌های متعددی نظیر رادیوسوند، رادیومترهای میکروویو، مشاهدات سنجش از دور ماهواره‌ای، فوتومترهای خورشیدی زمین مینا، مشاهدات راداری و تکنیک هواشناسی با GPS^۲ برای اندازه‌گیری بخار آب موجود در جو با تفکیک‌های زمانی و مکانی متفاوت استفاده شده‌اند (۲، ۸، ۱۲، ۱۰، ۱۵ و ۲۸).

در این میان، رادیوسوندها به عنوان قدیمی‌ترین ابزار برای اندازه‌گیری پارامترهایی نظیر فشار، دما، رطوبت نسبی، جهت و سرعت باد به صورت قائم در جو استفاده شده‌اند. با استفاده از پروفیل‌های اتمسفری تهیه شده از رادیوسوندها می‌توان مقادیر PWV را در هر ایستگاه رادیوسوند با دقتی در حد چند میلیمتر محاسبه نمود (۲۸).

بخار آب به عنوان یکی از مهمترین گازهای گلخانه‌ای اتمسفر، نقش مؤثری در فهم چرخه‌های هیدرولوژیکی، تغییرات آب و هوا و اقلیم جهانی بازی می‌کند. همچنین این پارامتر، سهم زیادی در خیلی از پدیده‌های اتمسفری نظیر بارش، سیل و همرفت‌های مرطوب دارد (۳، ۴۲ و ۲۳).

پارامترهای زیادی برای بیان بخار آب موجود در اتمسفر توسط هواشناسان ارائه شده است که بخار آب قابل بارش^۳ (PWV) یکی از رایج‌ترین آن‌ها است. اگر تمام بخار موجود در یک ستون قائم جو

۱- استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری و معماری، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، سنجش از دور، دانشگاه تهران

(Email: ali.sam@nit.ac.ir)

*- نویسنده مسئول

DOI: DOI: 10.22067/jsw.v34i6.86574

3- Precipitable Water Vapor

کمک ۱۰ ماه از اندازه‌گیری‌های ۲۲ گیرنده‌ی زمین مبنای GPS صحت محصولات بخار آب مادیس را در منطقه جنوب تبت مورد ارزیابی قرار دادند. آنالیزهای آن‌ها همبستگی بالایی بین تکنیک GPS محصولات بخار آب مادیس نشان داد. بر اساس این مطالعه، سنجنده مادیس در این منطقه به صورت کلی بخار آب را بیش از GPS برآورد می‌کند.

همچنین، وانگ و همکاران (۴۱) در منطقه‌ی جنوبی فلات تبت محصولات بخار آب ماموریت‌های ماهواره‌ای و مدل‌های عددی مختلف را به کمک داده‌های GPS PWV ارزیابی کردند. براساس آنالیزهای آماری انجام شده در مطالعه آن‌ها، محصولات بخار آب باند IR سنجنده مادیس به طور میانگین دارای اریبی^۶ منفی در حد ۱/۸۴ میلی‌متر می‌باشد در حالی که محصولات باند Near-IR این سنجنده بخار آب را به طور میانگین تا حدود ۳/۵۲ میلی‌متر بیشتر از مقادیر قابل اعتماد GPS برآورد می‌کند.

لیو و همکاران (۲۱) یک‌سال داده‌های بخار آب ۸۳ ایستگاه رادیوسوند در سراسر چین را برای ارزیابی محصولات باند IR و Near-IR سنجنده مادیس بکار گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد که محصولات باند Near-IR موافقت بیشتری با مقادیر بخار آب رادیوسوندها نسبت به باند IR دارند و ضریب همبستگی این دسته از محصولات با مقادیر متناظر رادیوسوند در حد ۰/۹۵ بدست آمد. براساس این مطالعه به طور میانگین مقدار خطای RMSE^۷ در باند Near-IR حدود ۵ میلی‌متر محاسبه شد. همچنین آن‌ها دریافتند که محصولات بخار آب IR سنجنده مادیس در طول شب نسبت به روز موافقت بیشتری با مقادیر متناظر رادیوسوند دارند.

به هر حال محصولات PWV بدست آمده از داده‌های سنجنده‌ی دوری قبل از استفاده در کاربری‌های گوناگون باید نسبت به داده‌های قابل اعتماد محلی ارزیابی شوند (۳۷). نتایج اعتبار سنجی برای بهبود تولید و بکارگیری چنین محصولاتی از اهمیت بالایی برخوردار است (۲۷). همچنین آگاهی از صحت محصولات ماهواره‌ای بخار آب در پیشینی دقیقتر مدل‌های اقلیمی و مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع آب‌وهوا از اهمیت بالایی برخوردار است (۲۲). در ایران نیز چندین مطالعه از تکنیک هواشناسی با GPS در حوزه‌های جوی و یونسفری صورت گرفته است (۳۴، ۳۵ و ۳۶). همچنین، تحقیقاتی به منظور ارزیابی داده‌های MODIS PWV یا بهبود الگوریتم‌های ارزیابی آن صورت گرفته است (۲۴ و ۲۵). تعداد کم ایستگاه‌های مبنای برای اعتبارسنجی و یا بازه‌ی کوتاه داده‌های مورد استفاده را می‌توان به عنوان محدودیت‌های این مطالعات برشمرد. همچنین سام‌خانیانی و

مقادیر PWV حاصل از رادیوسوندها به عنوان مبنای هواشناسان در نظر گرفته می‌شود. به هر حال تفکیک زمانی پایین (دو بار در روز)، کاهش کارایی سنسورها در شرایط سرد و خشک، هزینه بالا و عدم پوشش یکنواخت در کل سراسر زمین به عنوان محدودیت‌های این تکنیک مطرح هستند (۱۱ و ۳۰).

در سال ۱۹۹۲، تکنیک هواشناسی با GPS برای سنجنده‌ی بخار آب اتمسفری به کمک مشاهدات گیرنده‌های زمین مبنای GPS معرفی شد (۳). امروزه، این روش به عنوان ابزاری قدرتمند در برآورد مقادیر PWV مورد توجه جامعه آب‌وهوا شناسی قرار گرفته است. به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی نظیر، قابلیت استفاده در هر شرایط آب‌وهوایی، پایداری طولانی مدت، مشاهدات پیوسته با تفکیک زمانی بسیار بالا، هزینه پایین و برآورد PWV با سطح دقت در حدود ۲ میلیمتر، این تکنیک را به جایگزین قابل اعتماد دیگری برای سنجنده‌ی بخار آب اتمسفری تبدیل نموده است (۴، ۵، ۶، ۹، ۲۹، ۳۹ و ۳۸).

اگرچه رادیوسوند و GPS روش‌های دقیقی برای برآورد بخار آب موجود در جو هستند اما مشاهدات آن‌ها به صورت مکانی محدود به خشکی‌ها می‌باشند. در حالی که روش‌های سنجنده‌ی دور ماهواره‌ای می‌توانند مشاهدات پیوسته‌ای از توزیع بخار آب در مقیاس منطقه‌ای و جهانی تهیه کنند. از جمله ماموریت‌های ماهواره‌ای که قادر به تهیه اندازه‌گیری‌های بخار آب اتمسفری هستند می‌توان به سنجنده‌ی مادیس^۱ که بر روی ماهواره‌های ترا^۲ و آکو^۳ قرار دارد، اشاره نمود (۱۵ و ۳۱). در واقع هدف اصلی سنجنده مادیس اندازه‌گیری بخار آب جوی نیست ولی به دلیل وجود ۱۶ باند مادون قرمز در آن، امکان دستیابی به محصولات PWV در باندهای IR^۴ و Near-IR^۵ توسط آن میسر شده است (۳۷). مطالعات متعددی در مناطق مختلف محصولات MODIS PWV را به کمک مقادیر متناظر زمینی نظیر GPS PWV مورد ارزیابی قرار داده‌اند (۱۶، ۱۷، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۳۱، ۴۱ و ۴۰).

