

تفکیک عمق نوری ذرات معلق از ابر و رسوبات در مناطق دریایی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای

سعید فرهادی^۱، حسین محمد عسگری^{۲*}، علی دادالهی سهراب^۳،
سید محمد جعفر ناظم السادات^۴، سید حسین خزایی^۵

۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد محیط‌زیست دریا، دانشکده منابع طبیعی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر
۲ استادیار گروه محیط‌زیست دانشکده منابع طبیعی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر
۳ دانشیار گروه محیط‌زیست دانشکده منابع طبیعی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر
۴ استاد بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز
۵ مربی گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۱۵؛ تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۰۳/۱۹)

چکیده

پژوهش حاضر با هدف به کارگیری فناوری سنجش از دور و استفاده از تصاویر سنجنده مودیس برای محاسبه میزان ریزگردها در خلیج فارس و ارزیابی مدل همبستگی خطی ریزگردهای جوی با اندازه‌گیری‌های زمینی می‌باشد. روش کار به این صورت بود که ابتدا ماسک رسوبات و ماسک ابر و تصحیح اتمسفری بر روی تصاویر اعمال شد و در ادامه استخراج مقادیر غبار به صورت پارامتر AOD با استفاده از کد تهیه شده به زبان نرم‌افزار متلب صورت گرفت و در نهایت با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های آئرونت و شاخص‌های آماری RMSE و RMSD ارزیابی نتایج صورت گرفت. نتایج اولیه حاصل از اجرای الگوریتم نشان‌دهنده توانایی مدل در شبیه‌سازی ذرات ریزگرد بود. بررسی نتایج نشان داد که الگوریتم موجود داده‌های انعکاس طیفی برای شعاع موثرهای مختلف در جداول LUT را برای غلظت ریزگردها شبیه‌سازی می‌کند. میزان همبستگی برای روز ۲۲ شهریور ۱۳۸۳ برای باند ۱/۲۴۳ برابر با ۰/۹۴ و برای باند ۱/۶۴۳ برابر با ۰/۹۷ به دست آمد. که روند خوبی را بین داده‌های اندازه‌گیری نشان می‌دهد، شاخص‌های RMSE و RMSD در این روز برای باند ۱/۲۴۳ به ترتیب ۰/۰۲ و ۰/۰۲ و برای باند ۱/۶۴۳ برابر با ۰/۱ و ۰/۰۱ محاسبه شد. بنابراین، می‌توان بیان کرد دقت شبیه‌سازی‌ها در این باندها مناسب است. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد مقادیر AOD به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای همبستگی معنی‌داری با AOD اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های آئرونت دارد.

کلید واژه‌ها: عمق نوری؛ مناطق دریایی؛ AOD؛ آئرونت؛ داده‌های ماهواره‌ای

سرآغاز

بررسی تغییرات مکانی و زمانی پدیده‌های ریزگرد نیازمند اطلاع از وضعیت زمین‌شناسی، اقلیم‌شناسی و سینوپتیک این پدیده است. اقلیم‌شناسی پدیده ریزگردها به طور عمده بر پایه اندازه‌گیری‌های مختلفی است که به وسیله تکنیک‌های سنجش از دور و تحلیل داده‌های غبار و مدل‌سازی‌های عددی انجام می‌شود. از بین این روش‌ها تحلیل رخداد غبار و تحلیل داده‌های ماهواره‌ای معمول‌تر است (Mikami et al., 2005; Prospero et al., 2002)، هر چند داده‌های هواشناسی برای مناطق دریایی نسبتاً کم هستند و شبکه ایستگاه‌های هواشناسی در مناطق دریایی متراکم نیستند ولی ماهواره‌های مشاهده زمینی اطلاعات گسترده‌ای را برای مطالعه غبار در مقیاس وسیع تهیه می‌کند. با استفاده از عمق نوری هواویز (Moulin et al., 1998; Legrand et al., 1994) و شاخص جذب هواویز (Herman et al., 1997) که از سیگنال‌های ماهواره‌ای استخراج می‌شوند، می‌توان اطلاعات زیادی را در مورد غبار در مقیاس وسیع به دست آورد. روش‌های اندازه‌گیری زمینی و فناوری سنجش از دور از مهم‌ترین روش‌های ردیابی و توزیع ریزگردها در محیط قلمداد می‌شوند (Kaufman et al., 2002). تصاویر ماهواره‌ای یکی از بهترین منابع برای بررسی مشخصات و مسیر حرکت ریزگردها هستند (Myhre et al., 2005). که به دلیل پوشش مکانی و زمانی فوق‌العاده آن‌ها ماهواره‌های سنجش از دور دارای مزایای زیادی در پایش غبار می‌باشند. در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده، تصاویر ماهواره‌ای می‌توانند پهنای وسیعی را پوشش داده و به دلیل قابلیت تکرار، ابزار بسیار مهمی برای کنترل ریزگردها و انتقال آنها به شمار روند (Wang & Sunder., 2003). سنجنده‌های ماهواره توانایی ثبت سیگنال‌های تابشی از هواویزها و سطوح مختلف زمین در باندهای مختلف طیفی را دارند. سیگنال باندهای مختلف برای آشکارسازی پدیده‌های غبار می‌توانند ترکیب شوند و می‌توانند با استفاده از این ترکیب‌ها، متغیرهایی را برای کمی‌سازی بار غبار و اندازه ذرات غبار استخراج نمایند (Ackerman, 1997). سامانه مدل‌سازی جامع ریزگردها قادر به شبیه‌سازی و پیش‌بینی همه جنبه‌های ریزگردها در سطح یک منطقه می‌باشند. هدف از چنین سامانه‌هایی ارزیابی و پیش‌بینی کمی از ذرات ریزگرد در مقیاس‌های محلی تا جهانی است. (Geogdzhayev &

