

بازیابی پروفیل بومی اتمسفر از داده‌های مادون قرمز حرارتی طول موج بلند سنجنده ماهواره‌ای MODIS به جای داده‌های رادیوسوند

جبار صیدی^۱، جواد خلیلزاده^{۲*}، صفا خزایی^۳، مهدی مؤمنی^۴

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار، ۳- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، ۴- دانشیار، دانشگاه اصفهان

(دریافت: ۹۵/۱۲/۰۹، پذیرش: ۹۶/۰۴/۱۷)

چکیده

در کاربردهای مختلف ارسال و دریافت اطلاعات سکوه‌های هواپایه و فضاپایه، شناخت پروفیل اتمسفری محلی بسیار پراهمیت است. در بسیاری از نواحی دستیابی به این پروفیل از داده‌های محلی امکان‌پذیر نیست. هدف این پژوهش، محاسبه و بازیابی پروفیل اتمسفری در ایستگاه سینوپتیک مهرآباد تهران با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده MODIS است. در این تحقیق، داده‌های رادیوسوند برای دو فصل سرد (دی، بهمن و اسفند) و گرم (تیر، مرداد و شهریور) آنالیز و تحلیل شده است. متقابلاً داده‌های MODIS بازیابی شده نیز برای یک ماه سرد (بهمن) و یک ماه گرم (مرداد) مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است. در این مطالعه، بازیابی پروفیل عمودی دما، فشار و رطوبت از داده‌های MODIS در شرایط جوی صاف و بدون ابر و نیز در زمان روز و شب و مقایسه آن‌ها با داده‌های رادیوسوند در منطقه جغرافیایی ایستگاه انجام شده است. بازیابی پروفیل اتمسفری MODIS از طریق یک رگرسیون آماری و استفاده از مدل انتقال تابش سریع و استفاده از داده‌های رادیوسوند جهت تعیین ضریب رگرسیون انجام شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که پروفیل‌های اتمسفری بازیابی شده، تطابق خیلی خوبی با داده‌های رادیوسوند دارند. میانگین مجذور خطاها برای دما در فشار ۷۰۰ میلی‌باری حداکثر ۲/۸ تا ۳ کلون و نسبت مخلوط شدگی بخار آب ۱/۲ (g/kg) تا ۱/۳ (g/kg) به دست آمده است.

کلیدواژه‌ها: پروفیل اتمسفری، مادون قرمز طول موج بلند، رادیوسوند، داده‌های MODIS، فراطیفی

Atmospheric Profile Retrieval from Infrared, Thermal, Long-Wavelength Data of MODIS Satellite Sensor Instead of Radio-Sound Data

J. Saydi, J. Khalilzadeh*, S. Khazaei, M. Momeni

Imam Hossein University

(Received: 27/02/2017; Accepted: 08/07/2017)

Abstract

In various applications of data communications of air born and space born, local profile recognition of atmosphere is very important. In many regions, achieving this profile from local data is impossible. This research aims to calculate and retrieve the atmospheric profile in Tehran Mehrabad Synoptic Station, using satellite data of MODIS. Radio sound data were analyzed for two cold and warm seasons. The retrieved data were also analyzed for a cold and a warm month. The vertical temperature, pressure, and humidity profiles were retrieved from data in clear, cloudless atmospheric conditions during day and night, and they were compared with radio sound data in the geographical region of the station. The atmospheric profile was retrieved using a statistical regression and fast radiative transfer model as well as radio sound data for determining regression coefficient. The results indicate that the retrieved atmospheric profiles are in good agreement with radio sound data. Mean squared error for temperature at a pressure of 700 mbar was at most 2.8°K to 3°K, and water vapor mixing ratio was obtained to be 1.2 (g/kg) to 1.3 (g/kg).

Keywords: Atmospheric Profile, Long Wavelength Infrared, Radio Sound, MODIS Data, Hyper Spectral

۱. مقدمه

در همه فعالیت‌های نظامی (مانند ارسال و دریافت باریکه لیزرهای سلاح، مخابرات لیزری، شناسایی‌های تصویربردارها و طیف‌بردارهای هوایی و فضایی، رادار و میکروویو و ...) که مستلزم ارسال و دریافت سیگنال‌های الکترومغناطیس و آکوستیک هستند، اتمسفر محل فعالیت تأثیری اساسی بر موفقیت فرآیند دارد. با توجه به اینکه ویژگی‌های اتمسفر کاملاً محلی و تابع زمان است، ضرورت دارد پروفیل مکانی و زمانی آن شناخته شود. شناخت این پروفیل از داده‌های ماهواره‌ای در هر زمان و هر مکان امکان‌پذیر است. استخراج پروفیل‌های دما، رطوبت و سایر پارامترهای اتمسفری از داده‌های ماهواره‌ای بر اساس گسیل مادون‌قرمز حرارتی اولین بار توسط کینگ پیشنهاد شد [۱]. بر اساس تحقیق کینگ، توزیع شدت و یا رادیانس زاویه‌ای یک تبدیل لاپلاس از توزیع شدت تابع پلانک به صورت تابعی از عمق نوری است و استخراج پروفیل دما از اندازه‌گیری‌های حاصل از اسکن شدت توسط ماهواره امکان‌پذیر است. کاپلن [۲]، با اثبات اینکه تفکیک عمودی دما می‌تواند از توزیع طیفی گسیل اتمسفر استنتاج شود، مفهوم عمق‌سنجی دمایی را ارتقاء داد. وی بیان کرد که مشاهدات در باله‌های یک باند طیفی، نواحی عمیق‌تر اتمسفر را حس می‌کند درحالی‌که مشاهده در مرکز نوار، به دلیل کوچک بودن متوسط مسیر آزاد تابش، فقط لایه خیلی بالای اتمسفر را می‌بیند. بنابراین با انتخاب درست یک مجموعه کانال طیفی عمق‌سنجی با طول موج‌های مختلف، رادیانس‌های مشاهده‌شده می‌توانند در تولید اطلاعات توزیع دمای عمودی در اتمسفر مورد استفاده باشند. وارک یک برنامه عمق‌سنجی عمودی ماهواره‌ای را برای اندازه‌گیری پروفیل دمای اتمسفری پیشنهاد کرد. اولین دستگاه دقیق عمق‌سنجی ماهواره‌ای (SIRS_A) در سال ۱۹۶۹ میلادی روی ماهواره NIMBUS-3 نصب شد [۳ و ۴]. ابزارهای دقیق آزمایشگاهی روی ماهواره‌های سری NIMBUS با مدار قطبی در سال ۱۹۷۸، به موفقیت توسعه ماهواره‌های سری TIROS-N با مدار قطبی منجر شد. این ماهواره‌ها، عمق‌سنج‌های عمودی عملیاتی TIROS، متشکل از عمق‌سنج تابش مادون‌قرمز با رزولوشن بالا (HIRS)^۱، یونیت عمق‌سنج میکروویو (MSU)^۲ و قسمت عمق‌سنج استراتوسفری (SSU)^۳ را معرفی کردند [۵]. سری‌های مشابه این نوع ابزارهای دقیق عمق‌سنجی امروزه روی ماهواره‌های عملیاتی NOAA با مدار قطبی قرار دارند. سامانه

