نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال ششم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۷

Vol.6, No.3, Autumn 2018

۱۳۹-۱۶۲

توسعه و ارزیابی تخمین تابش موج کوتاه فرودی در سطح بر اساس عمق اپتیکی هواویز SARA و داده‌های سنجنده مادیس در شرایط بدون ابر

اسلام جوادنیا [*1]، علی‌اکبر آبکار [2]

۱- دانشجوی دکتری سنجش از دور – دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۰۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۰۹

چکیده

یکی از عوامل اصلی عدم قطعیت در تخمین تابش موج‌کوتاه در سطح، عمق اپتیکی هواویز موجود در جو می باشد. در این مقاله برای محاسبه تابش موج کوتاه از مدل پارامتری یانگ که هر یک از اجزای جو را بصورت جداگانه مدل می‌نماید، استفاده شد. در اکثر تحقیقات قبلی برای محاسبه تابش موج کوتاه در سطح، از داده‌های عمق اپتیکی هواویز سنجنده مادیس استفاده شده است، درحالی‌که در این تحقیق عمق اپتیکی برآورد شده از الگوریتم ساده شده بازیابی هواویز (SARA(Simplified Aerosol Retrieval Algorithm، مورد استفاده قرار گرفت. روش پیشنهادی برآورد تابش موج کوتاه براساس داده عمق اپتیکی هواویز SARA و همچنین روش رایج تابش موج‌کوتاه به‌دست آمده براساس محصولات عمق اپتیکی مادیس، با داده‌های زمینی اندازه‌گیری شده در ایستگاه چیتگر شهر تهران و برای پریود زمانی تابستان ۲۰۱۳ اعتبار سنجی شدند. نتایج اعتبارسنجی برای تابش موج‌کوتاه برآورده شده براساس عمق اپتیکی هواویز SARA، ضریب رگرسیون ۸۸٫۰ (R2)، خطای جزر میانگین مربعات و بایاس بترتیب ۲۵٫۰۹ و ۲٫۰۵ وات بر مترمربع، برای تابش موج‌کوتاه براساس داده سطح ۲ عمق اپتیکی هواویز مادیس، ضریب رگرسیون ۰٫۶۱، خطای جزر میانگین مربعات و بایاس بترتیب ۴۱٫۷۵ و ۱۵٫۹۳ وات بر مترمربع و برای تابش موج-کوتاه براساس داده سطح ۳ عمق اپتیکی هواویز مادیس، ضریب رگرسیون ۰٫۸۲، خطای جزر میانگین مربعات و بایاس بترتیب ۶۰٫۷۳ و ۵۳٫۷۷ وات بر مترمربع به‌دست آمدند. نتایج بیانگر دقت بالای تابش موج-کوتاه برآورد شده بر اساس عمق اپتیکی هواویز SARA نسبت به محصولات عمق اپتیکی هواویز مادیس می‌باشد. بطوریکه خطای جزر میانگین مربعات بترتیب ۱٫۶ و ۲ برابر نسبت به محصولات سطح ۲ و ۳ مادیس می‌باشد و خطای بایاس در روش پیشنهادی تقریباً به صفر رسیده است. با فرض توزیع مکانی مناسب ایستگاههای آئرونت (AERONET)، روش پیشنهاد شده‌ی ترکیب مدل تابشی یانگ و الگوریتم برآورد عمق اپتیکی هواویز SARA، می‌تواند تابش موج‌کوتاه را از مقیاس منطقه‌ای به جهانی، نیز برآورد نماید.

کلیدواژه‌ها: تابش فرودی موج کوتاه در سطح، عمق اپتیکی هواویز، مادیس

*نویسنده مکاتبه کننده: تهران، خیابان ولی عصر، بالاتر از میرداماد، پلاک ۱۳۴۶ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک

تلفن: ۰۹۱۲۵۲۳۲۰۵۷

Email : jjavadnia@mail.kntu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]

۱- مقدمه

مجموع تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین در محدوده ۳۰۰ تا ۳۰۰۰ نانومتر، تابش فرودی موج کوتاه در سطح (DSSR)[1] نامیده می‌شود و از دو مؤلفه مستقیم[2] و پراکنده[3] تشکیل شده است. تابش فرودی به سطح زمین، نقش اساسی در توازن انرژی بین جو و سطوح زمین-اقیانوس دارد. در مدلسازی و برنامه‌ریزی در زمینه‌های مختلف، از جمله کشاورزی، جنگلداری، اقیانوس شناسی، هواشناسی و اقلیم، اندازه‌گیری مکانی و زمانی تابش مورد نیاز است [۱]. تخمین دقیق تابش موج کوتاه برای کاربردهای مختلف از قبیل هواشناسی کشاورزی، پیش‌بینی آب و هوا و پایش اقلیم، بسیار ضروری است و همچنین یک متغیر مهم در بسیاری از مدل‌های عددی برای تخمین پارامترهایی مانند، رطوبت خاک، تبخیر وتعرق و فتوسنتز می‌باشد [۲ و ۳]. علاوه بر این، برآورد تابش خورشیدی، اهمیت زیادی در مکان‌یابی سیستم‌های گرمایش خورشیدی در کاربردهای انرژی خورشیدی دارد [۴ و ۵].

اندازه‌گیری تابش در ایستگاههای زمینی، محدود به یک مکان خاصی است، درحالیکه داده‌های ماهواره‌ای سنجش از دوری می‌تواند اطلاعات در مقیاس‌های محلی تا جهانی را در اختیار کاربران قرار دهد [۶]. بنابراین مدل‌های بسیاری برای تخمین تابش موج کوتاه از طریق داده‌های سنجش از دوری به‌ویژه از داده‌های سنجنده مادیس (MODIS)[4] مستقر بر ماهواره‌های ترا و آکوا و همچنین سنجنده‌های مستقر بر ماهواره‌های زمین‌آهنگ، طراحی و توسعه داده شده‌اند [۲، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵]. مدل‌های پهن‌باند[5] میزان جذب، پراکنش و بازتاب انرژی توسط جو را محاسبه می‌کنند و برای سنسورهای چند طیفی مخصوصاً مادیس می‌توانند مناسب‌تر باشند، زیرا سنجنده مادیس می‌تواند به تنهایی داده‌های مرتبط با جو و ویژگیهای سطح زمین را فراهم نماید و از طرفی خطای ناشی از به‌کارگیری داده‌ها از سنسورهای مختلف را نیز کاهش می‌دهد. محصولات سنجنده مادیس دارای قدرت تفکیک زمانی یک روز و قدرت تفکیک مکانی های مختلف از قبیل ۲۵۰ متر، ۵۰۰ متر و ۱ کیلومتر می‌باشد که برای به تصویر کشیدن ویژگیهای زمین از مقیاس منطقه‌ای به جهانی، مناسب هستند [۱۶]. الگوریتم‌های بسیاری مبتنی بر این محصولات، برای برآورد تابش موج کوتاه طراحی و توسعه یافته‌اند، به‌طوری‌که دیگر نیازی به محاسبات سنگین از قبیل محاسبات پیچیده و سنگین مدل‌های انتقال تابشی نیست [۲، ۱۴ و ۱۷].

مطالعات قبلی نشان داده است که دقت نقشه‌های تابش موج کوتاه هنوز در بسیاری موارد رضایت بخش نیست [۵ و ۱۸]. تحقیقات نشان می‌دهد که بخش بزرگی از این عدم قطعیت، در الگوریتم‌های برآورد تابش موج کوتاه در شرایط بدون ابر، مرتبط با داده‌های غیردقیق عمق اپتیکی هواویز[6](AOD) می‌باشد [۱ و ۱۹]. امروزه بسیاری از محققین از داده‌های اقلیمی هواویز برای محاسبه تابش موج کوتاه بهره می‌برند. این داده‌های اقلیمی قدرت تفکیک مکانی و زمانی پایینی دارند (۱ درجه و ماهیانه) و ممکن است برای کاربردهای در مقیاس ۱ تا ۱۰ کیلومتر مناسب نباشند [۱۵]. در حال حاضر نیاز به بررسی و مطالعه دقیق اثر هواویزها بر روی تابش خورشیدی در شرایط آسمان صاف (بارگذاری کم هواویز[7]) و شرایط تیرگی جو (بارگذاری زیاد هواویز[8]) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، هرچه بیشتر احساس می‌شود، زیرا این داده‌ها با اطلاعات مکانی-زمانی مناسب از

[1] Downward Surface Shortwave Radiation
[2] Direct
[3] Diffuse
[4] MODerate resolution Imaging Spectrometer
[5] Broadband

[6] Aerosol Optical Depth
[7] Low aerosol loading
[8] High aerosol loading

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]

توزیع هواویزها، می‌توانند ویژگیهای دقیقی از اثر تابشی آنها در اختیار کاربران قرار دهند.

الگوریتم های مختلفی به منظور برآورد عمق اپتیکی هواویز و محاسبه میزان بارگذاری گردوخاک، با استفاده از تکنیکهای سنجش دوری توسعه داده شده است. مادیس برای بیان عمق اپتیکی هواویز، محصول سطح دو هواویز مادیس [1](MODIS L2 AOD) و محصول سطح سه هواویز مادیس [2](MODIS L3 AOD) را ارائه کرده است. محصول سطح دو مادیس قدرت تفکیک مکانی ۱۰ کیلومتر دارد و خصوصیات هواویزها را با الگوریتم های هدف تیره [3](DT) [۲۰] و عمق آبی [4](DB) [۲۱] تشریح می‌نماید. الگوریتم DT، AOD را برای سطوح روشن، دست بالا[5] و برای سطوح تیره، دست پایین[6] برآورد می‌نماید [۲۲]. علاوه بر این، الگوریتم DT به‌دلیل محدودیت در معیارهای انتخاب، در شرایط تیرگی بالای جو، قادر به برآورد AOD نیست و در نتیجه، پیسکل‌های از دست رفته[7] زیادی تولید می‌شوند که هیچ مقداری برای AOD ندارند [۲۳]. الگوریتم DB، بدلیل توانایی بالا در برآورد AOD برای سطوح روشن، پیکسل‌های از دست رفته کمتری نسبت به الگوریتم DT دارد، با این وجود هنوز AOD برآورده شده، از دقت مناسبی برخوردار نیست و مقادیر AOD، بویژه در شرایط گرد و خاکی به میزان قابل توجهی دست پایین برآورد می‌شوند [۲۴]. محصول سطح سه عمق اپتیکی مادیس، متشکل از تجمع فضایی سطح دو مادیس به قدرت تفکیک مکانی ۱ درجه می باشد [۲۵]. محصول سطح سه مادیس پیکسل‌های از دست رفته کمتری دارد اما قدرت تفکیک مکانی پایین‌تری دارد. مشکلات ذکر شده در بالا، تخمین‌های تابش موج کوتاه را با استفاده از این محصولات تحت تأثیر قرار می‌دهد و برآورد دقیق تابش موج کوتاه با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر را در شرایط بارگذاری کم و زیاد هواویز بخصوص در زمان طوفانهای گرد و خاکی، با مشکل مواجه می‌کند. بنابراین، برای تخمین دقیق تابش موج‌کوتاه در شرایط آسمان صاف و تیره، استفاده از داده‌های با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا، ضروری به‌نظر می‌رسد. بلال و همکاران [۲۳] به تازگی الگوریتم ساده شده بازیابی هواویز (SARA[8]) را با استفاده از داده های رادیانس بالای جو و بازتابندگی سطح توسعه داده‌اند. این الگوریتم قادر به بازیابی AOD با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا (۱ کیلومتر و روزانه) می‌باشد. بلال و همکاران الگوریتم SARA را در منطقه هنگ کنگ ارزیابی کرده‌اند و نشان دادند که این الگوریتم خصوصیات هواویزها را بهتر از محصول سطح دو مادیس بیان می‌کند [۲۳]. این الگوریتم در مقایسه با الگوریتم های پیشینی که در هنگ کنگ مورد مطالعه وبررسی قرار گرفته اند، کارآیی بهتری را در شرایط بارگذاری کم و زیاد هواویز، از خود نشان داد [۲۳، ۲۶ و ۲۷]. علاوه بر این، الگوریتم SARA به‌دلیل اعمال بر تمامی پیکسل‌های بدون ابر، قادر به بازیابی، به مراتب تعداد پیکسل‌های بیشتری از AOD برای یک منطقه خاص است، درحالیکه الگوریتم DT، به‌علت محدودیت‌هایی که در انتخاب پیکسل‌های تیره وجود دارد، به پیکسل‌های محدودی اعمال می‌گردد [۲۴]. مطالعاتی که اخیراً برای تخمین تابش موج‌کوتاه از داده‌های مادیس بهره‌برده‌اند، در جدول (۱) به اختصار آورده شده است. بیشت[9] و همکاران [۱۴] از مدل ارائه شده توسط زیلمان[10] و با استفاده از داده‌های دمای هوا و دمای نقطه شبنم به‌دست آمده از محصول