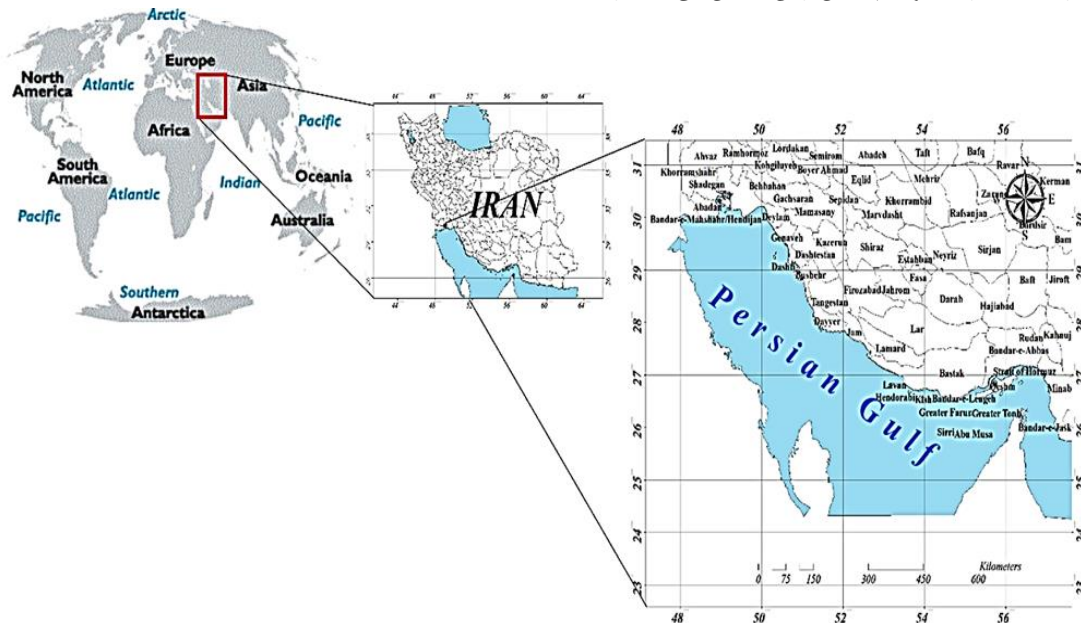
Mishchenko., 2015) مطالعه‌ای را برای ۷۵ ایستگاه آئرونت در کل سواحل و جزایر کره زمین برای دوره زمانی ۱۵ سال (۲۰۰۹-۱۹۹۵) برای باند ۰/۶۴۴ و ۰/۸۵۵ میکرومتر بر روی اقیانوس انجام دادند. تجزیه و تحلیل رگرسیون آنها نشان داد که به طور متوسط داده‌های AOT سنجنده مودیس برابر ۲۵-۵ درصد بالاتر از مقادیر آئرونت می‌باشد. مقایسه متوسط ماهانه AOT تصاویر مودیس در طول زمین و اقیانوس در مجاورت ایستگاه‌های آئرونت ساحلی سطح معنی‌دار قابل توجهی را نشان داد. Levy و همکاران در سال ۲۰۱۵ جهت توصیف الگوریتم بازیابی ریزگردها مطالعه‌ای را در بازه زمانی ۲۰۱۴-۲۰۱۲ با استفاده از الگوریتم پیکسل تاریخ سنجنده مودیس در سطح خشکی و دریا انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که میزان همبستگی برای ماه‌های مختلف در دامنه ۰/۸۸ تا ۰/۹۲ و RMSE نیز در دامنه ۰/۰۶ تا ۰/۰۸ متغیر بود در نتیجه مطالعات آنها نشان داد که همبستگی بالایی میان داده‌های استخراج شده از باند ۰/۵۵۳ و ۰/۸۵۵ میکرومتر با داده‌های ایستگاه‌های زمینی وجود دارد. (Smirnov et al., 2002) در مطالعه‌ای میزان عمق نوری ذرات معلق (AOD) سنجنده مودیس را با استفاده از ایستگاه آئرونت بحرین در خلیج فارس مورد ارزیابی قرار دادند. آنها در این مطالعه همبستگی قوی در عمق نوری ریزگردهای شدید و مقدار بخار آب در ستون جوی به دست آوردند (ضریب همبستگی ۰/۸۲) و پارامتر آنگستروم بالاتر از ۰/۷ محاسبه شد. و در هوای صاف و عاری از ریزگرد ضریب همبستگی ۰/۴۵ با آنگستروم کمتر از ۰/۷ به دست آمد. در تحقیق حاضر برای تعیین پراکندگی ریزگردها در دریا از تصاویر سنجنده مودیس استفاده شد. هدف نهایی پژوهش حاضر محاسبه میزان کمی و کیفی ریزگردهای موجود در سطح خلیج فارس و ارزیابی مدل همبستگی خطی میان ریزگردهای جوی با اندازه‌گیری‌های زمینی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق خلیج فارس است (شکل ۱) که در عرض جغرافیایی ۲۴ تا ۳۰ درجه و ۳۰ دقیقه شمالی و ۴۸ تا ۵۶ درجه و ۲۵ دقیقه شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد. از نظر آب و هوایی شرایط خشک و نیمه استوایی دارد،

عریض‌ترین بخش آن ۱۸۰ مایل و عمیق‌ترین نقطه آن ۹۳ متر در ۱۵ کیلومتری تنب بزرگ و کم عمق‌ترین بخش آن در غرب



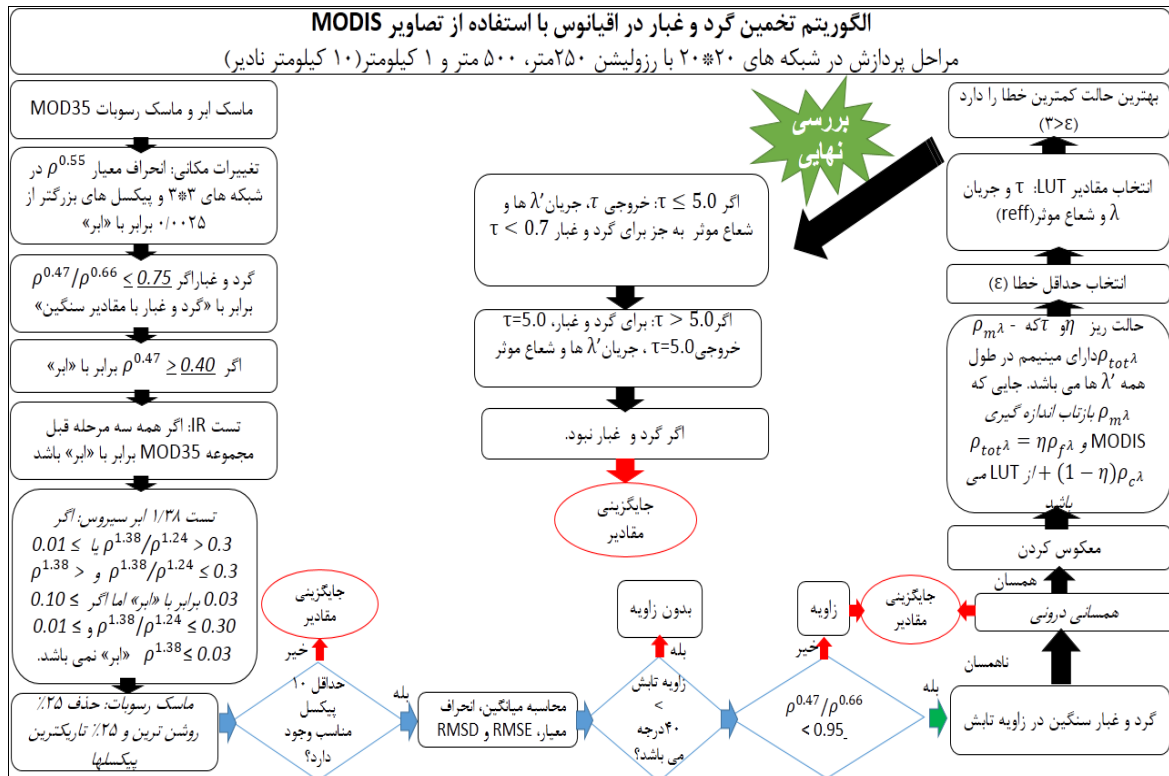
شکل (۱): منطقه مورد مطالعه

موجود در جو (ازن، بخار آب و دی اکسیدکربن) و همچنین اصلاحات جذب، بازتاب نیز بر روی تصاویر اجرا شد. اعتبارسنجی داده‌ها نیز با استفاده از داده‌های AOD اندازه گیری شده توسط دستگاه‌های نورسنج خورشیدی در ایستگاه‌های آبروت انجام شد. در نهایت، غلظت گرد و غبار با استفاده از رابطه‌های موجود محاسبه شد. تئوری و استراتژی الگوریتم بازیابی ذرات معلق در اقیانوس توسط تانره و کافمن، لوی و رمر (Tanre & Kaufman., 1997; Levy et al.; 2006 & Remer et al., 2005) تشریح شده است. الگوریتم تعیین عمق نوری ذرات معلق متناسب با تعیین کل ذرات معلق در ستون عمودی) برای تعیین توزیع اندازه ذرات از نور محیط استفاده می‌کند. مکانیسم الگوریتم بازیابی ریزگردها در اقیانوس در شکل (۲) نشان داده شده است. در این الگوریتم فرض بر این است که حالات ذرات معلق ریز و درشت را می‌توان با وزن‌دهی مناسب به عنوان ذرات معلق محیطی با هدف مشخص ترکیب کرد. در این مکانیسم انعکاس طیفی جداول LUT با انعکاس طیفی سنجنده مودیس برای پیدا کردن بهترین حالت مقایسه شد و بهترین برازش و یک میانگین از مجموعه‌ای از بهترین حالات ممکن را ارائه می‌دهد (Tanre & Kaufman., 1997).