HIRS با ۱۹ کانال عمق‌سنجی مادون‌قرمز، تفکیک فضایی ۱۰ کیلومتری در حالت نادیر را فراهم می‌کند. اولین ابزار دقیق عمق‌سنجی در مدار زمین آهنگ، عمق‌سنج اتمسفری GOESVISSR بود که در سال ۱۹۸۰ به فضا پرتاب شد [۶]. از دیگر سامانه‌های دقیق عمق‌سنجی می‌توان به GOES-8 اشاره کرد که با ۱۸ کانال مادون‌قرمز دارای توان تفکیک فضایی ۸ کیلومتر است [۷]. توسعه مدل‌های هواشناسی و آب و هواشناسی نیازمند رد دقیق دما و رطوبت اتمسفر و نیز ردیابی گازها و ذرات است. در حال حاضر ردیابی و نمایش پیوسته تغییرات این پارامترها در مقیاس کلی و جهانی سخت است. طیف‌نگارهای تصویربردار با توان تفکیک متوسط (MODIS)^۴ فرصت تازه‌ای برای بهبود ردیابی و نمایش دما، رطوبت و توزیع ازن و تغییرات آن‌ها را فراهم کرده‌اند. سنجنده MODIS روی ماهواره Terra و Aqua به ترتیب در ۱۸ دسامبر سال ۱۹۹۹ میلادی و ۴ می سال ۲۰۰۲ میلادی به فضا پرتاب شدند. این سنجنده دارای یک طیف‌نگار اسکن‌کننده با ۳۶ باند در نواحی مرئی، مادون‌قرمز طول موج کوتاه، مادون‌قرمز طول موج میانی و مادون‌قرمز طول موج بلند در بازه طول موجی ۰/۶۴۵ و ۱۴/۲۳۵ میکرون است [۸]. مزایای سنجنده MODIS برای بازیابی توزیع دمای اتمسفر و رطوبت به خاطر وجود باندهای طیفی مادون‌قرمز طول موج بلند و کوتاه (۱۴/۵-۳ میکرون) این سنجنده است. توان تفکیک این سنجنده (۱ کیلومتر در حالت نادیر) برای عمق‌سنجی مناسب است. لازم به ذکر است که توان تفکیک فضایی مناسب MODIS منجر به بهبود اندازه‌گیری گرادیان‌های افقی رطوبت، دما و ازن نسبت به سایر سنجنده‌های مذکور شده است. از کارهای مشابه می‌توان به تحقیقات اکبری و رحیم‌زادگان اشاره داشت که در آن‌ها بازیابی پروفیل‌ها تنها در چند روز از ماه ژوئن سال ۲۰۰۷ مورد ارزیابی قرار گرفته است، با این کار نمی‌توان روال و روند پروفیل‌ها در یک منطقه را پیش‌بینی کرد، همچنین خطای نتایج داده‌های رادیوسوند با الگوریتم‌های بازیابی در این مراجع خیلی زیاد است. در این پژوهش الگوریتم بازیابی توزیع دمای اتمسفر، رطوبت و بخار آب در موقعیت جغرافیایی ایستگاه مهرآباد تهران از سنجنده MODIS تشریح می‌شود. این الگوریتم از محصول MOD07_L2 از سنجنده MODIS در بازیابی پروفیل‌ها استفاده می‌کند. در این مطالعه، بازیابی پروفیل‌ها از رادیانس‌های دریافت شده در شرایط آسمان صاف و بدون ابر انجام گرفته است. داده‌های رادیوسوند از سازمان هواشناسی ایران برای ایستگاه

^۱High-resolution Infrared Radiation Sounder^۲Microwave Sounding Unit^۳Stratospheric Sounding Unit^۴Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

جدول ۱. مشخصات فنی سنجنده MODIS [۸]

مدار	ارتفاع ۷۰۵ km، خورشید آهنگ، زمان گذر از استوا: ۱۰:۳۰ قبل از ظهر به وقت محلی
نرخ اسکن	۲۰/۳ دور بر دقیقه در مسیر سمت
ابعاد نواره زمینی	۲۳۳۰ کیلومتر در عرضی (سمت) و ۱۰ کیلومتر در طول در حالت نادیر
توان تفکیک فضایی (مکانی)	۲۵۰ متر در باندهای ۲-۱، ۵۰۰ متر در باندهای ۳-۷ و ۱۰۰۰ متر در باندهای ۳۶-۸

جدول ۲. ویژگی‌های فنی باند طیفی سنجنده MODIS [۸]

کاربرد اولیه اتمسفر	باند	پهنای باند (nm)	دمای نوعی (K)	رادینانس در دمای نوعی (W/m ² sr) (μm)	اختلاف دمای معادل نویز مورد نیاز (K)
پروفیل دما	۲۵	-۴/۵۴۹ ۴/۴۸۲	۲۷۵	۰/۵۹	۰/۲۵
پروفیل رطوبت	۲۷	-۶/۸۹۵ ۶/۵۳۵	۲۴۰	۱/۱۶	۰/۲۵
	۲۸	-۷/۴۷۵ ۷/۱۷۵	۲۵۰	۲/۱۸	۰/۲۵
	۲۹	-۸/۷۰۰ ۸/۴۰۰	۳۰۰	۹/۵۸	۰/۲۵
ازن	۳۰	-۹/۸۸۰ ۹/۵۸۰	۲۵۰	۳/۶۹	۰/۲۵
دمای سطح	۳۱	-۱۱/۲۸۰ ۱۰/۷۸۰	۳۰۰	۹/۵۵	۰/۲۵
	۳۲	-۱۲/۲۷۰ ۱۱/۷۷۰	۳۰۰	۸/۹۴	۰/۲۵
پروفیل دما	۳۳	-۱۳/۴۸۵ ۱۳/۱۸۵	۲۶۰	۴/۵۲	۰/۲۵
	۳۴	-۱۳/۷۸۵ ۱۳/۴۸۵	۲۵۰	۳/۷۶	۰/۲۵
	۳۵	-۱۴/۰۸۵ ۱۳/۷۸۵	۲۴۰	۳/۱۱	۰/۲۵
	۳۶	-۱۴/۳۸۵ ۱۴/۰۸۵	۲۲۰	۲/۰۸	۰/۳۵

مهرآباد تهران اخذ و مورد تحلیل قرار گرفته است. این داده‌ها برای دو فصل سرد (دی، بهمن و اسفند) و گرم (تیر، مرداد و شهریور) از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۵ تحلیل شده است. متقابلاً داده‌های MODIS بازیابی شده نیز برای یک ماه سرد (بهمن) و یک ماه گرم (مرداد) سال و از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۵ مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است.