[1] MODIS Level 2 AOD
[2] MODIS Level 2 AOD
[3] Dark Target
[4] Deep Blue
[5] Overestimate
[6] Underestimate
[7] Missing pixels

[8] Simplified Aerosol Retrieval Algorithm
[9] Bisht
[10] Zillman

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]

پروفایل جو مادیس (MOD07)، تابش موج کوتاه را برای روزهای بدون ابر برآورد نمودند. ریو[1] و همکاران [۲]، هوبورگ و سوگارد[2] [۲۸] بترتیب با بهکارگیری مدلهای بیرد[3] [۲۹] و اقبال [۳۰] و با استفاده از محصول سطح دو عمق اپتیکی هواویز (MOD04)، محصول بخار آب (MOD05) و محصول ازن (MOD07) سنجنده مادیس، تابش موج‌کوتاه در سطح را بهدست آوردند. هوانگ[4] و همکاران با بکارگیری مدل مدل توسعه یافته یانگ بهمراه محصول سطح دو و سه عمق اپتیکی هواویز (MOD04/MOD08)، محصول بخار آب (MOD05)، محصول ازن (MOD07)، تابش موج کوتاه را در شرایط بدون ابر برآورد نمودند. تمامی مطالعات از محصول زاویه زنیتی خورشید (MOD03) بهره بردند.

یانگ و همکاران در سال ۲۰۰۱ [۳۱]، با سادهسازی مدل طیفی لکنر[5] [۳۲] مدل انتقال تابشی پهن باندی را طراحی و توسعه دادند. نتیجه ارزیابی ۲۱ مدل توسط گیمارد[6] [۳۳ و ۳۴] نشان داد که مدل یانگ یکی از بهترین مدل‌های پهن باند در مقایسه با مدل‌های انتقال تابشی برای محاسبه تابش موج کوتاه در شرایط بدون ابر است. پائولسیو و اسچلت[7] [۳۵ و ۳۶] و مدکور [۳۷] [۳۷] نیز، کارآیی بالای این مدل را تأیید نمودهاند. مطالعات اشاره شده در رابطه با ارزیابی مدل یانگ، عمدتاً از دادههای دقیق نقطهای بهعنوان ورودی در مدل بهره میبرند. در تحقیق حاضر نیز از این مدل برای محاسبه تابش موج کوتاه در شرایط بدون ابر استفاده شد ولی از دادههای مختلف جو و زمین مادیس بعنوان ورودی استفاده گردید (جدول (۱)).

در روش پیشنهاد شده در این تحقیق بهجای استفاده از محصول عمق اپتیکی هواویز مادیس، از الگوریتم SARA که با استفاده از محصول رادیانس بالای جو و محصول بازتابندگی سطح زمین مادیس (MOD02, MOD09)، مقدار AOD را در محدوده طیفی ۵۵۰ نانومتر برآورد می‌نماید، بهره برده شد. عمق اپتیکی هواویز بهدست آمده با الگوریتم SARA، SARA AOD نامیده می‌شود. سپس برای محاسبه تابش موج کوتاه با استفاده از مدل یانگ، از SARA AOD بهعنوان ورودی عمق اپتیکی هواویز استفاده شد. بهمنظور مقایسه، محصول سطح دو و سه مادیس نیز برای محاسبه تابش موج کوتاه مورد استفاده قرار گرفتند. در نهایت تابش موج کوتاه‌های بهدست آمده از این سه نوع داده مختلف AOD، توسط مشاهدات زمینی صورت گرفته در ایستگاه چیتگر، مورد ارزیابی قرار گرفتند.

هدف این تحقیق توسعه مدلی برای تخمین دقیق تابش موج کوتاه براساس SARA AOD و مقایسه آن با تابش موج کوتاه‌های بهدست آمده از محصول سطح دو و سه AOD مادیس می‌باشد. بمنظور دستیابی به این هدف، موارد زیر انجام گردید.

- تخمین تابش موج کوتاه با استفاده از مدل یانگ براساس SARA AOD، MODIS L2 AOD و MODIS L3 AOD
- ارزیابی تابش‌های بهدست آمده براساس داده‌های مختلف AOD، با اندازه‌گیری‌های زمینی صورت گرفته توسط دستگاه پیرانومتر مستقر در ایستگاه چیتگر

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش، ابتدا منطقه مورد مطالعه معرفی شده، سپس مشاهدات زمینی صورت گرفته برای DSSR و AOD و زمان‌های اندازه‌گیری این داده‌ها بیان می‌شوند. قسمت بعدی این بخش به داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در این تحقیق می‌پردازد و در نهایت در

[1] Ryu
[2] Houborg & Soegaard
[3] Bird
[4] Huang
[5] Leckner
[6] Gueymard
[7] Paulescu and Schlett

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]

قسمت‌های بعدی، روش‌های استفاده شده، برای بازیابی DSSR و AOD تشریح می‌گردند.

جدول ۱: برآورد تابش موج‌کوتاه با استفاده از داده‌های مادیس در مطالعات پیشین و تحقیق حاضر

تحقیق	مدل	محصولات داده های مادیس
بیشت و همکاران، ۲۰۰۵	زیلمان (۱۹۷۲)	MOD03, MOD07
هوبورگ و سوگارد، ۲۰۰۴	اقبال (۱۹۸۳)	MOD03, MOD04, MOD05, MOD07
ریو و همکاران، ۲۰۰۸	بیرد (۱۹۸۱)	MOD03, MOD04, MOD05, MOD07
هوانگ و همکاران، ۲۰۱۲	یانگ (۲۰۰۱)	MOD03, MOD04/MOD08, MOD05, MOD07
تحقیق حاضر	یانگ (۲۰۰۱)	MOD02, MOD03, MOD05, MOD07, MOD09

۲-۱- منطقه مورد مطالعه و اندازه‌گیری‌های زمینی

سایت چیتگر در دامنه جنوبی رشته کوههای البرز در شمال‌غربی شهر تهران در پارک چیتگر واقع است (شکل (۱) و جدول (۲)). تهران دارای یک آب و هوای خشک (طبقه بندی اقلیمی کوپن: BSK)، از نوع آب و هوای مدیترانه‌ای با تابستان‌های گرم است. آب و هوای تهران تا حد زیادی از طریق موقعیت جغرافیایی آن که توسط رشته کوه‌های بلند البرز از شمال و کویر مرکزی از جنوب احاطه شده است، تعریف می‌شود. به‌طور کلی می‌توان گفت تهران دارای آب و هوای معتدل در بهار و پاییز، گرم‌وخشک در تابستان و سردومرطوب در زمستان می‌باشد. بیشینه، کمینه و متوسط دمای سالانه بترتیب ۴۲٫۶، ۱۰- و ۱۷٫۷ درجه سانتیگراد می‌باشد [۳۸]. میانگین بارش سالانه ۲۳۳ میلیمتر است.

داده‌های سایت چیتگر از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید [۳۸]. تابش موج‌کوتاه در ارتفاع ۱/۵ متری سطح زمین، توسط دستگاه پیرانومتر مدل Kipp & Zonen CMP6 اندازه‌گیری می‌شود (جدول (۲)). اندازه‌گیری‌ها در این سایت از سال ۲۰۱۲ انجام می‌شود، در این تحقیق از داده‌های ۱ ژوئن تا ۲۱ دسامبر سال ۲۰۱۳ و برای روزهای بدون ابر استفاده شده است. کیفیت داده‌های جمع‌آوری شده توسط نرم‌افزار آماری SPSS کنترل شده و داده‌های خارج از انحراف استاندارد به‌عنوان داده‌های پرت[1] در نظر گرفته می‌شوند. اندازه‌گیری داده‌ها هر ۱۰ دقیقه ثبت می‌شوند، بنابراین نزدیکترین اندازه‌گیری‌ها به زمان‌های گذر ماهواره ترا به‌عنوان اندازه‌گیری زمینی مربوطه درنظر گرفته می‌شوند.

آئرونت شبکه‌ای متشکل از حدود بیش از ۷۰۰ سانفتومتر کالیبره شده زمینی در سراسر جهان است که خصوصیات اپتیکی هواویزها را اندازه‌گیری می‌کنند [۳۹ و ۴۰]. سانفتومترها تابش مستقیم و پراکنده خورشیدی را در فواصل زمانی ۱۵ دقیقه و در طول موج‌های ۴۴۰، ۶۷۰، ۸۷۰ و ۱۰۲۰ نانومتر اندازه‌گیری می‌کنند و AOD در طول موج‌های مذبور با دقت بالا از طریق مجموعه‌ای از الگوریتم‌ها محاسبه می‌گردد [۴۰]. در این تحقیق داده‌های بدون ابر سطح AOD ۱/۵، برای پریود زمانی ۱ ژوئن تا ۲۱ دسامبر سال ۲۰۱۳، از سایت آئرونت IASBS مستقر در دانشگاه تحصیلات تکمیلی شهر زنجان (شکل (۱) و جدول (۲)) به‌دست آمدند. داده‌های AOD به‌دست آمده در فواصل زمانی ۳۰± دقیقه و در زمان‌های نزدیک به گذر ماهواره ترا، میانگین‌گیری شده و برای محاسبه آلبدوی پراکنش منفرد[2] و فاکتور

[1] Outlier
[2] Single Scattering Albedo (SSA)

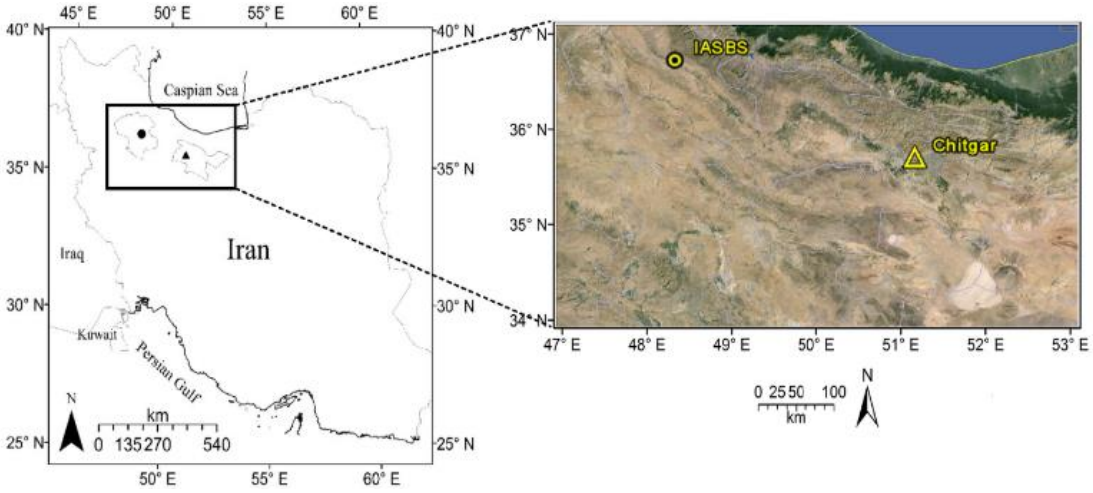
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]

تقارن[1] بر فراز سایت‌های چیتگر و IASBS، از طریق الگوریتم SARA مورد استفاده قرار گرفتند. زنجان دارای آب و هوای نیمه‌خشک سرد (طبقه‌بندی اقلیمی کوپن: BSK)، با تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد و مرطوب می‌باشد. بارش بسیار کم است و بیشتر بین ماه‌های اکتبر و می بارش اتفاق میفتد [۳۸]. میانگین دمای سالانه ۱۱ درجه سانتیگراد و میانگین بارش سالانه ۱۱۵ میلیمتر است.

