



ارزیابی مقادیر بخار آب قابل بارش حاصل شده از تصاویر MODIS و AMSR2 در سطح خشکی (مطالعه موردی: غرب ایران)

مجید رحیم‌زادگان^{۱*}، محمدحسین مریخ‌پور^۲

۱- استادیار گروه منابع آب دانشکده عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲- دانشجو دکتری گروه منابع آب دانشکده عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده:

بخار آب قابل بارش جو میزان بخار آب جو است که در صورت فشرده شدن قابلیت تبدیل به بارش را دارد و از پارامترهای مهم در بحث هواشناسی و هیدرولوژی است. این پارامتر نقش کلیدی در رابطه با پیش‌بینی وضعیت آب و هوا و بارش دارد. در این مطالعه، الگوریتم برآورد بخار آب قابل بارش در سطح خشکی در نیمه غربی ایران در محدوده امواج مایکروویو در روزهای ابری و فاقد ابر و محصول بخار آب قابل بارش مادون قرمز نزدیک اسپکترورادیومتر تصویربردار با قدرت تفکیک متوسط MODIS (MOD05) مستقر بر ماهواره ترا در روزهای فاقد ابر در ۲۵ روز مختلف در چهار فصل سال ۲۰۱۵-۲۰۱۶ مورد ارزیابی قرار گرفتند. اساس الگوریتم در محدوده امواج مایکروویو، استفاده از دمای درخشندگی در باندهای ۱۸/۷ و ۲۳/۸ گیگاهرتز رادیومتر تصویربردار مایکروویو پیشرفته ۲ (AMSR2) در قطبیدگی‌های افقی و قائم است. ارزیابی نتایج، با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در شش ایستگاه رادیوساند تهران، تبریز، اصفهان، کرمانشاه، اهواز و شیراز درونیابی شده برای لحظه گذر ترا انجام گردید. براساس نتایج ارزیابی، در روزهای فاقد ابر مقدار ضریب تبیین R² در مقادیر بخار آب حاصل از سنجنده AMSR2 و محصول MOD05 به ترتیب ۰/۷۲۵ و ۰/۷۱۲ و مقدار خطای RMSE به ترتیب ۳/۴۳۴ و ۳/۸۲۸ میلی-متر محاسبه شد. دقت هر دو محصول قابل قبول است و دقت الگوریتم در محدوده امواج مایکروویو بیشتر از محصول MOD05 است. در روزهای ابری مقدار ضریب تبیین R² و خطای RMSE در مقادیر بخار آب حاصل شده از سنجنده AMSR2 به ترتیب ۰/۵۳۲ و ۷/۰۳۶ میلی-متر به دست آمد که نشان‌دهنده دقت پایین و عدم کارایی این الگوریتم در روزهای ابری است. به طور کلی در روزهای ابری و فاقد ابر مقدار ضریب تبیین R² و خطای RMSE در مقادیر بخار آب حاصل شده از سنجنده AMSR2 به ترتیب ۰/۵۸۸ و ۰/۵۹۱۶ میلی-متر محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی: بخار آب قابل بارش، ایران، AMSR2، MODIS، MOD05

۱- مقدمه

بخار آب مقدار بخار آب موجود در جو است که در صورت بالا رفتن فشار در دامنه مشخصی از دما، قابلیت تبدیل شدن به بارش در قالب باران، برف و تگرگ را دارد [۱]. این پارامتر فیزیکی بر روی بسیاری از فرایندهای جوی اثر می‌گذارد و محاسبه آن با قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب در شرایط مختلف آب و هوایی، مشکل است [۲]. پایش تغییرات مکانی بخار آب جو بر اساس اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای موضوع مهمی است و در پایش تغییرات فصلی و سالانه آب قابل بارش در مقیاس منطقه‌ای به منظور بررسی شرایط خشکسالی و بیابان‌زایی حائز اهمیت است [۳]. پراکندگی ایستگاه‌های پایش زمینی، به خصوص در نواحی خشک، اهمیت روش‌های دقیق سنجش از دوری در برآورد بخار آب قابل بارش به صورت روزانه را نشان می‌دهد [۴]. مهم‌ترین مزیت برآورد بخار آب قابل بارش با استفاده از داده‌های مایکروویو نسبت به داده‌های اپتیکی و حرارتی، کاربرد آن در روزهای ابری است، زیرا الگوریتم‌های بر مبنای داده‌های اپتیکی در روزهای ابری کارایی مناسبی ندارند ولی امواج مایکروویو قابلیت عبور از ابرها را دارند. به طور کلی بیشتر الگوریتم‌های برآورد بخار آب قابل بارش بر اساس داده‌های مایکروویو در سطح اقیانوس‌ها و دریاها توسعه داده شده‌اند، زیرا شرایط سطحی در دریاها نسبت به سطح زمین یکنواخت‌تر و ساده‌تر است [۵].

