

برآورد آب قابل بارش کلی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS و داده‌های رادیوساوند: ناحیه تهران

محمد رضا مباحثری^{۱*}، سید مهدی پورباقرکردی^۲، منوچهر فرج زاده اصل^۳، علی صادقی نائینی^۴

- ۱- دانشیار گروه مهندسی سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
- ۲- کارشناس ارشد دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
- ۳- دانشیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
- ۴- کارشناس ارشد سازمان فضایی ایران، تهران، ایران

پذیرش: ۸۷/۹/۱۶

دریافت: ۸۶/۲/۲۵

چکیده

توانایی در برآورد آب قابل بارش کلی^۱ در پیش‌بینی میزان باران، زمان، میزان سرریز سدها و همچنین پیش‌بینی وقوع سیلاب مفید می‌باشد. برای استخراج آب قابل بارش ماهواره‌ای از باندهای فرسرخ نزدیک تصاویر سنجنده مادیس استفاده شده است. اعتبارسنجی آب قابل بارش ماهواره‌ای، با داده‌های رادیوساوند انجام شده است. با توجه به محدودیت‌های اجرای الگوریتم به شرایط آسمان فاقد ابر و جو تقریباً پایدار، وضعیت عمومی جو در روز گذر ماهواره به کمک نمودارهای ترمودینامیکی Skew-T و نیز تفسیر بصری، به‌طور کامل بررسی شده است. به کمک معادلات ترمودینامیکی، آب قابل بارش حاصل از کل گمانه زنی‌های رادیوساوند محاسبه شده است. آن‌گاه با توجه به پایداری و نبود ورود توده هوای جدید به منطقه برای روزهای منتخب، از طریق ترسیم و تحلیل‌های نمودارهای Skew-T، آب قابل بارش کلی به‌وسیله رادیوساوند در لحظه گذر ماهواره درون‌یابی شده است. از طریق تکنیک نسبت بازتابندگی ظاهری^۲ باند جذبی به باند غیر جذبی بخار آب MODIS، میزان قابلیت عبور بخار آب^۳ برای هر یک از باندهای مخصوص بخار آب به‌دست آورده شد. کل بخار آب قابل بارش در مسیر

E-mail: mobasheri@kntu.ac.ir

* نویسنده مسئول مقاله:

1. Total perceptible water
2. Apparent reflectance
3. Water vapor transmittance



سنجنده- زمین، با توجه به زوایای زینت خورشید، ماهواره و قابلیت عبور بخار آب به دست آمده از تکنیک نسبت باندی با اجرای الگوریتم باند فرسوخ نزدیک مادیس در شرایط مختلف جوئی به دست آورده شد. برای تعیین مقادیر α و β در الگوریتم مذکور از شاخص EVI استفاده شد. در پایان، رگرسیون بین آب قابل بارش ماهواره‌ای و آب قابل بارش محاسبه شده از داده‌های رادیوساوند، نشان داده است که باندهای ۱۸ و ۱۹ مادیس برای استخراج آب قابل بارش در شرایط جوئی ایستگاه مهرآباد مناسب می‌باشند.

کلیدواژه‌ها: آب قابل بارش کلی، سنجش از دور، رادیوساوند، MODIS، تهران.

۱- مقدمه

ایران سرزمینی نسبتاً خشک است. به طوریکه بارندگی در ایران کمتر از یک سوم متوسط بارندگی در جهان است [۱]. چنین کشورهایی که با کمبود آب مواجه هستند، مدیریتی به روز از منابع آب را می‌طلبند. یکی از ابزار مدیریتی در این زمینه، آگاهی از میزان کل آب قابل بارش (TPW) در جو است. تمامی بخار آب موجود را در ستونی از جو که قابلیت بارش دارد، آب قابل بارش کلی گویند. این ستون عمودی جو از سطح زمین آغاز و تا نقطه پایانی بخار آب در جو ادامه پیدا می‌کند [۲]. پیش‌بینی آب قابل بارش کلی از مسائل مشترک هواشناسی و هیدرولوژی است که اگر قابل قبول باشد، می‌تواند راهگشای بسیاری از مسائل هواشناسی در پیش‌بینی دقیق وضعیت جو و نیز بسیاری از مسائل در تخمین بارش و رواناب باشد. هیدرولوژیست‌ها برای تخمین حداکثر بارش محتمل- که فاکتور مهمی در تعیین محاسبات مربوط به مخازن و سرریز سدها و نیز پیش‌بینی وقوع سیلاب می‌باشد- آب قابل بارش کلی را در محاسبات لحاظ می‌کنند. به مقدار آبی که در هوا وجود دارد، رطوبت گفته می‌شود که به سه حالت فیزیکی جامد، مایع، گاز وجود دارند، در اینجا فقط حالت گاز که همان بخار آب است، مورد توجه ماست. باید توجه داشت بارش و آب قابل بارش دو مفهوم مجزا از هم هستند. از لحاظ تعریف، بارش هرگونه رطوبت متراکم شده‌ای است که به سطح زمین فرو می‌ریزد. بنابراین بارش در واقع تراکم و میعان ذرات ریز بخار آب در هوا می‌باشد و به اشکال مختلف فیزیکی برف،

1. Enhanced vegetation index

باران، تگرگ و... به سطح زمین می‌رسد. اما آب قابل بارش به این مفهوم است که اگر با توجه به نسبت آمیزه تحت شرایطی دمای هوا کمتر از دمای نقطه شبنم شود، پیش‌بینی شود که چه مقدار از کل رطوبت ستون اتمسفر به قطرات ریز مایع تبدیل می‌شود که بر حسب ارتفاع ایستایی آب بیان می‌شود [۲]. آب قابل بارش الزاماً به مفهوم نزولات جوی نخواهد بود. اینکه چه مقدار از این آب به سطح زمین خواهد رسید به بسیاری از پارامترهای دیگر مثل مقدار و نوع هواویزها، پروفایل دما و فشار جو، جهت و سرعت باد و غیره بستگی دارد. تاکنون در کشور برای محاسبه آب قابل بارش کلی، تنها از داده‌های حاصل از گمانه زنی‌های رادیوساوند استفاده می‌شده است. متأسفانه هنوز در ایران از فناوری جدید سنجش از دور برای برآورد TPW ماهواره‌ای استفاده نشده است.

