

## Evaluation and Comparison of the Efficiency of the MODIS and AMSR2 Total Precipitable Water Vapor Algorithm Over Lands in the Western Part of IRAN

M.H. Merrikhpour<sup>1</sup> and M. Rahimzadegan<sup>2\*</sup>

### Abstract

Total Precipitable Water Vapor is one of the important parameters in meteorology and hydrology. The aim of this study is the evaluation of remote sensing algorithms to estimate TPW over land using microwave and optical wavelengths in the western part of Iran. In this regard, the algorithm of TPW estimation in the microwave wavelength range by using Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2) data on cloudy and clear sky days as well as the product of near infrared TPW of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) MOD05 in clear sky days were evaluated (MOD05 product does not work on cloudy days). The evaluation results based on radiosonde data on clear sky days showed that MOD05 product had higher precision than AMSR2 algorithm, so that the coefficient of determination ( $R^2$ ) derived from AMSR2 and MOD05 were 0.516 and 0.650, respectively. Moreover, the Root Mean Square Error (RMSE) of AMSR2 and MOD05 were acquired as 5.129 and 4.542 mm, respectively. On cloudy days  $R^2$  and RMSE of the obtained TPW from AMSR2 algorithm were 0.284 and 7.367 mm, respectively. Overall, on cloudy and clear sky days, the value of  $R^2$  and RMSE of estimated TPW from AMSR2 was 0.420 and 5.976 mm, respectively.

**Keywords:** Total Precipitable Water Vapor, IRAN, AMSR2, MODIS, Radiosonde.

Received: April 28, 2018

Accepted: September 13, 2018

## ارزیابی و مقایسه کارایی الگوریتم بخار آب قابل بارش جو MODIS و AMSR2 در سطح خشکی در نیمه غربی ایران

محمدحسین مریخپور<sup>۱</sup> و مجید رحیمزادگان<sup>۲\*</sup>

### چکیده

بخار آب قابل بارش (TPW) جو یکی از پارامترهای مهم در هواشناسی و هیدرولوژی می‌باشد. هدف مطالعه حاضر، ارزیابی کارایی الگوریتم‌های سنسجس از دور برآورد TPW در سطح خشکی در محدوده امواج مایکروویو و اپتیکی در نیمه غربی ایران است. در این راستا، الگوریتم برآورد TPW در محدوده امواج مایکروویو با به کارگیری داده‌های رادیومتر اسکن کننده پیشرفته مایکروویو ۲ (AMSR2) در روزهای ابری و فاقد ابر و محصول TPW مادون قرمز نزدیک اسپکتورادیومتر تصویربردار با قدرت تفکیک متوسط (MODIS) با نام MOD05 تنها در روزهای فاقد ابر مورد ارزیابی قرار گرفتند؛ زیرا این محصول در روزهای ابری کارایی ندارد. نتایج ارزیابی با استفاده از داده‌های رادیوسوند در روزهای فاقد ابر نشان‌دهنده دقت بالاتر محصول MOD05 نسبت به الگوریتم AMSR2 بود، طوری که ضریب تعیین ( $R^2$ ) در TPW حاصل از سنجنده AMSR2 و محصول MOD05 به ترتیب ۰/۵۱۶ و ۰/۶۵۰ و مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) به ترتیب ۵/۱۲۹ و ۴/۵۴۲ میلی‌متر بود. در روزهای ابری مقدار  $R^2$  و RMSE مقادیر حاصل از سنجنده AMSR2 به ترتیب ۰/۲۸۴ و ۷/۳۶۷ میلی‌متر به دست آمدند. مجموعاً در روزهای ابری و فاقد ابر مقدار  $R^2$  و RMSE مقادیر TPW سنجنده AMSR2 به ترتیب ۰/۴۲۰ و ۵/۹۷۶ میلی‌متر محاسبه گردیدند.

**کلمات کلیدی:** بخار آب قابل بارش، ایران، AMSR2، MODIS، رادیوسوند.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۲/۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۶/۲۲

1- Ph. D. Candidate of Water Resources Management in Department of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor in Water Resources Management, Department of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. Email: rahimzadegan@kntu.ac.ir

\*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.

۲- استادیار گروه مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

## ۱- مقدمه

بخار آب قابل بارش<sup>۱</sup> جو (TPW)، مقدار توده بخار آب موجود در یک ستون قائم به مساحت واحد از سطح زمین تا بالای جو است (Frouin et al., 1990). TPW پارامتری مؤثر در واکنش‌های جو-زمین بوده و برآورد آن با قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب در شرایط مختلف آب و هوایی، از اهمیت بالایی برخوردار است (Maghrabi and Al Dajani, 2013). برآورد حداکثر بارش محتمل با استفاده از روش پیشینه‌سازی رطوبت (Casas et al., 2011; Rousseau et al., 2014)، بررسی تغییر اقلیم با تحلیل تغییرات سری زمانی (TPW) (Lee et al., 2016)، تخمین تبخیر از سطح برف (Valeo et al., 2005)، برآورد تبخیر و تعرق (Bordi et al., 2015) و بررسی خشکسالی (Bordi et al., 2016) از جمله مطالعات کاربردی صورت گرفته در حوزه منابع آب با استفاده از پارامتر TPW می‌باشد. روش‌های مختلفی بر مبنای داده‌های زمینی و داده‌های سنجنش از دور برای تخمین TPW ارائه شده است (Chaboureaud et al., 1998). در بخش داده‌های زمینی، ایستگاه‌های رادیوساند، سیستم‌های موقعیت‌یابی جهانی (GPS<sup>2</sup>)، رادیومترهای میکروویو (Niell et al., 2001; Pérez-Ramírez et al., 2014)، سان‌فتومترها<sup>۳</sup> (Halthore et al., 1997) و سیستم‌های لیدار رامن<sup>۴</sup> (Holben and Eck, 1990) (Froidevaux et al., 2013; Grant, 1991; Whiteman et al., 2010) از جمله مجموعه داده‌های پرکاربرد می‌باشند. پراکنده بودن ایستگاه‌های زمینی، به خصوص در نواحی خشک و نیمه خشک، اهمیت به کارگیری روش‌های دقیق سنجنش از دوری در برآورد TPW به صورت روزانه را بیشتر می‌سازد (Gao and Kaufman, 2003). روش‌های سنجنش از دور برآورد TPW را می‌توان به دو دسته روش‌های بر پایه امواج نوری<sup>۵</sup> یا حرارتی (Gao and Kaufman, 2003; Merrikhpour and Rahimzadegan, 2017a; Deeter, 2007) و امواج میکروویو (Seemann et al., 2003; Du et al., 2015; Merrikhpour and Rahimzadegan, 2017b; Sohn and Smith, 2003; Zhou et al., 2016) تقسیم‌بندی نمود. مهم‌ترین مزیت برآورد TPW با استفاده از داده‌های میکروویو نسبت به داده‌های نوری، کاربرد آن در روزهای ابری است. الگوریتم‌های بر مبنای داده‌های نوری در روزهای ابری کارایی نداشته، ولی امواج میکروویو قابلیت عبور از ابرها را دارند. در مقابل، نقطه ضعف داده‌های میکروویو، پایین بودن قدرت تفکیک مکانی آنها است (Jones et al., 2010).