یکی از روش‌های مورد استفاده در برآورد بخار آب قابل بارش جو، استفاده از روش‌های سنجش از دور در محدوده طول موجی امواج مایکروویو است. [۶] بر اساس نسبت اختلاف دمای درخشندگی در دو باند سنجنده^۱ AMSR-E، الگوریتمی را به منظور بازیابی بخار آب قابل بارش در سطح اقیانوس و زمین در کشور آمریکا توسعه داد. ارزیابی نتایج این روش در سطح زمین بر اساس داده‌های شبکه ایستگاه‌های GPS شمال آمریکا مربوط به سال ۲۰۰۴ انجام شد. مقادیر RMSE در این واسنجی تقریباً به ۶ میلی‌متر محدود شده و مقدار ضریب تبیین R² ۰/۸۹ به دست آمد. [۷] بر اساس دمای درخشندگی در باندهای ۱۸ و ۲۳ گیگاهرتز AMSR-E، در قطبیدگی‌های افقی و قائم در زمان صعود و فرود ماهواره، بدون در نظر گرفتن اثر مایع داخل ابر، الگوریتم بازیابی بخار آب قابل بارش را توسعه دادند که با استفاده از نتایج آن الگوریتمی به منظور برآورد حداقل و حداقل دمای هوا در نیم کره شمالی را توسعه دادند. [۵] بر اساس دماهای درخشندگی در ۵ باند سنجنده^۲ FY-3B الگوریتمی را به منظور برآورد مقادیر بخار آب قابل بارش در سطح زمین در ژانگی چین، دلانزدگید مغولستان و سنگاپور توسعه دادند. پس از ارزیابی الگوریتم در روزهای فاقد ابر، در ژانگی مقادیر RMSE ۴/۳۹ میلی‌متر و در مناطق دلانزدگید مغولستان و سنگاپور ۴/۷۳ میلی‌متر محاسبه شد.

از دیگر روش‌های سنجش از دوری پرکاربرد در برآورد بخار آب قابل بارش جو استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در محدوده امواج اپتیکی است. [۸] به معروفی روش سنجش از دوری برآورد بخار آب قابل بارش، با بهره‌گیری از بازتابندگی خورشیدی از سطوح، بر اساس داده‌های MODIS 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. [۹] با استفاده از تصاویر MODIS به بهبود الگوریتم برآورد بخار آب قابل بارش در نیمه شرقی ایران در شرایط غیرابری پرداختند و ارزیابی نتایج به دست آمده را با ایستگاه‌های رادیوساند و GPS تهران و مشهد به ترتیب ۰/۸۶ و ۰/۷۹ به دست آمده و در ارزیابی کلی ایستگاه‌های GPS، ۰/۸۱ محاسبه شد. [۱۰] مقادیر بخار آب قابل بارش حاصل از محصول MOD05 سنجنده MODIS مستقر بر دو ماهواره ترا و آکوا^۳ را با استفاده از ۲۲ ایستگاه زمینی GPS در جنوب تبت در ۱۰ ماه از سال ۲۰۰۸

¹ Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS

² Feng-Yun-3B

³ Aqua

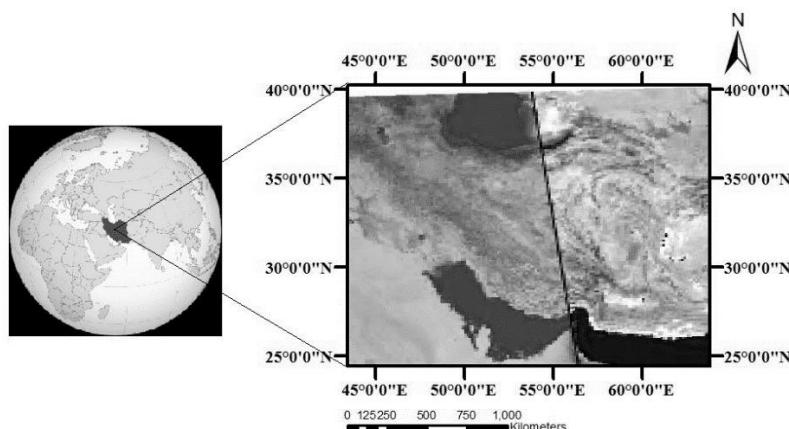
در شرایط آسمان بدون ابر ارزیابی نمودند. بر اساس نتایج حاصل شده، خطای RMSE حدود ۲/۱ تا ۳/۱۹ میلی‌متر محاسبه گردید.

