



Extraction of total precipitable water and the effect of fine dust on its retrieval in the atmosphere of Mehrabad

Seyed Mahdi Pazhuan

Department of Geography, Payame Noor University, Tehran, Iran.

**Corresponding Author: M.pourbagher@pnu.ac.ir*

Original Paper

Received: 9.9.2023
Accepted: 12.9.2024

Keywords:

total precipitable water,
MODIS,
aerosol or fine particles,
Mehrabad.

Abstract

The distribution of precipitable water on the scale of the earth is needed in order to increase the understanding of the hydrological cycle, the interaction of the biosphere and the atmosphere, the changes in the energy balance, and the monitoring of climate changes caused by greenhouse gases. Knowing the total amount of precipitable water is very useful in predicting floods, rainfall volume, designing water storage dams and designing hydrological models. The most important factor that causes errors in estimating total precipitable water from satellite images is the presence of fine dust. The purpose of this research is to recover precipitable water from MODIS satellite images and the effect of fine dust in its recovery. The most important materials of this research are MODIS sensor images from Tehran province, ENVI processor program and the method of this quantitative-applied research. The results of the study show that the precipitable water vapor obtained from band 19 to 2 in the upper atmosphere of Mehrabad, Tehran is equal to 4.69 mm on average. Also, studies show that the effect of fine particles on water vapor measurement depends on the intensity of surface reflectivity. Particulate matter weakens the reflected solar radiation in atmospheric openings and as a result reduces the radiation reaching the sensor. Also, the direct radiation of the sun is scattered towards the sensor and increases the input signal to the sensor. Also, one of the most important limitations of using this method is the cloud free and calm and almost stable atmosphere.



استخراج کل آب قابل بارش و تأثیر ریزگردها در بازیابی آن در جو مهرآباد

سید مهدی پژوهان

استادیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: M.pourbagher@pnu.ac.ir

نوع مقاله:	چکیده
علمی-پژوهشی	
تاریخچه مقاله:	
ارسال: ۱۴۰۲/۰۶/۱۸	
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۲	
کلمات کلیدی:	
کل آب قابل بارش، MODIS، آئروسول یا ریزگردها، مهرآباد.	نحوه پراکنش آب قابل بارش در مقیاس کره زمین، به منظور افزایش درک چرخه هیدرولوژی، برهمکنش زیست کره و جو، تغییرات بیلان انرژی و پایش تغییرات اقلیمی ناشی از گازهای گلخانه‌ای مورد نیاز است. اطلاع از میزان کل آب قابل بارش در پیش‌بینی سیل، حجم نزولات جوئی، طراحی سدهای ذخیره آب و طراحی مدل‌های هیدرولوژی بسیار کاربرد دارد. مهم‌ترین عاملی که باعث ایجاد خطا در برآورد کل آب قابل بارش از تصاویر ماهواره‌ای می‌کند، حضور ریزگردها است. هدف از این تحقیق بازیابی آب قابل بارش از تصاویر ماهواره‌ای MODIS و تأثیر ریزگردها در بازیابی آن است. مهم‌ترین مواد این تحقیق، تصاویر سنجنده MODIS از استان تهران، برنامه پردازشگر ENVI و روش این تحقیق کمی-کاربردی است. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که بخار آب قابل بارش حاصل از باند ۱۹ به ۲ در جو بالای مهرآباد تهران به طور متوسط برابر با ۴/۶۹ میلی‌متر به دست آمده است. همچنین مطالعات نشان می‌دهد که اثر ریزگرد روی سنسجش بخار آب به میزان شدت بازتابندگی سطحی بستگی دارد. ریزگردها، تابش بازتابیده خورشیدی را در روزنه‌های جوئی تضعیف کرده و در نتیجه تابش رسیده به سنجنده را کاهش می‌دهد. همچنین تابش مستقیم خورشید را به سمت سنجنده پراکنده کرده باعث افزایش سیگنال ورودی به سنجنده می‌شود. همچنین از مهم‌ترین محدودیت‌های استفاده از این روش، شرایط آسمان فاقد ابر و جو آرام و تقریباً پایدار است.