در محدوده امواج میکروویو، (Deeter (2007) بر اساس نسبت اختلاف دمای درخشندگی در باندهای ۱۸ و ۲۳ گیگاهرتز سنجنده

AMSR-E<sup>۶</sup>، الگوریتمی را به منظور بازیابی TPW در سطح اقیانوس و خشکی در کشور آمریکا توسعه داد. ارزیابی نتایج این روش در سطح زمین بر اساس داده‌های شبکه ایستگاه‌های GPS شمال آمریکا در سال ۲۰۰۴ انجام شد. بر اساس نتایج ارزیابی، مقدار RMSE تقریباً به ۶ میلی‌متر محدود شده و مقدار ضریب تعیین R<sup>2</sup> برابر با ۰/۸۹ به دست آمد. Jones et al. (2010) بر اساس دمای درخشندگی در باندهای ۱۸ و ۲۳ گیگاهرتز AMSR-E، در قطبیدگی‌های افقی و قائم در زمان صعود و نزول ماهواره، بدون در نظر گرفتن اثر آب مایع داخل ابر، الگوریتمی برای بازیابی TPW را توسعه دادند. Ji and Shi (2014) با استفاده از نسبت اختلاف دمای درخشندگی در قطبیدگی‌های افقی و قائم باندهای ۱۸ و ۲۳ گیگاهرتز سنجنده AMSR-E، محصولات دمای سطح و TPW سنجنده MODIS<sup>7</sup> در روزهای فاقد ابر، الگوریتمی در برآورد TPW در کشور آمریکا توسعه دادند و آن را به روزهای ابری نیز تعمیم دادند. بر اساس نتایج ارزیابی با مقادیر حاصل از ایستگاه‌های زمینی GPS، مقدار ضریب تعیین R<sup>2</sup> و RMSE در روزهای فاقد ابر به ترتیب ۰/۹۲ و ۴/۱۹ میلی‌متر و در روزهای ابری ۰/۹۱ و ۴/۴۱ میلی‌متر محاسبه شد. (Du et al., 2015) بر اساس دمای درخشندگی در باندهای ۱۸، ۲۳، ۳۶ و ۸۹ گیگاهرتز سنجنده AMSR2 در قطبیدگی‌های افقی و قائم، با در نظر گرفتن اثر آب مایع داخل ابر، دمای سطح و تراز ارتفاعی زمین، الگوریتمی به منظور برآورد TPW در سطح خشکی توسعه دادند. بر اساس ارزیابی نتایج حاصل از این الگوریتم در برابر مقادیر به دست آمده از AIRS<sup>8</sup>، مقدار RMSE به ۴-۵/۶ میلی‌متر محدود و مقدار ضریب تعیین R<sup>2</sup> برابر ۰/۸ محاسبه شد. (Zhou et al., 2016) با استفاده از داده‌های دمای درخشندگی در باندهای ۱۰، ۱۸، ۲۳، ۳۶ و ۸۹ گیگاهرتز سنجنده میکروویو Feng-Yun-3B در قطبیدگی‌های افقی و قائم و بدون در نظر گرفتن اثر آب مایع داخل ابر الگوریتمی به منظور برآورد TPW در مناطقی از چین، مغولستان و سنگاپور توسعه دادند. بر اساس نتایج ارزیابی با استفاده از داده‌های رادیوساند در چین در روزهای ابری مقادیر ضریب تعیین R<sup>2</sup> و خطای RMSE به ترتیب ۰/۵۷ و ۴/۸۴ میلی‌متر محاسبه شدند. (Merrikhpour and Rahimzadegan (2017b) استفاده از دمای درخشندگی در باندهای ۱۸، ۲۳، ۳۶ و ۸۹ گیگاهرتز سنجنده AMSR2 در قطبیدگی‌های افقی و قائم، در پیاده‌سازی اول بدون در نظر گرفتن اثر آب مایع داخل ابر و در پیاده‌سازی دوم با در نظر گرفتن اثر آب مایع داخل ابر، دمای سطح، تراز ارتفاعی زمین و NDVI<sup>9</sup> حاصل از سنجنده MODIS در سال ۲۰۱۶-۲۰۱۵، الگوریتمی به منظور برآورد TPW در نیمه غربی ایران توسعه دادند. ارزیابی نتایج با استفاده از داده‌های رادیوساند انجام شد و مقادیر ضریب تعیین R<sup>2</sup> و خطای RMSE در پیاده‌سازی‌های اول و دوم به ترتیب ۰/۴۵ و ۶/۱۵ میلی‌متر و ۰/۶۴۸ و ۳/۸۹۱ میلی‌متر محاسبه شدند.

دقت الگوریتم در بخش ۳ و خلاصه و جمع‌بندی در بخش ۴ ارائه شده‌اند.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

ایران کشوری نیمه خشک با میانگین بارش یک سوم بارندگی جهان می‌باشد (Mobasheri et al., 2008). از آنجا که بیشتر مناطق شرقی ایران را کویر تشکیل می‌دهد و همچنین اکثر ایستگاه‌های رادیوساند در ایران در منطقه غربی این کشور قرار گرفته‌اند، بنابراین منطقه مورد مطالعه در این مقاله، غرب ایران در نظر گرفته شده است. دامنه مقادیر TPW در ایران حدوداً بین ۲ میلی‌متر تا ۷۰ میلی‌متر متغیر است. شکل (۱-ا) موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

### ۲-۲- داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق از دمای درخشندگی سنجنده AMSR2، محصول TPW مادون قرمز نزدیک و محصول شناسایی ابر سنجنده MODIS و داده‌های TPW رادیوساند استفاده شده که در ادامه به تشریح هریک از آنها پرداخته شده است.

### ۲-۲-۱- دمای درخشندگی سنجنده AMSR2

سنجنده AMSR2 مستقر بر ماهواره GCOM-W1<sup>10</sup> با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ کیلومتر در سال ۲۰۱۲ توسط سازمان پژوهش‌های هوا فضا ژاپن<sup>۱۱</sup> به عنوان جایگزین سنجنده AMSR-E راه‌اندازی شد. AMSR2 دمای درخشندگی در قطبیدگی‌های افقی و قائم را در ۷ باند ۶/۹، ۷/۳، ۱۰/۶، ۱۸/۷، ۲۳/۸، ۳۶/۵ و ۸۹ گیگاهرتز اندازه‌گیری می‌کند (Kachi et al., 2014). AMSR2 محصولات ژئوفیزیکی از قبیل TPW در سطح دریا و اقیانوس‌ها، آب مایع داخل ابر، بارش، دمای سطح دریا، سرعت باد در سطح دریا، میزان یخ دریاها، عمق برف و رطوبت خاک را تولید می‌کند. این سنجنده، تصویربرداری را دو بار در روز هنگام صعود و هنگام نزول انجام می‌دهد (Wu et al., 2016). در این مطالعه از محصولات دمای درخشندگی در باندهای ۱۸/۷ و ۲۳/۸ گیگاهرتز در قطبیدگی‌های افقی و قائم سنجنده AMSR2 در ۶۰ روز مختلف از ۴ فصل سال ۲۰۱۶-۲۰۱۵ شامل روزهای ابری و غیر ابری در زمان صعود ماهواره استفاده شده است (Japan Aerospace Exploration Agency Website, 2016).

در محدوده امواج نوری، (Kaufman and Gao (1992) به معرفی روش سنجنش از دوری برآورد TPW، با بهره‌گیری از بازتابندگی خورشیدی از سطوح پرداختند. مبنای توسعه الگوریتم در این روش بر اساس گذردهی طیفی باند جذبی بخار آب (۰/۹۴۰ میکرومتر) و اطراف باندهای غیر جذبی بخار آب (۱/۰۳ و ۰/۸۷ میکرومتر) بود. (Mobasheri et al. (2008) با استفاده از تصاویر MODIS به بهبود الگوریتم برآورد TPW در نیمه شرقی ایران در شرایط غیرابری پرداختند و ارزیابی نتایج به دست آمده را با ایستگاه‌های رادیوساند و GPS تهران و مشهد انجام دادند. مقدار ضریب تعیین  $R^2$  در ارزیابی ایستگاه‌های رادیوساند در تهران و مشهد به ترتیب ۰/۸۶ و ۰/۷۹ به دست آمد و در ارزیابی کلی ایستگاه‌های GPS، ۰/۸۱ محاسبه شد. (Lu et al. (2011) مقادیر TPW حاصل از سنجنده MODIS مستقر بر دو ماهواره Terra و Aqua (MOD05 و MYD05) را با استفاده از ۲۲ ایستگاه زمینی GPS در جنوب تبت در سال ۲۰۰۸ در شرایط آسمان بدون ابر ارزیابی نمودند. خطای RMSE در این مطالعه حدود ۲/۱ تا ۳/۱۹ میلی‌متر محاسبه گردید. Merrikhpour and Rahimzadegan (2017a) با استفاده از داده‌های محلی، دقت محصول TPW سنجنده MODIS در نیمه غربی ایران در روزهای فاقد ابر در سال ۲۰۱۶-۲۰۱۵ را بهبود دادند. بر اساس نتایج ارزیابی با استفاده از داده‌های رادیوساند، مقادیر ضریب تعیین  $R^2$  و خطای RMSE به ترتیب ۰/۸۷۸ و ۲/۷۰۲ میلی‌متر محاسبه شدند.

