

تهیه نقشه‌های هم‌دما و هم‌رطوبت جوّ با استفاده از باندهای گرمایی تصاویر ماهواره‌ای مادیس

مجید رحیم‌زادگان^۱ و محمد رضا مباشری^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

(دریافت: ۹۱/۶/۲۶، پذیرش نهایی: ۹۲/۲/۲۴)

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از باندهای گرمایی تصاویر ماهواره‌ای به روشنی رایج در ایجاد نیم‌رخ‌های دما و رطوبت جوّ تبدیل شده است. تصاویر طیف‌سنج پرتویی تصویربردار با قدرت تکیک متوسط (MODIS) با دارا بودن قدرت تکیک مکانی مناسب یکی از تصاویر پُرکاربرد در زمینه تهیه نقشه‌های منحنی‌های هم‌دما و هم‌رطوبت با دقت نسبتاً مناسب است. در روش‌های رایج تهیه نقشه‌های هم‌دما و هم‌رطوبت از تصاویر مادیس از الگوریتم‌های جهانی استفاده می‌شود که در مقیاس محلی دقت مناسبی ندارند و استفاده از الگوریتم‌های محلی می‌تواند موجب بیهوده دقت تهیه این نقشه‌ها شود. در این پژوهش از داده‌های رادیوسوند و تصاویر مادیس مربوط به ۵ سال در ماه ژوئن و داده‌های ایستگاه سینوپتیک فرودگاه مهرآباد برای مدل‌سازی استفاده شده و از داده‌های کل ایستگاه‌های سینوپتیک موجود در ایران در ارزیابی کارایی مدل، استفاده شد. استخراج نیم‌رخ از روش رگرسیون‌های محلی (LSRPR) روش منتخب این پژوهش بود که در آن برای استخراج نیم‌رخ‌های جوّی از روش رگرسیون‌های آماری از تصاویر مادیس، با استفاده از نیم‌رخ‌های جوّی حاصل از داده‌های رادیوسوند محلی و تصاویر متناظر با آنها، ضرایب رگرسیون به صورت محلی استخراج می‌شود. مقدار متوسط RMSE بین نیم‌رخ‌های دمای حاصل از الگوریتم LSRPR و اندازه‌گیری‌های رادیوسوند برای همه ایستگاه‌های کشور ۳۴۳ و برای نیم‌رخ دمای حاصل از الگوریتم مادیس و داده رادیوسوند ۶۴۰ درجه کلوین به دست آمد. همچنین مقدار پیش‌گفته برای نیم‌رخ‌های رطوبت به ترتیب ۲۷۱ و ۴۱۰ گرم بر کیلوگرم به دست آمد. نتایج به دست آمده نشان داد که منحنی‌های هم‌دما و هم‌رطوبت استخراج شده از LSRPR هم‌خوانی مناسبی با اندازه‌گیری‌های رادیوسوند دارند.

واژه‌های کلیدی: هم‌دما، هم‌رطوبت، رادیوسوند، مادیس، سنجش از دور

Preparation of atmospheric temperature and humidity isopleths maps using thermal bands of MODIS satellite images

Rahimzadegan, M.¹ and Mobasher, M. R.²

¹Ph.D. Student, Remote Sensing Eng. Dept., KN Toosi University of Technology, Tehran, Iran

²Associate Professor, Remote Sensing Eng. Dept., KN Toosi University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 16 Sep 2012, Accepted: 14 May 2013)

Summary

In recent years, extraction of atmospheric temperature and humidity profiles from thermal bands of satellite images is a common practice. The most deployed images for this task have been acquired by Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). This sensor which is onboard of Terra and Aqua platforms consists of a spectroradiometer with 36 bands in visible (VIS), near infra-red (NIR) up to thermal infra-red (TIR) region (0.405 – 14.385 (μm)). The combination of sixteen infrared spectral channels is suitable

for sounding temperature and humidity profiles in the atmosphere with a relatively acceptable precision. Different daily atmospheric products of MODIS images are in access on MODIS site. Atmospheric temperature and humidity profiles are two of these products that were used in this work. These products are named MOD07 and MYD07 for Terra and Aqua platforms respectively. Other MODIS products used in this work were MOD35 and MYD35. These products are mainly used for detection of pixel cloud contamination as well as for detection of aerosol concentration in pixel.

Presently, maps of temperature and humidity isopleths from MODIS images are being extracted by applying some global algorithms. In these algorithms, global profiles of temperature, moisture, and ozone are being used in the calculations, where it is believed that these algorithms are not usually valid in regional scales. It is believed that the regional algorithms can boost the precision of aforementioned maps. In this work, 5 MODIS images of 8 and 11, June 2004 and 8, 15 and 22 June 2007 and their corresponding temperature and moisture profiles were used for modeling and 4 MODIS images of June 2, 6, 7 and 21 of 2007 were used for evaluation. In order to prepare a temperature and moisture profile as an initial guess in model, a 5 year (2004–2008) radiosonde data set consisting of 240 temperature profiles all interpolated for the times of satellite overpass in June were averaged. The aforementioned radiosonde measurements were acquired from the vicinity of synoptic station. This station is located at 51°, 21'E and 35°, 41'N in the south of Tehran at an altitude of 1191 (m) from mean sea level. Also some data from other synoptic stations including Kermanshah, Tabriz, Shiraz, Ahwaz, Bandarabbass, Zahedan and Mashhad stations were used for model evaluation.

A practical method for extraction of temperature from MODIS measurements is to use the predefined statistical relationship between measured or modeled radiance flux densities and the corresponding temperature and moisture profile in the atmosphere. In statistical extraction method, the regression between flux density radiated from CO₂ and water vapor in corresponding absorbing bands are modeled. This method is usually used in producing the first guess profile to be used in physical models later on. A method named Localized Statistical Regression Profile Retrieval (LSRPR) for extraction of temperature profiles from MODIS images based on statistical regressions is introduced in this work. In this method an approach for improving the clear sky temperature profile calculation is presented, where using local atmospheric profiles collected by Radiosondes and corresponding MODIS images, some regression coefficient matrix is calculated locally. Then by applying this matrix to other MODIS images, one can calculate temperature profiles with a precision better than what is achieved by MODIS research team i.e. MOD07/MYD07.

Here radiosonde data along with concurrent MODIS images were used and the relevant regression coefficients were calculated. The average RMSE between temperature profile calculated from LSRPR and the one measured by radiosonde in the selected stations around the country was about 3.43K. This for MODIS products was 4.66K. The average RMSE between humidity profiles calculated from LSRPR and the one measured by Radiosonde in the selected stations was 1.27 g/kg and this value for MODIS products was 1.41 g/kg. As can be seen LSRPR model shows improvement in the isopleths of temperature compared to MODIS products. This improvement for humidity isopleths was not as good as for temperature. This could be due to the low amount in humidity in June. On the other hand considerable improvements in the precision of temperature isopleths extraction can be due to the use of local temperature profiles as the first guess in extraction algorithm.

Moreover the results show that in the stations other than Mehrabad airport, the RMSE between temperature and humidity profiles extracted from LSRPR algorithm and those

calculated from radiosonde measurements is increased.

Based on the achievements in this research, it seems that LSRPR algorithm can enhance the precision compared to MODIS and the values calculated by this method are well comparable with the radiosonde collected data. So this algorithm can be used as an efficient method in regions such as Iran with relatively low number of radiosonde stations and irregular radiosonde measurements for producing temperature and humidity isopleths maps at different pressure levels in the atmosphere. It is hoped that by using these maps the accuracy of weather and climate prediction in the regional scale can be increased.

Keywords: Temperature, Humidity, Radiosonde, MODIS, Remote sensing

۱ مقدمه

نیم‌رخ بردار (resolution Infrared Radiation Sounder MSU: Microwave Sounding Unit)، و SSU: Stratospheric نیم‌رخ بردار پوشن‌سپهری (Sounding Unit) بود، حمل می‌کردند (اسمیت و همکاران، ۱۹۷۹). هم‌اکنون نیز همین نوع سامانه‌ها روی ماهواره‌های با مدارهای قطبی کاربردی نوآ (NOAA) در حال کار هستند. اولین دستگاه نیم‌رخ گیر در مدار زمین‌ایستا نیم‌رخ گیر جوّی، یعنی «ماهواره محیطی کاربردی زمین‌ایستای پویشگر چرخشی مرئی-فروسرخ Geostationary Operational Environmental (GOES (Satellite, Visible-Infrared Spin-Scan VISSR) در ۱۹۸۰ پرتاب شد (اسمیت و همکاران، ۱۹۸۱). نسل فعلی نیم‌رخ گیر GOES-8 دارای قدرت تفکیک مکانی ۸ کیلومتر با ۱۸ کاتال نیم‌رخ گیری فروسرخ است (منزل و پوردام، ۱۹۹۴).