برآورد آب قابل بارش با به‌کارگیری داده‌های سنجش از دور در منابع خارجی به خصوص در دهه ۱۹۸۰ بیشتر برای سطوح وسیع اقیانوسی به‌ویژه اقیانوس‌های مناطق حاره‌ای انجام شده است. علت آن شاید به‌خاطر همگن‌بودن سطوح اقیانوسی نسبت به خشکی و نبود تغییرات دمای سطحی آن باشد.

در دهه ۱۹۹۰ روش‌های جدیدی برای تخمین TPW با در نظر گرفتن تغییرات دمایی روی اراضی خشک با استفاده از تصاویر ماهواره انجام شده است که نمونه‌ای از این کار به وسیله مک میلین و کلسپیس^۱ در سال ۱۹۹۰ انجام شد [۴، صص ۸۵۱-۸۶۲].

آگاهی کوتاه مدت از PW با روش‌های سنتی، مشمول صرف هزینه و زمان زیادی است. علاوه بر آن در بسیاری از مناطق، به‌طور مثال نواحی وسیع اقیانوسی و اراضی وسیع کویری عملاً استفاده از این روش‌ها غیر ممکن است.

با روی کار آمدن فناوری جدید سنجش از دور امکان برآورد حجم بخار آب قابل بارش با کمک باندهای جذبی بخار آب و باندهای حرارتی در هر زمان و مکان و در هر مقیاسی ممکن است [۵، صص ۴۵۹-۴۷۳].

تخمین TPW بر پایه داده‌های کاوشگر رادیوساوند، به طور لزوم بهترین روش نمی‌باشند، به این دلیل که:

۱- نفوذ رادیوساوندها در ابرها و قرائت اضافی از میزان بخار آب جو تحت تأثیر ذرات

1. Kleespies, and McMillin

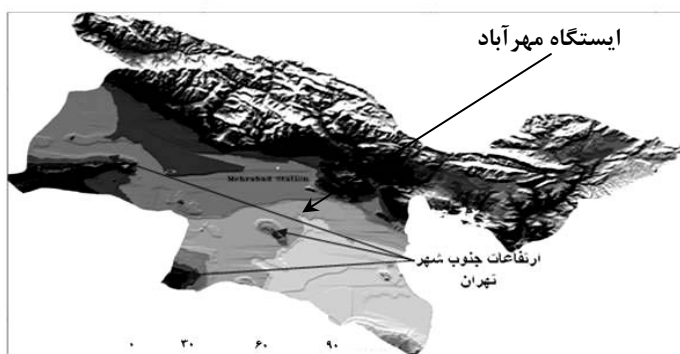


بسیار ریز مولکول آب عدم قطعیتی در اندازه‌گیری‌ها را به همراه دارد،
۲- تراکم بسیار کم ایستگاه‌های همدید و نقصان شدید داده‌ها به خصوص روی اقیانوس‌ها
از گستردگی داده‌ها می‌کاهد.
۳- گمانه زنی‌های محدود به مکان و زمان از جو نقصان داده را در پی خواهد داشت.
۴- امکان اشتباه در ثبت داده‌های همدیدی به وسیله دیده‌بان‌ها وجود دارد.
بنابراین استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای بازیابی TPW و به‌کارگیری داده‌های
رادیوساوند برای اعتبارسنجی الگوریتم به‌کار گرفته برای برآورد آب قابل بارش کلی از
تصاویر ماهواره، به‌طور هم‌زمان مفید خواهد بود که هدف اصلی مطالعه حاضر می‌باشد.

۲- مواد و روشها

۲-۱- منطقه مطالعه شده

منطقه مطالعه شده ایستگاه جوّ بالای مهرآباد تهران در موقعیت ۵۱ درجه و ۲۱ دقیقه طول
جغرافیایی و ۳۵ درجه و ۴۱ دقیقه عرض جغرافیایی و به ارتفاع ۱۱۹۱ متر از سطح دریا و
دارای شناسه جهانی OIII و شماره ایستگاه ۴۰۷۵۴ می‌باشد. این ناحیه مطابق شکل ۱ در
منطقه‌ای هموار و با شیب کم واقع شده و با دشت‌های اطراف تقریباً هم ارتفاع می‌باشد.
خصوصیات آب و هواشناسی ایستگاه مهر آباد نیز با دشتهای مجاور تقریباً یکسان می‌باشد.
توپوگرافی و ارتفاعات، عامل مهمی در توزیع میزان آب قابل بارش هستند [۵، ص ۳].



شکل ۱ موقعیت توپوگرافیکی منطقه مطالعه شده نسبت به استان تهران

کوه‌های شمال شهر و تپه‌های مرتفع شرق تهران با شیب‌های نسبتاً تند و نیز ارتفاعات جنوب شرقی تهران که در شکل ۱ دیده می‌شوند عوامل مهمی در تغییرات ناگهانی توزیع آب قابل بارش هستند.

۲-۲- داده‌های رادیوساوند

مرسوم‌ترین روش‌ها برای شناخت وضعیت عمومی جو، ترسیم نمودارهای ترمودینامیکی و تحلیل از روی آنها می‌باشد. نمودارهای ترمودینامیکی هواشناسی به عنوان یک ابزار کمکی، در کارهای عملی و روزانه هواشناسان برای محاسبه کمیت‌های مختلفی به کار می‌روند که کاوشگر یا گمانه زن نمی‌تواند آنها را اندازه‌گیری کند. نمونه‌ای از این نمودارها Skew-T است (که در بیشتر مراکز هواشناسی از آن استفاده می‌شود) که در آن با بررسی چگونگی تغییرات در رفتار منحنی‌های نیمرخ دما در زمان‌های متناوب، می‌توان به پایداری یا ناپایداری هوا پی برد. از این جهت در انتخاب تصاویر ماهواره‌ای هم گذر مفید می‌باشند. دما، فشار، نقطه شبنم، سرعت و سمت باد در ترازهای استاندارد جو و در ترازهایی که تغییرات باد قابل توجه است، کمیت‌هایی هستند که رادیوساوند از ترازهای مختلف جو به زمین ارسال می‌کند [۶].

