



پیشنهاد روشی برای جایگزینی داده‌های تابشی سنجنده MODIS با استفاده از مدل CRTM تصحیح‌شده در مقیاس محلی

مجید رحیم‌زادگان^۱، محمدرضا مباشری*^۲

۱. دانشجوی دکتری سنگش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲. دانشیار گروه سنگش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۰/۲۴

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۱۰

چکیده

در پژوهش حاضر روشی برای جایگزین کردن چگالی‌های شار تصاویر سنجنده MODIS با استفاده از مدل انتقال انرژی مجمع (CRTM) که از مدل‌های حل معادله انتقال انرژی است، ارائه شده است. بدین منظور اندازه‌گیری‌های رادبوساند مربوط به ایستگاه سینوپتیک بندرعباس به همراه چگالی‌های شار اندازه‌گیری شده از تصاویر شب سنجنده MODIS مستقر بر سکوی Aqua برای آب‌های عمیق خلیج فارس مورد استفاده قرار گرفت. بنابراین با استفاده از پیش‌بینی‌کننده‌های استاندارد نسخه هشتم مدل گذردهی مسیر نوری (OPTRAN) که بخش اصلی مدل CRTM است، اختلاف چگالی‌های شار محاسبه شده به وسیله مدل CRTM و اندازه‌گیری شده به وسیله سنجنده MODIS مدل‌سازی شده است. پس از پیاده‌سازی روش مورد نظر، مقدار میانگین RMSE چگالی‌های شار محاسبه شده از مدل CRTM با مقدار اندازه‌گیری شده برای تصاویر سنجنده MODIS منتخب برای آزمون کارایی روش، در تمام باندها $0.47 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$ محاسبه شد که با اعمال تصحیحات ارائه شده در پژوهش حاضر به 0.39 تغییر یافت. مقدار میانگین RMSE دمای درخشندگی میانگین معادل این چگالی‌های شار نیز به ترتیب $6/45$ و $5/27$ درجه کلوین محاسبه گردید. با استفاده از روش ارائه شده در این پژوهش، مقادیر چگالی‌های شار حاصل از مدل CRTM به مقادیر چگالی‌های شار سنجنده MODIS نزدیک تر می‌شود. بنابراین می‌توان از این مدل برای ارزیابی چگالی‌های شار سنجنده MODIS استفاده کرد و در مواردی نظیر وجود نویز بالا یا وجود ابر در تصاویر یا از کارافتادن سنجنده، داده‌های آن را با داده‌های محاسباتی مدل CRTM تصحیح‌شده جایگزین کرد.

کلیدواژه‌ها: پروفایل دما، MODIS، CRTM، ماهواره.

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران، خیابان ولی عصر، تقاطع میرداماد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک، تلفن: ۰۹۱۲۲۲۶۶۳۰

۱- مقدمه

امروزه اندازه‌گیری‌های انجام‌شده از راه دور (سنجش از دور) یا اندازه‌گیری‌های غیرمستقیم برای دستیابی به اهداف متنوعی استفاده می‌شوند (Rodgers, 2000). علت استفاده از اندازه‌گیری از راه دور این است که اندازه‌گیری‌های مستقیم و میدانی معمولاً دشوار و پرهزینه هستند، هرچند تفسیر اغلب این روش‌های اندازه‌گیری مستلزم حل مسائل پیچیده‌ای است که به‌عنوان مسئله معکوس^۱ شناخته می‌شوند. جو نمونه‌ای بارز از موضوعاتی است که کاربرد سنجش از دور در آن مقرون‌به‌صرفه است و از روش‌های معکوس در آن استفاده می‌شود (Rodgers, 2000). روش‌های مفهومی و ریاضی بسیاری برای حل مسائل معکوس در موضوعات به‌کار گرفته شده و بارها به‌طور مستقل با نام‌ها و اصطلاحات متفاوتی شرح و بسط یافته - که یکی از این حوزه‌ها، حوزه سنجش از دور جوی است (Rozanov, 2006).

در اندازه‌گیری انجام‌شده از راه دور، معمولاً کمیت اندازه‌گیری‌شده کم‌وبیش تابعی پیچیده از پارامتری است که واقعاً مورد نیاز است (Rodgers, 2000). ویژگی متمایزکننده این اندازه‌گیری‌ها انجام آنها از راه دور نیست، بلکه روش به‌دست‌آوردن غیرمستقیم آنهاست (Rozanov, 2006). تئوری معکوس^۲ به معکوس کردن توابع پیچیده بدون توجه به اینکه اندازه‌گیری به‌صورت فیزیکی از راه دور انجام شده است، می‌پردازد. نمونه رایج کاربرد این تئوری در اندازه‌گیری‌های جوی این است که کمیت اندازه‌گیری‌شده تابش الکترومغناطیسی دریافت‌شده از جو باشد درحالی‌که کمیت مورد نیاز توزیع دما یا اجزای سازنده جو است.

یکی از ورودی‌های مهم مدل‌های پیش‌بینی هواشناسی و اقلیمی، پروفایل‌های دما و رطوبت است که دقت آنها می‌تواند در مدل‌های پیش‌بینی و پایش، نقش مؤثری داشته باشد. به‌منظور استخراج پروفایل‌های جوی مانند دما و رطوبت، روش‌های مختلفی مطرح شده است که می‌توان آنها را در دو

دسته کلی روش‌های استخراج از طریق رگرسیون‌های آماری و روش‌های فیزیکی دسته‌بندی کرد. روش استخراج رگرسیون‌های آماری دارای مزایای متعددی نظیر سادگی، کارایی محاسباتی و استحکام عددی^۳ هستند، اما ضعف اصلی این روش‌ها در نظرنگرفتن ویژگی‌های فیزیکی معادله انتقال انرژی است (Seemann et al., 2003; Seemann et al., 2006). با این حال پس از محاسبه پروفایل‌های جوی از روش رگرسیون، می‌توان به‌وسیله الگوریتم فیزیکی درون تکرار غیرخطی که بر معادله انتقال انرژی اعمال می‌شود، نتایج را بهبود بخشید (Seemann et al., 2003).

شار انرژی مشاهده‌شده از طریق ماهواره R را می‌توان به‌صورت تابعی غیرخطی از پروفایل دمای جوی (T)، پروفایل رطوبت جوی (q)، دمای پوسته سطح (T_s)، گسیلمندی سطح (ε) و دیگر پارامترهای جوی در نظر گرفت (Borbas et al., 2011):

$$R = R(T, q, T_s, \epsilon, \dots) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که به‌صورت کلی چنین است:

$$Y = F(X) \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن، بردار X شامل دمای جوی در L سطح ارتفاعی جو (پروفایل دما، مقدار نسبت آمیزه بخار آب در L سطح ارتفاعی جو (پروفایل رطوبت))، و شامل دمای سطح و گسیلمندی سطح است. بردار Y شامل N (تعداد باندهای استفاده‌شده) و شار انرژی یا دمای درخشندگی مشاهده‌شده از طریق ماهواره است. رابطه (۲) را می‌توان با استفاده از مشتقات جزئی به‌صورت رابطه (۳) خطی کرد (Rodgers, 2000; Li et al., 2000):

$$\delta Y = F' \delta X \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن، F' مدل خطی یا تانژانت مدل مستقیم F است. F' که به‌عنوان ماتریس وزن‌دهی نیز شناخته

1. Inverse Problems
2. Inverse Theory
3. Numerical stability

انرژی، با کمینه‌سازی تابع هزینه معرفی شده در رابطه (۴)، روشی درون تکرار با استفاده از روش گوس - نیوتون^۴ به کار گرفته می‌شود. در این معادله از مشتق دوم $F(x)$ صرف نظر شده است (Rodgers, 2000; Li et al., 2000).

رابطه (۵)

$$x_{i+1} = x_i + (K_i^T S_y^{-1} K_i + S_a^{-1})^{-1} \times [K_i^T S_y^{-1} (y_m - y_i) - S_a^{-1} (x_i - x_a)]$$

که در آن، i شماره تکرار و K_i ماتریس ژاکوبین یا همان ماتریس تانژانت F' رابطه (۳) است که در x_i برآورد شده است. با به کارگیری روش فوق و تعریف یک معیار توقف می‌توان پروفایل‌های اجزای سازنده جو را محاسبه کرد (Marquardt, 1963).

