

# مقایسه و اعتبارسنجی بخار آب به دست آمده از سنجنده مادیس و سانفتومتر با استفاده از مشاهدات GPS در سایت آثرون IASBS زنجان

اسلام جوادنیا<sup>۱\*</sup>، نسرین بیگی<sup>۲</sup>، سعید عباسی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده مهندسی - دانشگاه زنجان  
javadnia@znu.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی نقشه برداری، ژئودزی - دانشکده مهندسی - دانشگاه زنجان  
nasrin.beygi@znu.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری رشته مهندسی نقشه برداری، ژئودزی - گروه مهندسی ژئوماتیک - دانشکده عمران و حمل و نقل - دانشگاه اصفهان  
saeed\_abbasy@znu.ac.ir

تاریخ دریافت اسفند ۱۳۹۹، تاریخ تصویب خرداد ۱۴۰۰

## چکیده

بخار آب یکی از مهمترین گازهای گلخانه‌ای جو است که مقدار آن با زمان و مکان تغییر پیدا می‌کند. بنابراین بررسی تغییرات بخار آب در پیش‌بینی آب و هوا و مطالعات اقلیمی بسیار مؤثر می‌باشد. هدف اصلی در این تحقیق بررسی دقت داده‌های بخار آب سنجنده مادیس و سانفتومتر آثرون با استفاده از مقادیر برآورد شده از مشاهدات GPS در شهر زنجان می‌باشد. بدین ترتیب در این مقاله، محصول استاندارد سطح دو بخار آب مادیس (MOD05\_L2) به همراه داده‌های بخار آب سانفتومتر سایت آثرون دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان (IASBS) استخراج شدند و با مقادیر برآورد شده توسط ایستگاه GPS مستقر در همان سایت در بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳ مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند. نتایج حاصله نشان داد که GPS و آثرون مطابقت خوبی با هم دارند، بطوریکه ضریب تعیین ( $R^2$ ) حدود ۹۵ درصد، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)  $3/2$  میلی‌متر و میانگین خطای بایاس حدود  $2/2$  میلی‌متر بدست آمد. ارزیابی محصول بخار آب مادیس با استفاده از داده‌های زمینی GPS و آثرون نشان داد که بین محصول مادیس و GPS همبستگی نسبتاً بالاتری ( $R^2=0/92$ ) در مقایسه با محصول مادیس و آثرون ( $R^2=0/90$ ) وجود دارد. خطای RMSE و بایاس حاصل از ارزیابی داده‌های مادیس با GPS حدود ۲ تا  $2/5$  برابر کمتر از آثرون بدست آمد بطوریکه RMSE و بایاس بین داده‌های مادیس و GPS بترتیب  $2/76$  میلی‌متر و ۲ میلی‌متر می‌باشد. به‌طور کلی نتایج ارزیابی نشان داد که داده‌های بخار آب محصول استاندارد مادیس از دقت و صحت مناسبی در منطقه مورد مطالعه برخوردار هستند.

واژگان کلیدی: بخار آب، مادیس، آثرون، GPS

\* نویسنده رابط

## ۱- مقدمه

بخار آب از طریق جذب اشعه مادون قرمز تابش شده از سطح زمین، در تعادل تابشی زمین نقش مهمی ایفا می‌نماید. لذا عامل اصلی گرم شدن هوا در لایه‌های پایین جو محسوب می‌شود. علاوه بر این، مقدار بخار آب، نه تنها پارامتر مهمی در پیش بینی بارش و شرایط بد آب و هوایی است بلکه یک فاکتور اصلی در مطالعه و بررسی چرخه جهانی آب، تغییر اقلیم، گردش انرژی در سیستم زمین-جو و همچنین متغیری مهم در فرآیند محاسبه عمق نوری هواویز و دمای سطح به‌شمار می‌رود [۱-۳]. بنابراین تخمین دقیق مقدار بخار آب جو می‌تواند به پیش-بینی بارش کمک نماید و همچنین درک ما را از بسیاری از فرآیندهای بازخوردی در جو بهبود بخشد [۳].

معمولاً بخار آب با کمیت مقدار بخار آب قابل بارش<sup>۱</sup> (PWV) یا مقدار ستونی تجمعی بخار آب جو<sup>۲</sup> (I WV) بیان می‌شود و معادل میعان تمامی بخار آب در راستای ستونی جو و اندازه‌گیری ارتفاع آن در ظرفی با سطح مقطع واحد است و بر حسب واحد چگالی ستونی (گرم بر سانتی متر مربع) یا بر حسب واحد طول (ارتفاع) به میلی-متر بیان می‌شود [۴، ۵].

در چند دهه اخیر روش‌های سنجش از دوری مختلفی برای اندازه‌گیری IWV، هم از طریق سایت‌های زمینی و هم با استفاده از سکوی فضایی توسعه داده شده‌اند. از بین اندازه‌گیری‌های زمینی می‌توان به رادیومترهای میکروویو [۶]، سانفتومترها<sup>۳</sup> [۷]، رادیوسوندها<sup>۴</sup> [۸] و سیستم تعیین موقعیت جهانی<sup>۵</sup> (GPS) [۹] اشاره نمود. اندازه‌گیری‌های فضایی توسط ماهواره‌ها انجام می‌گیرد و اطلاعاتی از بخشهای مختلف طیف الکترومغناطیس از قبیل میکروویو، مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز را جمع آوری می‌نمایند.

رادیوسوند و GPS از جمله روش‌های قدرتمند برای اندازه‌گیری IWV هستند. محدودیت‌هایی از قبیل هزینه بالا، قدرت تفکیک زمانی پایین داده‌های رادیوسوند (یک تا دو داده در روز)، استفاده از این داده‌ها را در مطالعات اقلیمی و

اعتبارسنجی داده‌های ماهواره‌ای با مشکل مواجه می‌نماید [۵]. در مقابل، GPS اندازه‌گیری‌های با قدرت تفکیک زمانی بسیار بالا را فراهم می‌نماید [۴]. یکی دیگر از مزایای اصلی GPS مستقل بودن اندازه‌گیری‌های آن از شرایط آب و هوایی از قبیل ابرناکی یا بارش می‌باشد. بخار آب برآورد شده از اندازه‌گیری‌های GPS، در پژوهش‌های مختلفی مورد مطالعه و اعتبارسنجی قرار گرفته است، که می‌توان به مطالعات انجام شده توسط ونگ و همکاران [۱۰] (با رادیوسوند، رادیومتر میکروویو، داده‌های ماهواره‌ای)، بوکویه و همکاران [۱۱] (با رادیوسوند و رادیومتر)، پانی [۱۲] و هان [۱۳] (با مدل‌های عددی) اشاره کرد. تمامی پژوهش‌های ذکر شده، داده‌های GPS را به عنوان مرجع قابل اعتمادی با بایاس حدود ۲ میلی‌متر و انحراف معیار حدود ۱/۲۲ میلی‌متر مورد تأیید قرار دادند [۴، ۱۰]. به همین دلایل در تحقیق حاضر، از اندازه-گیری‌های GPS به عنوان مرجع اصلی برای اعتبارسنجی داده‌های ماهواره‌ای و مشاهدات زمینی استفاده شده است.

علیرغم مزایای اشاره شده، ایستگاه‌های GPS حال حاضر در دنیا، از پوشش مکانی مناسب برای نمایش تغییرات زیاد مکانی بخار آب برخوردار نیستند. برخی از کاربردها مانند پیش‌بینی آب و هوا و مطالعات اقلیمی داده‌های با قدرت تفکیک مکانی بالا در مقیاس جهانی را نیاز دارند. از این رو در چنین مواردی، مشاهدات ماهواره-ای می‌تواند بسیار مفید واقع گردند. هرچند که اندازه-گیری‌های ماهواره‌ای نیز دو مشکل اساسی دارند: اول اینکه بسیاری از مناطق بسته به عرض جغرافیایی منطقه و عرض برداشت ماهواره تنها یک یا دو بار در روز برداشت می‌شوند. دوم اینکه، ابرها محدوده طیفی مرئی و مادون قرمز نزدیک را کدر و مات می‌کنند و این باعث می‌شود که داده‌های IWV استخراج شده از سنجنده‌های ماهواره-ای در شرایط ابری قابل اعتماد نباشند [۱۴].