برای مثال، لی و همکاران (۲۰) در منطقه دشت‌های بزرگ جنوبی با مرکزیت عرض جغرافیایی ۳۶ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۹۷ درجه غربی، بخار آب حاصل از رادیوسوند، GPS و مادیس در مکان‌های یکسان در یک بازه‌ی ۸ تا ۱۱ ماهه را مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در بین محصولات بخار آب حاصل از رادیوسوند و GPS و مادیس، محصولات رادیوسوند و GPS نسبت به محصولات مادیس به یکدیگر نزدیکتر هستند. لیو و همکاران (۲۲) به

- 1- MODIS
- 2- Terra
- 3- Aqua
- 4- Infrared
- 5- Near-Infrared

6- Bias

7- Root Mean Squares Error

GPS شامل اطلاعات ارزشمندی می‌باشد که مورد توجه کاربری‌های متعدد هواشناسی قرار است. ZTD به دو مولفه خشک یا تاخیر هیدروستاتیکی زینتی^۴ (ZHD) و تاخیر تر زینتی^۵ (ZWD) تقسیم می‌شود که بخش دوم وابسته به بخار آب جوی است (۱۸).

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (۱)$$

با اندازه‌گیری مشاهدات فشار سطحی (P_0) در ایستگاه GPS و به کمک مدل ساستاموینبا دقت بالایی ZHD بدست می‌آید(۷):

$$ZHD = \frac{0.0022768P_0}{1 - 0.00265 \cos(2\phi) - 0.000285h} \quad (۲)$$

که h و ϕ به ترتیب ارتفاع از ژئوئید بر حسب کیلومتر و عرض ژئودتیک ایستگاه هستند و P_0 بر حسب میلی‌بار می‌باشد. مقادیر ZTD به عنوان مجهول در کنار پارامترهای موقعیت ایستگاه در حین پردازش مشاهدات GPS برآورد می‌شوند. با محاسبه مولفه خشک تاخیر به کمک مدل ساستاموین و تفاضل آن از مقادیر ZTD مقادیر ZWD بدست می‌آیند. ZWD تابعی از مقادیر بخار آب و دمای اتمسفری است. بر اساس مطالعه بویس و همکاران (۴)، مقادیر ZWD به کمک یک ضریب بدون واحد به PWV تبدیل می‌شود:

$$WV = \Pi \times ZWD \quad (۳)$$

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho_w R_v [(k_3/T_m) + k_2 + k_1 (M_w/M_d)]} \quad (۴)$$

که ضرایب k_i ثوابت فیزیکی مرتبط با انکسار اتمسفری هستند. M_w و M_d هم به ترتیب جرم مولی هوای خشک و بخار آب می‌باشند. همچنین T_m دمای میانگین اتمسفری است که با استفاده از پروفیل‌های قائم دما و فشار جزئی بخار آب قابل محاسبه است (۷).

$$T_m = \frac{\int_{T_0}^T dh}{\int_{T_0}^T dh} \quad (۵)$$

با حل عددی رابطه (۵) به کمک پروفیل‌های جوی تهیه شده توسط رادیوسوندها و یا مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع آب و هوا T_m بدست می‌آید. به هر حال، معمولاً دسترسی به پروفیل‌های قائم اتمسفری در ایستگاه GPS غیر ممکن است. بویس و همکاران (۳)، مدل تجربی خطی بین دمای میانگین اتمسفری T_m و دمای سطحی T_0 (بر حسب کلونین) معرفی کردند:

$$T_m = 70.2 + 0.72 T_0 \quad (۶)$$

ضرایب این مدل خطی وابسته به شرایط جغرافیای و فصلی هر منطقه است (۳۲). صادقی و همکاران در سال ۲۰۱۴ بر اساس داده‌های ۵۴۳۳۰ پروفیل رادیوسوند توزیع شده در کشور ایران، ضرایب مدل خطی (۶) را به صورت زیر برای منطقه مورد مطالعه بدست آوردند (۳۳).

$$T_m = 75.39 + 0.7103 T_0 \quad (۷)$$

همکاران (۱۹) به ارزیابی محصولات بخار آب باند Near-IR سنجنده مادیس در کشور پرداختند و تمرکز آن‌ها بهبود این محصولات در منطقه بود. با این حال هنوز به صورت جامع، در باندهای متفاوت و طول شبانه روز، ارزیابی مقادیر بخار آب سنجنده مادیس در منطقه صورت نگرفته است. به همین منظور، نویسندگان قصد دارند در این تحقیق به کمک برآوردهای PWV حاصل از گیرنده‌های GPS زمینی، صحت محصولات بخار آب مادیس را در باندهای IR و Near-IR و شبانه‌روز برحسب پارامترهای آماری نظیر ضریب همبستگی، اریبی^۱ و RMSE مورد ارزیابی قرار دهند.

به همین منظور، یکسال برآوردهای بخار آب در ۳۸ ایستگاه GPS دائمی از شبکه IPGN^۲ به عنوان اندازه‌گیری‌های قابل اعتماد زمین مبنای نظر گرفته می‌شوند و دقت محصولات بخار آب سنجنده مادیس نسبت به این داده‌ها در دو باند مختلف و در طول شب و روز مورد بررسی قرار خواهد گرفت. مشخص شدن دقت این محصولات برای کاربران مختلف در هنگام استفاده از این محصولات بسیار اهمیت دارد. برای مثال کاربرانی که بخواهند برای پیش‌بینی تغییرات اقلیم از این داده‌ها بهره بگیرند مهم است که سطح دقت محصولات را بدانند و یا برای مدل‌های عددی پیش‌بینی هوا بهتر است مقادیر دقت مورد نظر به عنوان خطای مشاهدات وارد مدل شود که البته این موارد صورت مساله این تحقیق نبوده است.

مواد و روش‌ها

همانطور که در مقدمه عنوان شد، تکنیک‌های متعددی قادر به اندازه‌گیری مقادیر بخار آب جوی هستند که هر کدام ویژگی‌های منحصر به فردی دارند. در اینجا، به منظور اعتبارسنجی محصولات بخار آب مادیس، برآوردهای PWV بدست آمده از پردازش مشاهدات زمین - مبنای GPS استفاده می‌شود.

محاسبه PWV به کمک GPS

هنگامی که سیگنال ماهواره‌های GPS از میان جو عبور می‌کنند تا به گیرنده‌های زمین مبنای برسند، دچار انحراف و تاخیر می‌شوند. بخشی از این خطا به دلیل لایه یونسفر است که با کمک مشاهدات گیرنده‌های دو فرکانسه GPS قابل تعیین است چرا که تاخیر سیگنال در این لایه وابسته به فرکانس ماهواره‌هاست. تاخیر ناشی از بخش خنثی اتمسفر به صورت خاص تروپوسفر، وابسته به فرکانس و قابل حذف نیست. تاخیر کلی زینتی تروپوسفری^۳ (ZTD) مسیر سیگنال

1- Bias

2- Iranian Permanent GPS Network

3- Total Zenith Tropospheric Delay

4- Zenith Hydrostatic Delay

5- Zenith Wet Delay

که محدوده طیفی وسیعی را از باند مرئی تا مادون قرمز حرارتی پوشش می‌دهد. در دو دهه گذشته، قابلیت تهیه داده‌های مناسب از لحاظ دقت و صحت به صورت جهانی و با تفکیک زمانی مناسب (دو بار در روز) باعث شده تا این سنجنده مورد شناخت و استقبال کاربران زیادی قرار بگیرد (۱۶).

بخار آب قابل بارش نیز محصولی دیگر از این سنجنده است که از انکسار تشعشعات خورشیدی در کانال‌های جاذب (باندهایی که در نزدیکی ۰/۹۰۵، ۰/۹۳۶ و ۰/۹۳۰ میکرون تمرکز دارند) و تشعشعات خورشیدی منکسر شده در نزدیکی کانال‌های غیر جاذب یا کمتر جاذب (باندهایی که در ۰/۸۶۵ و ۱/۲۴۰ میکرون متمرکز هستند) قابل محاسبه است (۱۴).

در اینجا محصولات بخار آب از اول ژانویه ۲۰۱۱ تا انتهای دسامبر ۲۰۱۱ در منطقه‌ی ایران که توسط ماهواره‌های ترا (MOD05) و آکوا (MYD05) اندازه‌گیری شده‌اند از وبسایت ladsweb.nascom.nasa.gov با فرمت HDF جمع‌آوری شدند. محصولات بخار آب مادیس در باندهای IR و Near-IR با تفکیک افقی به ترتیب ۱ کیلومتر و ۵ کیلومتر استخراج می‌شوند. به دلیل حساسیت محصولات بخار آب سنجنده مادیس در هر دو باند ذکر شده به حضور ابر، پیکسل‌های با شرط بدون ابر که با موقعیت اندازه‌گیری‌های GPS همخوانی داشته باشند از داده‌های ترا و آکوا انتخاب شده است.

