

ارزیابی توانایی مدل انتقال تابشی و تصاویر مودیس در برآورد عمق نوری هواویزها

سعید فرهادی¹، حسین محمد عسگری^{2*}، علی دادالهی سهراب³، سید محمدجعفر ناظم السادات⁴، سیدحسین خزاعی⁵

1. کارشناس ارشد محیط‌زیست دریا، دانشکده منابع طبیعی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خوزستان، ایران.
2. استادیار گروه محیط‌زیست دانشکده منابع طبیعی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خوزستان، ایران.
3. دانشیار گروه محیط‌زیست دانشکده منابع طبیعی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خوزستان، ایران.
4. استاد بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، فارس، ایران.
5. مربی گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خوزستان، ایران.

* نویسنده مسئول: hmasgari01@gmail.com

تاریخ دریافت: 1395/08/19 تاریخ پذیرش: 1396/06/29

چکیده

هواویزها در جو، نقش بسیار مهمی را در سیستم‌های اقلیمی بازی می‌کنند. این ذرات جو را مستقیماً با تغییر ترازمندی تابشی به‌وسیلهٔ پخش و جذب طول‌موج‌های مختلف و به‌طور غیرمستقیم با تغییر ویژگی‌های نوری و ماندگاری ابرها، تحت‌تأثیر قرار می‌دهند، ویژگی‌های نوری هواویزها از قبیل ضخامت نوری آن‌ها (AOD)، در فهم تأثیرات هواویزهای اتمسفری در تغییر اقلیم و چرخهٔ بیوژئوشیمیایی بسیار مهم و حیاتی هستند. از این‌رو، در این پژوهش توانایی مدل انتقال تابشی و تصاویر مودیس در برآورد عمق نوری هواویزها بر روی خلیج‌فارس مورد ارزیابی قرار گرفت. برای پردازش تصاویر از نرم‌افزار MATLAB و داده‌های ماهواره‌ای با توان تفکیک 500 متر در شبکه‌های 5*5 سنجندهٔ مودیس استفاده شد و ارزیابی داده‌های عمق نوری هواویزها با استفاده از ایستگاه‌های آثرونیت با استفاده از آزمون همبستگی پیرسون، شاخص RMSE و RMSD انجام گرفت. نتایج اولیه حاصل از اجرای الگوریتم نشان‌دهندهٔ توانایی مدل در شبیه‌سازی عمق نوری هواویزها بود. نتایج نشان داد که الگوریتم موجود به‌درستی عمل می‌کند و با توجه به داده‌های انعکاس طیفی برای شعاع مؤثرهای مختلف در جداول LUT، مقادیر را برای عمق نوری هواویزها شبیه‌سازی می‌کند. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد مقادیر عمق نوری به‌دست‌آمده از تصاویر همبستگی معنی‌داری با عمق نوری اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های آثرونیت دارد. به‌گونه‌ای که مقدار همبستگی برای روزهای 8 تیر 1392، 23 تیر 1393 و 14 مهر 1394 برای باند 1/243 به ترتیب 0/96، 0/94 و 0/98 و برای باند 1/643 به ترتیب 0/99، 0/98 و 0/98 به دست آمد که روند خوبی را بین داده‌های اندازه‌گیری نشان می‌دهد. شاخص‌های RMSE و RMSD در این روزها به ترتیب کمتر از 0/15 و کمتر از 0/06 محاسبه شد؛ بنابراین می‌توان گفت دقت شبیه‌سازی‌ها در این باندها مناسب است.

واژگان کلیدی: ذرات معلق؛ خلیج‌فارس؛ الگوریتم بازیابی؛ MODIS

n مقدمه

اقلیم‌شناسی هواویزها به‌طور عمده بر پایه اندازه‌گیری‌های مختلفی است که به‌وسیله تکنیک‌های سنجش‌ازدور و تحلیل داده‌های غبار و مدل‌سازی‌های عددی انجام می‌شود. از بین این روش‌ها تحلیل رخدادهای غبار و تحلیل داده‌های ماهواره‌ای معمول‌تر است (12 و 14).

هواویزها در جو، نقش بسیار مهمی را در سیستم‌های اقلیمی بازی می‌کنند. این ذرات جو را مستقیماً با تغییر ترازمندی تابشی به‌وسیله پخش و جذب طول‌موج‌های مختلف و به‌طور غیرمستقیم با تغییر ویژگی‌های نوری و ماندگاری ابرها، تحت‌تأثیر قرار می‌دهند (9) و به واسطه غلظت و توزیع عمودی آن در اتمسفر، اندازه و ویژگی کانی-شناسی ذرات به‌عنوان عامل تغییر اقلیم عمل می‌کند (23). بنابراین، ویژگی‌های نوری هواویزها از قبیل ضخامت نوری هواویزها¹، در فهم تأثیرات هواویزهای اتمسفری در تغییر اقلیم و چرخه بیوژئوشیمیایی بسیار مهم و حیاتی هستند.

برای تعیین نقش گردوغبارهای ورودی بر بیوژئوشیمی اقیانوس، لازم است که از گزارش‌های درازمدت گردوغبارهای اتمسفری و غلظت رنگ‌دانه کلروفیل استفاده شود. اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای، تنها داده‌های موجود برای مشاهدات بزرگ‌مقیاس منطقه‌ای و جهانی هستند. در اواخر سال 1999، با پرتاب اولین سنجنده ماهواره MODIS این امکان فراهم شد تا اندازه‌گیری‌های نظام‌مند و کمی بر انتقال گردوغبار به اقیانوس اطلس انجام شود (7). ابرهای ریزگرد از طریق ماهواره‌ها قابل ردیابی و مشاهده بوده و می‌توان آن‌ها را از منبع تولید تا هزاران کیلومتر دورتر در اقیانوس، ردیابی نمود. با انجام مقایسه بین گردوغبار و غلظت پارامترهایی مانند کلروفیل با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای می‌توان نشانه‌های افزایش گردوغبار و به دنبال آن‌ها، افزایش زی‌توده (بیومس) فیتوپلانکتون‌ها را تخمین زد که ارتباط بین مقدار گردوغبار و رشد فیتوپلانکتون‌ها را نشان می‌دهد (19).

اقلیم‌شناسی پدیده گردوغبار به‌طور عمده بر پایه اندازه‌گیری‌های مختلفی است که به وسیله فن‌آوری‌های سنجش‌ازدور و تحلیل داده‌های غبار و مدل‌سازی‌های عددی انجام می‌شود. از بین این روش‌ها تحلیل رخدادهای غبار بر پایه

داده‌های ماهواره‌ای معمول‌تر است (12). با استفاده از عمق نوری هواویز و شاخص جذب هواویز که از داده‌های ماهواره‌ای استخراج می‌شوند، می‌توان اطلاعات زیادی در مورد غبار در مقیاس وسیع به‌دست آورد. سنجنده‌های ماهواره توانایی ثبت بازتابش‌های تابشی از هواویزها و سطوح مختلف زمین در باندهای مختلف طیفی را دارند. داده باندهای مختلف برای آشکارسازی پدیده‌های غبار می‌توانند ترکیب شوند و با استفاده از این ترکیبات، متغیرهایی را برای کمی‌سازی با غبار و اندازه ذرات غبار می‌توان استخراج کرد (1).