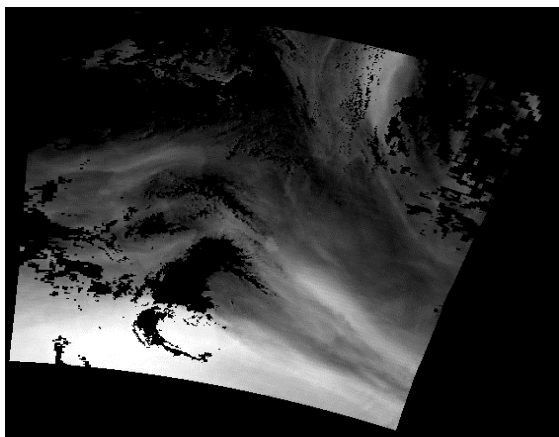
۲. روش تحقیق

در این بخش مشخصات فنی سنجنده MODIS، منطقه مورد مطالعه، بازیابی پروفیل اتمسفری داده‌ها و درنهایت خطای داده‌های این داده‌ها با داده‌های رادیوسوند مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است.

۱-۲. سنجنده MODIS

ویژگی‌های فنی سنجنده MODIS به طور خلاصه در جدول (۱) ذکر شده است. باندهای طیفی مادون‌قرمز MODIS در جدول (۲) ارائه شده است. پاسخ طیفی باندهای مادون‌قرمز MODIS متناسب با طیف گسیل حرارتی محاسبه شده توسط مدل انتقال تابش خط به خط برای اتمسفر استاندارد ایالات‌متحده در سال ۱۹۷۶، در شکل (۱) نشان داده شده است. محدوده طیفی وسیع، توان تفکیک بالا و پوشش جهانی روزانه سنجنده MODIS، این امکان را برای آن فراهم می‌کند تا تغییرات اتمسفر زمین به طور پیوسته مشاهده شود. بازیابی میزان بخار آب و توزیع دمایی اتمسفر از داده‌های سنجنده MODIS امکانی برای درک بهتر مفاهیمی است که به وسیله انرژی و فرآیندهای چرخه آب در تعیین آب و هوا و جو نقش ایفا می‌کند. در مواردی که داده‌های MODIS به دلایل مختلف مثل ابری بودن منطقه مورد نظر، اخلاص در سامانه مدار سنجنده، همپوشانی طیف‌ها، گذر نکردن در ساعت دلخواه از منطقه مورد نظر و... که در دسترس نیست؛ محصولات دما و رطوبت استخراج شده از داده‌های آن را می‌توان از مدل‌های عددی پیشگویی آب و هوای حاصل از سایر سنجنده‌های ماهواره‌ای و نیز داده‌های رادیوسوند تهیه کرد. تعیین و اعتبارسنجی زمین و اقیانوس‌های مختلف و محصولات اتمسفری مثل دمای سطح دریا، دمای سطح زمین و خواص ذرات اقیانوسی نیازمند پروفیل دما و رطوبت و نیز میزان ازن کلی در تفکیک فضایی MODIS به عنوان یک ورودی کمکی است [۹-۱۱].

نوع دیگر داده‌های مورد استفاده در این پژوهش محصول MOD07_L2 سنجنده MODIS برای یک ماه سرد (بهمن) و یک ماه گرم (مرداد) سال از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۵ است. داده‌های این محصول هم برای ایستگاه سینوپتیک مهرآباد تهران با همان مختصات ذکر شده در بالا استفاده شده است. در شکل (۳) تصویری از ایران، گرفته‌شده توسط سنجنده MODIS در ۱۵ جولای ۲۰۰۷، نشان داده شده است.



شکل ۳. تصویر سنجنده MODIS از ایران (۱۵ جولای ۲۰۰۷)

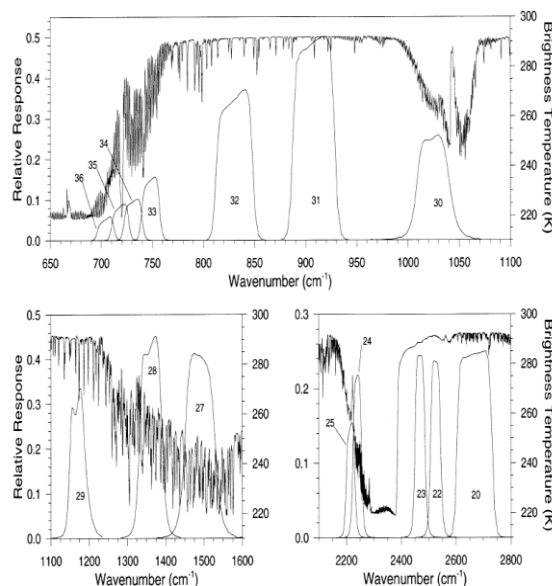
۳-۲. بازیابی پروفیل اتمسفری با استفاده از رگرسیون آماری

یک روش محاسباتی مؤثر برای تعیین پروفیل‌های دما و رطوبت از اندازه‌گیری‌های دقیق عمق‌سنجی ماهواره، استفاده از روابط آماری بین رادینانس مشاهده‌شده (مدل شده) و پروفیل‌های اتمسفری متناظر است. این روش اغلب برای حدس اولیه یک الگوریتم بازیابی فیزیکی استفاده می‌شود و عمدتاً در پردازش عمق‌سنج‌های عمودی عملیاتی دور نشان (TOVS)^۱ جهانی به کار می‌رود [۱۴-۱۲]. در این الگوریتم در حالت آسمان بدون ابر، تابش‌های رسیده به بالای جو در فرکانس ۷ معادل مجموع توزیع‌های رادینانس از سطح زمین و همه لایه‌های اتمسفر است. این الگوریتم آماری برای بازیابی دمای اتمسفر به صورت معادله (۱) خلاصه می‌شود.

$$R(v_j) = \sum_{i=1}^N B[v_j, T(p_i)] w(v_j, p_i); \quad (1)$$

$$w(v_j, p_i) = \varepsilon(v_j, p_i) \tau(v_j, 0 \rightarrow p_i)$$

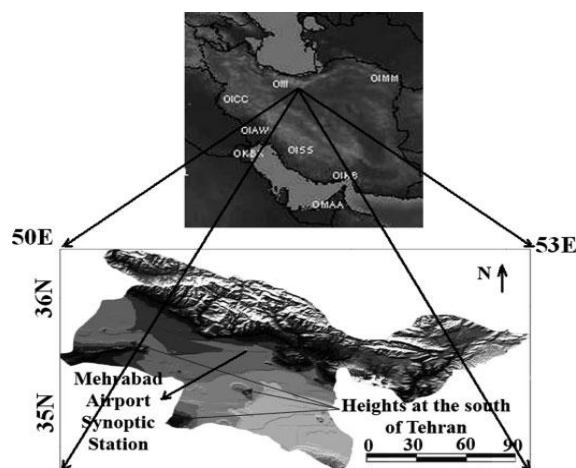
که در آن، $w(v_j, p_i)$ تابع وزنی، $B[v_j, T(p_i)]$ رادینانس تابع پلانک در دمای T و تراز فشار p_i ، $\varepsilon(v_j, p_i)$ گسیلندگی طیفی محیط گسیل در تراز فشار p_i و $\tau(v_j, 0 \rightarrow p_i)$ عبوردهی طیفی اتمسفر در بالای تراز فشار p_i است. این رابطه برای تعیین دما در