خلیج فارس سالانه تحت تاثیر توفان‌های ریزگردی است که از سمت غرب و شمال‌غرب و جنوب‌غرب به این منطقه وارد می‌شود.

مراحل تعیین غلظت ریزگردها از تصاویر ماهواره‌ای

برای بازیابی خواص ذرات معلق بر روی محدوده خلیج فارس با استفاده از انعکاس طیفی سنجنده مودیس ماهواره EOS (سامانه ترا)^(۱) از الگوریتم مربوط به محیط دریایی استفاده شد. در این پژوهش برای پردازش تصاویر برنامه‌ای به زبان نرم افزار متلب^(۲) تهیه شد. هدف از تهیه این برنامه شبیه‌سازی بازتاب ثبت شده در سنجنده با استفاده از جدول‌های LUT می‌باشد. کل فرایند پردازش در شبکه‌های ۵×۵ و پیکسل‌ها با توان تفکیک ۵۰۰ متر (۱۰ کیلومتر در نادر) انتخاب شدند. قبل از اجرای الگوریتم، بازتاب اندازه‌گیری شده توسط مودیس در بالای جو، در ۶ طول موج به ازای کلیه پیکسل‌های شبکه تعیین شد. در این برنامه هنگامی که مقادیر بازتاب هر یک از پیکسل‌های تصویر برابر با بازتاب‌های موجود در جدول LUT شد، مقدار عمق نوری متناظر به آن پیکسل اختصاص داده شد. برای تفکیک اثر پدیده‌های مختلف مانند ابرها، محیط‌های آبی و برف از سیگنال هواویزها از ماسک‌های مختلف استفاده شد. آثار اتمسفری و آثار گازهای



شکل (۲): فلوجارت الگوریتم بازیابی اطلاعات ذرات معلق از اقیانوس‌ها (Remer et al., 2005)

رسوبات این مناطق می‌توانند خصوصیات شبیه به سطح زمین را داشته باشند. بنابراین، ماسک رسوبات علاوه بر ماسک ابر استفاده شد (Li & Remer., 2005). رابطه (۱) الگوریتم محاسبه زاویه تابش^(۳)، که نشان‌دهنده زاویه بازتاب، در مقایسه با زاویه بازتاب آینه طبی می‌باشد را نشان می‌دهد (Remer., 2005):

$$\theta_{glint} = \cos^{-1}((\cos\theta_s \cos\theta_v) + (\sin\theta_s \sin\theta_v \cos\phi)) \quad (1)$$

(AOD) در یک طول موج ($\tau_{0.55}^{tot}$)، پارامتر وزن دهی انعکاس (FW) و شعاع موثر (τ_{eff}) در یک طول موج ($\eta_{0.55}$)، که نسبتی از توزیع اندازه ذرات معلق می‌باشد را استخراج کند. بازیابی اطلاعات مستلزم یک حالت ریز و یک حالت درشت است و برای تعیین بازیابی، ترکیباتی از حالات ریز و درشت و مشارکت نسبی نور آنها که بهترین حالت شبیه‌سازی انعکاس طیفی سنجنده مودیس مورد نیاز می‌باشد، رابطه (۲) محاسبه انعکاس حالت ترکیبی از η به عنوان پارامتر وزن دهی را نشان می‌دهد (Levy et al., 2015):

قسمت اولیه الگوریتم برای جداسازی پیکسل‌های ریزگردها از پیکسل‌های ابری ارائه شده است. براساس استاندارد MOD35 ماسک ابر از انعکاس در باندهای مرئی برای تشخیص ابرها استفاده می‌کند (Martins et al., 2002). همچنین رسوبات زیر آب در آب‌های کم عمق (در نزدیکی خطوط ساحلی) در پردازش ریزگردها در اقیانوس‌ها سبب ایجاد خطا می‌شوند چرا که

که در آن θ_s ، θ_v و ϕ به ترتیب زاویه سرسوی خورشیدی، زاویه سرسوی ماهواره‌ای و زاویه آزیموت نسبی (بین خورشید و ماهواره) است. توجه کنید که انعکاس زاویه تابش مطابق با $\theta_{glint} = 0$ است. اگر $\theta_{glint} > 40^\circ$ باشد می‌توان از آلودگی تابشی جلوگیری و اقدام به بازیابی کرد. این الگوریتم چندین واریسی پایدار از بازتاب طیفی انجام می‌دهد. و با توجه به ثبات نتایج این بررسی، می‌توان این الگوریتم را در تعیین بازتاب برای خارج از محدوده لازم به کار برد. طبق مطالعات انجام شده این الگوریتم می‌تواند سه پارامتر اصلی عمق نوری ذرات معلق

$$\rho_{\lambda}^{LUT}(\tau_{0.55}^{tot}) = \eta \rho_{\lambda}^f(\tau_{0.55}^{tot}) + (1 - \eta) \rho_{\lambda}^c(\tau_{0.55}^{tot}) \quad (2)$$

اندازه‌گیری شده توسط ایستگاه‌های آثرونوت دالما^(۴) (قطر)، صیر بو نعیر^(۵) (امارات)، اووم الکوئین^(۶) (امارات) و مارکو^(۷) (امارات) در خلیج فارس که موقعیت جغرافیایی آنها در جدول (۱) ذکر شده است، استفاده شد.

که در آن $\rho_{\lambda}^{LUT}(\tau_{0.55}^{tot})$ میانگین وزنی انعکاس در اتمسفر در یک حالت ریز (F) و ضخامت نوری $\tau_{0.55}^{tot}$ و انعکاس در اتمسفر در یک حالت درشت (C) نیز با همان $\tau_{0.55}^{tot}$ می‌باشد. برای ارزیابی نتایج از داده‌های روزانه عمق نوری ذرات معلق (AOD)

جدول (۱): موقعیت ایستگاه‌های آثرونوت مورد مطالعه

ردیف	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	دالما	۵۲۱۹۵۵	۲۴۳۰۰۷
۲	صیر بو نعیر	۵۴۱۳۵۸	۲۵۱۳۰۱
۳	اووم الکوئین	۵۵۳۹۲۸	۲۵۳۱۵۸
۴	مارکو	۵۴۳۹۳۲	۲۴۴۱۶۰

* واحدهای طول و عرض جغرافیایی بر حسب درجه، دقیقه، ثانیه (DMS) می‌باشد

$$RMSE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(m_i - o_i)]^2 \quad (4)$$

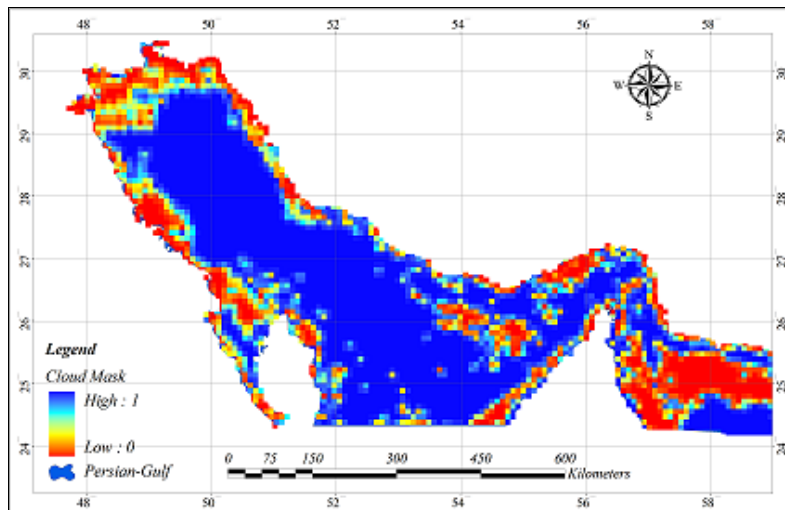
که m_i و o_i به ترتیب داده شبیه‌سازی و داده اندازه‌گیری، \bar{m} و \bar{o} میانگین داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری و N تعداد داده‌ها می‌باشد.