اسمیت و همکاران (۱۹۷۰) به منظور استخراج نیم‌رخ‌های جوّی از تصاویر Nimbus 3 SIRS از رگرسیون‌های آماری استفاده کردند. هایدن (۱۹۸۸) روش رگرسیون‌های آماری را برای استخراج نیم‌رخ‌های آماری از تصاویر GOES به کار گرفت. لی و همکاران (۲۰۰۰) از روش کمترین مربعات برای استخراج نیم‌رخ‌های دما و ارتفاع ژئوپتانسیل از اندازه‌گیری‌های Nimbus 3 SIRS استفاده کردند. منزل و گوملی (۱۹۹۸)

استخراج نیم‌رخ‌های (Profiles) جوّی از مشاهدات جوّی چگالی شار تابش‌های فروسرخ گرمایی را اولین بار کینگ (Kingsley) (۱۹۵۶) عرضه کرد. کاپلان (Capehart) (۱۹۵۹) مطرح ساخت که توزیع قائم دما در جوّ را می‌توان در مقیاس جهانی با اندازه‌گیری ماهواره‌ای به صورت تابعی از طول موج تابندگی گرمایی باند ۱۵ میکرومتر مربوط به جذب کردن دی‌اکسید محاسبه کرد. همچنین اُزن و بخار آب نیز با اندازه‌گیری‌های سنجش از دور قابل تعیین هستند (کاپلان، ۱۹۵۹)

وارک (Warick) (۱۹۶۱) یک برنامه نیم‌رخ گیری قائم ماهواره‌ای برای اندازه‌گیری نیم‌رخ‌های دمای جوّ پیشنهاد داد. اولین سامانه نیم‌رخ گیر ماهواره‌ای یعنی طیف‌سنج Satellite (SIRS-A) A سری NIMBUS-3 در ۱۹۶۹ (Infrared Spectrometer) به فضای فرستاده شد (وارک و همکاران، ۱۹۷۰). پس از موفقیت حس‌گرهای آزمایشی مستقر بر سری ماهواره‌های NIMBUS، سری ماهواره‌های کاربردی با مدار قطبی ماهواره مشاهده از راه دور فروسرخ سری N (TIROS-N) در ۱۹۷۸ توسعه داده شدند. این ماهواره‌ها، TIROS Operational (TIROS) نیم‌رخ گیر قائم کاربردی (Vertical Sounder) را که شامل سه واحد نیم‌رخ بردار HIRS: High- گرمایی فروسرخ با قدرت تفکیک زیاد (-

جو رابطه (۱) را در نظر گرفت. البته در مورد دیگر نیم رخ های جوی نیز چنین رابطه مشابهی وجود دارد:

$$L(f_j) = \sum_{i=1}^N P[f_j, T(p_i)] w(f_j, p_i) \quad (1)$$

$$j = 1, 2, \dots, M$$

در این معادله $w(f_j, p_i)$ یک تابع وزن دهی برای در نظر گرفتن وزن شرکت هر لایه، $P[f_j, T(p_i)]$ چگالی شار پلانک در بسامد f_j و دمای T در سطح فشار p_i است. تابع وزن دهی، اثر گسیل مندی ϵ و عبور دهی τ بالای جو را سطح آ در باند f_j را ترکیب می کند و می توان آن را با رابطه زیر نشان داد (سیمن و همکاران، ۲۰۰۶).

$$w(f_j, p_i) = \epsilon(f_j, p_i) \tau(f_j, 0 \rightarrow p_i) \quad (2)$$

در واقع هدف تعیین دما و رطوبت در N سطح جو از M مشاهده تابش است. به علت اینکه M مشاهده تابش از یکدیگر مستقل نیستند، برای رابطه (۱) راه حل منحصر به فردی وجود ندارد. یک راه حل برای این مشکل را سیمن و همکاران (۲۰۰۶) عرضه کردند که در آن از تفاضل از یک نیم رخ از قبل تعریف شده $T_0(p_i)$ استفاده می شود.

$$L(f_i) - L_0(f_j) = \sum_{i=1}^N \left\{ P[f_j, T(p_i)] \right\} w(f_j, p_i) + e(f_j) \quad (3)$$

در این رابطه $e(f_j)$ خطای مشاهدات تابش است. با فرض رفتار خطی تابع پلانک با بسامد در محدوده فروسرخ گرمایی، می توان از رابطه (۳) برای پیدا کردن نیم رخ های دمایی وارون استفاده کرد (سیمن و همکاران، ۲۰۰۶):

$$T(p_i) - T_0(p_i) = \sum_{j=1}^M A(f_j, p_i) [L(f_i) - L_0(f_j)] \quad (4)$$

معادله فوق در شکل ماتریسی به صورت زیر است:

$$T = AR \quad (5)$$

روشی کاربردی برای استخراج نیم رخ های جوی از تصاویر مادیس عرضه کردند که این روش را سیمن و همکاران (۲۰۰۳) گسترش دادند. مجدداً این روش را سیمن و همکاران (۲۰۰۶) و برویاس و همکاران (۲۰۱۱) توسعه بیشتری دادند، به طوری که امروزه از آن به منظور تولید محصولات روزانه روی تصاویر مادیس استفاده می شود. این محصولات در سایت مربوط به این حس گر (<http://modis.gsfc.nasa.gov>) قابل دسترسی هستند.

طیف سنج پرتویی تصویر بردار با قدرت تفکیک MODIS: Moderate Resolution (Imaging Spectroradiometer) فرست جدیدی را برای بهبود پایش جهانی دما، رطوبت و ازن و تغییرات آنها ایجاد کرده است (کینگ و همکاران، ۱۹۹۲). حس گر EOS: Earth Observing System متعلق به مؤسسه ملی هوافضای NASA: National Aeronautics and Space Administration آکوا به ترتیب در سالهای ۱۹۹۹ و ۲۰۰۲ به فضای خود شد. این سامانه از یک طیف سنج پرتویی اسکن کننده با ۳۶ باند طیفی در محدوده های مرئی (VIS: Visible)، فروسرخ نزدیک (NIR: Near-infrared) و فروسرخ گرمایی (TIR: Thermal Infrared) با طول موج های بین ۰/۴۰۵ و ۱۴/۳۸۵ میکرومتر تشکیل شده است (کینگ و همکاران، ۱۹۹۲). جدول ۱ باندهای فروسرخ گرمایی مربوط به حس گر مادیس مورد استفاده در این پژوهش را نشان می دهد.

بر پایه کار اسمیت و همکاران (۱۹۷۰)، در یک آسمان صاف، چگالی شار تابش رسیده در بالای جو در بسامد f_j را می توان به صورت مجموع تابش های شرکت کننده از سطح زمین و از همه لایه های جوی در نظر گرفت. برای نمونه می توان در مورد نیم رخ های دمایی

۱-۱ فیزیک مسئله

برای به دست آوردن دمای جوی از اندازه‌گیری‌های تابش گرمایی، باید منبع تابش یک گاز نسبتاً فراوان و با توزیع یکنواخت در جوّ باشد (سیمن و همکاران، ۲۰۰۳). در غیر این صورت عدم قطعیت‌های موجود در فراوانی گاز مورد بررسی، تعیین دما از اندازه‌گیری‌های تابش گرمایی را مبهم خواهد ساخت (سیمن و همکاران، ۲۰۰۳). همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، در جوّ گاز‌های گوناگونی وجود دارد که هریک دارای توزیع قائم متفاوتی است (گودی و یونگ، ۱۹۹۵) و بسیاری از آنها برای تحقیقات دمای جوّ مناسب نیستند.

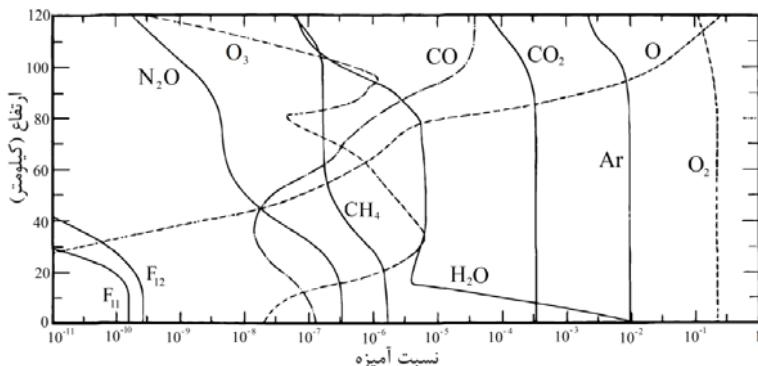
فقط دو گاز جوی دارای فراوانی یکنواخت در ارتفاعات کمتر از ۱۰۰ کیلومتر بوده و دارای باند جذبی در محدوده طیفی مناسب برای اندازه‌گیری‌های سنجش از دور هستند. این دو گاز، کربن دی‌اکسید با نسبت حجمی ۳۰ درصد و اکسیژن با نسبت ۲۱ درصد هستند که البته طول موج‌های جذبی کربن دی‌اکسید برای تعیین نیم‌رخ دمای جوّ مناسب هستند (سیمن و همکاران، ۲۰۰۶).

جدول ۱. مشخصات باندهای مادیس مورد استفاده در این پژوهش.

پهنهای باند	باند	کاربرد جوی اصلی
۴/۴۸۲-۴/۵۴۹	۲۵	نیم‌رخ دما
۶/۵۳۰-۶/۸۹۵	۲۷	نیم‌رخ رطوبت
۷/۱۷۵-۷/۴۷۵	۲۸	
۸/۴۰۰-۸/۷۰۰	۲۹	
۱۳/۱۸۵-۱۳/۴۸۵	۳۳	
۱۳/۴۸۵-۱۳/۷۸۵	۳۴	نیم‌رخ دما
۱۳/۷۸۵-۱۴/۰۸۵	۳۵	
۱۴/۰۸۵-۱۴/۳۸۵	۳۶	

در الگوریتم مطرح شده سیمن و همکاران (۲۰۰۶)، برای استخراج نیم‌رخ دما و رطوبت جوی از داده‌های جهانی به منزله حدس اولیه استفاده می‌شود. در این الگوریتم با استفاده از تفاضل‌ها داده‌های ورودی با داده‌های حدس اولیه پیش‌گفته، ضرایب مورد نیاز را برای اعمال روی داده‌های حس‌گر مادیس به دست می‌آورند. با اعمال این ضرایب و داده‌های حدس اولیه بر تصاویر مادیس، می‌توان منحنی‌های هم‌دما و هم‌رطوبت را در سطوح هم‌شاری گوناگون رسم کرد. از این منحنی‌ها می‌توان در مدل‌های پیش‌بینی و پایش جوی در مقیاس جهانی استفاده کرد.