با توجه به مطالعات پیشین، کارایی محصولات مختلف نوری و مایکروویو برآورد TPW در مناطق مختلف متفاوت بوده و برای هر منطقه باید آن‌ها را ارزیابی نمود. بنابراین هدف از این مطالعه، ارزیابی مقادیر TPW حاصل از اعمال الگوریتم سنجنده AMSR2 در محدوده امواج مایکروویو در روزهای ابری و فاقد ابر و محصول TPW مادون قرمز نزدیک سنجنده MODIS در محدوده امواج نوری در روزهای فاقد ابر است. از آنجا که اکثر تحقیقات صورت گرفته در زمینه برآورد پارامتر TPW در ایران با استفاده از داده‌های زمینی و روش‌های سنجنش از دور در محدوده امواج نوری می‌باشند؛ به کارگیری و پیاده‌سازی الگوریتم سنجنش از دور در محدوده امواج مایکروویو سنجنده AMSR2 برای اولین بار در ایران و مقایسه نتایج ارزیابی حاصل از آن با نتایج به دست آمده از روش سنجنش از دور در محدوده امواج نوری، نوآوری موجود در این مطالعه می‌باشد. پیاده‌سازی‌های مربوط به ارزیابی دقت این محصولات در سطح خشکی در نیمه غربی ایران توسط داده‌های اندازه‌گیری شده در شش ایستگاه رادیوساند تهران، تبریز، اصفهان، کرمانشاه، اهواز و شیراز انجام شده است. معرفی منطقه مورد مطالعه، داده‌های مورد استفاده و الگوریتم‌های به کار گرفته شده در این مطالعه در بخش ۲، نتایج و تحلیل نتایج و ارزیابی

## ۲-۲-۲- داده‌های سنجنده MODIS

سنجنده MODIS با ۳۶ باند طیفی به عنوان عضوی از سیستم پایش زمین (EOS<sup>12</sup>) در سال ۱۹۹۹ بر روی ماهواره Terra راه‌اندازی و دومین سنجنده MODIS نیز در سال ۲۰۰۲ بر روی ماهواره Aqua مستقر شده است (Justice et al., 2002). از جمله کاربردهای تصاویر ماهواره‌ای MODIS در منابع آب می‌توان به مطالعات مربوط به برآورد تبخیر و تعرق (Sima and Tajrish, 2015; Marbut et al., 2018)، شناسایی سطح برف (Tasdigian and Rahimzadegan, 2017) و تخمین TPW اشاره کرد. در این مطالعه، از محصول TPW سنجنده MODIS مستقر بر ماهواره Terra (MOD05) در محدوده امواج مادون قرمز نزدیک و محصول شناسایی ابر (MOD35) با احتمال بیشتر از ۹۵٪ با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر در بازه زمانی ذکر شده استفاده شده است (NASA Website, 2016) مهم‌ترین نقطه ضعف محصول MOD05، عدم کارایی آن در روزهای ابری است. شکل (۱-ب) نمونه‌ای از تصویر محصول MOD05 در یک روز ابری در کشور ایران را نشان می‌دهد.

## ۳-۲-۲- داده‌های رادیوساند

در این تحقیق، از داده‌های شش ایستگاه رادیوساند تهران (OIII)، تبریز (OITT)، کرمانشاه (OICC)، اهواز (OIAW)، شیراز (OISS) و

اصفهان (OIFM) به منظور ارزیابی الگوریتم توسعه داده شده AMSR2 و محصول MOD05 استفاده شده است (University Website, 2016). در شکل (۱-ا) موقعیت ایستگاه‌های رادیوساند به کار رفته در این مطالعه مشخص می‌باشند.

از ترکیب مجموعه داده‌های ذکر شده، مجموعاً تعداد ۲۷۵ داده در ایستگاه‌های مختلف به منظور ارزیابی محصولات ذکر شده تهیه شد که ۱۸۰ داده مربوط به روزهای فاقد ابر و ۹۵ داده مربوط به روزهای ابری می‌باشند.

## ۳-۲-۳- روش شناسی

سنجنده MODIS دارای محصول استاندارد TPW در سطح خشکی و دریا در مقیاس جهانی است که توسط تیم تحقیقاتی این سنجنده تولید شده است (NASA Website, 2016). اما سنجنده AMSR2 دارای محصول استاندارد TPW تنها در سطح دریا و اقیانوس‌ها در مقیاس جهانی است و در سطح خشکی محصول TPW سنجنده AMSR2 وجود ندارد. در این تحقیق از الگوریتم توسعه داده شده توسط Jones et al. (2010) به منظور برآورد TPW در سطح خشکی با استفاده از داده‌های سنجنده AMSR2 در نیمه غربی ایران استفاده شده است.

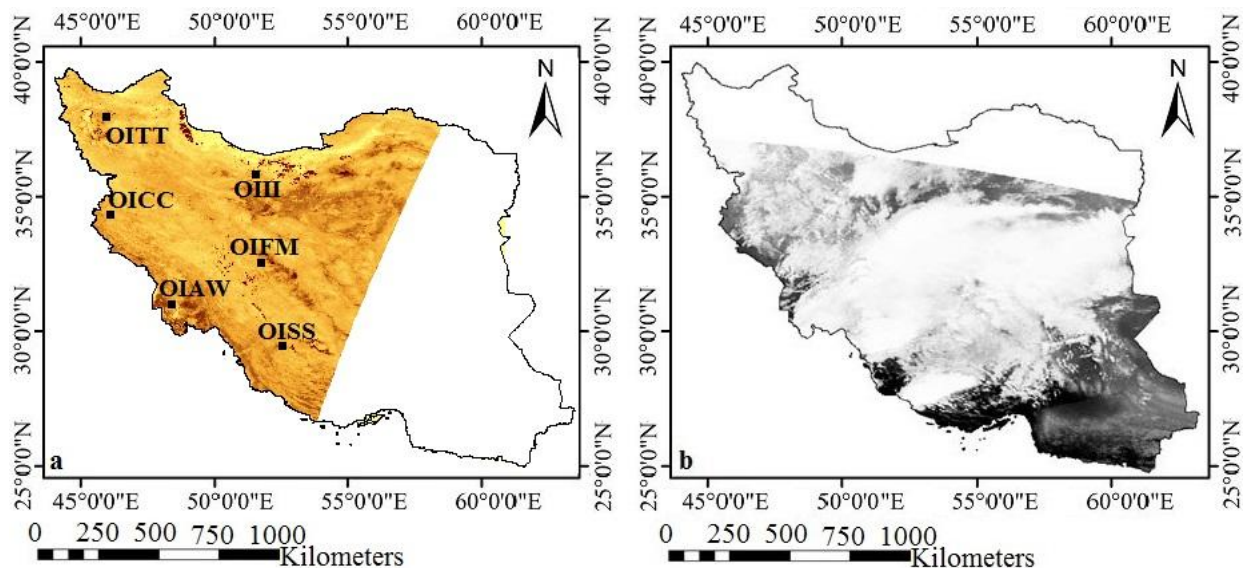


Fig. 1- a) The position of western part of Iran and six radiosonde stations and b) A MOD05 product on a cloudy day in Iran (July 14, 2015)

شکل (۱-ا) موقعیت نیمه غربی ایران و شش ایستگاه رادیوساند و (b) نمونه‌ای از محصول MOD05 در روز ابری در ایران (۱۴ جولای ۲۰۱۵)

۲-۳-۱- الگوریتم استخراج بخار آب قابل بارش جو از سنجنده AMSR2

با فرض اینکه  $\beta = \frac{\varepsilon_v(23.8) - \varepsilon_h(23.8)}{\varepsilon_v(18.7) - \varepsilon_h(18.7)}$  رابطه (۶) به شکل زیر

$$(t_{a23} / t_{a18}) = \frac{M.A.W.V.I}{\beta} \quad (7)$$

رابطه گذردهی جو به صورت زیر می‌باشد (Woodhouse, 2017):

$$t_{a(f)} = e^{-\tau} \quad (8)$$

که  $\tau$  عمق اپتیکی جو می‌باشد و به صورت زیر محاسبه می‌شود (Wentz, 1997):

$$\tau = \sec(\theta)[A_{o(f)} + A_{v(f)} + A_{l(f)}] \quad (9)$$

که  $\theta$  زاویه تابش،  $A_{o(f)}$  جذب امواج میکروویو توسط اکسیژن موجود در جو،  $A_{v(f)}$  جذب امواج میکروویو توسط بخار آب جو و  $A_{l(f)}$  جذب امواج میکروویو توسط آب مایع داخل ابر می‌باشد (Wentz, 1997).