با توجه به مطالب مطرح شده در این بخش، مهم‌ترین موضوع در استفاده از روش فیزیکی، محاسبه تابع تانژانت یا همان ماتریس ژاکوبین است. در محاسبه ماتریس ژاکوبین باید مشتق معادله انتقال انرژی نسبت به پارامترهای جوی محاسبه شود و مقدار این ماتریس برای وضعیت جوی مطلب محاسبه گردد. روش‌های مختلفی برای حل معادله انتقال انرژی معرفی شده که هر یک به صورت کدها یا برنامه‌های کامپیوتری ارائه شده‌اند (Han et al., 2006). با در نظر گرفتن عواملی چون در دسترس بودن کدها، به روز شدن محاسبات برای باندهای سنجنده MODIS و کد باز بودن^۵ نرم افزار، مدل یا نرم افزار CRTM برای محاسبه ماتریس تانژانت یا ژاکوبین در این پژوهش انتخاب شده است.

۱-۱- مدل CRTM

مدل انتقال انرژی مجتمع^۶ (CRTM) که در مرکز

می‌شود، می‌تواند با استفاده از روش دیفرانسیلی یا روش آشفتنگی^۱، برای اجزای جو - نظیر نسبت آمیزه بخار آب و نسبت آمیزه ازن - محاسبه شود. البته ترجیح این است که یک روش کارآمد و دقیق برای پردازش‌های مربوط به استخراج داده به صورت آنی^۲ به منظور محاسبه توابع وزن دهی تعریف شود. این مدل با به کارگیری یک روش تحلیلی کارآمد محاسبه می‌شود (Li, 1994). در واقع اغلب روش‌های فیزیکی به دنبال یافتن راهی بهینه برای محاسبه F' و استفاده از آن برای دستیابی به پروفایل‌های پارامترهای جوی با دقت بالاتر هستند.

راجرز در سال ۲۰۰۰ بررسی جامعی در مورد برخی روش‌های فیزیکی رایج برای استخراج پروفایل‌های جوی انجام داد (Rodgers, 2000) و نشان داد که در اغلب این روش‌ها می‌توان یک تابع هزینه تعریف کرد و روشی برای کمینه‌سازی آن به کار گرفت. این تابع هزینه می‌تواند غیرخطی باشد و میزان غیرخطی بودن آن به محدوده طیفی اندازه‌گیری، متغیرهای اندازه‌گیری شده و دقت پروفایل حدس اولیه بستگی دارد (Lynch et al., 2009). تابع هزینه مذکور برای حالت‌های غیرخطی کمترین مربعات به شکل رابطه (۴) است (Rodgers, 2000; Li et al., 2000):

رابطه (۴)

$$J(x) = [y_m - F(x)]^T S_y^{-1} [y_m - F(x)] + (x - x_a)^T S_a^{-1} (x - x_a)$$

که در آن y_m بردار اندازه‌گیری (شار دریافتی در سنجنده)، x بردار وضعیت^۳، $F(x)$ مدل مستقیم برای تبدیل بردار وضعیت به اندازه‌گیری و S_y ماتریس خطای اندازه‌گیری، خطای مدل مستقیم و دیگر خطاهای ناشناخته است. S_a و x_a نیز به ترتیب بردار زمین و ماتریس کوواریانس آن هستند که از روش استخراج رگرسیون خطی می‌توان آنها را به دست آورد (Rodgers, 2000; Li et al., 2000).

برای حل معادله انتقال انرژی و به دست آوردن پروفایل‌های جوی از طریق معادلات فیزیکی انتقال

1. Perturbation Method
2. Real-time
3. State vector
4. Gauss-Newton
5. Open source
6. Community Radiative Transfer Model

زمین، اقیانوس، یخ و برف برای محدوده‌های طیف مایکروویو و مادون قرمز در نظر گرفته است. چارچوب نرم‌افزاری CRTM به گونه‌ای طراحی شده است که بین کارایی محاسباتی، نگهداری از کد^۳ و انعطاف‌پذیری برای ارتقا و افزایش‌های آتی توازن برقرار کند. کد منبع در زبان برنامه‌نویسی فورترن ۹۵ و تحت سیستم عاملی لینوکس نوشته شده و مدل‌ها و ساختارهای داده استخراج شده برای دستیابی به این اهداف به‌طور وسیعی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

جزء اصلی مدل CRTM که محاسبات مربوط به گذردهی و تابش جو را محاسبه می‌کند، گذردهی مسیر نوری^۴ (OPTRAN) است. OPTRAN یکی از اجزای اساسی و اصلی مدل CRTM است که برای نخستین بار در سال ۱۹۷۶ مطرح شد (McMillin and Fleming, 1976) و تاکنون پیشرفت‌های بسیاری داشته، به طوری که هشت نسخه ارتقایافته از این مدل ارائه شده است. به دلیل اهمیت این مدل و استفاده از آن در پژوهش حاضر، در بخش پیش‌رو مرور مختصری بر هریک از نسخه‌های این مدل انجام شده و در موارد لازم، برخی از نسخه‌ها تشریح شده‌اند.

۱-۲- مدل OPTRAN

نسخه اولیه این مدل را مک‌میلین و فلمینگ در سال ۱۹۷۶ ارائه کردند (McMillin and Fleming, 1976). مهم‌ترین اصل روش مذکور این بود که در سطح مشخصی از فشار، گذردهی جو برای گازی جذب‌کننده با نسبت آمیزه ثابت فقط با پروفایل دمای جو تغییر می‌کند. در این نسخه مدل گذردهی ساده‌ای با استفاده از اختلاف دما برای تابش تک‌فام ارائه شده و با استفاده از تقریب مقیاس‌گذاری^۵ برای حالت مهم‌تر تابش

مشترک شبیه‌سازی داده ماهواره‌ای^۱ (JCSDA) تهیه شد (Han et al., 2006)، می‌تواند شار تابشی مادون قرمز (IR) و مایکروویو (MW) اندازه‌گیری شده به وسیله سنجنده‌های مستقر در فضاپیما را در وضعیت جوی و سطح زمین مشخص شبیه‌سازی کند. این مدل می‌تواند حساسیت‌های شار، مانند مشتقات چگالی شار (ژاکوبین) را نسبت به متغیرهای وضعیت محاسبه کند. افزون بر این CRTM می‌تواند برای دیگر کاربردهای شار ماهواره‌ای از قبیل معکوس کردن داده چگالی شار برای محاسبه بردار وضعیت - که در آنها به محاسبه سریع و دقیق شار IR و MW نیاز است - به کار رود. علاوه بر این، در مدل مذکور سنجنده‌های مختلفی از جمله سنجنده MODIS پشتیبانی می‌شوند.

یکی از اولویت‌های تحقیقاتی JCSDA، بهبود مدل‌سازی شار ماهواره‌ای است که با استفاده از آن بتوان اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای را در هر شرایط آب‌وهوایی به منظور پیش‌بینی عددی هوا^۲ (NWP) به کار برد. هدف مهم دیگر مدل CRTM، طراحی چارچوبی به منظور ساده‌سازی استفاده از الگوریتم‌های کاربردی برای گروه‌های تحقیقاتی و پژوهشگران و نیز آزمایش و ارزیابی آن در محیط واقعی و در نتیجه تبدیل سریع کارهای پژوهشی به کاربردهای عملی است.

