



## بازیابی عمق نوری ریزگردها با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸

### مطالعه موردی: شهر تامنراست، الجزایر

حسین نساری<sup>۱</sup> رضا شاه حسینی<sup>۲</sup>  
امیررضا گودرزی<sup>۳</sup> سهیل سبحان اردکانی<sup>۴</sup>  
سعید فرزانه<sup>۵</sup>

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۲۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۱۶

\*\*\*\*\*

#### چکیده

محصولات عمق نوری ریزگرد اتمسفری (AOD) مبتنی بر ماهواره‌های در حال گردش مانند MODIS، VIIRS و NOAA می‌توانند توزیع روزانه AOD جهانی و منطقه‌ای را ارائه دهند. کاربرد آن‌ها برای نظارت بر کیفیت هوا در مقیاس‌های محلی مانند محیط‌های شهری به دلیل قدرت تفکیک مکانی پایین آن‌ها محدود است. اخیراً، علاقه فزاینده‌ای به بازیابی محصولات AOD براساس تصاویر نوری با قدرت تفکیک بالا شکل گرفته است. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی بازیابی AOD در مناطق شهری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا است. با فرض سطح لامبرتی، اصل بازیابی AOD توسعه یافته براساس تئوری انتقال تابشی با استفاده از معادله Tanré است. برای حل معادله انتقال تابشی، مطالعه حاضر مدل انتقال تابشی شبیه‌سازی دوم سیگنال ماهواره‌ای در طیف خورشیدی (6S) را اتخاذ و یک جدول جستجو را با فرض یک مدل ریزگرد قاره‌ای ساخت. بازتاب سطح زمین در کل دوره مطالعه با استفاده از Landsat 8 OLI برای دوره ۲۰۱۵-۲۰۱۶ تنوع بسیار کمی به صورت ماهانه نشان داد. بازیابی AOD با مقایسه بازتاب TOA اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده انجام گرفت. اعتبارسنجی با استفاده از یک سایت زمینی مستقر در پشت بام مرکز منطقه‌ای هواشناسی با نام Tamanrasset\_INM واقع در منطقه تامنراست، الجزایر انجام شد. اعتبارسنجی نشان می‌دهد که روش بازیابی AOD منجر به خطای استاندارد ۰/۱۰۶۸ می‌شود و با  $R^2$  برابر با ۰/۷۰۹ همبستگی خوبی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: عمق نوری ریزگرد، مناطق شهری، مناطق خشک و نیمه خشک، شهر تامنراست الجزایر، Landsat-8 OLI

\*\*\*\*\*

۱- دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی محیط زیست، دانشکده فنی و مهندسی، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران h.nesari@gmail.com  
۲- استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) rshahosseini@ut.ac.ir  
۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران amir\_r\_goodarzi@yahoo.co.uk  
۴- استاد گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران s\_sobhan@iauh.ac.ir  
۵- استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران farzaneh@ut.ac.ir

## ۱- مقدمه

در مکان‌های دور توزیع شده‌اند و نقشه‌های بسیار دقیقی از توزیع AOD در مقیاس‌های مکانی بزرگ به‌طور منظم ارائه نمی‌دهند (Sayer et al., 2012; Levy et al., 2013; Farahat & Abuelgasim, 2022). با این حال، چنین اطلاعاتی با استفاده از داده‌های سنجش از دور ماهواره‌ای در چندین مطالعه اخذ شده است. علاوه بر این، بسیاری از رویکردهای تجربی و فیزیکی برای ارتباط AOD مشتق شده از ماهواره با ذرات ریز (PM<sub>2.5</sub>) توسعه یافته‌اند (Omari et al., 2019).

توسعه فناوری‌های سنجش از دور ماهواره‌ای، نظارت پویای بلادرنگ ریزگرد را در مقیاس بزرگ تسهیل کرده است (ارجمند و همکاران، ۱۳۹۷). در ۴۰ سال گذشته چندین روش برای بازیابی AOD از تشعشعات رادیومتریک غیرفعال توسعه یافته است (Sun et al., 2016). مشکلات در بازیابی AOD ماهواره‌ای به‌طور کلی با حذف سهم بازتاب سطح زمین (LSR)<sup>۱</sup>، ابرها و به انتخاب یک مدل ریزگرد مناسب مرتبط است. با این حال امروزه، چندین روش برای بازیابی AOD براساس تئوری انتقال تابشی از تصاویر سنجش از دور نوری توسعه یافته است (Omari et al., 2020). از نظر حذف سهم LSR، متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده شامل روش هدف تیره<sup>۲</sup> (DT)، روش ساختار-عملکرد<sup>۳</sup>، الگوریتم آبی عمیق<sup>۴</sup> (DB)، الگوریتم پلاریزاسیون، الگوریتم چند زاویه‌ای و روش SYNTAM<sup>۵</sup> است (جهانی چهره برق و آخوندزاده هنزائی، ۱۳۹۶؛ Chen et al., 2020). در این میان، روش پوشش گیاهی تیره متراکم (DDV)<sup>۶</sup> جز موارد ابتدایی و محبوب است (Kaufman and Tanré, 1997; Kaufman and Remer, 1994; Levy et al., 2007). بازیابی AOD در مناطق با پوشش گیاهی متراکم به‌طور گسترده‌ای براساس داده‌های سنجنده‌های ماهواره‌ای، مانند AVHRR<sup>۷</sup>، SeaWiFS<sup>۸</sup> و MODIS<sup>۹</sup> صورت گرفته است (Riffler et al.,

