

## Original Article

Iranian Remote Sensing GIS  
Journal of Sensing

# Integration of Multi-Sensor Data and Ground Observations in Order to Improve Accuracy and Spatial Resolution in Near-Surface Water Vapor Retrieval

Mohamad Reza Talari and Mina Moradizadeh\*

**Affiliation**

Dep. of Geomatics, Faculty of Civil and Transportation Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

**ABSTRACT**

**Introduction:** Atmospheric water vapor is a key parameter in modeling the energy balance on the earth's surface and plays a major role in keeping the temperature of the earth's atmosphere balanced. Retrieving of this parameter, as the most influential atmospheric parameter on the sensors received radiance, is of great importance. Since the atmospheric water vapor content in the near of surface is more and its temporal and spatial changes are more intense, the measurements of ground meteorological stations, despite their high accuracy, are not generalizable due to temporal and spatial limitations and point measurements. Therefore, it seems necessary to provide practical satellite-based methods to accurate and continuous retrieval of this parameter with appropriate spatial distribution. The aim of this research is to present four innovative and accurate methods to estimate the near surface atmospheric water vapor of Isfahan province in 2020 with a resolution of 1 km, through the integration of meteorological station data, sensor data and finally validating and comparing their performance. For this purpose, correcting the bias error of water vapor sensor data during the co-scaling stage and correcting the interpolation error of ground station observations was put on the agenda.

**Material and Methods:** Different sensors measure water vapor with different sensitivities and spatial resolution. Therefore, it is necessary to provide methods based on the simultaneous use of different sensor data and their integration to ground station observations, in order to simultaneously improve the accuracy and spatial resolution (1 km) of retrieved near surface water vapor. In the first method used in this research, the near surface water vapor is retrieved using the water vapor absorbing and non-absorbing bands of the MODIS, through the band ratio method and using ground observations. In the second method, first, observations of near surface water vapor of ground stations are converted to 1 km grid using the inverse distance interpolation (IDW) method. Then, during the steps of the proposed method and using the water vapor values estimated by the first method, the interpolation error in each pixel is removed. In the third method, the resolution of AIRS-derived water vapor product is reduced to 1 km by combining MODIS data during an operation similar to the steps of the second method, with the difference that the AIRS sensor product is used instead of ground station observations. It is necessary to eliminate the bias error of near surface water vapor product of the AIRS during the co-scaling stage by first. Estimation of near surface water vapor using MODIS column water vapor product is the fourth method. Of course, due to the difference in content, it is necessary to unite the two sets and equate them with an appropriate method.

**Results and Discussion:** In order to model and validate the estimation of atmospheric near surface water vapor at a spatial resolution of 1 km using the different mentioned methods, 66.6% of the data were randomly used for training and the remaining 33.3% were used to evaluate the accuracy and validation. Finally, the implementation results of the methods have been compared with each other. The validation results of proposed methods show that the second method, which is based on the generalization of accurate observations of ground stations and removing their interpolation error, during integration with the water vapor values retrieved from first method, has the best performance ( $R^2=0.55$ ,  $RMSE=1.05$  Gr/Kr).

**Conclusion:** Considering the better performance of the second method in retrieving the mixing ratio of near surface water vapor with high accuracy and resolution of 1 km, and with the aim of using the capabilities of satellite-based products and data, it is recommended to combine them with each other and also with ground observations.

**Keywords:** Near-surface water vapor, Multi-sensor data, Bias, MODIS, AIRS.

**Citation:**

Talari, M. R., Moradizadeh, M., *Integration of Multi-Sensor Data and Ground Observations in Order to Improve Accuracy and Spatial Resolution in Near-Surface Water Vapor Retrieval*, Iran J Remote Sens GIS. 17(1):61-78.

\* Corresponding Author: m.moradizadeh@eng.ui.ac.ir  
DOI: <https://doi.org/10.48308/GISJ.2024.230453.1146>

Received: 2023.01.27  
Accepted: 2023.12.25





# بازیابی بخار آب نزدیک به سطح جو با دقت و توان تفکیک مکانی ارتقایافته از طریق تلفیق داده‌های چندسنجنده‌ای و مشاهدات زمینی

محمد رضا طالاری و مینا مرادی‌زاده\*

## سمت

گروه مهندسی نقشه‌برداری، گرایش سنجش از دور، دانشکده عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

## چکیده

**سابقه و هدف:** بخار آب موجود در جو پارامتری محوری در مدل‌سازی تعادل انرژی در سطح زمین است و در متعادل نگاه داشتن دمای جو کره زمین نقش مهمی دارد. بازیابی این پارامتر، به‌منزله تأثیرگذارترین عامل جوی در رادینانس دریافتی سنجنده، از اهمیت بسزایی برخوردار است. از آنجاکه محتوای بخار آب جو در لایه نزدیک به سطح بیشتر و تغییرات زمانی و مکانی آن شدیدتر است، اندازه‌گیری ایستگاه‌های هواشناسی زمینی به‌رغم دقت بالا، به‌دلیل محدودیت‌های زمانی و مکانی و اندازه‌گیری نقطه‌ای، قابلیت تعمیم‌پذیری ندارند. از این‌رو ارائه روش‌های ماهواره‌محور کاربردی به‌منظور بازیابی دقیق و مداوم آن، با توزیع مکانی مناسب ضروری به نظر می‌رسد. هدف این تحقیق بیان چهار روش نوآورانه و دقیق برای برآورد نسبت اختلاط بخار آب نزدیک به سطح جو استان اصفهان در سال ۱۳۹۹، با توان تفکیک ۱ کیلومتر، از طریق تلفیق داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی، داده‌های سنجنده و در نهایت، اعتبارسنجی و مقایسه عملکرد آنهاست. بدین‌منظور تصحیح خطای اریبی داده‌های بخار آب سنجنده طی مرحله هم‌مقیاس‌سازی و تصحیح خطای درون‌یابی مشاهدات ایستگاه‌های زمینی در دستور کار قرار گرفت.

**مواد و روش‌ها:** سنجنده‌های گوناگون قابلیت اندازه‌گیری بخار آب، با توان تفکیک‌های مکانی و حساسیت‌های متفاوت به این پارامتر را دارند. از این‌رو مطرح کردن روش‌هایی، مبتنی بر استفاده و تلفیق هم‌زمان داده‌های سنجنده‌ها و مشاهدات ایستگاه‌های زمینی، به‌منظور ارتقای هم‌زمان توان تفکیک مکانی (یک کیلومتر) و دقت بازیابی بخار آب نزدیک به سطح جو ضروری است. در نخستین روش به‌کاررفته در این تحقیق، با استفاده از باندهای جذب و غیرجذب بخار آب سنجنده مادیس (MODIS) طی روش نسبت بانندی و با استفاده از مشاهدات زمینی، بخار آب نزدیک به سطح بازیابی می‌شود. در روش دوم، ابتدا مشاهدات بخار آب نزدیک به سطح ایستگاه‌های زمینی، با روش درون‌یابی معکوس فاصله، به داده‌های بخار آب سطحی یک‌کیلومتری تبدیل می‌شود. سپس طی مراحل روش پیشنهادی و با استفاده از مقادیر نسبت اختلاط بخار آب برآوردشده با روش اول، خطای درون‌یابی در هر پیکسل حذف می‌شود. در روش سوم، با تلفیق داده‌های مادیس طی عملیاتی شبیه مراحل روش دوم، توان تفکیک محصول بخار آب سنجنده AIRS به یک کیلومتر ارتقا داده می‌شود؛ با این تفاوت که به‌جای مشاهدات ایستگاه‌های هواشناسی زمینی، از محصول سنجنده AIRS استفاده می‌شود. از آنجاکه محصول نسبت اختلاط بخار آب نزدیک به سطح سنجنده AIRS دارای خطا و اریبی است، ابتدا باید با اعتبارسنجی محصولات این سنجنده، خطای اریبی محصول بخار آب نزدیک به سطح سنجنده AIRS، طی مرحله هم‌مقیاس‌سازی، حذف شود. برآورد بخار آب نزدیک به سطح جو با استفاده از محصول بخار آب جو ستونی سنجنده مادیس آخرین روش به‌کاررفته است. البته به‌دلیل تفاوت محتوایی، لازم است دو مجموعه داده هم‌واحد شوند و با روشی معادل‌سازی شوند.

**نتایج و بحث:** به‌منظور مدل‌سازی و اعتبارسنجی برآورد بخار آب نزدیک به سطح جو در توان تفکیک یک کیلومتر با استفاده از چهار روش اشاره‌شده، ۶۶/۳٪ داده‌ها به‌صورت تصادفی برای آموزش و ۳۳٪ مابقی برای ارزیابی دقت و اعتبارسنجی نتایج به کار رفته است. در نهایت نیز، نتایج اجرای روش‌ها با یکدیگر مقایسه شد. در این تحقیق، ضریب تعیین ( $R^2$ ) و جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) ملاک ارزیابی دقت و عملکرد مدل‌سازی قرار گرفته‌اند. نتایج اعتبارسنجی نشان می‌دهد روش دوم که مبتنی بر استفاده از تعمیم مشاهدات دقیق بخار آب نزدیک به سطح ایستگاه‌های زمینی و حذف خطای درون‌یابی آنها، طی تلفیق با مقادیر بخار آب بازیابی‌شده از سنجنده مادیس از طریق روش نسبت بانندی است، بهترین عملکرد ( $R^2=0.55$ ,  $RMSE=1.05$  Gr/Kr) را در تخمین بخار آب نزدیک به سطح جو را دارد.