در دو دهه گذشته، تعدادی از سنجنده‌های ماهواره‌ای از جمله سنجنده‌های نوری (مانند اسپکتور رادیومتر تصویر بردار با قدرت تفکیک متوسط (مادیس)<sup>۶</sup>) و سنجنده‌های میکروویو (مانند رادیومتر جاروب کننده میکروویو پیشرفته (AMSR)<sup>۷</sup>) برای تخمین IWV مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۵-۲۰]. سنجنده مادیس مستقر بر ماهواره‌های ترا و

<sup>۱</sup> Precipitable Water Vapor

<sup>۲</sup> Integrated Water Vapor

<sup>۳</sup> Sun-photometers

<sup>۴</sup> Radiosondes

<sup>۵</sup> Global Position System

<sup>۶</sup> MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)

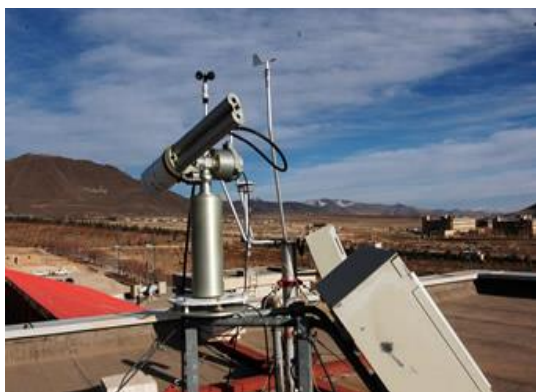
<sup>۷</sup> Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR)

## ۲- معرفی سایت‌های مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق، اندازه‌گیری‌های صورت‌گرفته توسط سانفتومتر سایت آثرون IASBS واقع در دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان و مشاهدات ایستگاه محلی GPS مستقر در این سایت، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند. شکل ۱-الف موقعیت سایت مطالعاتی و شکل‌های ۱-ب و ج دستگاه‌های سانفتومتر و GPS مستقر در این سایت را نشان می‌دهند.



الف



ب



ج

شکل ۱-الف- موقعیت مکانی سایت مطالعاتی، ب و ج- دستگاه‌های اندازه‌گیری واقع در این سایت بترتیب سانفتومتر و GPS

آکوا<sup>۱</sup>، IWW را بصورت زمانی و مکانی رصد می‌نماید. محصولات IWW این سنجنده، از اندازه‌گیری‌ها در محدوده مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز به‌دست می‌آیند. الگوریتم مادون قرمز IWW در محصولات MOD05 و MOD07 و الگوریتم مادون قرمز نزدیک IWW تنها در محصولات MOD05 بکار رفته است. روش به‌کار رفته در این الگوریتم‌ها، روش جذب تفاضلی است [۲۱-۲۳].

یکی دیگر از روش‌های اندازه‌گیری IWW با قدرت تفکیک زمانی بالا، به‌کارگیری سانفتومترهای زمینی هستند. طی دو دهه اخیر مطالعات زیادی درخصوص استفاده از سانفتومترها برای استخراج مقادیر IWW، انجام شده است. اساس بازیابی IWW در سانفتومترها، اندازه‌گیری در کانال جذبی بخار آب (۹۳۶ نانومتر) می‌باشد [۲۴]. تکنولوژی بازیابی IWW از طریق سانفتومترها در مقایسه با سایر روش‌های اندازه‌گیری IWW، از اعتبار و دقت بالایی برخوردار هستند [۱۱، ۲۵]. شبکه رباتیک هواویز ناسا (آثرون)، از طریق سانفتومترهای مدل CE-318، محصول دقیقی از IWW با قدرت تفکیک زمانی بالا را ارائه می‌نماید [۲۶].

پژوهش‌های انجام شده توسط محققان مختلف نشان داده است که دقت محصولات سنجنش از دوری در مناطق مختلف می‌تواند متفاوت باشد. لذا هدف از انجام تحقیق حاضر، ارزیابی کیفیت محصول IWW سنجنده مادیس و IWW بدست آمده از سانفتومتر آثرون، در منطقه زنجان است. در این تحقیق IWW استخراج شده از محصول MOD05 سنجنده مادیس در شرایط بدون ابر و همچنین داده‌ی IWW اندازه‌گیری شده توسط سانفتومتر در سایت آثرون دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان (IASBS)، با استفاده از داده‌های IWW برآورد شده از مشاهدات ایستگاه GPS مستقر در همان محل، مورد مقایسه و ارزیابی قرار می‌گیرند. از آنجا که نه تنها در منطقه زنجان بلکه در کل کشور هیچگاه سه نوع داده مختلف بخار آب بصورت همزمان برای مقایسه و ارزیابی مورد استفاده قرار نگرفته است، لذا هدف اصلی در این تحقیق بررسی کمی تفاوت بین داده‌های بخار آب ماهواره‌ای مادیس و مشاهدات سانفتومتر با داده‌های بخار آب به‌دست آمده از GPS می‌باشد. نتایج به‌دست آمده می‌تواند اطلاعات ما را در خصوص کیفیت و دقت داده‌های سنجنش از دوری بخار آب در شرایط آب و هوایی منطقه مورد مطالعه، افزایش دهد.

<sup>۱</sup> Terra and Aqua

### ۳- روش شناسی

در قسمت اول این بخش روش استخراج I WV از مشاهدات GPS، سپس نحوه بازیابی I WV با استفاده از الگوریتم بخار آب آثرون و در بخش سوم در خصوص سنجنده مادیس و استخراج I WV از الگوریتم مادون قرمز نزدیک توضیح داده می‌شود. در بخش پایانی، استراتژی مشخص مورد استفاده به منظور مقایسه بین داده‌های ماهواره‌ای و زمینی و شاخص‌های اعتبارسنجی بیان می‌گردند.

#### ۳-۱- برآورد I WV با استفاده از GPS

در تعیین موقعیت با GPS خطاهای گوناگونی سبب کاهش دقت می‌شوند. این خطاها را می‌توان به سه قسمت خطاهای ماهواره، مسیر سیر موج و گیرنده تقسیم کرد. از خطاهای ماهواره می‌توان به ساعت و مدار ماهواره اشاره کرد. در مسیر موج از ماهواره تا گیرنده نیز لایه‌های یونسفر<sup>۱</sup> و تروپوسفر<sup>۲</sup> باعث ایجاد خطا خواهند شد. از خطاهای لحظه‌ای دریافت نیز می‌توان به خطای ساعت گیرنده اشاره نمود [۲۸]. نحوه برخورد با این خطاها نیز با توجه به روش پردازش داده‌ها، محصولات خروجی مورد نیاز و دقت‌های آنها متفاوت است. بنابراین در مواجهه با این خطاها می‌توان رویکردهای مختلفی داشت: ۱) آنها را نادیده گرفت، ۲) برای کاهش خطا از مدل‌سازی یا محصولات دقیق ماهواره‌ای استفاده کرد، ۳) از روش‌های تفاضلی و ترکیبات خطی بین مشاهدات استفاده کرد و ۴) آنها را به عنوان مجهول برآورد کرد [۲۸]. در این تحقیق از روش تعیین موقعیت مطلق دقیق<sup>۳</sup> (PPP) برای پردازش مشاهدات استفاده شده است. در این رویکرد با استفاده از تنها یک گیرنده و با انجام مشاهدات طولانی، تعیین موقعیت انجام می‌شود. بنابراین خطاهایی که در روش‌های معمول تعیین موقعیت نسبی با تفاضل بین مشاهدات دو ایستگاه کاهش پیدا می‌کنند، در اینجا حائز اهمیت خواهند بود. از این رو برای مقابله با خطاهای ساعت و موقعیت ماهواره از محصولات دقیق ساعت و مدار ماهواره استفاده می‌شود. این محصولات توسط IGS<sup>۴</sup> منتشر می‌شود. برای کاهش خطای یونسفر نیز از ترکیب یونسفر آزاد