یافته‌ها

شکل (۳) تصویر ماسک ابر به دست آمده برای تصاویر مورد مطالعه را نشان می‌دهد. که با ماسک کردن تصاویر مقادیر پیکسل‌های دارای ابر برابر با صفر می‌شود و با ضرب این ماسک در سایر باندها، اثر ابر در سایر باندها نیز از بین می‌رود. قسمت‌های قرمز رنگ در حوزه خلیج فارس پوشش ابر حذف شده را نشان می‌دهد.

داده‌های متناظر با این ایستگاه‌ها برای باندهای ۰/۶۴۴، ۰/۸۵۵، ۱/۲۴۳ و ۱/۶۴۳ از تصویر استخراج شد. عمق نوری به دست آمده از تصاویر با مقادیر به دست آمده در ایستگاه‌های آثرونوت مورد مقایسه قرار گرفت. در این تحلیل‌ها از شاخص‌های آماری میانگین مربعات خطا (RMSE) و اختلاف میانگین مربعات خطا (RMSD) طبق رابطه‌های (۳ و ۴) استفاده شد. داده‌های شبیه‌سازی و برآوردی با استفاده از شاخص‌های آماری میانگین، انحراف معیار، همبستگی، $RMSE^{(8)}$ و $RMSD^{(9)}$ ارزیابی شدند (Kaufman., 2002).

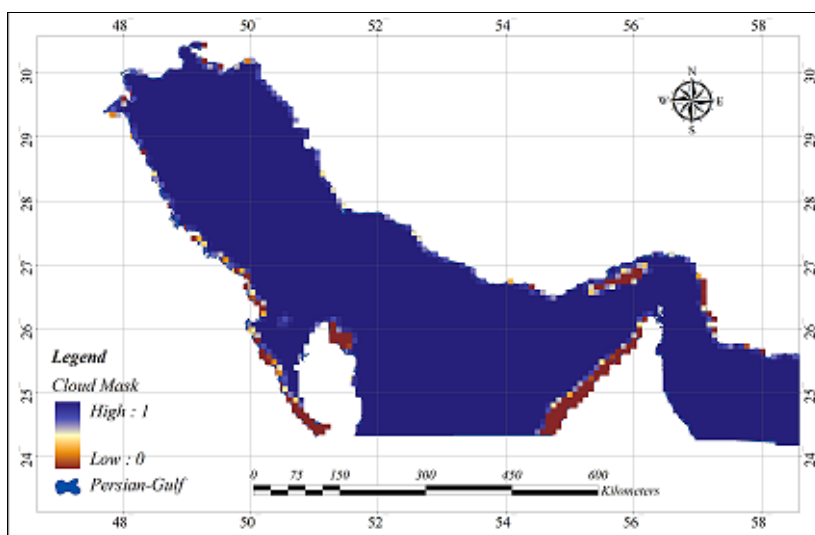
$$RMSD = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(m_i - \bar{m}) - (o_i - \bar{o})]^2 \quad (3)$$



شکل (۳): ماسک ابر به دست آمده برای تصاویر روز ۲۲ شهریور ۱۳۸۳

ضرب این ماسک در سایر باندها، اثر رسوبات در سایر باندها نیز از بین می‌رود.

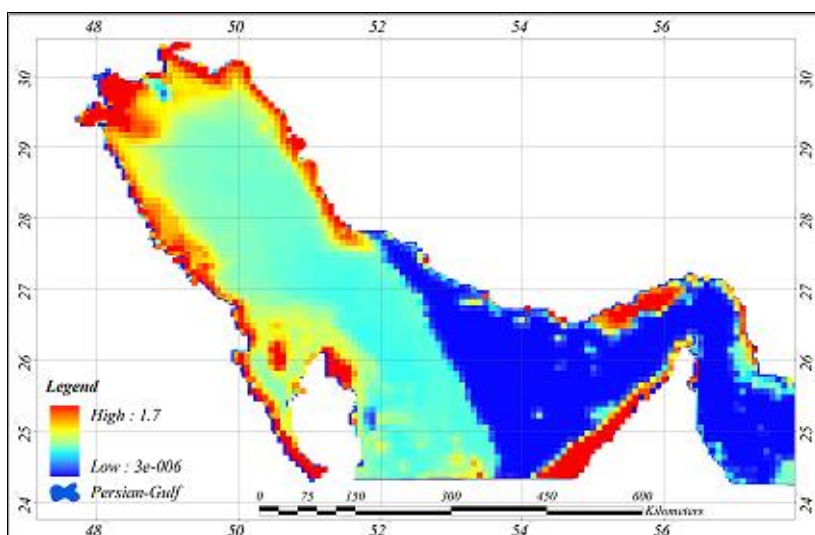
شکل (۴) تصویر ماسک رسوبات به دست آمده برای تصاویر مورد مطالعه را نشان می‌دهد. که با ماسک کردن تصاویر ارزش پیکسل‌های دارای ارزش خشکی‌ها برابر با صفر می‌شود و با



شکل (۴): ماسک رسوبات به دست آمده در روز ۲۲ شهریور ۱۳۸۳

(PWAT یا W) بر حسب سانتی‌متر، و ستون ازن (O_3) با واحد دابسون می‌باشد. نتایج تصحیح اتمسفری برای تصاویر روزهای مورد مطالعه در شکل (۵) نشان داده شده است.

در طول دوره پردازش تصاویر مودیس از داده‌های سطح دو مجموعه MOD07 دریافت شده از سایت ناسا برای تصحیح اتمسفری و حذف اثر گازها استفاده شد. پارامترهای اصلی استخراج شده از این سطح داده مجموع بخار آب قابل بارش

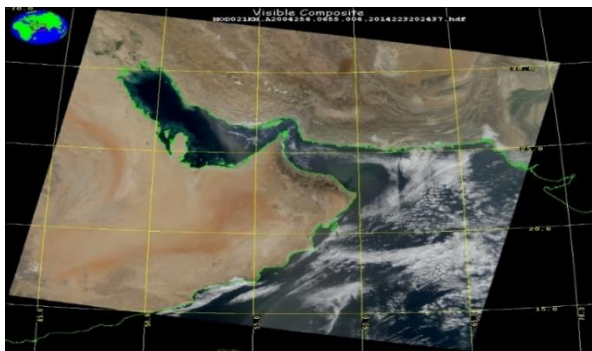


شکل (۵): تصحیح اتمسفری به دست آمده برای گازهای O_3 ، CO_2 و H_2O در ۲۲ شهریور ۱۳۸۳

خلیج فارس و نحوه پراکنش آن را نشان می‌دهد و شکل (۸) نمودار ارزیابی نتایج شبیه‌سازی شده را با داده‌های به دست آمده در ایستگاه‌های آژرنت دالما، مارکو، صیر بو نویر و اووم الکویین