**نتیجه‌گیری:** روش دوم، با توجه به عملکرد بهتر در بازیابی نسبت اختلاط بخار آب نزدیک به سطح جو با دقت بالا و توان تفکیک یک کیلومتر و با هدف استفاده از قابلیت محصولات و داده‌های ماهواره‌محور، تلفیق آنها با یکدیگر و همچنین با مشاهدات زمینی، توصیه می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** بخار آب نزدیک به سطح، داده چندسنجنده‌ای، اریبی، سنجنده مادیس، سنجنده AIRS.

**استناد:** طالاری، م.ر.، مرادی‌زاده، م.، بازیابی بخار آب نزدیک به سطح جو با دقت و توان تفکیک مکانی ارتقایافته از طریق تلفیق داده‌های چندسنجنده‌ای و مشاهدات زمینی، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱۷، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴: ۶۱-۷۸.



## ۱- مقدمه

بخار آب جو، به منزله یکی از مهم ترین ترکیبات جو با توزیع مکانی و زمانی بسیار متغیر، منبع بارندگی و حرکت های جوی در مقیاس بزرگ و شاخص مهمی در تعادل انرژی سطح زمین و تأثیرات گلخانه ای است (Colman, 2003). این پارامتر در زمینه های گوناگونی همچون کشاورزی (Caselles & Sobrino, 1989)، هواشناسی (Bevis et al., 1992)، اکولوژی (Rockström et al., 1999)، زیست شناسی (Sheil, 2018) و نیز موارد دیگر بسیار تأثیرگذار است. ظرفیت پذیرش بخار آب جو تابعی از دما، جنس و وضعیت سطح است و همین باعث می شود توزیع افقی و ستونی بخار آب در جو یکسان نباشد (Alizadeh, 2017). افزایش ارتفاع و متعاقب آن، کاهش دما باعث کاهش ظرفیت پذیرش بخار آب در لایه های بالاتر جو می شود (Román et al., 2015). بنابراین، با توجه به مقدار بالای بخار آب جو در لایه نزدیک به سطح و تغییرات زمانی و مکانی بسیار زیاد این پارامتر و همچنین اهمیت آن در مدل سازی های بیوسفری و هیدرولوژیکی، پایش مستمر و جهانی این پارامتر، با توزیع مکانی مناسب، ضروری به نظر می رسد. به دلیل محدودیت در انجام دادن مشاهدات زمینی بخار آب در مقیاس های بزرگ و با تراکم زمانی و مکانی بالا و پرهزینه بودن این کار و با توسعه روش های سنجش از دور در دهه های اخیر، این ابزار قدرتمند برای تعیین بخار آب جو با دقت مورد قبول در ابعاد پیکسلی تصاویر سنجنده استفاده می شود (Román et al., 2015; Kern et al., 2008). البته باید به این موضوع توجه داشت که به هر حال دقت این بازیابی ها کمتر از اندازه گیری های ایستگاه های هواشناسی است (Zhao & Zhou, 2020). همچنین محصولات فعلی بخار آب بازیابی شده ممکن است معایب دیگری، از جمله ناپیوستگی مکانی- زمانی و توان تفکیک مکانی<sup>۱</sup> اندک، داشته باشند (Li & Long, 2020). برای تعیین مقدار بخار آب جو با استفاده از داده های ماهواره ای، روش های گوناگونی وجود دارد که از آن میان،

می توان به برآورد میزان بخار آب با استفاده از سنجنده های اپتیکی (مبتنی بر استفاده از باندهای حرارتی و یا استفاده از باندهای فروسرخ نزدیک)، رادیومترهای مایکروویو و GPS<sup>۲</sup> اشاره کرد (Bevis et al., 1992; De Haan et al., 2004; Güldner & Spänkuch, 2001; Peters, 2001; Stum et al., 2011; Wolfe & Gutman, 2000). این روش ها، در صورت نداشتن حساسیت بالا به میزان و تغییرات ترکیبات دیگر جو و همچنین نوع و تغییرات ویژگی های سطح زمین، دقت بالاتری در بازیابی خواهند داشت (Sobrino et al., 2003).

روش هایی مانند تفاضل پنجره مجزای<sup>۳</sup> باندهای حرارتی، نسبت واریانس ها<sup>۴</sup>، شیب برازش<sup>۵</sup> و استفاده از LUT<sup>۶</sup> خروجی مدل انتقال تابشی، برای برآورد بخار آب جو با استفاده از باندهای حرارتی پیشنهاد شده است (Schrijver et al., 2009). از میان روش های برآورد بخار آب مبتنی بر باندهای فروسرخ حرارتی، دو روش شیب برازش و نسبت واریانس ها کمترین همبستگی ( $R = 0.4$ ) و روش LUT بیشترین همبستگی ( $R = 0.6$ ) را با مشاهدات زمینی نشان می دهند (Schrijver et al., 2009). استفاده از نسبت رادیانس اندازه گیری شده در یک باند جذب بخار آب (برای نمونه، محدوده باندی ۰/۹۴۰ یا ۰/۹۳۶ یا ۰/۹۰۵ میکرومتر) بر باند غیرجذب (مثلاً ۰/۸۶۵) بخار آب یکی از مهم ترین روش های برآورد بخار آب جو برفراز خشکی ها، با استفاده از باندهای فروسرخ نزدیک است. سوپرینو<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۰۳) از روش نسبت باند<sup>۸</sup> های جذب بخار آب (باندهای ۱۷، ۱۸ و ۱۹) به باند غیرجذب (باند ۲) سنجنده<sup>۹</sup> مادیس در یک مدل برازشی آماری، برای

1. Spatial Resolution
2. Global Positioning System
3. Split Window
4. Variance Ratio
5. Regression Slope
6. Look Up Table
7. Sobrino
8. Band Ratio
9. Moderate Resolution Imaging Spectro-Radiometer

حاصل از مادیس اختلاف آماری معناداری وجود ندارد (Campos-Arias, 2019). در مطالعه‌های دیگر، خانینانی<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۲۰) از مشاهدات ۳۸ ایستگاه GPS ایران، با هدف ارتقای دقت بخار آب به دست آمده از مادیس، استفاده کردند. این مطالعه با ارائه مدلی خطی توانست به ارتقای دقت بازیابی این پارامتر کمک کند. استفاده از سنجنده‌ای مانند MSG-SEVIRI<sup>۵</sup> نیز که توان تفکیک زمانی<sup>۶</sup> بسیار بالایی دارد، به منظور برآورد آنلاین میزان بخار آب جو، مورد توجه برخی محققان قرار گرفت و در پژوهشی، برای بازیابی میزان بخار آب جو در هر پانزده دقیقه، از تصاویر این سنجنده استفاده شد. ارزیابی نتایج بازیابی‌ها با استفاده از مشاهدات رادیوسوند تأیید کرد، صرف نظر از دقت کمتر این روش در قیاس با دیگر روش‌ها، می‌توان از آن در کارهای آنلاین بهره برد (Julien et al., 2015). اگرچه این تکنیک‌ها برای برآورد بخار آب ستونی جو معرفی و استفاده شدند، تحلیل‌های انجام شده در سال ۲۰۰۱ نشان داد بخار آب ستونی جو، در شرایطی که آسمان صاف است، همبستگی بسیاری (۰/۷۹) با بخار آب نزدیک به سطح جو دارد و می‌توان از این تکنیک‌ها برای برآورد بخار آب نزدیک به سطح نیز استفاده کرد (Schrijver et al., 2009).

با بررسی دقت روش‌های بازیابی بخار آب جو و تأیید معایب و محاسنی در هریک از آنها، در این تحقیق، از مدل‌های تجربی نوآورانه در تلفیق داده‌های دو سنجنده مادیس و AIRS<sup>۷</sup> با مشاهدات ایستگاه‌های زمینی استفاده شده است تا بخار آب نزدیک به سطح جو با دقت و توان تفکیک بالا برآورد شود.

بازیابی بخار آب جو، استفاده کردند. به دلیل نداشتن حساسیت یکسان باندهای جذب بخار آب به محتوای بخار آب جو، وزن‌های متفاوتی برای مقادیر بخار آب بازیابی شده با هریک از سه نسبت باندی در نظر گرفته شد (Sobrinho, 2003). مرادی زاده<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۴)، به دلیل کمتر بودن حساسیت باند ۱۷ به محتوای بخار آب جو، از این باند در بازیابی بخار آب جو صرف نظر کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که اگرچه دقت بازیابی میزان بخار آب جو با حذف باند ۱۷ تا حدی افزایش می‌یابد، مقدار آن شایان توجه نیست. در مناطق بدون پوشش گیاهی یا کم‌گیاه، استفاده از روش‌های مبتنی بر باندهای فرسرخ نزدیک و در مناطق دیگر، استفاده از روش‌های مبتنی بر باندهای حرارتی در بازیابی بخار آب جو عملکرد و دقت بهتری دارند (Fragkos et al., 2019).

رادیومترهای میکروویو نیز از دیگر ابزار بازیابی محتوای بخار آب جو، به ویژه بر فراز اقیانوس‌ها، محسوب می‌شوند (Epeloa & Meza, 2018). به دلیل تغییرات شدید در ضریب گسیل میکروویو، استفاده از داده‌های میکروویو برای بازیابی بخار آب بر فراز خشکی‌ها مرسوم نیست اما در سال ۲۰۱۷، با استفاده از تصاویر سنجنده Aquarius<sup>۲</sup> و رویکردی آماری، محتوای بخار آب ستونی جو<sup>۳</sup> بر فراز خشکی برآورد شد. اگرچه این روش عملکرد مورد قبولی داشت، مشکل تعمیم‌ناپذیری آن به سایر آب‌وهواها باقی بود (Epeloa & Meza, 2018).