سانفتومتر مدل CE-318 سایت IASBS یکی از ۴۰۰ سانفتومتر سایت شبکه جهانی آثرون است که از طریق اندازه‌گیری نور مستقیم و غیرمستقیم خورشیدی، امکان مطالعه ویژگی‌های هواویزها و بخار آب را فراهم می‌نماید. آثرون خصوصیات طیفی هواویز و I WV را در سه سطح کیفیت ارائه می‌دهد: سطح ۱ (داده‌های خام)، سطح ۱/۵ (حذف اثر ابر و کنترل کیفیت) و سطح ۲ (حذف اثر ابر و تضمین کیفیت) [۲۶]. این داده‌ها را می‌توان از وبسایت آثرون دانلود نمود ([www.aeronet.gsfc.nasa.gov](http://www.aeronet.gsfc.nasa.gov)). داده‌های I WV آثرون به کار رفته در این مقاله، از سایت IASBS (۳۶/۷۰۵ درجه شمالی، ۴۸/۵۰۷ درجه شرقی) که توسط دانشکده فیزیک دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان در سال ۲۰۰۹ دایر شده است، به دست آمدند. در تحقیق حاضر، داده‌های سطح دوم سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳ برای مقایسه با داده‌های دیگر مورد استفاده قرار گرفتند. در اواخر سال ۲۰۱۰ میلادی یک ایستگاه دائم GPS بر روی پشت بام دانشکده فیزیک این دانشگاه و در مجاورت سایت آثرون ایجاد شد. هدف از ایجاد این ایستگاه، مقاصد هواشناسی بود. این ایستگاه مجهز به گیرنده‌ی دو فرکانسه از نوع Trimble 5700 II است [۲۷]. محصولات بخار آب جمع‌آوری شده توسط این گیرنده در بازه زمانی اول ژانویه ۲۰۱۱ تا جولای ۲۰۱۴ و با فاصله زمانی یک دقیقه است. دستگاه سانفتومتر سایت آثرون در بازه زمانی اول ژانویه ۲۰۱۴ تا جولای ۲۰۱۴، بدلیل ارسال برای کالیبراسیون دستگاه، داده‌ی اندازه‌گیری نکرده است، لذا مشاهدات GPS در بازه زمانی اول ژانویه ۲۰۱۱ تا دسامبر ۲۰۱۳ در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند. علاوه بر دو سایت مطالعاتی ذکر شده، به منظور برآورد I WV از مشاهدات GPS، نیاز به داده فشار سطحی بود که از داده‌های هواشناسی ایستگاه علوم پایه زنجان کمک گرفته شد. داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در این تحقیق، محصول سطح دو بخار آب سنجنده مادیس (MOD05-L2) است که از الگوریتم مادون قرمز نزدیک استخراج می‌شوند. داده‌های سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳ از سایت <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov> دانلود شده و مورد استفاده قرار گرفتند. این محصول دارای قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر می‌باشد و فرمت آنها از نوع HDF، نسخه‌ی دو است.

<sup>۱</sup> Ionosphere

<sup>۲</sup> Troposphere

<sup>۳</sup> Precise Point Positioning

<sup>۴</sup> International GNSS Service

در این رابطه  $N$  تعداد لایه‌های تروپوسفر است.  $T$  دمای تروپوسفر (با واحد کلونین)،  $z$  فاصله در جهت عمودی و  $P_v$  فشار جزئی بخار آب (هکتوپاسکال) است. برای استفاده از این رابطه و محاسبه دمای میانگین تروپوسفر از داده‌های ERA-Interim استفاده شد. این محصولات توسط مرکز اروپایی پیش‌بینی متوسط مدت آب و هوا (ECMWF)<sup>۵</sup> منتشر می‌شود و از <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=pl/> در دسترس قرار می‌گیرد. در مورد جزئیات استفاده از رابطه (۴) می‌توان به عباسی و همکاران [۲۷] مراجعه کرد.

### ۳-۲- استخراج I WV از داده‌های سانفتومتر آثرون

آثرون شبکه‌ای متشکل از سانفتومترهای مدل CE-318 در سراسر کره زمین می‌باشد که در ابتدا به منظور مطالعه ویژگی‌های اپتیکی و میکروفیزیکی هواویزها تأسیس گردید [۲۶، ۳۲]. داده‌های بخار آب I WV نیز از اندازه‌گیری‌های این شبکه به دست آمده‌اند. سانفتومتر CE-318، تابش مستقیم خورشیدی را در چندین کانال طیفی از ۳۴۰ تا ۱۶۴۰ نانومتر (۳۴۰، ۳۸۰، ۴۴۰، ۵۰۰، ۶۷۵، ۸۷۰، ۱۰۲۰ و ۱۶۴۰ نانومتر) و یک باند جذبی بخار آب (۹۳۶ نانومتر) اندازه‌گیری می‌نماید. الگوریتم بخار آب آثرون با استفاده از قانون تضعیف بوگر-لامبرت-بیر<sup>۶</sup> و ضریب عبور مدل شده بخار آب در باند جذبی (۰/۹۴۰ میکرومتر)، مقادیر I WV را بازیابی می‌نماید [۳۳، ۳۴]. رابطه (۶) خروجی ولتاژ دستگاه  $V(\lambda)$  در باند جذبی را بیان می‌کند [۳۵]:

$$V(\lambda) = V_0(\lambda) \cdot d^{-2} \cdot \exp[-m \cdot \tau(\lambda)] T_w(\lambda) \quad (6)$$

$$T_w(\lambda) = \exp[-a \cdot (m_w \cdot W)^b]$$

که  $V_0$  ثابت کالیبراسیون دستگاه،  $d$  فاصله نسبی زمین-خورشید در واحد نجومی (AU)،  $m$  توده نسبی هوا (بدون بخار آب)،  $\tau$  عمق نوری کل (گازها و هواویز)،  $m_w$  توده هوای بخار آب است. بخار آب با استفاده از معادله ضریب عبور مدل شده بخار آب ( $T_w$ ) و از طریق سه پارامتر بیان شده در این معادله بازیابی می‌گردد. ضرایب  $a$

مشاهدات کد و فاز استفاده می‌شود. خطای تروپوسفر و ساعت گیرنده نیز به عنوان مجهول برآورد می‌شوند. بنابراین موقعیت ایستگاه، تأخیر تروپوسفری زینتی (ZTD)<sup>۱</sup> و خطای ساعت گیرنده خروجی‌های این روش هستند.

لذا مقادیر I WV به کمک داده های ZTD به روش زیر محاسبه گردید:

تأخیر تروپوسفری زینتی را می‌توان به دو بخش تأخیر تروپوسفری زینتی خشک (ZHD)<sup>۲</sup> و تر (ZWD)<sup>۳</sup> تقسیم کرد (رابطه ۱). قسمت خشک ناشی از گازهای خشک تروپوسفر و قسمت تر ناشی از بخار آب است.