رحیم‌زادگان و مباشری (۲۰۱۱) برای بهبود دقت این مدل‌ها و همچنین مدل‌سازی منطقه‌ای، از داده‌های رادیوسوند هم‌مکان با داده‌های تصویری استفاده کردند و با درون‌یابی این داده‌های برای لحظه‌گذر ماهواره، مبنای برای اندازه‌گیری‌های دقیق‌تر این نیم‌رخ‌ها از تصاویر مادیس به دست آوردن. به علت اینکه مدل‌های قبلی برای محاسبه نیم‌رخ‌های دما و رطوبت از تصاویر حس‌گر مادیس و در نتیجه رسم منحنی‌های هم‌دما و هم‌رطوبت از داده‌های حدس اولیه و ضرایب رگرسیون جهانی استفاده می‌کنند، در مقیاس محلی دقت مناسبی ندارند. بنابراین استفاده از الگوریتم‌هایی که مقادیر حدس اولیه و ضرایب رگرسیون را در مقیاس محلی به دست می‌آورند، می‌تواند دقت استخراج منحنی‌های هم‌دما و هم‌رطوبت را افزایش دهد و به علاوه در مدل‌سازی پدیده‌های جوی محلی نیز موثر باشد. هدف از این پژوهش، بهبود دادن رگرسیون‌های آماری به منظور استخراج نیم‌رخ‌های محلی دما و رطوبت جوّ از تصاویر مادیس و همچنین ایجاد نقشه‌های هم‌دما و هم‌رطوبت در سطوح فشاری متفاوت از رگرسیون‌های ایجاد شده است.



شکل ۱. نیم رخ قائم نسبت آمیزه (نسبت مقدار کاز موجود در یک کیلوگرم هوای خشک) برای تعدادی از گازهای موجود در جو (گودی و بونگ). (۱۹۹۵).

این نیم رخ‌ها به تابندگی‌های (Radiance) باند طیفی مادیس، از مدل گذردهی انجمان مدل انتقال انرژی (Community Radiative Transfer Model) (CRTM) استفاده می‌شود (مک‌میلین و همکاران، ۲۰۰۶). مدل CRTM مدلی است که به‌منظور حل معادله انتقال انرژی در جو که در مرکز مشترک شبیه‌سازی داده ماهواره‌ای JCSDA: Joint Center for Satellite Data) توسعه یافته است (هان و همکاران، ۲۰۰۶) و تابندگی‌های فروسرخ و مایکروویو مشاهده شده در دستگاه‌های مستقر بر فضای پیما را برای یک وضعیت مشخص جویی و سطح زمین شبیه‌سازی می‌کند. همچنین این مدل حساسیت‌های تابندگی مانند مشتق‌های تابندگی (ژاکوبی) نسبت به متغیرهای حالت (State variables) را نیز محاسبه می‌کند. در واقع در این مرحله از مدل CRTM برای تبدیل T_0 به $(f_j(p_i))$ در رابطه (۴) استفاده می‌شود. با استفاده از این داده‌های اولیه و چند داده تابندگی با نیم رخ متناظر با آنها، ضرایب رگرسیون یعنی مقادیر ضرایب $A(f_j, p_i)$ در رابطه (۴) بین نیم رخ‌های دما/ رطوبت جویی و تابندگی مادیس بدست می‌آید. از این روش اغلب برای ایجاد یک حدس اولیه به‌منظور ورود به الگوریتم‌های استخراج فیزیکی استفاده می‌شود (اسمیت و همکاران، ۱۹۸۱ و ۱۹۹۳).

۱-۱-۱ استخراج نیم‌رخ به روش رگرسیون‌های آماری از لحاظ محاسباتی یک روش کارآمد برای استخراج نیم‌رخ توزیع دما و رطوبت جوّ از اندازه‌گیری‌های نیم‌رخ گیرماهواره، استفاده از روابط آماری از قبل تعیین شده بین چگالی شار تابش‌های اندازه‌گیری شده یا مدل‌سازی شده با نیم‌رخ‌های جوّی متناظر آنها است (سیمن و همکاران، ۲۰۰۳). در روش استخراج نیم‌رخ به روش رگرسیون‌های آماری، که اولین بار از سوی سیمن و همکاران (۲۰۰۳) مطرح شد، ضرایب رگرسیون بین دما و رطوبت با چگالی شار تابش‌هایی که از کربن دی‌اکسید و بخار آب در باندهای جدبی مربوط به آنها صورت گرفته است، محاسبه می‌شود. این روش همان الگوریتم مورد استفاده در تولید محصولات نیم‌رخ‌های جوّی مادیس با نام‌های MOD07 و MYD07 به ترتیب برای سکوهای ترا و آکوا است. در این روش از داده‌های حدس اولیه به دست آمده از پایگاه داده نیم‌رخ جهانی SeeBor که شامل نیم‌رخ‌های جهانی دما، رطوبت و اُزن است، استفاده می‌شود (بروباس و همکاران، ۲۰۰۵ و ۲۰۱۱). این سری داده شامل ۱۵۷۰۴ نیم‌رخ جهانی دما، رطوبت و اُزن در سطح فشاری در شرایط آسمان صاف است. از مقادیر نیم‌رخ‌های موجود در این مجموعه داده، مقادیر مربوط به T_0 در رابطه (۴) به دست می‌آید. همچنین برای تبدیل

تحقیقاتی مادیس است (سیمن و همکاران، ۲۰۰۶)، به دست آورد. اما این داده‌ها به صورت محلی به دست می‌آید و فقط میزان دقت آن برای اقلیم محدوده ایستگاه سینوپتیک مورد استفاده در مدل‌سازی، آزمایش شده است.

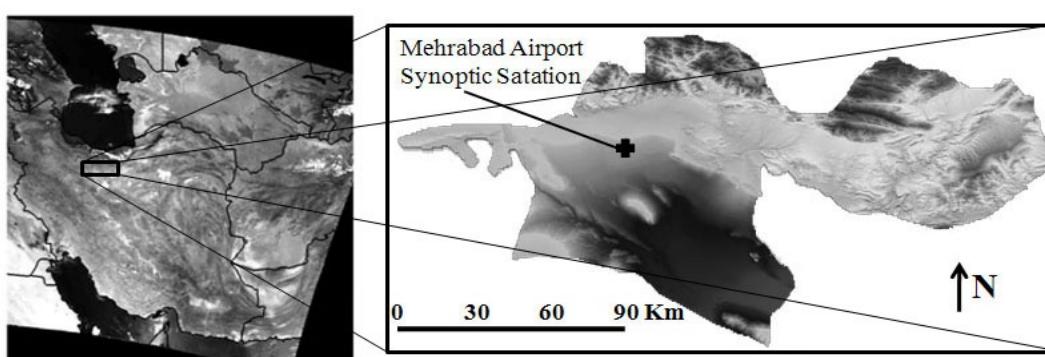
۲ مواد و روش‌ها

۱-۲ داده‌های مورد استفاده و منطقه مورد بررسی
محدوده انتخاب شده در این تحقیق برای مدل‌سازی، ایستگاه سینوپتیک فرودگاه مهرآباد است که در شکل (۲) به همراه نمایی از نقشه رقومی ارتفاعی مربوط به این منطقه نشان داده شده است. این ایستگاه که در موقعیت جغرافیایی $21^{\circ}E$, $35^{\circ}N$ و در ارتفاع ۱۱۹۱ متری از سطح دریا قرار دارد، در جنوب شهر تهران در دامنه‌های جنوبی کوه‌های البرز قرار گرفته است.

همچنین به منظور ارزیابی کارایی الگوریتم از داده‌های مربوط به کل ایستگاه‌های سینوپتیک موجود در ایران که در آنها داده‌های رادیوسوند به صورت نسبتاً مرتبت جمع‌آوری می‌شود، استفاده شده است. مختصات ایستگاه‌های رادیوسوند ایران که در تاریخ‌های مورد بررسی از آنها داده جمع‌آوری شده بود، در جدول (۲) آمده است.

۱-۱-۲ استخراج نیم‌رخ به روش رگرسیون‌های محلی آماری (LSRPR)

روش استخراج نیم‌رخ به روش رگرسیون‌های محلی LSRPR: Localized Statistical Regression آماری (Profile Retrieval) (رحیم‌زادگان و مباشری، ۲۰۱۱) عرضه شده است. در این روش که روش مورد استفاده در این پژوهش است، برای استخراج نیم‌رخ‌های جوئی به روش رگرسیون‌های آماری از تصاویر مادیس، مقادیر $T_0(p_i)$ در رابطه (۴) با استفاده از نیم‌رخ‌های جوئی حاصل از داده‌های رادیوسوند محلی به دست می‌آید. در این روش به جای استفاده از مدل CRTM برای استخراج مقادیر تابندگی معادل باندهای مادیس، تصاویر متاظر با داده‌های رادیوسوند استفاده شده مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد و با استفاده از این داده‌های ورودی، ضرایب رگرسیون به صورت محلی استخراج می‌شود. مزیت این روش، استفاده از داده‌هایی است که به صورت مستقیم در منطقه اندازه‌گیری شده است که البته با دقت بهتری با شرایط منطقه‌ای سازگاری دارد و عدم قطعیت‌های مربوط به مدل‌های گذردهی، در آن وارد نمی‌شود. سپس با اجرای مدل پیش‌گفته بر تصاویر مادیس، می‌توان نیم‌رخ‌های جوئی متاظر با آن تصاویر را با دقت بیشتری نسبت به نتایج الگوریتم MOD07 که الگوریتم عرضه شده تیم



شکل ۲. نمایی از نقشه ارتفاعی رقومی استان تهران و تصویر باند ۱ حسگر مادیس اخذ شده در سکوی Terra در تاریخ ۱۵ زئون ۲۰۰۷.

