

تخمین عمق نوری ریزگردها با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس در سطح خلیج فارس

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

۱. کارشناسی ارشد محیط‌زیست دریا، دانشکده منابع طبیعی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر
۲. استادیار گروه محیط زیست 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 پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۸/۸

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۱۵

چکیده

مدل‌های عددی هواشناسی و ایستگاه‌های زمینی به‌تنهایی قادر به ردیابی و بارزسازی توفان‌های ریزگرد نیست و در بسیاری از موارد خطاهای قابل توجهی دارد. این امر ضرورت استفاده از روش‌های بارزسازی ریزگردها براساس داده سنجنش از دور را نمایان می‌سازد. هدف از این پژوهش، استفاده از تصاویر سنجنده مودیس در تخمین عمق نوری ریزگردها در سطح خلیج فارس و برآورد رابطه همبستگی خطی میان ریزگردهای جوی با اندازه‌گیری‌های زمینی است. میزان عمق نوری ریزگردها با استفاده از برنامه نرم‌افزاری MATLAB و بر پایه کمترین اختلاف میان بازتاب موجود در جدول LUT و بازتاب ثبت‌شده در تصاویر MODIS محاسبه شد. ارزیابی کارایی داده‌های تصاویر با استفاده از آزمون همبستگی پیرسون، شاخص RMSE و RMSD انجام گرفت. براساس ارزیابی نتایج در هفت ایستگاه AERONET مورد بررسی مشخص شد که نتایج حاصل از تصاویر با داده‌های اندازه‌گیری‌شده در اکثر ایستگاه‌ها دارای همبستگی معنادار است ($R^2=0/93$). به‌ترتیب باندهای ۱/۲۴۳ و ۱/۶۴۳ با ضریب همبستگی ۰/۹۴ و ۰/۹۷ و RMSE و RMSD برابر با ۰/۰۲ و ۰/۰۲ برای باند ۱/۲۴۳ و ۰/۰۱ و ۰/۰۱ برای باند ۱/۶۴۳ بهترین و مناسب‌ترین حالت را نمایش داد.

کلیدواژه

اُترون، خلیج فارس، ریزگردها، عمق نوری، مودیس.

۱. سرآغاز

سنجنش از دور و تحلیل داده‌های غبار و مدل‌سازی‌های عددی انجام می‌شود. از بین این روش‌ها تحلیل رخداد غبار و تحلیل داده‌های ماهواره‌ای معمول‌تر است (Prospero et al., 2002; Mikami et al., 2005). هر چند داده‌های هواشناسی برای مناطق دریایی نسبتاً کم است و

بررسی تغییرات مکانی و زمانی پدیده‌های ریزگرد نیازمند اطلاع از وضعیت زمین‌شناسی، اقلیم‌شناسی و سینوپتیک این پدیده است. اقلیم‌شناسی پدیده ریزگردها به‌طور عمده بر پایه اندازه‌گیری‌های مختلفی است که با تکنیک‌های

پیش‌بینی‌های ریزگردها و گواردها، و مطالعه اقلیم‌شناسی ریزگردها.

سامانه مدل‌سازی جامع ریزگردها قادر به شبیه‌سازی و پیش‌بینی همه جنبه‌های ریزگردها در سطح منطقه است. هدف از چنین سامانه‌هایی ارزیابی و پیش‌بینی کمی ذرات ریزگرد در مقیاس‌های محلی تا جهانی است. Geogdzhayev و Mishchenko (۲۰۱۵) ۷۵ ایستگاه آثرون در کل سواحل و جزایر کره زمین را در دوره زمانی پانزده ساله (۲۰۰۹-۱۹۹۵) برای باند ۰/۶۴۴ و ۰/۸۵۵ میکرومتر روی اقیانوس از جمله خلیج فارس بررسی کردند. میانگین ماهانه مجموعه داده‌های عمق نوری هواویزهای ماهواره‌ای روی اقیانوس ضریب همبستگی بالایی را با مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های زمینی نشان داد. تجزیه و تحلیل رگرسیون آن‌ها نشان داد که به طور متوسط داده‌های عمق نوری هواویزهای (AOD) سنجنده مودیس ۵٪-۲۵٪ بالاتر از مقادیر آثرون است. مقایسه متوسط ماهانه عمق نوری هواویزها تصاویر مودیس در طول زمین و اقیانوس در مجاورت ایستگاه‌های آثرون ساحلی سطح معنادار قابل توجهی نشان داد. این امر نشان داد که مقدار ریزگردها در مکان‌های ساحلی به طور معناداری در مقایسه با مناطق آبی اقیانوس مجاور متفاوت است.

Levy و همکاران (۲۰۱۵) در توصیف الگوریتم بازیابی ریزگردها مطالعه‌ای را در بازه زمانی ۲۰۱۲-۲۰۱۴ با استفاده از الگوریتم پیکسل تاریخ سنجنده مودیس در سطح خشکی و دریا انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که روی خشکی تفاوت میان داده‌های عمق نوری هواویزها در تصاویر ایستگاه‌های زمینی کاهش می‌یابد و نزدیک به صفر است. اما، روی اقیانوس استفاده از الگوریتم باعث افزایش عمق نوری هواویزهای سنجنده مودیس و داده‌های ایستگاه‌های زمینی (حدود تا ۰/۰۲۵) می‌شود. همچنین، در این مطالعه میزان همبستگی در ماه‌های مختلف در دامنه ۰/۸۸ تا ۰/۹۲ و RMSE نیز در دامنه ۰/۰۶ تا ۰/۰۸ متغیر

شبکه ایستگاه‌های هواشناسی در مناطق دریایی مترام نیست، 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 که از سیگنال‌های ماهواره‌ای استخراج می‌شود، می‌توان اطلاعات زیادی را در مورد غبار در مقیاس وسیع به دست آورد. روش‌های اندازه‌گیری زمینی و فناوری سنجنش از دور از مهم‌ترین روش‌های ردیابی و توزیع ریزگردها در محیط قلمداد می‌شود (Kaufman et al., 2002).

تصاویر ماهواره‌ای یکی از بهترین منابع بررسی مشخصات و مسیر حرکت ریزگردهاست (Myhre et al., 2005). ماهواره‌های سنجنش از دور مزایای زیادی در پایش غبار دارد که به دلیل پوشش مکانی و زمانی فوق‌العاده آن‌هاست. در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده، تصاویر ماهواره‌ای پهنای وسیعی را پوشش می‌دهد و به دلیل قابلیت تکرار، ابزار بسیار مهمی برای کنترل ریزگردها و انتقال آن‌هاست (Wang and Sunder, 2003). سنجنده‌های ماهواره توانایی ثبت سیگنال‌های تابشی از هواویزها و سطوح مختلف زمین در باندهای مختلف طیفی را دارد. سیگنال باندهای مختلف برای آشکارسازی پدیده‌های غبار ترکیب می‌شود و با استفاده از این ترکیبات، متغیرهایی را برای کمی‌سازی بار غبار و اندازه ذرات غبار می‌توان استخراج کرد (Ackerman et al., 1997). در روش‌های گوناگون آشکارسازی معمولاً از مقادیر بازتابندگی در باندهای مرئی و دمای درخشندگی در باندهای فرورسرخ استفاده می‌شود. اختلاف مقادیر دمای درخشندگی در باندهای مختلف، راه مناسبی برای تشخیص پدیده ریزگردها از دیگر پدیده‌هاست. موارد استفاده از داده‌های ماهواره در مطالعات ریزگردها شامل موارد زیر است پایش لحظه‌ای توفان‌های ریزگرد به وسیله داده‌های ماهواره‌ای، استخراج پارامترهای سطح زمین و جو برای مدل‌سازی ریزگردها، استخراج کمیت‌های فیزیکی در ارزیابی

نوری هواویزها، نمای آنگستروم (α) و ضریب تیرگی آنگستروم (β)، همچنین داده‌های هواشناختی شامل فشار، دما، رطوبت، تندی و جهت باد و داده‌های مربوط به تمرکز PM 10 در دوره مطالعاتی دسامبر ۲۰۰۹ تا سپتامبر ۲۰۱۰ منطقه زنجان استفاده شد که دارای اقلیمی خشک، به‌ویژه در تابستان است. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی با مقادیر پیش‌بینی شده در روش همبستگی ساده چند متغیره و شبکه عصبی به ترتیب ۰/۶۲ و ۰/۸۲ است. در مقایسه با روش همبستگی ساده چندمتغیره روش مناسبی در برآورد تمرکز PM 10 است. از این‌رو، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در برآورد ذرات معلق مناسب تلقی شد.

محمدی نژاد و همکاران (۱۳۹۳) نقشه توزیع مکانی ذرات کمتر از PM 10 استان خوزستان را در دو بازه زمانی ساعتی و روزانه با استفاده از مدل رگرسیون خطی تهیه کردند. به‌منظور برآورد PM 10 از محصول ضخامت نوری ذرات معلق، سنجنده مودیس، همچنین داده‌های ایستگاه زمینی سنجش آلودگی هوا و دید افقی ایستگاه هواشناسی شهر اهواز در سال ۲۰۰۹ استفاده کردند. نتایج حاصل در اندازه‌گیری‌های مودیس در تحقیقات آلودگی هوا دقت خوبی را نشان داد. نتایج آن بیانگر این مسئله است که بازه زمانی ساعتی، ضریب تعیین بالاتری (۰/۹۰٪) نسبت به بازه روزانه (۰/۷۶٪) دارد. نتایج آن‌ها نشان داد که در مقادیر کم ذرات معلق (حدود ۱۰۰ میکروگرم بر مترمکعب) همبستگی معناداری بین ذرات معلق و متغیرهای AOD دیده نمی‌شود، در حالی که در مقادیر بالای ذرات معلق همبستگی قوی‌تر است. تعیین پراکندگی ریزگردها و مواد معلق با روش‌های معمولی به‌علت گستردگی، همچنین متغیربودن آن، کاری هزینه‌بر و وقت‌گیر و گاه ناممکن است. در سال‌های اخیر استفاده از فناوری ماهواره‌ای و علم سنجش از دور در دریافت و تحلیل پارامترهای هواشناسی و اقیانوس‌شناسی گسترش روزافزونی یافته است (ذوالفقاری و عابدزاده، ۱۳۸۴).

بود. در نتیجه مطالعات آن‌ها نشان داد که همبستگی بالایی میان داده‌های استخراج‌شده از باندهای ۰/۵۵۳ و ۰/۸۵۵ میکرومتر با داده‌های ایستگاه‌های زمینی وجود دارد.