مقدمه

طبق تعریف، کل آب قابل بارش (TPW^1)، کل رطوبت موجود در ستون جو است که اگر کاملاً فشرده شود به قطرات ریز مایع تبدیل می‌گردد و برحسب ارتفاع ایستایی آب، عموماً میلی‌متر، بیان می‌شود. بنابراین آب قابل بارش مرحله قبل از تراکم بخار آب است، به همین دلیل در بازیابی بخار آب قابل بارش عموماً از تصاویر ماهواره‌های هواشناسی بدون ابر استفاده می‌شود؛ البته با به‌کارگیری باندهای جذبی قوی بخار آب مثل باند شماره ۱۸ مودیس به مرکزیت ۰/۹۳۵ میکرومتر می‌توان میزان بخار آب موجود در داخل و بالای ابرها را نیز سنجش کرد (Kaufman & Gao, 1992). توزیع بخار آب در جو مستقیماً بستگی به توزیع دمای هوا دارد. به همین دلیل مقدار بخار آب موجود در جو استوا به مراتب بیشتر از مقدار آن در قطبین است. در واقع میزان رطوبت مطلق در استوا زیاد و در قطبین کمتر است، اما میزان رطوبت نسبی برعکس است (Pourbagher Kurdi, 2007).

آب قابل بارش الزاماً به مفهوم نزولات جوی نخواهد بود. این که چه مقدار از این آب به سطح زمین خواهد رسید به بسیاری از پارامترهای دیگر مثل مقدار و نوع هواویزها، دما و فشار جو، جهت و سرعت باد و غیره بستگی دارد (Pourbagher Kurdi et al., 2006).

Kaufman & Gao (۱۹۹۲) با موفقیت توانستند مقدار بخار آب جو را از طریق باند مادوق قرمز نزدیک سنجنده EOS/MODIS استخراج کنند آن‌ها با بکارگیری باندهای تکمیلی، عدم قطعیت در تخمین را به حداقل رساندند. KING et al. (۱۹۹۲) روش‌های مختلفی را برای سنجش ویژگی‌های جوی با استفاده از MODIS مرور می‌کنند و تأکید اصلی بر کاربردهای مهم تصاویر MODIS در تعیین خواص نوری، میکرو فیزیکی و فیزیکی ابرها و ذرات آئروسول از بازتاب طیفی و اندازه‌گیری‌های گسیل حرارتی دارند.

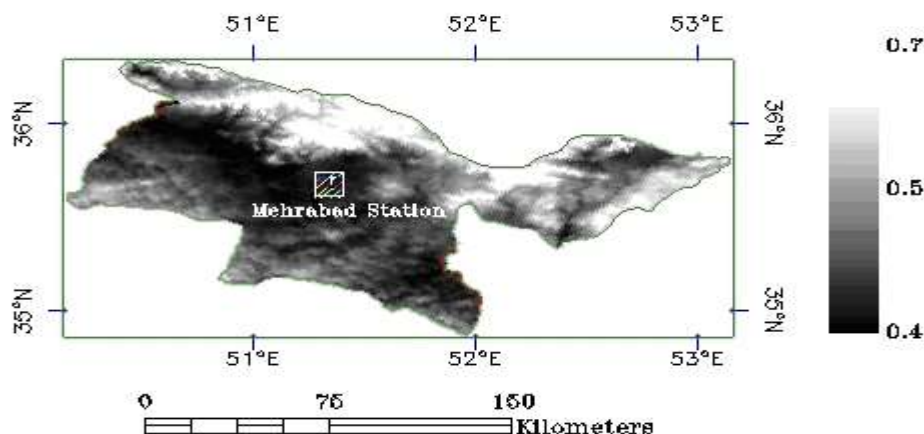
Aoki & Inoue (۱۹۸۲) کل آب قابل بارش را روی اقیانوس‌های مناطق حاره‌ای با کمک باند مادون قرمز (۱۰/۵ تا ۱۲/۵ میکرومتر) از ماهواره GMS ژاپنی استخراج کردند. داده‌های به‌دست‌آمده از این ماهواره توافق خوبی با داده‌های رادیوساوند داشتند. آن‌ها خطای RMS را ۰/۵۳ گرم بر سانتی‌متر مربع به دست آوردند.