(Jones et al., 2010) جذب امواج میکروویو توسط ذرات مایع داخل

ابر ( $A_{l(f)}$ ) را صفر و روابط  $A_{o(f)}$  و  $A_{v(f)}$  را به شکل خطی در نظر گرفته‌اند:

$$A_{o(f)} = \alpha_{o(f)} \quad (10)$$

$$A_{v(f)} = \alpha_{v(f)} \cdot V \quad (11)$$

که  $V$  مقدار TPW،  $\alpha_{o(f)}$  و  $\alpha_{v(f)}$  نیز ضرایب خطی جذب بخار آب و اکسیژن می‌باشند که توسط مدل جوی سطح اقیانوس بر اساس داده‌های AMSR-E محاسبه شده‌اند (Wentz, 1997). از ترکیب روابط (۷) تا (۱۱) رابطه محاسبه TPW (۷) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V = \frac{\ln\left(\frac{M.A.W.V.I}{\beta}\right)\cos(\theta) + \alpha_{o(23)} - \alpha_{o(18)}}{\alpha_{v(18)} - \alpha_{v(23)}} \quad (12)$$

مقادیر پارامترهای معلوم به کار رفته در روابط بالا در جدول ۱ ارائه شده‌اند. همچنین مقدار  $\delta$  ( $\frac{T_a}{T_s}$ ) در زمان صعود ۰/۹۶ در نظر گرفته

می‌شود (Jones et al., 2010). اساس کار این الگوریتم روش تکرار است. در مرحله اول اجرای الگوریتم، ضریب MAWVI با توجه به مقادیر معلوم دمای درخشندگی باندهای ۱۸/۷ و ۲۳/۸ گیگاهرتز در قطبیدگی‌های افقی و قائم (حاصل از سنجنده AMSR2)، با به کارگیری رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

تابش میکروویو اجسام با پارامتر دمای درخشندگی تعریف می‌شود. مقدار تابش اجسام، متناسب با گسیلندگی سطح می‌باشد و مقدار این پارامتر با توجه به جنس سطح متفاوت است (Jones et al., 2010). رابطه دمای درخشندگی شامل ۳ جزء تابش رو به بالای جو، تابش از سطح زمین و تابش پس پراکنش جو توسط سطح زمین به صورت زیر می‌باشد (Woodhouse, 2017):

$$Tb_{(p,f)} = T_s \varepsilon_{s(p,f)} t_{a(f)} + T_a (1 - t_{a(f)}) + T_a (1 - t_{a(f)}) (1 - \varepsilon_{s(p,f)}) t_{a(f)} \quad (1)$$

که  $T_s$  دمای سطح زمین،  $\varepsilon_s$  گسیلندگی سطح زمین،  $t_a$  گذردهی جو و  $T_a$  دمای مؤثر جو می‌باشد. اندیس‌های  $p$  و  $f$  نیز به ترتیب مربوط به بسامد<sup>۳</sup> و قطبیدگی هستند. به دلیل ناچیز بودن پس پراکنش جو توسط سطح زمین، با صرف نظر کردن از آن، رابطه جدید دمای درخشندگی به صورت زیر بازنویسی می‌شود (Wang and Manning, 2003):

$$Tb_{(p,f)} = T_s \varepsilon_{s(p,f)} t_{a(f)} + T_a (1 - t_{a(f)}) \quad (2)$$

رابطه گسیلندگی سطح زمین شامل دو جز خشکی و آب‌های سطحی موجود در خشکی می‌باشد (Jones et al., 2010):

$$\varepsilon_{s(p,f)} = f_w \varepsilon_{w(p,f)} + (1 - f_w) \varepsilon_{l(p,f)} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{l(p,f)} = \varepsilon_{os(p,f)} t_c + (1 - w)(1 - t_c) \quad (4)$$

که  $f_w$  درصد آب موجود در ناحیه مورد بررسی،  $(1 - f_w)$  درصد خشکی ناحیه مورد بررسی،  $\varepsilon_w$  گسیلندگی سطح آب،  $\varepsilon_l$  گسیلندگی خشکی سطح زمین می‌باشد. که گسیلندگی قسمت خشک زمین خود شامل ۲ قسمت خاک خشک و خیمه گیاهی می‌شود (رابطه ۴).  $\varepsilon_{os}$  گسیلندگی خاک خشک،  $t_c$  گذردهی خیمه گیاهی و  $w$  آلبیدو پراکنش منفرد گیاهی می‌باشد. (Jones et al., 2010) برای برآورد TPW، از نسبت اختلاف دمای درخشندگی در قطبیدگی‌های افقی و قائم در باندهای ۲۳/۸ و ۱۸/۷ گیگاهرتز (ضریب MAWVI<sup>۱۴</sup>) استفاده کردند:

$$MAWVI = \frac{\Delta T_b(23.8)}{\Delta T_b(18.7)} = \frac{T_{bv}(23.8) - T_{bh}(23.8)}{T_{bv}(18.7) - T_{bh}(18.7)} \quad (5)$$

ضریب MAWVI را می‌توان به صورت رابطه (۶) بسط داد:

$$MAWVI = \frac{T_s [t_{a(23.8)} \varepsilon_{s(v,23.8)} - t_{a(23.8)} \varepsilon_{s(h,23.8)} + (1 - t_{a(23.8)}) \delta - (1 - t_{a(23.8)}) \delta]}{T_s [t_{a(18.7)} \varepsilon_{s(v,18.7)} - t_{a(18.7)} \varepsilon_{s(h,18.7)} + (1 - t_{a(18.7)}) \delta - (1 - t_{a(18.7)}) \delta]} = \frac{\varepsilon_v(23.8) - \varepsilon_h(23.8)}{\varepsilon_v(18.7) - \varepsilon_h(18.7)} \left( \frac{t_{a23.8}}{t_{a18.7}} \right) \quad (6)$$

**Table 1- Value of parameters of radiative transfer model used to extract TPW (Jones et al., 2010)**

**جدول ۱- مقادیر پارامترهای مدل انتقال تابشی به کار رفته در استخراج TPW (Jones et al., 2010)**

Physical Model Parameters	Symbol	18.7 GHz	23.8 GHz	Physical Model Parameters	Symbol	18.7 GHz	23.8 GHz
Veg./Roughness single scattering albedo	$\omega$	0.05	0.05	Open water emissivity (H-pol.)	$\epsilon_{wh}$	0.336	0.421
Dry bare soil surface emissivity (V-pol.)	$\epsilon_{osv}$	0.994	0.975	Water Vapor mass absorption coefficient	$\alpha_v$	0.0034	0.0104
Dry bare soil surface emissivity (H-pol.)	$\epsilon_{osh}$	0.771	0.781	Oxygen mass absorption coefficient	$\alpha_o$	0.0103	0.0131
Open water emissivity (V-pol.)	$\epsilon_{wv}$	0.630	0.685	Initial emissivity difference ratio multiplier	$\beta_o$	0.88	0.88

آب جو به ترتیب مربوط به باندهای جذبی ۰/۹۳۶، ۰/۹۴۰ و ۰/۹۰۵ میکرومتر است. مقایسه بین انرژی بازتابیده شده در سه باند جذبی ضعیف، متوسط و قوی بخار آب به مرکزیت‌های به ترتیب ۰/۹۴۰، ۰/۸۶۵ و ۱/۲۴ میکرومتر و دو باند غیرجذبی بخار آب ۰/۸۶۵ و ۱/۲۴ میکرومتر، اساس محاسبه مقادیر محصول استاندارد TPW سنجنده MODIS (MOD05) می‌باشد. کاربرد این الگوریتم در روزهایی است که شرایط آسمان غیر ابری است (Kaufman and Gao, 1992). مشخصات پنج باند مادون قرمز نزدیک مورد استفاده در این الگوریتم در جدول ۲ مشخص می‌باشند (Gao and Kaufman, 1998).