یکی دیگر از مهم‌ترین و رایج‌ترین ابزارهای اندازه‌گیری در محل، برای مشاهده بخار آب جو، GPS است (Gong et al., 2020). GPS می‌تواند مشاهدات دقیق بخار آب را با وضوح مکانی-زمانی بالا، ارائه دهد و این مشاهدات را می‌توان، به منزله داده‌های زمینی بخار آب برای اعتبارسنجی اندازه‌گیری‌های دیگر ماهواره‌ها، به کار برد (Xu & Liu, 2021). در سال ۲۰۱۹ مطالعه‌ای در منطقه کاستاریکا، برای ارزیابی دقت بازیابی بخار آب جو با استفاده از GPS، انجام شد که نشان داد بین میزان بخار آب برآورد شده با بخار آب

1. Moradizadeh
2. Scientific Argentine Satellite (SAC-D/Aquarius)
3. Column Water Vapor
4. Khaniani
5. Generation-Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager
6. Temporal Resolution
7. Atmospheric Infrared Sounder

## ۲- منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

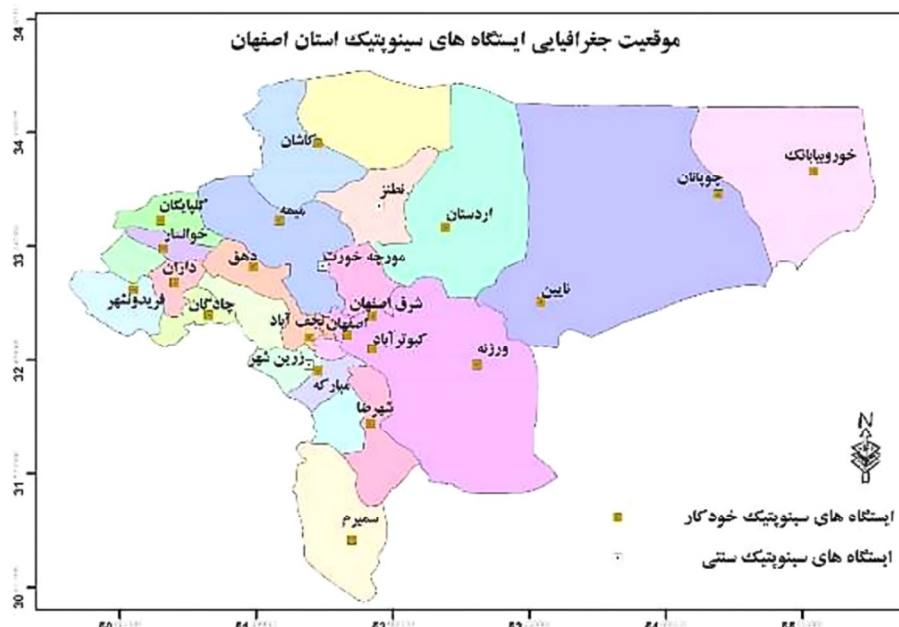
### ۲-۱- منطقه مطالعاتی

این مطالعه استان اصفهان به مرکزیت شهر اصفهان، واقع در مرکز ایران را دربرمی‌گیرد. این استان، با مساحتی حدود ۱۰۶۷۸۶ کیلومترمربع، بین ۳۰ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی خط استوا و ۴۹ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۳۱ دقیقه طول شرقی نصف‌النهار گرینویچ قرار گرفته است (شکل ۱). استان اصفهان ششمین استان پهناور و با پنج میلیون نفر، سومین استان پرجمعیت است و رتبه نخست شهرنشینی را در کشور دارد. از نظر طبیعی، این استان به دشت کویر در شرق و شمال و رشته‌کوه زاگرس در غرب و جنوب محدود شده است؛ این موقعیت طبیعی باعث پدید آمدن سه نوع آب‌وهوای مدیترانه‌ای با زمستان‌های سرد، مدیترانه‌ای با زمستان‌های گرم و نیمه‌خشک با تابستان‌های گرم در استان شده است که در ذیل، به آنها اشاره می‌شود. میانگین دمای استان

اصفهان ۱۶/۴ درجه سانتی‌گراد است. این میانگین، در سردترین ماه سال (دی)، ۳ درجه و در گرم‌ترین ماه سال (تیر)، ۲۹/۵ درجه سانتی‌گراد است. طبق آمار بلندمدت (۱۹۵۱-۲۰۱۵) میانگین ماهیانه بخار آب نسبی هوا، در ایستگاه اصفهان، ۳۸/۷٪، میانگین حداقل بخار آب نسبی تقریباً ۲۳٪ و میانگین حداکثر آن ۵۷/۶٪ است. طبیعی است که، در ماه‌های بارانی و سرد سال، میزان رطوبت نسبی کم‌وبیش بالا و برعکس، در ماه‌های گرم‌و خشک، میزان آن بسیار کم است.

### ۲-۲- داده‌های مورد استفاده

داده‌های به‌کاررفته در این مطالعه شامل میانگین فشار و میانگین فشار بخار ایستگاه (برحسب میلی‌بار) و همچنین داده‌های تابشی باندهای ۱۹، ۱۸، ۱۷، ۲ و محصول بخار آب جو سنجنده‌های مادیس و AIRS در بازه زمانی یک‌ساله، از ابتدای فروردین تا پایان اسفند سال ۱۳۹۹ و به‌صورت پانزده‌روز یک‌بار است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی، به همراه ایستگاه‌های هواشناسی (سینوپتیک) استان اصفهان

1. Millibar (mb)

## ۲-۲-۱- داده‌های ایستگاه‌های زمینی هواشناسی

ایستگاه‌های سینوپتیک هواشناسی ایستگاه‌هایی اند که در سراسر دنیا، هم‌زمان، براساس ضوابط و مقررات سازمان جهانی هواشناسی، به‌طور ۲۴ ساعته موظف به اندازه‌گیری و تهیه پارامترهای جوی و ارسال آنها در شبکه مخابراتی اند و برحسب موارد استفاده، انواع گوناگونی دارند. در ۲۳ ایستگاه سینوپتیک استان اصفهان، آمار دمای هوا، بارندگی، رطوبت نسبی، فشار هوا، تبخیر، فشار بخار و سایر متغیرهای هواشناسی به‌صورت سه‌ساعته اندازه‌گیری می‌شود. در این پژوهش، مطابق رابطه (۱)، از فشار میانگین ایستگاه‌ها (برحسب mb) و میانگین فشار بخار آب (برحسب mb) اندازه‌گیری شده در این ایستگاه‌ها، به‌منظور

محاسبه نسبت اختلاط<sup>۱</sup> بخار آب نزدیک به سطح جو، استفاده شده است.

$$MMR = 622 \left( \frac{e}{p - e} \right) \quad (1) \text{ رابطه (۱)}$$

در این رابطه،  $p$  فشار جو (mb) و  $e$  فشار بخار آب (mb) و مقادیر نسبت اختلاط برحسب گرم بر کیلوگرم است (French et al., 2003). فشار بخار آب جزئی از فشار هواست که از بخار آب جو ناشی می‌شود و از میزان بخار آب در هوا تأثیر مستقیم می‌پذیرد. نسبت اختلاط بخار آب نیز جرم بخار آب جو در حجم معینی از هوا، به جرم هوای خشک موجود در آن حجم هوا، در نظر گرفته می‌شود. در جدول ۱، مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک استان گزارش شده است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	سال تأسیس	ارتفاع (متر)	موقعیت جغرافیایی
اردستان	سینوپتیک خودکار	۱۳۷۰	۱۲۵۶	$\varphi = 33^{\circ}21'20''$ , $\lambda = 52^{\circ}22'32''$
اصفهان	سینوپتیک خودکار، آزن‌سنجی، جو بالا	۱۳۳۰	۱۵۵۰	$\varphi = 32^{\circ}31'04''$ , $\lambda = 51^{\circ}42'24''$
اصفهان (شرق)	سینوپتیک فرودگاهی	۱۳۵۵	۱۵۵۲	$\varphi = 32^{\circ}44'39''$ , $\lambda = 51^{\circ}51'47''$
چادگان	سینوپتیک خودکار	۱۳۹۴	۲۱۷۵	$\varphi = 32^{\circ}45'25''$ , $\lambda = 50^{\circ}39'02''$
چوپانان	سینوپتیک تمام خودکار	۱۳۸۵	۸۹۶	$\varphi = 33^{\circ}36'40''$ , $\lambda = 54^{\circ}22'42''$
خوانسار	سینوپتیک خودکار	۱۳۸۳	۲۳۰۰	$\varphi = 33^{\circ}12'32''$ , $\lambda = 50^{\circ}19'19''$
خور و بیابانک	سینوپتیک خودکار	۱۳۶۴	۸۴۲	$\varphi = 33^{\circ}46'11''$ , $\lambda = 55^{\circ}04'53''$
داران	سینوپتیک	۱۳۶۷	۲۲۹۰	$\varphi = 32^{\circ}59'15''$ , $\lambda = 50^{\circ}24'22''$
زرین شهر	سینوپتیک خودکار	۱۳۸۳	۱۷۱۴	$\varphi = 32^{\circ}23'58''$ , $\lambda = 51^{\circ}22'41''$
سمیرم	سینوپتیک خودکار	۱۳۷۹	۲۴۶۰	$\varphi = 31^{\circ}25'03''$ , $\lambda = 51^{\circ}32'55''$
شهرضا	سینوپتیک خودکار	۱۳۷۱	۱۸۵۸	$\varphi = 31^{\circ}58'53''$ , $\lambda = 51^{\circ}48'36''$
فریدون شهر	سینوپتیک خودکار	۱۳۸۲	۲۴۹۰	$\varphi = 32^{\circ}56'23''$ , $\lambda = 50^{\circ}07'37''$
کاشان	سینوپتیک خودکار	۱۳۴۵	۹۵۵	$\varphi = 33^{\circ}58'01''$ , $\lambda = 51^{\circ}28'51''$
کبوترآباد	سینوپتیک خودکار تحقیقات کشاورزی	۱۳۶۴	۱۵۴۲	$\varphi = 32^{\circ}30'51''$ , $\lambda = 51^{\circ}50'00''$
گلپایگان	سینوپتیک خودکار	۱۳۷۰	۱۸۷۰	$\varphi = 33^{\circ}28'36''$ , $\lambda = 50^{\circ}15'40''$
مبارکه	سینوپتیک خودکار	۱۳۸۶	۱۶۸۰	$\varphi = 32^{\circ}21'32''$ , $\lambda = 51^{\circ}27'05''$
مورچه خورت	سینوپتیک تمام خودکار	۱۳۷۸	۱۶۷۳	$\varphi = 33^{\circ}04'44''$ , $\lambda = 51^{\circ}28'50''$
نائین	سینوپتیک خودکار	۱۳۷۰	۱۵۷۴	$\varphi = 32^{\circ}51'06''$ , $\lambda = 53^{\circ}04'43''$