برخی از پژوهشگران (Jiafei & Zhizhao, 2022) آب قابل بارش کلی را با استفاده از MODIS برآورد و سپس با داده‌های تأخیر سیگنال حاصل از بخار آب توسط GPS زمینی مقایسه کردند که نتایج کارشان نشان از توافق بالای بین داده‌های فضایی و زمینی مذکور دارد.

مواد و روش‌ها

تصاویر مودیس از مهم‌ترین مواد این تحقیق است. روش تحقیق از نوع کمی و کاربردی است. شکل ۱ تصویر مودیس برای منطقه مورد مطالعه در استان تهران همراه با بازتابندگی را نشان می‌دهد.

¹ Total Water Vapour



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه در استان تهران؛ نقاط روشن تر بازتابندگی بیشتر و نقاط تیره تر بازتابندگی کمتر را نشان می دهد.

Fig. 1- Study area in Tehran Province. Brighter areas indicate higher reflectance, while darker areas represent lower reflectance.

در اینجا بعد از معرفی روش استخراج آب قابل بارش و اثرات ریزگردها به بازیابی آن نیز پرداخته شده است.

۱- روش بازیابی آب قابل بارش

نام روش بازیابی آب قابل بارش Near Infra-Red (NIR) نام دارد، علت این نام گذاری استفاده از باندهای شماره ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲ که در دامنه طیفی مادون قرمز نزدیک سنجنده مودیس قرار گرفته اند، است. علاوه بر باندهای فوق از باند شماره ۵ مودیس که در دامنه طیفی مادون قرمز با طول موج کوتاه قرار گرفته است نیز استفاده می شود. ولی از آنجائی که باند شماره ۵ تصویر منتخب مودیس از نسبت سیگنال به نویز کمی (مقدار ۷۴ در جدول ۱) برخوردار بودند، لذا از باند شماره ۲ به علت داشتن نسبت سیگنال به نویز بالا (مقدار ۲۰۱ در جدول ۱) به عنوان باند روزنه بخار آب در محاسبات استفاده شده است. مشخصات طیفی باندهایی از مودیس که در بازیابی آب قابل بارش کاربرد دارند در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- مشخصات طیفی باندهایی از مودیس که در بازیابی آب قابل بارش و ریزگردها کاربرد دارند.

Table 1- Spectral Characteristics of MODIS Bands Used in Retrieving Precipitable Water and Dust.

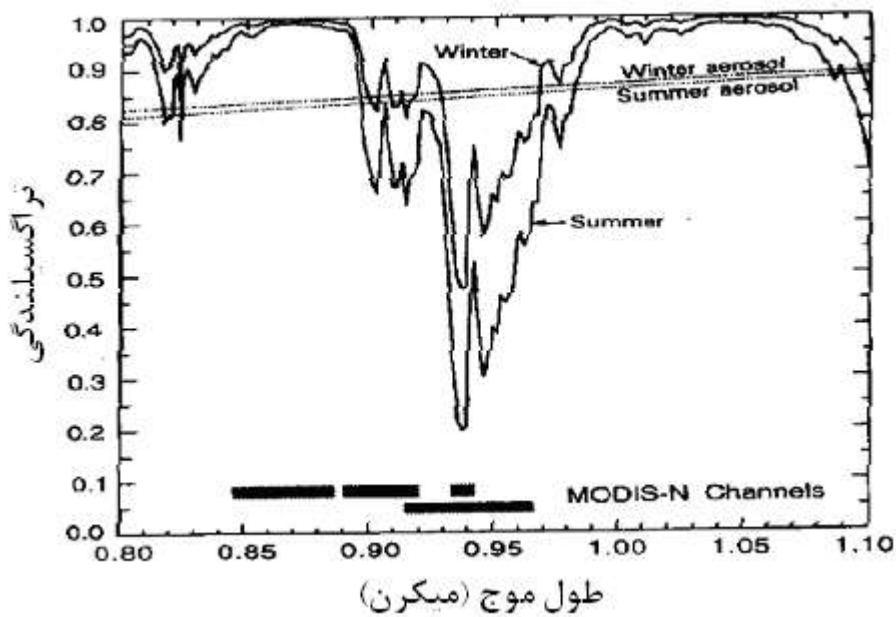
کاربرد اولیه	شماره باند	پهنای باند (نانومتر) از باند ۲۰ (میکرون)	راد یانس طیفی	سیگنال به نوفه
مواد معلق / تعیین محدوده سطح	۱	۶۲۰ - ۶۷۰	۲۱/۸	۱۲۸
زمین / ابر	۲	۸۴۱ - ۸۷۶	۲۴/۷	۲۰۱
	۳	۴۵۹ - ۴۷۹	۳۵/۳	۲۴۳
	۴	۵۴۵ - ۵۶۵	۲۹/۰	۲۲۸
مواد معلق / مشخصات سطح زمین / ابر	۵	۱۲۳۰ - ۱۲۵۰	۵/۴	۷۴
	۶	۱۶۲۸ - ۱۶۵۲	۷/۳	۲۷۵
	۷	۲۱۰۵ - ۲۱۵۵	۱/۰	۱۱۰
بخار آب اتمسفر	۱۷	۸۹۰ - ۹۲۰	۱۰/۰	۱۶۷
	۱۸	۹۳۱ - ۹۴۱	۳/۶	۵۷