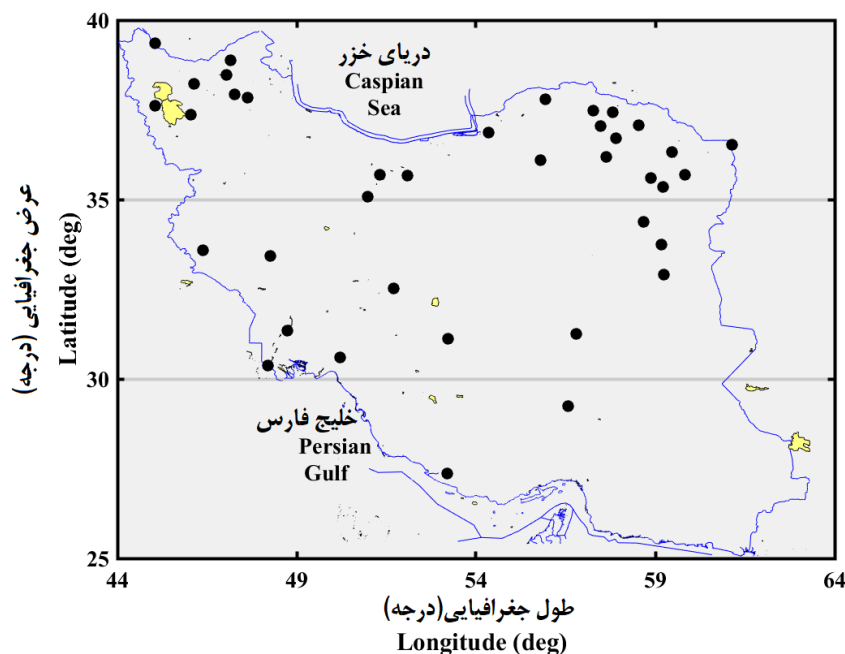
شبکه دائمی IPGN شامل بیش از ۱۰۰ ایستگاه توسط مرکز ملی کارتوگرافی ایران بنیان‌گذاری شده است. هدف اصلی این شبکه، استفاده از مشاهدات پیوسته GPS در کاربری‌های ژئودینامیکی و ژئوتیکی نظیر پایش جابجایی‌های پوسته‌ای، ناوبری به هنگام اهداف نقشه‌برداری می‌باشد. اخیراً، چندین مطالعه در زمینه‌های هواشناسی از مشاهدات ارزشمند شبکه IPGN بهره گرفته‌اند (۱، ۳۳ و ۳۶).

یک سال از مشاهدات پیوسته ۳۸ ایستگاه GPS از شبکه IPGN به کار گرفته شدند تا صحت داده‌های بخار آب سنجنده مادیس را در ایران مورد مطالعه قرار دهند. شکل ۱، توزیع مکانی ایستگاه‌های دائمی GPS مورد استفاده در این مطالعه را نمایش می‌دهد. همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود، منطقه مورد مطالعه بین عرض‌های ژئوتیک ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و طول‌های ژئوتیک ۴۴ تا ۶۴ درجه شرقی واقع شده است.

پس از جمع‌آوری مشاهدات خام گیرنده‌های GPS با فرمت استاندارد، مولفه‌های مختصاتی هر ایستگاه به همراه تاخیرهای تروپوسفری برآورد شدند. پردازش داده‌ها به کمک مشاهدات تفاضلی دوگانه با استفاده نرم‌افزار علمی گامیت در مد شبکه‌ای انجام شد تا مقادیر ZTD در بازه‌های زمانی یک ساعته برآورد شوند.

محصولات بخار آب مادیس

سنجنده مادیس یک رادیومتر با تفکیک بالا دارای ۳۶ باند است



شکل ۱- موقعیت مکانی ایستگاه‌های GPS مورد استفاده در این مطالعه

Figure 1- Location of GPS stations used in this study

نتایج و بحث

ارزیابی محصولات بخار آب مادیس

پس از برآورد مقادیر بخار آب در ایستگاه‌های GPS، با استفاده از برآوردهای همزمان بخار آب در ایستگاه‌های شبکه IPGN و محصولات PWV سنجنده مادیس، مقایسه آماری انجام گرفت. در ارزیابی‌ها، ابتدا محصولات باند Near-IR به صورت مجزا برای داده‌های ماهواره ترا و آکوا مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. سپس دقت محصولات در باند IR به صورت مجزا در طول شب و روز بررسی شد. در نهایت، محصولات بخار آب روزانه باند IR با مقادیر بخار آب در باند Near-IR نیز مقایسه شد.

مقایسه بخار آب GPS و باند Near-IR

برآوردهای GPS PWV یک ساعته از ۳۸ ایستگاه دائمی شبکه IPGN برای ارزیابی محصولات بخار آب مادیس در باند Near-IR از ماهواره‌های ترا و آکوا در کل سال ۲۰۱۱ به کار گرفته شدند. برای مقایسه با برآوردهای GPS PWV، تنها از داده‌های بخار آب با شرایط بدون ابر در باند Near-IR استفاده شد. در ادامه، سری‌های زمانی برآورد GPS PWV ایستگاه‌های مختلف در منطقه مورد مطالعه با مقادیر متناظر سنجنده مادیس در باند Near-IR مقایسه شدند که نتایج آماری بر حسب پارامترهای ضریب همبستگی (R)، میانگین اریبی MBE و RMSE در جدول ۱ لیست شده است.

نتایج همبستگی بالایی بین دو مجموعه از اندازه‌گیری‌های PWV نشان می‌دهند. فراوانی ضریب همبستگی بدست آمده بین GPS PWV و مقادیر متناظر باند Near-IR مادیس برای تمامی ایستگاه‌ها در شکل ۲ آورده شده است. مقادیر همبستگی در محدوده ۰/۹۰ تا ۰/۹۸ تغییر می‌کند (جدول ۱). برای باند Near-IR مقادیر اریبی (GPS-MODIS) در ایستگاه‌های مختلف، بین منفی ۷/۲۴ میلی‌متر تا مثبت ۱/۱۱ میلی‌متر با مقدار میانگین منفی ۲/۲ میلی‌متر تغییر می‌کند. مقدار میانگین اریبی بیان‌کننده این مطلب هستند که داده‌های باند Near-IR سنجنده مادیس، به طور میانگین در منطقه، بخار آب را بیش از مقدار واقعی برآورد می‌کنند. همچنین، RMSE اختلاف‌های (GPS-MODIS) بین ۱/۲ تا ۷/۶ میلی‌متر متغیر و با مقدار میانگین ۳/۴ میلی‌متر بدست آمد. این نتایج سازگار با تعداد زیادی از مطالعات پیشین هستند (۲۰، ۲۲، ۳۷ و ۴۰).

نتایج ارائه شده در جدول ۱ براساس تمامی داده‌های سنجنده مادیس (هم داده‌های ماهواره ترا و هم آکوا) در موقعیت هر ایستگاه بدست آمده است. برای ارزیابی جداگانه‌ی محصولات بخار آب در باند Near-IR، جدول ۲ به تفکیک، کیفیت داده‌های ماهواره‌ی ترا و آکوا نسبت به GPS لیست شده است.

همچنین، داده‌های پیکسل‌های تصاویر MODIS Near-IR با فاصله کمتر از ۱ کیلومتر با موقعیت ایستگاه GPS استخراج و برای ارزیابی آماری انتخاب شد. در کل این بازه‌ی مطالعاتی، ۱۲۹۴۵ عبور ماهواره‌های ترا و آکوا از منطقه مورد نظر رخ داده‌است. از بین کل فایل‌های دانلود شده، فایل‌هایی که در فاصله کمتر از ۱ کیلومتری موقعیت ایستگاه‌های GPS، دارای مقادیر قابل قبول (به عبارت دیگر بدون ابر) بودند برای آنالیز محصولات بخار آب این سنجنده انتخاب شدند و مقدار PWV از درون این تصاویر استخراج و مورد استفاده قرار گرفتند. انتخاب پیکسل‌های بدون ابر بر اساس داده‌های cloud mask سنجنده مادیس انجام شد. در حقیقت با توجه به مقادیر cloud mask هر پیکسل، مقادیر بدون ابر از کل تصاویر HDF استخراج شد. همچنین، داده‌ها یا تصاویری که ایستگاه‌های GPS را شامل شدند ولی در نزدیکی ایستگاه دارای مقادیر NAN بودند حذف شدند و به آنالیزهای آماری ورود پیدا نکردند.