Wei و همکاران (۲۰۱۴) عمق نوری ریزگردها را در دریاچه بایکال با استفاده از داده‌های سنجنده مودیس و الگوریتم ذرات معلق ناسا بازیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقادیر عمق نوری هواویزهای استخراج‌شده از عمق نوری ایستگاه آرنونت بیشتر است و ضریب همبستگی ۰/۲۲ به دست آمد. پس از حذف عمق‌های نوری بزرگ‌تر از ۱، نتایج تحلیل رگرسیون در عمق‌های نوری مشاهده شده و سنجنده مودیس میزان همبستگی ۰/۹ را ارائه داد. اما، با توجه به اینکه بایکال در عرض جغرافیایی بالاست (بالاتر از ۵۰ درجه سانتی شمالی)، مدت زمان تابش آفتاب کوتاه است و تابش خورشیدی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در نتیجه بازیابی متأثر است.

Smirnov و همکاران (۲۰۰۲) میزان عمق نوری ذرات معلق سنجنده مودیس را با استفاده از ایستگاه آرنونت بحرین در خلیج فارس در ماه مارس تا ژوئیه ۱۹۹۸ ارزیابی کردند. آن‌ها در این مطالعه از داده‌های مربوط به باندهای ۰/۴۶۶، ۰/۶۴۴، ۰/۸۵۵ و ۱/۲۴۳ میکرومتر استفاده کردند. همبستگی قوی‌ای در عمق نوری ریزگردهای شدید و مقدار بخار آب در ستون جوی به‌دست آمد (ضریب همبستگی ۰/۸۲) و پارامتر آنگستروم بالاتر از ۰/۷ محاسبه شد. در هوای صاف و عاری از ریزگرد ضریب همبستگی ۰/۴۵ با آنگستروم کمتر از ۰/۷ به‌دست آمد. آن‌ها نتیجه گرفتند که در شرایط وجود ریزگردها آلودگی پراکندگی در طول موج‌های مختلف کاهش می‌یابد.

خوش‌سیما و همکاران (۱۳۹۴) تمرکز روزانه ذرات معلق با قطر کمتر از PM 10 را با استفاده از نمایه‌های نورشناختی حاصل از داده‌های سنجش از دور و پراسنج‌های هواشناختی تخمین زدند. در این پژوهش از داده‌های حاصل از سنجنده مادیس (ماهواره‌های آکوا و ترا) و داده‌های دستگاه نورسنج خورشیدی شامل عمق

تحقیق و موارد مشابه استفاده و با تجهیزات کامل و برنامه‌های مدون این تحقیقات به صورت گسترده و در زمان‌های مختلف از نظر فصول و سال‌ها انجام پذیرد تا بتوان به بعضی داده‌های لازم منطقه‌ای دست یافت. اگر هزینه‌ها و مقدار وقت صرف شده محاسبه شود، این نظریه تأیید می‌شود که استفاده از کاربری ماهواره در شناخت بیشتر دریاها حتی از نظر بیولوژیکی و صید آبیان و پیش‌بینی بلایای طبیعی فوق‌العاده مفید است. بر اساس همین ضرورت، هدف نهایی پژوهش حاضر به کارگیری فناوری سنجنش از دور و استفاده از تصاویر سنجنده مودیس در تخمین عمق نوری ریزگردها در سطح خلیج فارس و برآورد رابطه همبستگی خطی میان ریزگردهای جوی با اندازه‌گیری‌های زمینی است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. 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 نصف النهار گرینویچ قرار دارد. از نظر آب و هوایی، شرایط خشک و نیمه‌استوایی دارد. عریض‌ترین بخش آن ۱۸۰ مایل و عمیق‌ترین نقطه آن ۹۳ متر در ۱۵ کیلومتری تنب بزرگ، و کم‌عمق‌ترین بخش آن در غرب بین ۱۰ تا ۳۰ متر است.

در تحقیق حاضر، برای تعیین پراکندگی ریزگردها در دریا از داده‌های ماهواره‌ای و از تصاویر ماهواره‌ای EOS سنجنده مودی استفاده شد. برآورد پراکندگی ریزگردها از تصاویر ماهواره‌ای یکی از کاربردهای این داده‌هاست. این برآورد که به صورت غیرمستقیم و بر اساس خصوصیات حرارتی و تابشی اجسام و قوانین فیزیکی است، به روش‌های مختلف و از داده‌های ماهواره‌ای تصاویر باندهای مختلف صورت می‌گیرد. اما، در این بین، سنجنده مودیس ماهواره EOS متداول‌ترین و گسترده‌ترین کاربرد را در این زمینه، به خصوص تعیین پراکندگی ریزگردها در دریا (آب)، دارد.

تغییرات زمانی و مکانی ریزگردهای پهنه آبی نقش مهمی در فعالیت‌های سیستم جوی، زندگی آبیان، جریان‌های دریایی، میزان شوری و دیگر خصوصیات آب دریاها و دریاچه‌ها دارد (رئیس‌پور، ۱۳۸۶). در سال‌های اخیر، استفاده از فناوری ماهواره‌ای و علم سنجنش از دور در دریافت و تحلیل پارامترهای هواشناسی و اقیانوس‌شناسی گسترش روزافزونی یافته است. داده‌های ماهواره‌ای به عنوان ارزش‌های عددی انرژی حاصل از پدیده‌های زمینی به سنجنده، اهمیت روزافزونی در استخراج اطلاعات منابع زمینی دارد (زبیری و مجد، ۱۳۸۸). با توجه به اشراف ایران به بخش عظیمی از آب‌های خلیج فارس و دریاچه خزر لازم است که از این



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

تغییرات مکانی باندهای ۰/۶۴۴، ۰/۸۵۵، ۰/۴۶۶، ۰/۵۵۳، ۰/۲۴۳ و ۱/۳۸ میکرومتر به ترتیب باید بزرگ‌تر از ۰/۰۲۵ و ۰/۰۳ باشد. همچنین، مقادیر مطلق این باندها باید از ۰/۴ و ۰/۲۵ بزرگ‌تر باشد (Martin et al., 2002). این الگوریتم مقادیر انحراف معیار را در گروه‌های ۳×۳ پیکسل محاسبه می‌کند. اگر انحراف معیار بزرگ‌تر از ۰/۰۲۵ در باندهای ۰/۶۴۴، ۰/۸۵۵، ۰/۴۶۶، ۰/۵۵۳، ۱/۲۴۳ میکرومتر باشد، گروه ۳×۳ پیکسل در تمامی باندها ماسک می‌شود. این بدین معناست که بدون توجه به اندازه تفکیک مکانی، بازتاب در تمامی باندها به صورت ترکیب شده با بازتاب ابرها در نظر گرفته می‌شود و مناطقی به وسعت ۱/۵×۱/۵ کیلومتر از محاسبات در تمام باندها حذف می‌شود. در این الگوریتم آزمون آستانه انعکاسی باند مرئی با استفاده از باند ۰/۴۶۶ میکرومتر انجام می‌گیرد. اگر ارزش پیکسل از ۰/۴ بیشتر باشد، این پیکسل ابر در نظر گرفته می‌شود و در سایر باندها نیز ماسک می‌شود. با تعیین ماسک ابر، ارزش پیکسل‌های دارای ابر برابر با صفر می‌شود و با ضرب این ماسک در سایر باندها، اثر ابر در سایر باندها نیز از بین می‌رود. ماسک رسوبات از مجموعه داده‌های MOD35 دریافت شده از سایت ناسا^۳ nv باندهای ۰/۶۴۴، ۰/۸۵۵، ۰/۴۶۶، ۰/۵۵۳، ۱/۲۴۳ و ۱/۳۸ برای تصاویر مورد مطالعه به دست آمد. با توجه به این داده‌ها، ارزش پیکسلی مربوط به خشکی‌ها و سواحل کم موجود در تصویر که ارزشی مشابه خشکی دارد برابر با صفر می‌شود و با ضرب این ماسک در سایر باندها، اثر رسوبات در سایر باندها نیز از بین می‌رود. پس از ضرب کردن ماسک در باند ۰/۲۵ کمترین و ۰/۲۵ بیشترین ارزش‌های باقی‌مانده یعنی معادل ۰/۵۰ ارزش‌ها حذف می‌شود و از این طریق خطای مربوط به پیکسل‌های دارای ارزش خشکی از بین می‌رود. بازتاب در بالای جو تابعی از ترکیب مناسبی از تابش‌ها در سامانه سطح-جو است. این تابش در طول موج خاص ρ_{λ} و در زوایای معینی از زاویه سوسوی خورشید θ_0 ، زاویه دید سنجنده θ و آزیموت بازتابندگی ϕ ، متشکل از تابش

۲.۲. مراحل تعیین غلظت ریزگردها از تصاویر ماهواره‌ای برای بازیابی خواص ذرات معلق 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 از نرم‌افزار متلب^۲ استفاده شد. هدف از تهیه این برنامه شبیه‌سازی بازتاب ثبت شده در سنجنده با استفاده از جدول‌های LUT است. کل فرایند پردازش در شبکه‌های ۵×۵ و پیکسل‌ها با توان تفکیک ۵۰۰ متر (۱۰ کیلومتر در نادیر) انتخاب شد. قبل از اجرای الگوریتم، بازتاب اندازه‌گیری شده با مودیس در بالای جو، در شش طول موج به‌ازای تمامی 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 متناسب به آن پیکسل اختصاص داده می‌شود. سپس، با در نظر گرفتن ضریب غلظت، مقادیر عمق نوری به غلظت غبار تبدیل می‌شود. برای تفکیک اثر پدیده‌های مختلف نظیر ابرها، محیط‌های آبی و برف از سیگنال هواویزها از ماسک‌های مختلف استفاده شد. آثار اتمسفری و آثار گازهای موجود در جو (ازن، بخار آب و دی‌اکسید کربن)، همچنین اصلاحات جذب و بازتاب نیز روی تصاویر اجرا شد.

اعتبارسنجی داده‌ها نیز با استفاده از داده‌های عمق نوری ریزگردها اندازه‌گیری شده با دستگاه‌های نورسنج خورشیدی در ایستگاه‌های آثرون انجام شد. در نهایت، عمق نوری ریزگردها با استفاده از رابطه‌های موجود محاسبه شد. در این برنامه ماسک ابر براساس مقادیر بازتاب و انحراف معیار در باندهای ۰/۶۴۴، ۰/۸۵۵، ۰/۴۶۶، ۰/۵۵۳، ۱/۲۴۳ و ۱/۳۸ محاسبه شد. علاوه بر این، برای تعیین اهداف تاریک از باندهای ۰/۶۴۴، ۰/۸۵۵، ۰/۴۶۶، ۰/۵۵۳، ۱/۲۴۳ و ۱/۳۸ میکرومتر استفاده شد. استفاده از این باندها اطلاعات مفیدی را در مورد ویژگی‌های انواع ابرها به دست می‌دهد. در این صورت

و با در نظر گرفتن شرایط زیر مقادیر عمق نوری محاسبه می‌شود.