هدف از این مطالعه، ارزیابی مقادیر بخار آب قابل بارش حاصل از سنجنده AMSR2 در محدوده امواج مایکروویو در روزهای ابری و فاقد ابر و محصول مادون قرمز نزدیک سنجنده MODIS مستقر بر سکوی ترا (MOD05) در محدوده امواج اپتیکی در سطح خشکی در نیمه غربی کشور ایران در روزهای فاقد ابر است. ارزیابی دقت این محصولات، توسط داده‌های اندازه‌گیری شده در شش ایستگاه رادیوساند تهران، تبریز، اصفهان، کمانشاه، اهواز و شیزار در نیمه غربی ایران درونیابی شده برای لحظه گذر ترا و AMSR2 انجام شده است. معرفی منطقه مورد مطالعه، داده‌های به کار رفته و پیاده‌سازی صورت گرفته در این مطالعه در بخش ۲، تجزیه و تحلیل نتایج و ارزیابی دقت الگوریتم در بخش ۳ و نتیجه‌گیری در بخش ۴ ارائه شده‌اند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

به طور کلی ایران کشوری نیمه خشک با میانگین بارش یک سوم بارندگی جهان می‌باشد که در منطقه خاورمیانه قرار گرفته است. اقلیم‌های متفاوتی از نظر آب و هوایی و پوشش گیاهی از قبیل مناطق مرطوب در شمال، کوهستانی در غرب و خشک در نواحی مرکزی ایران و همچنین از نظر توپوگرافی مناطق متنوعی با تراز ارتفاعی متفاوت در ایران وجود دارند [۹]. دریای خزر در شمال و خلیج فارس و دریای عمان در جنوب ایران قرار گرفته‌اند. از آنجا که بیشتر ایستگاه‌های رادیوساند در کشور ایران در منطقه غربی این کشور قرار گرفته‌اند و از طرفی بیشتر مناطق شرقی ایران را کویر تشکیل می‌دهد، بنابراین منطقه مورد مطالعه در این مقاله از نظر جغرافیایی بین ۴۰ تا ۵۶ درجه عرض شمالی و ۴۴ تا ۵۶ درجه طول شرقی، در غرب کشور ایران در نظر گرفته شده است. دامنه مقادیر بخار آب قابل بارش در ایران حدوداً بین ۲ میلی‌متر تا ۴۵ میلی‌متر متغیر است [۱۱]. شکل (۱) موقعیت کشور ایران در دنیا و نیمه غربی این کشور به عنوان منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه در نیمه غربی ایران

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق از سه مجموعه داده دمای درخشندگی AMSR2، داده محصول بخار آب قابل بارش مادون قرمز نزدیک MODIS و داده‌های رادیوساند استفاده شده است که در ادامه به تشریح هریک پرداخته شده است.

۲-۱-۲- دمای درخشندگی سنجنده AMSR2

سنجنده AMSR-E مستقر بر ماهواره آکوا ناسا^۱ در تاریخ ۴ می ۲۰۰۲ راهاندازی شد و ماموریت آن در اکتبر ۲۰۱۲ به علت مشکل در چرخش آنتن، متوقف شد [۱۲]. رادیومتر تصویربردار مایکروویو پیشرفته ۲ (AMSR2) مستقر بر ماهواره GCOM-W1^۲ در تاریخ ۱۸ می ۲۰۱۲ توسط سازمان پژوهش‌های هواشناسی ژاپن^۳ به عنوان جانشینی برای سنجنده AMSR-E راهاندازی شد. ماهواره GCOM-W1 اولین نسل ماهواره‌های سری GCOM است که نقش مهمی در مطالعات جهانی چرخش آب و انرژی دارد. سنجنده AMSR2 دمای درخشندگی را در ۷ باند ۶/۹، ۷/۳، ۱۰/۶، ۱۰/۷، ۱۸/۷، ۲۳/۸، ۳۶/۵ و ۸۹ گیگاهرتز در قطبیدگی‌های افقی و قائم اندازه‌گیری می‌کند. مفاهیم پایه AMSR2 در اکثر موارد شبیه مفاهیم مربوط به AMSR-E است [۱۳]. محصولات ژئوفیزیکی از قبیل بخار آب قابل بارش در سطح دریا، آب مایع داخل ابر، بارش، دمای سطح دریا، سرعت باد در سطح دریا، میزان بیخ دریاها، عمق برف و رطوبت خاک را تولید می‌کند. این سنجنده، تصویربرداری را دو بار در روز هنگام صعود (ساعت ۱/۳۰ بعد از ظهر زمان عبور از استوا) و هنگام فرود (ساعت ۱/۳۰ نیمه شب زمان عبور از استوا) انجام می‌دهد [۱۴].

به علت متوقف شدن ماموریت سنجنده AMSR-E در اکتبر ۲۰۱۲، در این مطالعه از محصولات دمای درخشندگی L1-R^۴ در باندهای ۱۸/۷ و ۲۳/۸ گیگاهرتز در قطبیدگی‌های افقی و قائم سنجنده AMSR2 با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ کیلومتر در ۳۵ روز مختلف از ۴ فصل سال ۲۰۱۵-۲۰۱۶ شامل روزهای ابری و غیر ابری در زمان صعود ماهواره استفاده شده است [۱۵]. به منظور ارزیابی نتایج، از داده‌های رادیوساند انجام شده است.