باید توجه داشت که تقریباً تمامی اندازه‌گیری‌های بخار آب مادیس که در این مطالعه استفاده شدند دارای اختلاف زمانی بیش از ۲ ساعت با پرتاب رادیوسوندها در منطقه می‌باشند. بنابراین چون بخار آب کمیتی بسیار متغیر در زمان و مکان است ترجیح داده شد که مقایسه آماری بین رادیوسوند و مادیس انجام نشود. از طرفی دیگر، اندازه‌گیری‌های پیوسته و با تفکیک زمانی در حد چند دقیقه ایستگاه‌های دائمی GPS، امکان مقایسه برآوردهای GPS PWV را با مقادیر متناظر بدست آمده از سنجنده مادیس در هر زمان تسهیل می‌کند.

پس از استخراج سری‌های زمانی قابل قبول از محصولات بخار آب مادیس در موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های GPS می‌توان مقادیر بخار آب این دو روش را در همه ایستگاه‌ها با هم مقایسه نمود و از این مقایسه می‌توان به خطای اریبی میانگین (MBE) و میزان خطاهای اتفاقی و همچنین همبستگی محصولات بخار آب این سنجنده نسبت به یک روش قابل اعتماد زمینی پی برد.

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (GPS_{PWV_i} - MODIS_{PWV_i})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (GPS_{PWV_i} - MODIS_{PWV_i})^2}$$

(۸)

جدول ۱- مقایسه آماری بین PWV حاصل از GPS و MODIS Near-IR در ۳۸ ایستگاه برای داده‌های سال ۲۰۱۱

Table 1- Statistical comparison between PWV derived from GPS and MODIS Near-IR PWV at 38 GPS stations over 2011

شماره ایستگاه Station number	شناسه ایستگاه Station ID	خطای میانگین اریبی MBE	جذر خطای کمترین مربعات RMSE	ضریب همبستگی R
1	ABDN	-7.24	7.60	0.94
2	ABRK	-2.03	2.74	0.93
3	ABSD	0.07	1.19	0.96
4	AHAR	-2.13	2.79	0.97
5	AHVZ	-6.51	6.92	0.94
6	AMND	-1.88	3.01	0.91
7	ARDH	-0.85	1.91	0.96
8	BAFT	0.05	2.19	0.91
9	BEBN	-5.11	5.59	0.95
10	BIAJ	-2.73	3.53	0.95
11	BIJD	-1.88	2.61	0.92
12	BNAB	-1.97	2.76	0.96
13	BOJD	-2.22	3.36	0.95
14	BRMN	-1.21	2.33	0.96
15	CHSM	-2.64	3.25	0.95
16	ESFN	-2.07	2.73	0.96
17	FARM	-1.37	2.46	0.95
18	GONA	-2.69	3.28	0.94
19	GRGN	-4.41	5.18	0.98
20	ILLM	-2.15	2.71	0.94
21	KADN	-0.08	1.98	0.94
22	KLBR	1.11	2.06	0.97
23	KRAD	-1.98	2.63	0.94
24	LAMD	-4.48	5.72	0.94
25	MAVT	-4.30	5.12	0.96
26	MSHN	-0.85	2.20	0.95
27	ORYH	-1.90	2.68	0.96
28	POLD	-2.84	3.62	0.96
29	QAEN	-2.11	2.61	0.96
30	QUCH	-1.43	2.97	0.93
31	RAVR	-2.82	3.57	0.91
32	SABZ	-1.94	2.86	0.94
33	SAFI	-2.42	3.19	0.95
34	SARK	-3.71	4.38	0.95
35	SFHN	-1.66	2.52	0.92
36	SHRN	-2.89	3.82	0.95
37	TEHN	-1.53	2.47	0.96
38	THED	-1.83	2.55	0.95

نظر گرفت.

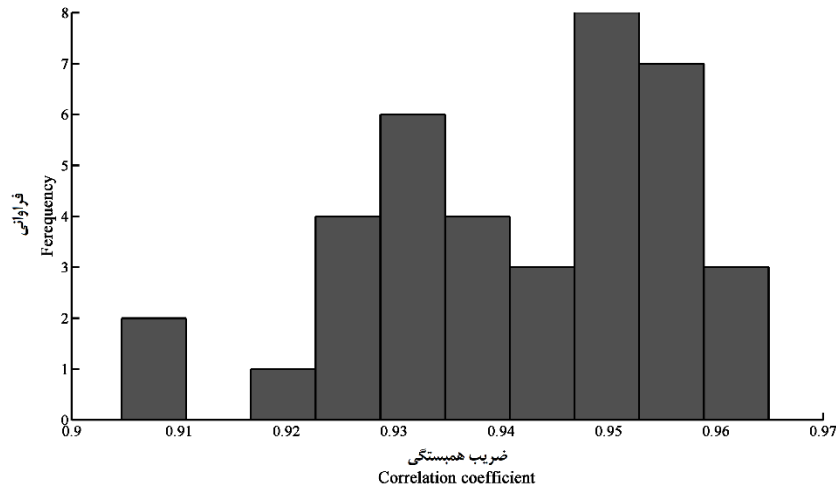
مقادیر آماری بدست آمده برای باند Near-IR سنجنده مادیس در این مطالعه قابل مقایسه با مطالعات مشابه در سایر مناطق جهان است. برای مثال، مارتینز و همکاران (۳۹) با مقایسه ۶ سال از داده های GPS PWV و محصولات باند Near-IR سنجنده مادیس در شبه جزیره ایبری مقادیر همبستگی بین این دو محصول را بین ۰/۳۸ تا ۰/۷۱ متغیر گزارش کردند. ونگ و همکاران (۴۰) در جنوب فلات تبت دریافتند که مادیس در باند Near-IR مقدار بخار آب را تا ۴۰ درصد (حدود ۳/۵۲ میلیمتر) بیش از GPS برآورد می کند.

با توجه به نتایج جداول ۲، پارامترهای آماری محصولات بخار آب باند Near-IR سنجنده مادیس واقع در ماهواره‌های ترا (نقاط قرمز) و آکوا (نقاط آبی) نسبت به GPS PWV برای ایستگاه‌های مختلف در شکل ۳ با هم مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل ۳، اندازه‌ی اریبی منفی داده‌های بخار آب ماهواره ترا نسبت به آکوا کمی بیشتر است. همچنین، مقادیر انحراف معیار اختلافات بین GPS PWV و MODIS برای ماهواره ترا کمی بیشتر بدست آمد. به طور کلی اندازه همبستگی مقادیر باند Near-IR با مقادیر بخار آب متناظر از GPS تقریباً برای ماهواره‌های ترا و آکوا در یک سطح قرار دارند. بنابراین، براساس نتایج، می‌توان دقت و صحت محصولات بخار آب سنجنده مادیس روی ماهواره‌های ترا و آکوا را تقریباً در یک حد و اندازه در

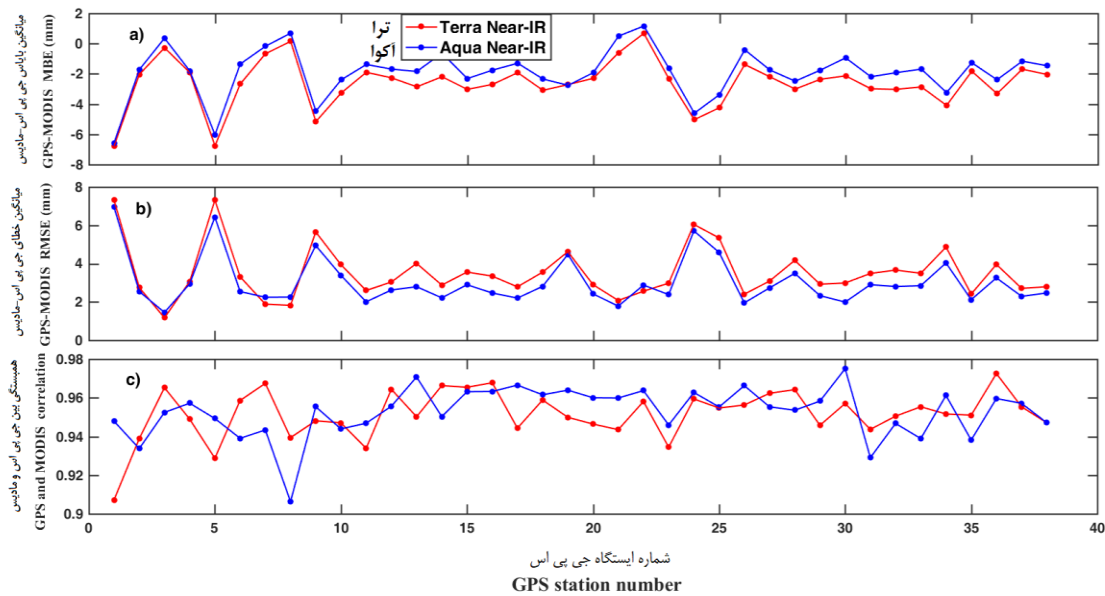
مقایسه بخار آب GPS و IR

قابل استخراج است. به عبارت دیگر باند IR در طول هم شب و هم روز محصولات بخار آب را ارائه می‌دهد. در این بخش محصولات این سنجنده در باند IR به صورت مجزا در طول شب و روز مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