[1] Asymmety factor

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]



شکل ۱: سایت چیتگر (مثلث) و سایت آئرونت IASBS (دایره)

جدول ۲: مشخصات سایت تابشی چیتگر و سایت آئرونت IASBS

نام سایت	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	دستگاه
چیتگر	۵۱/۲۰ درجه شرقی	۳۵/۷۶ درجه شمالی	۱۳۰۵	پیرانومتر مدل CMP6
IASBS	۴۸/۵۰ درجه شرقی	۳۶/۷۰ درجه شمالی	۱۸۰۵	سانفتومتر مدل CIMEL

علاوه بر این، داده‌های میدان دید[1] نیز از ایستگاه هواشناسی مستقر در فرودگاه مهرآباد تهران اخذ گردید [۳۸]. فاصله بین ایستگاه چیتگر و ایستگاه مهرآباد (۵۱٫۳۱ درجه شرقی، ۳۵٫۶۹ درجه شمالی) حدود ۱۳ کیلومتر می‌باشد. یک ناظر زمینی داده‌ها را هر ۳ ساعت اندازه‌گیری می‌کند. داده‌های میدان دید معمولاً در طول روز زیاد تغییر نمی‌کنند، بنابراین داده‌ها برای یک روز میانگین‌گیری می‌شوند. برای محاسبه AOD از داده‌های میدان دید از رابطه ارائه شده توسط ورموت و همکاران [۴۱] استفاده شد.

۲-۲- داده‌های سنجنده مادیس

محصول سطح یک، داده رادیانس بالای جو MOD02 و سطح یک موقعیت جغرافیایی MOD03، سطح دو عمق اپتیکی هواویز MOD04، سطح دو بخار آب MOD05 و سطح دو پروفایل جو MOD07، سطح سه عمق اپتیکی هواویز MOD08، سنجنده مادیس ماهواره ترا از مرکز هوایی گودارد[2] و سیستم توزیع و بایگانی جوی[3] [۴۲] ناسا برای پریود زمانی ۱ ژوئن تا ۲۱ دسامبر (۱۵۷ تا ۲۷۱ بر اساس روز جولین[4]) استخراج گردیدند. محصولات مختلف داده‌های مادیس و پارامترهای مورد استفاده، بهمراه قدرت تفکیک مکانی آن‌ها در جدول (۳) مشاهده می‌شود. روزهای مورد استفاده در این تحقیق بهمراه زمانهای گذر ماهواره در جدول (۴) آورده شده است. محصول سطح دو پروفایل جو MOD07، سطح دو عمق اپتیکی هواویز MOD04 و سطح سه عمق اپتیکی هواویز MOD08 به‌ترتیب قدرت تفکیک مکانی ۵، ۱۰ کیلومتر و ۱ درجه دارند. بنابراین هر سه به قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر نمونه‌برداری شدند.

[1] Visibility

[2] Goddard Space Flight Center (GSFC)
[3] Atmosphere Archive and Distribution System (LAADS)
[4] Julian day

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]

جدول ۳: محصولات داده‌های مادیس مورد استفاده در این تحقیق

محصول مادیس	نام اختصاری	قدرت تفکیک مکانی	پارامترهای مورد استفاده	مدل یا الگوریتم
رادیانس	MOD02	۱ کیلومتر	رادیانس بالای جو باند سبز	SARA
موقعیت جغرافیایی	MOD03	۱ کیلومتر	ارتفاع، زوایای زنیتی و آزیموتی	یانگ و SARA
عمق اپتیکی هواویز	MOD04	۱۰ کیلومتر	عمق اپتیکی هواویز در ۵۰۰ نانومتر	یانگ
بخار آب	MOD05	۱ کیلومتر	میزان بخار آب	یانگ
پروفایل جو	MOD07	۵ کیلومتر	میزان ازن	یانگ
شبکه بندی جو	MOD08	۱ درجه	عمق اپتیکی هواویز در ۵۰۰ نانومتر	یانگ
بازتابندگی سطح	MOD09	۱ کیلومتر	بازتابندگی سطح باند سبز	SARA
دمای سطح زمین	MOD11	۱ کیلومتر	دمای سطح	تعیین روزهای بدون ابر

جدول ۴: روزهای مورد مطالعه در این تحقیق و زمان‌های گذر ماهواره از منطقه

روز تقویمی (روز جولین)	زمان گذر ماهواره (گرینویچ)	روز تقویمی (روز جولین)	زمان گذر ماهواره (گرینویچ)
۶ ژوئن (۱۵۷)	۱۰:۷	۲۴ جولای (۲۰۵)	۱۰:۷
۲۲ ژوئن (۱۷۳)	۱۰:۷	۱۸ آگوست (۲۳۰)	۷:۰۵
۱ جولای (۱۸۲)	۷:۰۵	۲۵ آگوست (۲۳۷)	۱۰:۷
۲ جولای (۱۸۳)	۵۰:۷	۸ سپتامبر (۲۵۱)	۷:۲۵
۴ جولای (۱۸۵)	۷:۳۵	۱۵ سپتامبر (۲۵۸)	۷:۳۰
۶ جولای (۱۸۷)	۷:۲۵	۱۹ سپتامبر (۲۶۲)	۷:۰۵
۸ جولای (۱۸۹)	۷:۱۰	۲۲ سپتامبر (۲۶۵)	۷:۳۵
۱۳ جولای (۱۹۴)	۷:۳۰	۲۶ سپتامبر (۲۶۹)	۷:۱۰
۱۷ جولای (۱۹۸)	۷:۰۵	۲۸ سپتامبر (۲۷۱)	۷:۰۰
۲۲ جولای (۲۰۳)	۷:۲۵		

۲-۳- بازیابی AOD با استفاده از الگوریتم SARA (SARA AOD)

الگوریتم SARA (رابطه (۱)) بر اساس هندسه دید است و طیف وسیعی از شرایط و انواع هواویزها را در بر می‌گیرد [۲۳ و ۲۴]. این الگوریتم همچنین دارای سه فرض است: (۱) سطح لامبرتی است، (۲) تقریب پراکنش منفرد[1] و (۳) آلبدوی پراکنش منفرد و فاکتور تقارن در روز بازیابی و بر فراز یک منطقه وسیع تغییر نمی‌کنند [۲۳].

[1] single scattering approximation

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]

رابطه (۱)

$$\tau_{a,\lambda}=\frac{4\mu_s\mu_v}{\omega_0 P_{a(\theta_S,\theta_v,\phi)}}\left[\rho_{TOA(\lambda,\theta_S,\theta_v,\phi)}-\rho_{Ray(\lambda,\theta_S,\theta_v,\phi)}-\frac{e^{-(\tau_R+\tau_{a,\lambda})/\mu_s}e^{-(\tau_R+\tau_{a,\lambda})/\mu_v}\rho_{s(\lambda,\theta_S,\theta_v,\phi)}}{1-\rho_{s(\lambda,\theta_S,\theta_v,\phi)}(0.92\tau_R+(1-g)\tau_{a,\lambda})exp[-(\tau_R+\tau_{a,\lambda})]}\right]$$

که $\tau_{a,\lambda}$ عمق اپتیکی طیفی هواویز، τ_R عمق اپتیکی ریلی، ρ_{TOA} بازتابندگی بالای جو، ρ_s بازتابندگی سطح، ρ_{Ray} بازتابندگی ریلی، P_a تابع فاز هواویز، ω_o آلبدوی پراکنش منفرد، g فاکتور تقارن، μ_s کسینوس زاویه زنیتی خورشید، μ_v کسینوس زاویه زنیتی سنجنده، θ_s زاویه زنیتی خورشید، θ_v زاویه زنیتی سنجنده، ϕ زاویه آزیموت نسبی و λ طول موج (در این الگوریتم λ=۵۵۰ نانومتر، باند سبز مادیس) می‌باشد.

بازتابندگی بالای جو، تابعی از رادیانس بالای جو، زاویه زنیتی خورشید، فاصله زمین-خورشید در واحد نجومی و متوسط تابش خارج از جو[1] خورشید است و از طریق رابطه (۲) تخمین زده می‌شود.

رابطه (۲) $$\rho_{TOA(\lambda)}=\frac{\pi L_{TOA(\lambda)}d^2}{ESUN_\lambda\mu_s}$$

$L_{TOA(\lambda)}$ رادیانس طیفی دریافت شده توسط ماهواره بالای جو، $ESUN_\lambda$ متوسط تابش خارج از جو خورشید و d فاصله زمین-خورشید در واحد نجومی است.

عمق اپتیکی ریلی عمدتاً وابسته به فشار محیط و ارتفاع زمین است و از طریق رابطه پیشنهاد شده توسط لی یانگ (رابطه (۳)) محاسبه می‌شود [۶].

رابطه (۳) $$\tau_R=\frac{P_z}{P_0}(0.00864+6.5*10^{-6}*z)\lambda^{-\left(3.196+0.074\lambda+{}^{0.05}/_{\lambda}\right)}$$

P_z فشار محیط نسبت به ارتفاع برحسب میلی‌بار، P_o فشار در سطح متوسط دریا و برابر ۱۰۱۳ میلی‌بار است، z ارتفاع زمین از سطح دریا برحسب کیلومتر و λ طول موج برحسب میکرومتر می‌باشد.

بازتابندگی ریلی وابسته به تابع فاز ریلی P_R [۶ و ۴۳] و عمق اپتیکی ریلی است و از طریق رابطه (۴) به‌دست می‌آید.

[1] exoatmospheric

رابطه (۴) $$\rho_{Ray(\lambda,\theta_S,\theta_v,\phi)}=\frac{\omega_0\tau_R P_{R(\theta_S,\theta_v,\phi)}}{4\mu_s\mu_v}$$

تابع فاز هواویز بیانگر توزیع زاویه‌ای نور پراکنش شده توسط ذرات است و با استفاده از روش single-term Henyey-Greenstein (رابطه (۵)) محاسبه می‌گردد [۴۴].

رابطه (۵) $$P_{a(\theta_S,\theta_v,\phi)}=\frac{1-g^2}{[1+g^2-2g\cos(\pi-\Theta)]^{3/2}}$$

که Θ زاویه فاز پراکنش[2] [۴۵] و g فاکتور تقارن است که بیان‌کننده غلبه نسبی پراکنش پیشرو یا پسرو[3] است و در بسیاری از مدل‌های هواویز مقدار این پارامتر ثابت می‌باشد [۴۶]. مقادیر روزانه ω_o و g برای روزهایی که SARA AOD بازیابی می‌شود، از طریق تطبیق SARA AOD بر اساس تابعی از ω_o و g و متوسط AOD به‌دست آمده از سایت آئرونت IASBS و ۳۰± دقیقه پیرامون زمان گذر ماهواره ترا، تعیین می‌گردند. این عملیات بصورت تجربی و با استفاده از روش تکرار نقطه ثابت[4] [۴۷] و با تغییر مقادیر ω_o و g تا زمانیکه تطابق به‌دست آید، انجام می‌شود. سپس $\boldsymbol{\omega_o}$ و g، بهمراه داده‌های بازتابندگی بالای جو و بازتابندگی سطح مادیس، توسط الگوریتم SARA به‌کار گرفته می‌شوند تا AOD با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر در سایت چیتگر و مناطق اطراف آن برای لحظه گذر ماهواره ترا برآورد گردد. البته با فرض اینکه ω_o و g بر فراز منطقه مورد مطالعه و در طول روز بازیابی، تغییری نمی‌کنند. به‌منظور حذف نویز نیز، SARA AOD به‌دست آمده در سایت چیتگر به مرکزیت سایت و با فیلتر ۳ در ۳، میانگین‌گیری می‌شود [۴۸]. جدول (۵) تمامی

[2] Scattering phase angle
[3] Forward and back scattering
[4] Fixed Point Iteration (FPI)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]

متغیرهای کلیدی بـه‌کـار رفتـه در الگـوریتم SARA و نحوه دستیابی به آنها را نشان می‌دهد.