۲-۲-۲- داده‌های سنجنده MODIS

در راستای اجرای برنامه‌های فضایی آمریکا، ناسا به منظور پایش، تحقیق و تحلیل سطح زمین، اقیانوس‌ها و جو و واکنش‌های بین آنها سیستمی را تحت عنوان سیستم پایش زمین (EOS^۵) راهاندازی کرد [۴، ۱۶]. سنجنده MODIS به عنوان عضوی از این سیستم در تاریخ دسامبر ۱۹۹۹ بر روی ماهواره ترا مستقر و دومین سنجنده MODIS در سال ۲۰۰۲ بر روی ماهواره آکوا راهاندازی شده است. این سنجنده از ۳۶ باند طیفی تشکیل شده است [۱۷].

در این مطالعه، از محصول بخار آب قابل بارش سنجنده MODIS مستقر بر ماهواره ترا (MOD05) در محدوده امواج مادون قرمز نزدیک، با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر در روزهای فاقد ابر استفاده شده است [۱۸]. ارزیابی این محصول نیز با داده‌های رادیوساند انجام شده است.

۲-۲-۳- داده‌های رادیوساند

در این مطالعه از داده‌های شش ایستگاه رادیوساند تهران (OIII)، تبریز (OITT)، کرمانشاه (OICC)، اهواز (OIAW)، شیراز (OISS) و اصفهان (OIFM) به منظور آموزش و ارزیابی الگوریتم توسعه داده شده است. داده‌های رادیوساند مربوط به بازه زمانی ذکر شده، از سایت دانشگاه وایومینگ آمریکا تهیه شده‌اند [۱۱]. شکل (۲) موقعیت ایستگاه‌های رادیوساند به کار رفته در این مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه داده‌های ایستگاه‌های رادیوساند در ساعت‌های UTC ۰۰۰۰ و ۱۲ ثبت می‌شوند، کلیه داده‌های موجود در ایستگاه‌های انتخابی (در صورت موجود بودن) با توجه به زمان گذر سنجنده‌های AMSR2 و MODIS تهیه شدند.

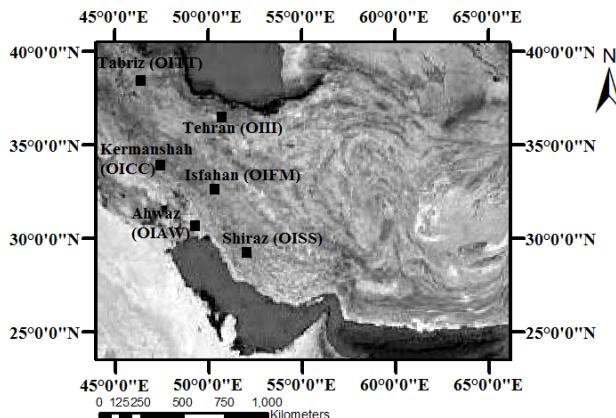
¹ National Aeronautics and Space Administration

² Global Change Observation Mission-Water 1

³ Japan Aerospace Exploration Agency

⁴ Level 1R

⁵ Earth Observing System



شکل ۲: موقعیت شش ایستگاه رادیوساند به کار رفته در این مطالعه

از ترکیب مجموعه داده‌های ذکر شده در این تحقیق، مجموعاً تعداد ۵۲ داده در ایستگاه‌های مختلف به منظور ارزیابی محصولات ذکر شده تهیه شد که ۲۰ داده مربوط به روزهای فاقد ابر و ۳۲ داده مربوط به روزهای ابری می‌باشد.

۳-۲- الگوریتم استخراج بخار آب قابل بارش از سنجنده AMSR-E

اجسام، متناسب با دمای فیزیکی که دارند از خود تابش در محدوده امواج مایکروویو را انجام می‌دهند. تابش مایکروویو اجسام با پارامتر دمای درخشندگی تعریف می‌شود [۱۹]. مقدار تابش اجسام، متناسب با گسیلنندگی سطح می‌باشد و گسیلنندگی سطح نشان دهنده توانایی اجسام در تابش است. گسیلنندگی سطح با توجه به جنس سطح که آب، خاک، گیاه و یا برف باشد متفاوت است. همچنین هندسه، ابعاد و نوع پراکنش که منفرد و یا چند گانه باشد بر روی این پارامتر اثر می‌گذارد [۷].

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 [۲۰]:

$$T_{b(p,f)} = T_s \varepsilon_{s(p,f)} t_{a(f)} + T_a (1 - t_{a(f)}) + T_a (1 - t_{a(f)}) (1 - \varepsilon_{s(p,f)}) t_{a(f)} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که T_s دمای سطح زمین، ε_s گسیلنندگی سطح زمین، t_a گذردهی جو و T_a دمای موثر جو می‌باشد. اندیس‌های f و p نیز به ترتیب مربوط به فرکانس و قطبیدگی هستند. در [۲۱] از پس پراکنش جو توسط سطح زمین صرف نظر شده است. لذا رابطه جدید دمای درخشندگی به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$T_{b(p,f)} = T_s \varepsilon_{s(p,f)} t_{a(f)} + T_a (1 - t_{a(f)}) \quad \text{رابطه (۲)}$$