مدل‌های پیشین استفاده‌شده در JCSDA همگی برمبنای شار تابش بودند و در شرایط آسمان صاف امکان استفاده از آنها وجود داشت (Kleepies et al., 2004). همچنین در آنها هیچ جزئی برای محاسبه گسیلمندی و بازتابندگی سطح در نظر گرفته نشده بود. نرم‌افزار مذکور همچنین انعطاف‌پذیری کافی برای افزودن توابع اضافی را به منظور برآورده کردن نیازمندی‌های توسعه‌ای نداشت. مدل CRTM در مقایسه با مدل‌های پیشین در هر دو جنبه نرم‌افزاری و علمی بهبود یافته است. این مدل جذب و پراکنش انواع گوناگون بخار آب و هواویزها را در نظر گرفته است. همچنین در این مدل سری جامع مدل‌های گوناگون برای در نظر گرفتن گسیلمندی و بازتابندگی در سطوح

1. Joint Center for Satellite Data Assimilation
2. Numerical Weather Prediction
3. Code maintenance
4. Optical Path TRANsmittance
5. Scaling Approximations

نسخه‌های قبلی این مدل برای هر لایه جذب‌کننده، یک نسبت گذردهی محاسبه می‌شد که به روش درون‌یابی بسیار حساس بود. در این نسخه از مدل، به جای استفاده از نسبت گذردهی‌ها، ضریب جذب مؤثر با استفاده از رابطه (۶) برآورد می‌شود.

$$k(A) = \sum_{j=1}^N C_{ij} Z_{ij} \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در آن، N تعداد کلی پیش‌بینی‌کننده‌ها، C_{ij} ضریب رگرسیون برای پیش‌بینی‌کننده j در سطح i و Z_{ij} پیش‌بینی‌کننده j در سطح i است. ضریب جذب $k(A)$ به صورت رابطه (۷) با گذردهی τ مرتبط است:

$$k(A) = -\frac{d}{dA} (\ln \tau) \quad \text{رابطه (۷)}$$

مقادیر $k(A)$ در بازه $0 \leq A \leq A_{tot}$ محاسبه می‌شوند که در آن A_{tot} مقدار کلی جذب‌کننده در طول مسیر مورب از ماهواره تا سطح زمین است. با توجه به رابطه (۷) ملاحظه می‌شود که تابع $k(A)$ به‌آهستگی و نرمی در جو تغییر می‌کند و برخلاف نسبت گذردهی‌ها می‌تواند به‌وسیله داده‌هایی که در فواصل نامنظم قرار گرفته‌اند، تقریب زده شود. در این روش می‌توان به‌جای استفاده از تفاضل پروفایل‌های مقادیر دما، رطوبت و ازن از یک پروفایل ثابت، از خود این مقدار در محاسبه پیش‌بینی‌کننده‌ها استفاده کرد. این روش اصلاح‌شده ضمن آنکه ساده‌تر است، آزمایش‌ها نیز نشان می‌دهند که در یک‌دوازدهم زمان روش OPTRAN نسخه قبلی با دقت یکسان اجرا می‌شود (McMillin et al., 1995b).

نسخه ششم این مدل راکلیسپایز و همکاران در سال ۲۰۰۴ ارائه کردند (Kleespies et al., 2004). در این نسخه پیش‌بینی‌کننده‌ها بسط یافته‌اند و روشی عملی برای انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها ایجاد شده است. نسخه مذکور از لحاظ محاسباتی کارآمدتر است و ضرایب رگرسیون از سطوح جذب‌کننده به سطوح فشاری درون‌یابی می‌شود و سپس ضرایب جذب و گذردهی محاسبه می‌شود. سرعت محاسبات این روش

چندفام بسط داده شده است. از آنجاکه این الگوریتم فقط به عملگرهای حسابی نیاز دارد، محاسبه گذردهی‌ها برای پروفایل دمای دلخواه، کاملاً ساده، دقیق و از لحاظ محاسباتی سریع است. اختلاف گذردهی‌های محاسبه‌شده به‌وسیله این الگوریتم با محاسبات روش خط‌به‌خط در حد ۰/۰۰۳۱ (بدون واحد) است (McMillin and Felming, 1976).

نسخه دوم مربوط به این مدل را مک‌میلین و فلمینگ در سال ۱۹۷۷ ارائه کردند (Fleming and McMillin, 1977). بهبود این نسخه درمقایسه با نسخه قبلی، در نظر گرفتن زاویه زینتی در محاسبات مربوط به گذردهی است. گذردهی‌های حاصل از این روش برای زاویه‌های زینتی در بازه ۰ تا ۴۰ درجه، با محاسبات خط‌به‌خط حداکثر تا ۰/۰۳۸ (بدون واحد) اختلاف داشت.

نسخه سوم این مدل را مک‌میلین و همکاران در سال ۱۹۷۹ ارائه کردند (McMillin et al., 1979). در این نسخه، روشی برای محاسبه گذردهی‌های جوی برای گازهای جاذب با نسبت آمیزه متغیر ارائه شد. گذردهی‌های به‌دست‌آمده از این روش با محاسبات خط‌به‌خط RMS اختلافی به‌اندازه ۰/۰۰۱۸ داشت.

نسخه چهارم این مدل که برای نخستین بار با نام گذردهی مسیر نوری (OPTRAN) شناخته شد، در سال ۱۹۹۵ از سوی مک‌میلین و همکاران ارائه شد (McMillin et al., 1995a). ویژگی مهم این نسخه از مدل OPTRAN آن بود که گذردهی به‌جای محاسبه در فشارهای مختلف، به‌صورت تابعی از مقدار جذب‌کننده به‌دست می‌آمد (McMillin et al., 1995a). نتایج به‌دست‌آمده از این روش نشان داد که مدل مذکور می‌تواند گذردهی‌هایی تولید کند که با استفاده از آن در محاسبه دمای درخشندگی، دقتی بیش از ۰/۲ کلون به‌دست آید، که بیش از ۱۰ بار دقیق‌تر از روش‌های معمول در آن زمان بود.

نسخه پنجم این مدل را در سال ۱۹۹۵ مک‌میلین و همکاران ارائه کردند (McMillin et al., 1995b). در

کانولوشن^۵ گذردهی تک‌فام $T(v)$ در تابع پاسخ طیفی کانال مورد نظر $\phi(v)$ تعریف می‌شود.

$$T_{ch} = \int_{\Delta v} T(v)\phi(v)dv \quad \text{رابطه (۸)}$$

این محاسبات اکنون به‌وسیله روش ارائه‌شده در نسخه پنجم این مدل انجام می‌شود (McMillin et al., 1995b). نسخه هشتم مدل OPTRAN که با نام Compact OPTRAN معرفی شده است (این نسخه به دلیل کارایی بالای آن در استفاده از حافظه کامپیوتر به این نام شناخته می‌شود)، ساختارهای قائم پروفایل‌های ژاکوبین را با مقیدکردن تغییرات ضرایب رگرسیون گذردهی بین سطوح قائم مختلف، بهبود بخشید. این مدل را نخستین بار یوشیکیکو تاهارا^۶ در سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۳ مطرح کرد (Chen et al., 2010). این مدل تاکنون به صورت رسمی در مقالات منتشر نشده و توضیحات مربوط به آن در ادامه ارائه شده است.

اگر $T_w(v)$ و $T_o(v)$ به ترتیب گذردهی‌های تک‌فام بخار آب و ازن باشند و $T_d(v)$ گذردهی گاز خشک (که ترکیب تمام گازهای جذب‌کننده به‌جز بخار آب و ازن است) باشد، گذردهی کلی تک‌فام می‌تواند به صورت حاصل ضرب این اجزا بیان شود.

$$T(v) = T_w(v)T_o(v)T_d(v) \quad \text{رابطه (۹)}$$

برای سادگی، i نمایش‌دهنده بخار آب، ازن و گاز خشک و $T_{ch,i}(A_i)$ گذردهی مربوط به یکی از این سه جزء است. A_i نشان‌دهنده مقدار جذب‌کننده از فضا تا یک سطح فشاری مشخص است. بنابراین گذردهی کانال به صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود.

درمقایسه با نسخه قبلی در حد ۱۲ درصد بهبود نشان می‌دهد (Kleespies et al., 2004). از دیگر مزایای این نسخه از مدل OPTRAN درمقایسه با نسخه‌های قبلی، محاسبه ضرایب برای محدوده وسیعی از ماهواره‌ها و سنجنده‌هاست. بزرگ‌ترین پیشرفت ایجادشده در نسخه مذکور، وجود ماتریس k -ژاکوبین^۱ مدل OPTRAN است (Kleespies et al., 2004). همان‌طور که در بخش‌های قبل در مورد استخراج پروفایل‌های آماری از روش‌های فیزیکی بیان شد، محاسبه این ماتریس برای پیاده‌سازی روش‌های فیزیکی اهمیت زیادی دارد و پس از ارائه این نسخه، محاسبه ماتریس ژاکوبین برای ترکیبات سازنده جو ممکن گردید.