جدول ۲. مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های رادیوسوند موجود در ایران.

شهر مختصات	تهران (مهرآباد)	کرمانشاه	تبریز	شیراز	اهواز	بندرعباس	Zahedan	مشهد
عرض جغرافیایی	۳۵/۸۸	۳۴/۲۶	۳۸/۰۸	۲۹/۰۳	۳۱/۳۳	۲۷/۲۱	۲۹/۴۶	۳۷/۲۶
طول جغرافیایی	۵۱/۳۱	۴۷/۱۱	۴۶/۲۸	۵۲/۲۸	۴۸/۶۷	۵۶/۳۶	۶۰/۸۸	۵۹/۶۳

انتخاب شده صورت گرفت. همچنین به منظور اطمینان یافتن از عاری بودن تصاویر از ابر، آزمون ابر با MOD35 و MYD35 (به ترتیب برای سکوهای ترا و آکوا) صورت گرفت و پیکسل‌های بدون ابر با درجه اطمینان بیش از ۹۵٪ انتخاب شد و برای هر پیکسل تصویر، میانگین پنجره‌های ۵ در ۵ به مرکزیت پیکسل مورد بررسی، محاسبه شد.

برای ایجاد حدس اولیه موردنیاز در رگرسیون آماری، میانگین داده‌های رادیوسوند مربوط به ۵ سال (۲۰۰۴ تا ۲۰۰۸) شامل ۲۴۰ نیم‌رخ دما و رطوبت که برای زمان گذر ماهواره در ماه ژوئن و در سطوح هم‌فشار با فواصل ۵۰ میلی‌بار درون‌یابی شده بودند، محاسبه شد.

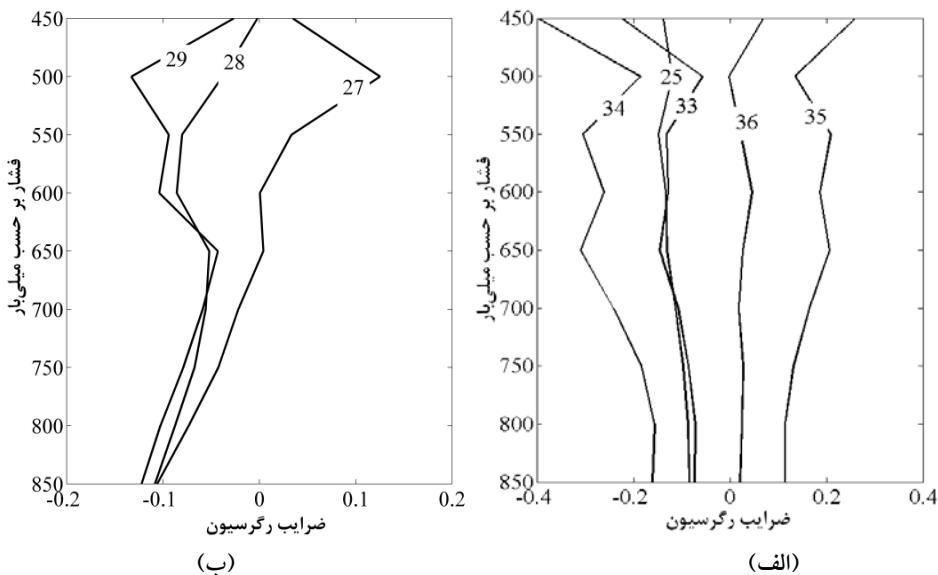
در مرحله بعد با استفاده از روش LSRPR و با کمک ۵ تصویر مادیس مربوط به تاریخ‌های ۸ و ۱۱ ماه ژوئن سال ۲۰۰۴ و ۸، ۱۵ و ۲۲ ماه ژوئن سال ۲۰۰۷، تابندگی‌های تصویری متناظر با حدس اولیه به دست آمده برای نیم‌رخ‌های دما و رطوبت و نیز ضرایب مربوط به رگرسیون‌های آماری استخراج شد. بدین ترتیب با استفاده از ضرایب ایجاد شده و داده‌های حدس اولیه، می‌توان برای هر تصویر مربوط به ماه ژوئن، نیم‌رخ‌های دما و رطوبت جوئی را محاسبه کرد. ضرایب وزن‌دهی برای نیم‌رخ‌های دما و رطوبت در سطوح فشاری گوناگون در شکل (۳) آمده است. عددی‌های مشخص شده روی نمودارهای این شکل، شماره باندهای مربوط را نشان می‌دهد.

در این پژوهش، ۹ تصویر سطح ۱ حس‌گر مادیس مستقر بر سکوی ترا و ۹ تصویر سطح ۱ حس‌گر مادیس مستقر بر سکوی آکوا با فرمت HDF مورد استفاده قرار گرفته است. از این تصاویر، ۵ تصویر مربوط به هر سکو برای ساخت مدل و ۴ تصویر برای ارزیابی و آزمون مدل انتخاب شده است.

برای انتخاب تصاویر مناسب، تا حد ممکن سعی شده است که تصاویر مادیس بدون ابر انتخاب شود. برای تهیه داده‌های رادیوسوند، از پایگاه داده سازمان هوافضای ایران و سایت دانشگاه وایومینگ (<http://weather.uwyo.edu/upperair/mideast.html>) استفاده شده است. این داده‌ها به شکل منظم دوبار در روز یعنی 0000Z و 1200Z به وقت جهانی در سراسر کره زمین با بالون جمع‌آوری می‌شود. در ایران نیز این داده‌ها در ایستگاه‌های مهرآباد و کرمانشاه در هر دو زمان ذکر شده اندازه‌گیری می‌شود، اما در دیگر ایستگاه‌ها یعنی ایستگاه‌های تبریز، مشهد، شیراز، زاهدان و بندرعباس فقط در زمان 0000Z جمع‌آوری می‌شود. دما، فشار و نسبت آمیزه بخار آب پارامترهایی هستند که با حس‌گرهای رادیوسوند جمع‌آوری و مستقیماً به زمین ارسال می‌شوند.

۲-۲ روش پژوهش

به منظور پیاده‌سازی مدل LSRPR، در مرحله اول، پیش‌پردازش‌های هندسی و رادیومتریک (این تصحیح در این پژوهش شامل تبدیل درجه روشنایی پیکسل‌ها به مقادیر تابندگی برای باندهای گرمایی است) روی تصاویر



شکل ۳. ضرایب وزن‌دهی در سطوح فشاری گوناگون (عددهای مشخص شده روی نمودارهای این شکل، نشان‌دهنده شماره باندهای حس‌گر مادیس است) برای (الف) نیم‌رخ رطوبت و (ب) نیم‌رخ دما.

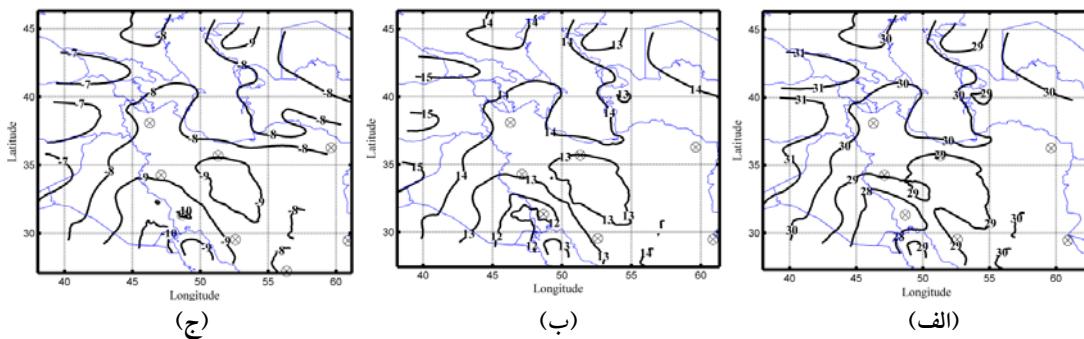
کاهش دقیق استخراج نیم‌رخ‌های جوّی در مقایسه با داده‌های رادیوسوند در برخی از ایستگاه‌ها ممکن است ناشی از ناپایداری جوّی موجود در این ایستگاه‌ها باشد. برای بررسی این موضوع می‌توان از آهنگ کاهش دمای جوّی (ELR: Environmental Lapse Rate) و مقایسه آن با آهنگ کاهش دمای بی‌دررو (ALR: Adiabatic Lapse Rate) استفاده کرد. در واقع وقتی شب نمودار ELR (Rate) از شب ALR شود، ممکن است نشان‌دهنده پایداری جوّی و در غیر این صورت نشان‌دهنده ناپایداری جوّی باشد.

همان‌گونه که در شکل (۵) دیده می‌شود، با افزایش ارتفاع، رطوبت نسبی افزایش یافته و به سطح تراکم نزدیک‌تر می‌شود. انتظار می‌رود، تولید ابر در نواحی با گرادیان شدید رطوبت نسبی، دمای کمتر و نسبت آمیزه بیشتر، شناس بیشتری داشته باشد.