رابطه گسیلنندگی سطح زمین شامل دو جز خشکی و آب‌های سطحی موجود در خشکی می‌باشد [۷]:

$$\varepsilon_{s(p,f)} = f_w \varepsilon_{w(p,f)} + (1 - f_w) \varepsilon_{l(p,f)} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\varepsilon_{l(p,f)} = \varepsilon_{os(p,f)} t_c + (1 - w)(1 - t_c) \quad \text{رابطه (۴)}$$

که f_w درصد آب موجود در ناحیه مورد بررسی، $(1 - f_w)$ درصد خشکی ناحیه مورد بررسی، ε_w گسیلنندگی سطح آب، ε_l گسیلنندگی خشکی سطح زمین می‌باشد. که گسیلنندگی قسمت خشک زمین خود شامل ۲ قسمت خاک

خشک و خیمه گیاهی می‌شود (رابطه ۴). t_c گذردهی خاک خشک، ϵ_{OS} گسیلنندگی خاک خشک، w آبیدو پراکنش منفرد گیاهی می‌باشد.

[۷] برای برآورد بخار آب قابل بارش، از نسبت اختلاف دمای درخشندگی در قطبیدگی‌های افقی و قائم در باندهای ۲۳/۸ و ۱۸/۷ گیگاهرتز (ضریب MAWVI) استفاده کرده‌اند:

$$MAWM = \frac{\Delta T(23)}{\Delta T(18)} \frac{T(23)-T(18)_v}{T(18)_v-T(18)_h} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\frac{T(23)-T(18)_v}{T(18)_v-T(18)_h} = \frac{\epsilon_v(23)-\epsilon_v(18)}{\epsilon_v(18)-\epsilon_h(18)} \frac{t}{t} \rightarrow \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\text{با فرض اینکه } \beta = \frac{\epsilon_v(23.8)-\epsilon_h(23.8)}{\epsilon_v(18.7)-\epsilon_h(18.7)} \quad \text{رابطه ۶ به شکل زیر نوشته می‌شود:}$$

$$\left(\frac{t_{a23}}{t_{a18}}\right) = \frac{M.A.W.V.I}{\beta} \quad \text{رابطه (۷)}$$

رابطه گذردهی جو به صورت زیر می‌باشد [۲۰]:

$$t_{a(f)} = e^{-\tau} \quad \text{رابطه (۸)}$$

که τ عمق اپتیکی جو می‌باشد و به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$\tau = \sec(\theta)[A_{o(f)} + A_{v(f)} + A_{l(f)}] \quad \text{رابطه (۹)}$$

که $A_{o(f)}$ جذب امواج مایکروویو توسط اکسیژن موجود در جو، $A_{v(f)}$ جذب امواج مایکروویو توسط بخار آب جو و $A_{l(f)}$ جذب امواج مایکروویو توسط آب مایع داخل ابر می‌باشد [۲۲].

[۷] جذب امواج مایکروویو توسط ذرات مایع داخل ابر ($A_{l(f)}$) را صفر و روابط ($A_{o(f)}, A_{v(f)}$) را به شکل خطی در نظر گرفته‌اند:

$$A_l = \alpha \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$A_{v(f)} = \alpha_{v(f)} \cdot v \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$\alpha_{o(f)}, \alpha_{v(f)}$ ضرائب خطی جذب بخار آب و اکسیژن می‌باشند که توسط مدل جوی سطح اقیانوس بر اساس داده‌های AMSR-E محاسبه شده‌اند [۲۲].

از ترکیب روابط ۷ و ۸ و ۹ رابطه اندازه‌گیری مقدار بخار آب جو به صورت زیر به دست می‌آید:

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

مقادیر پارامترهای معلوم به کار رفته در روابط بالا در جدول (۱) آورده شده‌اند. روش محاسبه دو پارامتر t_c و f_w

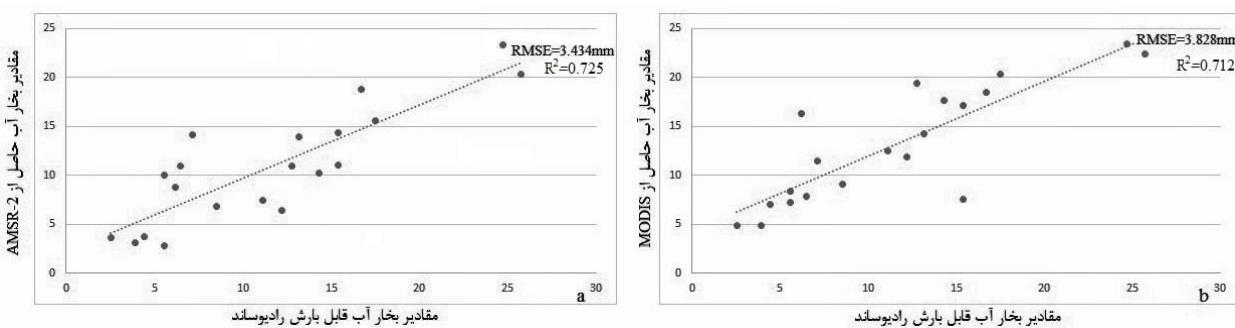
نیز در مقاله [۷] توضیح داده شده است. همچنین مقدار δ ($\frac{T_a}{T_s}$) در زمان صعود ۰/۹۶ در نظر گرفته می‌شود [۷]. اساس کار این الگوریتم روش تکرار است.