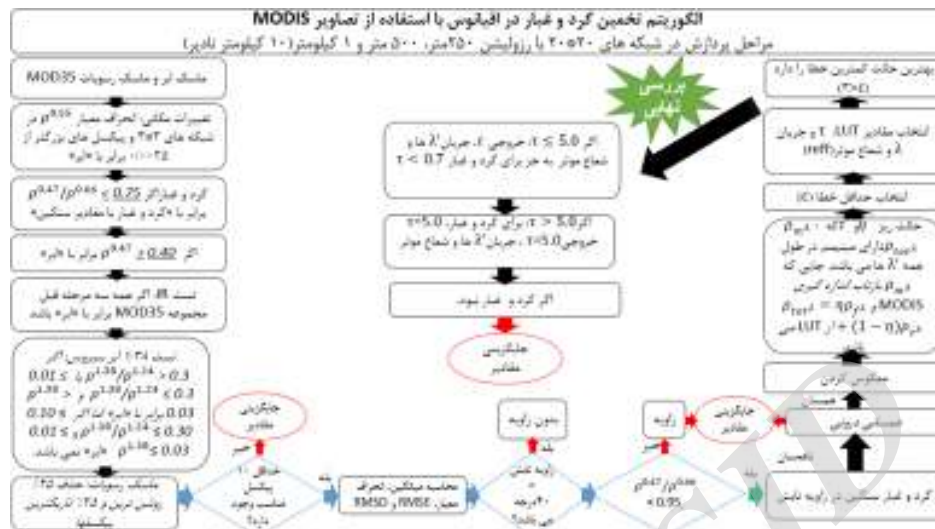
$$\rho_{\lambda}^{MODIS} - \rho_{\lambda}^{TOA} = 0 \quad (2)$$

که ρ_{λ}^{MODIS} بازتاب ثبت شده در باندهای مختلف سنجنده مودیس و ρ_{λ}^{TOA} بازتاب محاسبه شده در بالای جو است. نظریه و راهبرد الگوریتم بازیابی ذرات معلق در اقیانوس را Tanré و همکاران (۱۹۹۷)، Levy و همکاران (۲۰۰۶) و Remer و همکاران (۲۰۰۵) تشریح کرده‌اند. در الگوریتم تعیین عمق نوری ذرات معلق (AOD متناسب با تعیین کل ذرات معلق در ستون عمودی) در تعیین توزیع اندازه ذرات از نور محیط استفاده می‌شود. سازوکار 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 سازوکار انعکاس طیفی جداول LUT با انعکاس طیفی سنجنده مودیس در پیدا کردن بهترین حالت (حداقل مربعات خطا) مقایسه شده است و بهترین برازش و میانگینی از مجموعه‌ای از بهترین حالات ممکن را ارائه می‌دهد (Tanré et al., ۱۹۹۷). حذف پوشش ابرها و رسوبات، به صورت ویژه در بازیابی داده‌های ریزگردها در طول انعکاس، با بررسی جدول LUT امکان‌پذیر است. با این تغییرات، الگوریتم غلظت ریزگردها را در سطح دریاها محاسبه می‌کند. تمام مراحل در وضوح ۵۰۰ متر (۱۰ کیلومتر در نادیر) در شبکه‌های ۲۰*۲۰ پیکسل استفاده می‌شود. کل پیکسل‌های زمین با توجه به داده‌های مجموعه MOD35 و ماسک ابر و ماسک رسوبات به رنگ روشن می‌شود. ماسک ابرها و رسوبات و انتخاب پیکسل Remer و همکاران (۲۰۰۵) در شکل ۲ توصیف شده است. قبل از بازیابی اطلاعات اقیانوس، میزان انعکاس به صورت عددی در شبکه‌های ۲۰*۲۰ پیکسلی (۱۰ کیلومتر در نادیر با وضوح ۵۰۰ متر) سازماندهی و برای گازهای موجود در جو (بخار آب، دی‌اکسید کربن و ازن) تصحیح شد.

پراکنده شده در جو بدون دخالت سطح (که تابش مسیر جو نامیده می‌شود)، بازتاب ناشی از سطح که به طور مستقیم به بالای جو می‌رسد (تابعی از سطح) و بازتاب خارج از زاویه دید سنجنده (تابعی از محیط) است. جزء سوم یعنی بازتاب خارج از زاویه دید سنجنده قابل اغماض است. با در نظر گرفتن شرایط معینی از هواویزها می‌توان جدول‌های LUT را با استفاده از مدل‌های انتقال تابش و نظریه مای به دست آورد. هدف از تهیه این جدول‌ها تعیین بهترین شرایط و ویژگی‌های هواویزهاست که کمترین اختلاف را با بازتاب ثبت شده توسط سنجنده دارد. هر یک از پارامترهای رابطه (۱) در عمق‌های نوری مختلف (۰، ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۲ و ۳) محاسبه می‌شود.

$$\beta_{tot}(\lambda) = \beta_{abs}(\lambda) + \beta_{scat}(\lambda) \quad (1)$$

بازتاب اندازه‌گیری شده در بالای جو در نه زاویه سرسوی خورشیدی (۰، ۶، ۱۲، ۲۴، ۳۶، ۴۸، ۵۴، ۶۰ و ۶۶ درجه)، شانزده زاویه دید سنجنده (۰ تا ۸۸/۵ با فواصل ۶ درجه) و شانزده زاویه آزیموت بازتابندگی (۰ تا ۱۸۰ با فواصل ۱۲ درجه) محاسبه می‌شود. این محاسبات در اندازه ذرات مختلف و عمق‌های نوری مختلف انجام می‌گیرد و جدول‌های LUT تشکیل می‌شود. ذکر این نکته لازم است که پارامترهای مذکور با فرض بازتاب سطحی صفر محاسبه و در جدول‌ها وارد می‌شود. قسمت اول سمت راست معادله ۱-۱ یعنی بازتابندگی مسیر را تشکیل می‌دهد. هنگامی که بازتاب سطحی وجود دارد، قسمت دوم سمت راست معادله فوق غیر صفر خواهد بود. شار به‌هنگامی که فرودی تنها تابعی از جو است در حالی که ضریب پس‌پراکنش جو و قابلیت عبور کلی، تابعی از سطح و جو است. این پارامترها با استفاده از مدل انتقال تابشی به دست می‌آید. دیگر پارامترهای موجود در جدول‌های LUT شامل ضرایب پراکنش و میرایی و متغیرهای تشریح‌کننده خصوصیات فیزیکی (شعاع هندسی، انحراف معیار هندسی، شعاع ژئومتری) و ضریب غلظت توده است. سپس، با استفاده از رابطه (۱)، بازتاب در بالای جو محاسبه می‌شود



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

که در آن θ_s ، θ_v و ϕ به ترتیب زاویهٔ سرسوی خورشیدی، زاویهٔ سرسوی ماهواره‌ای و زاویهٔ آزمون نسبی (بین خورشید و ماهواره) است. توجه کنید که انعکاس زاویه تابش^۵ مطابق با $\theta_{gtint} = 0$ است. اگر $\theta_{gtint} > 40^\circ$ ، 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 محدودهٔ لازم به‌کار برد. طبق مطالعات Levy (۲۰۰۶)، Remer (۲۰۰۵) و Tanré (۱۹۹۶)، مشخص شد که درخشندگی طیفی سنجندهٔ مودیس (۲/۱۳-۰/۵۵ میکرومتر) دارای تقریباً سه قطعه از اطلاعات مستقل دربارهٔ بازیابی ذرات معلق و خصوصیات ابعاد آن‌هاست. با استفاده از برخی فرضیه‌ها، از این الگوریتم سه پارامتر اصلی استخراج می‌شود: عمق نوری ذرات معلق (AOD) در یک طول موج ($\tau_{0.55}^{tot}$)، پارامتر وزن‌دهی انعکاس (FW) و شعاع مؤثر (r_{eff}) در یک طول موج ($\eta_{0.55}$)، که نسبتی از توزیع اندازهٔ ذرات معلق است. شعاع مؤثر تنها یکی از حالات ریز (F) و درشت (c) ذرات معلق را برای ترکیب با پارامتر FW نشان می‌دهد. جداول LUT دارای چهار حالت ریز و پنج حالت

قسمت اولیهٔ 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 and Tanré 2002). همچنین، رسوبات زیرآب در آب‌های کم‌عمق (در نزدیکی خطوط ساحلی) در پردازش ریزگردها در اقیانوس‌ها باعث ایجاد خطا می‌شود، چرا که رسوبات این مناطق خصوصیتی شبیه به سطح زمین دارد. بنابراین، ماسک رسوبات علاوه بر ماسک ابر استفاده شد (Li et al., 2005). پیکسل‌های باقی‌مانده از ماسک ابر و ماسک رسوبات از روشن‌ترین تا تاریک‌ترین پیکسل مرتب و ۲۵٪ تیره‌ترین و درخشان‌ترین پیکسل حذف شد. بدین وسیله ۵۰٪ از داده‌های میانه حذف شد. اگر حداقل ده پیکسل مناسب در باند مورد مطالعه و حداقل سی پیکسل مناسب در پنج باند باقی‌مانده وجود داشت، متوسط بازتاب و انحراف استاندارد در پیکسل‌های باقی‌مانده در هر شش طول موج مربوط محاسبه می‌شود. الگوریتم محاسبهٔ زاویهٔ تابش^۴ که نشان‌دهندهٔ زاویهٔ بازتاب، در مقایسه با زاویهٔ بازتاب اینهٔ طبی است، به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\theta_{gtint} = \cos^{-1}((\cos\theta_s \cos\theta_v) + (\sin\theta_s \sin\theta_v \cos\phi)) \quad (3)$$

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 $\tau_{0.55}^{tot}$ است. الگوریتم برای هر بیست ترکیب از حالات ریز و درشت، یک جفت از $\tau_{0.55}^{tot}$ و $\eta_{0.55}$ را پیدامی‌کند. هنگامی که یک حالت مناسب یافت شد، حالت‌هایی که در عمل از مدل ذرات معلق مشتق شده و انواع مختلف پارامترهای توزیع اندازه ذرات را محاسبه می‌کند، شامل عمق نوری طیفی، شعاع مؤثر و جزآن. برای ارزیابی نتایج از داده‌های روزانه عمق نوری ذرات معلق اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های آئرونت خلیج فارس استفاده شد که موقعیت جغرافیایی آن در جدول ۲ ذکر شده است.