الگوریتم مورد استفاده سنجنده مودیس برای بازیابی اطلاعات گردوغبار، بر اختلاف بین بازتابندگی سطح و بازتابندگی رسیده به سنجنده استوار است. سنجنده مودیس کل تشعشعات خورشیدی پراکنده‌شده توسط اتمسفر، بازتاب نور از سطح زمین و همچنین مقدار نور ضعیف‌شده هنگام عبور از اتمسفر را اندازه‌گیری می‌کند و براساس این اختلاف بازتابندگی مقدار گردوغبار موجود در ستونی از اتمسفر محاسبه می‌شود و به‌صورت پارامتر بدون بُعد AOD بیان می‌شود (17). سامانه مدل‌سازی جامع هواویزها قادر به شبیه‌سازی و پیش‌بینی همه جنبه‌های هواویزها در سطح یک منطقه است. هدف از چنین سامانه‌هایی ارزیابی و پیش‌بینی کمی از ذرات هواویز در مقیاس‌های محلی تا جهانی است. در مطالعه طوفان گردوغبار 24 مارس 2007 در اروپای مرکزی، از طرح‌واره شائو² در مدل EURAD استفاده گردید. مقایسه نتایج مدل با داده‌های اندازه‌گیری‌شده نشان می‌دهد که این مدل از توانایی مناسبی در شبیه‌سازی طوفان برخوردار است (2) و (18). نتایج بررسی داده‌های مربوط به باندهای 0/553 و 0/855 میکرومتر سنجنده مودیس در سطح خشکی و دریا در بازه زمانی 2012-2014، نشان می‌دهد که بر روی اقیانوس استفاده از خوارزمیک موجب افزایش عمق نوری سنجنده مودیس و داده‌های ایستگاه‌های زمینی (حدود 0/025) می‌شود. در این مطالعه مقدار همبستگی در دامنه 0/88 تا 0/92 و RMSE نیز در دامنه 0/06 تا 0/08 محاسبه شد. در نتیجه بررسی‌ها همبستگی زیادی بین داده‌های استخراج‌شده با داده‌های ایستگاه‌های زمینی نشان می‌دهد (11). بازیابی عمق عمق نوری گردوغبار، در دریاچه بایکال با

² Shao¹ Aerosol Optical Depth (AOD)

ماهواره‌های سنجنش‌ازدور مزایای بسیاری در پایش غبار دارند که به دلیل پوشش مکانی و زمانی فوق‌العاده آنهاست. در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری‌شده، تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند پهنای وسیعی را پوشش داده و به دلیل قابلیت تکرار، ابزار بسیار مهمی برای کنترل گردوغبار و انتقال آنها به‌شمار می‌رود (21).

سنجنده‌های ماهواره توانایی ثبت داده‌های بازتابشی از هواویزها و سطوح مختلف زمین در باندهای مختلف طیفی را دارند. باندهای مختلف برای آشکارسازی پدیده‌های غبار می‌توانند ترکیب شوند و با استفاده از این ترکیبات، متغیرهایی را برای کمی‌سازی بار غبار و اندازه ذرات غبار می‌توان استخراج کرد (1).

براساس همین ضرورت، هدف اصلی پژوهش حاضر ارزیابی توانایی مدل انتقال تابشی و تصاویر مودیس در برآورد عمق نوری هواویزها و ارزیابی مدل همبستگی خطی میان هواویزهای جوی با اندازه‌گیری‌های زمینی است.

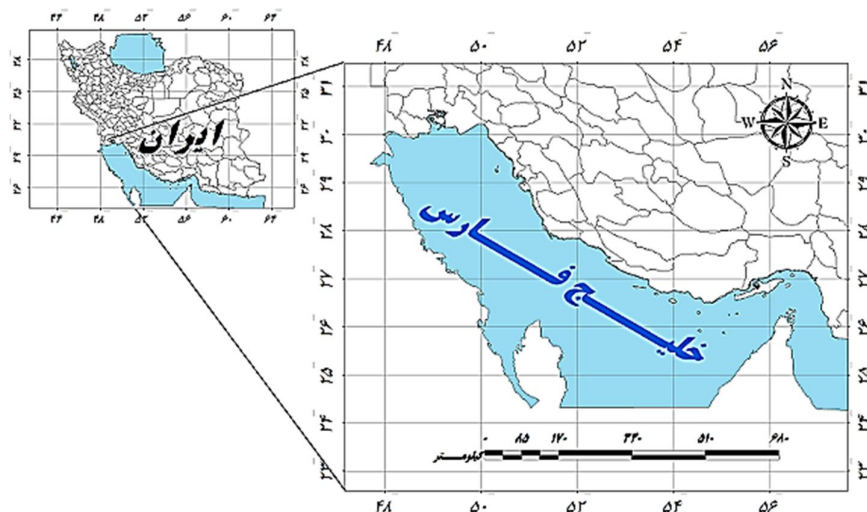
n مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق خلیج فارس است که از نظر آب و هوایی شرایط خشک و نیمه‌استوایی دارد. عریض‌ترین بخش آن 290 کیلومتر و عمیق‌ترین نقطه آن 93 متر در 15 کیلومتری تنب بزرگ و کم‌عمق‌ترین بخش آن در غرب بین 10 تا 30 متر است (شکل 1).

استفاده از داده‌های سنجنده مودیس و الگوریتم هواویزهای ناسا نشان می‌دهد که مقادیر عمق نوری استخراج‌شده، از عمق نوری ایستگاه آئرونت بیشتر و ضریب همبستگی آن 0/22 است که پس از حذف عمق‌های نوری بزرگ‌تر از یک، نتایج تحلیل رگرسیون برای عمق‌های نوری مشاهده‌شده در CE-318 و سنجنده مودیس مقدار همبستگی 0/9 را ارائه می‌دهد (22). در پژوهشی، تمرکز روزانه ذرات معلق با قطر کمتر از ده میکرون (PM10)، با استفاده از داده‌های سنجنش‌ازدور تخمین زده شد. نتایج نشان می‌دهد که ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی با مقادیر پیش‌بینی‌شده به ترتیب برابر 0/62 و 0/82 است. از این‌رو استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای برآورد ذرات معلق مناسب تلقی می‌گردد (8). همچنین، مطالعه‌ای با هدف تهیه نقشه توزیع مکانی ذرات کم‌تر از ده میکرون در استان خوزستان در دو بازه زمانی ساعتی و روزانه با استفاده از مدل رگرسیون خطی مطالعه‌ای انجام شد؛ نتایج به‌دست‌آمده دقت خوبی از اندازه‌گیری‌های مودیس را در تحقیقات آلودگی هوا نشان می‌دهد که بیانگر این مسئله است که بازه زمانی ساعتی، ضریب تعیین بالاتری (90%) نسبت به بازه روزانه (76%) دارد (13).

همه این مطالعات بیانگر قابلیت و قابل‌اطمینان بودن تولیدات مودیس در بررسی الگوهای حرکتی هواویزها و همچنین برآورد میزان غلظت ذرات جامد معلق است. روش‌های اندازه‌گیری زمینی و فناوری سنجنش‌ازدور از مهم‌ترین روش‌های ردیابی و توزیع هواویزها در محیط قلمداد می‌گردند (6).



شکل 1. منطقه مورد مطالعه

روش پژوهش

شد. سنجش از دور هواویزها بر روی اقیانوسها، از ارتباط میان بازتاب اندازه گرفته شده در بالای جو و خواص بازتاب دور ایستایی سطحی ناشی می شود. در این پژوهش، بازبایی اطلاعات هواویزها برای دو باند $1/24$ و $1/64$ میکرومتر) ذکر شده در جدول (1) انجام شد.