	۱۹	۹۱۵-۹۶۵	۱۵/۰	۲۵۰
	۲۶	۱/۳۶۰-۱/۳۹۰	۶/۰۰	۱۵۰ (SNR)
بخار آب ابرهای پارسا شکل	۲۷	۶/۵۳۵-۶/۸۹۵	۱/۱۶ (۲۴۰K)	۰/۲۵
	۲۸	۷/۱۷۵-۷/۴۷۵	۲/۱۸ (۲۵۰K)	۰/۲۵

سنجش از دور بخار آب بر پایه آشکارسازی جذب بخار آب از طیف تابش خورشیدی که از میان جو به سطح زمین رسیده و پس از بازتاب به سنجنده می‌رسد (باند روزنه بخار آب) و یا توسط بخار آب جذب می‌شود (باند جذبی بخار آب)، مبتنی است. بنابراین مقدار بخار آب قابل بارش ستون جو از مقایسه بین تابش بازتابیده خورشیدی در باند جذبی و باند غیر جذبی به دست می‌آید که در شکل ۲ نمایان است.

از رابطه ۱ با توجه به ضرایب ثابت تصاویر MODIS می‌توان برای تخمین بخار آب قابل بارش کلی (TPW) استفاده کرد.

$$TPW = \left(\frac{0.02 - \log(b19/b2)}{0.65} \right)^2 \times \left(\frac{1}{\cos(17.66 \times 3.14/180)} + \frac{1}{\cos(30.13 \times 3.14/180)} \right) \quad (1)$$



شکل ۲- شفافیت طیفی در جو قطبی و حاره‌ای عرض جغرافیایی میانه. خطوط صاف گذران از منحنی میزان ذرات معلق را در زمستان و تابستان نشان می‌دهد. این منحنی مربوط به محاسبات مدل جوی LOWTRAN7 در زاویه سمت الراس خورشید ۴۵ درجه و دید پاسوی ماهواره است. مستطیل‌های سیاه در پایین شکل موقعیت باندهای جذبی و روزنه بخار آب را نشان می‌دهند (بازسازی شده از Kaufman & Gao, 1992).

Fig. 2- Spectral transmittance in the polar, tropical, and mid-latitude atmosphere. Solid lines passing through the curves indicate the amount of suspended particles in winter and summer. This curve is related to the LOWTRAN7 atmospheric model calculations at a solar zenith angle of 45 degrees and a satellite overpass view. Black rectangles at the bottom of the figure show the position of the absorption bands and water vapor windows (redrawn from Kaufman & Gao 1992).

هدف از رابطه ۱ تعیین مقدار بخار آب با استفاده از تابش خورشیدی بازتاب یافته از سطح زمین و پس پراکنده به جو است. در این الگوریتم ابتدا مقدار کل ستون بخار آب از نسبت‌گیری باندهای جذبی به باندهای غیرجذبی بخار آب تعیین می‌شوند.