جدول ۱ : مقادیر پارامترهای مدل انتقال تابش به کار رفته در توسعه الگوریتم این مطالعه که از دماهای درخشندگی AMSR-E در باندهای ۱۸/۷ و ۲۳/۸ و ۱۸/۸ گیگاهرتز به دست آمده‌اند [۷]

پارامترهای مدل فیزیکی	نماد	۱۸/۷ گیگاهرتز	۲۳/۸ گیگاهرتز
آلبیدو پراکنش منفرد گیاهی	ω	۰/۰۵	۰/۰۵
گسیلنندگی خاک خشک (قطبیدگی قائم)	ϵ_{osv}	۰/۹۹۴	۰/۹۷۵
گسیلنندگی خاک خشک (قطبیدگی افقی)	ϵ_{osh}	۰/۷۷۱	۰/۷۸۱
گسیلنندگی آب (قطبیدگی قائم)	$\epsilon_{w.v}$	۰/۶۳۰	۰/۶۸۵
گسیلنندگی آب (قطبیدگی افقی)	$\epsilon_{w.h}$	۰/۳۳۶	۰/۴۲۱
ضریب جذب بخار آب	α_v	۰/۰۰۳۴	۰/۰۱۰۴
ضریب جذب اکسیژن	α_o	۰/۰۱۰۳	۰/۰۱۳۱
حدس اولیه نسبت اختلاف گسیلنندگی	β_0	۰/۸۸	۰/۸۸

۳- تجزیه و تحلیل نتایج

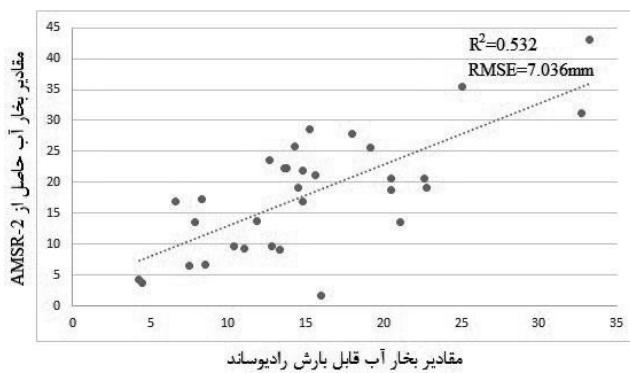
پس از استخراج مقادیر بخار آب قابل بارش حاصل از سنجنده AMSR2، محصول MOD05 سنجنده MODIS، و جمع‌آوری داده‌های رادیوساند در روزهای فاقد ابر در بازه زمانی ذکر شده، ۲۰ داده تهیه شد. شکل (۳) نمودارهای ارزیابی نتایج به دست آمده از دو محصول را نشان می‌دهد. زمان گذر سنجنده‌های AMSR2 و MODIS در این ارزیابی مطابق یکدیگر می‌باشد.



شکل ۳ : نتایج ارزیابی مقادیر بخار آب قابل بارش در روزهای فاقد ابر در شش ایستگاه رادیوساند (a) حاصل از سنجنده MODIS (b) محصول سنجنده AMSR2

با توجه به شکل (۳) مشاهده می‌شود که مقادیر بخار آب قابل بارش حاصل از سنجنده AMSR2 نسبت به مقادیر حاصل شده از سنجنده MODIS دقیق بالاتری دارند به طوری که مقدار ضریب تبیین R^2 در مقادیر حاصل از AMSR2 و MODIS به ترتیب 0.712 و 0.725 می‌باشد. مقدار خطای RMSE نیز در مقادیر حاصل از AMSR2 و MODIS به ترتیب 3.434 و 3.828 میلی‌متر می‌باشد که دقیق محصول سنجنده AMSR2 حدوداً 0.4 میلی‌متر بالاتر می‌باشد.

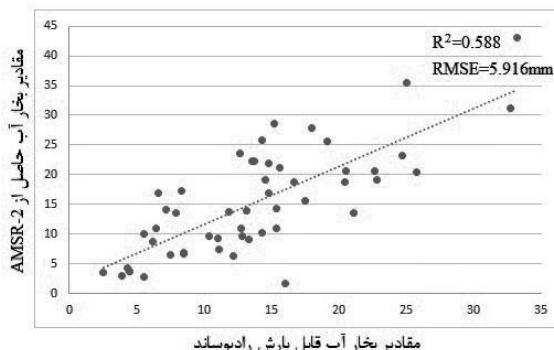
پس از استخراج مقادیر بخار آب قابل بارش حاصل از سنجنده AMSR2 و جمع‌آوری داده‌های رادیوساند در روزهای ابری در بازه زمانی ذکر شده، شکل (۴) نمودار ارزیابی نتایج به دست آمده را نشان می‌دهد.