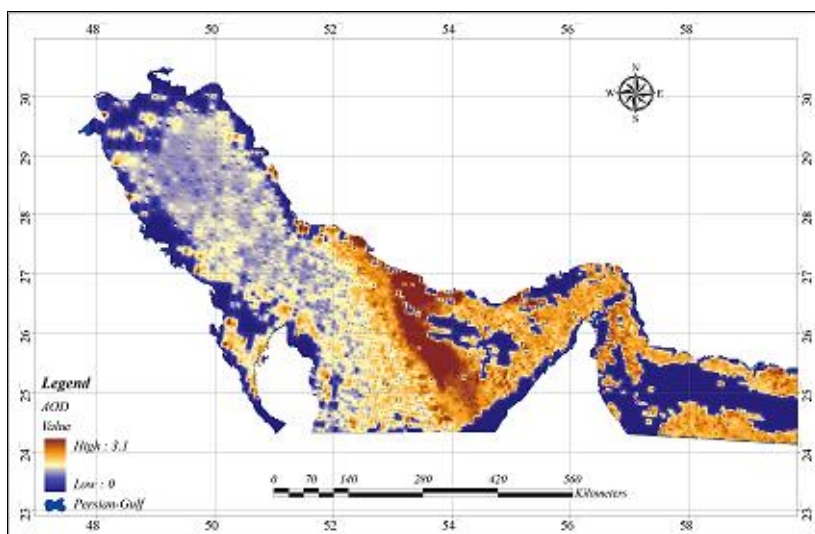
شکل (۶) تصویر RGB^(۱۰) مربوط به روز ۲۲ شهریور ۱۳۸۳ را نشان می‌دهد و شکل (۷) غلظت ذرات ریزگرد شبیه‌سازی شده و عمق نوری (AOD) را در باند ۱ ($0.644 \mu m$) میکرومتر) برای حوزه

۱ و نزدیک به صفر است. بنابراین، می‌توان بیان کرد مدل ایجاد شده در این باند دارای پیش برآورد است.

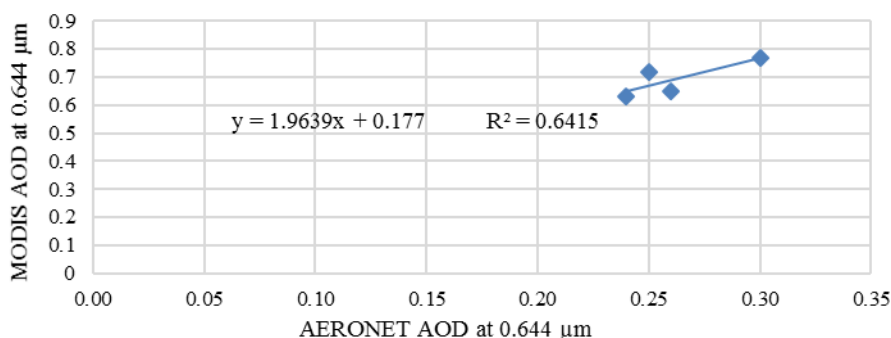


شکل (۶): تصویر RGB تاریخ ۲۲ شهریور ۱۳۸۳
(<https://modis.gsfc.nasa.gov>)

در روز ۲۲ شهریور ۱۳۸۳ نشان می‌دهد. بر اساس شکل (۷)، باند ۱ (۰/۶۴۴ میکرومتر) حالت مناسب و صحیحی از شبیه‌سازی و همبستگی بالایی را برای میزان غلظت ذرات در این روز نشان می‌دهد، در این جا با توجه به این که جهت باد به سمت جنوب ایران است این مسئله موجب افزایش غلظت ریزگرد در این منطقه می‌شود. جدول (۲) خلاصه آماری داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده و شاخص‌های ارزیابی را نشان می‌دهد. بر اساس شکل (۷) می‌توان بیان کرد که مدل توانایی مناسبی در نشان دادن تغییرات داده‌های مشاهداتی دارد. با توجه به شکل (۸) مشاهده می‌شود که نمودارهای پراکنش به نیمساز ربع اول و سوم نزدیکتر هستند. جدول (۲) نشان می‌دهد که میانگین و انحراف معیار شبیه‌سازی‌ها به میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده نسبت به سایر باندها دارای اختلاف کمی می‌باشند، همچنین در این حوزه همبستگی برابر با ۰/۸۰ و RMSE و RMSD کمتر از



شکل (۷): عمق نوری (AOD) شبیه‌سازی شده باند ۰/۶۴۴ میکرومتر در حوزه خلیج فارس



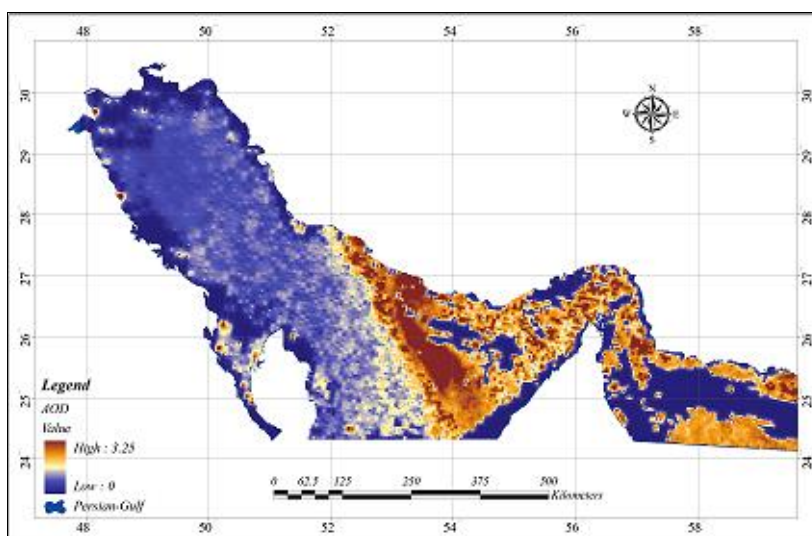
شکل (۸): عمق نوری (AOD) اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای باند ۱ (۰/۶۴۴ میکرومتر)

جدول (۲): شاخص‌های آماری برای باند ۱
(۰/۶۴۴ میکرومتر)

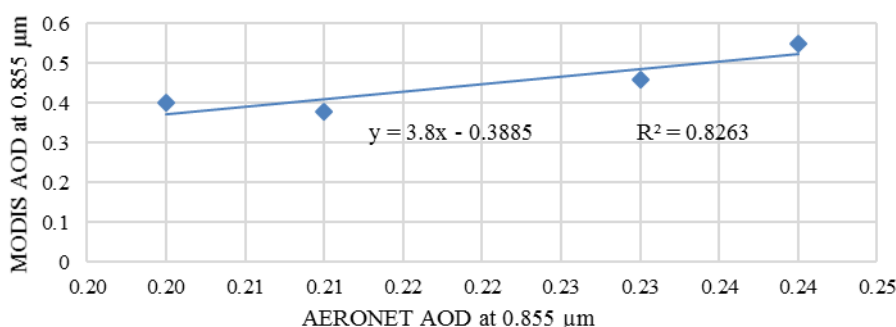
شاخص	اندازه‌گیری شده	مدلسازی سازی شده
میانگین	۰/۲۶	۰/۶۹
انحراف معیار	۰/۰۳	۰/۰۶
همبستگی		۰/۸۰
RMSE		۰/۴۳
RMSD		۰/۰۴

صحیحی از شبیه‌سازی و همبستگی نسبتا بالایی را برای میزان غلظت ذرات در این روز نشان می‌دهد. جدول (۳) خلاصه آماری داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده و شاخص‌های ارزیابی را نشان می‌دهد. بر اساس شکل (۹) می‌توان بیان کرد که مدل توانایی مناسبی در نشان دادن تغییرات داده‌های مشاهداتی دارد. با توجه به شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که نمودارهای پراکنش به نیمساز ربع اول و سوم نزدیکتر است. جدول (۳) نشان می‌دهد که میانگین و انحراف معیار شبیه‌سازی‌ها به میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده نسبت به سایر باندها دارای اختلاف کمی می‌باشد، همچنین در این حوزه همبستگی برابر با ۰/۹۱ و RMSE و RMSD کمتر از ۱ و نزدیک به صفر می‌باشد. بنابراین، می‌توان بیان کرد مدل ایجاد شده در این باند نیز دارای پیش برآورد است.