### 1. Mass Mixing Ratio

ادامه جدول ۱

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	سال تأسیس	ارتفاع (متر)	موقعیت جغرافیایی
نجف آباد	سینوپتیک خودکار تحقیقات کشاورزی	۱۳۷۶	۱۶۳۶	$\varphi = 32^{\circ}36'16''$ , $\lambda = 51^{\circ}23'17''$
نطنز	سینوپتیک خودکار	۱۳۷۰	۱۶۸۵	$\varphi = 33^{\circ}29'24''$ , $\lambda = 51^{\circ}55'51''$
ورزنه	سینوپتیک خودکار	۱۳۸۴	۱۴۵۰	$\varphi = 32^{\circ}25'58''$ , $\lambda = 52^{\circ}39'17''$
دهق	سینوپتیک تکمیلی تمام خودکار	۱۳۹۰	۱۹۶۰	$\varphi = 33^{\circ}05'50''$ , $\lambda = 50^{\circ}58'30''$
میمه	سینوپتیک	۱۳۷۷	۱۹۸۰	$\varphi = 33^{\circ}27'07''$ , $\lambda = 51^{\circ}10'31''$

### ۲-۲-۲- داده‌های سنجنده مادیس

سنجنده مادیس روی دو سکوی ترا<sup>۱</sup> و آکوا<sup>۲</sup>، به ترتیب در سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۲ میلادی، از سوی ناسا به فضا پرتاب شد. این سنجنده، با ۳۶ باند طیفی در محدوده امواج مرئی و فروسرخ، توان تفکیک مکانی متوسط هزار متر و توان تفکیک زمانی دوازده ساعت، در قیاس با دیگر سنجنده‌ها در موقعیت ممتازی قرار دارد (Wan et al., 2002). در این مطالعه، از داده‌های تابشی روزانه باندهای ۱۹، ۱۸، ۱۷، ۲ با توان تفکیک هزار متر استفاده شده است.

۲۳۷۸ کانال فروسرخ و ۴ کانال مرئی/ فروسرخ نزدیک دارد که در محدوده ۰/۴ تا ۱/۰ میکرومتر و ۳/۷ تا ۱۵/۴ میکرومتر قرار دارند. توان تفکیک مکانی و زمانی آن، به ترتیب، چنده کیلومتر و دوازده ساعته است. محصولات اتمسفری گوناگون این سنجنده نسبتاً دقیق، در دسترس، با پوشش جهانی و رایگان است. محصول بخار آب نزدیک به سطح جو که در این پژوهش به کار رفته، با کد مشخصه AIRS2RET، دارای توان تفکیک مکانی چهل کیلومتر است.

### ۲-۲-۲-۱- داده‌های بخار آب ستونی جو مادیس

محصول ماهواره‌ای بخار آب ستونی مورد استفاده در این مطالعه با کد مشخصه MYD05\_L2 از ماهواره آکوا، با توان تفکیک مکانی یک کیلومتر و توان تفکیک زمانی روزانه و حاوی اطلاعات روزانه بخار آب ستونی جو به دست آمده است. این محصول از باندهای فروسرخ نزدیک ۱۷، ۱۸، ۱۹ (باندهای جذب بخار آب) و باندهای ۲ و ۵ (باندهای غیر جذب مربوط به پنجره جوی)، با استفاده از الگوریتم نسبت باندها، به دست می‌آید.

### ۳- روش‌های برآورد نسبت اختلاط بخار آب نزدیک به سطح جو

بازیابی محتوای بخار آب نزدیک به سطح جو، با دقت و توان تفکیک مکانی مناسب، اهمیت بسیار چشمگیری دارد و از این رو در این تحقیق، به منظور برآورد نسبت اختلاط بخار آب نزدیک به سطح با توان تفکیک مکانی ۱ کیلومتر و دقت مناسب، چهار روش براساس داده‌های ماهواره‌ای گوناگون مطرح شده است. سنجنده‌های متفاوت توانایی اندازه‌گیری بخار آب را با توان تفکیک‌های مکانی و حساسیت‌های متفاوت به این

### ۲-۲-۳- داده‌های سنجنده AIRS

سنجنده AIRS روی سکوی آکوا، در سال ۲۰۰۲ میلادی، از سوی ناسا به فضا پرتاب شد. این سنجنده

1. Terra  
2. Aqua

### روش درون‌یابی IDW

در این روش (وزن دهی براساس معکوس فاصله)، فرض بر این است که نقاط نزدیک‌تر به نقطه مجهول تأثیر بیشتری در برآورد در نقطه مجهول دارند و در محاسبات، در قیاس با نقاط دورتر، وزن بیشتری می‌گیرند. در این روش از معکوس فاصله به‌منزله وزن نقاط معلوم، در پیش‌بینی مقادیر در نقاط مجهول، استفاده می‌شود. دلیل انتخاب این روش سادگی، فهم آسان و نتایج مورد قبول آن است (Khouni et al., 2018). برای درون‌یابی و برآورد پارامتر هدف در نقطه مجهول، با استفاده از نقاط معلوم، از رابطه (۲) استفاده می‌شود.

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i) \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه،  $Z(S_i)$  مقادیر اندازه‌گیری‌شده در موقعیت‌های معلوم و  $\lambda_i$  وزن مقدار اندازه‌گیری‌شده در موقعیت معلوم است که براساس فاصله تعیین می‌شود. همچنین  $S_0$  موقعیت مجهول و  $N$  تعداد نقاط معلوم استفاده‌شده در تعیین مقدار در موقعیت مجهول است.

### ۱-۳- بازیابی بخار آب نزدیک به سطح با روش نسبت باندی و داده‌های مادیس

در این روش، با استفاده از داده‌های سنجنده مادیس و مشاهدات بخار آب نزدیک به سطح ایستگاه‌های زمینی، با روش نسبت باندی، بخار آب نزدیک به سطح با توان تفکیک ۱ کیلومتر برآورد می‌شود. به‌منظور اجرای این الگوریتم، از داده‌های باندهای ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲ سنجنده مادیس، همچنین از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی استفاده می‌شود. برای هم‌زمانی دو مجموعه داده، داده‌های هواشناسی در نزدیک‌ترین ساعت به زمان عبور ماهواره انتخاب می‌شوند. داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی برای کالیبره کردن و اعتبارسنجی الگوریتم به کار می‌رود. نتایج مطالعه دیگری در سال ۲۰۰۲ نشان داد که بخار آب نزدیک به

پارامتر، دارا هستند. از این رو بیان روش‌هایی مبتنی بر استفاده و تلفیق هم‌زمان داده‌های سنجنده‌ها و مشاهدات ایستگاه‌های زمینی، به‌منظور ارتقای هم‌زمان توان تفکیک مکانی و دقت بازیابی بخار آب نزدیک به سطح جو ضروری است. در این تحقیق، از تلفیق تصاویر ماهواره‌ای مادیس و AIRS و مشاهدات ایستگاه‌های زمینی استفاده شده است. همچنین روش نسبت باندی، درون‌یابی IDW<sup>۱</sup> و هم‌مقیاس‌سازی داده‌ها، همراه با روش‌های پیشنهادی، به کار رفته است.

### روش نسبت باندی

این روش که سوپرینو و همکاران (۲۰۰۳) مطرح کردند، از نسبت رادیانس در باندهای جذب به باندهای غیرجذب بخار آب، به‌منظور برآورد دقیق‌تر محتوای بخار آب جو، بهره می‌برد. از آنجاکه میزان عبور از جو به مقدار بخار آب آن بستگی دارد، این نسبت متناسب با میزان بخار آب جو است و در برابر نویز ناشی از خطاهای آماری باندها، تغییرات ترکیبات دیگر جو و تغییرات ویژگی‌های سطح، حساسیت اندکی دارد (Schrijver et al., 2009). در سنجنده مادیس، باندهای ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ در محدوده طول موجی جذب و باند ۲ در محدوده غیرجذب بخار آب قرار دارد.