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (1)$$

قسمت خشک را می‌توان با استفاده از مولفه خشک مدل تأخیر تروپوسفری سااستاموینن<sup>۴</sup> به دست آورد (رابطه ۲) [۲۹]:

$$ZHD = \frac{0.002277}{g'} P_0 \quad (2)$$

که در آن:

$$g' = 1 - 0.0026 \cos 2\varphi - 0.00028 h_0 \quad (3)$$

در این معادلات  $g'$  شتاب استاندارد با واحد متر بر مجذور ثانیه است.  $\varphi$  عرض ژئودتیک،  $h_0$  ارتفاع ایستگاه (کیلومتر) و  $P_0$  فشار سطحی ایستگاه (هکتوپاسکال) است. به گفته آندری و چن (۲۰۰۹) این معادلات بالاترین دقت را در محاسبه تأخیر تروپوسفری زینتی خشک دارند [۲۹]. در مرحله بعد با استفاده از ضریب تبدیل  $Q$  (رابطه ۴) می‌توان ZWD را به I WV تبدیل کرد [۳۰]:

$$Q = \frac{ZWD}{PWV} = \rho_w \frac{R}{M_{wv}} \left( k'_2 + \frac{k_3}{T_m} \right) 10^{-6} \quad (4)$$

در این معادله  $k'_2 = 22.1 K \cdot hPa^{-1}$  و  $k_3 = 370100 K^2 \cdot hPa^{-1}$  ضرایب ثابت هستند.  $\rho_w$ ،  $M_{wv}$  و  $R$  به ترتیب چگالی آب، جرم مولی بخار آب و ثابت جهانی گازها هستند.  $T_m$  نیز دمای میانگین تروپوسفر است که از رابطه (۵) به دست می‌آید [۳۱]:

$$T_m \equiv \frac{\int \frac{P_v}{T} dz}{\int \frac{P_v}{T^2} dz} \approx \frac{\sum_{i=1}^N \frac{P_{v_i}}{T_i} \Delta z_i}{\sum_{i=1}^N \frac{P_{v_i}}{T_i^2} \Delta z_i} \quad (5)$$

<sup>۱</sup> Zenith Tropospheric Delay

<sup>۲</sup> Zenith Hydrostatic Delay

<sup>۳</sup> Zenith Wet Delay

<sup>۴</sup> Saastamoinen

<sup>۵</sup> European Center for Medium-Range Weather Forecasts

<sup>۶</sup> Beer-Lambert-Bouguer

و b با استفاده از روش IPC [۳۶] و با توجه به طراحی دستگاه از قبیل توابع پاسخ فیلتر، مدل سازی می گردند. تصحیح اثر هواویز در طول موج ۰/۹۴۰ میکرومتر از طریق برون یابی آنگستروم در محدوده طیفی ۰/۸۷۰-۰/۴۴۰ میکرومتر انجام می شود. گزارش ها نشان داده که کل خطای سیستماتیک دستگاه، می تواند منجر به عدم قطعیت حدود  $\pm 10\%$  درصد در محصول I WV گردد [۳۷].

### ۳-۳- استخراج I WV از داده های سنجنده مادیس ماهواره ترا

مادیس یک اسپکترورادیومتر جاروب کننده سنجنش از دوری با قدرت تفکیک مکانی بالا (بالاترین مقدار آن ۲۵۰ متر) و عرض گذر وسیع (۲۳۳۰ کیلومتر) می باشد. مادیس از طریق ۳۶ باند طیفی که از ۰/۴۱۲ (مرئی) تا ۱۴/۲۳۵ میکرومتر (مادون قرمز حرارتی) را شامل می شود، محدوده وسیعی از طیف الکترومغناطیس را پوشش می دهد. داده های مادیس به دلیل دقت بالا، کیفیت تضمین شده و پوشش جهانی خوبی که دارند در چند دهه اخیر بسیار مورد استفاده قرار گرفته اند. الگوریتم مورد استفاده برای برآورد محصول بخار آب مادون قرمز نزدیک مادیس (MODIS-NIR) از طریق نسبت بین سه باند جذبی بخار آب به مرکزیت حدود ۰/۹۰۵، ۰/۹۳۶ و ۰/۹۳۰ میکرومتر و دو باند روزنه جوی (غیر جذبی) به مرکزیت ۰/۸۶۵ و ۱/۲۴ میکرومتر، می باشد [۳۸]. جزئیات بیشتر از این الگوریتم که بر پایه تکنیک های تفاضلی می باشد، توسط گائو و کافمن [۳۸] منتشر شده است. عدم قطعیت محصول بخار آب، الگوریتم MODIS-NIR حدود ۵ تا ۱۰ درصد گزارش شده است [۳۸].

### ۳-۳-۱- پیش پردازش داده های سنجنده مادیس

پیش پردازش این داده ها به کمک افزونه مادیس کانورشن تولکیت (MCT) <sup>۱</sup> و در محیط نرم افزاری انوی (ENVI) صورت گرفت، ابتدا این داده ها با استفاده از تصحیحات هندسی، زمین مرجع شده و سپس با توجه به اینکه این نوع داده ها در حقیقت متشکل از مجموعه داده ها هستند، پارامتر مورد نظر در این تحقیق یعنی بخار آب قابل بارش به دست آمده از الگوریتم مادون قرمز نزدیک بر حسب سانتی متر، استخراج گردید. بدین منظور علاوه بر استفاده از

امکانات نرم افزار انوی، برای راستی آزمایی نتایج نرم افزار، از کد Matlab ارائه شده توسط ناسا نیز پس از بازبینی و اصلاحات مورد نیاز، استفاده گردید.

### ۴- معیارهای مقایسه و تحلیل اعتبارسنجی:

به منظور مقایسه بین داده های ماهواره ای و زمینی، نیاز است تا یک استراتژی مشخصی برای تطبیق داده ها در یک پنجره مکانی و زمانی، در نظر گرفته شود. در این مطالعه داده I WV به دست آمده از محصول مادیس برای پنجره مکانی ۳×۳ پیکسل (هر پیکسل ۱ کیلومتر) به مرکزیت سایت زمینی میانگین گیری شد و I WV میانگین گیری شده از داده ماهواره ای، با نزدیکترین داده زمینی از لحاظ زمانی، مورد مقایسه قرار گرفت. تعداد جفت داده ها در هر مقایسه بستگی به در دسترس بودن داده آئرونت و همچنین به داده ماهواره ای باز یابی شده در شرایط بدون ابر دارد. برای بررسی شرایط بدون ابر سایت مورد مطالعه در ابتدا از محصول دمای سطح زمین (LST) <sup>۲</sup> مادیس استفاده شد، در نهایت برای اطمینان بیشتر، تصویر ماهواره ای ترکیب رنگ حقیقی سایت [www.worldview.earthdata.nasa.gov](http://www.worldview.earthdata.nasa.gov) بصورت بصری برای بررسی شرایط ابر منطقه مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است که پیکسل های محصول LST مادیس تنها برای روزهای ابری مقدار دارد.

برای تحلیل ارزیابی های صورت گرفته، از شاخص های آماری مرسوم از قبیل ضریب تعیین ( $R^2$ )، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و میانگین بایاس که در رابطه های ۷، ۸ و ۹ ارائه شده است، استفاده گردید.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (I WV_S - \overline{I WV_S})(I WV_G - \overline{I WV_G})}{\sum_{i=1}^n (I WV_S - \overline{I WV_S})^2 \sum_{i=1}^n (I WV_G - \overline{I WV_G})^2} \quad (7)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I WV_S - I WV_G)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I WV_S - I WV_G) \quad (9)$$

که  $I WV_S$  مقدار بخار آب استخراج شده از داده ماهواره ای و  $I WV_G$  مقدار بخار آب اندازه گیری شده توسط دستگاه های زمینی از قبیل GPS و سانفتومتر می باشد.  $\overline{I WV_S}$  و  $\overline{I WV_G}$  میانگین  $I WV_S$  و  $I WV_G$  هستند.