درشت است، اگرچه LUT در بخشی از یک طول موج با ضخامت نوری واحد تعریف شده است و پارامترهای هر یک از مدل‌ها بسته به طیفی منحصر به فرد برای آن مدل تعریف شده که بر مقادیر بازیابی شده از $\tau_{0.55}^{tot}$ جمع شده است، می‌توان برای تعیین ضخامت نوری در طول موج‌های دیگر نیز به کار رود. بازیابی اطلاعات مستلزم یک حالت ریز و یک حالت درشت است. برای تعیین بازیابی، ترکیباتی از حالات ریز و درشت و مشارکت نسبی نور آن‌ها که بهترین حالت شبیه‌سازی انعکاس طیفی سنجنده مودیس مورد نیاز است، انعکاس از هر حالت ترکیبی از η به عنوان پارامتر وزن‌دهی به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\rho_{\lambda}^{LUT}(\tau_{0.55}^{tot}) = \eta \rho_{\lambda}^f(\tau_{0.55}^{tot}) + (1 - \eta) \rho_{\lambda}^c(\tau_{0.55}^{tot}) \quad (4)$$

جدول ۲. موقعیت ایستگاه‌های آئرونت مورد مطالعه

ردیف	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	دالما	۵۲۱۹۵۵	۲۴۳۰۰۷
۲	صیر بو نعیر	۵۴۱۳۵۸	۲۵۱۳۰۱
۳	اووم الکوائین	۵۵۳۹۲۸	۲۵۳۱۵۸
۴	مارکو	۵۴۳۹۳۲	۲۴۴۱۶۰
۵	بحرین	۵۰۳۶۳۲	۲۶۱۲۲۸
۶	مصفح	۵۴۲۸۰۱	۲۴۲۲۱۹
۷	ابو البخوش	۵۳۰۸۴۵	۲۵۲۹۴۲

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

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 داده‌هاست.

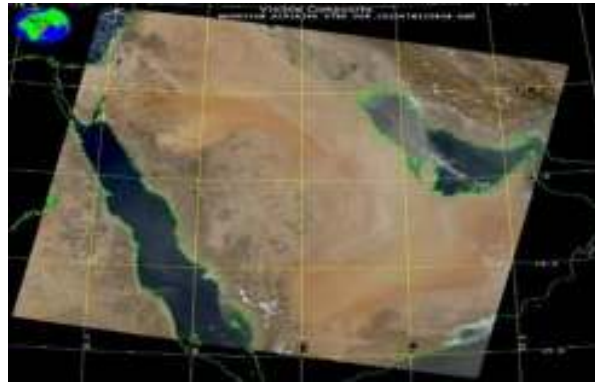
۳. بحث و نتایج

شکل ۳ تصویر RGB مربوط به روز ۲۳ تیر ۱۳۹۳ را نشان می‌دهد و شکل ۴ عمق نوری ذرات معلق شبیه‌سازی شده را در باندهای ۱ (۰/۶۴۴)، ۲ (۰/۸۵۵)، ۳ (۰/۴۶۶)، ۴ (۰/۵۵۳)، ۵ (۱/۲۴۳) و ۶ (۱/۶۴۳) در حوزه خلیج فارس و نحوه پراکنش آن را نشان می‌دهد.

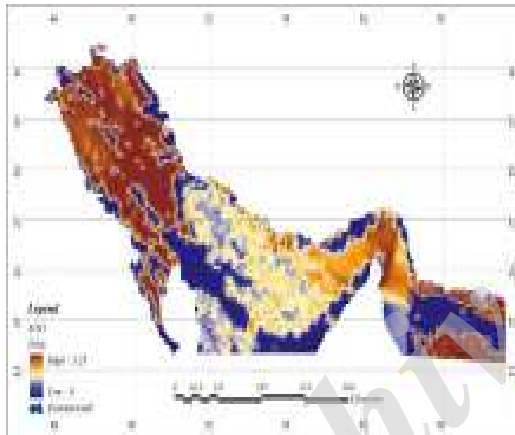
داده‌های متناظر با این ایستگاه‌ها در باندهای ۰/۶۴۴، ۰/۸۵۵، ۰/۴۶۶، ۰/۵۵۳، ۱/۲۴۳ و ۱/۶۴۳ از تصاویر استخراج شد. عمق نوری به دست آمده از تصاویر با مقادیر به دست آمده این باندها در ایستگاه‌های آئرونت مقایسه شد. در این تحلیل‌ها از آزمون همبستگی پیرسون و شاخص‌های آماری میانگین، انحراف معیار، همبستگی، میانگین مربعات خطا (RMSE) و اختلاف میانگین مربعات خطا (RMSD) استفاده شد.

$$RMSD = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(m_i - \bar{m}) - (o_i - \bar{o})]^2 \quad (5)$$

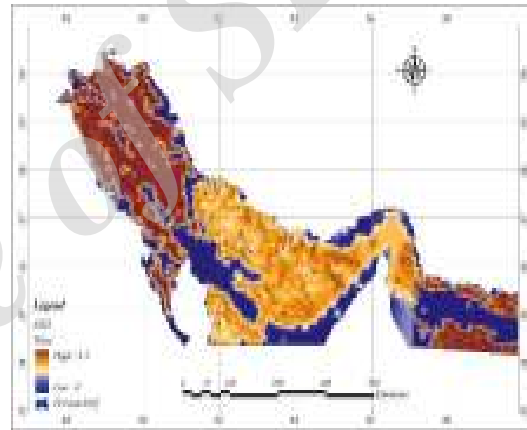
$$RMSE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(m_i - o_i)]^2 \quad (6)$$



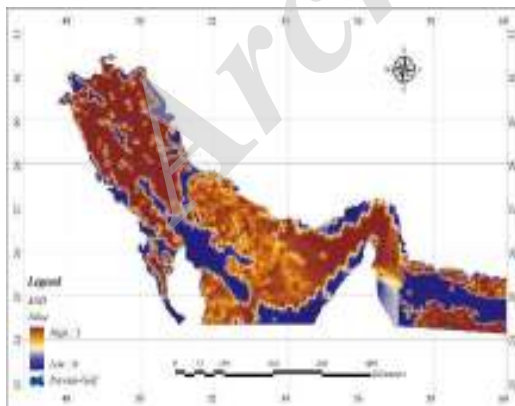
شکل ۳. تصویر RGB تاریخ ۲۳ تیر ۱۳۹۳



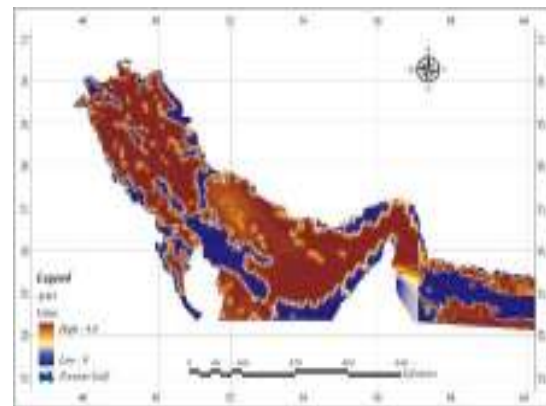
باند ۲ (۰/۸۵۵ میکرومتر)



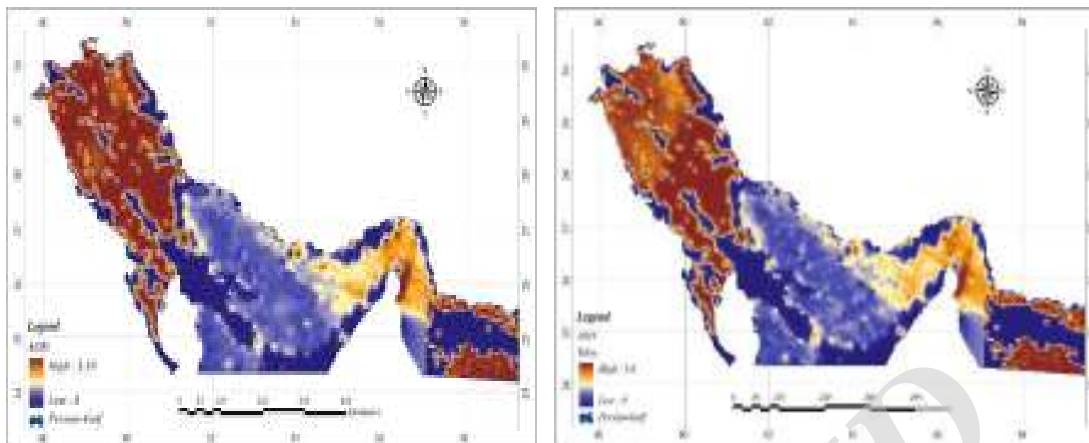
باند ۱ (۰/۶۴۴ میکرومتر)



باند ۴ (۰/۵۵۳ میکرومتر)



باند ۳ (۰/۴۶۶ میکرومتر)



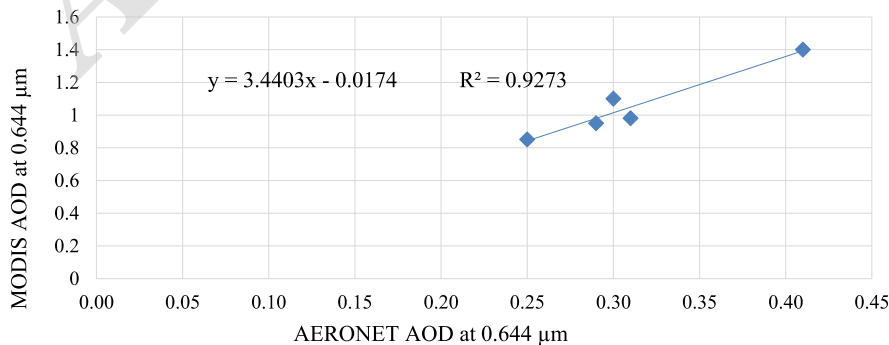
باند ۶ (۱/۶۴۳ میکرومتر)

باند ۵ (۱/۲۴۳ میکرومتر)

شکل ۴. عمق نوری (AOD) شبیه‌سازی شده در حوزه خلیج فارس برای توفان گرد و غبار روز ۲۳ تیر ۱۳۹۳

حالت را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه جهت باد به سمت جنوب ایران است، غلظت ریزگرد در این منطقه افزایش می‌یابد. جدول ۳ تا ۸ خلاصه آماری داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده و شاخص‌های ارزیابی را نشان می‌دهد. براساس شکل ۴ می‌توان بیان کرد که مدل توانایی مناسبی در نشان دادن تغییرات داده‌های مشاهداتی دارد. با توجه به شکل ۵ تا ۱۰ مشاهده می‌شود که نمودارهای پراکنش به نیمساز ربع اول و سوم نزدیک‌تر است.