### هم‌مقیاس‌سازی داده‌ها

داده‌های سنجنده‌های گوناگون دارای توان تفکیک مکانی یکسان نیستند و ماهیت اساسی داده‌های ماهواره‌ای نیز با مشاهدات ایستگاه‌های زمینی، که اغلب به‌منظور کالیبراسیون و اعتبارسنجی نتایج برآوردهای الگوریتم‌ها به کار می‌روند، متفاوت است؛ از این رو هم‌مقیاس‌سازی داده‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق، از روشی ساده و ابتکاری برای هم‌مقیاس‌سازی و درنهایت، ارزیابی دقت و تصحیح خطای اریبی محصولات بخار آب نزدیک به سطح سنجنده AIRS، استفاده شده و در بخش ۳-۲ به آن پرداخته می‌شود.

## 1. Inverse Distance Weighting



مقدار رادیانس سنجنده مادیس برای باندهای اشاره شده و وزن هریک از باندهای سه گانه ( $f_j$ ) را داشته باشیم. وزن هریک از نسبت های باندی ( $f_j$ ) بر اساس حساسیت آنها به محتوای بخار آب جو تعیین می شود. جدول ۳ وزن هریک از نسبت های باندی را نشان می دهد که مطابق با تحقیقات قبلی، سهم باند ۱۸ در برآورد بخار آب بیشتر در نظر گرفته شده است (Moradizadeh et al., 2014).

**۲-۳- بازیابی بخار آب نزدیک به سطح، با ترکیب داده های ماهواره ای و مشاهدات ایستگاه های هواشناسی**  
در این روش، با علم به اینکه مشاهدات ایستگاه های هواشناسی دقیق، ولی به صورت نقطه ای و پراکنده اند و از سوی دیگر داده های ماهواره ای، به رغم دقت کمتر، در برآورد پارامترها دارای توان تفکیک مناسب و سطحی و پیوسته اند، با روشی نوآورانه از مزایای هر دو سری داده به طور هم زمان استفاده می شود. در این مرحله، ابتدا مشاهدات بخار آب نزدیک به سطح ایستگاه های زمینی، رابطه (۵) با روش درون یابی معکوس فاصله، به داده های بخار آب سطحی یک کیلومتری تبدیل می شود. میزان این خطا، بنابر روش درون یابی و تراکم نقاط، متغیر است اما در هر حال خطای درخور ملاحظه ای است. سپس با استفاده از روش پیشنهادی و مقادیر نسبت اختلاط بخار آب برآورد شده با روش نسبت باندی، خطای درون یابی در هر پیکسل حذف می شود. به عبارت دیگر این روش، با داشتن قابلیت تخمین خطای درون یابی در

سطح و بخار آب ستونی نهایی جو با یکدیگر همبستگی فراوانی دارند (Wan et al., 2002). بنابراین، این روش که در ابتدا برای برآورد بخار آب ستونی جو ارائه شده است، برای تعیین بخار آب نزدیک به سطح جو نیز با افت دقت بسیار اندکی کاربرد دارد (Kaufman & Gao, 1992).  
با استفاده از روابط (۳)، نسبت رادیانس باندهای جذب به باند غیر جذب محاسبه می شود. روابط غیر خطی (۴) نسبت های باندی را به بخار آب تبدیل می کنند. در نهایت، با استفاده از رابطه (۵)، از ترکیب مقادیر سه باند جذب، بخار آب نزدیک به سطح محاسبه می شود.

$$R_{17} = \frac{L_{17}}{L} \quad R_{18} = \frac{L_{18}}{L} \quad R_{19} = \frac{L_{19}}{L}$$

رابطه (۳)

$$W_{17} = a_1 + b_1 R_{17} + c_1 R_{17}^2$$

$$W_{18} = a_1 + b_1 R_{18} + c_1 R_{18}^2$$

$$W_{19} = a_3 + b_3 R_{19} + c_3 R_{19}^2$$

$$MMR = f_{17} W_{17} + f_{18} W_{18} + f_{19} W_{19}$$

در این روابط،  $L_j$  مقدار رادیانس سنجنده مادیس برای باندهای اشاره شده و  $f_j$  وزن باند مورد نظر است. ضرایب  $a_1 \dots a_3$  و  $b_1 \dots b_3$  و  $c_1 \dots c_3$  نیز ضرایب ثابت اند که مطابق جدول ۲ تعیین می شود. برای محاسبه ضرایب این معادله، با استفاده از روش کمترین مربعات خطا، لازم است مقدار نسبت اختلاط بخار آب نزدیک به سطح جو محاسبه شده در محل ایستگاه ها،

جدول ۲. ضرایب نسبت باندها

$a_1$	$b_1$	$c_1$	$a_2$	$b_2$	$c_2$	$a_3$	$b_3$	$c_3$
۲/۳۷	-۴۴/۲۸۸	۴۴/۱۸۲	۶۴/۳۳	-۳۱۹/۸۱	۴۳۶/۹۲	۶۰/۰۷۰	۸۴۹/۲۶	-۸۵۷/۰۹

جدول ۳. وزن نسبت های باندی سه گانه

$f_{17}$	$f_{18}$	$f_{19}$
۰/۱۴۱	۰/۴۴۴	۰/۴۱۵

### ۳-۳- ارتقای توان تفکیک محصول بخار آب سنجنده

**AIRS** به یک کیلومتر، با تلفیق داده‌های مادیس در این روش به منظور بازیابی نسبت اختلاط بخار آب نزدیک به سطح جو با توان تفکیک یک کیلومتر و دقت مناسب، شبیه به عملیات مرحله دوم، محصول بخار آب نزدیک به سطح سنجنده **AIRS**، داده‌های سنجنده مادیس و مشاهدات ایستگاه‌های زمینی به صورت هم‌زمان، برای ارتقای توان تفکیک مکانی محصول بخار آب نزدیک به سطح سنجنده **AIRS**، استفاده می‌شود. در این مرحله نیز از نسبت بخار آب نزدیک به سطح بازیابی شده از داده‌های سنجنده مادیس طی روش نسبت بانندی (روش اول) به منظور حذف خطای درون‌یابی استفاده می‌شود؛ با این تفاوت که به جای مشاهدات ایستگاه‌های هواشناسی زمینی، از محصول سنجنده **AIRS** استفاده می‌شود. از آنجاکه محصول نسبت اختلاط بخار آب نزدیک به سطح سنجنده **AIRS** دارای خطا و اریبی است، پیش از انجام دادن مراحل یادشده با اعتبارسنجی محصولات این سنجنده، خطای اریبی محصول بخار آب نزدیک به سطح سنجنده **AIRS** باید طی مرحله هم‌مقیاس‌سازی حذف شود.

#### ۱-۳-۳- روش هم‌مقیاس‌سازی در ارزیابی دقت محصولات بخار آب نزدیک به سطح سنجنده **AIRS** و

##### تعیین اریبی

برای این کار باید محصول بخار آب سنجنده **AIRS**، با مشاهدات بخار آب نزدیک به سطح اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هواشناسی به منزله داده‌های مرجع زمینی، مقایسه شود. این در حالی است که اندازه‌گیری‌ها در ایستگاه‌های هواشناسی به صورت نقطه‌ای و داده‌های سنجنده به صورت سطحی و در ابعاد پیکسل‌های آن (40 km\*40 km) است.

بنابراین، به دلیل تفاوت اساسی در ماهیت دو نوع داده و اختلاف مقیاس زیاد بین آنها، لازم است مشاهدات مرجع زمینی با کمترین خطا به صورت سطحی و با توان تفکیک مکانی سنجنده **AIRS** ارائه

فاصله‌های بین ایستگاه‌های هواشناسی و تصحیح آن، امکان بهره‌مندی از مشاهدات بسیار دقیق این ایستگاه‌ها را با تراکم مناسب ایجاد می‌کند. به این ترتیب، ضمن دستیابی به مقادیر بخار آب در توان تفکیک مناسب، دقت نیز تا حد امکان ارتقا یافته است. این روش و حصول نتیجه مطلوب طی پنج مرحله انجام می‌شود.

**مرحله اول:** در این مرحله، ۶۶٪ از مشاهدات نسبت اختلاط بخار آب نزدیک به سطح جو در ایستگاه‌های هواشناسی که به صورت نقطه‌ای‌اند، با روش درون‌یابی **IDW** به داده‌های سطحی یک کیلومتری تبدیل می‌شوند. ۳۳٪ باقی مانده به منظور اعتبارسنجی استفاده خواهند شد. مقادیر درون‌یابی شده قطعاً خطای درون‌یابی دارند و در مراحل بعدی، برای حذف خطاهای درون‌یابی با استفاده از داده‌های سنجنده مادیس، روشی ابتکاری مطرح می‌شود.

**مرحله دوم:** مقادیر نسبت اختلاط بخار آب نزدیک به سطح حاصل از اجرای روش نسبت بانندی روی داده‌های سنجنده مادیس با توان تفکیک یک کیلومتر، در پیکسل‌های متناظر با موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی استخراج می‌شود.

**مرحله سوم:** بار دیگر مقادیر نسبت اختلاط بخار آب حاصل از روش نسبت بانندی سنجنده مادیس در محل ایستگاه‌های مرحله اول، با روش درون‌یابی **IDW**، به داده‌های سطحی یک کیلومتری تبدیل می‌شود. این مقادیر هم قطعاً دارای خطای درون‌یابی است.