در پژوهش حاضر، برای بازبایی خواص هواویزها بر محدوده خلیج فارس از انعکاس طیفی سنجنده مودیس ماهواره EOS و الگوریتم مربوط به محیط دریایی استفاده

جدول 1. مشخصات باندهای سنجنده MODIS مورد استفاده در بازبایی گرد و غبار (10)

شماره باند	پهنای طول موج (μm)	طول موج مرکزی	دقت مکانی (m)	$Ne\Delta\rho(x10^{-4})$	$Max \rho$	SNR دریافتی	Rayleigh optical depth
5	1/230-1/250	1/243	500	3/12	0/47	74	0/0037
6	1/628-1/652	1/643	500	3/63	0/94	275	0/0012

باند 26 (کانال 1/38) برای تصحیح ابر به کار می رود؛ $Ne\Delta\rho$ نشان دهنده حداکثر نور خورشید در زاویه صفر درجه است.

(θ_0) و تابش خورشید (F_0) در باندی با طول موج (λ) تابع انعکاس طیفی (ρ_λ) به صورت رابطه (1) تعریف شد:

$$\rho_\lambda = I_\lambda \frac{\pi}{F_{0,\lambda} \cos(\theta_0)} \quad (1)$$

معادله دیفرانسیل طیفی درخشندگی $(Ne\Delta L)$ از ویژگی های این سنجنده است؛ نسبت سیگنال به نویز (SNR) به عنوان نسبتی از درخشندگی معمولی (L^{ts}) و $Ne\Delta L$ تعریف می شود. $Ne\Delta L$ و مشخصات SNR در جدول 1 ذکر شده است. بنابراین، یک نویز معادل عمق نوری دیفرانسیل $(Ne\Delta\tau)$ به شکل رابطه (2) محاسبه می شود:

$$Ne\Delta\tau = \pi Ne\Delta\rho \frac{4 \cos(\theta_0) \cos(\theta_v)}{\omega_0 P(\theta)} \quad (2)$$

که در آن θ_0 و θ_v به ترتیب زاویه سرسوی و دید خورشید، ω_0 نسبت بازتاب پراکندگی ذرات معلق (SSA) و $P(\theta)$ تابع فازی ذرات معلق به صورت تابعی از زاویه پراکندگی است و $Ne\Delta\rho$ (معادله دیفرانسیل انعکاس طیفی) و مرتبط با معادله (1) است. در واقع مقدار

در این پژوهش برای پردازش تصاویر، برنامه ای به زبان نرم افزار متلب³ تهیه شد. هدف از تهیه این برنامه شبیه سازی بازتاب ثبت شده در سنجنده با استفاده از جدول های LUT است. کل فرایند پردازش در شبکه های 5×5 پیکسل با توان تفکیک 500 متر انتخاب شدند. در این برنامه هنگامی که مقادیر بازتاب هر یک از پیکسل های تصویر برابر با بازتاب های موجود در جدول LUT شد، مقدار عمق نوری متناظر به آن پیکسل اختصاص داده می شود. برای تفکیک اثر پدیده های مختلف در محیط های آبی از ماسک های مختلف استفاده شد. جهت ماسک ابر و ماسک رسوبات، از داده های سطح 2 $(L2)$ مجموعه MOD35 استفاده شد که در صورت وجود مناطق کم عمق در نزدیکی سواحل و جزایر موجود در خلیج فارس این ماسک اثر آن ها را در محاسبات به حداقل می رساند (1). جهت حذف اثرات گازهای موجود در جو (ازن، بخار آب و دی اکسید کربن) و تصحیحات اتمسفری از داده های سطح 2 مجموعه MOD07 دریافت شده از سایت ناسا استفاده شد. به منظور بازبایی عمق نوری هواویزها، از الگوریتم انتقال تابش در اقیانوس، با استفاده از اندازه گیری تابش طیفی (I_λ) زاویه سرسوی خورشیدی

⁴ داده های مربوط به ماسکها در سایت ناسا در سه سطح 1، 1/5 و 2 قرار داده شده اند که داده های سطح 2 تصحیح اتمسفری، رادیومترک و ... انجام شده است.

³ MATLAB

در جدول‌ها وارد شدند. در ادامه با استفاده از رابطه (1) و با در نظر گرفتن شرایط رابطه (4) مقادیر عمق نوری محاسبه شد.

$$\rho_{\lambda}^{\text{MODIS}} - \rho_{\lambda}^{\text{TOA}} = 0 \quad (4)$$

$\rho_{\lambda}^{\text{MODIS}}$ بازتاب ثبت‌شده در باندهای مختلف سنجنده مودیس و $\rho_{\lambda}^{\text{TOA}}$ بازتاب محاسبه‌شده در بالای جو است. الگوریتم محاسبه زاویه تابش، که نشان‌دهنده زاویه بازتاب، در مقایسه با زاویه بازتاب آینه طبی است در رابطه (5) شرح داده شده است:

$$\theta_{\text{glint}} = \left[\cos \left((-1) \left((\cos \theta_s \cos \theta_v) + (\sin \theta_s \sin \theta_v \cos \phi) \right) \right) \right] \quad (5)$$

که در آن θ_s ، θ_v و ϕ به ترتیب زاویه سوسوی خورشیدی، زاویه سوسوی ماهواره‌ای و زاویه آزیموت نسبی است. بازتابی اطلاعات مستلزم یک حالت ریز و یک حالت درشت است. برای تعیین بازتابی، 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 وزن دهی به صورت رابطه (6) محاسبه می‌شود:

$$\rho_{\lambda}^{\text{LUT}}(\tau_{0.55}^{\text{tot}}) = \eta \rho_{\lambda}^f(\tau_{0.55}^{\text{tot}}) + (1 - \eta) \rho_{\lambda}^c(\tau_{0.55}^{\text{tot}}) \quad (6)$$

که در آن $\rho_{\lambda}^{\text{LUT}}(\tau_{0.55}^{\text{tot}})$ میانگین وزنی انعکاس در اتمسفر در یک حالت ریز (F) و ضخامت نوری $\tau_{0.55}^{\text{tot}}$ و انعکاس در اتمسفر در یک حالت درشت (C) نیز با همان $\tau_{0.55}^{\text{tot}}$ است. به این صورت عمق نوری هواویزها در دریاها محاسبه شد.

اعتبارسنجی داده‌ها نیز با استفاده از داده‌های عمق نوری اندازه‌گیری‌شده توسط دستگاه‌های نورسنج خورشیدی در ایستگاه‌های آثرون انجام شد. در این مطالعه برای ارزیابی نتایج از داده‌های روزانه عمق نوری هواویزها در ایستگاه‌های آثرون خلیج فارس که موقعیت آن‌ها در جدول (2) ذکر شده است، استفاده شد.