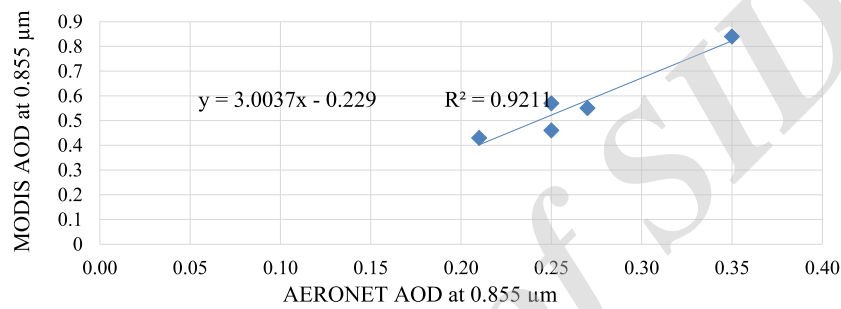
شکل ۵ تا شکل ۱۰ نمودار ارزیابی نتایج شبیه‌سازی شده را با داده‌های به‌دست‌آمده در ایستگاه‌های آثرون‌ت دالما، مارکو، صیر بو نویر و اووم ال‌کوبین در روز ۲۳ تیر ۱۳۹۳ نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۴، باند ۱ (۰/۶۴۴ میکرومتر)، باند ۲ (۰/۸۵۵)، باند ۵ (۱/۲۴۳) و باند ۶ (۱/۶۴۳) حالت مناسب و صحیحی از شبیه‌سازی و همبستگی بالایی را برای میزان غلظت ذرات در این روز نشان می‌دهد. باندهای ۱/۲۴۳ و ۱/۶۳۲ میکرومتر بهترین



شکل ۵. عمق نوری (AOD) اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در باند ۱ (۰/۶۴۴ میکرومتر)

جدول ۳. شاخص‌های آماری در باند ۱ (۰/۶۴۴ میکرومتر)

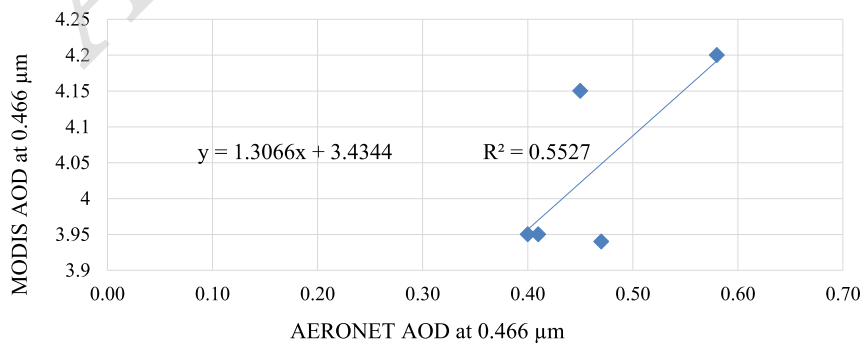
شاخص	اندازه‌گیری شده	مدلسازی شده
میانگین	۰/۳۱	۱/۰۶
انحراف معیار	۰/۰۶	۰/۲۱
همبستگی		۰/۹۶
RMSE		۰/۷۶
RMSD		۰/۱۴



شکل ۶. عمق نوری (AOD) اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در باند ۲ (۰/۸۵۵ میکرومتر)

جدول ۴. شاخص‌های آماری در باند ۲ (۰/۸۵۵ میکرومتر)

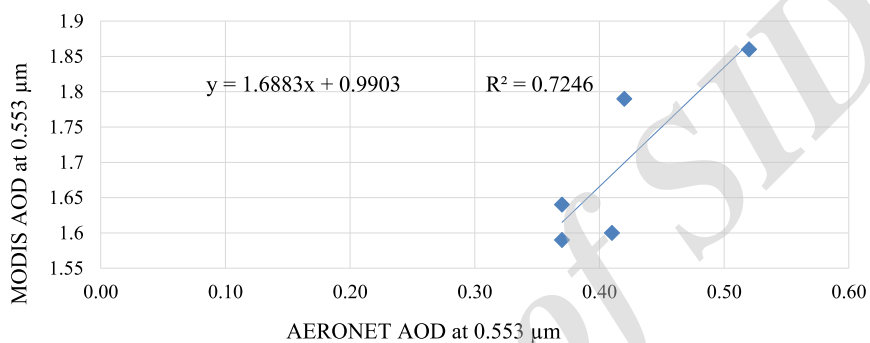
شاخص	اندازه‌گیری شده	مدلسازی شده
میانگین	۰/۲۷	۰/۵۷
انحراف معیار	۰/۰۵	۰/۱۶
همبستگی		۰/۹۶
RMSE		۰/۳۲
RMSD		۰/۱۰



شکل ۷. عمق نوری (AOD) اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در باند ۳ (۰/۴۶۶ میکرومتر)

جدول ۵. شاخص‌هاى آمارى در باند ۳ (۰/۴۶۶ ميكرومتر)

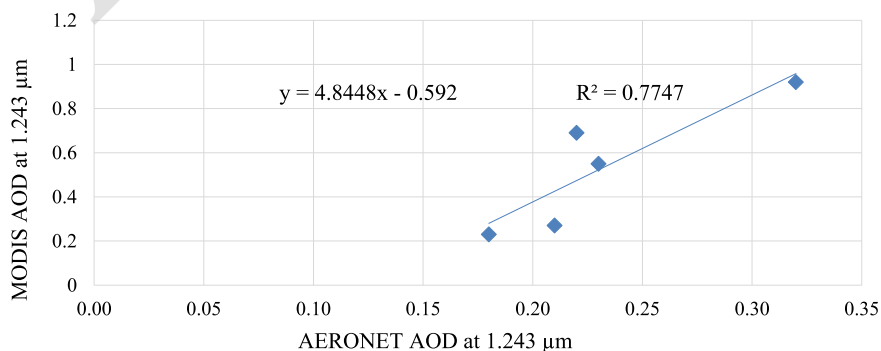
شاخص	اندازه گيرى شده	مدلسازى شده
ميانگين	۰/۴۶	۴/۰۴
انحراف معيار	۰/۰۷	۰/۱۳
همبستگى		۰/۷۴
RMSE		۳/۵۸
RMSD		۰/۰۸



شكل ۸. عمق نورى (AOD) اندازه گيرى شده و شبیه‌سازى شده در باند ۴ (۰/۵۵۳ ميكرومتر)

جدول ۶. شاخص‌هاى آمارى در باند ۴ (۰/۵۵۳ ميكرومتر)

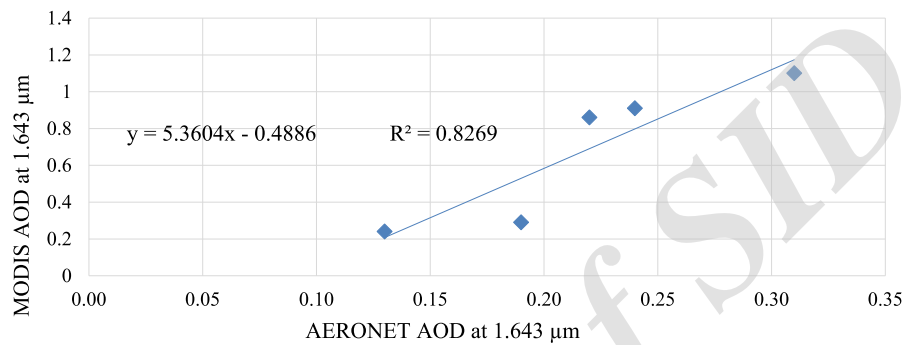
شاخص	اندازه گيرى شده	مدلسازى شده
ميانگين	۰/۴۲	۱/۷۰
انحراف معيار	۰/۰۶	۰/۱۲
همبستگى		۰/۸۵
RMSE		۱/۲۸
RMSD		۰/۰۷



شكل ۹. عمق نورى (AOD) اندازه گيرى شده و شبیه‌سازى شده در باند ۵ (۱/۲۴۳ ميكرومتر)

جدول ۷. شاخص‌های آماری در باند ۵ (۱/۲۴۳ میکرومتر)

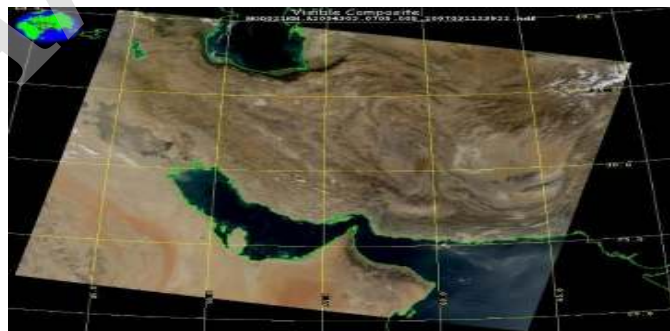
شاخص	اندازه‌گیری شده	مدلسازی شده
میانگین	۰/۲۳	۰/۵۳
انحراف معیار	۰/۰۵	۰/۲۹
همبستگی		۰/۸۸
RMSE		۰/۳۷
RMSD		۰/۲۲



شکل ۱۰. عمق نوری (AOD) اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در باند ۶ (۱/۶۴۳ میکرومتر)

جدول ۸. شاخص‌های آماری در باند ۶ (۱/۶۴۳ میکرومتر)

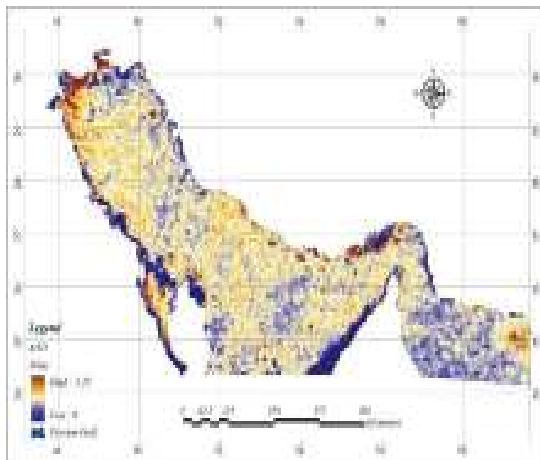
شاخص	اندازه‌گیری شده	مدلسازی شده
میانگین	۰/۲۲	۰/۶۸
انحراف معیار	۰/۰۷	۰/۳۹
همبستگی		۰/۹۱
RMSE		۰/۵۵
RMSD		۰/۳۰



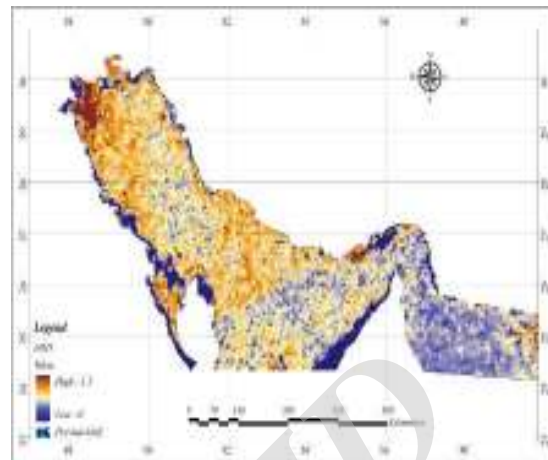
شکل ۱۱. تصویر RGB تاریخ ۷ آبان ۱۳۸۳

باند‌های ۱ (۰/۶۴۴)، ۲ (۰/۸۵۵)، ۳ (۰/۴۶۶)، ۴ (۰/۵۵۳)،
۵ (۱/۲۴۳) و ۶ (۱/۶۴۳) در حوزه خلیج فارس و نحوه
پراکنش آن را نشان می‌دهد.