شکل ۱. پاسخ طیفی سنجنده MODIS در محدوده طیفی مادون قرمز و طیف دمای درخشندگی در نقطه مشاهده نادیر در پروفیل اتمسفری استاندارد ایالات متحده در سال ۱۹۷۶ محاسبه‌شده با استفاده از مدل انتقال تابش [۸]

۲-۲. منطقه مورد مطالعه و داده‌های استفاده شده

منطقه مورد بررسی در این پژوهش محدوده‌ی اطراف ایستگاه سینوپتیک مهرآباد تهران است. این منطقه مختصاتی با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲۱ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۱ دقیقه دارد (شکل ۲). ارتفاع این منطقه از سطح دریا ۱۱۹۱ متر است. داده‌های رادیوسوند در دو زمان ۰۰:۰۰ و ۱۲:۰۰ به وقت گرینویچ و به طور روزانه دریافت شده است. داده‌های رادیوسوند برای دو فصل سرد (دی، بهمن و اسفند) و گرم (تیر، مرداد و شهریور) ۲۱ سال متوالی (از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۵) تحلیل شده است تا پروفیل دما، رطوبت، فشار و ارتفاع به طور دقیق پیش‌بینی شود.



شکل ۲. موقعیت ایستگاه سینوپتیک مهرآباد واقع در جنوب تهران

^۱ Television Operational Vertical Sounder

رادیوسوندها طبق روال تنها دو بار در روز و در دو زمان ۰۰:۰۰ و ۱۲:۰۰ به وقت گرینویچ حول زمین شلیک می‌شوند. عبور سنجنده MODIS روی ماهواره Terra تقریباً در بازه زمانی ۱۰:۰۰ تا ۱۱:۰۰ قبل از ظهر و روی ماهواره Aqua در محدوده زمانی ۰۱:۰۰ تا ۲۰:۰۰ بعد از ظهر استاندارد محلی هر روز رخ می‌دهد. بنابراین به دست آوردن رادیانس‌های MODIS در هر زمان و مکان خاص امکان‌پذیر نیست. به روش دیگری هم می‌توان ضرایب رگرسیون را تولید کرد. ضرایب رگرسیون در این روش از رادیانس‌های محاسبه‌شده MODIS با استفاده از یک مدل عبوردهی طیفی با پروفیل ورودی از یک پایگاه داده رادیوسوندی رطوبت و دمای جهانی به دست می‌آیند. در این روش، دقت توابع عبوردهی اتمسفری برای باندهای طیفی مختلف به منظور بازیابی پارامترهای دقیق بسیار مهم است. در فرآیند رگرسیون عوامل اصلی پیشگویی دماهای درخشندگی باند طیفی مادون‌قرمز سنجنده MODIS هستند. این الگوریتم از ۱۲ باند طیفی با طول موج‌های بین ۴/۵ و ۱۴/۲ میکرون استفاده می‌کند. این الگوریتم بازیابی به رادیانس‌های کالیبره شده، هدایت‌شده و ثبت هم‌زمان‌شده نیازمند است که از رادیانس‌های یک کیلومتر میدان دید از باندهای ۲۵ (باند جذب CO2 در طول موج کوتاه ۴/۵۲ میکرون)، ۲۷-۲۹ (طول موج‌های ۶/۷۲-۸/۵۵ میکرون برای اطلاعات مربوط به رطوبت)، ۳۰ (طول موج ۹/۷۳ میکرون برای اطلاعات مربوط به ازن)، ۳۱-۳۲ (پنجره جدایی طول موج‌های ۱۱/۰۳ و ۱۲/۰۲ میکرون) و ۳۳-۳۶ (کانال‌های باند جذبی CO2 در طول موج‌های ۱۳/۳۴، ۱۳/۶۴، ۱۳/۹۴ و ۱۴/۲۴ میکرون) حاصل می‌شوند. ضرایب رگرسیون برای ۶۸۰ زاویه زینت محلی از نادیر تا ۶۵ درجه تولید شده‌اند. ضرایب رگرسیون با استفاده از رادیانس‌های ترکیبی محاسبه شده و تطبیق با پروفیل اتمسفری تولید می‌شوند. برای انجام رگرسیون، معادله (۵) می‌تواند برای اندازه‌گیری‌های واقعی MODIS به منظور به دست آوردن پروفیل‌های اتمسفری تخمینی، به کار گرفته شود. محاسبات رادیانس‌های ترکیبی MODIS به خواص واقعی فیزیکی سطح شامل گسیلندگی سطح زمین، دمای پوسته و فشار سطح زمین وابسته است.

۲-۴. داده‌های رادیو سوند

داده‌های رادیوسوند از سازمان هواشناسی ایران به صورت خام از سازمان هواشناسی برای ایستگاه مهرآباد تهران اخذ و مورد تحلیل قرار گرفته است. این داده‌ها برای دو فصل سرد (دی، بهمن و اسفند) و گرم (تیر، مرداد و شهریور) از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۵ تحلیل شده است. با توجه به اینکه داده‌های رادیوسوند به

N لایه اتمسفر از M بار مشاهده رادیانس است. اما به دلیل اینکه توابع وزنی پهن و بیانگر سهم میانگین رادیانس از یک لایه مشخص هستند، M مشاهده رادیانس به هم وابسته بوده و جواب یکه وجود ندارد. به علاوه جواب در آن خطاهای کوچک در مشاهدات رادیانس که به خطاهای بزرگی در پروفیل دما منجر می‌شود، ناپایدار است. به همین دلیل این جواب با یک فرم خطی تخمین زده می‌شود. ابتدا معادله (۱) بر حسب انحرافی از یک حالت اولیه بازنویسی می‌شود:

$$R(v_j) - R_0(v_j) = \sum_{i=1}^N \{B[v_j, T(p_i)] - B[v_j, T_0(p_i)]\} w(v_j, p_i) + e(v_j) \quad (2)$$

که در آن، $e(v_j)$ خطای اندازه‌گیری در مشاهده رادیانس است. به منظور حل معادله (۲) برای پروفیل دمای T، لازم است که وابستگی فرکانسی تابع پلانک خطی شود و چون تابع پلانک در ناحیه مادون‌قرمز به دما وابسته‌تر است تا فرکانس، این امر قابل دستیابی است. جواب عمومی معکوس معادله (۲) برای پروفیل دما را می‌توان به صورت معادله (۳) نوشت.