شکل (۹) غلظت ذرات ریزگرد شبیه‌سازی شده و عمق نوری (AOD) را در باند ۲ (۰/۸۵۵ میکرومتر) و نحوه پراکنش آن را نشان می‌دهد و اشکال (۱۰) نمودار ارزیابی نتایج شبیه‌سازی شده را با داده‌های به دست آمده در ایستگاه‌های آئرونِت دالما، مارکو، صیر بو نویر و اووم الکوین در روز ۲۲ شهریور ۱۳۸۳ نشان می‌دهد. بر اساس شکل (۹) باند ۲ (۰/۸۵۵) حالت مناسب و



شکل (۹): عمق نوری (AOD) شبیه‌سازی شده باند ۲ (۰/۸۵۵ میکرومتر) در حوزه خلیج فارس



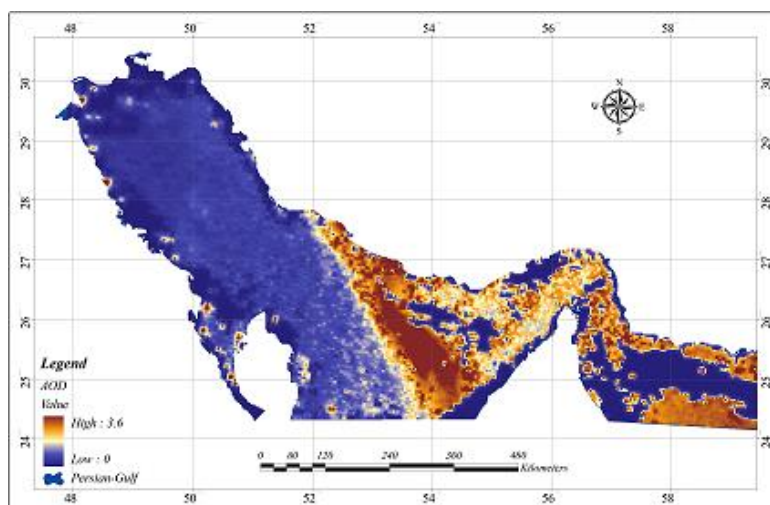
شکل (۱۰): عمق نوری (AOD) اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای باند ۲ (۰/۸۵۵ میکرومتر)

مناسب‌ترین و صحیح‌ترین حالت از شبیه‌سازی و همبستگی بالایی را برای میزان غلظت ذرات در این روز نشان می‌دهند. جدول‌های (۴-۵) خلاصه آماری داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده و شاخص‌های ارزیابی را نشان می‌دهد. بر اساس این داده‌ها می‌توان بیان کرد که مدل توانایی مناسبی در نشان دادن تغییرات داده‌های مشاهداتی دارد. با توجه به شکل‌های (۱۲ و ۱۴) مشاهده می‌شود که نمودارهای پراکنش به نیمساز ربع اول و سوم نزدیکتر است. جدول‌های (۴-۵) نشان می‌دهد که باندهای ۱/۲۴۳ و ۱/۶۳۲ میانگین و انحراف معیار شبیه‌سازی‌ها به میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده نسبت به سایر باندها بسیار نزدیکتر هستند. همچنین برای این باندها همبستگی بالا (۰/۹۴ و ۰/۹۷) میزان RMSE و RMSD کمتر از ۱ و نزدیک به صفر می‌باشد. بنابراین، می‌توان بیان کرد دقت شبیه‌سازی‌ها در این باندها بسیار مناسب است و نمایی کاملاً یکسان از ریزگردها را در مقایسه با تصویر RGB ارائه داده است.

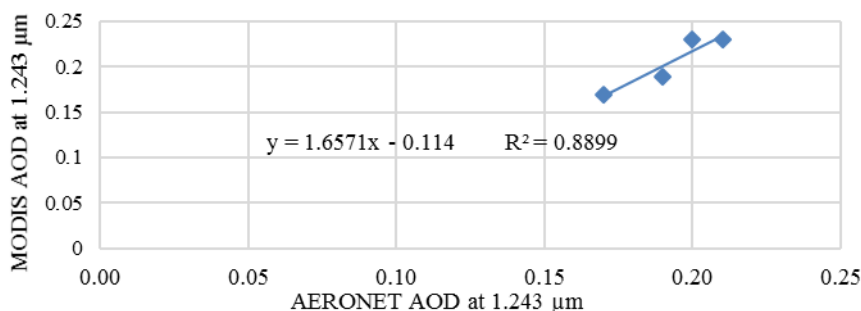
جدول (۳): شاخص‌های آماری برای باند ۲ (۰/۸۵۵ میکرومتر)

شاخص	اندازه‌گیری شده	مدلسازی سازی شده
میانگین	۰/۲۲	۰/۴۵
انحراف معیار	۰/۰۲	۰/۰۸
همبستگی		۰/۹۱
RMSE		۰/۲۳
RMSD		۰/۰۵

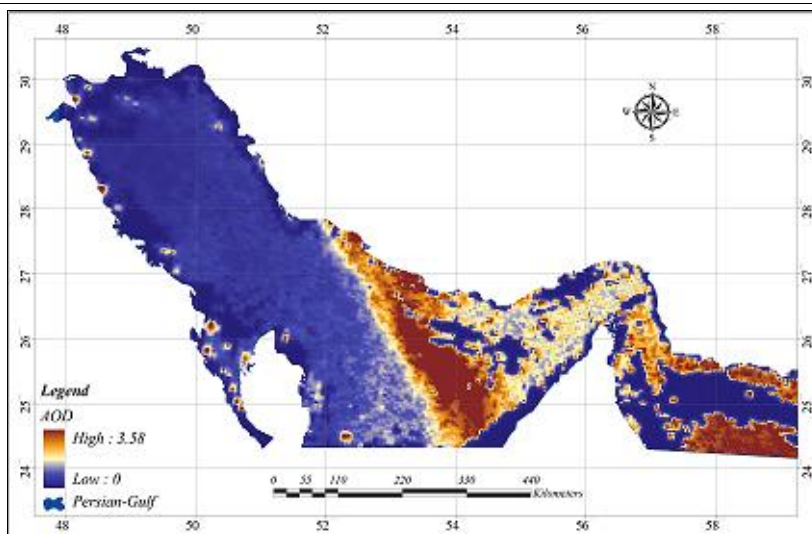
شکل‌های (۱۱ و ۱۳) غلظت ذرات ریزگرد شبیه‌سازی شده و عمق نوری (AOD) را در باندهای ۵ (۱/۲۴۳) و ۶ (۱/۶۴۳) برای حوزه خلیج فارس و نحوه پراکنش آن را نشان می‌دهد و شکل‌های (۱۲ و ۱۴) نمودار ارزیابی نتایج شبیه‌سازی شده را با داده‌های به‌دست آمده در ایستگاه‌های آثرون‌ت دالما، ابوالبخوش، مصفی و بحرین در روز ۲۲ شهریور ۱۳۸۳ را نشان می‌دهد. بر اساس شکل‌های (۱۱-۱۴) باندهای ۵ (۱/۲۴۳) و ۶ (۱/۶۴۳)