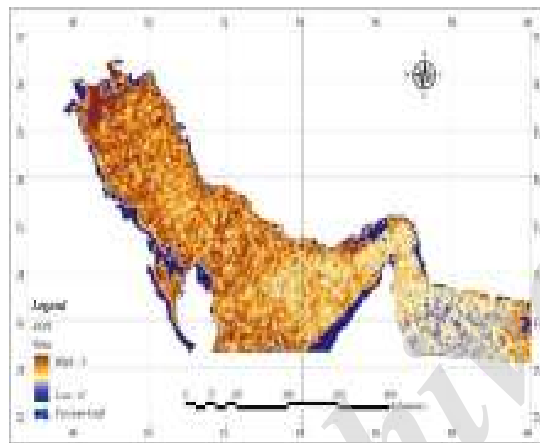
شکل ۱۱ تصویر RGB مربوط به روز ۷ آبان ۱۳۸۳ و
یک روز بدون پدیده ریزگرد و شکل ۱۲ غلظت ذرات
ریزگرد شبیه‌سازی شده و عمق نوری ذرات معلق در



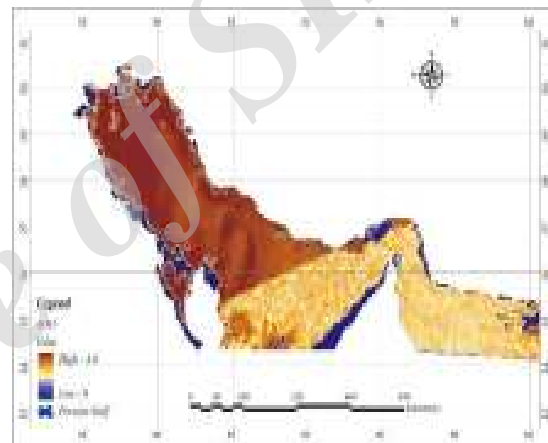
باند ۲ (۰/۸۵۵ میکرومتر)



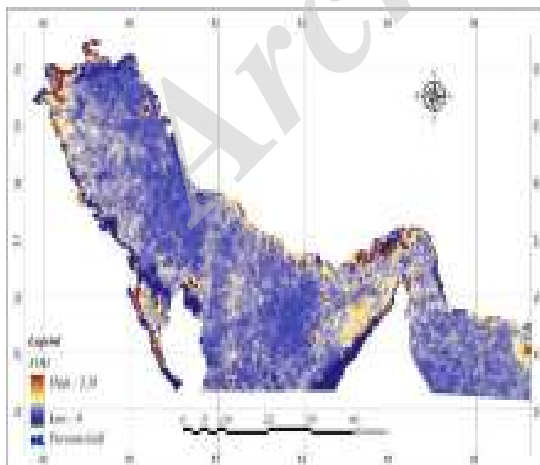
باند ۱ (۰/۶۴۴ میکرومتر)



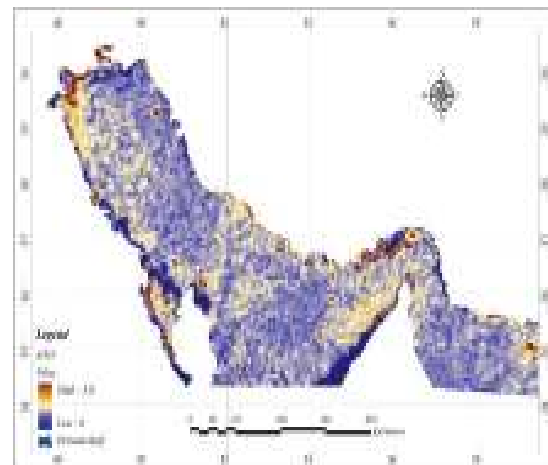
باند ۴ (۰/۵۵۳ میکرومتر)



باند ۳ (۰/۴۶۶ میکرومتر)



باند ۶ (۱/۶۴۳ میکرومتر)

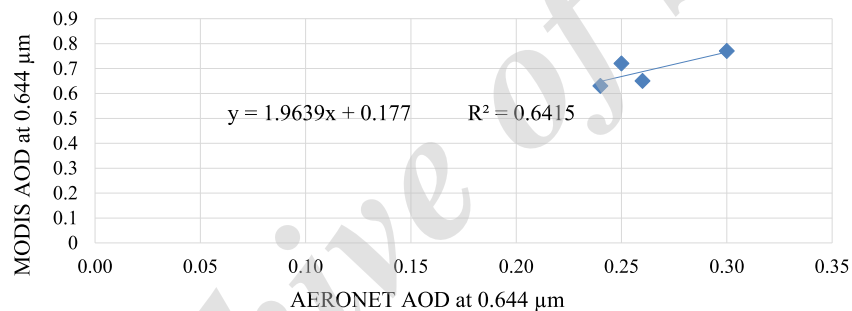


باند ۵ (۱/۲۴۳ میکرومتر)

شکل ۱۲. عمق نوری (AOD) شبیه‌سازی شده در حوزه خلیج فارس در توفان گرد و غبار روز ۷ آبان ۱۳۸۳

که نمودارهای پراکنش به نیمساز ربع اول و سوم نزدیکتر است. جدول ۱۳ و ۱۴ نشان می‌دهد که در باندهای ۱/۲۴۳ و ۱/۶۴۳ میکرومتر میانگین و انحراف معیار شبیه‌سازی‌ها به میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده نسبت به سایر باندها بسیار نزدیک‌تر است. همچنین، در این باندها همبستگی بالا (۰/۹۴ و ۰/۹۷) و میزان RMSE و RMSD کمتر از ۱ و نزدیک به صفر است. بنابراین، می‌توان بیان کرد دقت شبیه‌سازی‌ها در این باندها بسیار مناسب است و نمایی کاملاً یکسانی از ریزگردها را در مقایسه با تصویر RGB ارائه داده است.

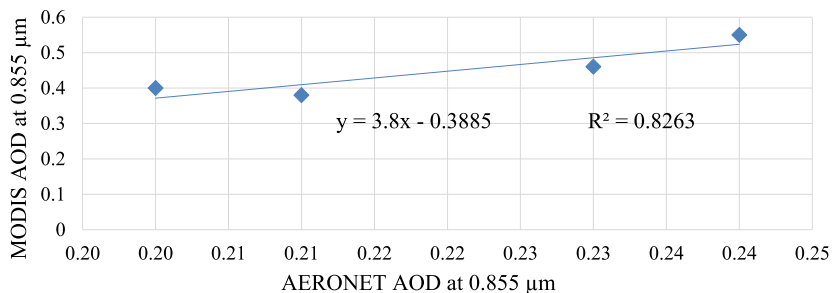
شکل ۱۳ تا ۱۸ نمودار ارزیابی نتایج شبیه‌سازی شده با داده‌های به‌دست‌آمده در ایستگاه‌های آئرونت دالما، ابو البخوش، مصفح و بحرین در روز ۷ آبان ۱۳۸۳ را نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۱۷ و شکل ۱۸ باندهای ۵ (۱/۲۴۳) و ۶ (۱/۶۴۳) مناسب‌ترین و صحیح‌ترین حالت از شبیه‌سازی است و همبستگی بالایی در میزان عمق نوری ریزگردها نشان می‌دهد. جدول ۹ تا ۱۴ خلاصه آماری داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده و شاخص‌های ارزیابی را نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۱۲ می‌توان بیان کرد که مدل توانایی مناسبی در نشان دادن تغییرات داده‌های مشاهداتی دارد. با توجه به شکل ۱۳ تا ۱۸ مشاهده می‌شود



شکل ۱۳. عمق نوری (AOD) اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در باند ۱ (۰/۶۴۴ میکرومتر)

جدول ۹. شاخص‌های آماری در باند ۱ (۰/۶۴۴ میکرومتر)

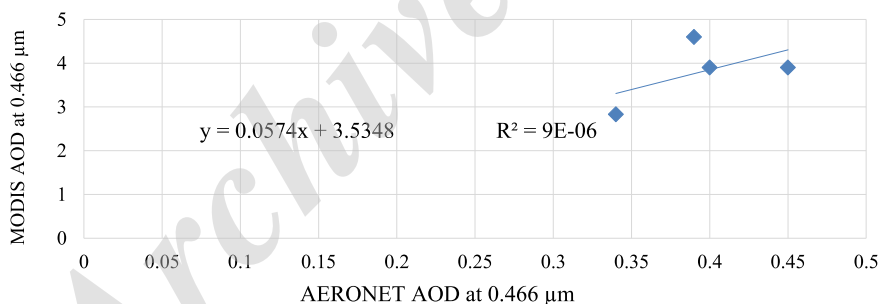
شاخص	اندازه‌گیری شده	مدلسازی شده
میانگین	۰/۲۶	۰/۶۹
انحراف معیار	۰/۰۳	۰/۰۶
همبستگی		۰/۸۰
RMSE		۰/۴۳
RMSD		۰/۰۴



شکل ۱۴. عمق نوری (AOD) اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در باند ۲ (۸۵۵ میکرومتر)

جدول ۱۰. شاخص‌های آماری در باند ۲ (۸۵۵ میکرومتر)

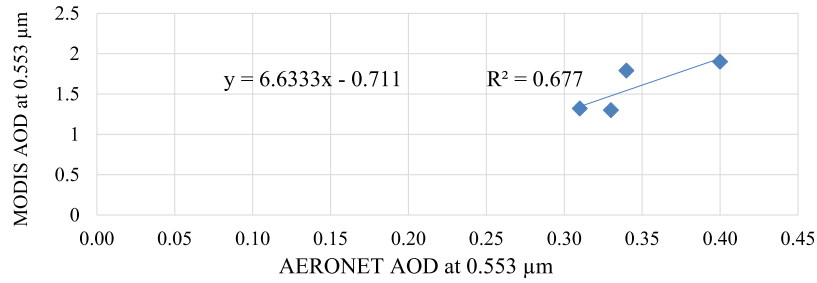
شاخص	اندازه‌گیری شده	مدلسازی شده
میانگین	۰/۲۲	۰/۴۵
انحراف معیار	۰/۰۲	۰/۰۸
همبستگی		۰/۹۱
RMSE		۰/۲۳
RMSD		۰/۰۵



شکل ۱۵. عمق نوری (AOD) اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در باند ۳ (۴۶۶ میکرومتر)

جدول ۱۱. شاخص‌های آماری در باند ۳ (۴۶۶ میکرومتر)