<sup>۲</sup> Land Surface Temperature

<sup>۱</sup> MODIS Conversion Toolkit



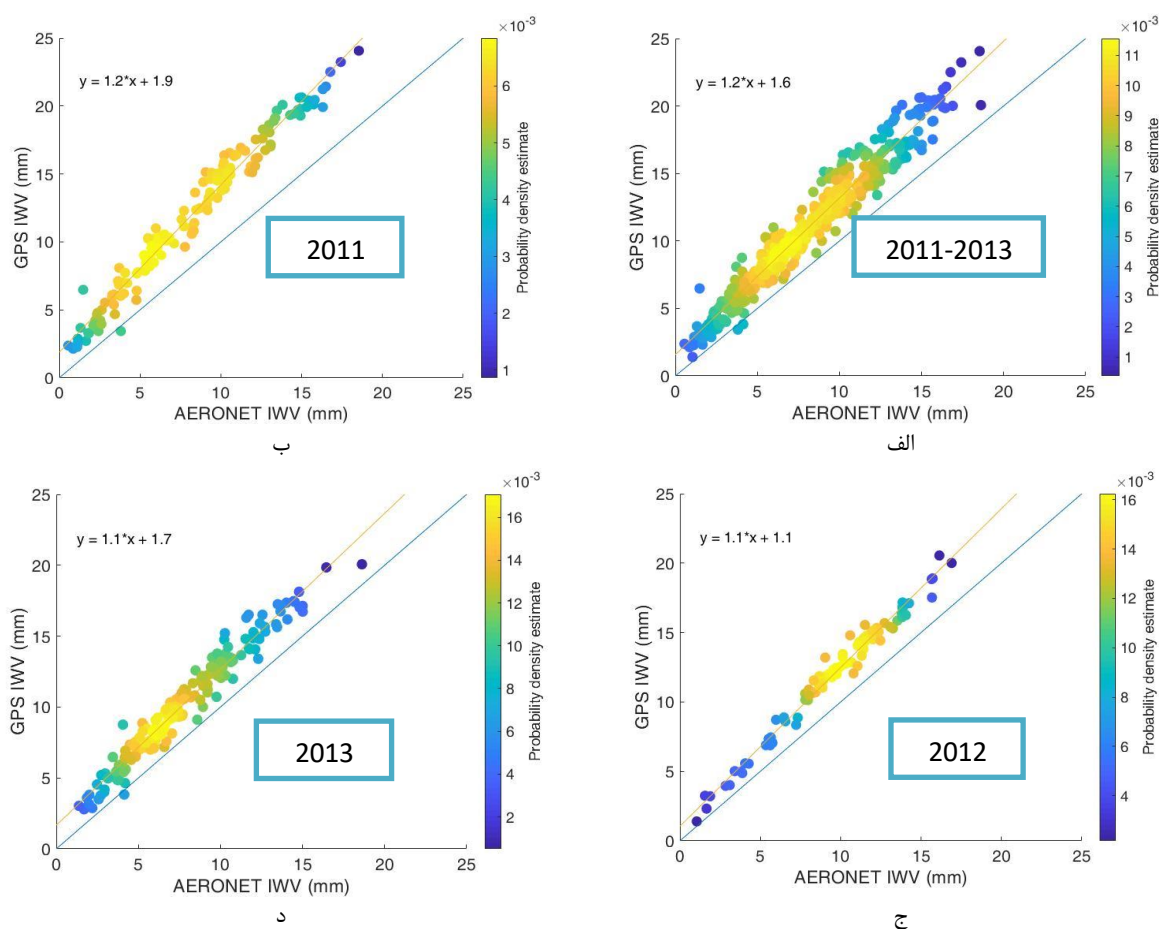
## ۵- تجزیه و تحلیل نتایج

در این بخش ابتدا مقادیر بخار آب به دست آمده توسط دستگاه‌های زمینی سانفتومتر و GPS با هم مقایسه شده و به کمک پارامترهای آماری مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرند. سپس مقادیر IWV استخراج شده از محصول ماهواره‌ای مادیس یک بار با مقادیر برآورد شده از مشاهدات GPS و بار دیگر با مقادیر متناظر بازیابی شده از اندازه‌گیری‌های سانفتومتر مورد مقایسه و اعتبارسنجی قرار می‌گیرند.

### ۵-۱- اعتبارسنجی IWV استخراج شده از آثرونیت با GPS

داده‌های IWV به دست آمده از سانفتومتر آثرونیت و GPS در ایستگاه IASBS شهر زنجان برای دوره‌ی زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳، همبستگی خوبی را نشان دادند (شکل ۲- الف) بطوریکه برای ۳۹۸ جفت داده ضریب تعیین  $R^2$  حدود

۰/۹۵ و مقدار خطای RMSE ۳/۱۸ میلیمتر بدست آمد. داده‌های بخار آب آثرونیت، بایاسی حدود ۲/۹۱ میلیمتر را در طول ۳ سال نشان دادند. نتایج به دست آمده بیانگر این است که داده‌های آثرونیت با IWV مستخرج از GPS مطابقت خوبی دارند و دقت داده‌های آثرونیت قابل قبول است. با این وجود بایاس به دست آمده نشان می‌دهد که سانفتومتر آثرونیت، مقادیر بخار آب را به میزان حدود ۳ میلیمتر کمتر از مقدار واقعی برآورد نموده است. نتایج به دست آمده به تفکیک هر سال نیز همبستگی خوبی را بین داده‌های GPS و آثرونیت نشان داد (شکل ۲-ب-د) بطوریکه  $R^2$  بترتیب ۰/۹۷، ۰/۹۷، ۰/۹۵ برای سالهای ۲۰۱۱، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ بدست آمد. مقدار خطای RMSE بترتیب ۴/۰۳، ۲/۵۴ و ۲/۶۰ میلیمتر و بایاس داده‌های بخار آب آثرونیت ۳/۷۸، ۲/۴۱ و ۲/۴۳ میلیمتر بود. بطور کلی داده‌های آثرونیت از دقت و صحت خوبی برخوردار هستند. خلاصه آماری این مقایسه در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۲- نمودار پراکنده‌گی و تخمین چگالی احتمال بخار آب قابل بارش (IWV) برآورد شده از مشاهدات GPS در مقایسه با مقادیر بازیابی شده IWV از اندازه‌گیری‌های سانفتومتر در سایت آثرونیت IASBS شهر زنجان برای دوره‌ی زمانی الف- ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳، ب- ۲۰۱۱، ج- ۲۰۱۲ و د- ۲۰۱۳. مقیاس رنگی نشان دهنده چگالی احتمال نقاط می باشد

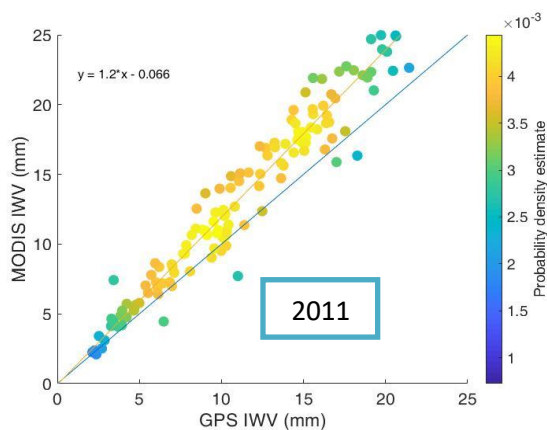
جدول ۱- خلاصه آماری مقایسه بین داده‌های بخار آب برآورد شده به کمک مشاهدات GPS و بازیابی شده از اندازه گیری‌های سانفتومتر در سایت آثرون IASBS زنجان