مرحله اول در برآورد TPW محاسبه گذردهی جو می‌باشد. به منظور محاسبه گذردهی جو از دو فرض می‌توان استفاده کرد: (۱) فرض نسبت‌گیری دو باندی: فرض اینکه مقدار بازتابندگی سطح زمین در باند جذبی بخار آب برابر بازتابندگی باند غیر جذبی بخار آب (۰/۸۶ میکرومتر) است. (۲) فرض نسبت‌گیری سه باندی: فرض اینکه بازتابندگی سطح زمین در باند جذبی بخار آب از درون یابی خطی بین بازتابندگی در باندهای روزنه جوی (۰/۸۶ و ۱/۲۴ میکرومتر) محاسبه شود. بنابراین در فرض ۱، بازتابندگی در یک باند جذبی بخار آب و بازتابندگی در یک باند غیر جذبی بخار آب MODIS و در فرض ۲، بازتابندگی در یک باند غیر جذبی بخار آب و بازتابندگی در دو باند غیر جذبی بخار آب MODIS مورد نیاز است (Gao and Kaufman, 2003).

در مرحله بعد، طبق رابطه (۱۲) مقدار TPW (V) محاسبه می‌شود. در رابطه ۱۲، مقدار ضریب MAWVI (محاسبه شده در مرحله قبل)، زاویه تابش و ضرائب خطی جذب اکسیژن و بخار آب  $(\alpha_{o(23)}, \alpha_{o(18)}, \alpha_{v(18)}, \alpha_{v(23)})$  (جدول ۱) مقادیر معلوم هستند. تنها پارامتر مجهول در این رابطه ضریب  $\beta = \frac{\epsilon_v(23.8) - \epsilon_n(23.8)}{\epsilon_v(18.7) - \epsilon_n(18.7)}$  می‌باشد که برای حل این مساله، یک فرض اولیه برای این ضریب (۰/۸۸ طبق جدول ۱) در نظر گرفته می‌شود. در مرحله بعد بر اساس مقدار V محاسبه شده، مقادیر گذردهی جو در باندهای ۱۸/۷ و ۲۳/۸ گیگاهرتز طبق روابط ۱۱-۸ محاسبه می‌شوند. در ادامه با توجه به روابط ارائه شده توسط Jones et al. (2010) مقدار جدید ضریب  $\beta$  محاسبه شده و با فرض اولیه در نظر گرفته شده برای این ضریب، مقایسه می‌شود. اگر مقدار اختلاف در حد قابل قبول بود تکرار متوقف می‌شود و مقدار TPW محاسبه شده در آخرین تکرار تأیید می‌گردد، در غیر این صورت، ضریب جدید  $\beta$  جایگزین فرض اولیه  $\beta$  در آغاز الگوریتم شده و این تکرار تا رسیدن به پایداری مورد نظر ادامه پیدا می‌کند.

### ۲-۳-۲- الگوریتم استخراج بخار آب قابل بارش جو از سنجنده MODIS

مطابق با بررسی‌های انجام شده توسط Kneizys et al. (1988)، بیشترین گذردهی بخار آب جو (کمترین جذب بخار آب) مربوط به باندهای روزنه جوی ۰/۸۶۵ و ۱/۲۴ میکرومتر و کمترین گذردهی بخار

**Table 2- Wavelength and width of five bands of MODIS algorithm (Gao and Kaufman, 1998)**

**جدول ۲- طول موج و پهنای ۵ باند به کار رفته در الگوریتم MODIS (Gao and Kaufman, 1998)**

Band	Central wavelength ( $\mu\text{m}$ )	Band width ( $\mu\text{m}$ )	Band type	Band	Central wavelength ( $\mu\text{m}$ )	Band width ( $\mu\text{m}$ )	Band type
2	0.865	0.04	Split-window	17	0.905	0.03	Weak absorption
5	1.24	0.02	Split-window	18	0.936	0.01	Strong absorption
				19	0.940	0.05	Moderate absorption

در رابطه (۱۵)،  $W^*$  مقدار TPW در مسیر اپتیکی (مایل) است (Kaufman and Gao, 1992). برای محاسبه TPW در راستای قائم ( $W$ ) از رابطه ۱۶ استفاده می‌شود:

$$W^* = W \left( \frac{1}{\cos\theta} + \frac{1}{\cos\theta_0} \right) \quad (16)$$

که  $\theta$  زاویه دید ماهواره و  $\theta_0$  زاویه سمت‌الرأس خورشید است. با توجه به جنس سطح زمین، مراجع مختلف برای  $\alpha$  و  $\beta$  مقادیر متفاوتی را پیشنهاد داده‌اند (Kaufman and Gao, 1992). با توجه به محدوده رطوبت جو، کارایی باندهای مختلف در این الگوریتم متفاوت است. در شرایط خشک که TPW مقادیر پایینی دارد ( $W < 1$  cm) باند جذبی قوی بخار آب ( $0.936$  میکرومتر) با پهنای  $10$  نانومتر که به بخار آب داخل ابر نیز بسیار حساس است پیشنهاد می‌شود. باند جذبی متوسط بخار آب ( $0.940$  میکرومتر) با پهنای  $50$  نانومتر به عنوان باند بهینه در محاسبه TPW در شرایط نیمه مرطوب ( $1 < W < 4$  cm) به کار گرفته می‌شود. در برآورد بخار آب در شرایط مرطوب ( $W > 4$  cm)، باند جذبی متوسط بخار آب اشباع شده و حساسیت آن به بخار آب کاهش می‌یابد. در این حالت باید از باند جذبی ضعیف بخار آب ( $0.905$  میکرومتر) استفاده شود (Gao and Kaufman, 2003). بنابراین در شرایط یکسان جوی، مقادیر جذب بخار آب و در نتیجه حساسیت باندهای جذب بخار آب MODIS شامل باندهای جذب قوی، متوسط و ضعیف ( $0.936$ ،  $0.940$  و  $0.905$  میکرومتر) متفاوت است. از آنجا که در شرایط یکسان جوی هرکدام از باندهای جذبی بخار آب MODIS، مقادیر مختلفی از TPW را ارائه می‌دهند، میانگین با استفاده ترکیبی از مقادیر TPW حاصل شده از ۳ باند مختلف جذبی بخار آب، از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Gao and Kaufman, 1998):

$$W = f_1 w_1 + f_2 w_2 + f_3 w_3 \quad (17)$$

که  $w_1$ ،  $w_2$  و  $w_3$  به ترتیب مقادیر بخار آب حاصل از باندهای جذب قوی، متوسط و ضعیف بخار آب و  $f_1$ ،  $f_2$  و  $f_3$  به ترتیب ضرایب وزنی باندهای جذب قوی، متوسط و ضعیف بخار آب هستند.  $f_1$  و  $f_2$  از نرمال‌سازی ضرایب  $\eta_1$ ،  $\eta_2$  و  $\eta_3$  محاسبه می‌شوند (Gao and Kaufman, 1998):

$$f_i = \frac{\eta_i}{\eta_1 + \eta_2 + \eta_3} \quad (18)$$

$\eta_i$  میزان حساسیت گذردهی جو در باند جذبی مشخص به میزان TPW در همان باند است (Kaufman and Gao, 1998):

$$\eta(\beta, w^*) = \left| \frac{dT_w}{dw^*} \right| = \left| \frac{-0.5\beta T_w}{\sqrt{w^*}} \right| \quad (19)$$

به عنوان مثال طبق فرض ۱، مقدار گذردهی جو در باند جذبی متوسط بخار آب MODIS ( $0.940$  میکرومتر) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Gao and Kaufman, 1998):

$$T_{obs}(0.940 \text{ mm}) = \frac{\rho^*(0.940 \mu\text{m})}{\rho^*(0.865 \mu\text{m})} \quad (13)$$

$T$  گذردهی جو و  $\rho^*$  بازتابندگی ظاهری سطح می‌باشد. مقدار گذردهی جو در باند جذبی متوسط بخار آب MODIS ( $0.940$  میکرومتر) طبق فرض نسبت‌گیری سه باندی از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Gao and Kaufman, 1998):

$$T_{obs}(0.940 \mu\text{m}) = \frac{\rho^*(0.940 \mu\text{m})}{[c_1 \times \rho^*(0.865 \mu\text{m}) + c_2 \times \rho^*(1.240 \mu\text{m})]}$$