**مرحله چهارم:** برای محاسبه خطای درون‌یابی در هر پیکسل، داده‌های مرحله دوم و سوم را مقایسه و خطای درون‌یابی روش **IDW** را محاسبه می‌کنیم.

**مرحله پنجم:** پس از محاسبه خطای درون‌یابی در هر پیکسل یک کیلومتری، این مقدار خطا به داده‌های مرحله اول اعمال می‌شود. به این ترتیب، داده‌های سطحی یک کیلومتری بخار آب نزدیک به سطح با دقت داده‌های هواشناسی و بدون خطای درون‌یابی به دست می‌آید.

۴-۳- برآورد بخار آب نزدیک به سطح جو با استفاده

از محصول بخار آب جو سنجنده مادیس

به رغم دسترسی آسان و توان تفکیک مناسب محصولات بخار آب سنجنده مادیس، این محصولات محتوای CWV را با واحد سانتی متر در اختیار کاربران قرار می دهند. این در حالی است که پارامتر بازیابی شده، در این پژوهش، نسبت اختلاط بخار آب نزدیک به سطح جو با واحد  $\frac{g}{kg}$  است. در نتیجه، لازم است دو مجموعه داده هم واحد شوند و به شیوه ای معادل سازی شوند. شایان ذکر است که این معادل سازی با فرض وجود همبستگی بالا بین رطوبت ستونی و رطوبت نزدیک به سطح جو انجام می شود. به منظور تعیین نوع رابطه (خطی یا غیر خطی) بین این دو مجموعه داده، توزیع ۶۶٪ مشاهدات بخار آب نزدیک به سطح ایستگاه های زمینی نسبت به این محصولات در فضای دوبعدی ترسیم شد؛ مطابق شکل های ۲ و ۳، تابع نمایی ( $MMR = 3.2966e^{0.1986CWV}$ ) بهترین برازش با بیشترین همبستگی را نشان می دهد.

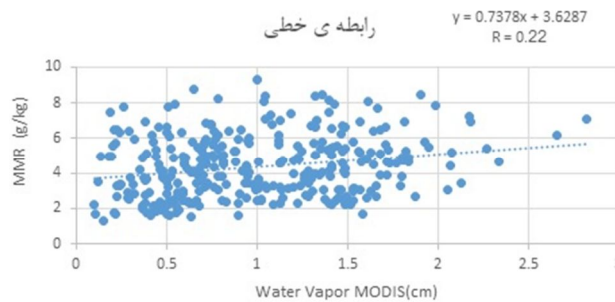
شوند. در این تحقیق، طی روشی نوآورانه، از داده های سنجنده مادیس (1 km\*1 km) به منزله واسطه ای برای سطحی کردن اندازه گیری های زمینی استفاده می شود. به این ترتیب، مقادیر نسبت اختلاط بخار آب نزدیک به سطح سنجنده مادیس، با استفاده از روش نسبت باندی در توان تفکیک یک کیلومتر، محاسبه می شود و به منظور اعتبارسنجی محصول بخار آب سنجنده AIRS، از  $40 \times 40$  پیکسل آن میانگین گیری می شود.

با مقایسه این دو برآورد از میزان نسبت اختلاط بخار آب نزدیک به سطح در توان تفکیک سنجنده AIRS، دقت و اریبی محصولات بخار آب این سنجنده مطابق جدول ۴ تعیین می شود.

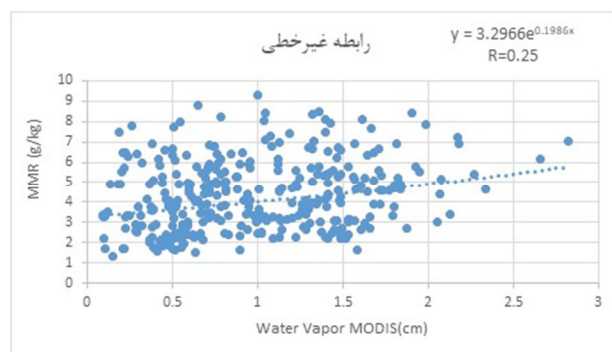
شایان ذکر است که برای کاهش خطای نبود انطباق زمانی بین مشاهدات زمینی و ماهواره ای، از مشاهدات ایستگاه های هواشناسی در ساعاتی استفاده می شود که کمترین اختلاف را با زمان عبور سنجنده داشته باشد.

جدول ۴. نتایج اعتبارسنجی محصول بخار آب سنجنده AIRS

Bias	R <sup>2</sup>	MAE	RMSE
-۰/۱۹۳	۰/۲۴	۱/۰۵	۱/۳۲



شکل ۲. رابطه خطی بین داده های بخار آب ایستگاه های هواشناسی و محصول بخار آب داده های مادیس



شکل ۳. رابطه غیر خطی بین داده های بخار آب ایستگاه های هواشناسی و محصول بخار آب داده های مادیس

## ۴- اجرا، نتایج و بحث

به منظور مدل سازی و اعتبارسنجی برآورد بخار آب نزدیک به سطح جو در توان تفکیک یک کیلومتر، با استفاده از چهار روش اشاره شده، ۶۶/۳٪ داده ها به صورت تصادفی برای آموزش و ۳۳٪ مابقی به منظور ارزیابی دقت و اعتبارسنجی نتایج به کار رفته است. در نهایت نیز نتایج اجرای روش ها با یکدیگر مقایسه شد. در این تحقیق ضریب تعیین ( $R^2$ )<sup>۱</sup> و جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE)<sup>۲</sup> ملاک ارزیابی دقت و عملکرد مدل سازی قرار گرفته اند. جدول ۵ نتایج اعتبارسنجی و دقت روش های مطرح شده در این تحقیق، به منظور بازیابی نسبت اختلاط بخار آب نزدیک به سطح با توان تفکیک یک کیلومتر را نشان می دهد.

مقایسه اعتبارسنجی روش های گوناگون حاکی از آن است که براساس معیار  $R^2$ ، استفاده از روش نسبت بانندی روی داده های سنجنده مادیس (روش اول) و همچنین براساس معیار RMSE، تلفیق داده های بخار آب بازیابی شده از طریق روش اول با مشاهداتی ایستگاهی، به منظور حذف خطای درونیابی (روش دوم)، بهترین عملکرد را در بازیابی پارامتر هدف داشته اند. به طور کلی نتایج نشان داد که روش دوم، با ضریب تعیین ( $R^2=0.546$ ) و جذر میانگین مربعات

خطا (RMSE=1.1 Gr/Kr) عملکرد بهتری در بازیابی بخار آب نزدیک به سطح، با توان تفکیک یک کیلومتر، دارد. علت آن به کار بردن مشاهدات دقیق بخار آب نزدیک به سطح از ایستگاه های زمینی و تلفیق آنها با داده های سطحی سنجنده مادیس در تخمین بخار آب نزدیک به سطح جو و در نهایت، حذف خطای درونیابی است.

همچنین روش چهارم که از محصول سنجنده مادیس در بازیابی نسبت اختلاط بخار آب نزدیک به سطح جو استفاده می کند، دقتی کمتر از دیگر روش ها دارد و دلیل اصلی آن ماهیت متفاوت محصول سنجنده مادیس با پارامتر بازیابی شده است. شکل های ۴ تا ۷ میزان اختلاف متوسط بخار آب اندازه گیری شده جو را که با استفاده از چهار روش محاسبه شده است، در کل بازه برای هر ایستگاه نشان می دهند.

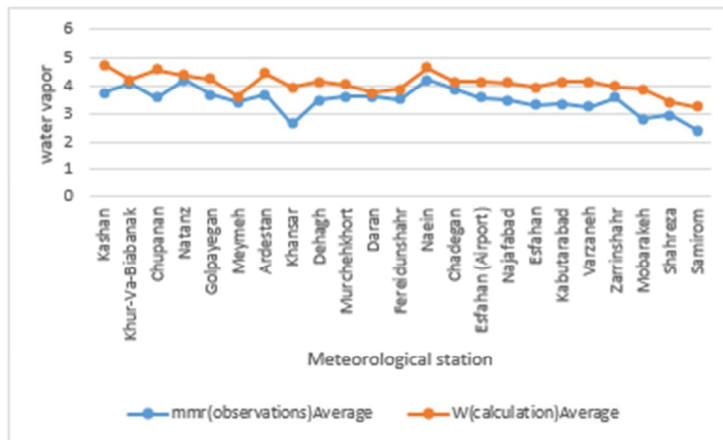
مطابق نمودار شکل ۴، الگوریتم نسبت بانندی در همه نقاط متناظر با مکان ایستگاه های متفاوت، عملکرد تقریباً یکسانی نشان می دهد. همچنین اختلاف این دو مقدار مشخص می کند که مقادیر برآورد شده با روش نسبت بانندی، در مقایسه با مقادیر زمینی، همواره اندکی بیشتر است. نمودار توزیع مقادیر برآورد بخار آب نزدیک به سطح با روش دوم به منزله دقیق ترین روش، در مقایسه با مقادیر مشاهداتی زمینی بخار آب نزدیک به سطح جو، در شکل ۸ نشان داده شده است.