عبوردهی نور در لایه هواویز به صورت تابعی از پارامتر اندازه است که به صورت رابطه (3) تعریف می‌شود:

$$X = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3)$$

که در آن λ طول موج رادیانس فرودی است (5). برای استخراج مقادیر غبار از تصاویر ماهواره‌ای نیاز است بازتاب ثبت‌شده توسط سنجنده با استفاده از مدل‌های انتقال تابش در جو شبیه‌سازی شود. برای این منظور نیاز به تعیین عمق نوری و ویژگی‌های تابشی برای گروه‌های مختلف اندازه ذرات در باندهای مختلف است. در این مطالعه، برای تعیین ویژگی‌های تابشی ذرات از نتایج کد مای و مدل انتقال تابش RT3 استفاده شد. کد RT توسط دیو⁵ (1970) نوشته شده است که به عنوان استاندارد تعیین عمق نوری و مقدار انعکاس در جامعه سنجنش‌آز دور است (3) و طبق مطالعات انجام شده برای انعکاس هواویزها روی اقیانوس قابل استفاده است (16). با استفاده از کد مای و مدل انتقال تابش و با در نظر گرفتن شرایط معینی از هواویزها جدول‌های LUT به دست آمد. هدف از تهیه این جدول‌ها تعیین بهترین شرایط و ویژگی‌های هواویزهاست که کمترین اختلاف را با بازتاب ثبت‌شده توسط سنجنده دارد. در این جدول‌ها مقدار بازتاب در بالای جو در زوایای مختلف سوسوی خورشید، زاویه سنجنده و آزیموت بازتابندگی تعیین شد. این جدول‌ها فقط برای 5 گروه از اندازه ذرات با شعاع مؤثر 0/9726 و 1/459، 1/945، 1/46 و 2/36 میکرون برای ذرات درشت و برای دو گروه از اندازه ذرات ریز با شعاع مؤثر 0/1، 0/15، 0/2 و 0/25 میکرون محاسبه شد. سرعت باد در سطح 6 متر/ثانیه فرض شد و مقادیر بدون پرتو در آب صفر فرض شد. بازتاب اندازه‌گیری‌شده در بالای جو برای 9 زاویه سوسوی خورشیدی (0، 6، 12، 24، 36، 48، 54، 60 و 66 درجه)، 16 زاویه دید سنجنده (0 تا 88/5 با فواصل 6 درجه) و 16 زاویه آزیموت بازتابندگی (0 تا 180 با فواصل 12 درجه) محاسبه شد. پارامترهای مذکور با فرض بازتاب سطحی صفر محاسبه و

جدول 2. موقعیت ایستگاه‌های آثرون مورد مطالعه

ردیف	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
1	دالما	521955	243007
2	بحرین	503632	261228
3	ابو البخوش	530845	252942
4	صیر بو نعیر	541358	251301
5	اووم الکوائین	553928	253158

* واحدهای طول و عرض جغرافیایی برحسب درجه، دقیقه، ثانیه (DMS) است.

\bar{o} میانگین داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری و N تعداد داده‌ها است.

n نتایج

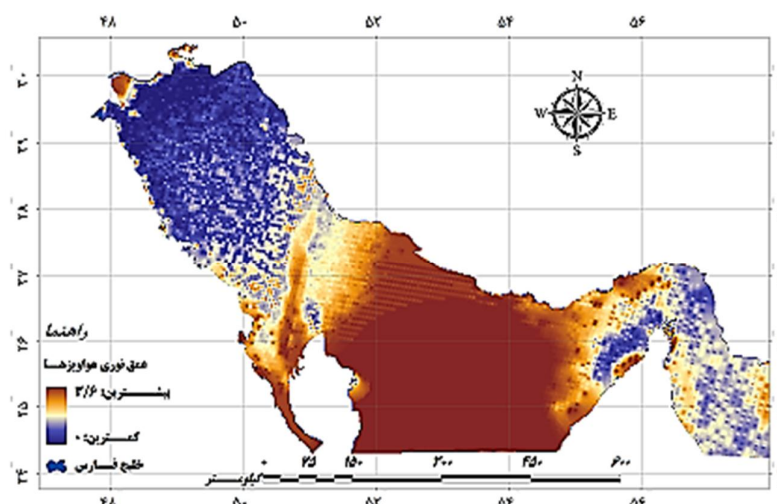
عمق نوری شبیه‌سازی شده در باندهای 1/243 و 1/643 میکرومتر برای خلیج فارس در شکل‌های (2) و (4) نشان داده شده است. براساس این شکل‌ها می‌توان بیان کرد که این مدل توانایی مناسبی در نمایش تغییرات داده‌های مشاهده‌ای دارد.

در این تحلیل‌ها از آزمون همبستگی پیرسون و شاخص‌های میانگین مربعات خطا⁶ طبق رابطه (7) و اختلاف میانگین مربعات خطا⁷ طبق رابطه (8) استفاده شد:

$$RMSD = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(m_i - \bar{m}) - (o_i - \bar{o})]^2 \quad (7)$$

$$RMSE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(m_i - o_i)]^2 \quad (8)$$

که m_i و o_i به ترتیب داده شبیه‌سازی و اندازه‌گیری، \bar{m} و



شکل 2. عمق نوری (AOD) شبیه‌سازی شده برای باند 1/243 میکرومتر در حوزه خلیج فارس، روز 8 تیر 1392

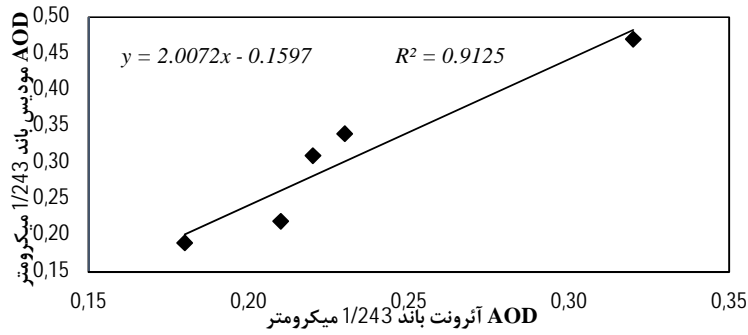
باندهای 1/243 و 1/643 میکرومتر میانگین و انحراف معیار شبیه‌سازی‌ها به میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده نسبت به سایر باندها بسیار نزدیک‌تر است. همچنین برای این باندها همبستگی بالا (0/96 و 0/99) مقدار RMSE و RMSD کمتر از 0/1 و نزدیک به صفر است. بنابراین دقت

نمودارهای پراکنش به نیمی از ربع اول و سوم نزدیک‌تر است. باندهای 1/243 و 1/643 میکرومتر حالت مناسب و صحیحی از شبیه‌سازی و همبستگی بالایی را برای مقدار غلظت ذرات در شکل (3) و (5) نشان داد؛ باند 1/643 بهترین حالت را دارد. جدول‌های (3) و (4) نشان داد که در

⁷ RMSD

⁶ RMSE

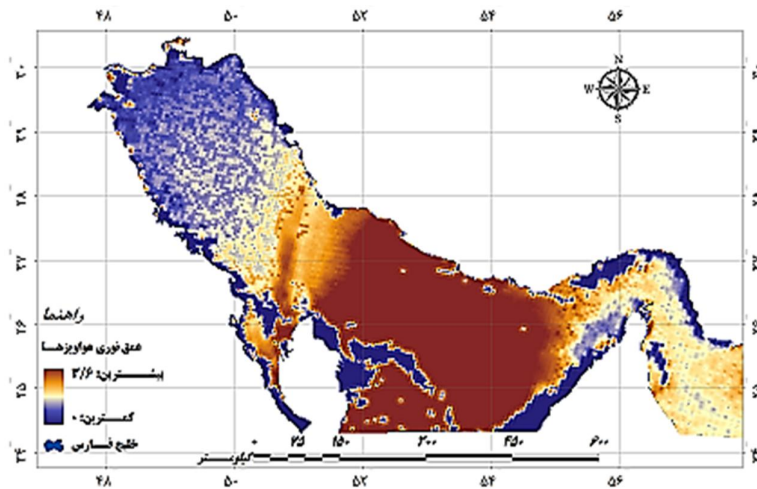
شبهه‌سازی‌ها در این باندها بسیار مناسب بوده و نمایی کاملاً یکسان از هواویزها را ارائه داده است.