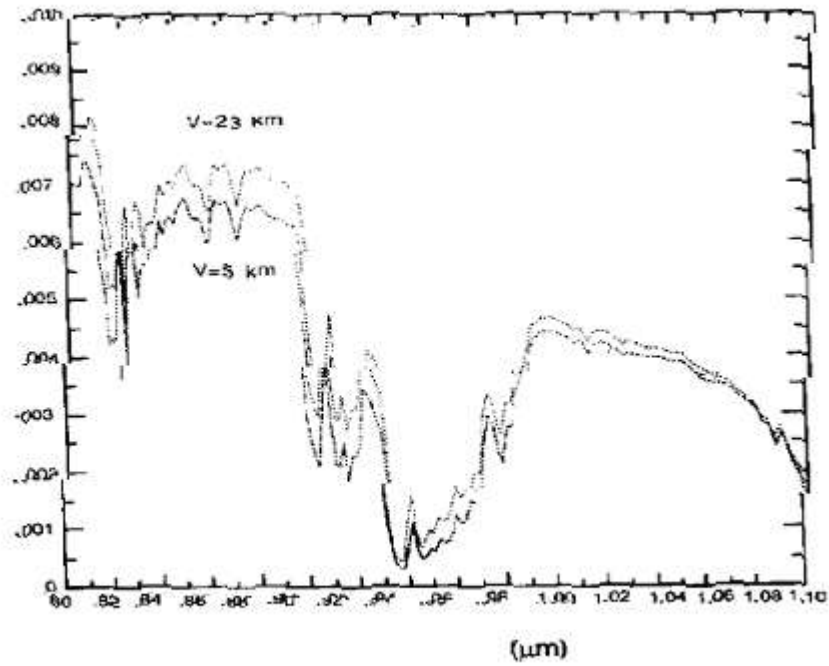
۲- اثرات ریزگردها در بازیابی آب قابل بارش

به‌طور کلی به انواع مواد معلق جامد و یا مایع در اتمسفر، آئروسول گفته می‌شود (William, 1999)، نمک دریا، گردوغبار و خاکستر آتش‌فشانی سه نوع متداول از آئروسول هستند (N.A.S.A, 2010). اگر این ذرات معلق مثل گردوغبار ریز، جامد باشند، به آن ریزگرد می‌گویند. ریزگردها باعث عدم قطعیت در بازیابی آب قابل بارش می‌شوند (Kaufman & Gao, 1992). به‌طور کلی ریزگردها از فرآیند بارش‌های گرم و سبک ممانعت به عمل می‌آورد و در عوض، افزایش ریزگردها در اثر سوء فعالیت انسان، باعث تقویت هسته‌های بارش شده و در نتیجه فرایندهای بارش یخی مثل تگرگ را افزایش می‌دهد. برای بررسی اثرات ریزگردها از شکل ۳ استفاده شده است. در شکل ۳ رادیانس طیفی بالاسوی برای دو پوشش سطحی چمن روشن و خاک رس تیره و همچنین برای دو نوع از غلظت ریزگرد با قابلیت دید ۲۳ کیلومتر و ۵ کیلومتر در مدل جوّی مناطق روستایی رسم شده است. ریزگرد، تابش بازتابیده خورشیدی را در روزه‌های جوّی تضعیف کرده و در نتیجه تابش رسیده به سنجنده از سطح را کاهش می‌دهد. همچنین تابش مستقیم خورشید را به سمت سنجنده پراکنده کرده باعث افزایش سیگنال ورودی به سنجنده می‌شود. اثر خالص ریزگرد بستگی به میزان بازتابندگی سطحی دارد. طبق شکل (۳-الف) بازتابندگی در چمن‌های روشن، در حضور ریزگرد تضعیف می‌شود بدین معنی که ریزگرد میزان بازتابندگی چمن‌های روشن را کاهش می‌دهد، اما میزان بازتابندگی در خاک رس تیره در حضور ریزگرد افزایش می‌یابد که علتش اثرات پراکنندگی ریزگرد است (شکل ۳-ب).