جدول ۵: متغیرهای کلیدی در الگوریتم SARA

عبارت	پارامتر	به‌دست آمده از:
z و ϕ ،θ_v ،θ_s	زاویه زنیتی خورشید، زاویه زنیتی سنجنده، زاویه آزیموت نسبی و ارتفاع	محصول موقعیت جغرافیائی مادیس (MOD03)
μ_v و μ_s	کسینوس زاویه زنیتی خورشید و کسینوس زاویه زنیتی سنجنده	θ_v و θ_s
$ESUN_\lambda$	متوسط تابش خارج از جو خورشید	مقادیر ارائه شده توسط لی یانگ [۶]
d	فاصله زمین-خورشید در واحد نجومی	رابطه ارائه شده در [۳۰] و روز جولین
P_z	فشار محیط نسبت به ارتفاع برحسب میلی‌بار	z
ρ_{TOA}	بازتابندگی بالای جو (باند سبز)	d ،$ESUN_\lambda$ و محصول رادیانس بالای جو مادیس (MOD02)
ρ_s	بازتابندگی سطح زمین (باند سبز)	محصول بازتابندگی سطح مادیس (MOD09)
τ_R	عمق اپتیکی ریلی	P_z و z
P_R	تابع فاز ریلی	τ_R
ρ_{Ray}	بازتابندگی ریلی	μ_v و μ_s ،P_R ،τ_R
ω_o و g	آلبدوی پراکنش منفرد و فاکتور تقارن	ایستگاه آئرونت
Θ	زاویه فاز پراکنش	ϕ و θ_v ،θ_s
P_a	تابع فاز هواویز	g و Θ
τ_a	عمق اپتیکی هواویز	g و ω_o ،P_a ،τ_R ،ρ_{Ray} ،ρ_s ،ρ_{TOA} ،μ_v ،μ_s

۲-۴- بازیابی AOD با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدان دید (Visibilty AOD)

داده‌هـای میـدان دیـد ثبـت شـده در سـایت فرودگـاه مهرآباد با استفاده از رابطه ارائه شـده توسـط ورمـوت و همکاران [۴۱] (رابطه (۶)) به AOD تبدیل می‌گردند.

$$V = 3.9449/(\mathrm{AOD}_{550} - 0.08498) \qquad \text{رابطه (۶)}$$

کـه V میـدان دیـد برحسـب کیلـومتر، AOD_{550} عمـق اپتیکـی هـواویز در طـول مـوج ۵۵۰ نـانومتر اسـت. این رابطه برای $\mathrm{AOD} \leq$ ۰٫۰۸۴۹۸ معتبر نیست. AOD روزانه برآورد شـده بـا ایـن روش در سـایت مهرآبـاد بـا SARA AOD، MODIS L2 AOD و MODIS L3 AOD مقایسه می‌شود.

۲-۵- بازیابی تابش موج کوتاه با استفاده از مـدل یانگ

تابش موج کوتاه برحسب گذردهی کل[1] τ بـا رابطـه (۷) بیان می‌شود.

$$DSSR = E_0\, \mu_s\, \tau / d^2 \qquad \text{رابطه (۷)}$$

که E_0 تابش فرودی بـالای جـو در واحـد نجـومی یـک، است.

ضریب گذردهی کل با استفاده از مـدل یانـگ و بهمـراه محصـولات زمینـی و جـو مـادیس محاسـبه مـی‌شـود. ضـریب گـذردهی تـابش مسـتقیم ($\tau_{b,clear}$)، ضـریب

[1] Total transmittance

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]

گذردهی تابش پراکنده ($\tau_{d,clear}$) و ضریب گذردهی کل (τ_{clear}) در شرایط آسمان بدون ابر بصورت زیر بیان می‌گردد.

رابطه (۸) $$\tau_{b,clear} = \tau_{oz}\tau_w\tau_g\tau_r\tau_a - 0.013$$

رابطه (۹) $$\tau_{d,clear} = 0.5[\tau_{oz}\tau_g\tau_w(1-\tau_r\tau_a) + 0.013]$$

رابطه (۱۰) $$\tau_{clear} = \tau_{b,clear} + \tau_{d,clear}$$

که τ_{oz}، τ_w، τ_g، τ_r و τ_a بترتیب گذردهی جذب ازن، گذردهی جذب بخار آب، گذردهی گازهای مخلوط، گذردهی پراکنش ریلی و گذردهی ناشی از جذب و پراکنش هواویز می‌باشد و به‌صورت روابط زیر (رابطه‌های (۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷) بیان می‌گردند.

رابطه (۱۱) $$\tau_{oz} = \exp[-0.0365(ml)^{0.7136}]$$

رابطه (۱۲)

$$\tau_w = \min[1.0, 0.909 - 0.036\ln(mw)]$$

رابطه (۱۳) $$\tau_g = \exp(-0.0117\, m_c^{0.3139})$$

رابطه (۱۴) $$\tau_r = \exp[-0.00873517\, m_c(0.547 + 0.014m_c - 0.00038\, m_c^2 + 4.6 \times 10^{-6}\, m_c^3)^{-4.08}]$$

رابطه (۱۵) $$\tau_a = \exp\{-m\beta[0.6777 + 0.1464(m\beta) - 0.00626(m\beta)^2]^{-1.3}\}$$

رابطه (۱۶)

$$m = (\cos\theta + 0.15(\theta + 3.885)^{-1.253})^{-1}$$

رابطه (۱۷) $$m_c = mp/p_0$$

که p، m، m_c، θ، l، w و β بترتیب فشار، توده اپتیکی جو[1]، توده اپتیکی جو اصلاح شده برای فشارهای مختلف[2]، زاویه زنیتی خورشید، ستونی کلی ازن[3] بر حسب سانتیمتر، بخار آب قابل بارش[4] و ضریب تیرگی آنگستروم[5] می‌باشد. ضریب تیرگی آنگستروم در طول موج ۰/۵ میکرون با درنظر گرفتن مقدار ثابت ۱/۳ برای نمای آنگستروم[6]، به‌صورت زیر تعیین می‌گردد.

رابطه (۱۸) $$\beta = 0.5^{1.3}\mathrm{AOD}(0.5)$$

که AOD(0.5)، عمق اپتیکی هوایز در طول موج ۰/۵ میکرون می‌باشد. جدول (۶) تمامی متغیرهای کلیدی به‌کار رفته در مدل یانگ و نحوه دستیابی به آنها را نشان می‌دهد.

محصول دمای سطح زمین مادیس (LST)[7]، تنها برای پیکسل‌های بدون ابر مقدار دارد، بنابراین در این تحقیق پیکسل‌هایی که محصول دمای سطح زمین مادیس، برای آن مقدار دارد، به‌عنوان شاخص شرایط بدون ابر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۴]. برای پیکسل‌های بدون ابر، SARA AOD بهمراه داده‌های بخار آب، ازن و اطلاعات هندسی به‌دست آمده از مادیس به‌عنوان داده‌های ورودی الگوریتم یانگ جهت برآورد تابش موج کوتاه در سایت چیتگر مورد استفاده قرار گرفت. تابش به‌دست آمده از این روش، تابش موج کوتاه براساس SARA AOD، (SARA-based DSSR) نامیده می‌شود.

[1] Optical air mass

[2] Pressure-corrected optical air mass
[3] Total Ozone Column
[4] Perceptible water content
[5] Angstrom turbidity coefficient
[6] Angstrom exponent
[7] Land Surface Temperature

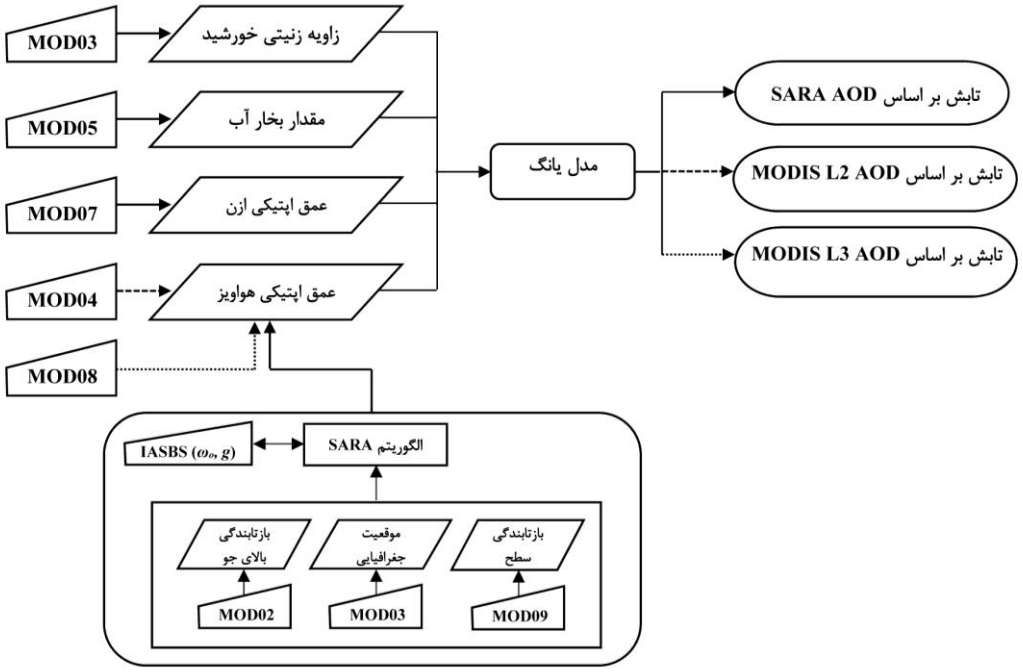
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]

جدول ۶: متغیرهای کلیدی در مدل یانگ

عبارت	پارامتر	به‌دست آمده از:
θ و z	زاویه زنیتی خورشید و ارتفاع	محصول موقعیت جغرافیائی مادیس (MOD03)
μ_s	کسینوس زاویه زنیتی خورشید	θ
P	فشار هوا	z
m	توده اپتیکی جو	θ
m_c	توده اپتیکی جو اصلاح شده برای فشارهای مختلف	m و P
E_0	تابش فرودی بالای جو در واحد نجومی یک	مقادیر ارائه شده توسط لی یانگ [۶]
τ_{oz}	گذردهی جذب ازن	m و داده ستون کلی ازن مادیس (MOD07)
τ_w	گذردهی جذب بخار آب	m و داده میزان بخار آب مادیس (MOD05)
τ_g	گذردهی گازهای مخلوط	m_c
τ_r	گذردهی پراکنش ریلی	m_c
β	ضریب تیرگی آنگستروم	داده عمق اپتیکی هواویز مادیس (MOD04) یا داده عمق اپتیکی هواویز مادیس (MOD08) یا عمق اپتیکی هواویز به‌دست آمده از الگوریتم SARA (SARA AOD)
τ_a	گذردهی ناشی از جذب و پراکنش هواویز	m و β
$\tau_{b,clear}$	ضریب گذردهی تابش مستقیم	τ_{oz}، τ_w، τ_g، τ_r و τ_a
$\tau_{d,clear}$	ضریب گذردهی تابش پراکنده	τ_{oz}، τ_w، τ_g، τ_r و τ_a
τ_{clear}	ضریب گذردهی کل	$\tau_{b,clear}$ و $\tau_{d,clear}$
$DSSR$	تابش موج کوتاه فرودی در سطح	E_0، μ_s و τ_{clear}

به‌منظور مقایسه، MODIS L2 AOD و MODIS L3 AOD نیز پس از نمونه‌برداری به قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر، بهمراه سایر اطلاعات جوی و هندسی جهت برآورد تابش موج کوتاه مورد استفاده قرار گرفتند. تابش‌های به‌دست آمده از این داده‌ها نیز به‌ترتیب تابش موج‌کوتاه براساس محصول سطح دو مادیس (MODIS L2-based DSSR)، و تابش موج‌کوتاه براساس محصول سطح سه مادیس-(MODIS L3 based DSSR)، نامیده می‌شود. تابش‌های به‌دست آمده از هرکدام از داده‌های مختلف عمق اپتیکی، برای یک پنجره فضایی ۳ در۳ کیلومتر به مرکزیت سایت چیتگر و در زمان‌های گذر ماهواره ترا میانگین‌گیری می‌شوند. شکل (۲) دیاگرام تخمین تابش موج کوتاه با استفاده از داده‌های مختلف عمق اپتیکی و سایر اطلاعات جوی و هندسی را به‌اختصار نمایش می‌دهد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]



شکل۲: دیاگرام تخمین تابش موج کوتاه بر اساس SARA AOD، MODIS L2 AOD (MOD04) و MODIS L3 AOD (MOD08) و اطلاعات دیگر جوی و هندسی. بخش مشخص شده با سایه، بازیابی AOD با استفاده از الگوریتم SARA را نشان می‌دهد، بطوریکه ωo وg بترتیب بیانگر آلبدوی پراکنش منفرد و پارامتر تقارن هستند.