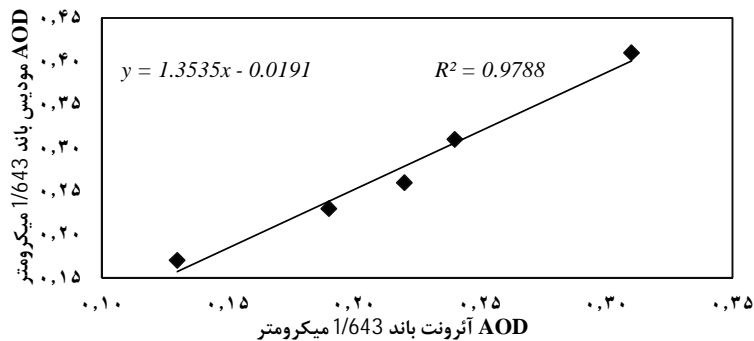
شکل 3. عمق نوری اندازه‌گیری شده و شبهه‌سازی شده برای باند 1/243 میکرومتر (8 تیرماه 92)

جدول 3. شاخص‌های آماری برای باند 1/243 میکرومتر

شاخص	اندازه‌گیری شده	مدلسازی شده
میانگین	0/31	0/23
انحراف معیار	0/11	0/05
همبستگی		0/96
RMSE		0/09
RMSD		0/06



شکل 4. عمق نوری (AOD) شبهه‌سازی شده برای باند 1/643 میکرومتر در حوزه خلیج فارس، روز 8 تیر 1392



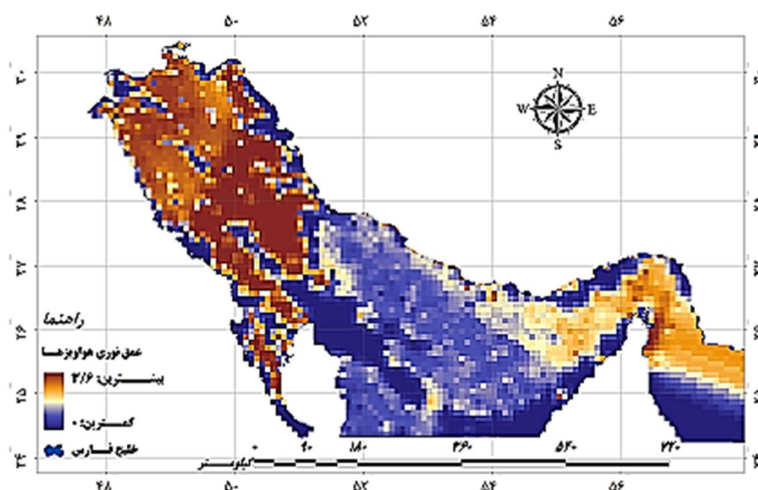
شکل 5. عمق نوری اندازه‌گیری شده و شبهه‌سازی شده برای باند 1/643 میکرومتر

جدول 4. شاخص‌های آماری برای باند 1/643 میکرومتر

شاخص	اندازه‌گیری شده	مدلسازی شده
میانگین	0/28	0/22
انحراف معیار	0/09	0/07
همبستگی		0/99
RMSE		0/06
RMSD		0/02

زاویه تابش و آلودگی زاویه تابش است. غلظت ذرات هواویز شبیه‌سازی شده برای این روز در باندهای 1/243 و 1/643 میکرومتر برای حوزه خلیج فارس و نحوه پراکنش آن در شکل‌های (6) و (8) نشان داده شده است؛ پراکندگی هواویزها در باندهای 1/243 و 1/643 میکرومتر در حالت مناسبی از پراکندگی نمایش داده شده است.

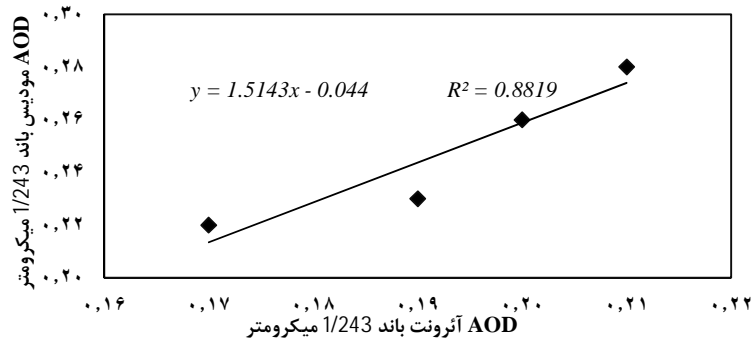
بنابراین در تاریخ 8 تیر 1392 مقدار همبستگی زیاد و معنی‌دار و شاخص‌های RMSE و RMSD کمتر از 0/1 و نزدیک به صفر به دست آمد. در این باندها مقادیر شبیه‌سازی شده کوچک‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های آثرون است؛ این اختلاف داده ناشی از خطای سنجنده و ارتفاع زیاد آن از زمین نسبت به ارتفاع پدیده هواویزها، که در سطح زمین اتفاق می‌افتد، خطای



شکل 6. عمق نوری (AOD) شبیه‌سازی شده برای باند 1/243 میکرومتر در حوزه خلیج فارس، روز 23 تیر 1393

را بین داده‌های اندازه‌گیری نشان می‌دهد. پارامتر RMSE برای این دو باند به ترتیب برابر با 0/06 و 0/13 و پارامتر RMSD برابر با 0/01 و 0/03 محاسبه شد؛ بنابراین دقت شبیه‌سازی در این باندها مناسب است. تفاوت‌های ایجاد شده می‌تواند ناشی از خطای ارتفاع سنجنده و پخش ذرات گسیل شده به وسیله جریان‌های جوی و دامنه کوتاه انعکاسی جداول LUT باشد. همچنین تفاوت در مقادیر پارامترهای آماری برای روزهای مختلف به دلیل تغییر شدت توزیع هواویزها در فضا و تغییر در انعکاس ثبت شده در سنجنده و پوشش ابر در منطقه است.

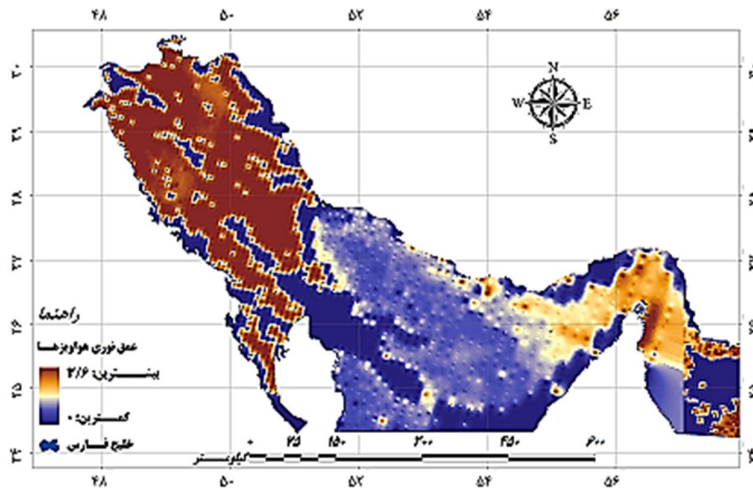
باندهای 1/243 و 1/632 میکرومتر طبق شکل‌های (6) و (8) برای بازیابی عمق نوری هواویزها در خلیج فارس مناسب و صحیح است. جدول‌های (5) و (6) نشان می‌دهد که باندهای 1/243 و 1/643 میانگین و انحراف معیار شبیه‌سازی‌ها به میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده نسبت به سایر باندها نزدیک‌تر است. برای باندهای 1/243 و 1/643 مقدار RMSE و RMSD کمتر از 1 و نزدیک به صفر است. بنابراین می‌توان گفت دقت شبیه‌سازی‌ها در این باندها مناسب است. مقدار همبستگی برای این باندها به ترتیب برابر با 0/94 و 0/98 به دست آمد که روند خوبی