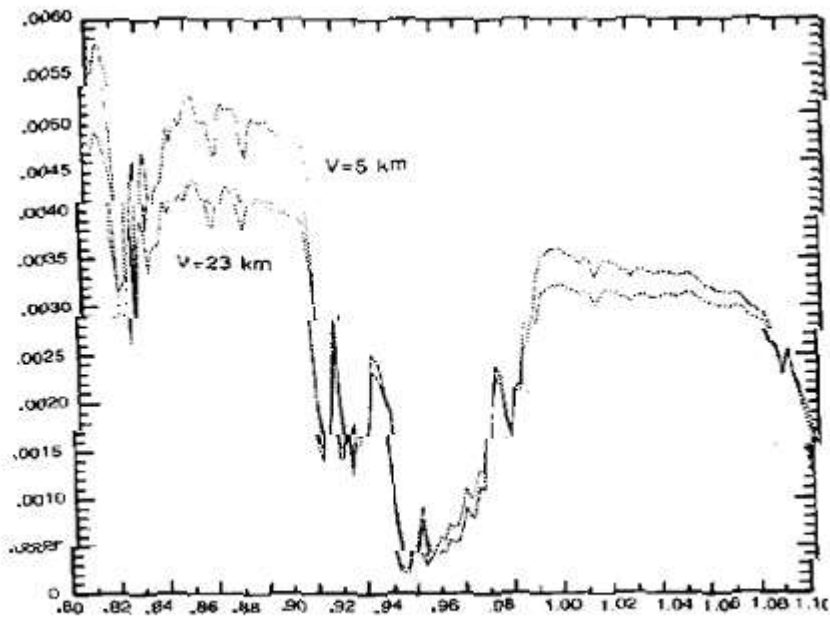
برای یافتن خطای ناشی از ریزگرد در سنجنش‌ازدور بخار آب، بازتابندگی ظاهری برای چهار مدل جوّی توسط LOWTRAN شبیه‌سازی می‌شوند. این چهار مدل عبارت‌اند از: جوّ مناطق روستایی با قابلیت دید ۵۰ و ۲۳ کیلومتر، جوّ مناطق شهری با قابلیت دید ۵ کیلومتر و جوّ مناطق دریایی با قابلیت دید ۲۳ کیلومتر. در این مدل‌ها قسمت اعظم ریزگرد و بخار آب در یک لایه ترکیبی مرزی قرار می‌گیرند. عدم قطعیت در با قابلیت دید و میزان ریزگرد ستونی، محدوده اندازه‌های نسبت بازتابندگی ظاهری را افزایش داده خطا را دو برابر می‌کند. به‌عنوان مثال برای ۴/۱ سانتی‌متر بخار آب، قابلیت عبور برای چهار مدل بین ۰/۲۶ و ۰/۳۱ به‌دست می‌آید. توجه داشته باشید که کاهش با قابلیت دید به ۵ کیلومتر، نماینده حضور ریزگردهای شدید است (Kaufman & Gao, 1992).

نتایج

اولاً نتایج شکل ۲ در بخش روش تحقیق نشان می‌دهد که میزان ذرات معلق در زمستان به خاطر مصرف سوخت‌های فسیلی بیشتر از فصل تابستان است. همچنین میزان جذب بخار آب در تابستان به علت بالا بودن میزان بخار آب بیشتر از زمستان است. در مجموع میزان شفافیت جوّ در زمستان بیشتر از تابستان است. البته باید توجه داشت که این شکل در شرایط آسمان فاقد ابر است. مقدار بخار آب قابل بارش از روش نسبت‌گیری کانال‌ها دارای دقت تقریبی ۱۵٪ است (Kaufman & Gao, 1992). ثانیاً براساس شکل ۳ باید ابراز داشت که ریزگردها، بازتاب خورشیدی را کاهش می‌دهند، بنابراین رادیانس رسیده به سنجنده را به‌شدت کاهش می‌دهد. از طرفی ریزگردها به علت ایجاد خاصیت پراکنندگی نور، میزان سیگنال رسیده به سنجنده را افزایش می‌دهند.



(a)