$$T(p_i) - T_0(p_i) = \sum_{j=1}^M A(v_j, p_i) [R(v_j) - R_0(v_j)] \quad (3)$$

فرم ماتریسی معادله (۳) به صورت $T=AR$ است که $A(v_j, p_i)$ یک عملگر خطی است. با توجه به معادلات (۲) و (۳) مشخص می‌شود که A از لحاظ نظریه وارون ماتریس تابع وزنی است. اما در عمل ماتریس وارون از لحاظ عددی ناپایدار است. الگوریتم رگرسیون آماری در پی یک عملگر ماتریسی A با بهترین برازش است که با به‌کارگیری روش‌های حداقل مربعات با استفاده از یک نمونه بزرگ از عمق‌سنجی‌های رطوبت و دمای اتمسفر و مشاهدات رادیانس جمع‌آوری شده، محاسبه می‌شود. پس هدف کمینه کردن خطا است:

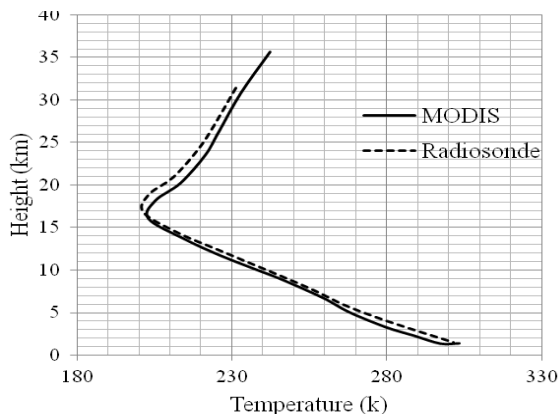
$$\frac{\partial}{\partial A} |AR - T|^2 = 0 \quad (4)$$

که با استفاده از معادله به هنجار حل می‌شود و معادله (۵) را حاصل می‌کند:

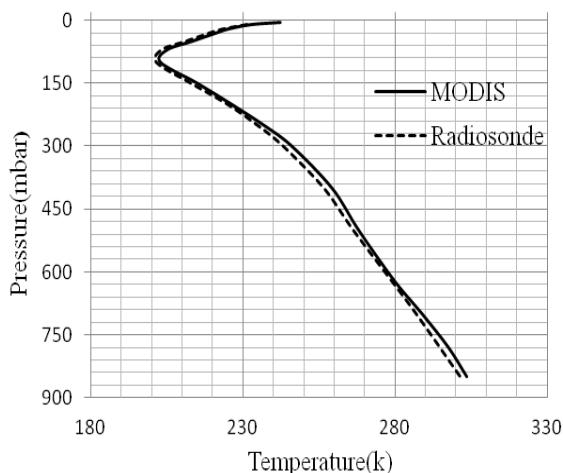
$$A = (R^T R)^{-1} R^T T \quad (5)$$

که در آن، $R^T R$ کواریانس مشاهدات رادیانس و $R^T T$ کواریانس مشاهدات رادیانس با پروفیل دما است. در حالت ایده‌آل، مشاهدات رادیانس باید از اندازه‌گیری‌های داده‌های واقعی MODIS اخذ شده و توأم با داده‌های پروفیل‌های رادیوسوندی، که از نظر زمانی و مکانی متناظر با داده‌های MODIS است، برای استخراج ضرایب رگرسیون A استفاده شوند. در چنین روشی، رابطه رگرسیون دربردارنده هیچ محاسبه انتقال تابشی نخواهد بود. اما

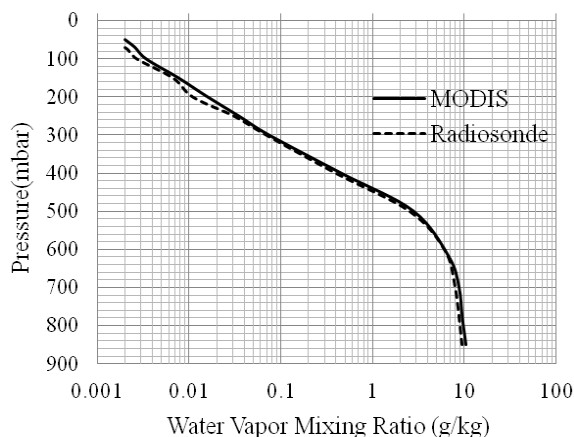
RMSE دما و نسبت مخلوط‌شدگی بخار آب به ترتیب در نمودارهای (۱۲ و ۱۳)، و در ماه‌های سرد به ترتیب در نمودارهای (۱۴ و ۱۵) نشان داده شده است.



شکل ۴. نمودار مقایسه تغییرات ارتفاع بر حسب دما در ماه‌های گرم



شکل ۵. نمودار مقایسه تغییرات فشار بر حسب دما در ماه‌های گرم



شکل ۶. نمودار مقایسه تغییرات فشار بر حسب نسبت مخلوط‌شدگی بخار آب در ماه‌های گرم

دلایل مختلف ممکن است در ستون فشاری مختلف ثبت نشود و یا داده‌ها در هم تنیده باشند باید با دقت آن‌ها را تفکیک کرد تا در روند محاسبه پروفیل‌ها اختلال ایجاد نشود. به دلیل حجم داده‌ها در این دو دهه باید بحث‌های آماری از جمله انحراف معیار، واریانس، آزمون کشیدگی و چولگی و اینکه آیا این داده‌ها می‌شود به عنوان داده آماری تحلیل آماری روی آن‌ها انجام داد، کاملاً مورد بررسی قرار گرفته است. در این کار تحقیقی به عبارتی محاسبات مربوط به نرمال بودن داده‌ها و اینکه آیا این داده‌ها از رفتار گاوسی تبعیت می‌کنند یا نه انجام شده است که این خود یک کار حجیم و قابل ارائه و منحصر به فرد است. در این مقاله داده‌های رادیوسوند پس از عبور از مراحل ذکر شده به نمودارها و خروجی‌های ذکر شده منجر شده است و روند تغییرات پارامترهای جوی محلی را با دقت خوبی به دست داده است.

۲-۵. مقایسه و محاسبه خطای داده‌ها

برای مقایسه پروفیل‌های به دست آمده از MODIS و رادیوسوند و در نتیجه اعتبارسنجی داده‌های MODIS از روش محاسبه میانگین مجذور مربعات خطاها (RMSE) استفاده می‌شود. در محاسبه RMSE داده‌های اندازه‌گیری شده به وسیله رادیوسوند مبنا قرار داده شده و داده‌های اندازه‌گیری شده به وسیله MODIS بر مبنای آن‌ها ارزیابی می‌شود. میانگین مجذور مربعات خطاها، معیاری متداول برای اندازه‌گیری اختلاف بین مقادیر مبنا و مقادیر حاصل از روش‌ها یا مدل‌ها است. تعیین RMSE از روش‌های مفید برای اندازه‌گیری میزان دقت است که از معادله (۶) به دست می‌آید:

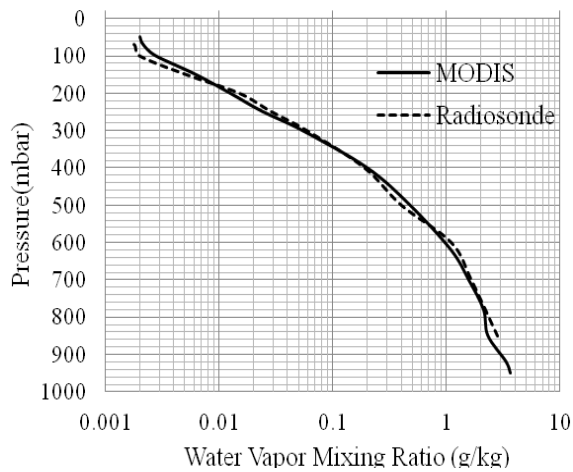
$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

در این رابطه، N تعداد کل داده‌ها، X_i و Y_i متغیرهای مبنا و محاسبه شده می‌باشند.