نسخه هفتم این مدل در سال ۲۰۰۶ از سوی مک‌میلین و همکاران ارائه شد (McMillin et al., 2006). دو پیشرفت مهم ایجادشده در این نسخه، تغییر فضای جذب‌کننده استفاده‌شده برای از نو اضافه کردن پیش‌بینی‌کننده‌های جدید برای هر گاز است. در این نسخه پیش‌بینی‌کننده‌ها از ۱۵ پیش‌بینی‌کننده به ۱۸ پیش‌بینی‌کننده در هر لایه جو رسیده و از میانگین‌های وزن‌دار استفاده شده است. این نسخه روی داده‌های پروفایل‌گیر تابش مادون قرمز با قدرت تفکیک بالا (HIRS)^۲ و پروفایل‌گیر مادون قرمز جوی (AIRS)^۳ پیاده‌سازی گردید و بهبود دقت بالایی صورت گرفت. نتایج ارائه‌شده در این نسخه بسط‌یافته روشی است که مک‌میلین و چیانگ در سال ۲۰۰۵ ارائه کردند (Xiong and McMillin, 2005) که در آن برای بهبود دقت، از یک جمله تصحیح چندفامی به جای مفهوم گذردهی مؤثر استفاده شده است.

نسخه هشتم مدل OPTRAN را CRTM ارائه کرده است (Han et al., 2006) و اکنون در نرم‌افزار CRTM از آن استفاده می‌شود. مهم‌ترین جزء مدل CRTM، مدل جذب گازی^۴ است که محاسبات اصلی به‌وسیله آن انجام می‌شود. مدل جذب گاز چندفامی در این نسخه با محاسبه گذردهی کانال (باند) از یک لایه جوی به فضای T_{ch} شروع می‌شود و این گذردهی به صورت

1. Jacobian-K-matrix
2. High-Resolution Infrared Radiation Sounders
3. Atmospheric Infrared Sounder
4. Gaseous absorption model
5. Convolution
6. Yoshikiko Tahara

رابطه (۱۳)

$$u_m^{(*)}(A_i) = \frac{i}{A_m^i} \sum_{j=1}^m A_j^{i-1} u_j \Delta A_j \quad i=1,2,3$$

$$T_{ch,i}(A_i) = e^{-\int_0^{A_i} k_{ch,i}(A_i') dA_i'} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

که در آن

رابطه (۱۱)

$$\ln(k_{ch,i}(A_i)) = c_{i,0}(A_i) + \sum_{j=1}^6 c_{i,j}(A_i) x_{i,j}(A_i)$$

در رابطه (۱۱)، $k_{ch,i}(A_i)$ ضریب جذب کانال و $\ln(0)$ لگاریتم طبیعی است. پیش‌بینی‌کننده‌های $x_{i,j}(A_i)$ برای $(j=1, \dots, 6)$ توابعی از متغیرهای وضعیت جوی هستند و $c_{i,0}(A_i)$ و $c_{i,j}(A_i)$ توابع چندجمله‌ای^۱ از A_i به شکل رابطه (۱۲) است.

رابطه (۱۲)

$$c_{i,j}(A_i) = \sum_{n=0}^N a_{i,j,n} \ln(A_i)^n$$

که در آن $a_{i,j,n}$ ضرایب رگرسیون هستند. سری ۶ پیش‌بینی‌کننده استفاده‌شده در رابطه (۱۱) بین کانال‌های مختلف تغییر می‌کند و از میان مجموعه‌ای از ۲۹ پیش‌بینی‌کننده که در جدول ۱ ارائه شده‌اند، انتخاب می‌شود. در جدول ۱، T نشان‌دهنده دما، P نشان‌دهنده فشار و Q نشان‌دهنده نسبت آمیزه بخار آب است. مجموعه پیش‌بینی‌کننده‌ها شامل ۱۱ پیش‌بینی‌کننده استاندارد است، که مختص هیچ‌یک از سه جزء پیش‌بینی‌کننده نیست و ۱۸ پیش‌بینی‌کننده یکپارچه^۲ را شامل می‌شود، که به سه زیرمجموعه که هر یک متعلق به یک جزء گذردهی خاص است، تقسیم می‌شود. اگر u نشان‌دهنده فشار جوی P یا دمای T باشد، پیش‌بینی‌کننده‌های یکپارچه برای جزء m به شکل رابطه (۱۳) بیان می‌شوند.

ضرایب گذردهی $a_{i,j,n}$ در رابطه (۱۲) از طریق فرایند پردازش با استفاده از مجموعه داده آماری، که در آن پیش‌بینی‌کننده و پیش‌بینی‌شونده از مجموعه‌ای پروفایل جوی متنوع محاسبه شده‌اند، به دست می‌آید. لازم به توضیح است که برای جزء گاز خشک، پروفایل نسبت آمیزه بین وضعیت‌های جوی مختلف تغییر نمی‌کند (McMillin et al., 2006; Han et al., 2006). استفاده از توابع چندجمله‌ای در رابطه (۱۲) برای ضرایب رگرسیون رابطه (۱۱) یکی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد Compact OPTRAN است. این مورد می‌تواند به‌عنوان استفاده از توابع چندجمله‌ای برای مقید کردن شکل ضرایب پروفایل‌های قائم در نظر گرفته شود. در نتیجه از ساختارهای دندان‌دندانه غیرواقعی پروفایل‌های ژاکوبین که ممکن است در الگوریتم‌های گذردهی سریع بدون قید - به‌خصوص برای کانال‌های با باند جذب گازی ضعیف اتفاق بیفتند - پرهیز می‌شود. مزیت دیگر این الگوریتم، به‌ویژه برای سنجنده‌های ابرطیفی، تعداد کم ضرایب رگرسیون لازم برای محاسبه پروفایل گذردهی مربوط به یک کانال و جزء گاز مشخص است. در مقایسه با نسخه‌های قبلی، که به سری متفاوتی از ضرایب برای هر سطح پروفایل نیاز دارند، compact OPTRAN فقط تعداد کمی از ضرایب مورد استفاده در این الگوریتم‌ها را به‌کار می‌گیرد، که موجب صرفه‌جویی زیادی در حافظه استفاده‌شده کامپیوتر می‌شود.

1. Polynomial
2. Integrated Predictors

جدول ۱. پیش‌بینی‌کننده‌های استاندارد و یکپارچه

پیش‌بینی‌کننده‌های استاندارد				پیش‌بینی‌کننده‌های یکپارچه					
۱	T	۷	TP ²	۱	T _w [*]	۷	T _o [*]	۱۳	T _d [*]
۲	P	۸	T ² P ²	۲	T _w ^{**}	۸	T _o ^{**}	۱۴	T _d ^{**}
۳	T ²	۹	\sqrt{P}	۳	T _w ^{***}	۹	T _o ^{***}	۱۵	T _d ^{***}
۴	P ²	۱۰	Q	۴	P _w [*]	۱۰	P _o [*]	۱۶	P _d [*]
۵	TP	۱۱	Q / T ²	۵	P _w ^{**}	۱۱	P _o ^{**}	۱۷	P _d ^{**}
۶	T ² P			۶	P _w ^{***}	۱۲	P _o ^{***}	۱۸	P _d ^{***}

پوشش جهانی تقریباً روزانه MODIS، آن را قادر به مشاهده جو زمین و پایش پیوسته تغییرات آن از جمله ساختار دمایی و رطوبت جو کرده است. هدف از استخراج بخار آب جو و توزیع دما به وسیله MODIS این است که دانش ما را در مورد نقشی که انرژی و فرایندهای چرخه آب در تعیین آب‌وهوا و اقلیم زمین ایفا می‌کنند، افزایش دهد (Seemann et al., 2006). مزایای عمده MODIS که آن را برای استخراج توزیع دما و رطوبت جو مناسب می‌سازد، اینها هستند:

۱. دارا بودن ترکیبی از باندهای طیفی مادون قرمز موج کوتاه و موج بلند (۰/۴۰۵ تا ۱۴/۳۸۵ μm) مناسب برای پروفایل‌گیری؛ و
۲. دارا بودن قدرت تفکیک مکانی بالا (۱ km در پاسو) مناسب برای کاربردهای هواشناسی (Seemann et al., 2003).