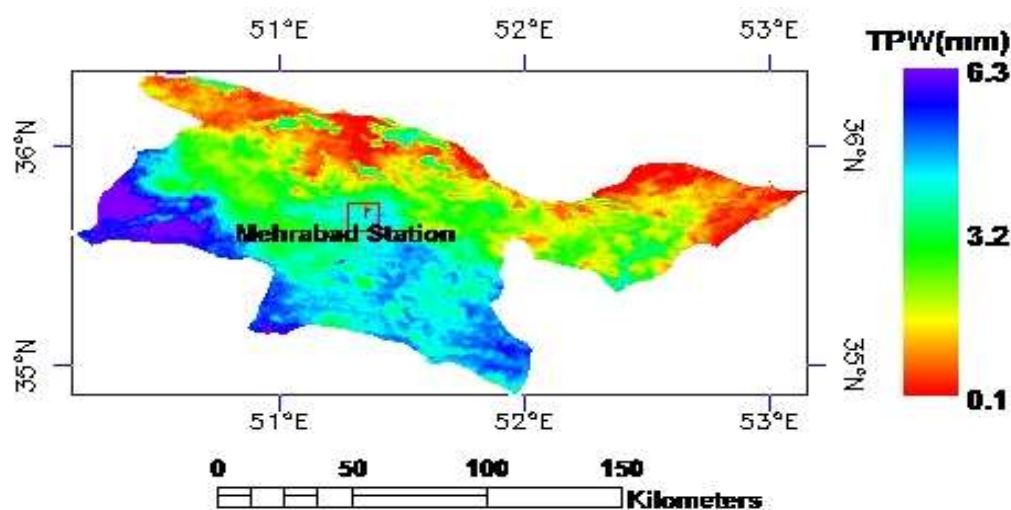


(b)

شکل ۳- رادیانس طیفی بالاسوی برای پوشش‌های سطحی (a) چمن روشن و (b) خاک رس تیره در دو نوع از غلظت‌های ریزگرد با قابلیت دید ۲۳ و ۵ کیلومتر (جوّ حاره‌ای عرض‌های میانه) (بازسازی شده از Kaufman & Gao, 1992).

Fig. 3- Top-of-atmosphere spectral radiance for surface covers of a) light grass and b) dark clay soil under two types of dust aerosol concentrations with visibilities of 23 and 5 kilometers (mid-latitude tropical atmosphere) (adapted from Kaufman & Gao, 1992).

طول عمر ذرات معلق و بخار آب در جو شبیه هم‌اند زیرا که هردوی آنها توسط فرآیندهای ابری تعیین می‌شوند. بنابراین در این مدل‌ها، فرض شباهت پروفایل‌های ذرات معلق و بخار آب با یکدیگر منطقی به نظر می‌رسد؛ اما در شرایط آتش‌های بزرگ و طوفان‌های گردوغبار، ذرات گردوغبار به لایه‌های بالای لایه جوئی تزریق می‌شوند. در این حالت، پروفایل‌های ریزگرد و بخار آب متفاوت شده و منبع خطای بزرگی را در برآورد میزان بخار آب ایجاد می‌کند (Kaufman & Gao, 1992). لایه حاوی ذرات معلق بیشتر، رادیانس رو به بالا را در باند بخار آب در مقایسه با باندهای روزنه‌های جوئی، افزایش می‌دهد. در نتیجه باعث افزایش مقدار شفافیت بخار آب جوئی (T_w) شده که نتیجه آن برآورد کمتر از واقعیت میزان بخار آب است. برای یک عمق اپتیکی متوسط (0.2) ناشی از یک لایه دود و گردوغبار، آب قابل بارش ظاهری در باند 0.94 میکرون به میزان 20 تا 25 درصد کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌شود. برای کانال‌های جذبی ضعیف‌تر این اثر به علت تفاوت کمتر تابش رو به بالا در این باند و باندهای روزنه جوئی، کمتر است (10 تا 15 درصد). از این تفسیر غلط از میزان بخار آب می‌توان با آشکارسازی دود و گردوغبار (که توسط الگوریتم‌های مودیس انجام می‌شود) پرهیز کرد. اختلاف اساسی بین بخار آب استخراج‌شده از دو باند، می‌تواند نشان از آلودگی بالای پیکسل به ذرات معلق باشد. میانگین مقدار آب قابل بارش کلی حاصل از باند 19 به 2 برابر با $5/10$ میلی‌متر به دست آمده است. شکل 4 مقادیر را برحسب میلی‌متر نشان می‌دهد.



شکل ۴- آب قابل بارش کلی حاصل از باند ۱۹ به ۲ درگذر ۲۶ می ۲۰۰۲ (برحسب میلی‌متر)

Fig. 4- Total precipitable water derived from bands 19 to 2 on May 26, 2002 (in millimeters).