در بخش قبل محصولات PWV بدست آمده از سنجنده مادیس در باند Near-IR با استفاده از مقادیر دارای اعتبار GPS PWV ارزیابی شدند. باید توجه داشت که این محصولات فقط در طول روز ارائه می‌شوند و مقادیر MODIS PWV برای شب تنها در باند IR



شکل ۲- هیستوگرام فروانی مقادیر ضریب همبستگی بین مقادیر MODIS Near-IR PWV و GPS PWV براساس داده‌های سال ۲۰۱۱
Figure 2- Frequency histogram of correlation coefficient values between GPS PWV and MODIS Near-IR PWV data over 2011



شکل ۳- مقایسه الف) اریبی ب) خطای RMSE و ج) ضریب همبستگی محصولات بخار آب باند Near-IR سنجنده MODIS روی ماهواره‌های ترا (نقاط قرمز) و آکوا (نقاط آبی) نسبت به GPS PWV محاسبه شده در ۳۸ ایستگاه کشور

Figure 3- Comparison of a) bias b) RMSE and c) correlation coefficient of MODIS Near-IR water vapor products on Terra satellites (red dots) and Aqua (blue dots) compared to GPS PWV calculated in 38 stations of the country

جدول ۲- مقایسه آماری بین PWV حاصل از GPS و باند Near-IR ماهواره ترا و آکوا در ایستگاه‌های مختلف برای داده‌های سال ۲۰۱۱

Table 2- Statistical comparison between GPS PWV and MODIS Near-IR data from Terra and Aqua at different stations over 2011

شناسه ایستگاه Station ID	خطای میانگین اریبی MBE		جذر خطای کمترین مربعات RMSE		ضریب همبستگی R	
	Terra	Aqua	Terra	Aqua	Terra	Aqua
	ترا	آکوا	ترا	آکوا	ترا	آکوا
ABDN	-6.76	-6.56	7.31	6.94	0.90	0.94
ABRK	-2.04	-1.72	2.75	2.54	0.93	0.93
ABSD	-0.27	0.35	1.17	1.45	0.96	0.95
AHAR	-1.90	-1.80	3.06	2.94	0.94	0.95
AHVZ	-6.76	-6.00	7.31	6.42	0.92	0.94
AMND	-2.67	-1.35	3.31	2.54	0.95	0.93
ARDH	-0.66	-0.17	1.88	2.24	0.96	0.94
BAFT	0.14	0.69	1.81	2.25	0.93	0.90
BEBN	-5.15	-4.46	5.65	4.94	0.94	0.95
BIAJ	-3.26	-2.39	3.94	3.38	0.94	0.94
BIJD	-1.89	-1.37	2.59	2.00	0.93	0.94
BNAB	-2.26	-1.68	3.04	2.62	0.96	0.95
BOJD	-2.85	-1.84	4.01	2.79	0.95	0.97
BRMN	-2.18	-0.62	2.87	2.21	0.96	0.95
CHSM	-3.02	-2.31	3.55	2.89	0.96	0.96
ESFN	-2.69	-1.75	3.34	2.46	0.96	0.96
FARM	-1.91	-1.29	2.78	2.19	0.94	0.96
GONA	-3.08	-2.33	3.55	2.81	0.95	0.96
GRGN	-2.70	-2.75	4.62	4.48	0.94	0.96
ILLM	-2.29	-1.91	2.9	2.42	0.94	0.96
KADN	-0.59	0.50	2.07	1.78	0.94	0.95
KLBR	0.67	1.16	2.56	2.87	0.95	0.96
KRAD	-2.34	-1.65	2.97	2.38	0.93	0.94
LAMD	-5.03	-4.60	6.04	5.70	0.95	0.96
MAVT	-4.23	-3.37	5.34	4.58	0.95	0.95
MSHN	-1.37	-0.40	2.40	1.95	0.95	0.96
ORYH	-2.19	-1.74	3.08	2.73	0.96	0.95
POLD	-3.00	-2.48	4.16	3.49	0.96	0.95
QAEN	-2.35	-1.75	2.92	2.32	0.94	0.95
QUCH	-2.13	-0.93	2.98	1.99	0.95	0.97
RAVR	-2.98	-2.186	3.48	2.90	0.94	0.92
SABZ	-3.02	-1.91	3.66	2.80	0.95	0.94
SAFI	-2.86	-1.68	3.49	2.84	0.95	0.93
SARK	-4.08	-3.23	4.86	4.03	0.95	0.96
SFHN	-1.82	-1.26	2.41	2.11	0.951	0.93
SHRN	-3.31	-2.38	3.95	3.25	0.97	0.95
TEHN	-1.69	-1.16	2.70	2.29	0.95	0.95
THED	-2.04	-1.46	2.79	2.46	0.94	0.94

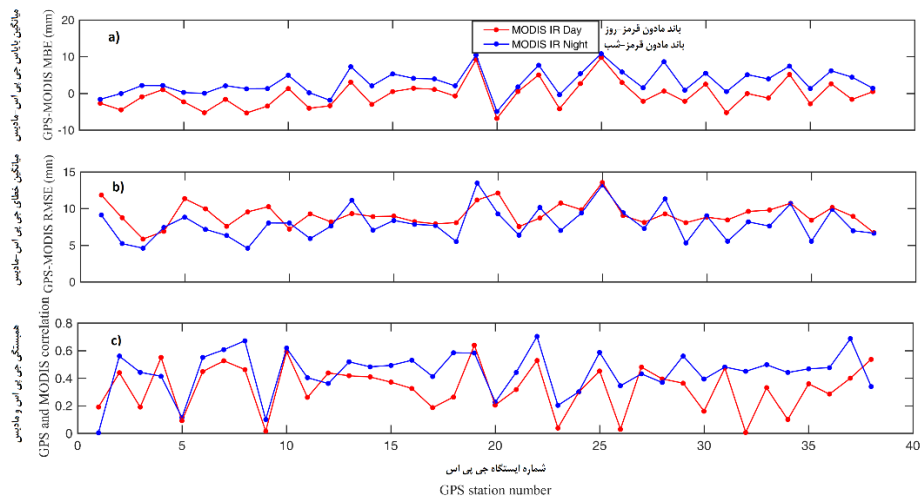
IR با GPS در طول روز و شب به ترتیب ۰/۷ و ۰/۶۴ می‌باشد. در برخی از ایستگاه‌ها مقادیر همبستگی بین باند IR و مقادیر بخار آب GPS خیلی پایین بوده است. علت این امر می‌تواند وجود ابر در بخشی از پیکسل‌های ۵ کیلومتری باشد. همچنین مواقعی که تعداد مقادیر متناظر بخار آب از هر دو روش GPS و باند IR مادیس در طول یکسال کم باشد ممکن است منجر به همبستگی پایین در نتایج شده باشد. همچنین، مقایسه بین کارایی محصولات باند IR در طول روز (نقاط قرمز) و شب (نقاط آبی) نسبت به GPS PWV در شکل ۴ نمایش داده شده است.