آرشیو نسبتاً کاملی از داده‌های رادیوساوند در سایت دانشگاه ویومینگ^۱ و سازمان هواشناسی کشور در دسترس می‌باشد. همچنین داده‌های ماهواره‌ای ترا از سال ۱۹۹۹م. به بعد در سازمان فضایی کشور موجود است. بنابراین ابتدا تصاویر مادیس بدون ابر تهران انتخاب، سپس داده‌های رادیوساوند بر اساس تصاویر منتخب استخراج شدند. برای کنترل پارامترهای مؤثر بر تغییرات موجودی بخار آب در جو، از تصاویر بدون ابر و نیز فاقد هر گونه پدیده خاص جوی نظیر توفندها^۲ و حرکات چرخند^۳ یا واچرخند^۴ و یا گردباد استفاده شد. برای این‌کار ابتدا یک تحلیل دقیقی از نمودارهای ترمودینامیکی هواشناسی مانند Skew-T مربوط به سال‌های انتخاب‌شده را انجام داده و اطلاعاتی مثل تعیین نقطه شبنم، فشار بخار

1. University of Wyoming
2. Hurricanes
3. Cyclonic Systems
4. Anticyclone Systems



آب، رطوبت نسبی، بررسی نیمرخ دما و فشار، تعیین دما و فشار میعان^۱ که در واقع مرحله اولیه تشکیل ابر می‌باشد، بررسی شده است [۷]. این امکان وجود دارد که تصویری به ظاهر کاملاً بدون ابر باشد، اما گونه‌ای از ابرها که ابعاد آن کمتر از یک کیلومتر (یعنی کمتر از قدرت تفکیک فضایی مادیس) است، به وسیله ماهواره آشکارسازی نشوند. این خطا دقت برآورد آب قابل بارش کلی را بسیار پایین می‌آورد؛ یعنی آب قابل بارش را بیشتر از مقدار واقعی تعیین می‌کند، زیرا الگوریتم‌هایی که در تعیین آب قابل بارش به کار می‌روند، اکثراً مربوط به شرایط آسمان فاقد ابر است.

۲-۳- داده‌های ماهواره‌ای

پردازش‌های هندسی بر داده‌های استفاده شده در این تحقیق با همکاری سازمان فضایی ایران صورت گرفته است. در مورد داده‌های MODIS، اطلاعات ابتدا بصورت فشرده و به فرمت PDS ذخیره می‌شود. سپس به وسیله نرم افزار IMMAP داده‌ها از حالت فشرده خارج شده خروجی اول با نام MOD 01 و به فرمت HDF ذخیره می‌شود. سپس از داده‌های تولید شده L1A که از نظر هندسی تصحیح شده می‌باشند پارامترهای کالیبراسیون با استفاده از Header داده‌ها باز خوانی شده و تولید می‌شود. آن‌گاه با استفاده از نرم افزار IMMAP، داده‌ها از جنبه رادیومتریک به روش پیکسل به پیکسل برای کلیه باندها کالیبراسیون می‌شوند. در پایان به وسیله نرم افزار Scan Magic تصحیحات هندسی بر اساس اطلاعات مداری و در سیستم لامبرت با بیضوی مبنای WGS ۸۴ و به روش نزدیک‌ترین همسایگی^۲ بازنویسی شدند.

مشخصات پارامتری سیستم مختصات مبنا (سیستم لامبرت متشابه مخروطی) به قرار

زیر است:

Projection: Lambert conformal system

Standard parallel ۱:۳۰N

Standard parallel ۲:۳۶N

1. Condensation Temperature

2. Nearest Neighbour

Central meridian (Long): ۵۴E

Origin parallel (Lat): ۲۴N

False easting: ۵۰۰۰۰۰۰

False northing: ۳۰۰۰۰۰۰۰

ابتدا تصاویر ماهواره‌های با مشخصات پارامتری فوق و نوع بیضوی WGS-۸۴ در محیط نرم افزار سنجش از دوری EERDAS IMAGINE ۸/۷، تعریف شد تا تصاویر برای نرم‌افزار شناخته شده باشد. آن‌گاه سیستم تصویر لامبرت به سیستم تصویر GCS یا جغرافیایی با نوع بیضوی WGS-۸۴ به واحد غیر متریک تبدیل شد. با این کار سیستم تصویر تمامی تصاویر مورد نظر مانند سیستم تصویر نقطه پرتاب بالون حاوی رادیوساوند، مشترک و یکی شدند.

۲-۴ - محاسبه آب قابل بارش کلی از داده‌های منتخب رادیوساوند در جو مهرآباد

مراحل مختلف استخراج اطلاعات مورد نیاز از داده‌های رادیوساوند به شرح ذیل است:

گام اول: محاسبه فشار بخار آب

ابتدا فشار بخار آب به کمک دمای نقطه شبنم و با استفاده از رابطه زیر به دست آمده است. سپس از این کمیت برای محاسبه رطوبت ویژه استفاده می‌شود.

$$e_s(T_d) = 6/11 \text{Exp} \left[\frac{L_v}{R_v} \left(\frac{1}{273/15} - \frac{1}{T_d} \right) \right] \quad (1)$$

که در آن T_d دمای نقطه شبنم، $L_v = 2/5 \times 10^6 \text{ jkk}^{-1}$ گرمای نهان تبخیر و $R_v = 461/5 \text{ jkk}^{-1}$ ثابت ویژه گازها است [۷، ص ۲۶].

گام دوم: محاسبه رطوبت ویژه با استفاده از معادله (۲)

$$q = q(T_d) = \frac{0/622 e_s(T_d)}{[p - 0/378 e_s(T_d)]} \quad (2)$$



که در آن $e_s(T_d)$ فشار جزئی اشباع بخار آب، P فشار هوا به میلی بار و q نم ویژه برحسب گرم بر کیلوگرم است [۸، صص ۵-۱۵].
گام سوم: محاسبه آب قابل بارش کلی برای کل گمانه زنی‌ها در دو زمان صفر و دوازده به وقت گرینویچ با استفاده از معادله (۳)

$$P_w = \frac{1}{\rho_w g_m} \int q \cdot dp \quad (3)$$

که در آن چگالی آب و p_w آب قابل بارش به میلی‌متر که مقدارش برای عرض‌های میانه بین ۱۰-۵۰ میلی متر است. g_m میانگین شتاب جاذبه زمین برحسب متر بر مجذور ثانیه که برای هر محل خاص با مشخصات عرض جغرافیایی ϕ و ارتفاع H می‌توان محاسبه کرد [۷، ص ۶۲].