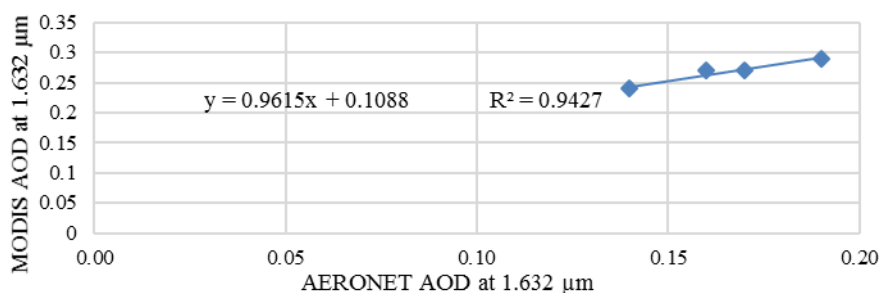
شکل (۱۱): عمق نوری (AOD) شبیه‌سازی شده باند ۱/۲۴۳ میکرومتر در حوزه خلیج فارس



شکل (۱۲): عمق نوری (AOD) اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای باند ۵ (۱/۲۴۳ میکرومتر)



شکل (۱۳): عمق نوری (AOD) شبیه سازی شده باند ۱/۶۳۲ میکرومتر در حوزه خلیج فارس



شکل (۱۴): عمق نوری (AOD) اندازه گیری شده و شبیه سازی شده برای باند ۶ (۱/۶۳۲ میکرومتر)

بحث و نتیجه گیری

برای ۷۵ ایستگاه آئرونت در کل سواحل و جزایر کره زمین برای دوره زمانی ۱۵ سال (۲۰۰۹-۱۹۹۵) برای باند ۰/۶۴۴ و ۰/۸۵۵ میکرومتر بر روی اقیانوس از جمله خلیج فارس انجام دادند. در این مطالعه آنها از مدل انتقال تابشی برای تولید جدول‌های LUT استفاده کردند و جهت ارزیابی از داده‌های سطح ۲ عمق نوری هواویزها ایستگاه‌های آئرونت استفاده نمودند. میانگین مجموعه داده‌های ماهواره‌ای AOT در طول اقیانوس ضریب همبستگی بالایی را با مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های زمینی نشان داد، به گونه‌ای که ضریب همبستگی برای مقایسه داده‌های آئرونت و داده‌های GACP برابر با ۰/۸۱-۰/۸۵ و برای داده‌های تصاویر مودیس برابر با ۰/۷۹-۰/۷۴ به دست آمد. تجزیه و تحلیل رگرسیون نشان می‌دهد که به طور متوسط میزان عمق نوری (AOT) برای داده‌های GACP حدود ۲۷-۱۷ درصد پایین‌تر از مقادیر آئرونت، در حالی

جدول (۴): شاخص‌های آماری برای باند ۵ (۱/۲۴۳ میکرومتر)

شاخص	اندازه گیری شده	مدلسازی سازی شده
میانگین	۰/۱۹	۰/۲۱
انحراف معیار	۰/۰۲	۰/۰۳
همبستگی		۰/۹۴
RMSE		۰/۰۲
RMSD		۰/۰۲

جدول (۵): شاخص‌های آماری برای باند ۶ (۱/۶۳۲ میکرومتر)

شاخص	اندازه گیری شده	مدلسازی سازی شده
میانگین	۰/۱۷	۰/۲۷
انحراف معیار	۰/۰۲	۰/۰۲
همبستگی		۰/۹۷
RMSE		۰/۱
RMSD		۰/۰۱

برابر با ۰/۹۱ به دست آمد. که روند خوبی را بین داده‌های اندازه‌گیری نشان می‌دهد. بنابراین، می‌توان بیان کرد دقت شبیه‌سازی‌ها در این باندها مناسب است و تفاوت‌های ایجاد شده می‌تواند ناشی از خطای ارتفاع سنجنده و پخش ذرات گسیل شده بوسیله جریان‌های جوی و دامنه کوتاه انعکاسی جداول LUT باشد. همچنین تفاوت در مقادیر پارمترهای آماری برای روزهای مختلف به دلیل تغییر شدت توزیع ریزگردها در فضا و تغییر در انعکاس ثبت شده در سنجنده و همچنین پوشش ابر در منطقه است. در این تحقیق توانایی مدل انتقال تابشی و تصاویر مودیس در شبیه‌سازی و برآورد غلظت ریزگردها مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی نتایج مدل نشان داد که الگوریتم موجود به درستی عمل می‌کند و با توجه به داده‌های انعکاس طیفی برای شعاع موثرهای مختلف در جداول LUT، مقادیر را برای غلظت ریزگردها شبیه‌سازی می‌کند. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد مقادیر AOD به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای همبستگی معنی‌داری با AOD اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های مورد مطالعه دارد. در تمامی ایستگاه‌ها مقدار AOD به دست آمده از تصویر بزرگتر از مقدار AOD متناظر با آن در ایستگاه است و الگوریتم مورد استفاده دارای بیش برآورد است. علت این بیش برآورد را می‌توان استفاده از ذرات با شعاع موثرهای محدود دانست. زیرا، دامنه تحت پوشش این شعاع موثرها در توزیع اندازه ذرات لوگ نرمال محدود می‌شود. منابع خطا در ارزیابی ذرات معلق، مانند خطای کالیبراسیون سنسور، آلودگی موجود در زاویه تابش، و یا تخمین نادرست از انعکاس آب تعریف شد. الگوریتم به دست آمده در این پژوهش بیانگر مفید بودن تصاویر مودیس در پیش‌بینی غلظت ذرات ریزگردها می‌باشد. از کاربردهای این مدل، اندازه‌گیری غلظت ریزگردها بر مبنای داده‌های جداول LUT و اطلاعات دریافتی از تصاویر ماهواره‌ای است که می‌تواند در تحلیل رفتار ریزگردها در مناطق دریایی مفید واقع شود.

یادداشت‌ها

1. Terra
2. MATLAB@R
3. Glint Angle
4. Dalma
5. Sir_Bu_Nuair
6. Umm_Al_Quwain
7. MAARCO
8. Root Mean Square
9. Centered Root Mean Square difference
10. <http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov>