که در این حالت مقدار ضرایب  $c_1$  و  $c_2$  به ترتیب  $0.8$  و  $0.2$  می‌باشند (Gao and Kaufman, 1998). شکل ۲ مقادیر گذردهی جو محاسبه شده از فرض نسبت‌گیری ۲ باندی در باندهای جذبی قوی، متوسط و ضعیف بخار آب در برابر مقادیر TPW را نشان می‌دهد. مقادیر میانگین  $T_w$  (گذردهی جو) در نمودار شکل ۲ برای انواع پوشش گیاهی، خاک و برف متنوع است (Bowker et al., 1985). با توجه به شکل ۲، رابطه‌نمایی بین  $T_w$  و TPW وجود دارد. رابطه (۱۵) برای محاسبه TPW با استفاده از گذردهی جو در باندهای جذبی بخار آب استفاده می‌شود (Reagan et al., 1987):

$$T_w = \exp(\alpha - \beta \sqrt{w^*}) \quad (15)$$

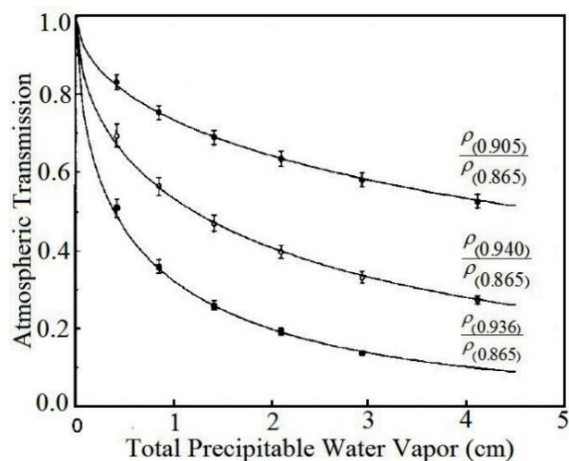


Fig. 2- Graphs of atmospheric transmission versus the TPW in strong, moderate, and weak absorption bands (Kaufman and Gao, 1992)

شکل ۲- نمودار گذردهی جو در برابر TPW در باندهای جذبی قوی، متوسط و ضعیف (Kaufman and Gao, 1992)

### ۳- نتایج و تحلیل نتایج

می‌باشد و به طور کلی سنجنده MODIS در مقایسه با سنجنده AMSR2 مقادیر بالاتری از TPW را نشان می‌دهد. از استخراج مقادیر TPW حاصل از سنجنده AMSR2، محصول MOD05 سنجنده MODIS، و جمع‌آوری داده‌های رادیوساند در روزهای فاقد ابر در بازه زمانی ذکر شده، ۱۸۰ داده تهیه شد. شکل ۴ نمودارهای ارزیابی نتایج به دست آمده از دو محصول را نشان می‌دهد. زمان گذر سنجنده‌های AMSR2 و MODIS مطابق یکدیگر می‌باشد.

شکل ۳، نقشه پهنه‌بندی بخار آب قابل بارش محصول مادون قرمز نزدیک سنجنده MODIS (MOD05) و مقادیر حاصل از سنجنده AMSR2 در نیمه غربی ایران در روز ۱۲ جولای ۲۰۱۵ را در کنار یکدیگر نشان می‌دهد. رنگ خاکستری نشان‌دهنده نواحی بدون مقدار می‌باشد.

با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که مقادیر TPW حاصل از سنجنده MODIS نسبت به مقادیر حاصل شده از سنجنده AMSR2 در روزهای غیرابری دقت بالاتری دارند، به طوری که مقدار ضریب تعیین  $R^2$ ، خطای RMSE و خطای مطلق در مقادیر محصول MOD05 به ترتیب ۰/۶۵، ۴/۵۴۲ میلی‌متر و ۳۴/۵۷٪ و در نتایج حاصل از الگوریتم AMSR2 به ترتیب ۰/۵۱۶، ۵/۱۲۹ میلی‌متر و ۳۴/۷٪ می‌باشد.

همانطور که از شکل ۳ مشخص است در هر دو پهنه‌بندی، مقدار TPW در سواحل جنوبی و شمالی کشور بیشترین مقدار را دارد و در مناطق مرکزی کشور کمترین مقدار را دارد. بیشترین مقدار TPW در محصول MOD05 و سنجنده AMSR2 به ترتیب ۶۰/۱۸ و ۴۰/۶۸ میلی‌متر می‌باشد که مقدار بیشینه TPW محصول MOD05 حدود ۲۰ میلی‌متر بیشتر از بیشینه مقدار TPW حاصل از سنجنده AMSR2

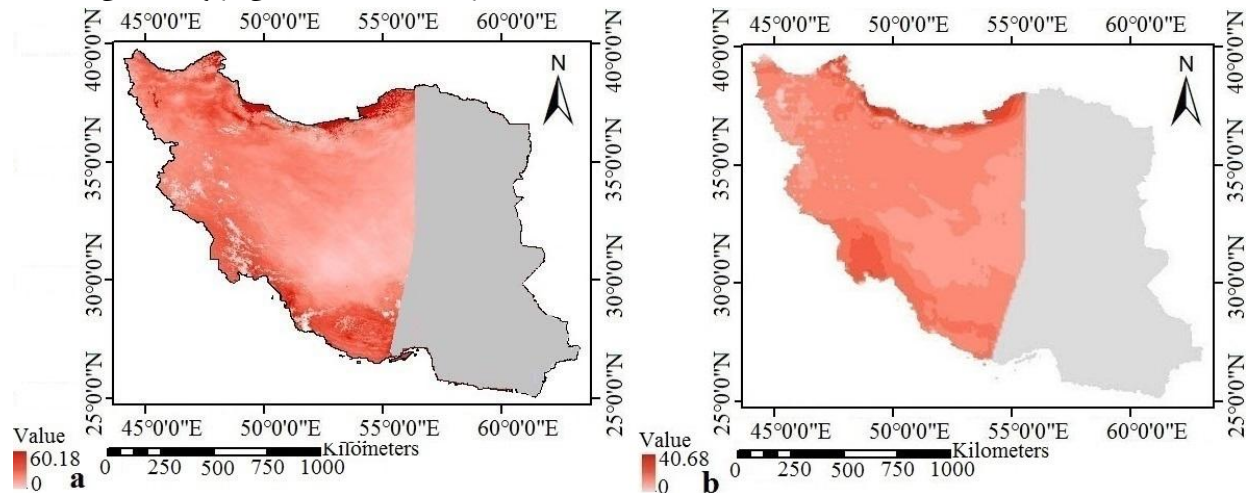


Fig. 3- The zonation map of TPW in the western part of Iran (July 12, 2015), a) MOD05 product and b) AMSR2 algorithm

شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی TPW در نیمه غربی ایران (۱۲ جولای ۲۰۱۵)، (a) محصول MOD05 و (b) الگوریتم AMSR2

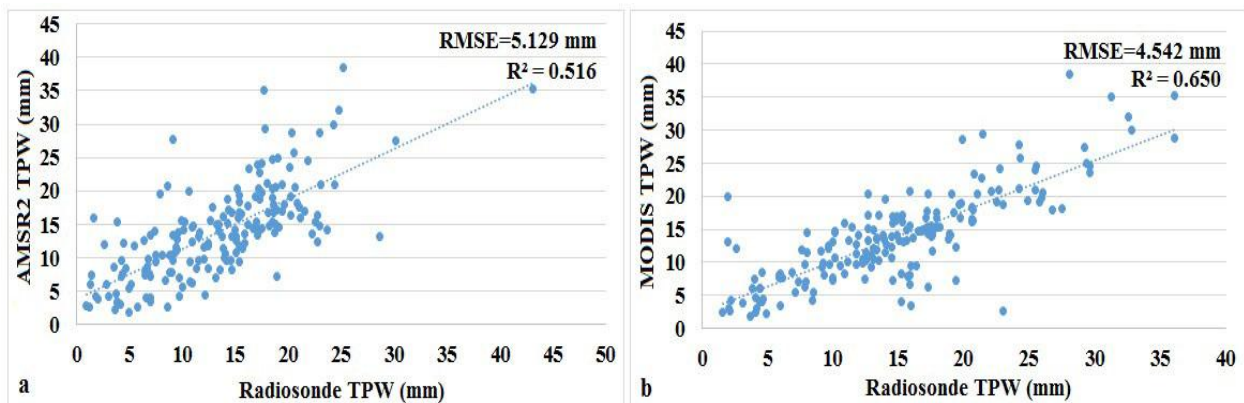


Fig. 4- The validation results of TPW value in the clear sky conditions at 6 radiosonde stations versus a) AMSR2 algorithm and b) MODIS algorithm

شکل ۴- نتایج ارزیابی مقادیر TPW در روزهای فاقد ابر در شش ایستگاه رادیوساند در برابر (a) الگوریتم سنجنده AMSR2 و (b) الگوریتم سنجنده MODIS