جدول ۵. نتایج اعتبارسنجی روش های مطرح شده

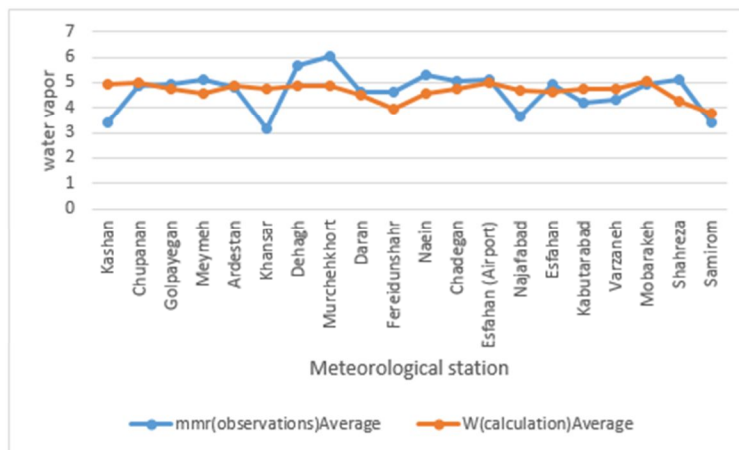
روش برآورد	داده ها	توان تفکیک	RMSE	$R^2$
روش اول: نسبت بانندی	داده های هواشناسی و داده های سنجنده مادیس	۱ کیلومتر	۱/۲۵	۰/۶۴
روش دوم: حذف خطای درونیابی	داده های هواشناسی و داده های سنجنده	۱ کیلومتر	۱/۰۵	۰/۵۵
روش سوم: حذف آربی محصول AIRS، با روش هم مقیاس سازی و حذف خطای درونیابی	محصول بخار آب سنجنده AIRS، داده های سنجنده مادیس و داده های هواشناسی	۱ کیلومتر	۱/۲۱	۰/۵۶
روش چهارم: محصول مادیس	محصول بخار آب مادیس و داده های هواشناسی	۱ کیلومتر	۱/۲۷	۰/۵۴

1. R Squared (R2)

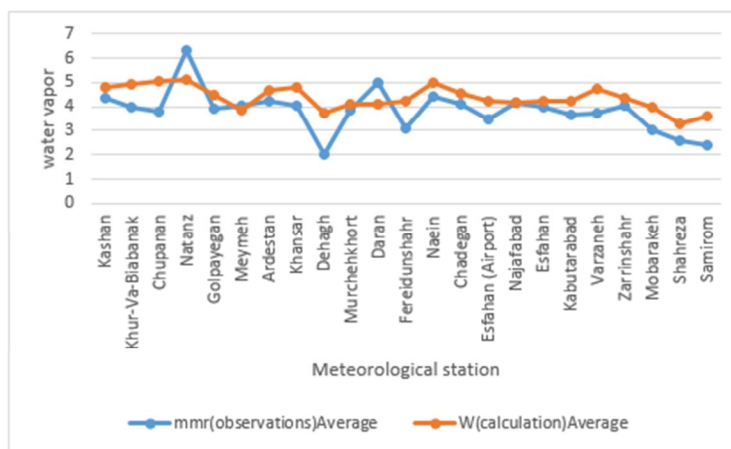
2. Root Mean Square Error (RMSE)



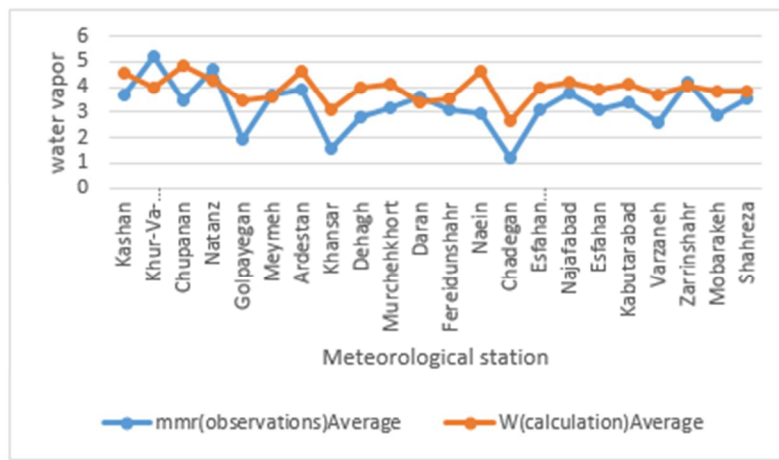
شکل ۴. نمودار اختلاف بخار آب اندازه گیری و محاسبه شده با روش نسبت باندی (روش اول) در هر ایستگاه



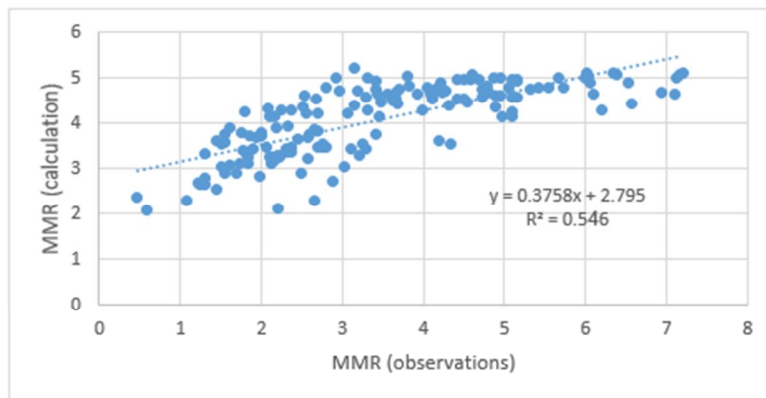
شکل ۵. نمودار اختلاف بخار آب اندازه گیری و محاسبه شده با روش حذف خطای درونیابی مشاهدات هواشناسی (روش دوم) در هر ایستگاه



شکل ۶. نمودار اختلاف بخار آب اندازه گیری و محاسبه شده با روش حذف اربیی و خطای درونیابی محصول سنجنده AIRS (روش سوم) در هر ایستگاه



شکل ۷. نمودار اختلاف بخار آب اندازه‌گیری و محاسبه‌شده با محصول بخار آب جو براساس داده‌های مادیس (روش چهارم) در هر ایستگاه



شکل ۸. توزیع مقادیر برآورد بخار آب نزدیک به سطح با روش حذف خطای درون‌یابی مشاهدات هواشناسی (روش دوم)، در مقایسه با مشاهداتی زمینی

خطای نسبتاً پایین، در مقایسه با تحقیقات دیگر، حاکی از توانایی این شیوه‌ها در پیش‌بینی میزان بخار آب جو است (Moradizadeh et al., 2014).

### ۵- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت بخار آب جو و تأثیر آن در فعل‌وانفعالات بین سطح و جو و کاربردهای این پارامتر در زمینه‌های گوناگونی مانند کشاورزی، هواشناسی و اکولوژیکی و همچنین لزوم ورود مقدار عددی این پارامتر در بسیاری از الگوریتم‌های سنجش از دوری، بازیابی این پارامتر با دقت و توان تفکیک مکانی بالا

تفاوت دمای هوا و وجود اقلیم‌های گوناگون، در استان اصفهان، دلیل متفاوت بودن توزیع زمانی و مکانی بخار آب جو است. شایان ذکر است که علاوه بر محدودیت‌ها و مشکلاتی مانند نبود همسانی زمانی و مکانی و ماهیتی داده‌ها، اندازه‌گیری نشدن بخار آب جو طی برخی روزهای سال در ایستگاه‌های هواشناسی و همچنین وجود داده‌های غیرکاربردی در تصاویر ماهواره‌ای از دیگر محدودیت‌ها و عوامل ایجاد خطا در این روش‌ها بود. اما نتایج اعتبارسازی بازیابی بخار آب نزدیک به سطح با روش‌های مدل‌سازی مطرح‌شده، با ضریب همبستگی مورد قبول و جذر میانگین مربعات

محاسباتی در تعیین ضرایب روش نسبت باندها، پیشنهاد می‌شود از روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین در تعیین ضرایب استفاده شود.

#### ۶- منابع

- Alizadeh Rabiee, H., 2017, **Remote Sensing (Principles and Application)**, Samt Organisation, 978-600-02-2449-3.
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T.A., Rocken, C., Anthes, R.A. & Ware, R.H., 1992, **GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System**, J. Geophys. Res. Atmos., 97(D14), PP. 15787-1580, <https://doi.org/10.1029/92JD01517>.
- Campos-Ariaa, P., Esquivel-Hernández, G., Valverde-Calderón, J.F., Valverde Calderón, S., Moya-Zamora, J., Sánchez-Murillo, R. & Boll, J., 2019, **GPS Precipitable Water Vapor Estimations over Costa Rica: A Comparison against Atmospheric Sounding and Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS)**, Clim., 7(63), <https://doi.org/10.3390/cli7050063>.
- Caselles, V. & Sobrino, J., 1989, **Determination of Frosts in Orange Groves from NOAA-9 AVHRR Data**, Remote Sens. Environ., 29(2), PP. 135-146, [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90022-9](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90022-9).
- Colman, R., 2003, **A Comparison of Climate Feedbacks in General Circulation Models**, Clim. Dyn., 20(7), PP. 865-873, <https://doi.org/10.1007/s00382-003-0310-z>.
- De Haan, S., Barlag, S., Baltink, H.K., Debie, F. & Van Der Marel, H., 2004, **Synergetic Use of GPS Water Vapor and Meteosat Images for Synoptic Weather Forecasting**, J. Appl. Meteorol., 43(3), PP. 514-518, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0514:SUOGWV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0514:SUOGWV>2.0.CO;2).
- Epeloa J. & Meza, A., 2018, **Total Column Water Vapor Estimation over Land Using Radiometer Data from SAC-D/Aquarius**, Adv. Space Res., 61(4), PP. 1025-1034, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.11.023>.