محصولات PWV باند IR با تفکیک افقی ۵ کیلومتر ارائه می‌شوند. بنابراین به کمک پارامترهای کیفیت داده موجود در فایل‌های جمع‌آوری شده، آن دسته از پیکسل‌های ۵ کیلومتری باند IR که تقریباً فاقد ابر بودند برای ارزیابی استخراج شد. با مقایسه محصولات بدست آمده در باند IR با مقادیر GPS PWV، آماره‌های میانگین خطای میانگین اریبی (MMBE)، میانگین جذر خطای کمترین مربعات (MRMSE) و میانگین همبستگی (MR) در ۳۸ ایستگاه برای مدت یکسال محاسبه و به ترتیب برای روز و شب در جدول ۳ آورده شده است.

بر اساس نتایج، حداکثر میزان همبستگی محصولات بخار آب باند

جدول ۳- مقایسه آماری بین PWV حاصل از GPS و باند IR سنجنده مادیس در طول روز و شب برای کل ایستگاه‌ها در طول سال ۲۰۱۱
Table 3. Statistical comparison between GPS PWV and MODIS IR PWV during day and night for all stations over 2011.

	MMBE		MRMSE		MR	
	میانگین		میانگین جذر خطای		میانگین ضریب	
	خطای میانگین اریبی		کمترین مربعات		همبستگی	
	Day	Night	Day	Night	Day	Night
	روز	شب	روز	شب	روز	شب
For all stations	-0.38	3.11	9.15	7.90	0.33	0.45



شکل ۴- مقایسه الف) اریبی ب) خطای RMSE و ج) ضریب همبستگی محصولات بخار آب باند IR سنجنده MODIS در طول روز (نقاط قرمز) و شب (نقاط آبی) نسبت به GPS PWV محاسبه شده در ۳۸ ایستگاه کشور

Figure 4- Comparison of a) bias b) RMSE and c) correlation coefficient of MODIS IR water vapor products during the day (red dots) and night (blue dots) compared to GPS PWV calculated in 38 stations of the country

آمده در ایستگاه‌های GPS، برای شب و روز با هم مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل، میزان همبستگی محصولات IR PWV با مقادیر GPS PWV به طور کلی در طول شب بهتر از روز بوده است. میانگین ضریب همبستگی در طول روز و شب به ترتیب ۰/۳۳ و ۰/۴۴ بدست آمد.

همچنین، چندین مطالعه در بخش‌های مختلف جهان مقادیر بخار آب باند IR سنجنده مادیس را مورد ارزیابی قرار دادند که نتایج آن‌ها را می‌توان با نتایج بدست آمده در این مطالعه مقایسه نمود. برای مثال، لیوو و همکاران (۲۱) با مقایسه مقادیر بخار آب ۸۳ ایستگاه رادیوسوند کشور چین با داده‌های سنجنده مادیس در طول یک‌سال دریافتند که محصولات باند Near-IR نسبت به باند IR با مقادیر رادیوسوند موافقت بیشتری دارند. براساس نتایج آن‌ها به طور میانگین RMSE محصولات باند Near-IR به اندازه ۵/۰۳ میلی‌متر برآورد شد.

همانطور که در شکل ۴ الف دیده می‌شود، مقادیر اریبی بخار آب باند IR در طول روز اکثراً منفی و مقادیر اریبی همین محصولات در طول شب مثبت می‌باشند. میانگین اریبی بخار آب باند IR برای کل ایستگاه‌ها در طول سال ۲۰۱۱ برای روز و شب به ترتیب منفی ۰/۳۸ و مثبت ۳/۱۱ میلی‌متر بدست آمد. بنابراین سنجنده مادیس در باند IR بخار آب را به اندازه‌ی حدود ۳/۱۱ میلی‌متر کمتر از مشاهدات قابل اعتماد GPS برآورد می‌کند. به عبارت دیگر می‌توان گفت که محصولات MODIS IR PWV در منطقه مورد مطالعه به طور میانگین دارای اریبی مثبت با مقدار کم در طول روز و اریبی منفی معنی‌دار در طول شب می‌باشند.

همچنین براساس مقادیر RMSE در شکل ۴ ب، دقت محصولات IR در شب بهتر از روز بدست آمده است. به طور میانگین در کل منطقه برای سال ۲۰۱۱، RMSE بخار آب مادیس برای باند IR در طول روز و شب به ترتیب ۹/۱۵ و ۷/۹۰ میلی‌متر بدست آمد. همچنین در شکل ۴ ج مقادیر همبستگی این محصولات با مقادیر متناظر بدست

جدول ۴- مقایسه کارایی محصولات بخار آب سنجنده MODIS در باندهای IR و Near-IR در طول روز نسبت به داده‌های GPS PWV در سال ۲۰۱۱

Table 4- Comparison of performance of MODIS water vapor products in IR and Near-IR bands during the day compared to GPS PWV data over 2011

	Near-IR		IR-day			
	باند نزدیک به مادون قرمز		باند مادون قرمز (داده‌های روز)			
	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean
	کمترین	بیشترین	متوسط	کمترین	بیشترین	متوسط
MBE	-6.65	0.93	-2.20	-6.85	9.72	-0.38
خطای میانگین اریبی						
RMSE	1.30	7.11	3.40	5.85	13.55	9.15
جذر خطای کمترین مربعات						
R	0.90	0.97	0.94	0.01	0.64	0.33
ضریب همبستگی						

میلی‌متر محاسبه شد که یک بازه‌ی تغییرات بزرگ برای داده‌های PWV محسوب می‌شود. تقریباً در تمامی ایستگاه‌ها اندازه اریبی میانگین و RMSE باند Near-IR از باند IR کمتر برآورد شده است. همچنین باتوجه به جدول ۴، محصولات Near-IR PWV همبستگی بسیار بالاتری با مقادیر بدست آمده از GPS نسبت به محصولات IR در منطقه مورد مطالعه داشته است.

نتیجه‌گیری

برای دستیابی به اطلاعات جامعی در مورد صحت داده‌های بخار آب سنجنده مادیس در باندهای مختلف بدست آمده از ماهواره‌های ترا و آکوا در ایران، از برآوردهای بخار آب تکنیک هواشناسی با GPS استفاده شد. برای این منظور، یکسال از مقادیر PWV با تفکیک زمانی بالا، بدست آمده از مشاهدات شبکه‌ای از ۳۸ ایستگاه دائمی GPS مورد استفاده قرار گرفتند. سری‌های زمانی GPS PWV با استفاده از پردازش مشاهدات خام جمع‌آوری شده در گیرنده ایستگاه‌های زمینی تولید شدند.

در ابتدا مقادیر Near IR PWV با شرایط بدون ابر در موقعیت تمامی ایستگاه‌های GPS جمع‌آوری شدند. ارزیابی‌ها موافقت بالایی بین این دو مجموعه از داده‌های بخار آب با میانگین ضریب همبستگی ۰٫۹۵، نشان داد. همچنین، میانگین خطای اریبی و RMSE اختلافات (GPS - MODIS) برای باند Near-IR به ترتیب منفی ۲/۲ و ۳/۴ میلی‌متر بدست آمد. با توجه به مقدار اریبی منفی می‌توان دریافت که داده‌های Near IR نسبت به GPS تمایل دارند که PWV را بیشتر برآورد کنند. همچنین مقایسه داده‌های بخار آب ماهواره‌ی ترا با آکوا در باند Near-IR نشان داد که تقریباً کیفیت محصولات PWV سنجنده مادیس هر دو ماهواره در یک سطح قرار دارد.

از دیگر نتایج مطالعه آن‌ها این بود که محصولات باند IR در طول شب نسبت به روز موافقت بهتری داشتند که البته سازگار با نتایج ارائه شده در این مطالعه نیز می‌باشد. لیبو و همکاران (۲۱) به طور میانگین مقادیر RMSE محصولات باند IR را در طول روز و شب به ترتیب ۶/۰۲ میلی‌متر و ۵/۸۱ میلی‌متر برآورد نمودند. گورباز و جین (۱۷) در منطقه ترکیه با مقایسه مقادیر PWV در ۸ ایستگاه GPS و مقادیر متناظر MODIS IR دریافتند که دقت محصولات بخار آب مادیس در باند IR برای روز نسبت به شب کمتر است. آن‌ها مقادیر RMSE محصولات بخار آب مادیس را بین ۳ تا ۷ میلی‌متر گزارش کردند. باید توجه داشت که دقت داده‌های سنجنش از دور و به طور خاص بخار آب سنجنده مادیس، ممکن است در مناطق مختلف جهان مقادیر متفاوتی داشته باشد و ممکن است نتایج آماری در یک منطقه کمی با مناطق دیگر متفاوت باشد. آنچه حائز اهمیت است، استفاده از داده‌های با کیفیت و قابل اعتماد محلی برای ارزیابی صحیح محصولات سنجنش از دور می‌باشد.