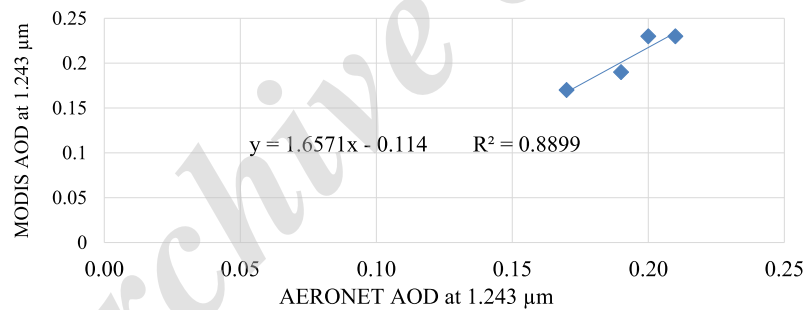
شاخص	اندازه‌گیری شده	مدلسازی شده
میانگین	۰/۴	۳/۸۱
انحراف معیار	۰/۰۵	۰/۷۳
همبستگی		۰/۵۶
RMSE		۳/۴۷
RMSD		۰/۶۱



شکل ۱۶. عمق نوری (AOD) اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در باند ۴ (۵۵۳ میکرومتر)

جدول ۱۲. شاخص‌های آماری در باند ۴ (۵۵۳ میکرومتر)

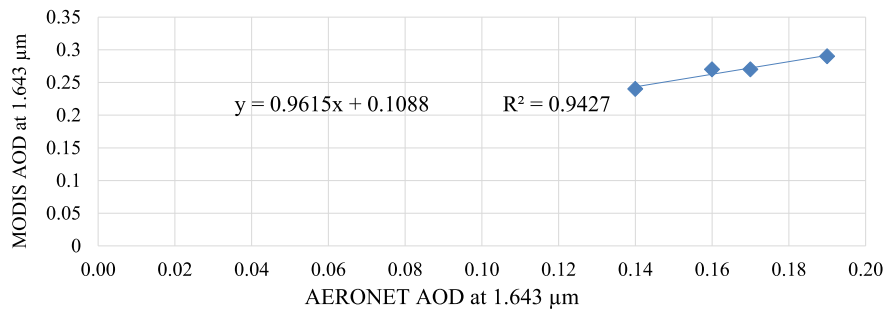
شاخص	اندازه‌گیری شده	مدلسازی شده
میانگین	۰/۳۵	۱/۵۸
انحراف معیار	۰/۰۴	۰/۳۱
همبستگی		۰/۸۲
RMSE		۱/۲۶
RMSD		۰/۲۴



شکل ۱۷. عمق نوری (AOD) اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در باند ۵ (۲۴۳ میکرومتر)

جدول ۱۳. شاخص‌های آماری در باند ۵ (۲۴۳ میکرومتر)

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



شکل ۱۸. عمق نورى (AOD) اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در باند ۶ (۱/۶۴۳ میکرومتر)

جدول ۱۴. شاخص‌های آماری در باند ۶ (۱/۶۴۳ میکرومتر)

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

۴. بحث و نتیجه‌گیری

Levy و همکاران (۲۰۱۵) در توصیف الگوریتم بازیابی هواویزها مطالعه‌ای را در بازه زمانی ۲۰۱۲-۲۰۱۴ 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 و عمق نورى ذرات معلق ماهانه سرى‌های زمانى و داده‌های عمق نورى حاصل را به صورت شبکه‌های ۱*۱ با داده‌های آثرون‌ت مقایسه کردند. نتایج نشان داد که روى خشكى تفاوت میان داده‌های عمق نورى تصاویر با ایستگاه‌های زمينى کاهش می‌یابد و نزدیک به صفر است. اما، روى اقیانوس استفاده از الگوریتم باعث افزایش عرض از مبدأ^۲ عمق نورى سنجنده مودیس و داده‌های ایستگاه‌های زمينى (حدوداً تا ۰/۰۲۵) می‌شود. همچنین، داده‌های حاصل از الگوریتم را با داده‌های عمق نورى سطح ۲ ایستگاه‌های آثرون‌ت مقایسه کردند. میزان همبستگی در 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 زمينى وجود دارد. در پژوهش حاضر نیز میزان همبستگی در روزهای مورد مطالعه در باند ۰/۵۵۳ به ترتیب ۰/۸۸، ۰/۹۵، ۰/۸۵، ۰/۹۵ و ۰/۸۲ و در باند ۰/۸۵۵ به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۷۸، ۰/۹۶، ۰/۹۲ و ۰/۹۱ به دست آمد که روند خوبی را بین داده‌های اندازه‌گیری نشان می‌دهد. اما، در باند ۰/۵۵۳ پارامتر RMSE در این روزها به ترتیب برابر با ۱/۶۸، ۲/۰۸، ۱/۲۸، ۱/۴۳ و ۱/۲۶ و در باند ۰/۸۵۵ برابر با ۰/۳۰، ۰/۸۹، ۰/۳۲، ۱/۳۴ و ۰/۲۳ محاسبه شد که نشان‌دهنده کیفیت بالای داده‌ها در باند ۰/۸۵۵ میکرومتر نسبت به باند ۰/۵۵۳ میکرومتر است و با توجه به بالا بودن میزان RMSE باند ۰/۵۵۳ برآورد خوبی از ریزگردها را در محیط دریایی نشان نمی‌دهد.

Geogdzhayev و Mishchenko (۲۰۱۵) ۷۵ ایستگاه آثرون‌ت در کل سواحل و جزایر کره زمین را در دوره

مشابهی از اختلاف را با ایستگاه‌های آثرونس ساحلی و جزایر نشان می‌دهد. هر دو مجموعه داده دارای ارتباط معناداری با داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های آثرونس است.

Remer و همکاران (۲۰۰۲) بازیابی عمق نوری هواویزها را در طول موج‌های ۰/۶۴۴ و ۰/۸۵۵ میکرومتر سنجندهٔ مودیس محاسبه کردند و با داده‌های سطح ۱/۵ از یازده ایستگاه آثرونس (چهار ایستگاه در دریای مدیترانه، دو ایستگاه در سواحل غربی اقیانوس اطلس شمالی، دو ایستگاه در دریای کارائیب، دو ایستگاه در سواحل جنوبی اقیانوس اطلس شمالی و یک ایستگاه در اقیانوس هند) در پنجره‌های ۵٪ در ۲۱ اوت ۲۰۰۰ به مدت دو ماه مطالعه کردند. میزان همبستگی در باند ۰/۶۴۴ برابر با ۰/۹۴ و در باند ۰/۸۵۵ برابر با ۰/۹۵ با خطای استاندارد در هر دو باند ۰/۰۲ به دست آمد. آن‌ها نتیجه گرفتند که در عمق نوری ذرات معلق پایین نسبت به خطاهای کوچک بازیابی در عدم قطعیت هر دو آزمون الگوریتم و سنجنده حساسیت بیشتری وجود دارد که باعث تفاوت در میزان داده‌های عمق نوری مستخرج از الگوریتم با داده‌های آثرونس می‌شود.

در پژوهش حاضر نیز باندهای ۰/۶۴۴ و ۰/۸۵۵ میکرومتر در بازیابی عمق نوری ریزگردها در خلیج فارس استفاده شد. در برآورد دقت الگوریتم و ارزیابی داده‌ها از داده‌های باند ۰/۶۴۴ و ۰/۸۵۵ ایستگاه‌های آثرونس دالما (قطر)، بحرین، ابوالخوش (امارات) و مصفح (امارات) استفاده شد. میزان همبستگی در روزهای ۲۲ شهریور، ۱ مهر، ۵ مهر، ۲۶ مهر، ۸ آبان سال ۱۳۸۳ در باند ۰/۶۴۴ به ترتیب ۰/۹۲، ۰/۲۰، ۰/۹۶، ۰/۸۴ و ۰/۸۰ و در باند ۰/۸۵۵ به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۷۸، ۰/۹۶، ۰/۹۲ و ۰/۹۱ به دست آمد که روند خوبی را بین داده‌های اندازه‌گیری نشان می‌دهد. اما، در باند ۰/۶۴۴ پارامتر RMSE در این روزها به ترتیب برابر با ۰/۹۳، ۱/۱۵، ۰/۷۶، ۰/۸۳ و ۰/۴۳ و پارامتر RMSD برابر با ۰/۴۶، ۰/۰۷، ۰/۱۴، ۰/۰۶ و ۰/۰۴ و در

زمانی پانزده ساله (۱۹۹۵-۲۰۰۹) برای باند ۰/۶۴۴ و ۰/۸۵۵ میکرومتر روی اقیانوس از جمله خلیج فارس بررسی کردند. در این مطالعه از مدل انتقال تابشی برای تولید جداول LUT استفاده کردند و در ارزیابی از داده‌های سطح ۲ عمق نوری هواویزها ایستگاه‌های آثرونس استفاده کردند. آن‌ها متوجه شدند که عدم تطابق بزرگی در پوشش جغرافیایی بین ماهواره و مجموعه داده‌های زمینی وجود دارد و شامل پوشش بسیار محدود شبکه‌های آثرونس در فضای اقیانوس است. این امر به خصوص به دلیل تعداد کم ایستگاه‌های آثرونس در مراحل اولیهٔ توسعهٔ این شبکه در سطح جهان است. به همین منظور در کنار داده‌های ایستگاهی آثرونس از داده‌های مربوط به پروژه جهانی اقلیم‌شناسی ذرات معلق (GACP)^۱ نیز استفاده کردند. میانگین مجموعه داده‌های ماهواره‌ای AOT ماهانه در طول اقیانوس ضریب همبستگی بالایی را با مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های زمینی نشان داد، به گونه‌ای که ضریب همبستگی در مقایسهٔ داده‌های آثرونس و داده‌های GACP برابر با ۰/۸۱-۰/۸۵ و در داده‌های تصاویر مودیس برابر با ۰/۷۴-۰/۷۹ به دست آمد. تجزیه و تحلیل رگرسیون نشان می‌دهد که به طور متوسط میزان عمق نوری ذرات معلق در داده‌های GACP حدود ۰/۱۷-۰/۲۷٪ پایین‌تر از مقادیر آثرونس است، در حالی که برای داده‌های عمق نوری ذرات معلق سنجندهٔ مودیس برابر ۰/۵-۰/۲۵٪ بالاتر از مقادیر آثرونس است. مقایسهٔ متوسط ماهانهٔ عمق نوری ذرات معلق تصاویر مودیس در طول زمین و اقیانوس در مجاورت ایستگاه‌های آثرونس ساحلی سطح معناداری بالایی نشان داد. این امر نشان داد که مقدار هواویزها در مکان‌های ساحلی به طور معناداری در مقایسه با مناطق آبی اقیانوس مجاور متفاوت است. علاوه بر این، رنگ آب‌های ساحلی و شرایط آب‌وهوایی ممکن است باعث ایجاد خطاهایی در بازیابی عمق نوری ذرات معلق در خطوط ساحلی شود. آن‌ها نتیجه گرفتند که الگوریتم بازیابی داده‌های GACP و مودیس در طول اقیانوس درجات

که داده‌های عمق نوری حاصل از تصاویر ماهواره مودیس اطلاعات دقیقی از میزان ریزگردهای منطقه خلیج فارس فراهم می‌کند. جدول ۷ و ۸ نشان می‌دهد که در باندهای ۱/۲۴۳ و ۱/۶۴۳ میانگین و انحراف معیار شبیه‌سازی‌ها به میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده نسبت به سایر باندها نزدیک‌تر است. همچنین، در این حوزه همبستگی بالا (۰/۹۹ و ۰/۹۱) و RMSE و RMSD کمتر از ۱ و نزدیک به صفر است. بنابراین می‌توان بیان کرد دقت شبیه‌سازی‌ها در این دو باند مناسب‌تر است.