برای اعتبارسنجی تابش‌های برآورد شده در سایت چیتگر نیز از متغیرهای آماری زیر (رابطه‌های (۱۹، ۲۰ و ۲۱) استفاده گردید.

رابطه (۱۹)

$$R^2 = \sum_{i=1}^{n}(E_i-\bar{E})(O_i-\bar{O})/\sum_{i=1}^{n}(E_i-\bar{E})^2\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2$$

رابطه (۲۰)
$$\mathrm{RMSE}=\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(E_i-O_i)^2\right]^{1/2}$$

رابطه (۲۱)
$$\mathrm{Bias}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(E_i-O_i)]$$

که R^2، RMSE[1] و Bias بترتیب ضریب همبستگی، خطای جذر میانگین مربعات و بایاس می‌باشند [۱۷]. E و O، تابش تخمین و اندازه‌گیری شده و $\bar{E}$ و $\bar{O}$ نیز میانگین تابش تخمین و اندازه‌گیری شده است.

۳- نتایج و ارزیابی

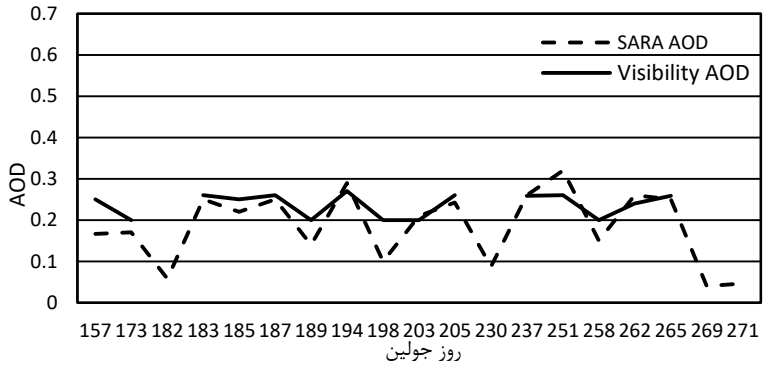
۳-۱- مقایسه AOD های برآورد شده در سایت مهرآباد

شکل ۳-الف، ب و ج مقایسه SARA AOD، MODIS L2 AOD و MODIS L3 AOD را با AOD بدست آمده براساس داده‌های میدان دید (Visibility AOD) در روزهای مورد مطالعه در سایت مهرآباد تهران، نشان می‌دهد. AODهای بدست آمده از الگوریتم SARA، SARA AOD (با متوسط مقدار ۰/۱۸) انطباق بسیار خوبی با AOD بدست آمده براساس داده‌های میدان دید (با مقدار متوسط ۰/۲۳) دارند، درحالیکه محصول MODIS L2 AOD، (با مقدار متوسط ۰/۲۸) مقادیر عمق اپتیکی را تحت شرایط بارگذاری زیاد هواویز، نسبتاً دست بالا برآورد می‌نماید و محصول MODIS L3 AOD، (با مقدار متوسط ۰/۴۱) تحت هردو شرایط بارگذاری زیاد و کم، دست بالا

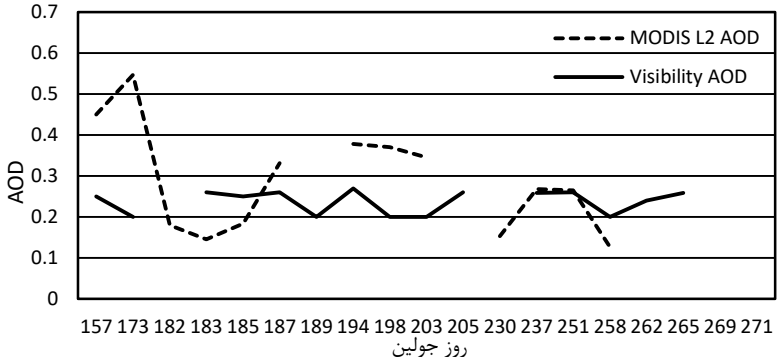
[1] Root Mean Square Eror

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]

برآورد می‌نماید. در مقایسه با الگوریتم بازیابی عمق اپتیکی هواویز محصولات مادیس، الگوریتم SARA جزئیات بیشتری از داده های جوی و زمینی را بکار می‌برد، بنابراین SARA AOD دقت بیشتری نسبت به این محصولات دارد. بازتابندگی سطح و بالای جو مادیس با قدرت‌تفکیک‌مکانی ۱ کیلومتر به‌همراه داده‌های آلبدوی پراکنش منفرد و پارامتر تقارن، به‌دست آمده از داده‌های سایت آئرونت واقع در شهر زنجان، از جمله داده‌های مورد نیاز در الگوریتم SARA هستند. محصولات AOD مادیس، با استفاده از الگوریتم DT بازیابی می‌شوند. این الگوریتم در مناطق با پوشش گیاهی متراکم از دقت مناسبی برخوردار است درحالیکه برای مناطق روشن [۲۲] و شرایط بارگذاری بالای هواویز [۲۴]، مقادیر AOD را دست بالا برآورد می‌نماید. میانگین ۹ پیکسل با اعمال پنجره فضایی ۳ در ۳ کیلومتر بر فراز سایت چیتگر نشان می‌دهد که منطقه مورد مطالعاتی دربرگیرنده سطوح روشن است ($\rho_{2.21\mu m}$=0.25). لذا مقادیر AOD در الگوریتم محصولات مادیس، بالاتر از حد واقعی برآورد می‌گردند. الگوریتم SARA در هنک‌کنگ و بیجینگ اعتبارسنجی شده است [۲۳ و ۲۴] و نتایج نشان‌دهنده دقت بالای این الگوریتم در مقایسه با الگوریتم DT در شرایط بارگذاری بالا و پایین هواویز بود، به‌طوری‌که RMSE آن نصف الگوریتم DT گزارش شده است.



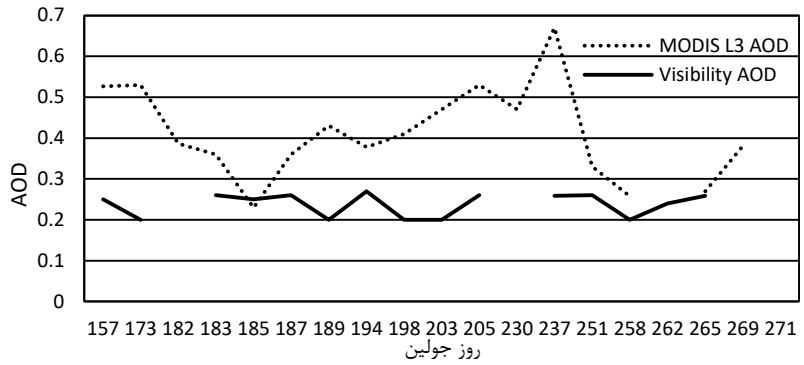
(الف)



(ب)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]



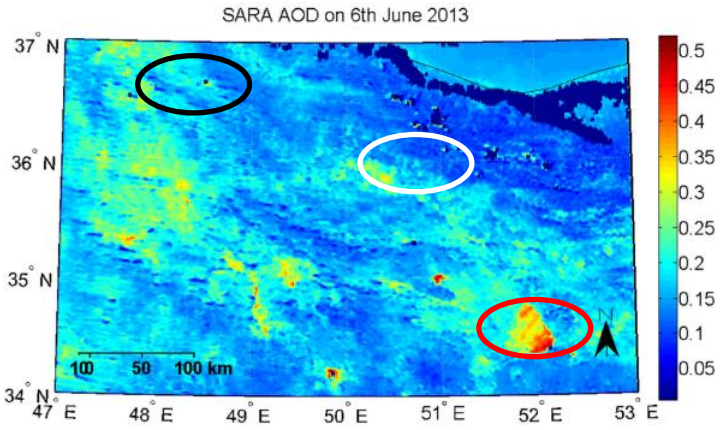
(ج)

شکل ۳: مقایسه SARA AOD (Dash) (الف)، MODIS L2 AOD (Square Dot) (ب)، MODIS L3 AOD (Round Dot) (ج) با داده های عمق اپتیکی هواویز به‌دست آمده از داده های زمینی میدان دید (Solid) برای روزهای مورد مطالعه در سایت مهرآباد تهران. روزهای ۱۸۹، ۲۰۵، ۲۶۲، ۲۶۵، ۲۶۹ و ۲۷۱ برای MODIS L2 AOD ، روزهای ۲۶۲و ۲۷۱ برای MODIS L3 AOD و روزهای ۱۸۲، ۲۳۰، ۲۶۹و ۲۷۱ برای داده_های زمینی میدان دید، روزهای بدون مقدار هستند.

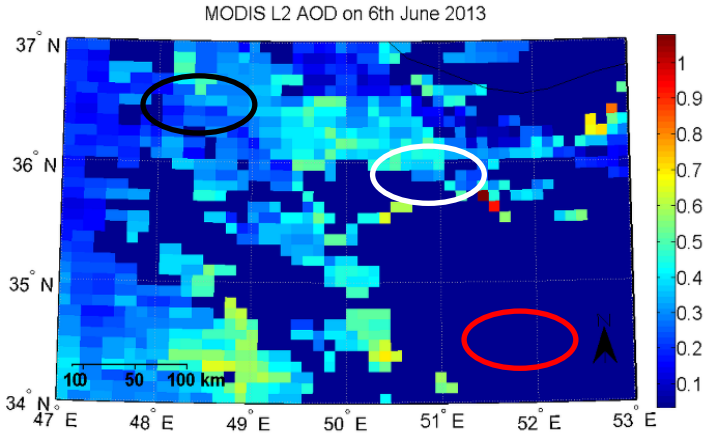
شکل (۴-الف، ب و ج) نمونه‌ای از نمایش مکانی داده‌های عمق اپتیکی هواویز در تاریخ ششم ژوئن ۲۰۱۳ در شمال و شمالغرب ایران (که دربرگیرنده سایت چیتگر تهران و IASBS زنجان و مناطق مجاور می‌باشد) را نشان می‌دهد. تغییرات مکانی بخوبی در SARA AOD به تصویر کشیده شده است درحالیکه MODIS L2 AOD گپ‌های فراوان و MODIS L3 AOD علاوه بر وجود گپ، قدرت تفکیک مکانی پایینی دارد و قادر به نمایش این تغییرات مکانی بصورت مناسبی نیستند. SARA AOD بر فراز دریاچه نمک، بارگذاری نسبتاً بالایی از هواویز را (حدود ۰/۵) در مقایسه با مناطق اطراف نشان می‌دهد (شکل ۴-الف). بارگذاری بالای هواویز در این منطقه می‌تواند ناشی از هواویزهای نمکی بوجود آمده از بخش خشک شده این دریاچه و همچنین گرد و خاک های دشت کویر باشد. محصولات عمق اپتیکی مادیس بدلیل پیکسل‌های از دست رفته در این منطقه ناشی از محدودیت‌های الگوریتم DT، قادر به نمایش این پدیده نیستند، در حالیکه SARA AOD بخوبی این تغییرات را در بخشهای مختلف دریاچه نمایش می‌دهد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]

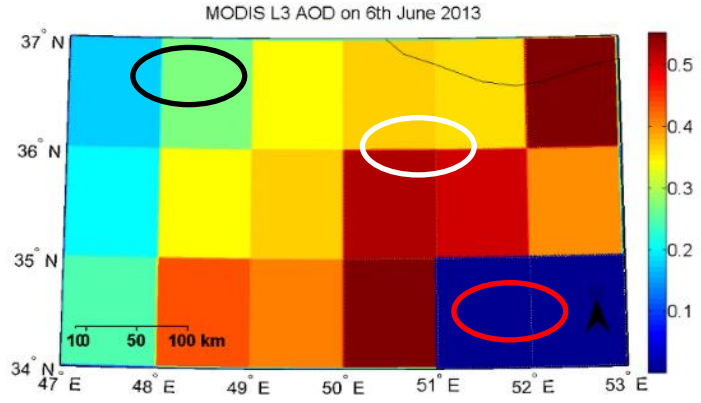
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴: الگوهای فضایی (الف) SARA AOD، (ب) MODIS L2 AOD و (ج) MODIS L3 AOD بر فراز سایت IASBS واقع در شهر زنجان (بیضی سیاه)، سایت چیتگر مستقر در شهر تهران (بیضی سفید) و دریاچه نمک (بیضی قرمز) در تاریخ ۶ ژوئن ۲۰۱۳. مناطق به رنگ بنفش در SARA AOD نشان‌دهنده عدم وجود اطلاعات ناشی از پوشش ابر، و در محصولات عمق اپتیکی مادیس، بیانگر عدم وجود اطلاعات ناشی از پیکسل‌های از دست رفته در الگوریتم DT می‌باشد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]