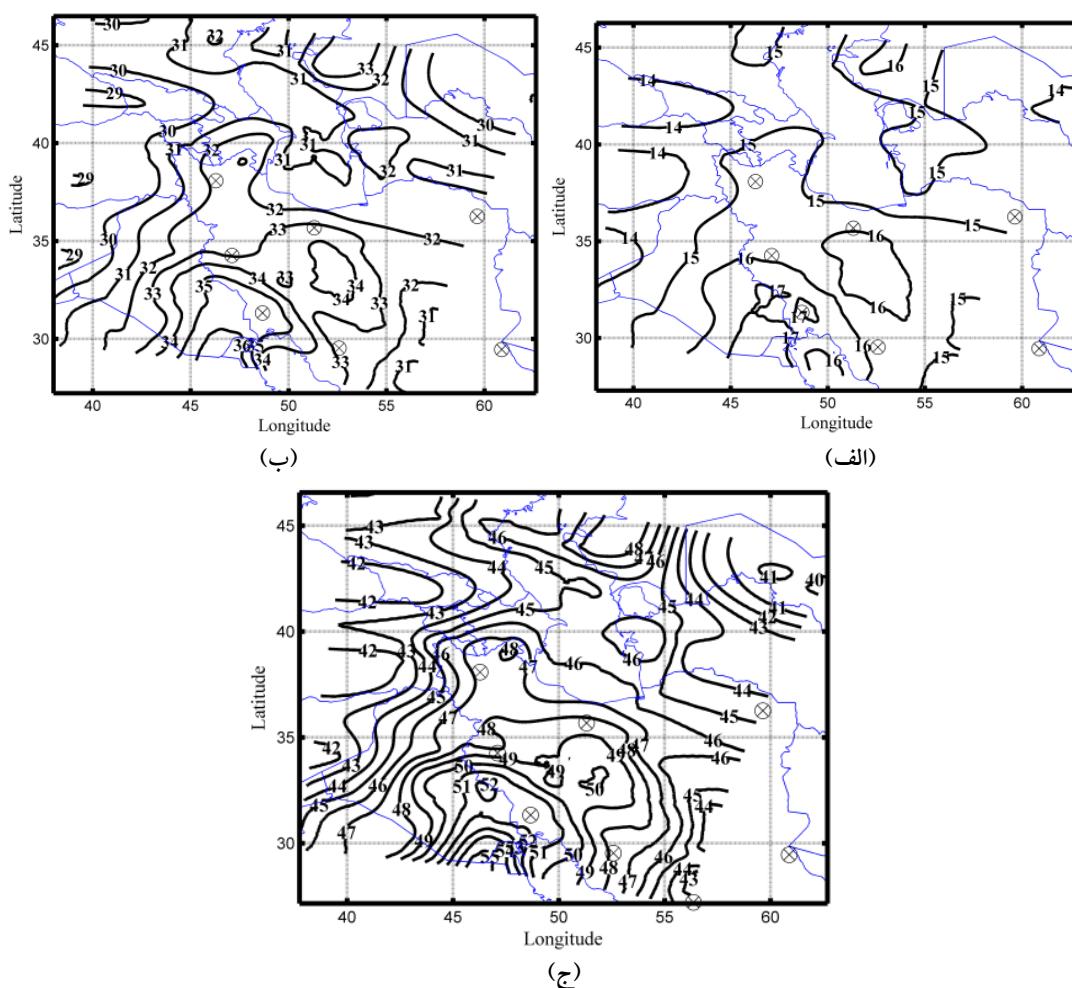
در مرحله بعد با استفاده از مقادیر حدس اولیه و ضرایب رگرسیون به دست آمده، نیم‌رخ‌های دما و رطوبت برای همه پیکسل‌های تصاویر مادیس مربوط به تاریخ‌های ۲، ۶، ۷ و ۲۱ ماه ژوئن سال ۲۰۰۷، مستقر بر سکوهای ترا و آکوا محاسبه شد.

۳ نتایج

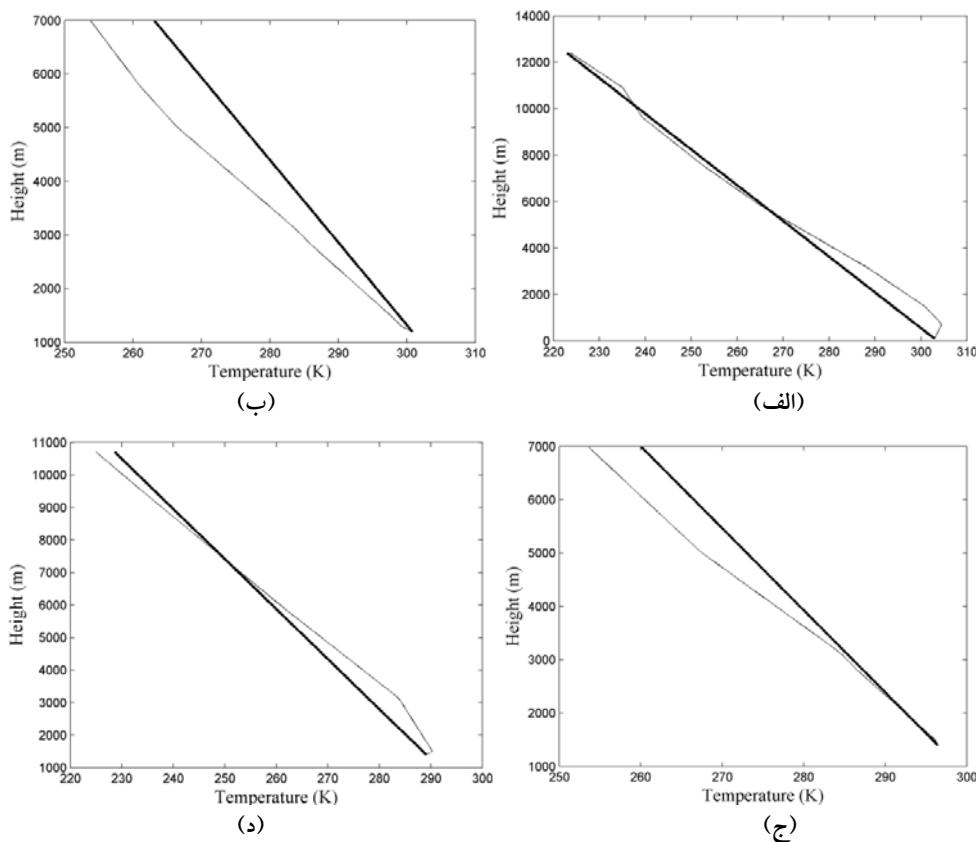
با استفاده از ضرایب به دست آمده در مرحله قبل، منحنی‌های سطوح هم‌دما و هم‌رطوبت برای تصاویر مادیس مستقر بر سکوهای ترا و آکوا در تاریخ‌های ۲، ۶، ۷ و ۲۱ ماه ژوئن سال ۲۰۰۷ ایجاد شد. نیم‌رخ‌های دما و رطوبت جوّی حاصل از پیاده‌سازی مدل پیش‌گفته برای سطوح هم‌فشار ۵۰۰، ۵۰۰ و ۸۵۰ میلی‌بار در شکل (۴) تا شکل (۱۳) آمده است. همچنین موقعیت ایستگاه‌های رادیوسوند ایران در تصاویر عرضه شده با علامت \otimes نشان داده شده است.



شکل ۴. نقشه هم‌دما بر حسب درجه سلسیوس مربوط به گذر ترا اخذ شده در تاریخ ۲ زوئن ۲۰۰۷ ساعت ۷:۳۵ UMT برای سطوح هم‌فشار (الف) ۸۵۰ و (ب) ۷۰۰ و (ج) ۶۵۰ میلی‌بار. با توجه به الگوی‌های مشابه هم‌دما در سطوح متفاوت فشاری، وجود جوی آرام و پایدار مشاهده می‌شود.



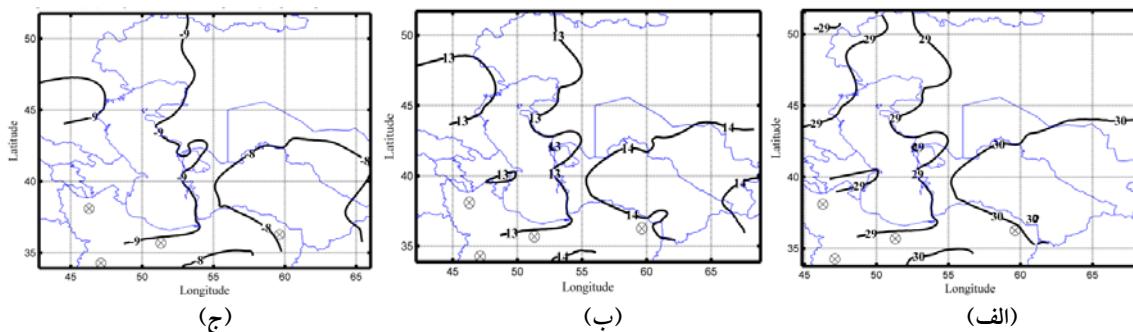
شکل ۵. منحنی های رطوبت نسبی مربوط به گذر ترا اخذ شده در تاریخ ۲ ژوئن ۲۰۰۷ ساعت UMT ۷:۳۵ برای سطوح هم فشار (الف) ۸۵۰ و (ج) ۵۰۰ میلی بار.