۲-۵- مراحل استخراج آب قابل بارش با استفاده از الگوریتم باند فروسرخ نزدیک MODIS

گام اول: محاسبه میزان قابلیت عبور جو برای باندهای بخار آب و میزان بازتابندگی ظاهری [۹، صص ۸۷۱-۸۸۴]:
قابلیت عبور جو در باند جذبی متوسط بخار آب:

$$T_w(940/865) = \rho_{.915-.965}^* / \rho_{.845-.885}^* \quad (4)$$

قابلیت عبور جو در باند جذبی ضعیف بخار آب:

$$T_w(905/865) = \rho_{.89-.92}^* / \rho_{.845-.885}^* \quad (5)$$

قابلیت عبور جو در باند جذبی قوی بخار آب:

$$T_w(936/865) = \rho_{.93-.94}^* / \rho_{.845-.885}^* \quad (6)$$

که در آن ρ^* بازتابندگی ظاهری محاسبه شده در بالای جو برای هر باند، T_w قابلیت

عبور یا شفافیت جو برای بخار آب است. بازتابندگی ظاهری با استفاده از معادله زیر ارائه می‌شود [۱۰، صص ۱-۲۵]:

$$\rho^*_{(\lambda)} = \frac{L_{(Sensor)}(\lambda)}{L_{(Sun)}(\lambda)} \quad (7)$$

بنا به تعریف نسبت رادیانس طیفی رسیده به سنجنده به رادیانس طیفی فرودی خورشیدی در بالای جو را بازتابندگی ظاهری گویند.

میزان رادیانس رسیده به سنجنده را می‌توان به صورت زیر نوشت [۱۰، ص ۳].

$$L_{(Sensor)}(\lambda) = L_{(Sun)}(\lambda).T(\lambda).\rho(\lambda) + L_{Path}(\lambda) \quad (8)$$

که در آن طول موج، $L_{(Sensor)}(\lambda)$ رادیانس طیفی رسیده به سنجنده و $L_{(Sun)}(\lambda)$ تابش طیفی خورشیدی در بالای جو است. همچنین $\rho(\lambda)$ بازتابندگی دو راستایی سطح^۱ و $L_{Path}(\lambda)$ تابش پراکنده شده به وسیله هواویزها در مسیر اپتیکی سنسور- خورشید- زمین است که میزان آن تقریباً ۱۰ درصد $L_{(Sensor)}(\lambda)$ می‌باشد. از آنجایی که ضخامت اپتیکی هواویزها (مباشری، ۱- ۱۳۸۵) در ناحیه فرسرخ نزدیک خیلی کم است، در این صورت از فوتونهایی که بیش از یکبار به وسیله سطح پراکنده شده‌اند، صرف نظر شده‌است. عبارت $L_{(Sun)}(\lambda).T(\lambda).\rho(\lambda)$ در معادله فوق انرژی تابش طیفی بازتابیده خورشید از سطح است که به این ترتیب مقدار آن ۹۰ درصد $L_{(Sensor)}(\lambda)$ است [۱۱].

به علت اینکه بیشتر هواویزها تا ارتفاع دو کیلومتری جو قرار دارند و از طرف دیگر تجمع بخار آب نیز در این ارتفاع می‌باشد، پراکندگی تابش به وسیله هواویزها در جذب بخار آب مؤثر است. در نتیجه شامل ویژگی‌های جذبی بخار آب نیز می‌باشد [۴، ص ۱۰].

گام دوم: تصحیح مقادیر دمای درخشندگی اندازه‌گیری شده به وسیله ماهواره این تصحیح به وسیله رابطه زیر انجام می‌شود [۱۲، صص ۹۷-۱۱۱].

$$\text{Reflectance} = \text{scale} * (\text{DN} - \text{Offset}) \quad (9)$$

1. Surface bidirectional reflectance



گام سوم: تبدیل قابلیت عبور بخار آب به آب قابل بارش کلی رابطه بین T_w یا قابلیت عبور بخار آب و بخار آب قابل بارش کلی TPW (W) را می‌توان بصورت نمایی نشان داد، علاوه بر این به خاطر اشباع بودن جذب بخار آب، ریشه دوم W ، یعنی \sqrt{W} به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شده است [۹، ص ۶]:

$$T_w(940/1865) = \exp(\alpha - \beta\sqrt{W}) \quad (10)$$

برای این‌کار از معادله فوق می‌توان نوشت:

$$W = \left(\frac{\alpha - \ln T_w}{\beta}\right)^2 \quad (1-10)$$

با توجه به زوایای سمت الرأس خورشید و ماهواره و در نتیجه اثر توده هوا ($1/\cos\theta$) می‌توان مقدار W را در مسیر اپتیکی سنسور- خورشید- زمین ماهواره تعریف کرد:

$$W^* = \left(\frac{\alpha - \ln T_w}{\beta}\right)^2 \times \left(\frac{1}{\cos\theta} + \frac{1}{\cos\theta}\right) \quad (11)$$

که در آن θ زاویه سمت الرأس ماهواره، θ_0 زاویه سمت الرأس خورشید و W^* همان TPW یا آب قابل بارش کلی در مسیر اپتیکی سنسور- خورشید- زمین برحسب سانتیمتر است. α و β ضرایب ثابت منطقه‌ای هستند که بستگی به نوع پوشش منطقه و نوع دید ماهواره دارد.