1. Monitoring
2. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
3. Earth Observing System
4. National Aeronautics and Space Administration
5. Scanning
6. Visible
7. Near-infrared
8. Thermal InfraRed

۱-۳- ویژگی‌ها و کاربردهای جوی سنجنده

MODIS

مدل‌های اقلیمی و آب‌وهوایی نیازمند پایش دقیق رطوبت و دمای جو و نیز ردیابی گازها و هواویزها هستند (Seemann et al., 2006). پایش پیوسته تغییرات پارامترها در مقیاس جهانی با استفاده از امکانات موجود در سال‌های گذشته دشوار بود. اسپکترورادئومتر تصویربردار با قدرت تفکیک متوسط MODIS^۲ فرصت جدیدی را برای بهبود پایش جهانی دما، رطوبت و ازن و تغییرات آنها فراهم کرد (King et al., 1992). MODIS به وسیله سامانه مشاهده زمین EOS^۳ متعلق به سازمان ملی هوانوردی و فضایی آمریکا^۴ (NASA) مستقر بر سکوه‌های Terra و Aqua به ترتیب در ۱۸ دسامبر ۱۹۹۹ و ۴ می ۲۰۰۲ به فضا فرستاده شد. این دستگاه یک اسپکترورادئومتر پوششگر^۵ با ۳۶ باند طیفی در محدوده‌های مرئی^۶ (VIS)، مادون قرمز نزدیک^۷ (NIR) تا مادون قرمز حرارتی^۸ (TIR) بین ۰/۴۰۵ و ۱۴/۳۸۵ μm است (King et al., 1992). لیست باندهای مادون قرمز MODIS استفاده‌شده در این پژوهش به همراه کاربردهای رایج هر یک از آنها در جدول ۲ ارائه شده است.

محدوده طیفی وسیع، قدرت تفکیک مکانی بالا، و

جدول ۲. فهرست باندهای طیفی مادون قرمز MODIS برای محاسبهٔ پروفایل‌های دما و رطوبت جوی

کاربرد جوی اصلی	باند	پهنای باند
پروفایل دما	۲۵	۴/۴۸۲-۴/۵۴۹
	۲۷	۶/۵۳۵-۶/۸۹۵
	۲۸	۷/۱۷۵-۷/۴۷۵
پروفایل رطوبت	۲۹	۸/۴۰۰-۸/۷۰۰
	۳۳	۱۳/۱۸۵-۱۳/۴۸۵
	۳۴	۱۳/۴۸۵-۱۳/۷۸۵
	۳۵	۱۳/۷۸۵-۱۴/۰۸۵
پروفایل دما	۳۶	۱۴/۰۸۵-۱۴/۳۸۵

مادون قرمز Cross-Track^۴ (CrIS) مربوط به سامانه ملی ماهواره‌ای محیطی با مدار قطبی^۵ (NPOESS)، اطلاعات بیشتری دربارهٔ توزیع قائم دما و رطوبت جو فراهم می‌کند (Borbas et al., 2011).

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- داده و منطقه مورد مطالعه

در پیاده‌سازی‌های انجام‌شده در پژوهش حاضر، برای انجام مدل‌سازی و ارزیابی کارایی مدل، ایستگاه سینوپتیک بندرعباس که در آنها داده‌های رادیوساند در ساعت 00z به صورت نسبتاً مرتب جمع‌آوری می‌شود، انتخاب گردید. شناسهٔ این ایستگاه در سطح جهانی OIKB و شمارهٔ ایستگاه ۴۰۸۷۵ است. موقعیت این ایستگاه در یک تصویر MODIS به همراه نمایی از تصویر با قدرت تفکیک مکانی بالا مربوط به این منطقه در شکل ۱ نشان داده شده است. این ایستگاه که در موقعیت جغرافیایی ۲۱° ۵۶' شرقی و ۱۲° ۲۷' شمالی

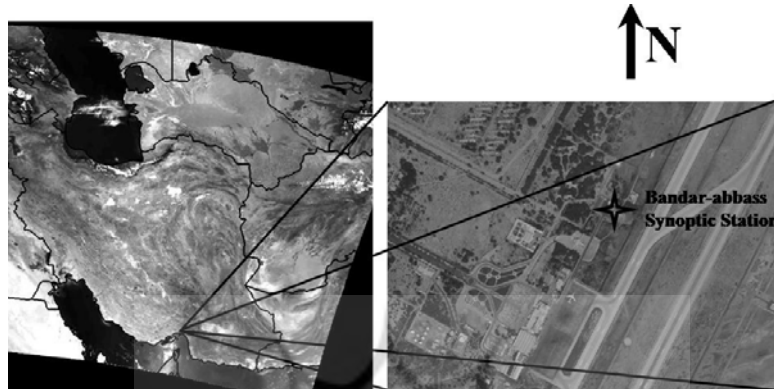
محصولات دما و رطوبت MODIS می‌توانند در کنار دیگر اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای و زمینی در مدل‌های پیش‌بینی هواشناسی عددی، در نواحی‌ای که مشاهدات هواشناسی متداول کم هستند، استفاده شوند. تعیین و ارزیابی محصولات زمینی، اقیانوسی و جوی مختلف، مانند دمای سطح دریا، دمای سطح زمین و خواص هواویزهای اقیانوسی، نیازمند پروفایل‌های دما و رطوبت و نیز ازن کلی در قدرت تفکیک مکانی MODIS به‌عنوان ورودی کمکی در مدل‌های عددی است.

قدرت تفکیک مکانی ارتقایافتهٔ MODIS، اندازه‌گیری‌های گرادیان‌های افقی رطوبت، دما و ازن کلی جو را بهتر از سنجنده‌های مشابه آن مانند پروفایل‌گیر ماهوارهٔ محیطی عملیاتی زمین‌آهنگ^۱ (GOES) (قدرت تفکیک مکانی ۱۰ کیلومتر برای استخراج‌های مربوط به یک محدودهٔ دید (FOV)، دستگاه پروفایل‌گیر مایکروویو پیشرفته^۲ (AMSU) با قدرت تفکیک ۴۵ کیلومتر، پروفایل‌گیر چگالی شار تابش مادون قرمز با قدرت تفکیک بالا^۳ (HIRS) با قدرت تفکیک ۱۹ کیلومتر و پروفایل‌گیر مادون قرمز جوی^۳ (AIRS) با قدرت تفکیک ۱۵km مشخص می‌کند (Seemann et al., 2003; Seemann et al., 2006; King et al., 1992). البته پروفایل‌گیرهای با قدرت تفکیک طیفی بالاتر مانند AIRS و پروفایل‌گیر

1. Geostationary Operational Environmental Satellite
2. High-Resolution Infrared Radiation Sounder
3. Atmospheric Infrared Sounder
4. Cross-Track Infrared Sounder
5. National Polar-Orbiting Environmental Satellite System

گرفته شد. از این ۱۳ تصویر، ۷ تصویر برای ساخت مدل و ۶ تصویر برای ارزیابی و آزمون کارایی مدل به کار گرفته شد. تاریخ و زمان دریافت هر یک از تصاویر استفاده شده در این پژوهش، در جدول ۳ ارائه شده است.

و در ارتفاع ۱۰ متری از سطح دریا قرار دارد، در سواحل خلیج فارس و در مجاورت تنگه هرمز قرار گرفته است. در این پژوهش ۱۳ تصویر Level1 سنجنده MODIS مستقر بر سکوی Aqua در فرمت HDF که از سایت سنجنده MODIS دریافت شده است، به کار



شکل ۱. سمت چپ: موقعیت شهر بندرعباس در تصویر باند ۱ سنجنده MODIS مستقر بر سکوی Terra در تاریخ ۲۰۰۷/۰۶/۱۵؛ سمت راست: موقعیت این ایستگاه در تصویر گوگل ارث

جدول ۳. تصاویر سنجنده MODIS استفاده شده در این پژوهش به منظور ایجاد و آزمون کارایی مدل

تاریخ اخذ	ساعت اخذ (UTM)
30 May 2010	21:35
3 June 2010	22:50
7 June 2010	22:25
تصاویر استفاده شده برای	
16 June 2010	22:20
ایجاد مدل	
22 August 2010	22:50
25 August 2010	21:40
27 August 2010	21:30
31 May 2010	22:20
4 June 2010	21:55
تصاویر استفاده شده برای	
11 June 2010	22:00
آزمون کارایی مدل	
21 August 2010	22:05
23 August 2010	21:55
26 August 2010	22:25