شکل ۴: نتایج ارزیابی مقادیر بخار آب قابل بارش حاصل از سنجنده AMSR2، در روزهای ابری در شش ایستگاه رادیوساند.

با توجه به شکل (۴) مشاهده می‌شود که مقادیر حاصل شده از سنجنده AMSR2 در روزهای ابری دقیق مناسبی ندارند به طوری که مقدار ضریب تبیین $0.532 R^2$ و خطای RMSE ۷.۰۳۶ میلی‌متر محاسبه شده است که در مقایسه با دقیق متناظر این سنجنده در روزهای فاقد ابر، مقدار ضریب تبیین $0.193 R^2$ کاهش یافته و خطای RMSE ۳.۶۰۲ میلی‌متر افزایش یافته است.

شکل (۵) نمودار ارزیابی مقادیر بخار آب حاصل شده از سنجنده AMSR2 با استفاده از داده‌های رادیوساند در ۵۲ داده به طور کلی در روزهای ابری و فاقد ابر را نشان می‌دهد.



شکل ۵: نتایج ارزیابی مقادیر بخار آب قابل بارش حاصل از سنجنده AMSR2، در روزهای ابری و فاقد ابر در شش ایستگاه رادیوساند.

با توجه به شکل (۵) در استخراج مقادیر بخار آب حاصل از AMSR2 در مجموع روزهای ابری و فاقد ابری مقدار ضریب تبیین $0.588 R^2$ و خطای RMSE ۵.۹۱۶ میلی‌متر محاسبه شده است. همان‌طور که مشخص است وجود ابر باعث کاهش دقیق الگوریتم استخراج بخار آب قابل بارش از داده‌های سنجنده AMSR2 می‌شود. برای کاهش این خطای می‌توان اثر آب مایع داخل ابر را در روزهای ابری در الگوریتم در نظر گرفت.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه کارایی الگوریتم توسعه داده شده در [۷] در محدوده امواج مایکروویو که بر اساس دمای درخشندگی در باندهای ۱۸/۷ و ۲۳/۸ گیگاهرتز سنجنده AMSR2 در قطبیدگی‌های افقی و قائم می‌باشد در روزهای ابری و فاقد ابر و همچنین کارایی محصول بخار آب قابل بارش مادون قرمز نزدیک MODIS (MOD05) در روزهای فاقد ابر در ۲۵ روز مختلف از ۴ فصل سال ۲۰۱۵-۲۰۱۶ در نیمه غربی ایران در سطح خشکی مورد بررسی قرار گرفته است. ارزیابی نتایج حاصل شده با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در شش ایستگاه رادیوساند تهران، تبریز، اصفهان، کرمانشاه، اهواز و شیراز درونیایی شده برای لحظه گذر ترا و AMSR2 انجام شده است. در مجموع ۲۰ داده در روزهای فاقد ابر و ۳۲ داده در روزهای ابری جمع‌آوری شد. در روزهای فاقد ابر مقدار ضریب تبیین^۲ و خطای RMSE در نتایج حاصل شده از سنجنده AMSR2 به ترتیب ۰/۷۲۵ و ۳/۴۳۴ میلی‌متر و در نتایج حاصل شده از محصول مادون قرمز نزدیک MOD05 ۰/۷۱۲ و ۳/۸۲۸ میلی‌متر به دست آمد. دقت الگوریتم مربوط به سنجنده AMSR2 از محصول سنجنده MODIS بالاتر است به طوری که در مقایسه نتایج حاصل از AMSR2 نسبت به محصول MODIS، مقدار ضریب تبیین ۰/۰۱۳ بیشتر و مقدار خطای RMSE ۰/۳۹۴ میلی‌متر کمتر است. در روزهای فاقد ابر مقدار ضریب تبیین^۲ و خطای RMSE در نتایج حاصل شده از سنجنده AMSR2 به ترتیب ۰/۵۳۲ و ۰/۰۳۶ میلی‌متر محاسبه شده است که مقادیر قابل قبول نمی‌باشد و علت آن وجود ابر و عدم در نظر گرفتن اثر آب مایع داخل ابر است. در مجموع روزهای ابری و فاقد ابر مقدار ضریب تبیین^۲ و خطای RMSE در نتایج حاصل شده از سنجنده AMSR2 به ترتیب ۰/۵۸۸ و ۰/۹۱۶ میلی‌متر به دست آمده است.

مطالعات زیادی در رابطه با برآورد مقادیر بخار آب قابل بارش در سطح خشکی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای صورت گرفته است.