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که اولاً همه ماهواره‌های هواشناسی (مودیس، نوآ و ...) مجهز به باندهای جذبی بخار آب به منظور اندازه‌گیری جرم بخار آب هستند. مثلاً باندهای شماره ۱۷، ۱۸ و ۱۹ تصاویر ماهواره‌ای مودیس باندهای مخصوص بخار آب است که محققان از این باندها برای محاسبه TPW بیشتر در شرایط آسمان فاقد ابر استفاده می‌کنند. البته باندهای ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ هم برای تخمین میزان بخار آب داخل ابرهای پرتا شکل مورد استفاده قرار می‌گیرند. ثانیاً تصاویر ماهواره‌ای مودیس دارای سه باند مخصوص بخار آب اتمسفر هستند که میزان بخار آب لایه‌های تحتانی، میانی و فوقانی وردسپهر را اندازه‌گیری می‌کنند.

با استفاده از دو باند بخار آب مادون قرمز نزدیک (۰/۹۰۵ و ۰/۹۴ میکرومتر) و نیز باندهای روزنه بخار آب ۰/۸۶۵ و ۱/۲۴ میکرومتر) استخراج کل مقدار بخار آب ستون جو از داده‌های مودیس امکان پذیر می‌شود. از نسبت گیری تابش اندازه گیری شده در باند جذبی (۰/۲۵/۰ ۰/۹۴) و یا (۰/۱۵/۰ ۰/۹۰۵ میکرومتر) به باند غیر جذبی (۰/۲۰/۰ ۰/۸۶۵) استخراج آب ستون جو روی اراضی خشکی را امکان پذیر می‌کند.

اثر ذرات معلق بر بازیابی آب قابل بارش بدین صورت است که رادیانس رو به بالا را در باند بخار آب در مقایسه با باندهای روزنه‌های جو، افزایش می‌دهد. در نتیجه باعث افزایش مقدار شفافیت بخار آب جو (T_w) شده و در نهایت باعث کمتر نشان دادن مقدار واقعی آب قابل بارش است به عبارت ساده‌تر حضور ذرات معلق منجر به برآورد کمتر از واقعیت میزان بخار آب می‌شود. یافته‌های این تحقیق همسو و تأیید کننده با سایر تحقیقات داخلی مثل Ansar Moghaddam and Safar Rad (۱۴۰۲) و تحقیقات خارجی مثل Qiao (۲۰۲۳) دارد.

References

- Aoki, T., & Inoue, T., (1982). Estimation of the Precipitable water from the IR channel of the geostationary satellite. *remote sensing of environment*, 12, 219-228.
- Ensfamoghaddam, T., & Safarrad, T. (2023). Investigate of Precipitable Water in dusty conditions using satellite images (Case study: Southwest of Iran). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 3, 17-20. [In Persian]
- Jiafei, X.u., & Zhizhao, L.i.u. (2022). Evaluation of Precipitable Water Vapor Product From MODIS and MERSI-II NIR Channels Using Ground- Based GPS Measurements Over Australia, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, (15), .8744-8758.
- Kaufman, Y.J., & Gao, B.C. (1992). Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 5 (30), 871 – 884.
- King, M.D., Kaufman, Y.J., Menzel, W.P., & Tanre, D. (1992). Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the moderate resolution imaging spectrometer (MODIS). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(1), 2 – 27.
- Pourbagher Kurdi, S. M. (2007). *Extraction of Physical Meteorological Parameters Using MODIS Satellite Data*. Research Project, Iran Meteorological Organization, Tehran, Iran. [In Persian]
- Pourbagher Kurdi, S. M., Mobasheri, M. R., & Farajzadeh, M. (2006). *Feasibility of using radiosonde data and MODIS satellite imagery to estimate total precipitable water (Study area: Tehran region)*. [Master's thesis, Tarbiat Modares University]. [In Persian]
- N.A.S.A. (2010). Aerosols: Tiny Particles, Big Impact. earthobservatory.nasa.gov. 2 November 2010. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Aerosols>
- Qiao, C., Liu, S., Huo, J., Mu, X., Wang, P., Jia, S., Fan, X., & Duan, M. (2023). Retrievals of precipitable water vapor and aerosol optical depth from direct sun measurements with EKO MS711 and MS712 spectroradiometers. *Atmos. Meas. Tech.*, 16, 1539–1549.
- William, C.H. (1999). *Aerosol Technology* (2nd ed.). Wiley - Interscience.