۲-۲- روش پژوهش

هدف پژوهش حاضر ارائه روشی برای جایگزین کردن تصاویر MODIS با استفاده از محاسبات انجام‌شده به‌وسیله مدل CRTM است. ورودی این مدل، پروفایل‌های دما و رطوبت اندازه‌گیری‌شده به‌وسیله ایستگاه‌های رادیوساند است و یکی از خروجی‌های آن که در تحقیق حاضر مورد نظر است، چگالی شار^۱ طیفی باندهای MODIS برحسب $W / (m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$ است. به‌دلیل اینکه سنجنده MODIS بر سکوی Terra و Aqua مستقر است و به ترتیب حدود ۱۳ و ۱۰ سال در حال تصویربرداری است، امکان از کارافتادن این سنجنده یا مخدوش شدن اطلاعات آن وجود دارد. بنابراین می‌توان جایگزینی برای اطلاعات از دست‌رفته آن با استفاده از روش‌های فیزیکی ارائه کرد و روش پیشنهادی در این پژوهش یکی از آنهاست. در این پژوهش چگالی شار محاسبه‌شده به‌وسیله مدل CRTM برای سنجنده MODIS، با استفاده از پروفایل‌های دما و رطوبت اندازه‌گیری‌شده به‌وسیله رادیوساند در آب‌های عمیق خلیج فارس تصحیح شده است تا چگالی شار مذکور تا حد ممکن به اندازه‌گیری‌های سنجنده MODIS نزدیک‌تر شود. با استفاده از چگالی شار تصحیح‌شده برای مدل CRTM و در صورت دستیابی به دقت مناسب در مقایسه با شارهای محاسبه‌شده به‌وسیله سنجنده MODIS، در برخی از باندها می‌توان چگالی شار اندازه‌گیری‌شده با سنجنده MODIS را ارزیابی کرد و وجود خطای نامتعارف در آن به‌دلیل نویزهای دستگاهی یا وجود ابر در تصاویر را تشخیص داد. در صورت نیاز می‌توان حتی این چگالی شارها را با چگالی شارهای محاسبه‌شده به‌وسیله مدل CRTM جایگزین کرد.

برای به‌دست‌آوردن پروفایل‌های دما و رطوبت، از اندازه‌گیری‌های رادیوساند ایستگاه هواشناسی سینوپتیک بندرعباس استفاده شد و فرض شد که این داده‌ها تقریب مناسبی از داده‌های مربوط به آب‌های عمیق خلیج فارس نزدیک به بندرعباس را در اختیار

می‌گذارند. برای اجتناب از خطاهای ایجادشده به‌دلیل آثار گسیلمندی سطح و پیکسل‌های مختلط و نیز برآورد دقیق از پارامترهای اندازه‌گیری‌شده با سنجنده MODIS، اندازه‌گیری انجام‌شده در قسمت عمیق دریا که تا حد ممکن به ساحل نزدیک هستند، به‌عنوان اندازه‌گیری شار به‌کار گرفته شدند. به‌دلیل آنکه اندازه‌گیری دمای سطح آب به‌وسیله سنجنده MODIS در بدترین حالت در حد 0.5 درجه کلوین است (Brown et al., 1999)، اندازه‌گیری انجام‌شده با سنجنده MODIS در آب‌های عمیق خلیج فارس به‌عنوان مرجع اندازه‌گیری‌ها در نظر گرفته شد.

برای آنکه تصاویر انتخاب‌شده از لحاظ زمانی به‌اندازه‌گیری‌های رادیوساند ایستگاه هواشناسی بندرعباس نزدیک باشند، از تصاویر Aqua مربوط به شب استفاده شد. بدین منظور اختلافات چگالی شارهای محاسبه‌شده به‌وسیله مدل CRTM با مقادیر اندازه‌گیری‌شده به‌وسیله سنجنده MODIS مدل‌سازی گردید. از آنجاکه مدل CRTM به‌صورت جهانی مدل‌سازی شده است، کارایی محلی آن چندان مناسب نیست و با استفاده از روش‌های گوناگون می‌توان نتایج حاصل از این مدل را به مقدار واقعی نزدیک‌تر کرد. در پژوهش حاضر با ایده‌گرفتن از مدل‌سازی انجام‌شده در مدل CRTM برای محاسبه ضرایب جذب و گذردهی و با بهره‌گیری از پیش‌بینی‌کننده‌های استاندارد استفاده‌شده به‌وسیله این مدل، کوشش شده است تا نتایج حاصل از مدل CRTM بهبود یابند.

مراحل پیاده‌سازی روش تصحیح چگالی شارهای محاسبه‌شده به‌وسیله مدل CRTM برای سنجنده MODIS در آب‌های عمیق در ادامه ذکر شده است.

مرحله ۱. داده‌های رادیوساند (شامل پروفایل‌های دما و رطوبت جوی) مربوط به تاریخ‌های گذر تصاویر انتخاب‌شده برای مدل‌سازی و صحت‌سنجی مدل تهیه گردید و برای لحظه گذر ماهواره درون‌یابی شد. این داده‌ها به‌عنوان ورودی به مدل CRTM وارد شدند و با

پیش‌بینی‌کننده‌های استاندارد مربوط به مدل CRTM هستند. با استفاده از ۱۱ پیش‌بینی‌کننده استاندارد به کاررفته در مدل CRTM، خطای محاسباتی این مدل در مقایسه با اندازه‌گیری‌های MODIS مدل‌سازی شد. این معادله به صورت ماتریسی به شکل رابطه (۱۵) بازنویسی شد.

رابطه (۱۵)

$$\Delta T = CX$$

و برای به دست آوردن ضرایب از روش کمترین مربعات از رابطه (۱۶) استفاده شد.

$$C = \Delta T X^T (X X^T)^{-1} \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

به این ترتیب بردار C و در نتیجه ضرایب c_0 تا c_{11} محاسبه شدند.

مرحله ۵. مدل ارائه شده برای داده‌های در نظر گرفته شده به منظور ارزیابی کارایی مدل، اجرا گردید. در این مرحله با استفاده از اندازه‌گیری‌های رادیوساند در نظر گرفته شده برای آزمون کارایی مدل، پیش‌بینی‌کننده‌های استاندارد برآورد شدند و با بهره‌گیری از رابطه (۱۷)، با افزودن جمله سمت راست معادله مذکور به مقادیر T_{CRTM} که مقادیر محاسباتی به وسیله مدل CRTM بود، چگالی شار تصحیح شده مدل CRTM برای سنجنده MODIS که با $T_{Corrected}$ نمایش داده شده است، محاسبه شد.

رابطه (۱۷)

$$T_{Corrected} = T_{CRTM} + \left[c_0 + \sum_{i=1}^{11} c_i x_i \right]$$

به این ترتیب چگالی شار جدیدی به دست آمد که انتظار می‌رود نسبت به مقادیر محاسباتی به وسیله مدل CRTM به اندازه‌گیری‌های MODIS نزدیک‌تر باشند.

۳- نتایج

به منظور ارزیابی روش ارائه شده در این پژوهش، مقادیر RMSE بین چگالی شار محاسبه شده به وسیله مدل

استفاده از این مدل، چگالی شار مربوط به سنجنده MODIS برای سکوی Aqua محاسبه گردید.

مرحله ۲. از ایده مطرح شده در مدل CRTM برای محاسبه ضرایب جذب و گذردهی استفاده شد و پیش‌بینی‌کننده‌های استاندارد به کاررفته در آن مطابق با جدول ۱، برای داده‌های رادیوساند منتخب به منظور مدل‌سازی و آزمون کارایی مدل محاسبه شدند. محاسبات انجام شده در این مرحله به وسیله برنامه‌نویسی در محیط MATLAB انجام شد و پیش‌بینی‌کننده‌های استاندارد مورد استفاده در مدل CRTM محاسبه گردیدند.