دوره زمانی	R <sup>2</sup>	RMSE (میلیمتر)	بایاس (GPS-AERONET) (میلیمتر)
۲۰۱۱	۰/۹۷	۴/۰۳	۳/۷۸
۲۰۱۲	۰/۹۷	۲/۵۴	۲/۴۱
۲۰۱۳	۰/۹۵	۲/۶۰	۲/۴۳
۲۰۱۳-۲۰۱۱	۰/۹۵	۳/۱۸	۲/۹۱

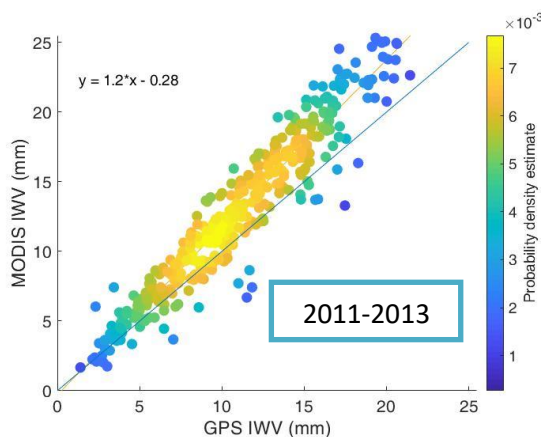
است. شکل ۳-ب تا د مقایسه بین داده‌های بخار آب مادیس و GPS را به تفکیک هر سال نشان می‌دهد. مقدار R<sup>2</sup>، ۰/۹۵، ۰/۹۱ و ۰/۸۷ به ترتیب برای سال‌های ۲۰۱۱، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ می‌باشد. دقت محصول بخار آب مادیس (RMSE) برای سال‌های مذکور به ترتیب ۳، ۲/۷۲ و ۲/۶۰ میلی‌متر است و میانگین خطای بایاس (MODIS-GPS) نیز به ترتیب ۲/۳۱، ۲/۱۶ و ۱/۶۰ میلی‌متر بدست آمد. خلاصه آماری این مقایسه در جدول ۲ آورده شده است.

### ۵-۲- اعتبارسنجی IWV بدست آمده از مادیس با GPS

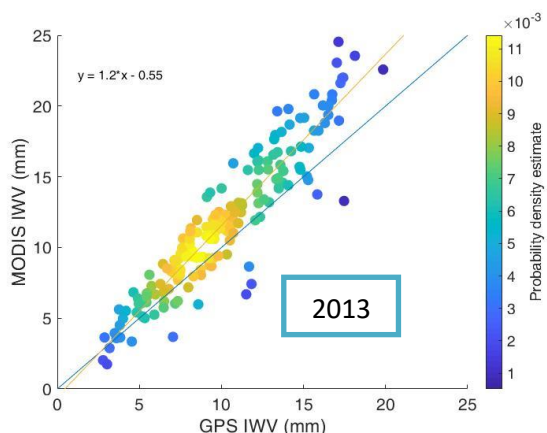
بخار آب مادیس همبستگی خوبی را با داده‌های متناظر GPS در سایت آثرون IASBS برای دوره زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳ نشان داد (شکل ۳-الف)، به طوری که ضریب تعیین ۰/۹۲ و مقدار خطای RMSE داده‌های بخار آب مادیس ۲/۷۶ میلی‌متر می‌باشد. بایاس محصول بخار آب مادیس حدود ۲ میلی‌متر می‌باشد که نشان دهنده بالا برآورد نمودن مقادیر IWV توسط مادیس مخصوصاً برای مقادیر بالای بخار آب



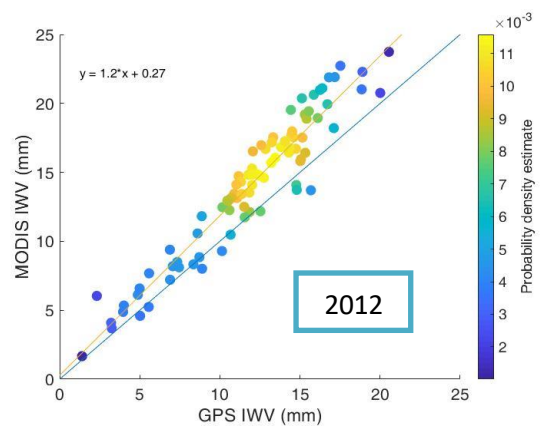
ب



الف



د



ج

شکل ۳- نمودار پراکندگی و تخمین چگالی احتمال بخار آب قابل بارش (IWV) استخراج شده از محصول مادون قرمز نزدیک مادیس در مقایسه با مقادیر بازیابی شده از اندازه گیری‌های سانفتومتر در سایت آثرون IASBS شهر زنجان برای دوره زمانی الف- ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳، ب- ۲۰۱۱، ج- ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳. مقیاس رنگی نشان دهنده چگالی احتمال نقاط می‌باشد



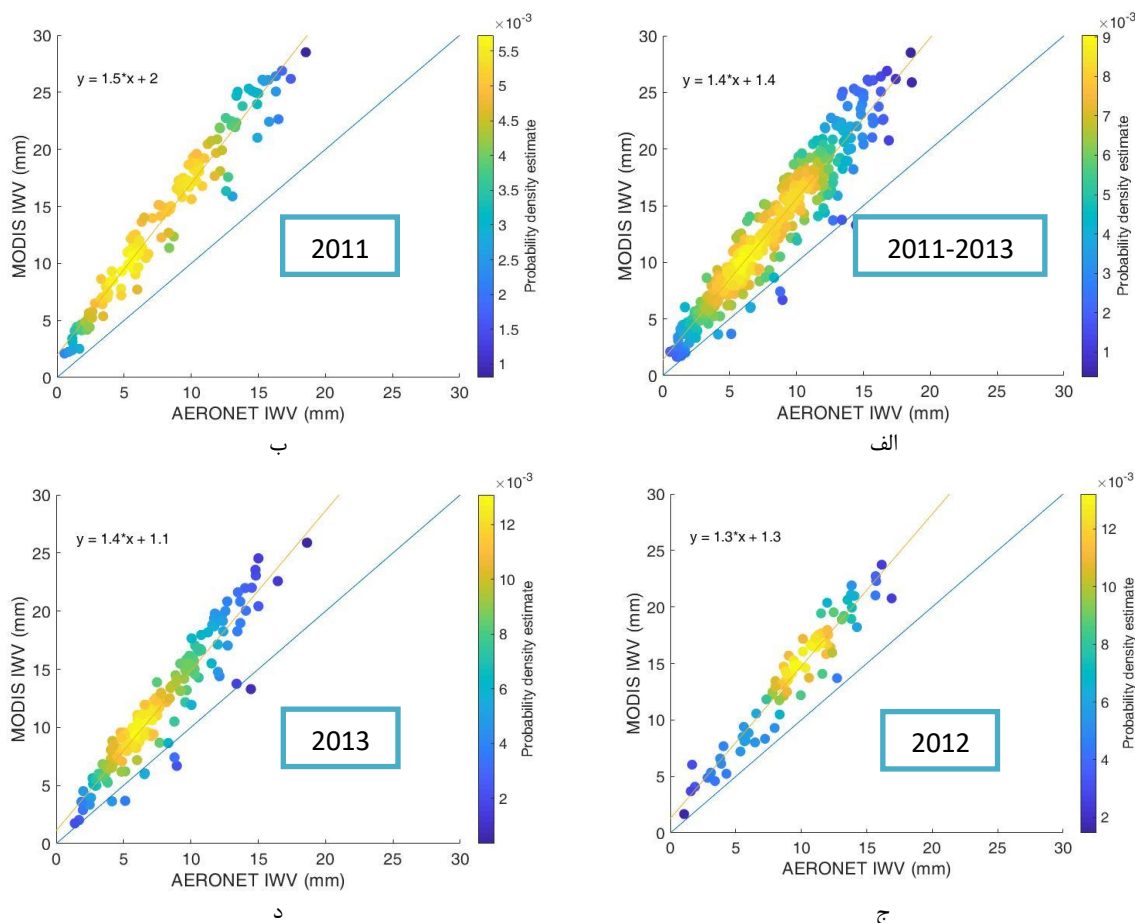
جدول ۲- خلاصه آماری مقایسه بین داده‌های بخار آب استخراج شده از محصول مادون قرمز نزدیک مادیس و مقدار برآورد شده به کمک مشاهدات GPS در سایت IASBS زنجان