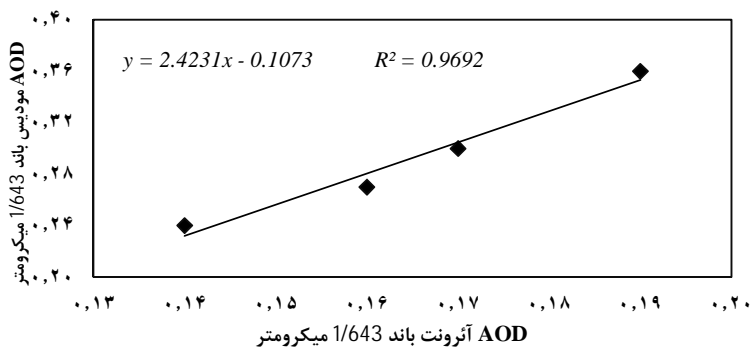
شکل 7. عمق نوری اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای باند 1/243 میکرومتر

جدول 5. شاخص‌های آماری برای باند 1/243 میکرومتر

شاخص	اندازه‌گیری شده	مدلسازی شده
میانگین	0/25	0/19
انحراف معیار	0/03	0/02
همبستگی		0/94
RMSE		0/06
RMSD		0/01



شکل 8. عمق نوری (AOD) شبیه‌سازی شده برای باند 1/643 میکرومتر در حوزه خلیج فارس، روز 23 تیر 1393



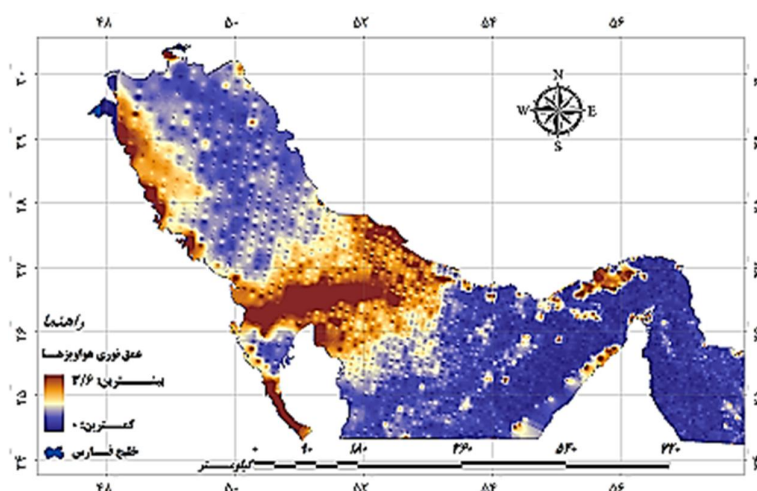
شکل 9. عمق نوری اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای باند 1/643 میکرومتر

جدول 6. شاخص‌های آماری برای باند 1/643 میکرومتر

شاخص	اندازه‌گیری شده	مدلسازی شده
میانگین	0/29	0/17
انحراف معیار	0/05	0/02
همبستگی		0/98
RMSE		0/13
RMSD		0/03

در این قسمت می‌توان بیان کرد که این مدل توانایی مناسبی در نشان دادن تغییرات داده‌های مشاهداتی در باندهای 1/243 و 1/632 میکرومتر دارد.

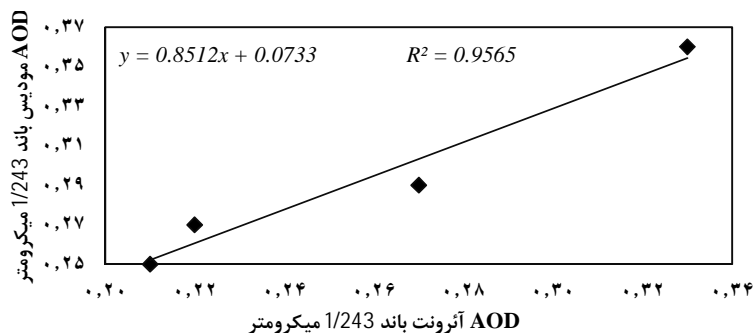
عمق نوری شبیه‌سازی‌شده هواویزها در باندهای 1/243 و 1/643 میکرومتر برای حوزه خلیج فارس و نحوه پراکنش آن در شکل (10) و (12) نشان داده شده است.



شکل 10. عمق نوری (AOD) شبیه‌سازی‌شده برای باند 1/243 میکرومتر در حوزه خلیج فارس، روز 14 مهر 1394

انحراف معیار شبیه‌سازی‌ها به میانگین داده‌های اندازه‌گیری‌شده نسبت به سایر باندها نزدیک‌تر است. همچنین برای این باندها همبستگی بالا (0/98) مقدار RMSE و RMSD کمتر از 1 و نزدیک به صفر است. بنابراین می‌توان بیان کرد دقت شبیه‌سازی در این باندها نیز مناسب است.

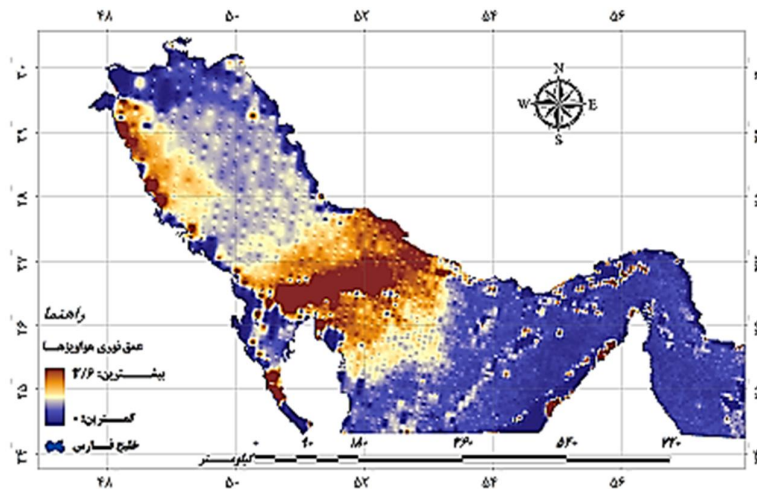
شاخص‌های آماری یادشده در جدول‌های (7) و (8) و باندهای 1/243 و 1/643 میکرومتر مانند تصاویر قبل حالت مناسب و صحیحی از شبیه‌سازی و همبستگی بالایی را برای مقدار غلظت ذرات در شکل (11) و (13) نشان می‌دهد. جدول‌های (7) و (8) نشان می‌دهد که باندهای 1/243 و 1/643 میانگین و