مرحله ۳. تصحیحات رادیومتریک و هندسی روی تصاویر منتخب برای مدل‌سازی و آزمون کارایی مدل انجام گردید. تست ابر روی تصاویر پیاده‌سازی شد و پیکسل‌های مربوط به آسمان صاف استخراج گردید. چگالی شارهای سنجنده MODIS، مربوط به آب‌های عمیق خلیج فارس در نزدیک‌ترین فاصله ممکن به ایستگاه سینوپتیک بندرعباس در پیکسل‌های بدون ابر در تصاویر انتخاب شده برای آموزش و آزمون کارایی الگوریتم، محاسبه گردید. سپس تفاضل مقدار چگالی شار محاسبه شده از سنجنده MODIS برای تصاویر انتخاب شده برای مدل‌سازی و چگالی شار به دست آمده از مدل CRTM برای اندازه‌گیری‌های رادیوساند مربوط به همین تصاویر محاسبه شد.

مرحله ۴. با ایده گرفتن از روش ارائه شده در مدل CRTM برای محاسبه ضرایب جذب و گذردهی و با در نظر گرفتن پیش‌بینی‌کننده‌های استاندارد برای این مدل، رابطه (۱۴) در نظر گرفته شد.

رابطه (۱۴)

$$T_{CRTM} - T_{MODIS} = c_0 + \sum_{i=1}^{11} c_i x_i$$

که در آن T نشان‌دهنده دمای درخشندگی^۱، اندیس CRTM به معنی محاسبه شده به وسیله CRTM و اندیس MODIS به معنی اندازه‌گیری شده به وسیله MODIS است. مقادیر C_i ضرایب مجهول و مقادیر x_i

1. Brightness Temperature

پیشنهاد روشی برای جایگزینی داده‌های تابشی سنجنده MODIS با استفاده از مدل CRTM تصحیح‌شده در مقیاس محلی

می‌توان در بهترین حالت در محاسبه دمای درخشندگی مربوط به باند ۳۶ سنجنده MODIS، به دقتی در حد ۲/۸۱ کلوین درمقایسه با داده MODIS رسید. این درحالی است که برای مدل CRTM این وضعیت در باند ۲۹ و RMSE برابر با ۳/۹۸ به دست آمده است. از آنجاکه MODIS در سطح دریا دارای دقتی در حد ۰/۵ درجه کلوین در مقایسه با واقعیت سطحی است، می‌توان مقادیر اندازه‌گیری‌شده به وسیله سنجنده MODIS را با دقتی مناسب معادل اندازه‌گیری سطحی در نظر گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده در این بخش، میانگین RMSE چگالی شار برای مدل CRTM در حد ۰/۴۷ (W / m².μm.sr) بود که پس از اصلاح مدل به ۰/۳۹ ارتقا یافت. در اینجا تبدیل شده مقادیر مذکور به دمای درخشندگی، اعداد ۶/۴۵ و ۵/۲۷ درجه کلوین را نشان می‌داد که حکایت از بهبود تقریباً مناسبی داشت. بنابراین می‌توان ادعا کرد که دمای درخشندگی تصحیح‌شده به وسیله مدل پیشنهادی در این پژوهش در مقایسه با واقعیت زمینی، دارای دقت مناسبی است.

CRTM و چگالی شار حاصل از سنجنده MODIS برای تصاویر شب دریافت شده از سکوی Aqua و در تاریخ‌های در نظر گرفته شده، به منظور آزمون کارایی مدل برای باندهای حساس به ساختارهای دما و رطوبت جو محاسبه شد. مقادیر RMSE محاسبه شده بین دمای درخشندگی تصحیح‌شده با روش ارائه شده در این پژوهش، در مقایسه با چگالی شار حاصل از سنجنده MODIS برای باندهای مذکور محاسبه گردید (جدول ۴).

مقادیر مربوط به RMSE چگالی شار به دمای درخشندگی معادل آنها تبدیل شد، که نتایج آن در جدول ۵ آمده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴، ملاحظه می‌شود که بهترین مقدار RMSE به دست آمده برای چگالی شار مربوط به باند ۲۵ و برابر ۰/۱۷ بود که با بهره‌گیری از روش پیشنهادی پژوهش حاضر، این مقدار به ۰/۱۱ ارتقا یافت. در جدول ۵، مقادیر چگالی شار ارائه شده در جدول ۴ به دمای درخشندگی تبدیل شده است که با استفاده از مدل CRTM تصحیح‌شده

جدول ۴. RMSE بین چگالی شار محاسبه شده به وسیله CRTM و مقادیر اصلاح شده برای این مدل درمقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده با سنجنده MODIS مستقر بر سکوی Aqua برای باندهای طیفی حساس به پروفایل‌های دما و رطوبت جو برحسب (W / (m².μm.sr))

میانگین	۳۶	۳۵	۳۴	۳۳	۲۹	۲۸	۲۷	۲۵	شماره باند MODIS
۰/۴۷	۰/۳۱	۰/۳۲	۰/۳۹	۰/۴۶	۰/۶۸	۰/۸۷	۰/۵۴	۰/۱۷	RMSE چگالی شار مدل CRTM
۰/۳۹	۰/۱۴	۰/۲۶	۰/۳۵	۰/۴۱	۰/۵۸	۰/۸۱	۰/۴۹	۰/۱۱	RMSE چگالی شار مدل CRTM اصلاح شده

جدول ۵. RMSE بین دمای درخشندگی محاسبه شده با CRTM و مقادیر اصلاح شده برای این مدل درمقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده با سنجنده MODIS مستقر بر سکوی Aqua برای باندهای طیفی حساس به پروفایل‌های دما و رطوبت جو برحسب درجه کلوین

میانگین	۳۶	۳۵	۳۴	۳۳	۲۹	۲۸	۲۷	۲۵	شماره باند MODIS
۶/۴۵	۶/۰۲	۵/۱۷	۵/۶۱	۵/۷۳	۳/۹۸	۸/۸۷	۸/۸۹	۷/۳۰	RMSE دمای درخشندگی مدل CRTM
۵/۲۷	۲/۸۱	۴/۳۰	۵/۱۸	۵/۱۱	۳/۴۷	۸/۲۴	۸/۰۹	۴/۹۴	RMSE دمای درخشندگی مدل CRTM اصلاح شده

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، روشی برای جایگزین کردن چگالی شار حاصل از تصاویر سنجنده MODIS با استفاده از مدل CRTM که یکی از مدل‌های حل معادله انتقال انرژی است، ارائه شد. برای دستیابی به این هدف، چگالی شار محاسبه‌شده با مدل CRTM در مقیاس محلی برای سنجنده MODIS تصحیح گردید. هسته اصلی این مدل، مدل OPTRAN است که از سال ۱۹۷۶ تاکنون هشت نسخه از آن ارائه شده و در هر نسخه بهبودهایی در مقایسه با نسخه‌های قبلی ایجاد شده است. نسخه نهایی این مدل هنوز به صورت مقاله رسمی منتشر نشده ولی پیاده‌سازی‌های مربوط به مدل، در کدهای ذی‌ربط اعمال شده است. به دلیل آنکه ضرایب مربوط به مدل OPTRAN با استفاده از داده‌های جهانی محاسبه شده است، این ضرایب کارایی لازم را در کشور ما ندارند و نیاز است نتایج این مدل برای کشور ما تصحیح شوند. بنابراین پژوهش حاضر به دنبال تحقق این هدف بوده است.

داده‌های مورد استفاده، اندازه‌گیری‌های رادیوساند انجام‌شده در ایستگاه سینوپتیک بندرعباس به همراه چگالی شارهای محاسبه‌شده از سنجنده MODIS برای آب‌های عمیق خلیج فارس بودند. استفاده از مشاهدات سنجنده MODIS در آب‌های عمیق به دلیل اجتناب از تأثیرات ناخواسته مربوط به گسیلمندی و پیکسل‌های مختلط و نیز برآورد دقیق پارامترهای اندازه‌گیری‌شده با سنجنده MODIS بود. در روش پیشنهادی پژوهش حاضر برای نزدیک‌بودن زمان دریافت تصاویر MODIS به اندازه‌گیری‌های رادیوساند، از تصاویر شب مربوط به سنجنده Aqua استفاده شد و با استفاده از ۱۱ پیش‌بینی‌کننده استاندارد نسخه هشتم مدل OPTRAN، سعی در مدل‌سازی اختلاف چگالی شار محاسبه‌شده به وسیله مدل CRTM و اندازه‌گیری‌شده با سنجنده MODIS گردید. بنابراین پیش‌بینی‌کننده‌های استاندارد مدل OPTRAN مربوط به نسخه مذکور محاسبه گردید و با استفاده از ۶ تصویر MODIS مربوط

به سکوی Aqua که برای ایجاد مدل انتخاب شده بودند و با استفاده از روش کمترین مربعات، ضرایب مربوط به تبدیل این پیش‌بینی‌کننده‌های استاندارد به اختلاف چگالی شار CRTM و MODIS محاسبه شد. سپس این ضرایب، بر پیش‌بینی‌کننده‌های محاسبه‌شده روی تصاویر انتخاب‌شده برای ارزیابی کارایی مدل اعمال گردید و خروجی مدل با اندازه‌گیری‌های چگالی شار MODIS مقایسه شد.