هواشناسی در پیش‌بینی دقیق وضعیت جو و همچنین مسائل منابع آب مانند تخمین حداکثر بارش محتمل می‌باشد. از آنجا که ایران سرزمینی نسبتاً خشک است، دستیابی به مقدار این پارامتر با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا یکی از ابزارهای مدیریت به روز منابع آب می‌باشد. ایستگاه‌های زمینی مانند رادیوساند و GPS به عنوان یک مجموعه داده سستی، مقدار TPW را به صورت نقطه‌ای برآورد می‌کنند؛ اما در پهنه‌های وسیع این داده‌ها از دقت لازم برخوردار نیستند. از آنجا که محصول TPW مادون قرمز نزدیک سنجنده MODIS (MOD05) به صورت روزانه و رایگان در اختیار کاربران قرار دارد، در این مطالعه کارایی این محصول در روزهای فاقد ابر و همچنین الگوریتم توسعه داده شده توسط Jones et al. (2010) در محدوده امواج مایکروویو سنجنده AMSR2 در روزهای ابری و فاقد ابر در نیمه غربی ایران در سطح خشکی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج ارزیابی با استفاده از داده‌های رادیوساند، در روزهای فاقد ابر مقدار ضریب تعیین  $R^2$  و خطای RMSE در نتایج حاصل شده از سنجنده AMSR2 به ترتیب  $0/516$  و  $5/129$  میلی‌متر و در نتایج حاصل شده از محصول مادون قرمز نزدیک MOD05 به ترتیب  $0/65$  و  $4/542$  میلی‌متر به دست آمد. نتایج تحقیق نشان داد که دقت الگوریتم مربوط به سنجنده MODIS از محصول سنجنده AMSR2 بالاتر است. در روزهای ابری مقدار ضریب تعیین  $R^2$  و خطای RMSE در نتایج حاصل شده از سنجنده AMSR2 به ترتیب  $0/284$  و  $7/367$  میلی‌متر محاسبه شد که مقادیر قابل قبولی نمی‌باشند. در مجموع روزهای ابری و فاقد ابر، مقدار ضریب تعیین  $R^2$  و خطای RMSE در نتایج حاصل شده از سنجنده AMSR2 به ترتیب  $0/42$  و  $5/976$  میلی‌متر به دست آمد. عدم نظر گرفتن اثر آب مایع داخل ابر منبع اصلی وجود خطا در الگوریتم سنجنده AMSR2 در برآورد TPW در روزهای ابری است (Jones et al., 2010).

همچنین دقت هر دو الگوریتم (شکل ۴-a و ۴-b) در پیش‌بینی TPW با مقادیر بالا کمتر از دقت پیش‌بینی این پارامتر با مقادیر پایین است. پس از استخراج مقادیر TPW حاصل از سنجنده AMSR2 و جمع‌آوری داده‌های رادیوساند در روزهای ابری در بازه زمانی ذکر شده، ۹۵ داده تهیه شد. شکل (۵-a) نمودار ارزیابی نتایج به دست آمده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۵-a) مشاهده می‌شود که مقادیر TPW حاصل شده از سنجنده AMSR2 در روزهای ابری دقت بالایی ندارند، به طوری که مقدار ضریب تعیین  $R^2 = 0/284$ ، خطای RMSE  $7/367$  میلی‌متر و خطای مطلق  $41/7\%$  محاسبه شدند. از مقایسه این مقادیر در برابر دقت متناظر این سنجنده در روزهای فاقد ابر، مقدار ضریب تعیین  $R^2$  به اندازه  $0/232$  کاهش، خطای RMSE به میزان  $2/238$  میلی‌متر افزایش و خطای مطلق نیز به مقدار  $7/05\%$  افزایش یافته است. شکل (۵-b) نمودار ارزیابی مقادیر TPW حاصل شده از سنجنده AMSR2 با استفاده از داده‌های رادیوساند در ۲۷۵ داده به طور کلی در روزهای ابری و فاقد ابر را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۵-b) در استخراج مقادیر TPW حاصل از AMSR2 در مجموع روزهای ابری و فاقد ابر مقدار ضریب تعیین  $R^2$  برابر با  $0/420$ ، خطای RMSE برابر با  $5/976$  میلی‌متر و همچنین خطای مطلق  $36/97\%$  محاسبه شده است. از آنجا که منبع اصلی تولید خطا در این الگوریتم عدم نظر گرفتن اثر آب مایع داخل ابر است (Du et al., 2015; Merrikhpour and Rahimzadegan, 2017b) می‌توان نتیجه گرفت که وجود ابر باعث کاهش دقت الگوریتم استخراج TPW از داده‌های سنجنده AMSR2 می‌شود.

#### ۴- خلاصه و جمع‌بندی

بخار آب قابل بارش (TPW) جو یکی از پارامترهای مهم در مسائل

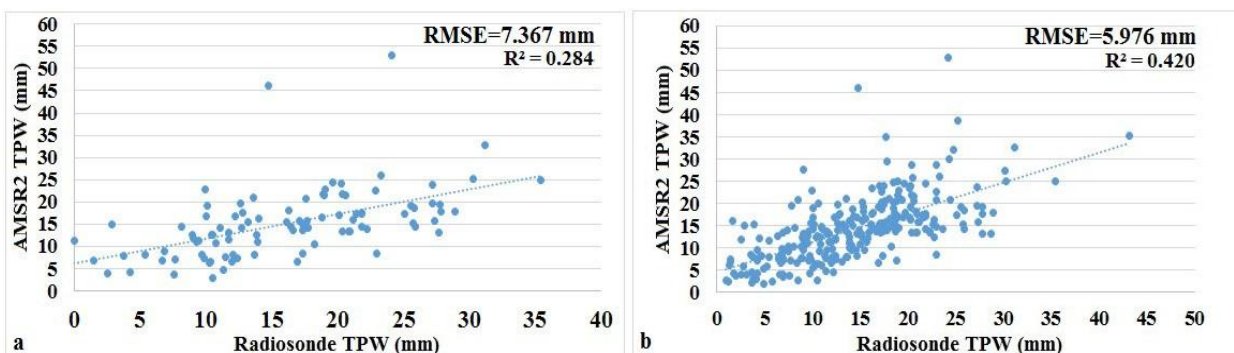


Fig. 5- The validation results of TPW value at 6 radiosonde stations versus AMSR2 algorithm: a) in the cloudy sky conditions and b) in the cloudy and clear sky conditions

شکل ۵- نتایج ارزیابی مقادیر TPW در شش ایستگاه رادیوساند در برابر الگوریتم سنجنده AMSR2: (a) در روزهای ابری و (b) در روزهای ابری و فاقد ابر

Casas MC, Rodríguez R, Prohom M, Gázquez A and Redaño A (2011) Estimation of the probable maximum precipitation in Barcelona (Spain). *International Journal of Climatology*. Wiley Online Library 31(9):1322-1327

Chaboureaud J, Chédin A and Scott NA (1998) Remote sensing of the vertical distribution of atmospheric water vapor from the TOVS observations: Method and validation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. Wiley Online Library 103(D8):8743-8752

Deeter MN (2007) A new satellite retrieval method for precipitable water vapor over land and ocean. *Geophysical research letters*, Wiley Online Library 34(2)

Du J, Kimball JS and Jones LA (2015) Satellite microwave retrieval of total precipitable water vapor and surface air temperature over land from AMSR2. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. IEEE 53(5):2520-2531

Froidevaux M, Higgins CW, Simeonov V, Ristori P, Pardyjak E, Serikov I, Calhoun R, Van Den Bergh H and Parlange MB (2013) A Raman lidar to measure water vapor in the atmospheric boundary layer. *Advances in Water Resources* 51:345-356

Frouin R, Deschamps P-Y and Lecomte P (1990) Determination from space of atmospheric total water vapor amounts by differential absorption near 940 nm: Theory and airborne verification. *Journal of Applied Meteorology* 29(6):448-460

Gao B and Kaufman Y (1998) The MODIS Near-IR water vapor algorithm (Algorithm theoretical basis document, ATBD-MOD05). NASA, 25p

Gao B and Kaufman Y (2003) Water vapor retrievals using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) near-infrared channels. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library 108(D13)