گام چهارم: تعیین ضرایب α و β از روی شاخص گیاهی:

$$EVI = \frac{B_{NIR} - B_{Red}}{B_{NIR} + C_1/B_{Red} - C_2/B_{blue} + L} (1 + L) \quad (12)$$

B_{NIR} باند فرسرخ نزدیک MODIS، B_{Red} و B_{blue} باند سرخ و آبی سنجنده MODIS هستند. L فاکتور خاک و C_1 و C_2 ضرایبی هستند که به ترتیب $0/6$ و $0/7$ و $0/1$ می‌باشند [۱۳]. در این پژوهش، ابتدا به کمک نمودارهای ترمودینامیکی Skew-T، تصاویر مناسب و

سازگار با الگوریتم انتخاب شدند. با استفاده از تصاویر بدون اغتشاشات جوئی، آب قابل بارش ماهواره ای به کمک باندهای بخار آب سنجنده MODIS و با اجرای الگوریتم Near-IR MODIS برای جو ایستگاه مهرآباد تهران استخراج شده آنگاه برای اعتبارسنجی آن از محاسبات آب قابل بارش کلی حاصل از گمانه زنی های رادیوساوند در همان روز استفاده شده است [۱۴، صص ۶۱۷-۶۲۱].

از آنجایی که در این نوع مطالعات نیازمند تصاویر بدون ابر و هر گونه پدیده خاص جوی می باشیم، لازم است که یک تحلیل دقیق تری از تصاویر بدون ابر و بدون پدیده خاص جوی داشته باشیم. برای این کار باید نمودارهای ترمودینامیکی هواشناسی نظیر Skew-T مربوط به زمانهای انتخاب شده برای داده های رادیوساوند ترسیم و تحلیل شده است. الگوریتم ذیل برای بازیابی TPW در این شرایط در محیط ENVI به کار گرفته شد.

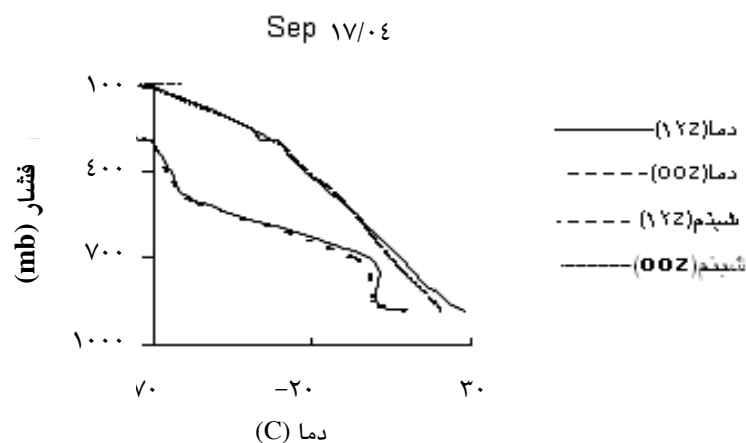
$$(((-0.5 \cdot \log(b17/b2)) / 0.65)^{0.2}) * ((1 / \cos(22/42 * 3/14/180)) + (1 / \cos(27/0.5 * 3/14/180))) \quad (13)$$

۳- نتایج

۳-۱- نمودار ترمودینامیکی Skew-t تاریخ ۱۷ سپتامبر ۲۰۰۴

با توجه به شکل ۲ نیمرخ دما در دو زمان صفر و ۱۲ دارای الگویی مشابه بوده است. این امر می تواند مبین این باشد که هیچ گونه پدیده خاص هواشناسی نظیر ورود یا خروج جبهه های گرم یا سرد و یا سایر پدیده های جوی که باعث تغییر شدید پارامترهای جوی در دو زمان مذکور شده باشد، وجود ندارد چرا که شیب دو نمودار در دو زمان تقریباً یکسان است. این به آن معنی است که نمودارهای skew-t در دو مقطع زمانی صفر و ۱۲ نسبت به یکدیگر فقط شیفیت پیدا کرده و هیچ گونه آنومالی جوی^۱ خاصی در این فاصله زمانی اتفاق نیفتاده است. بنابراین قاعدتاً نباید تغییرات خاصی مانند افزایش یا کاهش نسبت آمیزه بخار آب در این فاصله زمانی داشته باشیم.

1. Anomaly



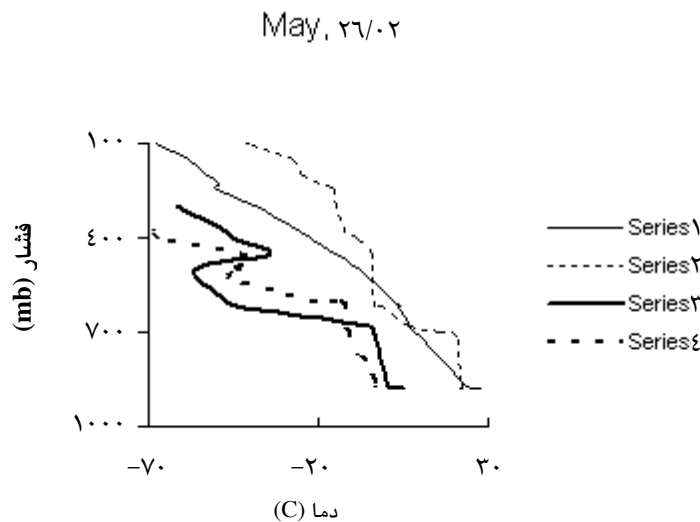
شکل ۲ نمودارهای skew-T رادیوساوند مربوط به تاریخ ۱۷ سپتامبر ۲۰۰۲ در دو زمان صفر و ۱۲:۰۰ به وقت گرینویچ

علاوه بر نیمرخ دما، نیمرخ نقطه شبنم که معیاری برای شروع مرحله تراکم بخار آب و تولید ابر محسوب می‌شود، در این نمودارها رسم شده است. روشن است که شیب تغییرات منحنی نقطه شبنم وابستگی و حساسیت بیشتری به توزیع قائم دمای جو دارد. منحنی‌هایی که در زیر منحنی نیمرخ دما رسم شده است، تغییرات نقطه شبنم را نسبت به ارتفاع نشان می‌دهد که همان منحنی‌های نقطه شبنم هستند. از آنجا که روند کلی دما در لایه وردسپهر^۱ نزولی است، تغییرات نقطه شبنم نیز در این لایه در صورتیکه نیمرخ رطوبت نیز همانند دما باشد، کاهش پیدا می‌کند. با کاهش نقطه شبنم و وجود نم در هوا، رطوبت نسبی افزایش یافته و ممکن است به مرحله تراکم یا نقطه شروع برون ریزش آب و تولید ابر برسد. در مقابل وجود پدیده وارونگی در ترازهای مختلف لایه وردسپهر مانع از سرد شدن سریع هوا و در نتیجه مانع رسیدن به مرحله تراکم و تشکیل ابر می‌شود.