با توجه به نتایج به دست آمده، ملاحظه می‌شود که مقدار میانگین RMSE چگالی شار محاسبه‌شده از مدل CRTM با مقدار اندازه‌گیری‌شده با سنجنده MODIS مستقر بر سکوی Aqua برای تصاویر انتخاب‌شده برای آزمون کارایی روش پیشنهادی این پژوهش، در تمام باندها $(0.47 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{mm} \cdot \text{sr}))$ بود که با اعمال تصحیحات ارائه‌شده در این پژوهش این مقدار به 0.39 تغییر یافت. دمای درخشندگی میانگین معادل این چگالی شارها نیز به ترتیب $6/45$ و $5/27$ درجه کلوین محاسبه گردید. بنابراین به نظر می‌رسد با استفاده از روش ارائه‌شده در پژوهش حاضر مقادیر چگالی شار حاصل از مدل CRTM به مقدار چگالی شار اندازه‌گیری‌شده با سنجنده MODIS نزدیک‌تر می‌شود که این مورد می‌تواند به دلیل محاسبه ضرایب مربوط به مدل CRTM به صورت جهانی باشد. بنابراین با استفاده از این روش می‌توان چگالی شار و در نتیجه دمای درخشندگی را با دقت بیشتری محاسبه کرد. همچنین می‌توان از این مدل برای ارزیابی چگالی شار محاسبه‌شده به وسیله سنجنده MODIS استفاده کرد و در صورت لزوم در مواردی نظیر زمانی که داده‌های MODIS دارای نویز بالایی هستند یا تصویر ابری است، یا به دلیل مدت زمان طولانی کار سنجنده MODIS و امکان از کارافتادگی آن، می‌توان داده‌های این سنجنده را با داده‌های محاسباتی مدل تصحیح‌شده CRTM جایگزین کرد. بروز برخی از عدم قطعیت‌های موجود در این مدل می‌تواند به دلیل نبود اندازه‌گیری‌های مستقیم رادیوساند در آب‌های عمیق و استفاده از داده‌های

پیشنهاد روشی برای جایگزینی داده‌های تابشی سنجنده MODIS با استفاده از مدل CRTM تصحیح شده در مقیاس محلی

Atmospheric Administration, National Environmental Satellite, Data, and Information Service.

بندرعباس برای مناطق آبی عمیق باشد. خطای ذاتی موجود در داده‌های رادیوساند و اندازه‌گیری‌های MODIS از دیگر منابع عدم قطعیت موجود در این پژوهش است.

King, M.D., Y.J. Kaufman, W.P. Menzel and D. Tanre, 1992, **Remote Sensing of Cloud, Aerosol, and Water Vapor Properties From the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS)**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30(1), PP. 2-27.

Kleespies, T.J., P. van Delst, L.M. McMillin and J. Derber, 2004, **Atmospheric Transmittance of an Absorbing Gas. 6. OPTRAN Status Report and Introduction to the NESDIS/NCEP Community Radiative Transfer Model**, Applied optics 43(15), PP. 3103-3109.

Li, J., 1994, **Temperature and Water Vapor Weighting Functions From Radiative Transfer Equation with Surface Emissivity and Solar Reflectivity**, Advances in Atmospheric Sciences, 11(4), PP. 421-426.

Li, J., W.W. Wolf, W.P. Menzel, W. Zhang, H.L. Huang and T.H. Achtor, 2000, **Global Soundings of the Atmosphere from ATOVS Measurements: The algorithm and validation**, Journal of Applied Meteorology, 39(8), PP. 1248-1268.

Lynch, R., J.L. Moncet and X. Liu, 2009, **Efficient Nonlinear Inversion for Atmospheric Sounding and Other Applications**, Applied optics 48(10), PP. 1790-1796.

۵- منابع
Borbas, E.E., S.W. Seemann, A. Kern, L. Moy, J. Li, L.E. Gumley and W.P. Menzel, 2011, **MODIS Atmospheric Profile Retrieval Algorithm Theoretical Basis Document (version 7)**, University of Wisconsin-Madison.

Brown, O.B., P.J. Minnett, R. Evans, E. Kearns, K. Kilpatrick, A. Kumar, R. Sikorski and A. Závody, 1999, **MODIS Infrared Sea Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document Version 2.0**, University of Miami, NAS5-31361.

Chen, Y., Y. Han, P. Van Delst and F. Weng, 2010, **On Water Vapor Jacobian in Fast Radiative Transfer Model**, Journal of Geophysical research 115(D12): D12303.

Fleming, H.E. and L.M. McMillin, 1977, **Atmospheric Transmittance of an Absorbing Gas. 2: A Computationally Fast and Accurate Transmittance Model for Slant Paths at Different Zenith Angles**, Applied optics, 16(5), PP. 1366-1370.

Han, Y., P. van Delst, Q. Liu, F. Weng, B. Yan, R. Treadon and J. Derber, 2006, **JCSDA Community Radiative Transfer Model (CRTM): Version 1**, US Dept. of Commerce, National Oceanic and

- Marquardt, D.W., 1963, **An Algorithm for Least-squares Estimation of Nonlinear parameters**, Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics, 11(2): 4, PP. 441-31.
- McMillin, L., L. Crone, M. Goldberg and T. Kleespies, 1995a, **Atmospheric Transmittance of an Absorbing gas. 4. OPTRAN: a computationally fast and accurate transmittance model for absorbing gases with fixed and with variable mixing ratios at variable viewing angles**, Applied optics, 34(27), PP. 6269-6274.
- McMillin, L., L. Crone and T. Kleespies, 1995b, **Atmospheric Transmittance of an Absorbing Gas. 5. Improvements to the OPTRAN Approach**, Applied optics 34(36), PP. 8396-8399.
- McMillin, L.M. and H.E. Fleming, 1976, **Atmospheric Transmittance of an Absorbing Gas: A Computationally Fast and Accurate Transmittance Model for Absorbing Gases with Constant Mixin Ratios in Inhomogeneous Atmospheres**, Applied optics 15(2), PP. 358-363.
- McMillin, L.M., H.E. Fleming and M.L. Hill, 1979, **Atmospheric Transmittance of an Absorbing Gas. 3: A Computationally Fast and Accurate Transmittance Model for Absorbing Gases With Variable Mixing Ratios**, Applied optics, 18(10), PP. 1600-1606.
- McMillin, L.M., X. Xiong, Y. Han, T.J. Kleespies and P. Van Delst, 2006, **Atmospheric Transmittance of an Absorbing gas. 7. Further improvements to the OPTRAN 6 approach**, Applied optics, 45(9), PP. 2028-2034.
- Rodgers, C., 2000, **Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice**, World Scientific.
- Rozanov, V.V. 2006, **Adjoint radiative transfer equation and inverse problems**, Light Scattering Reviews, PP. 339-390.
- Seemann, S.W., E.E. Borbas, J. Li, W.P. Menzel and L.E. Gumley, 2006, **MODIS Atmospheric Profile Retrieval Algorithm Theoretical Basis Document (version 6)**, University of Wisconsin-Madison.
- Seemann, S.W., J. Li, W.P. Menzel and L.E. Gumley, 2003, **Operational Retrieval of Atmospheric Temperature, Moisture, and ozone from MODIS Infrared Radiances**, Journal of Applied Meteorology, 42(8), PP. 1072-1091.
- Xiong, X. and L.M. McMillin, 2005, **Alternative to the Effective Transmittance Approach for the Calculation of Polychromatic Transmittances in Rapid Transmittance Models**, Applied optics, 44(1), PP. 67-76.