مقایسه محصولات باند IR و Near-IR

از طرف دیگر با مقایسه کارایی محصولات بخار آب این سنجنده در طول روز برای باند IR با نتایج مربوط به باند Near-IR در جدول ۱، می‌توان دریافت که دقت و صحت محصولات این سنجنده برای روز در باند Near-IR بسیار بهتر از باند IR می‌باشد. مقایسه جامع این دو محصول در طول روز در جدول ۴ آورده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، دقت محصولات Near-IR به طور میانگین حدود ۵ میلی‌متر بیشتر از باند IR برآورد شده است. علت این امر، پراکندگی بیش از حد مقادیر اختلافات MODIS IR PWV و GPS PWV در طول روز می‌باشد به طوری که کمترین میزان اریبی این محصول منفی ۶/۸۵ میلی‌متر و بیشترین آن مثبت ۹/۷۲

در محصولات این باند شد. در این مطالعه محصولات باند IR از این جهت که تنها مقادیر بخار آب سنجنده مادیس در شب را ارائه می دهند مورد ارزیابی قرار گرفتند و با محصولات باند Near-IR نیز مقایسه شدند. نتایج به طور واضح نشان داد که در منطقه مورد مطالعه کیفیت بخار آب باند IR بسیار کمتر از باند Near-IR است و برای استفاده عملیاتی از این محصولات توصیه می شود که با روش مناسبی کالیبره شود.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از داوران محترم برای نظرات و پیشنهادات ارزشمندی که به منظور افزایش کیفیت این تحقیق ارائه نمودند، تشکر می کنند. همچنین، مراتب قدردانی خود را از حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل از طریق اعتبار پژوهشی شماره BNUT/394099/97 اعلام می دارند.

در ادامه ارزیابی های آماری روی محصولات بخار آب باند IR به طور مجزا در طول روز و شب نسبت به GPS PWV در ایستگاه های مختلف صورت گرفت. مقادیر اریبی بخار آب باند IR در طول روز اکثرا منفی و مقادیر اریبی همین محصولات در طول شب مثبت برآورد شدند. بررسی مقادیر میانگین اریبی محصولات مادیس در این باند نسبت به GPS PWV برای کل ایستگاه ها در طول سال ۲۰۱۱ برای روز و شب نشان داد که مادیس در منطقه مورد مطالعه به طور میانگین دارای اریبی مثبت با مقدار کم در طول روز و اریبی منفی معنی دار در طول شب می باشد.

باید توجه داشت که نتایج ارائه شده در این تحقیق بیانگر میزان دقت و صحت مربوط به محصولات استخراج شده از فایل های HDF دانلود شده هستند. به عبارت دیگر قبل از استفاده از این داده ها بهتر است که با روش مناسبی کالیبره شوند. سام خانیانی و همکاران در سال ۲۰۲۰ با توجه به ارتباط قوی بین مقادیر اریبی بخار آب مادیس در باند Near-IR با ارتفاع منطقه، مدل خطی برای کالیبراسیون محصولات در این باند پیشنهاد کردند که منجر به بهبود قابل توجهی

منابع

- 1- Adavi Z., and Mashhadi-Hossainali M. 2014. 4D tomographic reconstruction of the tropospheric wet refractivity using the concept of virtual reference station, case study: northwest of Iran. *Meteorology and Atmospheric Physics* 126(3-4): 193-205.
- 2- Alexandrov M.D., Schmid B., Turner D.D., Cairns B., Oinas V., Laci A.A., and Eilers J. 2009. Columnar water vapor retrievals from multifilter rotating shadowband radiometer data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D2).
- 3- Bevis M., Businger S., Herring T.A., Rocken C., Anthes R.A., and Ware R.H. 1992. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 97(D14): 15787-15801.
- 4- Bevis M., Businger S., Chiswell S., Herring T.A., Anthes R.A., Rocken C., and Ware R.H. 1994. GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water. *Journal of Applied Meteorology* 33(3): 379-386.
- 5- Bocolari M., Fazlagic S., Frontero P., Lombroso L., Pugnaghi S., Santangelo R., and Teggi S. 2002. GPS Zenith Total Delays and Precipitable Water in comparison with special meteorological observations in Verona (Italy) during MAP-SOP. *Annals of Geophysics*.
- 6- 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).
- 7- Davis J.L., Herring T.A., Shapiro I.I., Rogers A.E.E., and Elgered G. 1985. Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Science* 20(6): 1593-1607.
- 8- Deeter M.N. 2007. A new satellite retrieval method for precipitable water vapor over land and ocean. *Geophysical Research Letters*, 34(2).
- 9- Dietrich S.V.R., Johnsen K.P., Miao J., and Heygster G. 2004. Comparison of tropospheric water vapour over Antarctica derived from AMSUB data, ground-based GPS data and the NCEP/NCAR reanalysis. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 82(1B), 259-267.
- 10- Divakarla M.G., Barnet C.D., Goldberg M.D., McMillin L.M., Maddy E., Wolf W., and Liu X. 2006. Validation of Atmospheric Infrared Sounder temperature and water vapor retrievals with matched radiosonde measurements and forecasts. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D9).
- 11- Durre I., Vose R.S., and Wuertz D.B. 2006. Overview of the integrated global radiosonde archive. *Journal of*

- Climate 19(1): 53-68.
- 12- Elgered G., Johansson J.M., Rönnäng B.O., and Davis J.L. 1997. Measuring regional atmospheric water vapor using the Swedish permanent GPS network. *Geophysical Research Letters*, 24(21): 2663-2666.
 - 13- Ferrare R., Brasseur L., Clayton M., Turner D., Remer L., and Gao B.C. 2002. Evaluation of TERRA aerosol and water vapor measurements using ARM SGP data. In *American Meteorological Society 11th Conference on Atmospheric Radiation*, Ogden, Utah (pp. 3-7).
 - 14- Gao B., and Kaufman Y.J. 1998. The MODIS Near-IR water vapor algorithm: product ID: MOD05-total precipitable water, algorithm technical background document. Remote Sensing Division, Code, 7212.
 - 15- Gao B.C., Yang P., Guo G., Park S.K., Wiscombe W.J., and Chen B. 2003. Measurements of water vapor and high clouds over the Tibetan Plateau with the Terra MODIS instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41(4): 895-900.
 - 16- Gui K., Che H., Chen Q., Zeng Z., Liu H., Wang Y., and Zhang X. 2017. Evaluation of radiosonde, MODIS-NIR-Clear, and AERONET precipitable water vapor using IGS ground-based GPS measurements over China. *Atmospheric Research* 197: 461-473.
 - 17- Gurbuz G., and Jin S. 2017. Long-time variations of precipitable water vapour estimated from GPS, MODIS and radiosonde observations in Turkey. *International Journal of Climatology* 37(15): 5170-5180.
 - 18- Iwabuchi T., Naito I., and Mannoji N. 2000. A comparison of Global Positioning System retrieved precipitable water vapor with the numerical weather prediction analysis data over the Japanese Islands. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 105(D4): 4573-4585.
 - 19- Khaniani A.S., Nikraftar Z., and Zakeri S. 2020. Evaluation of MODIS Near-IR water vapor product over Iran using ground-based GPS measurements. *Atmospheric Research*, 231, 104657.
 - 20- 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).
 - 21- Liu H., Tang S., Zhang S., and Hu J. 2015. Evaluation of MODIS water vapour products over China using radiosonde data. *International Journal of Remote Sensing* 36(2): 680-690.
 - 22- Lu N., Qin J., Yang K., Gao Y., Xu X., and Koike T. 2011. On the use of GPS measurements for Moderate Resolution Imaging Spectrometer precipitable water vapor evaluation over southern Tibet. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D23).
 - 23- Mazany R.A., Businger S., Gutman S.I., Roeder, W., 2002. A Lightning Prediction Index that Utilizes GPS Integrated Precipitable Water Vapor. *Weather Forecast* 17: 1034-1047.
 - 24- Merrikhpour M.H., and Rahimzadegan M.(2017). Improving the algorithm of extracting regional total precipitable water vapor over land from MODIS images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 55(10): 5889-5898.
 - 25- Mobasheri M.R., Purbagher Kordi S.M., Farajzadeh M., and Sadeghi Naeini A. 2008. Improvement of remote sensing techniques in TPW assessment using radiosonde data. *Journal of Applied Sciences* 8(3): 480-488.
 - 26- Mockler S. 1995. *Water Vapor in the Climate System: Special Report*.
 - 27- Morisette J.T., Privette J.L., and Justice C.O. 2002. A framework for the validation of MODIS land products. *Remote Sensing of Environment* 83(1-2): 77-96.
 - 28- Niell A.E., Coster A.J., Solheim F.S., Mendes V.B., Toor P.C., Langley R.B., and Upham C.A. 2001. Comparison of measurements of atmospheric wet delay by radiosonde, water vapor radiometer, GPS, and VLBI. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 18(6): 830-850.
 - 29- Pottiaux E., and Warnant R. 2002. First comparisons of precipitable water vapor estimation using GPS and water vapor radiometers at the Royal Observatory of Belgium. *GPS Solutions* 6(1-2): 11-17.
 - 30- Pramualsardikul S., Haas R., Elgered G., and Scherneck H.G. 2007. Sensing of diurnal and semi-diurnal variability in the water vapour content in the tropics using GPS measurements. *Meteorological Applications: A Journal of Forecasting, Practical Applications, Training Techniques and Modelling* 14(4): 403-412.
 - 31- 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(D5).