دوره زمانی	R <sup>2</sup>	RMSE (میلیمتر)	بایاس (MODIS-GPS) (میلیمتر)
۲۰۱۱	۰/۹۵	۳	۲/۳۱
۲۰۱۲	۰/۹۱	۲/۷۲	۲/۱۶
۲۰۱۳	۰/۸۷	۲/۶۰	۱/۶۰
۲۰۱۳-۲۰۱۱	۰/۹۲	۲/۷۶	۲

میلیمتر برای کل دوره زمانی (۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳) به دست آمد مقدار این خطا در مقایسه با ارزیابی که با GPS انجام شد، حدود ۲/۵ برابر بیشتر است. مقدار خطای بایاس ۶/۰۹، ۴/۵۷ و ۴/۰۴ میلیمتر بترتیب برای سالهای ۲۰۱۱، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ می‌باشد. مقدار خطای RMSE نیز نسبتاً بالا می‌باشد (۵/۴۸ میلیمتر) برای کل دوره زمانی و برای هر سال بصورت مجزا نیز مقدار خطای RMSE بترتیب ۶/۶۵، ۴/۹۵ و ۴/۵۸ میلیمتر به دست آمد.

### ۵-۳- مقایسه IWV به دست آمده از مادیس با آثرون

بخار آب اندازه گیری شده توسط سانفتومتر و محصول بخار آب مادیس در سایت آثرون IASBS برای دوره زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳ مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند (شکل ۴ و جدول ۳). محصول بخار آب مادیس همانند مقایسه با GPS، همبستگی خوبی را با آثرون نشان می‌دهد ( $R^2=0/90$ ). میانگین خطای بایاس حدود ۴/۸۸



شکل ۴- نمودار پراکندگی و تخمین چگالی احتمال بخار آب قابل بارش (IWV) استخراج شده از محصول مادون قرمز نزدیک مادیس در مقایسه با مقادیر بازیابی شده IWV از اندازه گیری‌های سانفتومتر در سایت آثرون IASBS شهر زنجان برای دوره زمانی الف- ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳، ب- ۲۰۱۱، ج- ۲۰۱۲ و د- ۲۰۱۳. مقیاس رنگی نشان دهنده چگالی احتمال نقاط می باشد

جدول ۳- خلاصه آماری مقایسه بین داده های بخار آب استخراج شده از محصول مادون قرمز نزدیک مادیس و مقدار بازیابی شده از اندازه گیریهای سانفتومتر در سایت آثرونِت IASBS زنجان

دوره زمانی	R <sup>2</sup>	RMSE (میلیمتر)	بایاس (MODIS-AERONET) (میلیمتر)
۲۰۱۱	۰/۹۵	۶/۶۵	۶/۰۹
۲۰۱۲	۰/۹۲	۴/۹۵	۴/۵۷
۲۰۱۳	۰/۸۸	۴/۵۸	۴/۰۴
۲۰۱۳-۲۰۱۱	۰/۹۰	۵/۴۸	۴/۸۸

#### ۵-۴- مقایسه با تحقیقات پیشین

است که در مجاورت سایت آثرونِت قرار دارد. به جز مطالعه‌ای که درخصوص ارزیابی محصول استاندارد مادیس با داده‌های رایوسوند در شمال غرب ایران صورت گرفته است [۴۰]، تحقیق حاضر اولین مطالعه در ایران است که از دو نوع داده زمینی مختلف بخار آب به منظور مقایسه و ارزیابی داده ماهواره‌ای بهره می‌برد.

نتایج بدست آمده نشان داد که بین داده‌های بخار آب سانفتومتر و GPS مطابقت خوبی وجود دارد بطوریکه ضریب تعیین، ۰/۹۵ و خطای RMSE حدود ۳ میلیمتر بدست آمد. سانفتومتر آثرونِت مقادیر بخار آب را بطور میانگین حدود ۳ میلیمتر کمتر از GPS برآورد می‌نماید که مقدار این خطا برای مقادیر بیشتر از ۱۵ میلیمتر کمی بیشتر است. بطور کلی می‌توان گفت که GPS و آثرونِت می‌توانند برای اعتبارسنجی مقادیر بخار آب بدست آمده از ماهواره‌ها استفاده گردند.

نتایج کلی بدست آمده از اعتبارسنجی بخار آب بدست آمده از مادیس با داده های GPS ضریب تعیین ۰/۹۲، خطای RMSE ۲/۷۶ میلیمتر و بایاس ۲ میلیمتر و با داده‌های آثرونِت ضریب تعیین ۰/۹۰، خطای RMSE ۵/۴۸ میلیمتر و بایاس ۴/۸۸ میلیمتر را نشان داد. خطای RMSE و بایاس نسبتاً بالای بین داده‌های مادیس و آثرونِت در مقایسه با داده‌های GPS، می‌تواند بدلیل وجود خطا در فرآیند اندازه‌گیری دستگاه سانفتومتر و همچنین عدم قطعیت ناشی از الگوریتم مورد استفاده در بازیابی بخار آب توسط آثرونِت باشد [۳۷]. در مجموع، محصول بخار آب مادیس مطابقت خوبی با داده‌های زمینی اندازه‌گیری شده در سایت IASBS در بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳ داشت و خطای RMSE و بایاس محاسبه شده نیز نشان داد که محصول مادیس از دقت و صحت مناسبی در منطقه مورد مطالعه برخوردار بود.

مطالعات مختلفی درخصوص اعتبارسنجی داده های بخار آب آثرونِت و بخار آب بدست آمده از محصول مادون قرمز نزدیک مادیس به کمک مشاهدات GPS در مناطق مختلف دنیا انجام گرفته است. پراساد و سینگ [۳۹] بخار آب آثرونِت و مادیس را در سایت کانپور کشور هند مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج بدست آمده برای آثرونِت R<sup>2</sup> ۰/۹۵، خطای RMSE برابر ۳/۸۷ میلیمتر و بایاس ۲/۶۳ میلیمتر را نشان داد که بسیار نزدیک مقادیر بدست آمده در تحقیق حاضر است. مقادیر آماری حاصل از اعتبارسنجی محصول مادیس، R<sup>2</sup> ۰/۹۱، RMSE ۶/۶۷ میلی‌متر و بایاس ۶/۵۸ میلیمتر را به دست داد. گوبی و همکاران [۵] بخار آب آثرونِت را در سایت بیجینگ و بخار آب مادیس را در شش سایت کشور چین مورد ارزیابی قرار دادند. مقادیر حاصل از اعتبارسنجی بخار آب آثرونِت R<sup>2</sup> ۰/۹۷، خطای RMSE و بایاس بترتیب ۲/۵۳ و ۰/۰۹ میلیمتر را نشان داد. اعتبارسنجی محصول مادیس نیز R<sup>2</sup> ۰/۸۸، خطای RMSE و بایاس بترتیب ۵/۷۶ و ۱/۵ میلی‌متر را به دست داد.