1. Troposphere

۳-۲- آنومالی جوی در نمودارهای ترمودینامیکی تاریخ ۲ می ۲۰۰۲

در شکل ۳ آنومالی یا ناهنجاری در هر دو نمودار skew-t در دو زمان صفر و ۱۲ نشان می‌دهد که در فاصله زمانی صفر و ۱۲ جو کاملاً ناپایدار بوده است. به احتمال قوی این آنومالی به خاطر ورود یا خروج جبهه‌ای خاص به این منطقه بوده است که نتیجه آن تغییرات دما، تغییرات ناگهانی بخار آب و به‌طور کلی شرایط غیر نرمال هستیم. همچنین از آنومالی نمودارهای حاصل از داده‌های رادیو ساوند مربوط به این روز می‌توان دریافت که جو بی‌ثباتی در این تاریخ حاکم بوده و از این لحاظ تصویر ماهواره‌ای مربوط به این روز برای این تحقیق مناسب نمی‌باشد.



شکل ۳ آنومالی نمودارهای skew-T رادیو ساوند مربوط به تاریخ ۱۹ می ۲۰۰۲ در دو زمان صفر و ۱۲ به وقت گرینویچ

با توجه به شکل ۴، می‌توان گفت که تراکم پوشش گیاهی منطقه اطراف ایستگاه مهرآباد ضعیف تا متوسط و ترکیب با پوشش خاک است. بنابراین مقادیر مناسب برای ضرایب α و β به ترتیب ۰/۰۲۰ و ۰/۶۵ انتخاب می‌شوند. تأثیر این ضرایب در الگوریتم استخراج آب قابل بارش ماهواره‌ای، نزدیک‌ترین جواب را با آب قابل بارش حاصل از داده‌های رادیو ساوند

می‌دهد. این ضرایب به وسیله گائو و کافمن برای چنین شرایطی پیشنهاد داده شد.



شکل ۴ بارزسازی پوشش گیاهی با شاخص EVI برای تعیین ضرایب آلفا و بتا

جدول ۱ آب قابل بارش کلی ستون جو حاصل از داده‌های رادیوساوند در دو زمان صفر و ۱۲ (برحسب mm)

روز زمان	۲۶ می ۲۰۰۳	۲۶ می ۲۰۰۲	۱۵ سپتامبر ۲۰۰۲	۱۷ سپتامبر ۲۰۰۴
۰۰Z	۵/۳۴	۸/۶۵	۶/۰۹	۱۵
۱۲Z	۸/۴۸	۱۰/۵	۴/۹۱	۱۲/۵

جدول ۲ آب قابل بارش کلی ستون جو حاصل از داده‌های رادیوساوند در زمانهای هم‌گذر با ماهواره Terra-MODIS در جو مهرآباد (برحسب mm)

روز گذر ماهواره	۲۶ می ۲۰۰۳	۲۶ می ۲۰۰۲	۱۵ سپتامبر ۲۰۰۲	۱۷ سپتامبر ۲۰۰۴
کل آب قابل بارش رادیوساوند	۷/۲۷	۹/۷۸	۵/۳۷	۱۳/۴۸

۳-۳- محاسبه آب قابل بارش از تصاویر ماهواره ای ۲۶ می ۲۰۰۳

این مطالعه در شرایط زیر صورت گرفته است:

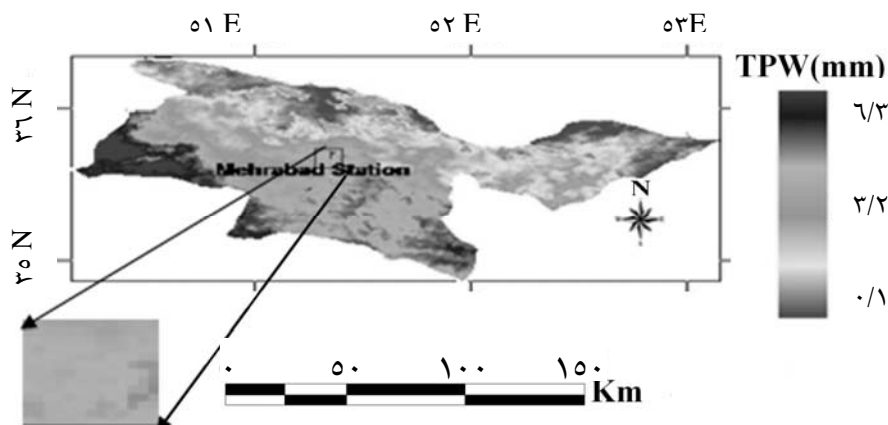
خروجی محاسبه با فرض جو مرطوب در شکل ۶ نشان داده شده است. نتیجه محاسبه میانگین مقدار آب قابل بارش کلی حاصل از نسبت باند ۱۷ به ۲ برابر با ۴/۶۹ میلی‌متر را نشان می‌دهد (جدول ۳).

1. Gao and Kaufman, 2002

از آنجایی که از قدرت تفکیک فضایی یک کیلومتر سنجنده مادیس برای اهداف بخار آب استفاده می‌شود، نمی‌توان TPW یک پیکسل حاوی ایستگاه مهرآباد را با TPW محاسبه شده از داده‌های رادیوساوند مقایسه کرد، زیرا دقت در اهداف هواشناسی برای شرایطی مثل ایستگاه منتخب که در منطقه مسطح و هموار قرار گرفته، در حد یک پیکسل نیست. از طرفی چون مهرآباد در منطقه‌ای با توپوگرافی ملایم قرار گرفته و تا شعاع چند کیلومتری با دشت‌های اطرافش تقریباً هم ارتفاع می‌باشد (شکل ۱). بنابراین پارامترهایی همچون نسبت آمیزه، فشار جزئی بخار آب و تا حدودی رطوبت نسبی این ایستگاه تا شعاع چند کیلومتری قابل تعمیم هستند. با این توضیح یک پنجره ۱۳×۱۳ در اطراف ایستگاه مهرآباد انتخاب شد تا مقادیر میانگین آب قابل بارش این پنجره به‌عنوان معیار آب قابل بارش کلی ایستگاه مهرآباد در نظر گرفته شود.