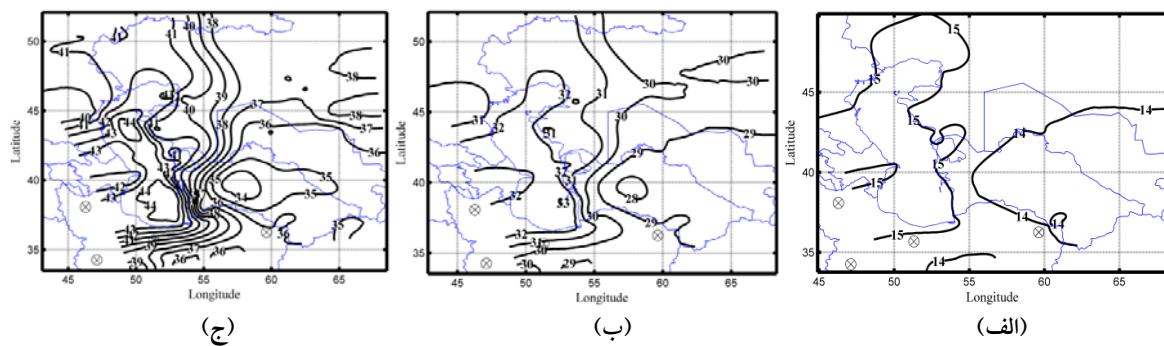
شکل ۶. شاخص ALR (خطوط نازک) و ELR (خطوط ضخیم) برای تاریخ دوم ماه ژوئن سال ۲۰۰۷ و برای لحظه گذر ماهواره ترا (ساعت ۷:۳۵ UMT) برای (الف) تهران، (ب) بندرعباس، (ج) کرمانشاه و (د) تبریز.

صورتی که ابرهای موجود پوششی دیس نبوده و ابرهای جوشش کومه‌ای دیس باشند، احتمال وجود ناپایداری شدید در این نواحی وجود دارد. در حالی که این پدیده در ۷۰۰ و ۸۵۰ میلی‌بار به راحتی دیده نمی‌شود.

همان‌گونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، جوّ در بندرعباس و کرمانشاه به شدت ناپایدار ولی در تهران و تبریز شدت این ناپایداری کمتر است. این مسئله در نقشه ۵۰۰ میلی‌بار (شکل ۵) نیز به خوبی دیده می‌شود؛ چرا که گرادیان شدید رطوبت نسبی در منطقه جنوب و غرب، در



شکل ۷. منحنی‌های هم‌دما برحسب درجه سلسیوس مربوط به گذر آکوا اخذ شده در تاریخ ۲ ژوئن ۲۰۰۷ ساعت ۹:۱۵ UMT برای سطح هم‌فشار (الف) (ب) ۵۰۰ و (ج) ۷۰۰ میلی‌بار. همانند شکل (۴)، جوّ در گذر بعدازظهر هم پایدار به نظر می‌رسد.

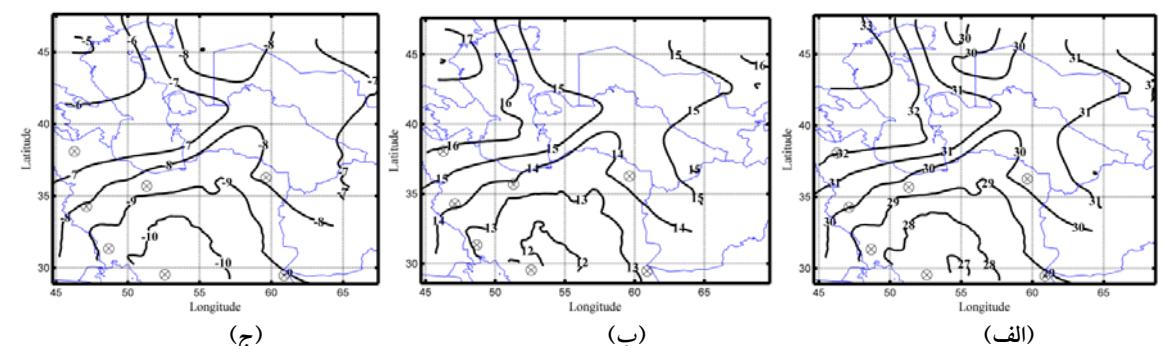


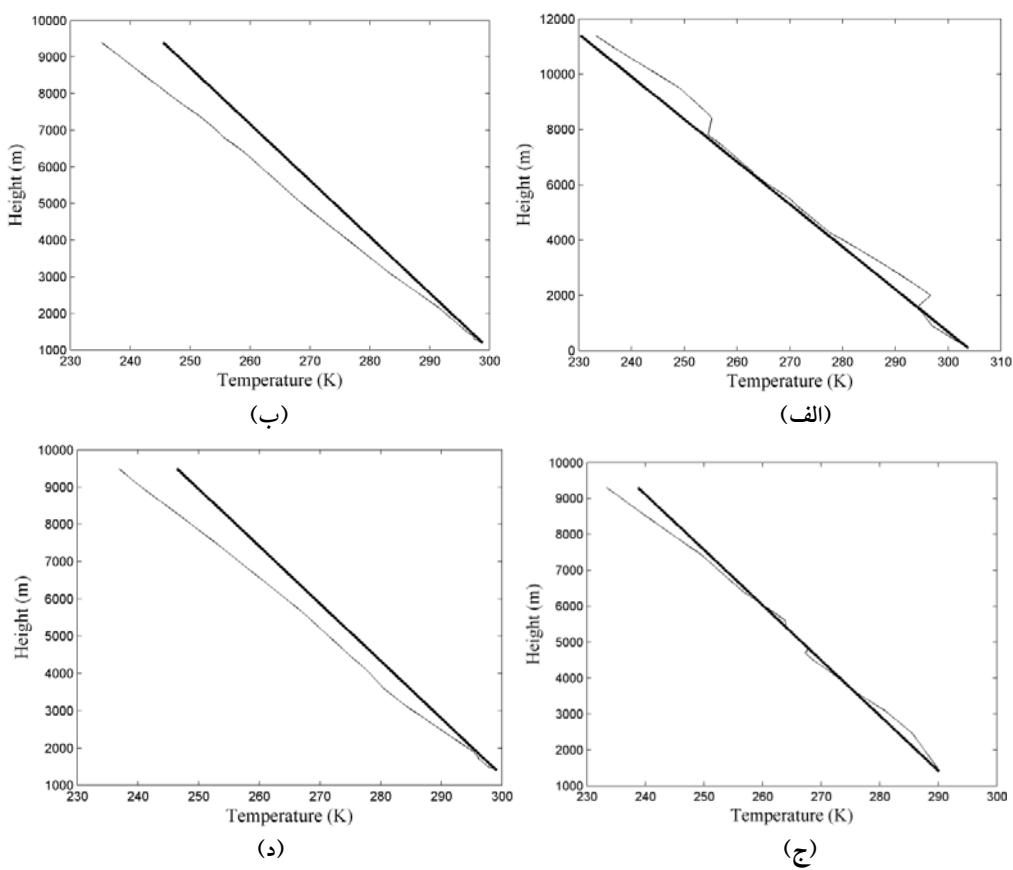
شکل ۸ منحنی های رطوبت نسبی مربوط به گذر آکوا اخذ شده در تاریخ ۲ ژوئن ۲۰۰۷ ساعت ۹:۱۵ UMT برای سطح هم فشار (الف) ۸۵۰ (ب) ۷۰۰ و (ج) ۵۰۰ میلی بار.

در شکل ۱۱ برای چهار ایستگاه تهران، تبریز، کرمانشاه و بندرعباس نشان داده شده است.

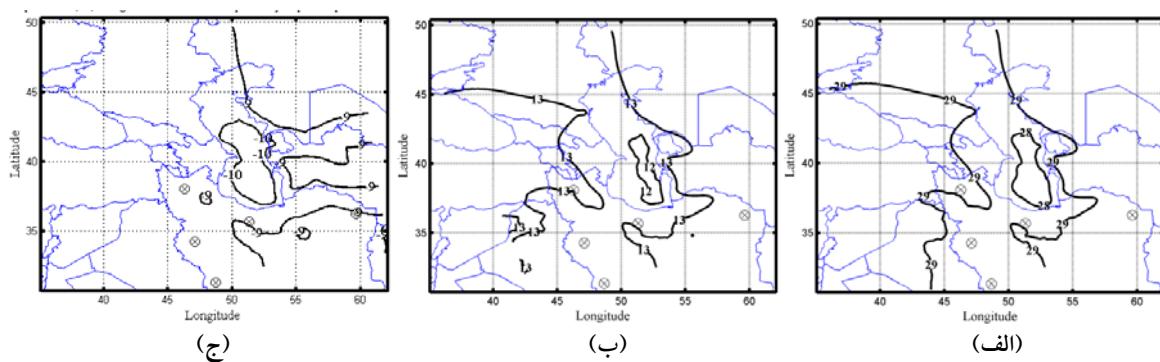
همان طور که در شکل ۱۱ ملاحظه می شود، برای تهران و کرمانشاه ناپایداری کمتر و برای تبریز و بندرعباس جو ناپایداری بیشتری دارد.