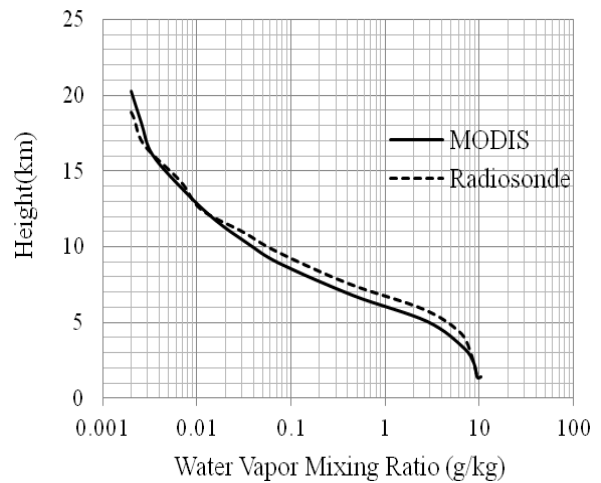
۳. نتایج و بحث

برای داده‌های MODIS و رادیوسوند در ماه‌های گرم، تغییرات ارتفاع و فشار بر حسب دما به ترتیب در شکل‌های (۴ و ۵) و بر حسب نسبت مخلوط‌شدگی بخار آب به ترتیب در شکل‌های (۶ و ۷) نشان داده شده است. بر اساس همین داده‌ها در ماه‌های سرد، تغییرات ارتفاع و فشار بر حسب دما به ترتیب در شکل‌های (۸ و ۹) و بر حسب نسبت مخلوط‌شدگی بخار آب، به ترتیب در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) نشان داده شده است. بر اساس داده‌های MODIS و رادیوسوند در ماه‌های گرم تغییرات فشار بر حسب

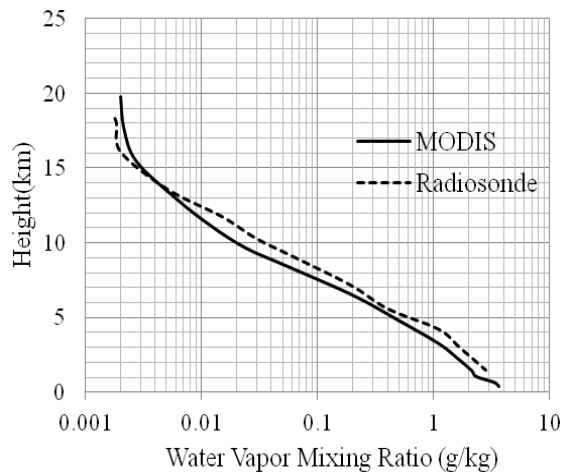
¹ Root Mean Square Error



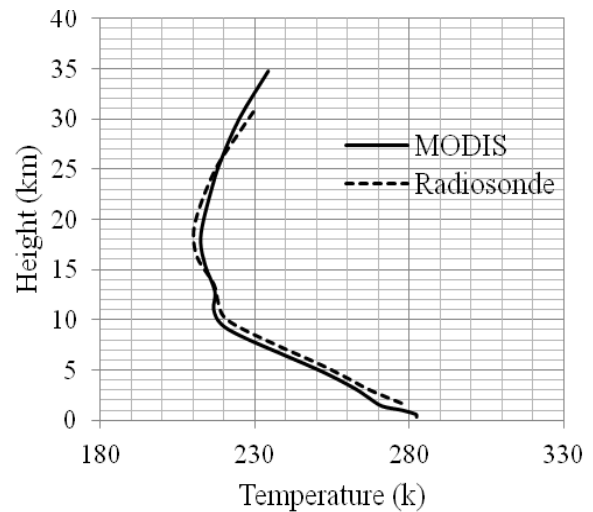
شکل ۱۰. نمودار مقایسه تغییرات فشار بر حسب نسبت مخلوط‌شدگی بخار آب در ماه‌های سرد



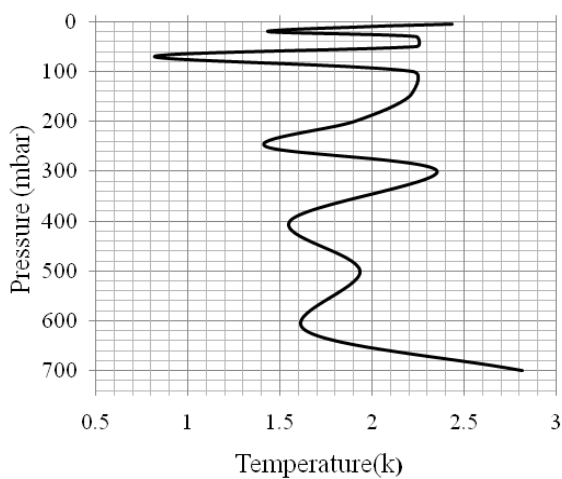
شکل ۷. نمودار مقایسه تغییرات ارتفاع بر حسب نسبت مخلوط‌شدگی بخار آب در ماه‌های گرم



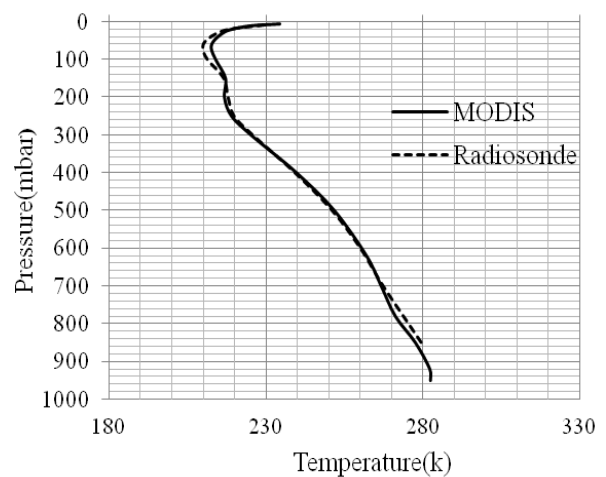
شکل ۱۱. نمودار مقایسه تغییرات ارتفاع بر حسب نسبت مخلوط‌شدگی بخار آب در ماه‌های سرد