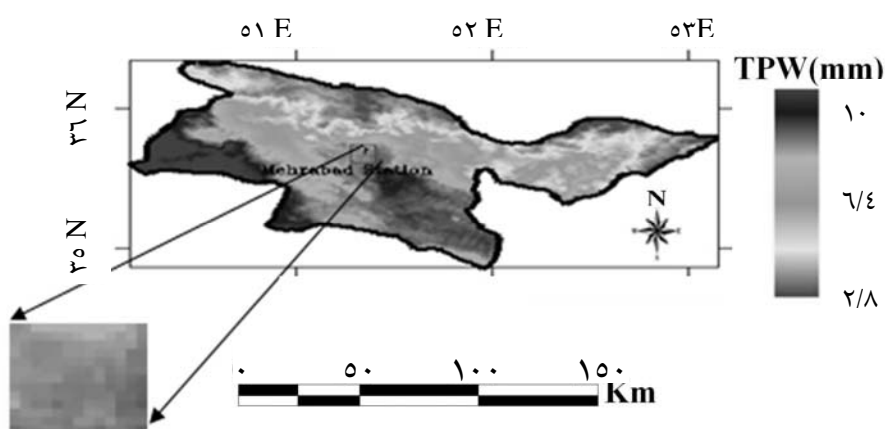
جدول ۳ مقادیر میانگین کل آب قابل بارش از سنجنده مادیس و آب قابل بارش از رادیوساوند در تاریخ های هم گذر

تاریخ گذر	۲۰۰۲/۹/۱۵	۲۰۰۲/۵/۲۶	۲۰۰۳/۵/۲۶	۲۰۰۴/۹/۱۷
آب قابل بارش از رادیوساوند (mm)	۵/۳۷	۹/۷۸	۷/۲۷	۱۳/۴۸
آب قابل بارش ماهواره ای (mm)	۲ به ۱۷	۴/۹۵	۰/۵۶	۴/۶۹
	۲ به ۱۸	۱۰/۰۰۴۰۳	۱۲/۵۷	۸/۳۸
	۲ به ۱۹	۴/۹۰۰۹۹	۵/۱۱	۶/۵۸

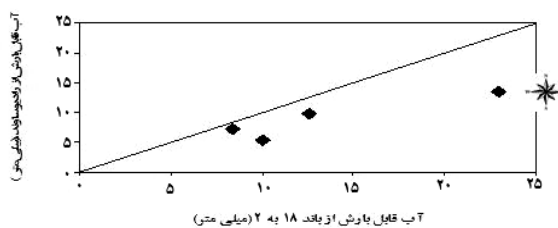


شکل ۵ آب قابل بارش کلی حاصل از باند ۱۷ به ۲ در گذر ۲۶ می ۲۰۰۳

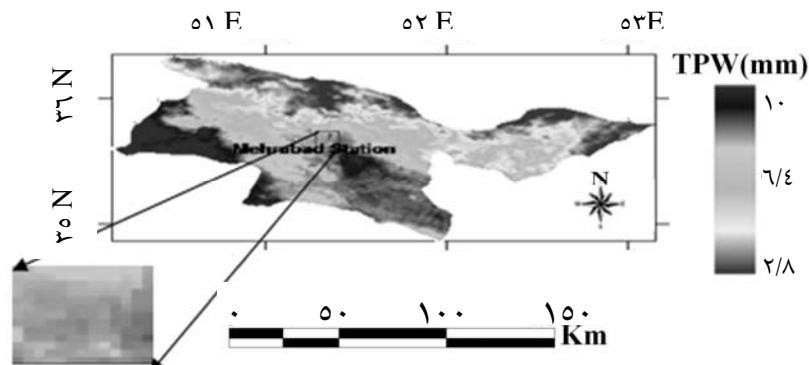
در فرض جو خشک نتیجه محاسبه میانگین مقدار آب قابل بارش کلی حاصل از نسبت باندها ۱۸ به ۲ برابر با ۸/۳۸ میلی‌متر را نشان می‌دهد (شکل‌های ۶ و ۷) و در فرض جو معمولی نتیجه محاسبه میانگین مقدار بخار آب قابل بارش کلی حاصل از نسبت باندها ۱۹ به ۲ برابر با ۶/۸۵ میلی‌متر را بیان می‌کند (شکل‌های ۸ و ۹ و جدول ۳). نتیجه: میانگین مقدار آب قابل بارش کلی حاصل از نسبت باندها ۱۹ به ۲ برابر با ۶/۸۵ میلی‌متر بدست آمده است.



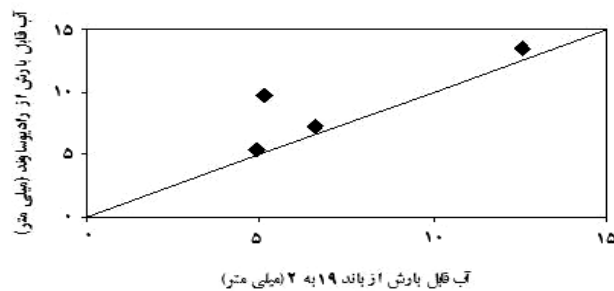
شکل ۶ آب قابل بارش کلی حاصل از باندها ۱۸ به ۲ در گذر ۲۶ می ۲۰۰۲



شکل ۷ مقایسه بین آب قابل بارش به دست آمده از نسبت باندها ۱۸ به ۲ و آب قابل بارش محاسبه شده از داده‌های رادیوساوند



شکل ۸ اب قابل بارش کلی حاصل از باند ۱۹ به ۲ در گذر ۲۶ می ۲۰۰۲



شکل ۹ مقایسه بین آب قابل بارش به دست آمده از نسبت باند ۱۹ به ۲ و آب قابل بارش محاسبه شده از داده‌های رادیوساوند