در این تحقیق توانایی مدل انتقال تابشی و تصاویر مودیس در شبیه‌سازی و برآورد عمق ریزگردها ارزیابی شده است. برای این منظور از داده‌های هواشناسی سازمان داده‌های زمینی USGS با تفکیک مکانی ۱ کیلومتر استفاده شد. نتایج اولیه حاصل از اجرای الگوریتم نشان‌دهنده توانایی مدل در شبیه‌سازی ذرات ریزگردها بود. بررسی نتایج مدل نشان داد که الگوریتم موجود به درستی عمل می‌کند و با توجه به داده‌های انعکاس طیفی در شعاع مؤثرهای مختلف در جداول LUT، مقادیر را برای عمق نوری ریزگردها شبیه‌سازی می‌کند. برای دقیق‌تر کردن شبیه‌سازی مقادیر عمق نوری (AOD) با داده‌های عمق نوری ذرات معلق در ایستگاه‌های آئرونت دالما (قطر)، صیر بو نعیر (امارات)، اووم الکوائین (امارات)، بحرین، ابوالخوش، مصفح و مارکو (امارات) استفاده شد. ارزیابی کارایی مدل با استفاده از آزمون همبستگی پیرسون، شاخص مجموع مربعات خطا (RMSE) و اختلاف میانگین مربعات خطا (RMSD) انجام گرفت. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد مقادیر عمق نوری به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای با عمق نوری ذرات معلق اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های مورد مطالعه همبستگی معناداری دارد. در تمامی ایستگاه‌ها مقدار عمق نوری به دست آمده از تصویر بزرگ‌تر از مقدار عمق نوری متناظر با آن در ایستگاه است و الگوریتم مورد استفاده بیش‌برآورد دارد. علت این بیش‌برآورد را می‌توان استفاده از ذرات با شعاع مؤثرهای محدود دانست، زیرا

باند ۰/۸۵۵ پارامتر RMSE در این روزها به ترتیب برابر با ۰/۳۰، ۰/۸۹، ۰/۳۲، ۱/۳۴ و ۰/۲۳ و پارامتر RMSD برابر با ۰/۱۲، ۰/۰۹، ۰/۱۰، ۰/۱۸ و ۰/۰۵ محاسبه شد. بنابراین، می‌توان بیان کرد دقت شبیه‌سازی‌ها در این باندها مناسب و تفاوت‌های ایجاد شده ناشی از خطای ارتفاع سنجنده و پخش ذرات گسیل شده به وسیله جریان‌های جوی و دامنه کوتاه انعکاسی جداول LUT است. همچنین، تفاوت در مقادیر پارامترهای آماری در روزهای مختلف به دلیل تغییر شدت توزیع ریزگردها در فضا و تغییر در انعکاس ثبت شده در سنجنده، همچنین پوشش ابر در منطقه است.

Chervenkov و Jakobs (۲۰۱۱) به مطالعه توفان ریزگردها در ۲۴ مارس ۲۰۰۷ در اروپای مرکزی پرداختند. برای درک بهتر فرایندها و برهم‌کنش‌ها با استفاده از روش جدید پارامتره کردن گسیل ریزگردها، شبیه‌سازی عددی این رخداد انجام شد. آن‌ها از طرحواره Shao (۲۰۰۴) در مدل EURAD استفاده کردند و در نهایت نتایج مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده مقایسه شد. تحلیل حساسیت فاکتورهای مختلف نشان داد مدل به توزیع اندازه ذرات و طرحواره گسیل حساسیت بیشتری دارد. این مدل در شبیه‌سازی توفان مورد بررسی از توانایی مناسبی برخوردار بود. پایش توفان‌های ریزگرد براساس خصوصیات تابشی و پراکنشی ذرات ریزگرد انجام می‌گیرد. با مطالعات انجام شده روش‌هایی برای شناسایی ریزگردها با استفاده از تصاویر طیف مرئی و مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز حرارتی توسعه یافته است. در این بخش به چند مورد از این مطالعات اشاره می‌کنیم.

سلیمانی و همکاران (۱۳۹۴) در مطالعه‌ای عمق اپتیکی ریزگردها را در منطقه خلیج فارس از مارس ۲۰۰۸ تا دسامبر ۲۰۱۳ بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که داده‌های عمق نوری ذرات معلق از سنجنده مودیس دارای دقت قابل قبولی است و همبستگی بسیار زیادی بین مقادیر اندازه‌گیری شده با سنجنده مودیس و شبکه آئرونت وجود دارد (ضریب همبستگی ۰/۹۰). نتایج این بررسی نشان داد

آن Rnd_j خطای تصادفی در مقیاس بین ± 0.02 است و نمونه خطاهای احتمالی در درخشندگی آب را نشان می‌دهد.

۴. خطای سطح نوع ۲؛ $\rho_j^m \Rightarrow \rho_j^m + 0.005/\lambda_j$ جایی که در آن λ_j طول موج مرکزی (بر حسب میکرومتر) در کانال j است. برای انجام این کار، بازتاب تقریباً در حدود 0.1 در 0.53 میکرومتر و 0.25 در کانال $2/119$ میکرومتر افزایش یافته است و خطاهای سیستماتیک در وابستگی طیفی از بازتاب، مانند عدم قطعیت نتایج حاصل وابستگی طیفی را نشان می‌دهد.

یادداشت‌ها

1. Terra (EOS-AM1)
2. MATLAB@R
3. modis-atmos.gsfc.nasa.gov
4. Glint Angle
5. Fresnel
6. <http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov>
7. Offset
8. Global Aerosol Climatology Project

دامنه تحت پوشش این شعاع مؤثرها در توزیع اندازه ذرات لوگ‌نرمال محدود می‌شود. منابع خطا در بازیابی ذرات معلق، مانند خطای کالیبره کردن سنسور، آلودگی موجود در زاویه تابش و یا تخمین نادرست از انعکاس آب تعریف شد.

برای شبیه‌سازی این آثار، منابع خطا به‌طور مجزا اندازه‌گیری و ρ_j^m در هر کانال (j) به‌روش زیر تعریف می‌شود:

۱. خطای کالیبره کردن؛ $\rho_j^m \Rightarrow \rho_j^m (1 - Rnd_j)$ که در آن Rnd_j خطای تصادفی بین مقیاس ± 0.1 است که خطای تصادفی کالیبره کردن طیفی در حداکثر 1% را نشان می‌دهد.

۲. خطای زاویه تابش؛ $\rho_j^m \Rightarrow \rho_j^m + 0.01$ که می‌توان اثر تابش را به‌طور کامل در نظر نگرفت یا پیش‌بینی شده که مقدار ثابتی به بازتاب در تمام باندها افزوده شود.

۳. خطای سطح نوع ۱؛ $\rho_j^m \Rightarrow \rho_j^m + Rnd_j$ که در

منابع

- خوش‌سیما، م. ثابت‌قدم، س.س. علی‌اکبری بیدختی، ع.ع. ۱۳۹۴. تخمین تمرکز ذرات معلق (PM10) در جو با استفاده از داده‌های سنجش از دور ماهواره‌ای و زمین‌پایه و پراسنج‌های هواشناختی: کاربری شبکه عصبی مصنوعی. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۱(۳): ۴۹۹-۵۱۰.
- ذوالفقاری ح. عابدزاده، ح. ۱۳۸۴. تحلیل سینوپتیک سیستم‌های گردو غبار در ایران. *مجله جغرافیا و توسعه*، ۳(۶): ۱۷۳-۱۸۸.
- رییس‌پور ک. ۱۳۸۶. تحلیل آماری سینوپتیک پدیده‌های گردوغباری استان خوزستان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- سلیمانی، آ. محمدعسگری، ح. دادالهی سهراب، ع. علمی‌زاده، ه. خزاعی. ح. ۱۳۹۴. ارزیابی عمق اپتیکی حاصل از تصاویر ماهواره MODIS در خلیج فارس. *مجله علوم و فنون دریایی خرمشهر*، ۱۴(۴): ۷۵-۸۳.
- زبیری، م. و مجد، ع. ۱۳۸۸. *آشنایی با فن سنجش از دور و کاربرد آن در منابع طبیعی*. انتشارات دانشگاه تهران.
- محمدی‌نژاد، ش. علی محمدی سراب، ع. فرج‌زاده اصل، م. ۱۳۹۳. تجزیه و تحلیل و تهیه نقشه توزیع مکانی ذرات کمتر از ده میکرون استان خوزستان با استفاده از محصولات سنجنده مودیس. *فصلنامه برنامه‌ریزی و آمایش فضا*، ۱۸(۳): ۷۹-۹۸.
- Ackerman, S. 1997. Remote sensing aerosols using satellite infrared observations. *J. Geophys. Res.*, 102: 17069-17079.
- Chervenkov, H. Jakobs, H. 2011. Dust storm simulation with regional air quality model: Problems and results. *Atmos. Env.* 45: 3965-3976.

- 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, doi:10.3390/rs71012588.
- Kaufman, Y.J. Tanré, 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. et al. 2006. Aerosol optical properties and lookup tables for the new MODIS aerosol retrieval over land, submitted to JGR.
- Levy, R.C. Munchak, L.A. 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. Kaufman, Y.J. Mattoo, S. Gao, B.C. Vermote, E. 2005. Snow and ice mask for the MODIS aerosol products. *Ieee Geoscience and Remote Sensing Letters.* 2(3): 306-310.
- Martins, J.V. Tanré, D. 2002. MODIS Cloud screening for remote sensing of aerosols over oceans using spatial variability. *Geophysical Research Letters.* 29: 1619-1624.
- 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. Ginoux, P. Torres, O. Nicholson, S.E. Gill, T.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. Tanré', 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.* 29(12), 10.1029/2001GL013204.
- Remer, L.A. Kaufman, Y.J. Tanré, D. Mattoo, S. Chu, D.A. Martins, J.V. et al. 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. et al. 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).
- Wei, P. Hong. J. Zhan-yong, X. 2014. Using MODIS to retrieve the AOT over the region of Baikal. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 17, 012038 doi:10.1088/1755-1315/17/1/012038.