شکل ۸. نمودار مقایسه تغییرات ارتفاع بر حسب دما در ماه‌های سرد



شکل ۱۲. نمودار تغییرات فشار بر حسب RMSE دما در ماه‌های گرم

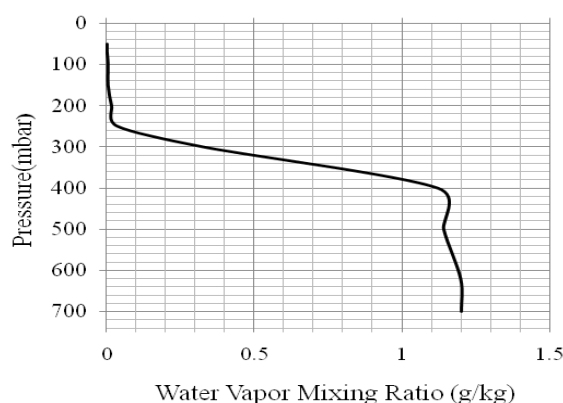


شکل ۹. نمودار مقایسه تغییرات فشار بر حسب دما در ماه‌های سرد

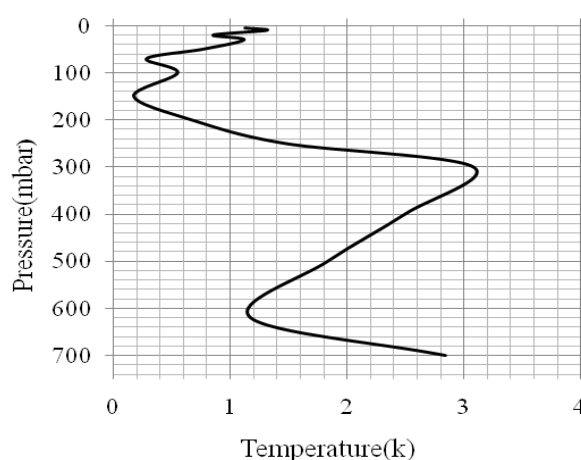
استفاده کرده‌اند، منحنی هموارتری دارند. نمودار فشار بر حسب رطوبت نسبی در فشارهای کمتر از ۲۰۰ میلی بار برای داده‌های رادیوسوند با رگرسیون خطی و روش شبکه عصبی ذکر شده در دیگر کارها با همدیگر همخوانی ندارند، درحالی‌که مطابق شکل‌های (۶ و ۱۰) در کار ما همخوانی و تطبیق خوبی مشاهده می‌شود [۱۵]. در کار دیگر پروفیل‌ها تنها برای چند روز از ژوئن ۲۰۰۷ استخراج شده‌اند [۱۶]. در این کار پروفیل‌های ارتفاع بر حسب دما تا ارتفاع بین ۱۰ تا ۱۲ کیلومتری استنتاج شده و در ضمن بین داده‌های رادیوسوند و الگوریتم‌های بازیابی اختلاف زیاد است و به عبارتی این داده‌ها با همدیگر همپوشانی خوبی ندارند. درحالی‌که در کار پژوهشی حاضر محاسبات داده‌های رادیوسوند و بازیابی پروفیل از سنجنده MODIS تا ارتفاع نزدیک ۴۰ کیلومتر و برای تقریباً دو دهه در فصل گرم و سرد با کمترین خطا و بیش‌ترین انطباق محاسبه شده است (شکل‌های (۴ و ۸)). در کار پژوهشی حاضر RMSE برای دما حداکثر ۲/۸ تا ۳ کلوین به دست آمد، در صورتی که در کار دیگر مقدار RMSE بیشینه ۳/۸۶ کلوین بوده است. در دیگر کارها پروفیل‌ها تنها برای روزهای هشتم و نهم ژوئن ۲۰۰۴ و روزهای هشتم، پانزدهم و بیست و دوم ژوئن ۲۰۰۷ بررسی شده‌اند [۱۷]. با توجه به نمودارهای این کارها پروفیل داده‌های رادیوسوند و سنجنده MODIS همپوشانی خوبی با هم ندارند، منحنی‌ها کاملاً از همدیگر مجزا می‌باشند و تنها روند صعودی یا نزولی آن‌ها مثل هم است. مقدار RMSE این داده‌ها نزدیک ۷ کلوین گزارش شده است که در مقایسه با این تحقیق بسیار زیاد است. این میزان خطا از روی عدم انطباق منحنی‌ها به وضوح مشهود است [۱۷]. در کار دیگری پروفیل‌های ارتفاع بر حسب دما تا ارتفاع ۱۰ کیلومتری حاصل شده است در صورتی که در این کار محاسبات مربوط به استخراج پروفیل‌ها تا ارتفاع حدود ۴۰ کیلومتری و برای تقریباً دو دهه در فصل گرم و سرد با کمترین خطا و بیش‌ترین انطباق انجام شده است [۱۷].

۴. نتیجه‌گیری

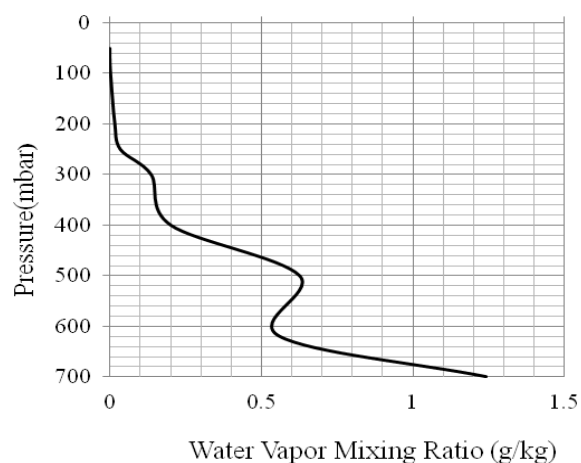
اتمسفر متلاطم و تابع شرایط آب و هوایی منطقه مورد مطالعه است. بنابراین پیش‌بینی شرایط اتمسفری هر چه جای‌گزیده‌تر باشد از دقت بیشتری برخوردار است. در مسائل مختلف مرتبط با اتمسفر شامل جبران اثرات اتمسفری بر پرتوهای نوری در نواحی طیفی مختلف، بررسی تغییرات دمایی، رطوبت، فشار، غلظت ترکیبات جوی و... و نیز مسائلی از جمله هدف یابی، بردیابی دقیق با نور همدوس و یا ناهمدوس، شناخت دقیق اتمسفر و حصول پروفیل اتمسفری منطقه اجتناب‌ناپذیر است. این پروفیل‌ها با پروفیل‌های حاصل از کدهای محاسباتی مربوط به اتمسفر



شکل ۱۳. نمودار تغییرات فشار بر حسب RMSE نسبت مخلوط‌شدگی بخار آب در ماه‌های گرم



شکل ۱۴. نمودار تغییرات فشار بر حسب RMSE دما در ماه‌های سرد



شکل ۱۵. نمودار تغییرات فشار بر حسب RMSE نسبت مخلوط‌شدگی بخار آب در ماه‌های سرد

مقایسه پروفیل‌های به دست آمده در شکل‌های (۵ و ۶) با کارهای دیگران، که داده‌های آن تنها برای یک روز خاص سال ارزیابی و تحلیل شده و از این رو نتوانسته روند پروفیل اتمسفری را به خوبی پیش‌بینی کند، نشان می‌دهد که در کار ما همپوشانی بهتری نسبت به کار مذکور حاصل شده است [۱۵]. منحنی این شکل‌ها از RMSE کمتری برخوردارند و چون از داده بیشتری