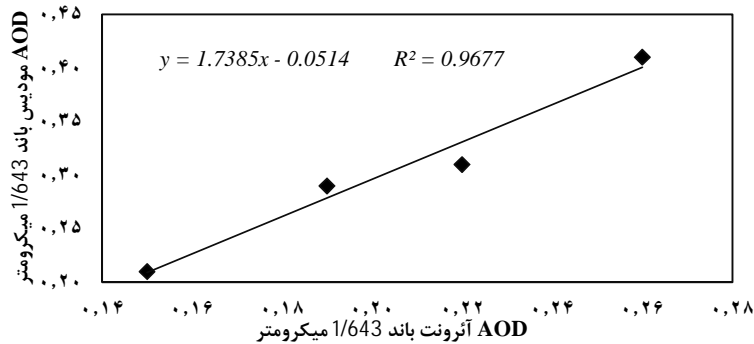
شکل 11. عمق نوری اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده برای باند 1/243 میکرومتر

جدول 7. شاخص‌های آماری برای باند 1/243 میکرومتر

شاخص	اندازه‌گیری شده	مدلسازی شده
میانگین	0/29	0/26
انحراف معیار	0/05	0/06
همبستگی		0/98
RMSE		0/04
RMSD		0/01



شکل 12. عمق نوری (AOD) شبیه‌سازی شده برای باند 1/643 میکرومتر در حوزه خلیج فارس، روز 14 مهر 1394



شکل 13. عمق نوری اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای باند 1/643 میکرومتر

جدول 8. شاخص‌های آماری برای باند 1/643 میکرومتر

شاخص	اندازه‌گیری شده	مدلسازی شده
میانگین	0/31	0/21
انحراف معیار	0/08	0/05
همبستگی		0/98
RMSE		0/11
RMSD		0/03

n بحث و نتیجه‌گیری

محققان بسیاری علاقه‌مند به استخراج اطلاعات غبار از طریق تصاویر ماهواره‌ای هستند. استفاده تنها از تصاویر

ماهواره‌ای، توانایی نشان‌دادن غبار به صورت کیفی را دارد حال آنکه برای استخراج اطلاعات کمی از تصاویر ماهواره در مورد هواویزها نیاز به شناخت فیزیک نور و نحوه عبور

خوبی را بین داده‌های اندازه‌گیری نشان داد و پارامتر RMSE برای باند 1/243 میکرومتر به ترتیب برابر با 0/09، 0/06 و 0/04 و پارامتر RMSD برابر با 0/06، 0/01 و 0/01 به دست آمد و برای باند 1/643 پارامتر RMSE به ترتیب برابر با 0/06، 0/13 و 0/11 و پارامتر RMSD برابر با 0/02، 0/03 و 0/03 محاسبه شد. بنابراین می‌توان بیان کرد دقت شبیه‌سازی‌ها در این باندها مناسب است 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 برای روزهای مختلف به دلیل تغییر شدت توزیع گردوغبار در فضا و تغییر در انعکاس ثبت شده در سنجنده و همچنین پوشش ابر در منطقه است. در مطالعات صورت گرفته در داخل کشور نیز سلیمانی و همکاران (1394) در مطالعه‌ای نشان دادند که داده‌های عمق نوری از سنجنده مودیس دارای دقت قابل قبولی هستند و همبستگی بسیار زیادی بین مقادیر اندازه‌گیری شده با سنجنده مودیس و شبکه آئرونت، وجود دارد. نتایج این بررسی نشان داد که داده‌های عمق اپتیکی حاصل از تصاویر ماهواره مودیس می‌تواند اطلاعات دقیقی از مقدار گردوغبارهای منطقه خلیج فارس فراهم نماید (20). نتایج اولیه حاصل از اجرای الگوریتم نشان‌دهنده توانایی مدل در شبیه‌سازی عمق نوری هواویزها بود. بررسی نتایج مدل نشان داد که الگوریتم موجود به درستی عمل می‌کند و با توجه به داده‌های انعکاس طیفی برای شعاع مؤثرهای مختلف در جداول LUT، مقادیر را برای عمق نوری هواویزها شبیه‌سازی می‌کند. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد مقادیر عمق نوری به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای همبستگی معنی‌داری با عمق نوری اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های مورد مطالعه دارد. در همه ایستگاه‌ها مقدار عمق نوری به دست آمده از تصویر کوچک‌تر از مقدار عمق نوری متناظر با آن در ایستگاه است. علت این امر را می‌توان استفاده از ذرات با شعاع مؤثرهای محدود دانست؛ زیرا دامنه تحت پوشش این شعاع مؤثرها در توزیع اندازه ذرات لوگ‌نرمال محدود می‌شود. منابع خطا در ارزیابی هواویزها مانند: خطای کالیبراسیون حس گر، آلودگی موجود در زاویه تابش یا تخمین نادرست از انعکاس آب تعریف می‌شود.

نور در جو است. در این پژوهش نتایج ارزیابی‌ها نشان داد مقادیر عمق نوری به دست آمده از هواویزهای تصاویر ماهواره‌ای همبستگی معنی‌داری با عمق نوری اندازه‌گیری شده هواویزها در ایستگاه‌های مورد مطالعه دارد. در تمامی ایستگاه‌ها مقدار عمق نوری به دست آمده از تصویر کوچک‌تر از مقدار عمق نوری متناظر با آن در ایستگاه است که با مطالعات کافمن و همکاران (2002) همخوانی دارد (6)؛ آن‌ها بیان کردند رگرسیون عمق نوری مودیس و ایستگاه‌های آئرونت بر روی اقیانوس در شیب کمتر از یک است، یعنی مودیس گرایش به ارزیابی عمق نوری کمتر از آئرونت دارد (6).

دیگر نتایج نشان داده است که روی خشکی تفاوت میان داده‌های عمق نوری تصاویر با ایستگاه‌های زمینی کاهش می‌یابد و نزدیک به صفر است (10). اما روی اقیانوس استفاده از الگوریتم موجب افزایش عمق نوری سنجنده مودیس و داده‌های ایستگاه‌های زمینی (حدود 0/025) است و مقدار همبستگی برای ماه‌های مختلف در دامنه 0/88 تا 0/92 و RMSE نیز در دامنه 0/06 تا 0/08 متغیر است در نتیجه بررسی‌های آن‌ها نشان داد که همبستگی بالایی میان داده‌های استخراج شده از باند 0/553 و 0/855 میکرومتر با داده‌های ایستگاه‌های زمینی وجود دارد (11). در پژوهش حاضر نیز مقدار همبستگی برای روزهای مورد مطالعه برای باند 1/243 و 1/643 میکرومتر بزرگ‌تر از 0/94 به دست آمد. که روند خوبی را بین داده‌های اندازه‌گیری نشان داد. همچنین گوپتا و همکاران (2006) توانستند رابطه خطی قوی‌ای بین ضخامت نوری هواویزهای سنجنده مودیس و مقادیر اندازه‌گیری شده زمینی با ضریب همبستگی 0/96 به دست آورند (4). در مطالعه‌ای دیگر، رمر و همکاران (2002)، مقدار همبستگی برای باند 0/644 برابر با 0/94 و برای باند 0/855 برابر با 0/95 با خطای استاندارد برای هر دو باند 0/02 به دست آمد (15). در پژوهش حاضر نیز باندهای 1/243 و 1/643 میکرومتر برای ارزیابی عمق نوری گردوغبار در خلیج فارس استفاده شد و مقدار همبستگی برای روزهای 8 تیر 1392، 23 تیر 1393 و 14 مهر 1394 برای باند 1/243 به ترتیب 0/96، 0/94 و 0/98 و برای باند 1/643 به ترتیب 0/99، 0/98 و 0/98 به دست آمد که روند

پیکسل تصویر اختصاص می‌دهد. استفاده از مدل انتقال تابش برای ذرات با شعاع مؤثر متفاوت موجب می‌شود که اختلاف بین بازتاب شبیه‌سازی شده و ثبت شده به کم‌ترین مقدار خود برسد؛ در این حالت عمق نوری واقعی تر و شعاع مؤثر دقیق‌تری به هر پیکسل اختصاص داده می‌شود.