Grant WB (1991) Differential absorption and Raman lidar for water vapor profile measurements: a review. *Optical Engineering*. International Society for Optics and Photonics 30(1):40-49

Halthore RN, Eck TF, Holben BN and Markham BL (1997) Sun photometric measurements of atmospheric water vapor column abundance in the 940nm band. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. Wiley Online Library 102(D4):4343-4352

Holben BN and Eck TF (1990) Precipitable water in the Sahel measured using sun photometry. *Agricultural and Forest Meteorology* 52(1-2):95-107

به طور کلی با مقایسه نتایج به دست آمده در این تحقیق با دیگر مطالعات صورت گرفته در برآورد TPW، مشاهده می‌شود که دقت نتایج حاصل شده در این تحقیق در روزهای فاقد ابر مناسب و قابل قبول است اما دقت نتایج ارزیابی در روزهای ابری پایین و نامناسب است همان طور که نتایج با دقت پایین در مطالعات Zhou et al. (2016) ( $R^2=0/57$  و  $RMSE=4/84$  mm) و Merrikhpour and Rahimzadegan (2017b) ( $R^2=0/45$ ) در حالت بدون در نظر گرفتن اثر آب مایع داخل ابر مشاهده شد. برای بالا رفتن دقت در روزهای ابری، در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود اثر پارامتر آب مایع داخل ابر در الگوریتم لحاظ و بررسی شود. در مجموع، با توجه به امکان پهنه‌بندی TPW توسط تصاویر ماهواره‌ای در تمام روزهای سال می‌توان از این داده‌ها برای تعیین TPW استفاده نمود و آن را در مدل‌های مختلف هواشناسی، هیدرولوژی و اقلیمی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در آن به کار برد.

#### پی‌نوشت‌ها

- 1- Total Precipitable Water Vapor
- 2- Global Positioning System
- 3- Sun Photometer
- 4- Raman Lidar
- 5- Optical
- 6- Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS
- 7- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
- 8- Atmospheric Infrared Sounder
- 9- Normalized Difference Vegetation Index
- 10- Global Change Observation Mission-Water 1
- 11- Japan Aerospace Exploration Agency
- 12- Earth Observing System
- 13- Frequency
- 14- Microwave Atmospheric Water Vapor Index

#### ۵- مراجع

Bordi I, Raziei T, Pereira LS and Sutera A (2015) Ground-based GPS measurements of precipitable water vapor and their usefulness for hydrological applications. *Water resources management*, Springer 29(2):471-486

Bordi I, Zhu X and Fraedrich K (2016) Precipitable water vapor and its relationship with the Standardized Precipitation Index: ground-based GPS measurements and reanalysis data. *Theoretical and applied climatology*, Springer 123(1-2):263-275

Bowker D, Davis R, Myrick D, Stacy K and Jones W (1985) Spectral reflectances of natural targets for use in remote sensing studies. NASA, 188p

- Merrikhpour MH and Rahimzadegan M (2017b) An introduction to an algorithm for extracting precipitable water vapor over land from AMSR2 Images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 10(9)
- Mobasheri MR, Purbagher Kordi SM, Farajzadeh M and Sadeghi Naeini A (2008) Improvement of remote sensing techniques in TPW assessment using radiosonde data. *Journal of Applied Sciences* 8:480-488
- NASA Website (2016) Available at: <https://ladsweb.nascom.nasa.gov>
- Niell AE, Coster AJ, Solheim FS, Mendes VB, Toor PC, Langley RB and Upham CA (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
- Pérez-Ramírez D, Whiteman DN, Smirnov A, Lyamani H, Holben BN, Pinker R, Andrade M and Alados-Arboledas L (2014) Evaluation of AERONET precipitable water vapor versus microwave radiometry, GPS, and radiosondes at ARM sites. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library 119(15):9596-9613
- Reagan J, Thome K, Herman B and Gall R (1987) Water vapor measurements in the 0.94 micron absorption band- calibration, measurements and data applications. In: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS87)*, The University of Michigan, United States, 63-67
- Rousseau AN, Klein IM, Freudiger D, Gagnon P, Frigon A and Ratté-Fortin C (2014) Development of a methodology to evaluate probable maximum precipitation (PMP) under changing climate conditions: Application to southern Quebec, Canada. *Journal of hydrology* 519:3094-3109
- Seemann SW, Li J, Menzel WP and Gumley LE (2003) Operational retrieval of atmospheric temperature, moisture, and ozone from MODIS infrared radiances. *Journal of applied meteorology* 42(8):1072-1091
- Sohn B-J and Smith EA (2003) Explaining sources of discrepancy in SSM/I water vapor algorithms. *Journal of climate* 16(20):3229-3255
- Valeo C, Skone SH, Ho CLI, Poon SKM and Shrestha SM (2005) Estimating snow evaporation with GPS derived precipitable water vapour. *Journal of Hydrology* 307(1-4):196-203
- Wang JR and Manning W (2003) Near concurrent MIR, SSM/T-2, and SSM/I observations over snow-
- Japan Aerospace Exploration Agency Website (2016) Available at: <https://gcom-w1.jaxa.jp/auth.html>
- Ji D and Shi J (2014) Water vapor retrieval over cloud cover area on land using AMSR-E and MODIS. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, IEEE 7(7):3105-3116
- Jones LA, Ferguson CR, Kimball JS, Zhang K, Chan STK, McDonald KC, Njoku EG and Wood EF (2010) Satellite microwave remote sensing of daily land surface air temperature minima and maxima from AMSR-E. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, IEEE 3(1):111-123
- Justice CO, Townshend JRG, Vermote EF, Masuoka E, Wolfe RE, Saleous N, Roy DP and Morisette JT (2002) An overview of MODIS land data processing and product status. *Remote sensing of Environment*, Elsevier 83(1-2):3-15
- Kachi M, Hori M, Maeda T and Imaoka K (2014) Status of validation of AMSR2 on board the GCOM-W1 satellite. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2014 IEEE International, IEEE, 110-113
- Kaufman YJ and Gao B-C (1992) Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 30(5):871-884
- Kneizys F, Shettle E, Abreu L, Chetwynd J and Anderson G (1988) Users guide to LOWTRAN 7. DTIC Document
- Lee O, Park Y, Kim ES and Kim S (2016) Projection of Korean probable maximum precipitation under future climate change scenarios. *Advances in Meteorology*. Hindawi
- 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*, Wiley Online Library 116(D23)
- Maghrabi A and Al Dajani HM (2013) Estimation of precipitable water vapour using vapour pressure and air temperature in an arid region in central Saudi Arabia. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences* 14(1):1-8
- Merrikhpour MH and Rahimzadegan M (2017a) Improving the algorithm of extracting regional total precipitable water vapor over land from MODIS images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 55(10)

- Wyoming University Website (2016) Radiosonde data. <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
- Zhou F-C, Song X, Leng P, Wu H and Tang B-H (2016) An algorithm for retrieving precipitable water vapor over land based on passive microwave satellite data. *Advances in Meteorology*, Hindawi, <http://dx.doi.org/10.1155/2016/4126393>
- Marbut B, Ashrafzadeh A, Vazifehdoust M and Khaledian MR (2018) Comparing actual evapotranspiration rates derived from MOD16 product and simulated using SWAP model (Case study: Corn fields in Qazvin Province). *Iran-Water Resources Research* 14(2):81-93 (In Persian)
- Sima S and Tajrishi M (2015) Estimation of Urmia Lake evaporation using remote sensing data. *Iran-Water Resources Research* 11(1):32-48 (In Persian)
- Tasdighian M and Rahimzadegan M (2017) Evaluation and improvement of snow cover detection from MODIS images. *Iran-Water Resources Research* 13(1):163-177 (In Persian)
- covered surfaces. *Remote Sensing of Environment* 84(3):457-470
- Wentz FJ (1997) A well-calibrated ocean algorithm for special sensor microwave/imager. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library 102(C4):8703-8718
- Whiteman DN, Rush K, Rabenhorst S, Welch W, Cadirola M, McIntire G, Russo F, Adam M, Venable D and Connell R (2010) Airborne and ground-based measurements using a high-performance Raman lidar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 27(11):1781-1801
- Woodhouse IH (2017) Introduction to microwave remote sensing. CRC press
- Wu Q, Liu H, Wang L and Deng C (2016) Evaluation of AMSR2 soil moisture products over the contiguous United States using in situ data from the International Soil Moisture Network. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 45:187-199