- [4] Wark, D. Q.; Hilleary, D. T.; Anderson, S. P.; Fisher, J. C. "Nimbus Satellite Infrared Spectrometer Experiments"; IEEE. Trans. Geosci. Electron. 1970, 8, 264-270.
- [5] Smith, W. L.; Woolf, H. M.; Hayden, C. M.; Wark, D. Q.; McMillin, L. M. "The TIROS-N Operational Vertical Sounder"; Bull. Am. Meteor. Soc. 1979, 60, 1177-1187.
- [6] Smith, W. L.; Suomi, V. E.; Menzel, W. P.; Woolf, H. M.; Sromovsky, L. A.; Revercomb, H. E.; Hayden, C. M.; Erickson, D. N.; Mosher, F. R. "First Sounding Results from VAS-D"; Bull. Am. Meteor. Soc. 1981, 62, 232-236.
- [7] Menzel, W. P.; Holt, F. C.; Schmit, T. J.; Aune, R. M.; Schreiner, A. J.; Wade, G. S.; Gray, D. G. "Application of the GOES-8/9 Soundings to Weather Forecasting and Nowcasting"; Bull. Am. Meteor. Soc. 1998, 79, 2059-2077.
- [8] King, M. D.; Kaufman, Y. J.; Menzel, W. P.; Tanre, D. "Remote sensing of Cloud, Aerosol, and Water Vapor Properties from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS)"; IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1992, 30, 2-27.
- [9] Lambrigson, B. H.; Calheiros, R. V. "The Humidity Sounder for Brazil – An International Partnership"; IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003, 41, 352-361.
- [10] Mukhin, D. N.; Feigin, A. M.; Molkov, Ya. I.; Suvorov, E. V. "Bayesian Approach to Retrieval of Vertical Ozone Profile from Radiometry Data"; Advances in Space Research 2006, 37, 2292-2298.
- [11] Borbas, E. E.; Menzel, W. P.; Weisz, E.; Devenyi, D. "Deriving Atmospheric Temperature of the Tropopause Region–Upper Troposphere by Combining Information from GPS Radio Occultation Refractivity and High-Spectral-Resolution Infrared Radiance Measurements"; J. Appl. Meteorology and Climatology 2008, 47, 2300-2309.
- [12] Smith, W. L.; Woolf, H. M.; Nieman, S. J.; Achtor, T. H. "ITPP-5 - The Use of AVHRR and TIGR in TOVS Data Processing"; Technical Proc. of the Seventh Int. TOVS Study Conf. Held in Igls, Austria, 1993, 443-453.
- [13] Schmit, T. J.; Feltz, W. F.; Menzel, W. P.; Jung, J.; Noel, A. P.; Heil, J. N.; Nelson, J. P.; Wade, G. S. "Validation and Use of GOES Sounder Moisture Information"; Wea. Forecasting 2002, 17, 139-154.
- [14] Wang, K. Y. "Profiles of the aAtmospheric Temperature Response to the Saharan Dust Out Breaks Derived from FORMOSAT-3/COSMIC and OMI A1"; Atmospheric Research 2010, 96, 110-121.
- [15] Akbari, V.; Amini, J.; Saradjian, M.; Motaghi, R. M. "Estimation of Atmospheric Temperature and Humidity Profile from MODIS and Radiosonde Data Using Artificial Neural Network"; The Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008.
- [16] Rahimzadegan, M.; Mobasheri, M. R. "An Attempt for Improving MODIS Atmospheric Temperature Profiles in Clear Sky"; Royal Meteorological Society, Meteorol. Appl. 2011, 18, 181-187.
- [17] Rahimzadegan, M.; Mobasheri, M. R. "Atmospheric Temperature Profile Extraction from MODIS Thermal Bands, Using Genetic Algorithm"; Archives Des Sciences 2012, 65, 23-34.

که به طور رایج محققین از پیش فرض آن‌ها استفاده می‌کنند، مقایسه و مورد ارزیابی قرار گرفت. در این مقایسه مشاهده شد که پروفیل ماه‌های گرم و سرد منطقه مورد مطالعه این تحقیق (ایستگاه هواشناسی مهرآباد تهران) با هیچ‌کدام از شش مدل پیش‌فرض جهانی انطباق کامل ندارد. این رفتار بیانگر آن است که در تحقیقات دقیق باید از پروفیل‌های اتمسفری محلی آن منطقه استفاده کرد. یکی از روش‌های مفید جهت استخراج پارامترهای اتمسفری مثل پروفیل دما و رطوبت، استفاده از روش‌های رگرسیون آماری در پردازش تصاویر ماهواره‌ها است. در این تحقیق استخراج پروفیل اتمسفری از تصویر حرارتی MODIS و داده‌های رادیوسوند در منطقه مورد مطالعه انجام شد. نتایج بیانگر این است که پروفیل‌های به دست آمده انطباق خوبی با هم دارند به طوری که RMSE در فشار ۷۰۰ میلی‌باری برای دما حداکثر $2/8$ تا 3 کلون و نسبت مخلوط‌شدگی بخار آب $1/2$ تا $1/3$ (g/kg) به دست آمد. با توجه به وابستگی رادینانس‌های طیفی به پارامترهای اتمسفری شامل دما، رطوبت، فشار و... می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب پارامترهای جای‌گزیده‌تر منجر به استخراج پروفیل اتمسفری دقیق‌تر می‌شود که نتایج تحقیق نیز مؤید این امر است. بنابراین استفاده از داده‌های رادیوسوند جای‌گزیده در مکان و زمان خاص منجر به افزایش دقت در بازیابی پروفیل اتمسفری می‌شود. یعنی هر چه داده‌های رادیوسوند در بازه زمانی کوتاه‌تری متوسط‌گیری شوند، ضرایب رگرسیون بازیابی با دقت بالاتری حاصل می‌شوند. بنابراین تعیین پروفیل اتمسفری به منظور دستیابی به رادینانس‌های طیفی رسیده به سنجنده، افزایش دقت باید مورد توجه قرار گیرد. این امر مستلزم تعیین داده‌های رادیوسوند جای‌گزیده در یک محدوده زمانی کوتاه‌تر است. این تحقیق در استخراج پروفیل اتمسفری جای‌گزیده به دقت خیلی خوبی منجر شد.

۵. مراجع‌ها

- [1] King, J. I. F. "The Radiative Heat Transfer of Planet Earth. Scientific Use of Earth Satellites"; University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, 1956, 133-136.
- [2] Kaplan, L. D. "Inference of Atmospheric Structure from Remote Radiation Measurements"; J. Optical Soc. Am. 1959, 49, 1004-1011.
- [3] Wark, D. Q. "On Indirect Temperature Soundings of the Stratosphere from Satellites"; J. Geophys. Res. 1961, 66, 77-85.