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، محصول استاندارد سطح دو بخار آب مادیس (MOD05\_L2) و بخار آب بازیابی شده از اندازه‌گیری‌های سانفتومتر با استفاده از مقادیر برآورد شده توسط مشاهدات GPS در سایت آثرونِت مستقر در دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان (IASBS) مورد مقایسه و اعتبارسنجی قرار گرفتند. در مجاورت سایت آثرونِت یک ایستگاه GPS نیز راه‌اندازی گردید و داده‌های اندازه‌گیری شده در بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳ به منظور اعتبارسنجی استفاده گردید. لذا در این تحقیق، اندازه‌گیری‌های زمینی شامل مشاهدات بخار آب سانفتومتر سایت آثرونِت و مقادیر برآورد شده بخار آب از اندازه‌گیری‌های ایستگاه GPS ای

- [1] Solomon, S., et al., Contributions of stratospheric water vapor to decadal changes in the rate of global warming. *Science*, 2010. 327(5970): p. 1219-1223.
- [2] Wagner, T., et al., Global trends (1996–2003) of total column precipitable water observed by Global Ozone Monitoring Experiment (GOME) on ERS-2 and their relation to near-surface temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006. 111(D12).
- [3] Held, I.M. and B.J. Soden, Water vapor feedback and global warming. *Annual review of energy and the environment*, 2000. 25(1): p. 441-475.
- [4] Vaquero-Martínez, J., et al., Validation of integrated water vapor from OMI satellite instrument against reference GPS data at the Iberian Peninsula. *Science of the Total Environment*, 2017. 580: p. 857-864.
- [5] Gui, K., et al., Evaluation of radiosonde, MODIS-NIR-Clear, and AERONET precipitable water vapor using IGS ground-based GPS measurements over China. *Atmospheric Research*, 2017. 197: p. 461-473.
- [6] Turner, D.D., et al., Retrieving Liquid Water Path and Precipitable Water Vapor From the Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Microwave Radiometers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007. 45(11): p. 3680-3690.
- [7] Ichoku, C., et al., Analysis of the performance characteristics of the five-channel Microtops II Sun photometer for measuring aerosol optical thickness and precipitable water vapor. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002. 107(D13): p. AAC 5-1-AAC 5-17.
- [8] Durre, I., R.S. Vose, and D.B. Wuertz, Overview of the integrated global radiosonde archive. *Journal of Climate*, 2006. 19(1): p. 53-68.
- [9] Bevis, M., et al., GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1992. 97(D14): p. 15787-15801.
- [10] Wang, J., et al., A near-global, 2-hourly data set of atmospheric precipitable water from ground-based GPS measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007. 112(D11).
- [11] Bokoye, A., et al., Multisensor analysis of integrated atmospheric water vapor over Canada and Alaska. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003. 108(D15).
- [12] Pany, T., P. Peseck, and G. Stangl, Atmospheric GPS slant path delays and ray tracing through numerical weather models, a comparison. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 2001. 26(3): p. 183-188.
- [13] De Haan, S., H. Van Der Marel, and S. Barlag, Comparison of GPS slant delay measurements to a numerical model: case study of a cold front passage. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2002. 27(4-5): p. 317-322.
- [14] Diedrich, H., et al., Representativeness of total column water vapour retrievals from instruments on polar orbiting satellites. 2016.
- [15] Jones, A., et al., Evolution of stratospheric ozone and water vapour time series studied with satellite measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009. 9(16): p. 6055-6075.
- [16] Román, R., et al., Comparison of total water vapor column from GOME-2 on MetOp-A against ground-based GPS measurements at the Iberian Peninsula. *Science of the Total Environment*, 2015. 533: p. 317-328.
- [17] Wang, H., et al., Water vapor retrieval from OMI visible spectra. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014. 7(6): p. 1901-1913.
- [18] Grossi, M., et al., Total column water vapour measurements from GOME-2 MetOp-A and MetOp-B. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015. 8(3): p. 1111-1133.
- [19] Wang, Y., et al., Evaluation of precipitable water vapor from four satellite products and four reanalysis datasets against GPS measurements on the Southern Tibetan Plateau. *Journal of Climate*, 2017. 30(15): p. 5699-5713.
- [20] Vaquero-Martínez, J., et al., Inter-comparison of integrated water vapor from satellite instruments using reference GPS data at the Iberian Peninsula. *Remote Sensing of Environment*, 2018. 204: p. 729-740.
- [21] Gao, B.-C. and Y.J. Kaufman, The MODIS near-IR water vapor algorithm product ID: MOD05-total precipitable water. [http://modisatmos.gsfc.nasa.gov/\\_docs/atbd\\_mod03.pdf](http://modisatmos.gsfc.nasa.gov/_docs/atbd_mod03.pdf), 2010. 29(11).
- [22] Li, J., et al., Operational retrieval of atmospheric temperature, moisture, and ozone from MODIS infrared radiances. Submitted to *Jour. Geophys. Res.*, 2002.

- [23] Merrikhpour, M.H., et al., Probable maximum precipitation estimation over western Iran based on remote sensing observations: comparing deterministic and probabilistic approaches. *Hydrological Sciences Journal*, 2020: p. 1-14.
- [24] Che, H., et al., Calibration of the 936 nm water-vapor channel for the China aerosol remote sensing NETwork (CARSNET) and the effect of the retrieval water-vapor on aerosol optical property over Beijing, China. *Atmospheric Pollution Research*, 2016. 7(5): p. 743-753.
- [25] Bokoye, A.I., et al., Calibration of sun radiometer-based atmospheric water vapor retrievals using GPS meteorology. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2007. 24(6): p. 964-979.
- [26] Holben, B.N., et al., AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote sensing of environment*, 1998. 66(1): p. 1-16.
- [27] Abbasy, S., et al., Precipitable water vapour estimation using the permanent single GPS station in Zanjan, Iran. *Meteorological Applications*, 2017. 24(3): p. 415-422.
- [28] Teunissen, P. and O. Montenbruck, *Springer handbook of global navigation satellite systems*. 2017: Springer.
- [29] Andrei, C.-O. and R. Chen, Assessment of time-series of troposphere zenith delays derived from the global data assimilation system numerical weather model. *GPS solutions*, 2009. 13(2), p. 109-117.
- [30] Bevis, M., et al., GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water. *Journal of applied meteorology*, 1994. 33(3): p. 379-386.
- [31] Davis, J., et al., Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio science*, 1985. 20(6): p. 1593-1607.
- [32] Giles, D.M., et al., Advancements in the Aerosol Robotic Network (AERONET) Version 3 database—automated near-real-time quality control algorithm with improved cloud screening for Sun photometer aerosol optical depth (AOD) measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019. 12(1).
- [33] Michalsky, J.J., et al., A differential technique to retrieve column water vapor using sun radiometry. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001. 106(D15): p. 17433-17442.
- [34] Halthore, R.N., et al., Sun photometric measurements of atmospheric water vapor column abundance in the 940-nm band. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997. 102(D4): p. 4343-4352.
- [35] Schmid, B., et al., Comparison of columnar water-vapor measurements from solar transmittance methods. *Applied Optics*, 2001. 40(12): p. 1886-1896.
- [36] Lyapustin, A.I., Interpolation and Profile Correction (IPC) method for shortwave radiative transfer in spectral intervals of gaseous absorption. *Journal of the atmospheric sciences*, 2003. 60(6): p. 865-871.
- [37] Pérez-Ramírez, D., et al., Evaluation of AERONET precipitable water vapor versus microwave radiometry, GPS, and radiosondes at ARM sites. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014. 119(15): p. 9596-9613.
- [38] Gao, B.C. and Y.J. Kaufman, Water vapor retrievals using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) near-infrared channels. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003. 108(D13).
- [39] Prasad, A.K. and R.P. Singh, 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*, 2009. 114(D5).
- [40] Rahimzadegan, M. and M.H. Merrikhpour, Evaluation and Comparison of the Efficiency of the Total Precipitable Water Vapor Algorithm of MODIS and AMSR2 over Land in the Western Part of IRAN. *Iran-Water Resources Research*, 2019. 14(5): p. 452-468, (in Persian).