- 32- Ross R.J., and Rosenfeld S. 1997. Estimating mean weighted temperature of the atmosphere for Global Positioning System applications. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 102(D18): 21719-21730.
- 33- Sadeghi E., Mashhadi-Hossainali M., and Etemadfard H. 2014. Determining precipitable water in the atmosphere of Iran based on GPS zenith tropospheric delays. *Annals of Geophysics* 57(4): 0430.
- 34- Sharifi M.A., Safari A., Masoumi S., and Khaniani A.S. 2012. Harmonic analysis of the ionospheric electron densities retrieved from FORMOSAT-3/COSMIC radio occultation measurements. *Advances in Space Research* 49(10): 1520-1528.
- 35- Sharifi M.A., Khaniani A.S., Masoumi S., Schmidt T., and Wickert J. 2013. Least-squares harmonic estimation of the tropopause parameters using GPS radio occultation measurements. *Meteorology and Atmospheric Physics* 120(1-2): 73-82.
- 36- Sharifi M.A., Azadi M., and Khaniani A.S. 2016. Numerical simulation of rainfall with assimilation of conventional and GPS observations over north of Iran. *Annals of Geophysics* 59(3): 0322.
- 37- Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., Mattar C., and Sòria G. 2015. Evaluation of Terra/MODIS atmospheric profiles product (MOD07) over the Iberian Peninsula: A comparison with radiosonde stations. *International Journal of Digital Earth* 8(10): 771-783.
- 38- Van Baelen J., Aubagnac J.P., and Dabas A. 2005. Comparison of near-real time estimates of integrated water vapor derived with GPS, radiosondes, and microwave radiometer. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 22(2): 201-210.
- 39- Vaquero-Martínez J., Antón M., de Galisteo J.P.O., Cachorro V.E., Wang H., Abad G.G., and Costa M.J. 2017. Validation of integrated water vapor from OMI satellite instrument against reference GPS data at the Iberian Peninsula. *Science of the Total Environment* 580: 857-864.
- 40- Wang Y., Yang K., Pan Z., Qin J., Chen D., Lin C., and Lu N. 2017. Evaluation of precipitable water vapor from four satellite products and four reanalysis datasets against GPS measurements on the Southern Tibetan Plateau. *Journal of Climate* 30(15): 5699-5713.
- 41- Wong M.S., Jin X., Liu Z., Nichol J., and Chan P.W. 2015. Multi-sensors study of precipitable water vapour over mainland China. *International Journal of Climatology* 35(10): 3146-3159.
- 42- Zhai P., and Eskridge R.E. 1997. Atmospheric water vapor over China. *Journal of Climate* 10(10): 2643-2652.

Quality Assessment of MODIS Water Vapor Products in IR and Near-IR Bands over Iran

A. Sam-Khaniani^{1*} - Z. Nikraftar²

Received: 23-05-2020

Accepted: 04-11-2020

Introduction: Water vapor, as one of the most important greenhouse gases in the atmosphere, plays a key role in hydrological cycles, climate change, and the global climate. Many parameters for the expression of water vapor in the atmosphere have been proposed by meteorologists, one of which is Precipitable Water Vapor (PWV). There are many ground-based and space-based methods to measure PWV. Meanwhile, radiosonde is considered as one of the most common and traditional tools for measuring this parameter. However, low temporal resolution, high cost, and lack of uniform coverage across the globe are some of the limitations of this technique. In the last two decades, GPS Meteorology due to unique features such as usability in any weather conditions, long-term stability, continuous observations with very high resolution, low cost, and PWV estimation with an accuracy level of about 2 millimeters has received a lot of attention. Although radiosonde and GPS are precise methods for estimating water vapor in the atmosphere, their observations are limited to the land. While satellite remote sensing methods can provide continuous observations of the distribution of water vapor on a regional and global scale. MODIS is one of the sensors capable of measuring atmospheric water vapor measurements, which is onboard the Terra and Aqua satellites. However, PWV products obtained from remote sensing data should be evaluated with respect to the reliable in situ data before application. The main purpose of this study was to use PWV estimates obtained from ground-based GPS receivers in order to statistically evaluate the accuracy of MODIS water vapor products in IR and Near-IR bands and different times of the day over Iran.

Materials and Methods: The MODIS sensor, which is on board of the Terra and Aqua satellites, is able to provide water vapor products in the IR (both night and day) and Near-IR (day-only) bands. In order to evaluate MODIS PWV products over Iran, one year data of high temporal resolution GPS PWV values in 38 different stations in the country were considered as reliable values. For statistical analysis, water vapor values were extracted from the pixels with cloud-free conditions. Also, among the cloud-free pixels, that with the closest distance to the GPS station was selected. Moreover, the corresponding PWV values of GPS and MODIS with a maximum time difference of 10 minutes were selected for comparison.

Results and Discussion: Initially, Near-IR PWV products were assessed separately for Terra and Aqua satellite data. The results showed a good agreement between the two sets of PWV measurements. The correlation values between the GPS PWV and the corresponding values of the MODIS Near-IR products varied in the range of 0.90 to 0.98. Average bias values indicated that MODIS Near-IR overestimated PWV in comparison with GPS over Iran. In addition, a comparison of Near-IR water vapor values extracted from Terra and Aqua datasets separately showed that the data quality of both satellites in this band is almost at the same level in terms of the correlation coefficient, average bias, and RMSE. In the next step, the MODIS IR PWV products were evaluated separately during the day and night with respect to the corresponding values obtained at the GPS stations. The maximum correlation between GPS and IR PWV products during the day and night was 0.7 and 0.64, respectively. Furthermore, the average bias of MODIS IR PWV data in the study area for day and night was found to be -0.38 and 3.11 mm, respectively. In other words, MODIS IR PWV products in the study area had, on average, a positive bias with a small amount during the day and a significant negative bias during the night. On the other hand, a comparison of daytime MODIS IR and Near-IR water vapor products revealed that the quality of IR PWV data was significantly lower than the Near-IR band and requires a suitable calibration method.

Conclusion: The results of this study indicate that the MODIS Near-IR water vapor products had a high agreement with GPS PWV values with an average correlation coefficient of 0.95 in the study region. The mean bias and RMSE error of (GPS-MODIS Near-IR) PWV differences were -2.2 and 3.3 mm, respectively. A similar

1- Assistant Professor, Department of Surveying and Architecture Engineering, Faculty of Civil Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol

(*- Corresponding Author Email: ali.sam@nit.ac.ir)

2- M.Sc. Graduate, Remote Sensing, University of Tehran

DOI: DOI: 10.22067/jsw.v34i6.86574

analysis of MODIS Near-IR PWV data from the Terra and Aqua satellites showed that almost both sets of water vapor data had the same accuracy. The average bias values of the MODIS IR PWV data compared to the GPS PWV for day and night were also investigated. Results showed that in the study area, MODIS IR products had a small positive bias during the day and significant negative bias at night. Examining the efficiency of the daytime MODIS water vapor products during the day, we found that the accuracy and precision of these data in the Near-IR band are much better than the IR band. Therefore, proper calibration should be made before employing the IR band.

Keywords: GPS, IR band, MODIS, Near-IR band, PWV