که برای داده‌های AOT سنجنده مودیس برابر ۲۵-۵ درصد بالاتر از مقادیر آترونت می‌باشد. مقایسه متوسط ماهانه AOT تصاویر مودیس در طول زمین و اقیانوس در مجاورت ایستگاه‌های آترونت ساحلی سطح معنی‌داری بالایی را نشان داد. این امر نشان داد که مقدار هواویزها در مکان‌های ساحلی می‌تواند به طور معنی‌داری در مقایسه با مناطق آبی اقیانوس مجاور متفاوت باشد. آنها نتیجه گرفتند هر دو مجموعه داده دارای ارتباط معنی‌داری با داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های آترونت بودند. (Levy et al., 2015) جهت توصیف الگوریتم ارزیابی هواویزها مطالعه‌ای را در بازه زمانی ۲۰۱۴-۲۰۱۲ با استفاده از الگوریتم پیکسل تاریک در شبکه‌ای ۵*۵ پیکسل برای داده‌های مربوط به باندهای ۰/۵۵۳ و ۰/۸۵۵ میکرومتر سنجنده مودیس در سطح خشکی و دریا انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که میزان همبستگی برای ماه‌های مختلف در دامنه ۰/۸۸ تا ۰/۹۲ و RMSE نیز در دامنه ۰/۰۶ تا ۰/۰۸ متغیر بود در نتیجه مطالعات آنها نشان داد که همبستگی بالایی میان داده‌های استخراج شده از باندهای ۰/۵۵۳ و ۰/۸۵۵ میکرومتر با داده‌های ایستگاه‌های زمینی وجود دارد. همچنین (Remer et al., 2002) ارزیابی عمق نوری هواویزها (AOD) را برای طول موج‌های ۰/۶۴۴ و ۰/۸۵۵ میکرومتر سنجنده مودیس محاسبه و با داده‌های سطح ۱/۵ از ۱۱ ایستگاه آترونت (۴ ایستگاه در دریای مدیترانه، ۲ ایستگاه در سواحل غربی اقیانوس اطلس شمالی، ۲ ایستگاه در دریای کارائیب، ۲ در سواحل جنوبی اقیانوس اطلس شمالی، ۱ ایستگاه در اقیانوس هند) برای سال ۲۰۰۰ به مدت ۲ ماه مورد مطالعه قرار دادند. میزان همبستگی برای باند ۰/۶۴۴ برابر با ۰/۹۴ و برای باند ۰/۸۵۵ برابر با ۰/۹۵ با خطای استاندارد برای هر دو باند ۰/۰۲ به دست آمد. آنها نتیجه گرفتند که در عمق‌های نوری (AOD) پایین حساسیت بیشتری نسبت به خطاهای کوچک ارزیابی برای عدم قطعیت هر دو آزمون الگوریتم و سنجنده وجود دارد. که سبب تفاوت در میزان داده‌های عمق نوری مستخرج از الگوریتم با داده‌های آترونت می‌شود. در پژوهش حاضر نیز باندهای ۰/۶۴۴ و ۰/۸۵۵ میکرومتر برای ارزیابی عمق نوری ریزگردها در خلیج فارس استفاده شد و برای برآورد دقت الگوریتم و ارزیابی داده‌ها از داده‌های باند ۰/۶۴۴ و ۰/۸۵۵ ایستگاه‌های آترونت دالما (قطر)، بحرین، ابوالخوش (امارات) و مصفح (امارات) استفاده شد. میزان همبستگی برای باند ۰/۶۴۴ برابر با ۰/۸۰ و برای باند ۰/۸۵۵

فهرست منابع

- Ackerman, S. 1997. Remote sensing aerosols using satellite infrared observations. *J. Geophys. Res.*, 102: 17069 - 17079.
- Geogdzhayev, I. V. & Mishchenko, M. I. 2015. Validation of Long-Term Global Aerosol Climatology Project Optical Thickness Retrievals Using AERONET and MODIS Data. *Remote Sens*, 7: 12588-12605;
- Herman, J. R.; Bhartia, P.; Torres, O.; Hsu, C.; Seftor, C. & Celarier, E. 1997. Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/TOMS data. *J. Geophys. Res.*, 102: 911–922.
- Kaufman, Y. J.; Tanre, D. & Boucher, O. 2002. A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, 419: 215-223.
- Legrand, M.; N'doum', C. & Jankowiak, E. I. 1994. Satellite-derived climatology of the Saharan aerosol. In: Lynch DK (Ed) *Passive Infrared Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere*. *Int. Sci. Opt. Eng.*, 23: 127–135.
- Levy, R.C.; Remer, L.A. & Dubovik, O. 2006. Aerosol optical properties and lookup tables for the new MODIS aerosol retrieval over land, submitted to JGR.
- Levy, R.; Munchak, L.; Mattoo, S.; Patadia, F.; Remer, L. A. & Kolz, R.E. 2015. Towards a long-term global aerosol optical depth record: applying a consistent aerosol retrieval algorithm to MODIS and VIIRS-observed reflectance. *Atmos. Meas. Tech Journal*. (8): 4083–4110.
- Li, R. R. & Remer, L. 2005. Snow and ice mask for the MODIS aerosol products. *Ieee Geoscience and Remote Sensing Letters* 2(3): 306-310.
- Mikami, M.; Aoki, T.; Ishizuka, M.; Yabuki, S.; Yamada, Y.; Gao, W. D. & Zeng, F. J. 2005. Observation of number size distribution of desert aerosols in the south of the Taklimakan Desert- China. *J. Meteorol Sci., Japan*, 83: 31–43.
- Moulin, C.; Lambert, C. E.; Dayan, U.; Masson, V.; Ramonet, M.; Bousquet, P.; Legrand, M.; Balkanski, Y. J.; Guelle, W.; Marticorena, B.; Bergametti, G. & Dulac, F. 1998. Satellite climatology of African dust transport in the Mediterranean atmosphere. *J. Geophys. Res*, 103: 137–144.
- Myhre, G.; Stordal1, F.; Johnsrud1, M.; Diner, D. J.; Geogdzhayev, I. V.; Haywood, J. M.; Holben, B. N.; Holzer-Popp, T.; Ignatov, A.; Kahn, R, A.; Kaufman, Y. J.; Loeb, N.; Martonchik, J. V.; Mishchenko, M. I.; Nalli, N. R.; Remer, L.A.; Schroedter-Homscheidt, M.; Tanré, D.; Torres, O. & Wang, M. 2005. Intercomparison of satellite retrieved aerosol optical depth over ocean during the period September 1997 to December 2000. *Atmos. Chem. Phys.*, 5: 1697-1719.
- Prospero, J. M.; P. Ginoux, O.; Torres, S. E.; Nicholson, T. & Gill, E. 2002. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the NIMBUS 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Reviews of Geophysics*, 40: 1029-1043.
- Remer, L. A.; Tanre', D.; Kaufman, Y. J.; Ichoku, C.; Mattoo, S.; Levy, R.; Chu, D.A.; Holben, B.; Dubovik, O.; Smirnov, A.; Martins, J. V.; Li, R. R. & Ahmad, Z. 2002. Validation of MODIS aerosol retrieval over ocean. *Geophysical Research Letters*. V 29 (12), 10.1029/2001GL013204.
- Remer, L. A.; Kaufman, Y. J.; Tanre, D.; Mattoo, S.; Chu, D. A.; Martins, J. V.; Li, R.R.; Ichoku, C.; Levy, R. C.; Kleidman, R. G.; Eck, T. F.; Vermote, E. & Holben, B. N. 2005. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation. *Journal of atmospheric sciences*, 62(4): 947-973.
- Shao, Y. 2004. Simplification of a dust emission scheme and comparison with data. *J. Geophys. Res.*, 109: 359- 372.
- Smirnov, A.; Holben, B, N.; Dubovik, O.; O'Neill, N, T.; Eck, T. F.; Westphal, D. L.; Goroch, A. K.; Pietras, C. & Slutsker, I. 2002. Atmospheric Aerosol Optical Properties in the Persian Gulf. *J. Atmos. Sci.*, 59: 620–634.
- Tanré, D.; Herman, M. & Kaufman, Y. 1996. Information on the aerosol size distribution contained in the solar reflected spectral radiances. *J. Geophys. Res.*, 101: 19043-19060.
- Tanré, D. & Kaufman, Y. J. 1997. Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS/EOS spectral radiances. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 102(14): 16971-16988.
- Wang, J. & Sunder, A. C. 2003. Inter comparison between satellite derived aerosol optical thickness and PM2.5 mass: Implications for air quality studies. *Geophysical Research Letters*, 30(21).