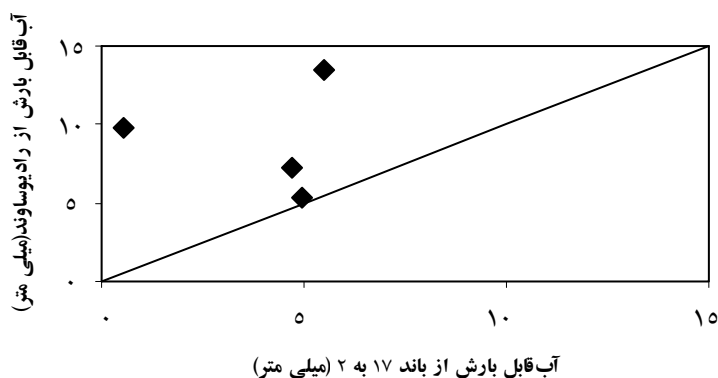
۴- نتیجه‌گیری

از ماتریس همبستگی^۱ بین نسبت بازتابندگی باندی و آب قابل بارش حاصل از نسبت های باندی نتیجه گرفته می‌شود، که رابطه معکوسی بین نسبت بازتابندگی باندی و آب قابل بارش حاصل از نسبت‌های باندی وجود دارد. همچنین از برقراری رگرسیون بین TPW حاصل از گمانه زنی‌های رادیوساوند و TPW حاصل از به‌کارگیری الگوریتم باند فرسرخ نزدیک سنجنده مادیس نتیجه گرفته می‌شود که از بین سه نسبت باندی، نسبت‌های باندی ۱۸ به ۲ و ۱۹ به ۲ برای استخراج آب قابل بارش ماهواره‌ای در شرایط جوی حاکم بر زمان‌های منتخب

1. Correlation Matrix



مناسب می‌باشند. به طوری که TPW استخراج شده از نسبت‌های باندی ۱۸ به ۲ و ۱۹ به ۲ به ترتیب با ضرایب همبستگی ۰/۷۱ و ۰/۸۴ با TPW محاسبه شده از داده‌های رادیوساوند همخوانی دارند. اما نسبت باندی ۱۷ به ۲ (شکل ۱۰). برای جو مهرآباد در گذرهای مذکور مناسب بنظر نمی‌رسد. دلیل این امر این است که این نسبت باندی تنها برای شرایط جو مرطوب (به طور مثال برای جو بندر انزلی) مناسب بوده و نسبت‌های ۱۸ به ۲ و ۱۹ به ۲ برای شرایط جوی خشک و معمولی مناسب است. این نتیجه نیز تهران را جزو شهرهای نیمه خشک نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ مقایسه بین آب قابل بارش به دست آمده از نسبت باند ۱۷ به ۲ و آب قابل بارش محاسبه شده از داده‌های رادیوساوند

البته باید اذعان کرد که تعداد چهار نقطه برای ارزیابی مدل به دست آمده کافی نبوده و نیاز به داده‌های همزمان بیشتری برای آن می‌باشد. همچنین این مدل باید برای نقاط بیشتری از کشور و با استفاده از داده‌های همزمان رادیوساوند و ماهواره اجرا شده تا از توانایی آن اطمینان بیشتری حاصل شود. در بررسی‌های آینده می‌توان از تصاویر ماهواره‌ای زمین آهنگ^۱ - که مجهز به باندهای بخار آب هستند- برای ارزیابی آب قابل بارش در مقیاس کوچک‌تر استفاده کرده و نتایج آن را با سایر داده‌های موجود مقایسه کرد. از آنجایی که ماهواره‌های هواشناسی از نوع زمین آهنگ دارای قدرت تفکیک زمانی بالایی هستند و هر ۱۵

1. Geosynchronous

تا ۳۰ دقیقه یکبار زمین را پایش می‌کنند، می‌توانند اطلاعات با ارزشی در پیش‌بینی بلایای طبیعی ارائه کنند.

۵- منابع

- [۱] علیزاده، ا.؛ اصول هیدرولوژی کاربردی چ ۱۲، آستان قدس دانشگاه امام رضا (ع)، ۱۳۷۹.
- [2] Corlson T.N.; "Mid-latitude weather system"; University Press, Cambridge, 1991.
- [۳] مباشری، م.ر.؛ آشنائی با فیزیک هوا؛ انتشارات آستان قدس رضوی، شرکت به نشر، ۱۳۷۹.
- [4] Kleespies T.J., McMillin, L.M., "Retrieval of precipitable water from observations in the split window over varying surface temperatures". *Journal of Applied Meteorology*, 29, 1990.
- [5] Plantinch S., King M. D., Ackerman S. A., Menzel W. P., Baum B. A., Riedi J.C. and Fery R.A., "The MODIS products: Algorithms and examples from Terra"; *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 2003.
- [۶] امیدی ش.؛ "طراحی و ساخت سیستم فرستنده و گیرنده رادیوساوند پروژه فاز اول؛ انتشارات سازمان هواشناسی کشور؛ سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، ۱۳۷۹.
- [۷] مباشری م.ر.؛ "مبانی فیزیک در سنجش از دور و فناوری ماهواره"؛ انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۵.
- [8] Hurly, P. J., A lagrangian partic/puff approach for plume dispersion modeling. *J. Appl. Meteor*, 40, 1994.
- [9] Kaufman Y. J., Gao. B. C.; " Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS"; *IEEE Transaction on Geosciences and Remote*



Sensing, Vol.30, 1992.

- [10] Gao Bo-Cai, Kaufman Y.J.; “The MODIS Near-IR Water Vapor Algorithm”; *IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing*, Vol. 56, 2002.
- [11] Bowker D. E., Davis R. E., Myrick S., Jones T.; “Spectral reflectance of natural targets for use in remote sensing studies;” *NASA Reference Pub*, 1139, 1985.
- [12] Vermote E. F., Saleous N. Z. El., C.O.; Justice, “Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: First results, *Remote Sensing Environ*; 83, 2002.
- [13] Jensen J. R.; “introductory digital image processing, A remote sensing perspective”; Prentice Hall, Inc, Vol. 544, 1996.
- [14] Wang W., Sun X., Zhang R., Li, Z. Z., Su H.; “Multi-layer perceptron neural network based algorithm for estimating precipitable water vapour from MODIS NIR Data”; *International Journal of Remote Sensing*, Vol.27, No.3, 2006.