همانند شکل ۵، نواحی خاصی روی دریای خزر در شکل ۸ سریع تر به سطح اشباع می رستند. در شکل ۹ نیز، پایداری جو تا سطح ۵۰۰ میلی بار مشاهده می شود. ولی با مشاهده الگوی رطوبت نسبی در شکل ۱۰، انتظار می رود، جو در همه نواحی کشور ناپایدار باشد. این مهم





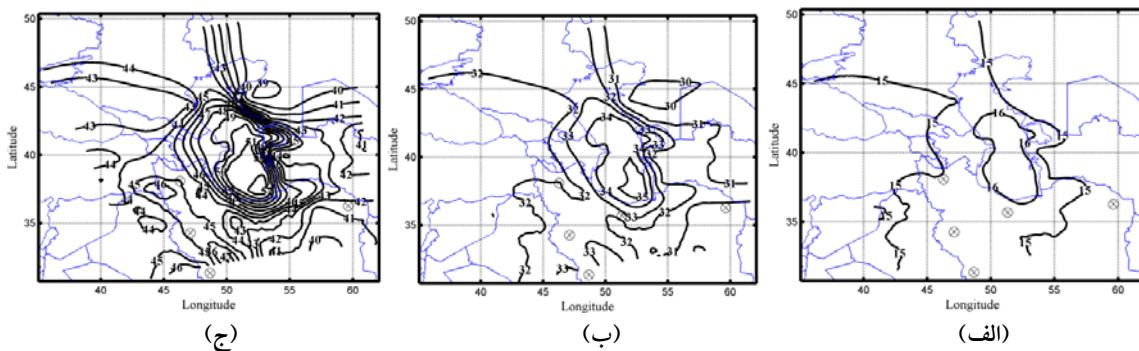
شکل ۱۱. شاخص ALR (خطوط ضخیم) و ELR (خطوط نازک) برای تاریخ ۶ ژوئن ۲۰۰۷ و برای لحظه گذر ماهواره ترا (ساعت ۱۰:۰۰ UMT) برای (الف) تهران، (ب) بندرعباس، (ج) کرمانشاه و (د) تبریز.



شکل ۱۲. منحنی‌های هم‌دما بر حسب درجه سلسیوس مربوط به گذر آکوا اخذ شده در تاریخ ۲۱ ژوئن ۲۰۰۷ ساعت ۹:۴۵ UMT برای سطح هم‌فشار (الف) (ب) ۷۰۰ و (ج) ۵۰۰ میلی‌بار.

انتظار می‌رود که در شرق دریای خزر و ناحیه شرق کشور و در ارتفاعات بالا، رطوبت به حد اشباع رسیده باشد.

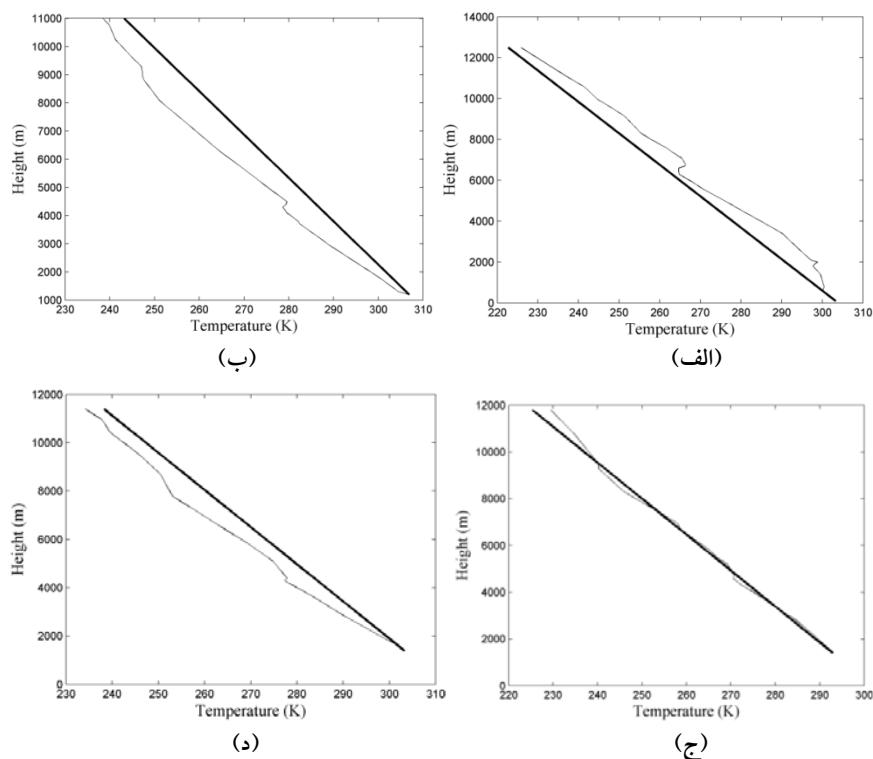
در شکل ۱۲، با توجه به تغییرات دما در سطح فشاری متفاوت انتظار جوی نآرام می‌رود. این مهم در شکل ۱۳ با توجه به الگوی تغییرات رطوبت تایید می‌شود.



شکل ۱۳. منحنی های رطوبت نسبی مربوط به گذر آکوا اخذ شده در تاریخ ۲۱ زوئن ۲۰۰۷ ساعت ۹:۴۵ UMT برای سطوح هم فشار (الف) ۸۵۰ (ب) و ۷۰۰ (ج) میلی بار.

دارد. برخلاف این مورد نمودار ELR مربوط به شهرهای تهران و کرمانشاه زیر نمودار ALR مربوط به این مناطق قرار گرفته است که این نشان دهنده ناپایداری جوی است که این مورد نیز با RMSE پایین محاسبه شده LSRPR نسبت به داده های رادیوسوند مربوط به این ایستگاهها هم خوانی بیشتری دارد.

همان طور که در شکل ۱۴ ملاحظه می شود، نمودار ELR مربوط به نیم رخ دمایی در جو شهرهای تبریز و بندرعباس، بالای نمودار ALR مربوط به این شهرها قرار گرفته که نشان دهنده پایداری جوی در این تاریخ است. این پایداری با RMSE بالای محاسبه شده LSRPR نسبت به داده های رادیوسوند مربوط به این ایستگاهها هم خوانی



شکل ۱۴. شاخص ALR (خطوط ضخیم) و ELR (خطوط نازک) برای تاریخ ۲۱ زوئن ۲۰۰۷ و برای لحظه گذر ماهواره آکوا (ساعت ۹:۴۵ UMT) برای (الف) تهران، (ب) بندرعباس، (ج) کرمانشاه و (د) تبریز.

این ایستگاه‌ها نیز دارای عدم قطعیت است.

همان‌طور که در جدول‌های بالا ملاحظه می‌شود، متوسط RMSE بین نیم‌رخ دمای استخراج شده از الگوریتم LSRPR و اندازه‌گیری‌های رادیوسوند برای همه ایستگاه‌های کشور ۳/۴۳ درجه کلوین و متوسط RMSE بین نیم‌رخ دمای استخراج شده از الگوریتم مادیس و داده رادیوسوند برای همه ایستگاه‌های کشور ۴/۶۶ درجه کلوین به‌دست آمد. همچنین متوسط RMSE بین نیم‌رخ رطوبت استخراج شده از الگوریتم LSRPR و اندازه‌گیری‌های رادیوسوند برای همه ایستگاه‌های کشور ۱/۲۷ و متوسط RMSE بین نیم‌رخ رطوبت استخراج شده از الگوریتم مادیس و داده‌های رادیوسوند برای همه ایستگاه‌های کشور برابر ۱/۴۱g/kg به‌دست آمد. بنابراین مقادیر به‌دست آمده از الگوریتم LSRPR هم‌خوانی نسبتاً مناسبی با داده‌های رادیوسوند جمع‌آوری شده در ایستگاه‌های هواشناسی دارد و در ایستگاه هواشناسی مهرآباد نقص بسیاری دارد و در بسیاری از ایستگاه‌های سینوپتیک فقط داده‌های رادیوسوند در ساعت ۰۰:۰۰Z و آن هم به‌طور ناقص جمع‌آوری می‌شود. بنابراین RMSE‌های به‌دست آمده برای

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با استفاده از الگوریتم LSRPR می‌توان پهنگ‌بندی دما و رطوبت را در لایه‌های فشاری مختلف و با جزئیات بیشتر به‌دست آورد. به این علت که داده‌های نیم‌رخ‌های دما و رطوبت با تراکم زیاد در کشور موجود نیست و منحنی‌های هم‌دما و هم‌رطوبت موجود نیز به روش درون‌یابی با استفاده از داده‌های نقشه ای تولید می‌شوند، درنتیجه، صحبت‌سنگی نتایج الگوریتم LSRPR با استفاده از داده‌های رادیوسوند نقطه‌ای موجود در ایستگاه‌های سینوپتیک کشور صورت گرفته است. در جدول‌های ۳ و ۴ مقادیر RMSE بین نتایج حاصل از الگوریتم LSRPR و ایستگاه‌های رادیوسوند کشور در کنار RMSE بین نتایج عرضه شده در محصول MOD07 یا MYD07 و ایستگاه‌های رادیوسوند ایران برای تصاویر مورد آزمایش آمده است. لازم به ذکر است داده‌های رادیوسوند مربوط به دیگر ایستگاه‌های هواشناسی غیر از ایستگاه هواشناسی مهرآباد نقص بسیاری دارد و در رادیوسوند در ساعت ۰۰:۰۰Z و آن هم به‌طور ناقص جمع‌آوری می‌شود. بنابراین RMSE‌های به‌دست آمده برای

جدول ۳. میانگین RMSE مربوط به نیم‌رخ دما به‌دست آمده از الگوریتم LSRPR و الگوریتم مادیس در مقایسه با داده‌های رادیوسوند برای همه ایستگاه‌های رادیوسوند ایران در تاریخ‌های ۲۱، ۲۰، ۲۱ و ۲۶ ژوئن سال ۲۰۰۷ (برحسب درجه کلوین).