ضروری است. بنابراین، با هدف استفاده از قابلیت محصولات و داده‌های ماهواره‌محور و تلفیق آنها با یکدیگر و مشاهدات زمینی، در این تحقیق روش‌هایی جدید و نوآورانه، به‌منظور بازیابی نسبت اختلاط بخار آب نزدیک به سطح جو با دقت مناسب و توان تفکیک یک کیلومتر بیان شد.

در روش اول، با استفاده از داده‌های سنجنده مادیس و مشاهدات بخار آب نزدیک به سطح ایستگاه‌های زمینی، طی روش نسبت باندها، نسبت اختلاط بخار آب نزدیک به سطح با توان تفکیک یک کیلومتر برآورد شد. با توجه به دقت بسیار بالای مشاهدات زمینی، در روش دوم ابتدا مشاهدات بخار آب نزدیک به سطح ایستگاه‌های زمینی، با درون‌یابی، به توان تفکیک یک کیلومتر رسید و سپس با ارائه روشی نوآورانه، از مقادیر بخار آب برآورد شده در مرحله اول استفاده شد تا خطای درون‌یابی در هر پیکسل تصحیح شود. محصول بخار آب نزدیک به سطح سنجنده AIRS، داده‌های سنجنده مادیس و مشاهدات ایستگاه‌های زمینی، هم‌زمان، در مرحله سوم به کار رفتند تا توان تفکیک مکانی محصول بخار آب نزدیک به سطح سنجنده AIRS ارتقا یابد. این مرحله شامل حذف اریبی محصول بخار آب نزدیک به سطح سنجنده AIRS، طی مرحله هم‌مقیاس‌سازی و درنهایت، برآورد پارامتر بخار آب نزدیک به سطح در توان تفکیک مدنظر بود. در روش چهارم نیز دقت محصولات بخار آب سنجنده مادیس با توان تفکیک یک کیلومتر، ارزیابی شد. با اعتبارسنجی نتایج بازیابی چهار روش و مقایسه آنها مشخص شد همه روش‌ها، در بازیابی بخار آب نزدیک به سطح، عملکرد مناسبی دارند؛ اگرچه روش مبتنی بر استفاده هم‌زمان داده‌های ماهواره‌ای مادیس و مشاهدات ایستگاه‌های زمینی و نیز روش مبتنی بر استفاده از محصول بخار آب سنجنده مادیس، در بازیابی بخار آب نزدیک به سطح با توان تفکیک یک کیلومتر، به‌ترتیب، بهترین و ضعیف‌ترین عملکرد را داشتند. به‌منظور دستیابی به دقت بالاتر و کاهش خطاهای

- Fragkos, K., Antonescu, B., Giles, D.M., Ene, D., Boldeanu, M., Efstathiou, G.A., Belegante, L. & Nicolae, D., 2019, **Assessment of the Total Precipitable Water from a Sun Photometer, Microwave Radiometer and Radiosondes at a Continental Site in Southeastern Europe**, *Atmos. Meas. Tech.*, 12(3), PP. 1979-1997, <https://doi.org/10.5194/amt-12-1979-2019>.
- French, A., Norman, J. & Anderson, M., 2003, **A Simple and Fast Atmospheric Correction for Spaceborne Remote Sensing of Surface Temperature**, *Remote Sens. Environ.*, 87(2-3), PP. 326-333, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.08.001>.
- Gong, S., Chen, W., Zhang, C., Wu, P. & Han, J., 2020, **Intercomparisons of Precipitable Water Vapour Derived from Radiosonde, GPS and Sunphotometer Observations**, *Geod. Vestn.*, 64(4), PP. 562-577, 2020, <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2020.04.562-577>.
- Güldner, J. & Spänkuch, D., 2001, **Remote Sensing of the Thermodynamic State of the Atmospheric Boundary Layer by Ground-Based Microwave Radiometry**, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 18(6), PP. 925-933, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2001\)018<0925:RSOTT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001)018<0925:RSOTT>2.0.CO;2).
- Julien, Y., Sobrino, J., Mattar, C. & Jiménez-Muñoz, J.C., 2015, **Near-Real-Time Estimation of Water Vapor Column from MSG-SEVIRI Thermal Infrared Bands: Implications for Land Surface Temperature Retrieval**, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 53(8), PP. 4231-4237, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2393378>.
- Kaufman, Y.J. & Gao, B.C., 1992, **Remote Sensing of Water Vapor in the Near IR from EOS/MODIS**, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 30(5), PP. 871-884, <https://doi.org/10.1109/36.175321>.
- Kern, A., Bartholy, J., Borbás, E.E., Barcza, Z., Pongrácz, R. & Ferencz, C., 2008, **Estimation of Vertically Integrated Water Vapor in Hungary Using MODIS Imagery**, *Adv. Space Res.*, 41(11), PP. 1933-1945, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.06.048>.
- Khaniani, A.S., Nikraftar, Z. & Zakeri, S., 2020, **Evaluation of MODIS Near-IR Water Vapor Product over Iran Using Ground-Based GPS Measurements**, *Atmos. Res.*, 231(104657), <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104657>.
- Khouni, I., Louhichi, G. & Ghrabi, A., 2018, **Use of GIS Based Inverse Distance Weighted Interpolation to Assess Surface Water Quality: Case of Wadi El Bey, Tunisia**, *Environ. Technol. Innov.*, 24(101892), <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101892>.
- Li, X. & Long, D., 2020, **An Improvement in Accuracy and Spatiotemporal Continuity of the MODIS Precipitable Water Vapor Product Based on a Data Fusion Approach**, *Remote Sens. Environ.*, 248(111966), <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111966>.
- Moradzadeh, M., Momeni, M. & Saradjian, M.R., 2014, **Estimation and Validation of Atmospheric Water Vapor Content Using a MODIS NIR Band Ratio Technique Based on AIRS Water Vapor Products**, *Arab. J. Geosci.*, 7(5), PP. 1891-1897, <https://doi.org/10.1007/s12517-013-0828-2>.
- Peters, G., 2001, **Ground Based Remote Profiling of the Atmosphere: Demands, Prospects and Status**, *Phys. Chem. Earth*, 26(3), PP. 175-180, [https://doi.org/10.1016/S1464-1909\(00\)00236-7](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(00)00236-7).
- Rockström, M., Gordon, L., Folke, C., Falkenmark, M. & Engwall, M., 1999, **Linkages among Water Vapor Flows, Food Production, and Terrestrial Ecosystem Services**, *Ecol. Soc.*, 3(2), <https://doi.org/10.5751/ES-00142-030205>.
- Román, R., Antón, M., Cachorro, V.E., Loyola, D., Ortiz de Galisteo, J.P., de Frutos, A. & Romero-Campos, P.M., 2015, **Comparison of Total Water Vapor Column from GOME-2 on MetOp-A against Ground-Based GPS Measurements at the Iberian Peninsula**, *Sci. Total Environ.*, 533(317-328), <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.124>.
- Schrijver, H., Gloudemans, A., Frankenberg, C. & Aben, I., 2009, **Water Vapour Total**



- Columns from SCIAMACHY Spectra in the 2.36 $\mu$ m Window**, Atmos. Meas. Tech., 2, PP. 561-571, <https://doi.org/10.5194/amt-2-561-2009>.
- Sheil, D., 2018, **Forests, Atmospheric Water and an Uncertain Future: The New Biology of the Global Water Cycle**, For. Ecosyst., 5(19), <https://doi.org/10.1186/s40663-018-0138-y>.
- Sobrinho, J., 2003, **Zonas metropolitanas de México en 2000: Conformación territorial y movilidad de la población ocupada**, Estud. Demogr. Urbanos Col. Mex., 18(3), PP. 461-507, <https://doi.org/10.24201/edu.v18i3.1156>.
- Sobrinho, J., El Kharraz, J. & Li, J.L., 2003, **Surface Temperature and Water Vapour Retrieval from MODIS Data**, Int. J. Remote Sens., 24(24), PP. 5161-5182, <https://doi.org/10.1080/0143116031000102502>.
- Stum, J., Sicard, P., Carrere, L. & Lambin, J., 2011, **Using Objective Analysis of Scanning Radiometer Measurements to Compute the Water Vapor Path Delay for Altimetry**, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 49(9), PP. 3211-3224, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2104967>.
- Wan, Z., Zhang, Y., Zhang, Q. & Li, Z.L., 2002, **Validation of the Land-Surface Temperature Products Retrieved from TERRA Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Data**, Remote Sens. Environ., 83(1-2), PP. 163-180, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00093-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00093-7).
- Wolfe, D.E. & Gutman, S.I., 2000, **Developing an Operational, Surface-Based, GPS, Water Vapor Observing System for NOAA, Network Design and Results**, J. Atmos. Ocean Tech., 17(4), PP. 426-440, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2000\)017<0426:DAOSBG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2000)017<0426:DAOSBG>2.0.CO;2).
- Xu, J. & Liu, Z., 2021, **The First Validation of Sentinel-3 OLCI Integrated Water Vapor Products Using Reference GPS Data in Mainland China**, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 60, PP. 1-17, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3099168>.
- Zhao, Y. & Zhou, T., 2020, **Asian Water Tower Evinced in Total Column Water Vapor: A Comparison among Multiple Satellite and Reanalysis Data Sets**, Clim. Dyn., 4(1-2), PP. 231-245, <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04999-4>.

**This Page is Intentionally Left Blank**