۳-۲- اعتبارسنجی تابش‌های برآورد شده در سایت چیتگر

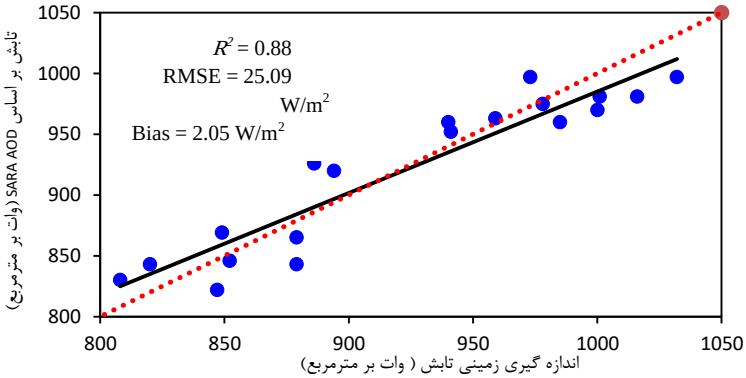
شکل (۵ الف- ب و ج) و جدول (۷)، اعتبارسنجی تابش برآورد شده براساس SARA AOD، تابش براساس MODIS L2 AOD و تابش براساس MODIS L3 AOD، با اندازه‌گیریهای پیرانومتر واقع در سایت چیتگر در روزهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد. نتایج آماری اعتبارسنجی تابش برآورد شده براساس SARA AOD، ضریب رگرسیون (R^2) ۰٫۸۸، خطای RMSE و بایاس بترتیب ۲۵٫۰۹ وات بر مترمربع و ۲/۰۵ وات بر مترمربع است (شکل (۵-الف)). مقایسه بین تابش اندازه‌گیری شده زمینی و تابش برآورد شده بر اساس MODIS L2 AOD نیز در شکل (۵-ب) نشان داده شده است، نتایج آماری این مقایسه ضریب رگرسیون ۰٫۶۱، خطای RMSE و بایاس بترتیب ۴۱٫۵۷ و ۱۵٫۹۳ وات بر مترمربع به‌دست آمد. مقایسه بین تابش اندازه‌گیری شده زمینی و تابش برآورد شده بر اساس MODIS L3 AOD نیز در شکل (۵-ج) با ضریب رگرسیون ۰٫۸۲، خطای RMSE و بایاس بترتیب ۶۰٫۷۳ و ۵۳٫۷۷ وات بر مترمربع نشان داده شده است. تابش برآورد شده بر اساس SARA AOD و MODIS L3 AOD مقادیر ضریب همبستگی بالایی را نشان دادند، اما مقدار خطای RMSEو بایاس تابش برآورد شده بر اساس MODIS L3 AOD مقادیر پایین‌تری را نشان می‌دهد. ضریب رگرسیون تابش به‌دست آمده براساس MODIS L2 AOD، مقدار پایینی را نشان می‌دهد، خطای RMSE و بایاس نیز در تابش برآورد شده بر اساس محصول سطح دو مادیس کمتر از محصول سطح سه مادیس و بیشتر از خطای به‌دست آمده در تابش براساس SARA AOD می‌باشد. خطای بوجود آمده از محصول سطح دو مادیس می‌تواند بعلت الگوریتم DT باشد که در مناطق با سطوح روشن مقدار AOD را دست بالا برآورد می‌نماید. بین تابش و AOD ارتباط معکوسی وجود دارد، بنابراین دست پایین برآورده شدن تابش مخصوصاً در شرایط بارگذاری بالای هواویز می‌تواند ناشی از بکارگیری محصول سطح دو مادیس باشد. خطای بوجود آمده از محصول سطح سه مادیس نیز که منجر به دست پایین برآورد شدن قابل ملاحظه تابش در همه شرایط هواویز شده است می‌تواند به دو علت باشد، (۱) قدرت تفکیک مکانی پایین (۱ درجه) محصول سطح سه مادیس و (۲) الگوریتم بازیابی عمق اپتیکی هواویز DT.

شکل (۶ الف-ج) نمونه‌ای از نمایش مکانی تابش موج کوتاه براساس SARA AOD، MODIS L2 AOD وMODIS L3 AOD در زنجان، تهران و مناطق اطراف، در تاریخ ۶ ژوئن ۲۰۱۳ نشان می‌دهد. نقشه تابش موج کوتاه در شکل (۶-الف) به‌خوبی تغییرات مکانی را به تصویر می‌کشد، زیرا این تابش بر اساس SARA AOD و با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر، به‌دست آمده است. نقشه تابش براساس محصول سطح دو و سطح سه مادیس، توانایی نمایش تغییرات مکانی را بصورت مناسبی ندارند، زیرا محصول سطح دو مادیس گپ های زیاد داشته و محصول سطح سه، قدرت تفکیک مکانی پایین دارد. تابش به‌دست آمده براساس SARA AOD نه تنها با مشاهدات زمینی در توافق خوبی است، نمایش بهتری نیز از تغییرات مکانی را نشان می‌دهد.

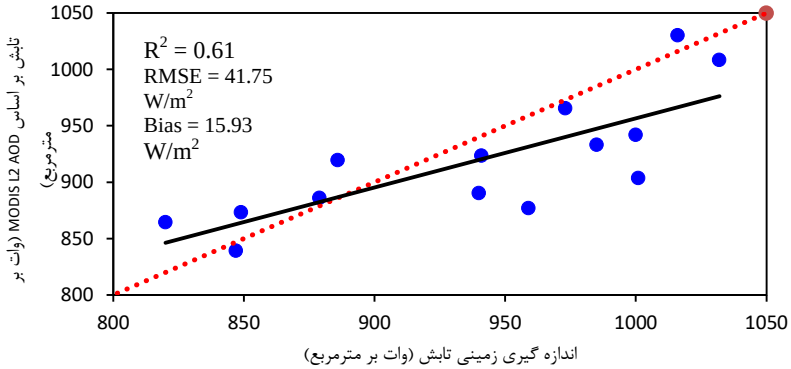
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]

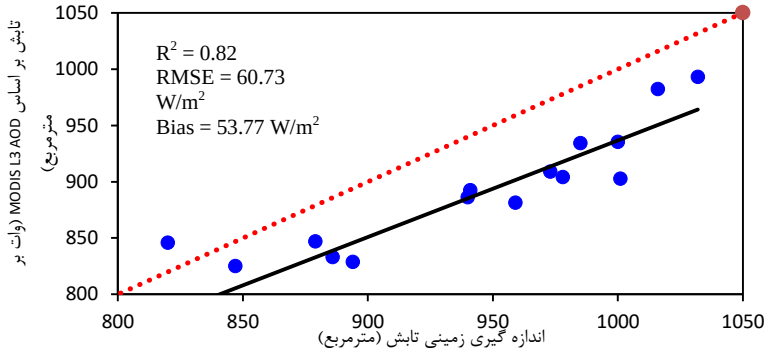
الف



ب



ج

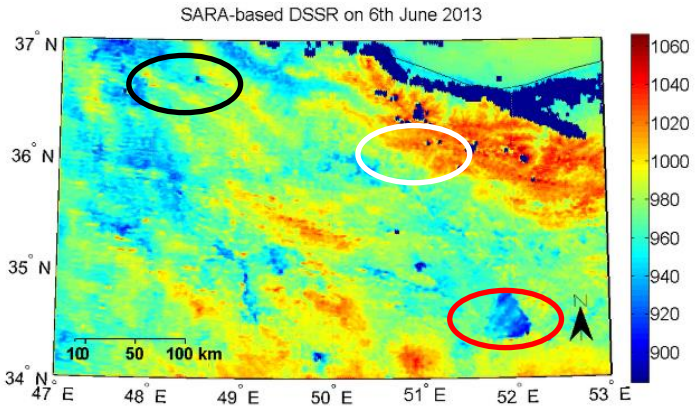


شکل ۵: اعتبارسنجی تابش‌های برآورد شده براساس داده‌های مختلف عمق اپتیکی هواویز (الف) SARA AOD (ب) MODIS L2 AOD (ج) MODIS L3 AOD در سایت چیتگر تهران سال ۲۰۱۳.

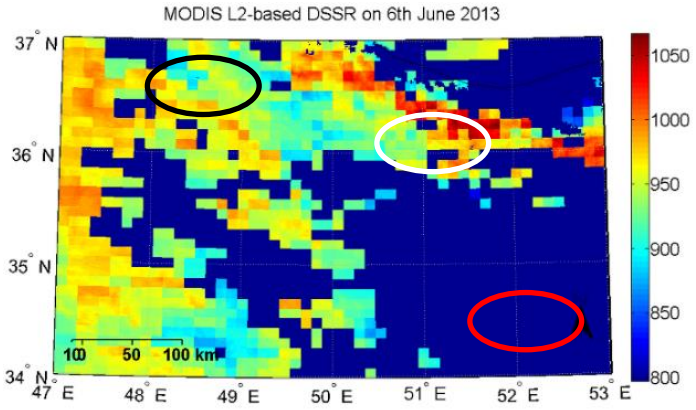
جدول ۷: اطلاعات آماری ارزیابی تابش‌های تخمین شده براساس داده‌های مختلف عمق اپتیکی با تابش‌های اندازه‌گیری شده توسط پیرانومتر در سایت چیتگر سال ۲۰۱۳.

تابش موج‌کوتاه بر اساس	R^2	RMSE (وات بر مترمربع)	بایاس (وات بر مترمربع)
SARA AOD	۰/۸۸	۲۵/۰۹	۲/۰۵
MODIS L2 AOD	۰/۶۱	۴۱/۷۵	۱۵/۹۳
MODIS L3 AOD	۰/۸۲	۶۰/۷۳	۵۳/۷۷

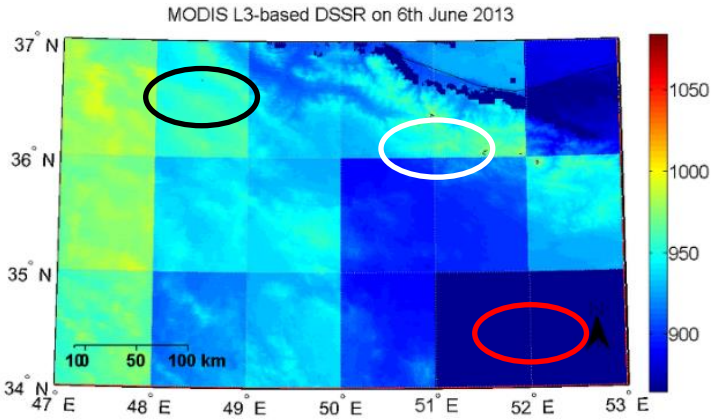
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶: الگوهای فضایی تابش موج کوتاه براساس (الف) SARA AOD، (ب) MODIS L2 AOD و (ج) MODIS L3 AOD بر فراز سایت IASBS واقع در شهر زنجان (بیضی سیاه)، سایت چیتگر مستقر در شهر تهران (بیضی سفید) و دریاچه نمک (بیضی قرمز) در تاریخ ۶ ژوئن ۲۰۱۳. مناطق به رنگ بنفش در نقشه تابش براساس SARA AOD، نشان‌دهنده عدم وجود اطلاعات ناشی از پوشش ابر و در نقشه تابش براساس محصولات عمق اپتیکی مادیس بیانگر عدم وجود اطلاعات ناشی از پیکسل‌های از دست رفته در الگوریتم DT می‌باشد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]