به طوری که [۶] بر اساس نسبت اختلاف دمای درخشندگی در دو باند سنجنده E-AMSR، الگوریتمی را بهمنظور بازیابی بخار آب قابل بارش در سطح اقیانوس و زمین در کشور آمریکا توسعه داد. ارزیابی نتایج این روش در سطح زمین بر اساس داده‌های شبکه ایستگاه‌های GPS شمال آمریکا مربوط به سال ۲۰۰۴ انجام شد. مقدار RMSE در این واسنجی تقریباً به ۶ میلی‌متر محدود شده و مقدار ضریب تبیین^۲ ۰/۸۹ به دست آمد. [۹] با استفاده از تصاویر MODIS به بهبود الگوریتم برآورد بخار آب قابل بارش 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 تبیین^۲ در ارزیابی ایستگاه‌های رادیوساند در تهران و مشهد به ترتیب ۰/۸۶ و ۰/۷۹ به دست آمده و در ارزیابی کلی ایستگاه‌های GPS، ۰/۸۱ محسوبه شد. [۱۰] مقادیر بخار آب قابل بارش حاصل از محصول MOD05 سنجنده MODIS مستقر بر دو ماهواره ترا و آکوا را با استفاده از ۲۲ ایستگاه زمینی GPS در جنوب تبت در ۱۰ ماه از سال ۲۰۰۸ در شرایط آسمان بدون ابر ارزیابی نمودند. بر اساس نتایج حاصل شده، خطای RMSE حدود ۲/۱ تا ۳/۱۹ میلی‌متر محاسبه گردید. به طور کلی با مقایسه نتایج به دست آمده در این تحقیق با دیگر مطالعات صورت گرفته در برآورد بخار آب قابل بارش، 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 نا مناسب است و برای بالا رفتن دقت در روزهای ابری باید اثر آب مایع داخل ابر در محاسبات در نظر گرفته شود.

مراجع

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

- [2] A. Maghrabi and H. Al Dajani, "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, vol. 14, pp. 1-8, 2013.
- [3] G. J. Jedlovec, "Precipitable water estimation from high-resolution split window radiance measurements," Journal of Applied Meteorology, vol. 29, pp. 863-877, 1990.
- [4] B. C. Gao and Y. J. Kaufman, "Water vapor retrievals using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) near-infrared channels," Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 108, 2003.
- [5] F.-C. Zhou, X. Song, P. Leng, H. Wu, and B.-H. Tang, "An Algorithm for Retrieving Precipitable Water Vapor over Land Based on Passive Microwave Satellite Data," Advances in Meteorology, vol. 2016, 2016.
- [6] M. N. Deeter, "A new satellite retrieval method for precipitable water vapor over land and ocean," Geophysical research letters, vol. 34, 2007.
- [7] L. A. Jones, C. R. Ferguson, J. S. Kimball, K. Zhang, S. T. K. Chan, K. C. McDonald, et al., "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, vol. 3, pp. 111-123, 2010.
- [8] Y. J. Kaufman and B.-C. Gao, "Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 30, pp. 871-884, 1992.
- [9] M. Mobasher, S. Purbagher Kordi, M. Farajzadeh, and A. Sadeghi Naeini, "Improvement of remote sensing techniques in TPW assessment using radiosonde data," Journal of Applied Sciences, vol. 8, pp. 480-488, 2008.
- [10] N. Lu, J. Qin, K. Yang, Y. Gao, X. Xu, and T. Koike, "On the use of GPS measurements for Moderate Resolution Imaging Spectrometer precipitable water vapor evaluation over southern Tibet," Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 116, 2011.
- [11] <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> .
- [12] A. Al-Yaari, J.-P. Wigneron, A. Ducharme, Y. Kerr, P. De Rosnay, R. De Jeu, et al., "Global-scale evaluation of two satellite-based passive microwave soil moisture datasets (SMOS and AMSR-E) with respect to Land Data Assimilation System estimates," Remote Sensing of Environment, vol. 149 ,pp. 181-195, 2014.
- [13] M. Kachi, M. Hori, T. Maeda, and K. Imaoka, "Status of validation of AMSR2 on board the GCOM-W1 satellite," in 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2014, pp. 110-113.
- [14] Q. Wu, H. Liu, L. Wang, and C. Deng, "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, vol. 45, pp. 187-199, 2016.
- [15] <http://gcom-w1.jaxa.jp>, 2016.
- [16] M. King and R. Greenstone, "EOS Reference Handbook: A Guide to Earth Science Enterprise and the Earth Observing System," ed: Greenbelt, MD: EOS Project Sci. Office, NASA/Goddard Space Flight Center, 1999.
- [17] C. Justice, J. Townshend, E. Vermote, E. Masuoka, R. Wolfe, N. Saleous, et al., "An overview of MODIS Land data processing and product status," Remote sensing of Environment, vol. 83, pp. 3-15, 2002.
- [18] <https://ladsweb.nascom.nasa.gov> .

- [19] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A .K. Fung, "Microwave remote sensing active and passive," 2015.
- [20] I. H. Woodhouse, Introduction to microwave remote sensing: CRC press, 2005.
- [21] J. R. Wang and W. Manning, "Near concurrent MIR, SSM/T-2, and SSM/I observations over snow-covered surfaces," Remote sensing of environment, vol. 84, pp. 457-470, 2003.
- [22] F. J. Wentz, "A well-calibrated ocean algorithm for special sensor microwave/imager," Journal of Geophysical Research: Oceans, vol. 102, pp. 8703-8718, 1997.