نتایج مدل با استفاده از دامنه‌ای از شعاع‌های مؤثر بهتر خواهد شد؛ زیرا ذرات غبارهایی که در جو پخش شده‌اند دارای شعاع‌های گوناگونی‌اند. خوارزمیک تهیه شده بر اساس کم‌ترین اختلاف بین شبیه‌سازی‌های بازتاب در بالای جو با بازتاب ثبت شده به وسیله سنجنده، یک عمق نوری به هر

References

- Ackermann, I. J., Hass, H., Memmesheimer, M., Ebel, A., Binkowski, F. S., & Shankar, U. (1998). Modal aerosol dynamics model for Europe: Development and first applications. *Journal of Atmospheric Environment*, 32, 2981–2999.
- Chervenkov, H., & Jakobs, H. (2011). Dust storm simulation with regional air quality model: Problems and results. *Journal of Atmospheric Environment*, 45, 3965-3976.
- Dave, J. V. (1970). Intensity and Polarization of Radiation Emerging from a Plane- Parallel Atmosphere Containing Mono-dispersed Aerosols. *Journal of Applied Optics*, 9(12), 2673-&.
- Gupta, P., Sunder, A. C., Wang, J., Gehrig, R., Lee, Y. C., & Kumar N. (2006). Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities. *Journal of Atmospheric Environment*, 40(30), 5880-5892.
- Kaufman, Y. J., & Remer, L. A. (1994). Detection of forests using mid-IR reflectance: an application for aerosol studies. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Society*, 32(3), 672-683.
- Kaufman, Y. J., Tanre, D., & Boucher, O. (2002). A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, 419, 215-223.
- Kaufman, Y. J., Koren, I., Remer, L. A., Tanrı, D., Ginoux, P., & Fan, S. (2005). Dust transport and deposition observed from the Terra-Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer (MODIS) spacecraft over the Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 110, 1-16.
- Khoshsima, M., Sabet Ghadam, S. S., & Aliakbari Bidokhti, A. A. (2015). Estimation of atmospheric particulate matter (PM10) concentration based on remote sensing measurements and meteorological parameters: application of artificial neural network. *Journal of Earth and Space Physics*, 41(3), 499-510. (In Farsi)
- Kim, S. W., Yoon, S. C., & Kim, J. (2008). Columnar Asian dust particle properties observed by sun/sky radiometers from 2000 to 2006 in Korea. *Journal of Atmospheric Environment*, 42, 492-504.
- Levy, R.C., Remer, L.A., & Kaufman, Y.J. (2004). Effect of neglecting polarization on the MODIS aerosol retrieval over land. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Society*, 42(11), 2576- 2583.
- 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. *Journal of Atmospheric Measurement Techniques (AMT)*, 8, 4083–4110.
- 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. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 83, 31–43.
- Mohammadi Nezhad, Sh., Ali Mohammadi Sarab, A., & Farajzadeh Asl, M. (2015). Air particles (less than 10Mq) spatial distribution Analysis and mapping in Khuzestan area based on MODIS sensor products. *Journal of spatial planning*, 18(3), 79-98. (In Farsi)
- Prospero, JM., & Lamb, PJ. (2003). African droughts and dust transport to the Caribbean: climate change implications. *Science*, 302, 1024-7.

15. Remer, L. A., Tanre, D., Kaufman, Y. J., Ichok, C., Matto, S., Levy, R., Chu, D. O., 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), doi: 10.1029/2001GL013204.
16. 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.
17. Retalis, A., Hadjimitsis, D. G., Michaelides, S., Tymvios, F., Chrysoulakis, N., Clayton, C. R. I., & Themistocleous, K. (2010). Comparison of aerosol optical thickness with in situ visibility data over Cyprus. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 10: 421-428.
18. Shao, Y. (2004). Simplification of a dust emission scheme and comparison with data. *Journal of Geophysical Research*, 109, 359- 372.
19. Stegmann, P. M. (2000). Ocean-color satellites and the phytoplankton-dust connection. *Satellite, Oceanography and Society*, 11: 207-223.
20. Soleimani, A., Mohammad Asgari, H., Dadolahi Sohrab, A., Elmizadeh, H., & Khazaei, S.H. (2016). Evaluation of optical depth from MODIS satellite imagery in the Persian Gulf. *Journal of Marine Science and Technology*, 14(4), 75-83. (In Farsi)
21. 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, 2095, doi: 10.1029/2003GL018174, 21.
22. Wei, P., Hong, J., & Zhan-yong, X. (2014). Using MODIS to retrieve the AOT over the region of Baikal. *IOP Conf. Earth and Environmental Science* 17(2014). 012038 doi:10.1088/1755-1315/17/1/012038.
23. Xie, J., Yang, C., Zhou, B., & Huang, Q. (2010). High-performance computing for the simulation of dust storms. *Computers, Environment and Urban Systems*: 34, 278-290.

Evaluation of the ability of radiation transmission model and MODIS images to estimate aerosol optical depth

S. Farhadi¹, H. Mohammad Asgari^{*2}, A. Dadollahi Sohrab³, S. M. J. Nazemosadat⁴, S. H. Khazaei⁵

1. M.Sc of Marine Environmental, College of Marine Natural Resources, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr , Iran.
2. Assistant Professor College of Marine Natural Resources, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran.
3. Associate Professor College of Marine Natural Resources, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr , Iran.
4. Professor, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.
5. Lecturer, College of Marine Natural Resources, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr , Iran.

* Corresponding Author: sahnasabpour@ut.ac.ir

Received date: 09/11/2016

Accepted date: 20/09/2017

Abstract

Aerosols play an important role in the climate system of the atmosphere. These atmospheric particles are directly affected by changing radiation exposure by diffusing and absorbing different wavelengths and indirectly by changing the optical properties and the durability of the clouds, and the optical properties of the aerosols, such as aerosols optical depth (AOD), are critical in understanding the effects of atmospheric aerosols on climate change and biogeochemical cycles. Therefore, in this research, the ability of radiation transmission model and MODIS images was evaluated to estimate the aerosols optical depth in Persian Gulf. MATLAB was used for images processing of the images with resolution of 500 m at 545 networks. The evaluation of aerosols optical depth data was performed by using AERONET stations with Pearson correlation, RMSE and RMSD indices. First results of the algorithm implementation showed the ability of model to simulate the aerosols optical depth. Modeling results showed that the algorithm is correct and according to spectral reflectance data for effective radius of the LUT tables, values simulated for aerosols optical depth. The results of evaluation showed that optical depth values obtained from the images has significantly correlation with the measured optical depth in AERONET stations. So that, amount of correlation calculated form 29 June 2013, 14 July 2014 and 6 October 2015 in the band of 1.243 μm is 0.96, 0.94 and 0.98 respectively, and for the band of 1.643 μm is 0.99, 0.98 and 0.98, respectively which shows a good trend between the measured data, RMSE and RMSD indices were calculated in these days less than 0.15 and less than 0.06, respectively. It can be concluded that simulations accuracy is appropriate in these bands.

Keywords: Aerosols; Persian Gulf; Retrieval algorithm; MODIS