نتایج آماری تابش برآورد شده براساس SARA AOD، با تحقیقات مشابه قبلی نیز مورد مقایسه قرار گرفت (جدول (۸)). هوبورگ و سوگارد [۲۸] تابش موج کوتاه را براساس محصول سطح دو مادیس و با استفاده از مدل اقبال در یک منطقه کشاورزی در دانمارک برآورد نمودند. ضریب رگرسیون و خطای RMSE بترتیب ۰٫۹۵ و ۵۰ وات بر مترمربع به‌دست آمد. مقدار خطای بالای بایاس در این تحقیق می‌تواند به‌دلیل بکارگیری محصول سطح دو عمق اپتیکی هواویز مادیس باشد. ریو و همکاران [۲]، تابش موج کوتاه را براساس محصول سطح دو مادیس و با استفاده از مدل بیرد برآورد نموده و در دو سایت مختلف در کشور کره جنوبی ارزیابی نمودند. برای سایت اول، ضریب رگرسیون، خطای RMSE و بایاس به‌ترتیب، ۹۸٪، ۴۱ وات بر مترمربع و ۳۲ وات بر مترمربع و برای سایت دوم ۹۸٪، ۲۴ وات بر مترمربع و ۱۳ وات بر مترمربع به‌دست آمد. بیشت و همکاران [۱۴] نیز با استفاده از مدل زیلمان و محصول پروفایل جوی مادیس (دما و نقطه شبنم)، تابش موج کوتاه را برای یک سطح نسبتاً هموار با پوشش ناهمگون در منطقه SGP[1] آمریکا برآورد نمودند. ارزیابی تابش به‌دست آمده با استفاده از مشاهدات زمینی، ضریب رگرسیون ۹۷٪، خطای RMSE ۵۱ وات بر مترمربع و بایاس ۴۱ وات بر متربع را نشان داد. مدل زیلمان برای عمق اپتیکی هواویز مقدار ثابتی درنظر می‌گیرد، به‌همین دلیل خطای RMSE و بایاس مقدار بزرگی دارند. در مقایسه با تابش‌های برآورد شده در تحقیقات قبلی، روش به‌کار رفته در تحقیق پیش رو یعنی برآورد تابش براساس SARA AOD، خطای RMSE و بایاس کمتری را نشان می‌دهد. دقت بالای این روش می‌تواند به‌علت به‌کارگیری مستقیم داده‌های بازتابندگی سطح و بالای جو مادیس برای محاسبه AOD عنوان کرد. البته ضریب رگرسیون به‌دست آمده از این روش در مقایسه با تحقیقات قبلی مقدار کمتری را نشان می‌دهد، علت آن می‌تواند ثابت فرض کردن مقادیر آلبدوی پراکنش منفرد و فاکتور تقارن در منطقه مورد مطالعه (زنجان تا تهران) دانست.

۳-۳-آنالیز حساسیت

با استفاده از نظریه انتشار عدم قطعیت (خطا) و به کمک مدل یانگ آنالیز حساسیت بصورت زیر انجام شد.

$$\Delta I = \left|\frac{\partial I}{\partial \tau}\right| \Delta\tau \qquad \text{رابطه (۲۲)}$$

که I تابش موج کوتاه فرودی، $\Delta\tau$ عدم قطعیت AOD و ΔI عدم قطعیت تابش موج کوتاه تنها ناشی از $\Delta\tau$.

با فرض اینکه میانگین AODهای به‌دست آمده بر اساس داده‌های میدان دید، ۰/۲۳ باشد (رجوع شود به بخش ۳-۱) و همچنین با فرض اینکه ماکزیمم عدم قطعیت مجاز در تابش موج کوتاه (فقط ناشی از عدم قطعیت AOD) ۵ درصد باشد [۴۹]، ماکزیمم عدم قطعیت قابل قبول در AOD بایستی ۱۷ درصد باشد (یعنی مقدار ۰٫۰۳۹ در واحد AOD). عدم قطعیت به‌دست آمده در این تحقیق برای SARA AOD، ۱۴ درصد (یعنی ۰٫۰۳۲) است، درحالیکه این مقدار برای محصول سطح ۲ و ۳ مادیس بترتیب ۴۷ و ۷۴ درصد (یعنی ۰٫۱۰۸ و ۰٫۱۷۰) به‌دست آمد (جدول (۹)). عدم قطعیت محصولات مادیس به میزان قابل توجهی بزرگتر از ماکزیمم عدم قطعیت قابل قبول در AOD می‌باشد و عدم قطعیت SARA AOD کمتر از ماکزیمم عدم قطعیت قابل قبول در AOD است. بنابراین این نتایج نیز دقت بالای SARA AOD برای محاسبه تابش موج کوتاه را در مقایسه با محصولات سطح ۲ و ۳ مادیس نشان می‌دهد. لازم بذکر است که AOD به‌دست آمده از داده‌های میدان دید، شاید معیار مناسبی برای اعتبارسنجی AOD های بکار رفته در این تحقیق نباشد و بهتر است از داده‌های دقیق‌تر آئرونت

[1] Southern Great Plains

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]

بدین‌منظور استفاده گردد. تنها داده موجـود در منطقـه مورد مطالعه، داده‌های میدان دید بودند.

جدول ۸: اطلاعات آماری تابش برآورد بر اساس روش پیشنهادی، در مقایسه با تحقیقات قبلی مشابه

روش بکار رفته در	R^2	RMSE (وات بر مترمربع)	بایاس (وات بر مترمربع)
تحقیق پیش رو	۰/۸۸	۲۵/۰۹	۲/۰۵
ریو و همکاران	۰/۹۸-۰/۹۸	۴۱-۲۴	۳۲-۱۳
بیشت و همکاران	۰/۹۷	۵۱	۴۱
هوبورگ و سوگارد	۰/۹۵	۴۸	-

جدول ۹: آنالیز حساسیت محاسبه تابش موج کوتاه بر اساس داده‌های مختلف AOD

AOD	میانگین AOD	عدم قطعیت (٪)	عدم قطعیت در واحد AOD
SARA AOD	۰/۱۸	۱۴	۰/۰۳۲
MODIS L2 AOD	۰/۲۸	۴۷	۰/۱۰۸
MODIS L3 AOD	۰/۴۱	۷۴	۰/۱۷۰

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیـق پـس از ارائـه روش پیشـنهادی بـرآورد تـابش براسـاس SARA AOD، تـابش مـوج کوتـاه در ایستگاه چیتگر تهران برای روزهای بدون ابـر بـه‌دسـت آمد. به منظور مقایسه، تابش موج کوتـاه بـا اسـتفاده از محصـولات عمـق اپتیکـی هـواویز مـادیس، نیـز برآورد گردید. نتایج به‌دست آمده بـا انـدازه‌گیـری‌هـای زمینی اعتبارسنجی شدند. نتایج ارائه شده در شکل (۵) و جدول (۷) نشان داد، روش پیشنهادی بـرآورد تـابش براسـاس SARA AOD بـا اطلاعـات آمـاری، خطـای RMSE و بایاس بترتیب برابـر اسـت بـا: ۲۵/۰۹ و ۲/۰۵ وات بر مترمربع، تابش موج کوتاه در ایستگاه چیتگـر را برآورد نمود. این روش در مقایسه بـا روش‌هـای بـرآورد تابش براساس محصولات عمـق اپتیکـی مـادیس ماننـد MODIS L2 AOD وMODIS L3 AOD نتایج بهتـری به‌همراه داشـت. بطوریکـه نتـایج آمـاری بـرآورد تـابش براساس محصول سـطح دو مـادیس، خطـای RMSE و بایاس بترتیب برابـر اسـت بـا: ۴۱/۷۵ و ۱۵/۹۳ وات بـر مترمربع و برآورد تـابش براسـاس محصـول سـطح سـه مادیس، بترتیب برابر است بـا: ۶۰/۷۳ و ۵۳/۷۷ وات بـر مترمربع، را نشان داد. خطای RMSE تابش برآورد شده در روش پیشـنهادی، حـدوداً ۰/۶ تـابش بـرآورد شـده براساس محصـول سـطح دو و ۰/۴ تـابش بـرآورد شـده براساس محصول سطح سه مادیس است. خطای بایـاس نیز در روش پیشنهادی بـه صـفر نزدیـک شـده اسـت، درحالی‌که در روش‌هـای براسـاس محصـولات مـادیس، این خطا مقدار بالایی دارد.

علاوه بـر ایـن، شـکل (۶-الـف) نیـز مزیـت اسـتفاده از SARA AOD نسبت به محصولات عمق اپتیکی هواویز مادیس را به خوبی نمایش می‌دهد. به‌طوریکـه بـه‌علـت قدرت تفکیک مکانی بالای SARA AOD، تابش برآورد شـده بـر اسـاس آن، بخـوبی تغییـرات مکـانی را نمـایش مـی‌دهـد، درحالیکـه ایـن تغییـرات مکـانی در تابش‌های برآورد شده براساس محصولات عمق اپتیکـی هواویز به‌صورت مناسـبی دیـده نمـی‌شـود. چنانچـه در شکل(۶-ب) دیـده شـد، تـابش بـرآورد شـده براسـاس

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]

محصول سطح دو مادیس قدرت تفکیک مناسبی دارد ولی بدلیل محدودیت الگوریتم DT در نواحی با سطوح روشن و همچنین در مناطق با بارگذاری بالای هواویز گپ‌های فراوانی در آن مشاهده می‌شود، تابش برآورد شده براساس محصول سطح سه مادیس (شکل (۶-ج))، گپ کمتری دارد ولی از قدرت تفکیک مناسبی برای نمایش تغییرات تابش در منطقه، برخوردار نیست.

مقایسه روش پیشنهادی برآورد تابش براساس SARA AOD، با مطالعات مشابه انجام شده در سالهای گذشته، نشان داد که این روش از دقت بمراتب بالاتری برخوردار بوده، یعنی خطای RMSE و بایاس مقدار پایین‌تری دارند، اگرچه ضریب رگرسیون در روش پیشنهادی، درمقایسه با مطالعات پیشین مقدار کمتری نشان داد. پایین بودن ضریب رگرسیون می‌تواند بعلت ثابت فرض کردن مقادیر آلبدوی پراکنش منفرد و فاکتور تقارن در منطقه باشد. این دو پارامتر از طریق ایستگاه آئرونت IASBS مستقر در زنجان بدست می‌آید و در ایستگاه چیتگر نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. لذا برای محاسبه تابش با روش پیشنهادی در مقیاس منطقه‌ای و جهانی، نیاز به توزیع مکانی مناسبی از شبکه آئرونت در کشور است. با فرض در دسترس بودن چنین شبکه‌ای در آینده، روش پیشنهادی ترکیب مدل تابشی یانگ و الگوریتم بازیابی هواویز SARA، می‌تواند برآورد دقیقی از تابش موج کوتاه با قدرت تفکیک مکانی بالا، در مقیاس منطقه‌ای تا جهانی، داشته باشد.

در این تحقیق هدف از ارائه روش ترکیبی، تخمین دقیق تابش موج‌کوتاه با قدرت‌تفکیک‌مکانی بالا (۱ کیلومتر) با استفاده از داده‌های مادیس، در مقیاس منطقه‌ای بود. که نتایج نشان از موفقیت بالای این روش داشت. همچنین نقشه تابش به‌دست آمده با استفاده از این روش برای شمال و شمالغرب کشور نشان داد که این روش، تغییرات مکانی تابش را در منطقه به‌خوبی نمایش می‌دهد. این روش با روش‌های مرسوم در مطالعات پیشین نیز مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج نشان‌دهنده دقت بالای آن بود. با فرض دسترسی به شبکه‌ای منظم از ایستگاه‌های آئرونت در منطقه، روش پیشنهادی قادر خواهد بود تابش موج‌کوتاه را با قدرت تفکیک‌مکانی ۱ کیلومتر برای کاربردهای مختلف از قبیل مدل‌های سطح و جوی در مقیاس منطقه‌ای تا جهانی برآورد نماید.

مراجع

[1] M. Castelli, R. Stöckli, D. Zardi, A. Tetzlaff, J. E. Wagner, G. Belluardo, et al., "The HelioMont method for assessing solar irradiance over complex terrain: Validation and improvements," Remote Sensing of Environment, vol. 152, pp. 603-613, 2014.

[2] Y. Ryu, S. Kang, S.-K. Moon, and J. Kim, "Evaluation of land surface radiation balance derived from moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) over complex terrain and heterogeneous landscape on clear sky days," Agricultural and Forest Meteorology, vol. 148, pp. 1538-1552, 2008.