آکوا		ترا		سکو
MYD 07	LSRPR	MOD 07	LSRPR	شهر
۷/۰۵	۳/۰۷	۶/۸۲	۲/۹۱	تهران
۴/۹۲	۲/۹۲	۵/۷۶	۴/۲۱	کرمانشاه
۳/۶۷	۵/۵۳	۴/۰۰	۵/۱۴	تبریز
۴/۴۲	۳/۱۲	۷/۰۱	۴/۵۰	شیراز
بدون داده	بدون داده	۳/۷۹	۴/۹۸	اهواز
بدون داده	بدون داده	۴/۰۲	۱/۲۴	بندرعباس
۲/۸۱	۷/۰۴	بدون داده	بدون داده	مشهد
۴/۰۹	۳/۰۳	۵/۲۳	۳/۸۳	میانگین

جدول ۴. میانگین RMSE مربوط به نیمرخ نسبت آمیزه بخار آب به دست آمده از الگوریتم LSRPR و الگوریتم مادیس برای همه ایستگاه‌های رادیوسوند ایران برای تاریخ‌های ۲۱، ۶، ۲ و ۷ ژوئن سال ۲۰۰۷ (بر حسب g/kg).

آکوا		ترا		سکو
LSRPR	شهر	MOD 07	LSRPR	شهر
۱/۳۳	۰/۹۷	۱/۰۴	۰/۷۴	تهران
۱/۰۷	۱/۳۸	۱/۰۱	۰/۹۷	کرمانشاه
۱/۶۷	۱/۹۸	۱/۲۰	۱/۶۹	تبریز
۱/۴۵	۰/۶۴	۱/۱۸	۰/۹۸	شیراز
بدون داده	بدون داده	۱/۵۴	۱/۲۳	اهواز
بدون داده	بدون داده	۲/۶۲	۲/۲۱	بندرعباس
۱/۳۸	۱/۲۴	۱/۴۳	۱/۳۰	میانگین

می‌توان نیمرخ‌های جوئی را محاسبه کرد.

مقادیر متوسط RMSE به دست آمده بین نیمرخ‌های استخراج شده از الگوریتم LSRPR و الگوریتم مادیس نشان می‌دهد که در مورد دما، الگوریتم LSRPR بهبود دقت داشته اما در مورد رطوبت افزایش دقت چندان چشمگیر نبوده است. این مورد می‌تواند ناشی از استفاده از تصاویر در ماه ژوئن که ماه بهنسبت خشکی است، باشد. همچنین همان‌طور که نتایج مربوط به پیاده‌سازی الگوریتم نشان می‌دهد، در ایستگاه‌های غیر از ایستگاه فرودگاه مهرآباد، مقادیر RMSE بین نیمرخ‌های دما و رطوبت مستخرج از الگوریتم LSRPR و اندازه‌گیری‌های رادیوسوند نسبت به الگوریتم مادیس، افزایش می‌یابد. علت این مورد ممکن است استفاده از داده‌های رادیوسوند یک ایستگاه (ایستگاه مهرآباد) و استفاده نکردن از داده‌های رادیوسوند دیگر ایستگاه‌ها (به سبب برداشت نامنظم داده) برای ایجاد حدس اولیه باشد. همچنین بهبود کلی به دست آمده در مورد نیمرخ دما می‌تواند به علت استفاده از نیمرخ‌های محلی دما به مترله مقدار حدس اولیه باشد.

۴ نتیجه‌گیری

از جمله روش‌های به دست آوردن نیمرخ‌های جوئی مانند دما و بخار آب، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در باندهای فروسرخ گرمایی و در نواحی جذبی رطوبت و بخار آب است. یکی از روش‌های استخراج این نیمرخ‌ها استفاده از رگرسیون‌های آماری در تصاویر ماهواره‌ای نظیر تصاویر حس‌گر مادیس است. در این مقاله به منظور استخراج نیمرخ‌های رطوبت و دمای جوئی، به روش رگرسیون‌های آماری، از روش LSRPR استفاده شد که خود روشی برای بهبود دقت نیمرخ‌های آماری به دست آمده تیم مادیس بود. در این روش مقادیر اولیه نیمرخ‌های جوئی مورد نیاز برای ایجاد مدل رگرسیون بین داده‌های تابندگی مادیس و نیمرخ‌های جوئی، از درون‌یابی برای لحظه گذر ماهواره و متوسط‌گیری ایجاد شد و مقادیر اولیه تابندگی‌ها به صورت مستقیم از تصاویر متناظر با این نیمرخ‌های جوئی به دست آمد. ضرایب مربوط به رگرسیون نیز با استفاده از این مقادیر اولیه به دست آمد. به این ترتیب پایگاه داده‌ای شامل مقادیر اولیه و ضرایب رگرسیون ایجاد شد که با وارد کردن هر تصویر مادیس،

- Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS), Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions, **30**(1), 2-27.
- Li, J., Wolf, W. W., Menzel, W. P., Zhang, W., Huang, H. L. and Achtor, T. H., 2000, Global soundings of the atmosphere from ATOVS measurements: The algorithm and validation, Journal of Applied Meteorology, **39**(8), 1248-1268.
- McMillin, L. M., Xiong, X., Han, Y., Kleespies, T. J. and Van Delst, P., 2006, Atmospheric transmittance of an absorbing gas. 7. Further improvements to the OPTRAN 6 approach, Applied optics, **45**(9), 2028-2034.
- Menzel, W. and Gumley, L., 1998, MODIS atmospheric profile retrieval algorithm theoretical basis document, version 4. Univ. Wisconsin, Madison, 6-10.
- Menzel, W. P. and Purdom, J. F. W., 1994, Introducing GOES-I: the first of a new generation of geostationary operational environmental satellites, Bull. Amer. Meteor. Soc, **75**, 757-782.
- Rahimzadegan, M. and Mobasher, M. R., 2011, An attempt for improving MODIS atmospheric temperature profiles products in clear sky, Meteorological Applications, **18**(2), 181-187.
- Seemann, S. W., Borbas, E. E., Li, J., Menzel, W. P. and Gumley, L. E., 2006, MODIS atmospheric profile retrieval algorithm theoretical basis document (version 6), University of Wisconsin-Madison, 5-20.
- Seemann, S. W., Li, J., Menzel, W. P. and Gumley, L. E., 2003, Operational retrieval of atmospheric temperature, moisture, and ozone from MODIS infrared radiances, Journal of Applied Meteorology, **42**(8), 1072-1091.
- Smith, W., Woolf, H., Hayden, C., Suomi, V., Menzel, W., Sromovsky, L., Revercomb, H., Erickson, D. and Mosher, F., 1981, First sounding results from VAS-D, Bull. Amer. Meteor. Soc, **62**, 232-236.
- Smith, W., Woolf, H., Hayden, C., Wark, D. and McMillin, L., 1979, The TIROS-N operational vertical sounder, Bull. Amer. Meteor. Soc, **60**(10), 1177-1187.
- Smith, W., Woolf, H., Nieman, S. and Achtor, T., 1993, ITPP-5—The use of AVHRR and TIGR in TOVS data processing.
- Smith, W. L., Woolf, H. M. and Jacob, W. J. 1970, A regression method for obtaining real-time temperature and geopotential height profiles from satellite spectrometer measurements and its application to Nimbus 3

همچنین هم‌خوانی نسبتاً مناسب بین تصاویر دما و رطوبت به دست آمده از الگوریتم LSRPR در فشارهای متفاوت با داده‌های رادیوسوند می‌تواند کارایی این الگوریتم را در تولید نقشه‌های دما و رطوبت در فشارهای گوناگون در کشوری مانند ایران که دارای تعداد استگاه‌های رادیوسوند کمی است و همچنین برداشت این داده‌ها هم به صورت منظم نیست، نشان دهد. استفاده از این نقشه‌ها در مدل‌های پیش‌بینی هوای و مدل‌های اقلیمی می‌تواند منجر به افزایش دقت پیش‌بینی‌های صورت گرفته شود.

مراجع

- Borbas, E., Seemann, S. W., Huang, H. L., Li, J. and Menzel, W. P., 2005, Global profile training database for satellite regression retrievals with estimates of skin temperature and emissivity, 14th International ATOVS Study Conference, NASA, Beijing.
- Borbas, E. E., Seemann, S. W., Kern, A., Moy, L., Li, J., Gumley, L. E. and Menzel, W. P., 2011, MODIS atmospheric profile retrieval algorithm theoretical basis document (version 7), University of Wisconsin-Madison, 2-10.
- Goody, R. M. and Yung, Y. L., 1995, Atmospheric radiation: theoretical basis, Oxford University Press, USA, 8-14.
- Han, Y., van Delst, P., Liu, Q., Weng, F., Yan, B., Treadon, R. and Derber, J., 2006, JCSDA Community Radiative Transfer Model (CRTM): Version 1, US Dept. of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite, Data, and Information Service, 2-9.
- Hayden, C. M., 1988, GOES-VAS simultaneous temperature-moisture retrieval algorithm, Journal of Applied Meteorology, **27**, 705-733.
- Kaplan, L. D., 1959, Inference of atmospheric structure from remote radiation measurements, JOSA, **49**(10), 1004-1006.
- King, J., 1956, The radiative heat transfer of planet Earth, Scientific uses of the Earth satellites, University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, 133-136.
- King, M. D., Kaufman, Y. J., Menzel, W. P. and Tanre, D., 1992, Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the

- Wark, D. Q., Hilleary, D., Anderson S. P. and Fischer, J. C., 1970, Nimbus satellite infrared spectrometer experiment. Geoscience Electronics, IEEE Transactions, **8**(4), 264-270.
- "SIRS" observations, Monthly Weather Review, **98**(8), 582-603.
- Wark, D., 1961, On indirect temperature soundings of the stratosphere from satellites, Journal of Geophysical research, **66**(1), 77-82.