[3] S. Liang, Advanced Remote Sensing. Boston: Academic Press, 2012.

[4] L. Chen, G. Yan, T. Wang, H. Ren, J. Calbó, J. Zhao, et al., "Estimation of surface shortwave radiation components under all sky conditions: Modeling and sensitivity analysis," Remote Sensing of Environment, vol. 123, pp. 457-469, 2012.

[5] C. A. Gueymard, "Temporal variability in direct and global irradiance at various time scales as affected by aerosols," Solar Resources, vol. 86, pp. 3544-3553, 2012.

[6] S. Liang, Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2004.

[7] R. T. Pinker and I. Laszlo, "Modeling Surface Solar Irradiance for Satellite Applications on a Global Scale," Journal of Applied Meteorology, vol. 31, pp. 194-211, 1992.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]

[8] Z. Li, H. G. Leighton, K. Masuda, and T. Takashima, "Estimation of SW Flux Absorbed at the Surface from TOA Reflected Flux," Journal of Climate, vol. 6, pp. 317-330, 1993.

[9] G. L. Stephens, A. Slingo, M. J. Webb, P. J. Minnett, P. H. Daum, L. Kleinman, et al., "Observations of the Earth's Radiation Budget in relation to atmospheric hydrology: 4. Atmospheric column radiative cooling over the world's oceans," Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 99, pp. 18585-18604, 1994.

[10] Y. C. Zhang, W. B. Rossow, and A. A. Lacis, "Calculation of surface and top of atmosphere radiative fluxes from physical quantities based on ISCCP data sets: 1. Method and sensitivity to input data uncertainties," Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 100, pp. 1149-1165, 1995.

[11] S. K. Gupta, N. A. Ritchey, A. C. Wilber, C. H. Whitlock, G. G. Gibson, and P. W. Stackhouse, "A Climatology of Surface Radiation Budget Derived from Satellite Data," Journal of Climate, vol. 12, pp. 2691-2710, 1999.

[12] R. W. Mueller, K. F. Dagestad, P. Ineichen, M. Schroedter-Homscheidt, S. Cros, D. Dumortier, et al., "Rethinking satellite-based solar irradiance modelling: The SOLIS clear-sky module," Remote Sensing of Environment, vol. 91, pp. 160-174, 2004.

[13] C. Rigollier, M. Lefèvre, and L. Wald, "The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images," Solar Energy, vol. 77, pp. 159-169, 2004.

[14] . Bisht, V. Venturini, S. Islam, and L. Jiang, "Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days," Remote Sensing of Environment, vol. 97, pp. 52-67, 2005.

[15] H.-Y. Kim and S. Liang, "Development of a hybrid method for estimating land surface shortwave net radiation from MODIS data," Remote Sensing of Environment, vol. 114, pp. 2393-2402, 2010.

[16] MODIS (2016, Web Page). Modis – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. Available: http://modis.gsfc.nasa.gov/

[17] G. Huang, S. Liu, and S. Liang, "Estimation of net surface shortwave radiation from MODIS data," International Journal of Remote Sensing, vol. 33, pp. 804-825, 2012.

[18] M. Suri, J. Remund, T. Cebecauer, C. Hoyer-Click, D. Dumortier, T. Huld, et al., "Comparison of Direct Normal Irradiation Maps for Europe," in Solar Paces, ed. Berlin, Germany: In: Proc. SolarPACES Conf, 2009.

[19] C. A. Gueymard, "Uncertainties in Modeled Direct Irradiance Around the Sahara as Affected by Aerosols: Are Current Datasets of Bankable Quality?," Journal of Solar Energy Engineering, vol. 133, pp. 031024-031024, 2011.

[20] R. C. Levy, L. A. Remer, S. Mattoo, E. F. Vermote, and Y. J. Kaufman, "Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance," Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 112, p. D13211, 2007.

[21] N. C. Hsu, T. Si-Chee, M. D. King, and J. R. Herman, "Aerosol properties over bright-reflecting source regions," Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 42, pp. 557-569, 2004.

[22] R. C. Levy, L. A. Remer, R. G. Kleidman, S. Mattoo, C. Ichoku, R. Kahn, et al., "Global evaluation of the Collection 5 MODIS dark-target aerosol products over land," Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 10, pp. 10399-10420, 2010.

[23] M. Bilal, J. E. Nichol, M. P. Bleiweiss, and D. Dubois, "A Simplified high resolution

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]

MODIS Aerosol Retrieval Algorithm (SARA) for use over mixed surfaces," Remote Sensing of Environment, vol. 136, pp. 135-145, 2013.

[24] M. Bilal, J. E. Nichol, and P. W. Chan, "Validation and accuracy assessment of a Simplified Aerosol Retrieval Algorithm (SARA) over Beijing under low and high aerosol loadings and dust storms," Remote Sensing of Environment, vol. 153, pp. 50-60, 2014.

[25] P. Hubanks, M. King, S. Platnick, and R. Pincus, "MODIS atmosphere L3 gridded product algorithm theoretical basis document Collection 005 Version 1.1," 2008.

[26] L. Chengcai, A. K. H. Lau, M. Jietai, and D. A. Chu, "Retrieval, validation, and application of the 1-km aerosol optical depth from MODIS measurements over Hong Kong," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 43, pp. 2650-2658, 2005.

[27] M. S. Wong, J. E. Nichol, and K. H. Lee, "An operational MODIS aerosol retrieval algorithm at high spatial resolution, and its application over a complex urban region," Atmospheric Research, vol. 99, pp. 579-589, 2011.

[28] R. M. Houborg and H. Soegaard, "Regional simulation of ecosystem CO2 and water vapor exchange for agricultural land using NOAA AVHRR and Terra MODIS satellite data. Application to Zealand, Denmark," Remote Sensing of Environment, vol. 93, pp. 150-167, 2004.

[29] R. E. Bird and R. L. Hulstrom, "Review, Evaluation, and Improvement of Direct Irradiance Models," Journal of Solar Energy Engineering, vol. 103, pp. 182-192, 1981.

[30] M. Iqbal, "Total (Broadband) Radiation under Cloudless Skies," in An Introduction to Solar Radiation, M. Iqbal, Ed., ed Toronto: Academic Press, 1983, pp. 169-213.

[31] K. Yang, G. W. Huang, and N. Tamai, "A hybrid model for estimating global solar radiation," Solar Energy, vol. 70, pp. 13-22, 2001.

[32] B. Leckner, "The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface—elements of a model," Solar Energy, vol. 20, pp. 143-150, 1978.

[33] C. A. Gueymard, "Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: detailed theoretical performance assessment," Solar Energy, vol. 74, pp. 355-379, 2003.

[34] C. A. Gueymard, "Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part II: validation with high-quality measurements," Solar Energy, vol. 74, pp. 381-395, 2003.

[35] M. Paulescu and Z. Schlett, "Performance assessment of global solar irradiation models under Romanian climate," Renewable Energy, vol. 29, pp. 767-777, 2004.

[36] M. Paulescu and Z. Schlett, "A simplified but accurate spectral solar irradiance model," Theoretical and Applied Climatology, vol. 75, pp. 203-212, 2003.

[37] M. A. Madkour, M. El-Metwally, and A. B. Hamed, "Comparative study on different models for estimation of direct normal irradiance (DNI) over Egypt atmosphere," Renewable Energy, vol. 31, pp. 361-382, 2006.

[38] IRIMO (2016, Web Page). I. R. of Iran Meteorological Office. Available: http://www.irimo.ir/

[39] B. N. Holben, T. F. Eck, I. Slutsker, D. Tanré, J. P. Buis, A. Setzer, et al., "AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization," Remote Sensing of Environment, vol. 66, pp. 1-16, 1998.

[40] B. N. Holben, D. Tanré, A. Smirnov, T. F. Eck, I. Slutsker, N. Abuhassan, et al., "An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]

AERONET," Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 106, pp. 12067-12097, 2001.

[41] E. F. Vermote, S. Vibert, H. Kilcoyne, D. Hoyt, and T. Zhao, "Suspended Matter. Visible/Infrared Imager/Radiometer Suite algorithm theroretical basis document. SBRS Document# Y2390, Raytheon Systems Company," Information Technology and Scientific Services, Maryland, 2002.

[42] NASA (2016, Web Page). Modis Level 1, Atmosphere and Land data products. Available: http://ladsweb.nascom.nasa.gov.

[43] O. Lado-Bordowsky and I. Naour, "Optical paths involved in determining the scattering angle for the scattering algorithm developed in LOWTRAN7," International Journal of Infrared and Millimeter Waves, vol. 18, pp. 1689-1696, 1997.

[44] H. Rahman, B. Pinty, and M. M. Verstraete, "Coupled surface-atmosphere reflectance (CSAR) model: 2. Semiempirical surface model usable with NOAA advanced very high resolution radiometer data," Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 98, pp. 20791-20801, 1993.

[45] R. C. Levy, L. A. Remer, and O. Dubovik, "Global aerosol optical properties and application to Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer aerosol retrieval over land," Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 112, p. D13210, 2007.

[46] D. Tanre, M. Herman, P. Y. Deschamps, and A. d. Leffe, "Atmospheric modeling for space measurements of ground reflectances, including bidirectional properties," Appl.Opt., vol. 18, pp. 3587-3594, 1979.

[47] C. Kelley, Iterative Methods for Linear and Nonlinear Equations: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1995.

[48] C. Ichoku, R. Levy, Y. J. Kaufman, L. A. Remer, R.-R. Li, V. J. Martins, et al., "Analysis of the performance characteristics of the five-channel Microtops II Sun photometer for measuring aerosol optical thickness and precipitable water vapor," Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 107, pp. AAC 5-1-AAC 5-17, 2002.

[49] J. A. Ruiz-Arias, J. Dudhia, C. A. Gueymard, and D. Pozo-Vazquez, "Assessment of the Level-3 MODIS daily aerosol optical depth in the context of surface solar radiation and numerical weather modeling," Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 13, pp. 675-692, 2013.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.6, No.3, Autumn 2018

Development and evaluation of Downward Surface Shortwave Radiation based on SARA AOD using MODIS data under cloud-free conditions

Javadnia, E. * [1], Abkar, A. [2]

1- PhD student of remote sensing in Department of Photogrammetry and Remote Sensing, Faculty of Geodesy & Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology
2- Assisstant professor in Department of Photogrammetry and Remote Sensing, Faculty of Geodesy & Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology

Abstract

The atmospheric Aerosol Optical Depth (AOD) is one of the major uncertainties in retrieving Downward Surface Shortwave Radiation (DSSR). In the current study, Yang's model, which determines the effect of each component of atmosphere separately, was used to estimate DSSR under cloud-free conditions. Recent studies have used MODIS AOD data to calculate DSSR, while in this article the retrieved AOD from the Simplified Aerosol Retrieval Algorithm (SARA) was used to estimate DSSR over the Chitgar site in Tehran, Iran. For comparison purpose, MODIS AOD products were also used to estimate DSSR over the studied region. Estimated DSSR based on SARA AOD, MODIS Level 2 (L2) AOD, and MODIS Level 3 (L3) AOD were evaluated with ground-based measurements of DSSR at the Chitgar site during summer of 2013. Results show R2 = 0.88, RMSE = 25.09 W/m2, and Bias = 2.05 W/m2 for SARA-based DSSR, and R2 = 0.61, RMSE = 41.75 W/m2, and Bias = 15.93 W/m2 for MODIS-L2 based DSSR, and R2 = 0.82, RMSE = 60.73 W/m2, and Bias = 53.77 W/m2 for MODIS L3-based DSSR. The results showed higher accuracy of estimated DSSR based on the SARA AOD than the estimated DSSR based on MODIS products. As RMSE of SARA-based DSSR is 1.6 and 2 times MODIS-L2 based DSSR and MODIS-L3 based DSSR, respectively. In the proposed method, Bias reached close to zero. These results also showed that our modeling scheme of combining Yang's model with the SARA algorithm can be used from the regional to global scale under the assumption of future access to spatially distributed AERONET sites.

Key words: Downward surface shortwave radiation, Aerosol optical depth, Moderate Resolution Imaging

Correspondence Address. : Department of Photogrammetry and Remote Sensing, Faculty of Geodesy & Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
Tel: +98.9125232057
Email: jjavadnia@mail.kntu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.29252/jgit.6.3.147]