ریزگردهای کلونیدی از ذرات جامد یا قطرات مایع معلق در جو هستند. قطر آن‌ها بین 10<sup>-3</sup> تا 10<sup>2</sup> میکرومتر است. آن‌ها با جذب و پراکنده کردن تشعشعات خورشیدی به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر اقلیم جهانی تأثیر می‌گذارند و همچنین می‌توانند با انتشار مواد مضر بر سلامت انسان تأثیر جدی بگذارند (Chudnovsky, 2021; Sun et al., 2016; Pope et al., 2002). علاوه بر این، غلظت‌های بالای ریزگردها در مقیاس محلی به دلیل فعالیت‌های طبیعی یا انسانی، اثرات نامطلوبی بر سلامت انسان از جمله سرطان‌ها، التهاب ریوی و مرگ‌ومیر قلبی ریوی دارد. نظارت بر تنوع زمانی و مکانی غلظت ریزگردها نیاز به اندازه‌گیری منظم خواص نوری آن‌ها مانند عمق نوری ریزگرد (AOD) دارد (ارجمند و همکاران، ۱۳۹۷). AOD به‌عنوان ضریب خاموش شدن نور خورشید در جو در اثر ذرات معلق در هوا تعریف می‌شود که نشان‌دهنده مجموع ضرایب جذب و پراکندگی است (Omari et al., 2019).

در گذشته، ویژگی‌های ذرات معلق در هوا به خوبی درک نشده بود و اطلاعات به‌دست‌آمده غیرقابل اعتماد بود. به‌منظور کاهش عدم قطعیت در ویژگی‌های ذرات معلق در هوا، اندازه‌گیری‌های مکانی-زمانی دقیق‌تر و قابل اعتمادتر در مقیاس منطقه‌ای و جهانی مورد نیاز بود. AERONET (شبکه رباتیک ریزگرد) به‌عنوان یک شبکه جهانی نورسنج خورشیدی، نقش مهمی در ارائه اندازه‌گیری‌های ثابت در مورد خواص نوری ریزگردها، مانند AOD که می‌تواند مستقیماً با استفاده از ابزارهایی مانند: نورسنج خورشیدی CE-318 اندازه‌گیری شود، ایفا کرده است (Zhao et al., 2020). مشاهدات AOD طیف وسیعی از کانال‌های مرئی تا مادون قرمز نزدیک (۰/۳۴-۱/۰۲ میکرومتر) را با قدرت تفکیک زمانی بالای ۱۵ دقیقه و عدم قطعیت کم ۰/۰۱-۰/۰۲ پوشش می‌دهد (Wei et al., 2017). ایستگاه‌های نظارتی زمینی AERONET معمولاً در تخمین AOD سطح زمین استفاده می‌شوند. ایستگاه‌های زمینی AERONET به‌طور نامنظم

1- Land Surface Reflectance

2- Dark Target Method

3- Structure-Function Method

4- Deep Blue Algorithm

5- SYNergy of Terra and Aqua Modis

6- Dense Dark Vegetation

7- Advanced Very High Resolution Radiometer

8- Sea-viewing Wide Field of view Sensor

9- MODerate resolution Imaging Spectroradiometer

در مناطق پرنور، مانند شهرها و سایر مناطق با پوشش گیاهی کم یا بدون پوشش گیاهی، سهم سطح زمین در تشعشع دریافت شده توسط ماهواره، بیشتر از نواحی پوشش گیاهی است و لذا تخمین LSR را با دقت بالا دشوار می‌کند. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که الگوریتم DB دارای مزایای غیرقابل مقایسه‌ای نسبت به سایر الگوریتم‌های بازیابی AOD در مناطق روشن است. الگوریتم DB با موفقیت در مناطق خشک و نیمه خشک مانند بیابان صحرا<sup>۳</sup> به کار گرفته شده است و با مزایای خاص خود به الگوریتم اصلی برای بازیابی AOD اهداف روشن تبدیل شده است (Chen et al., 2020). اکثر این مطالعات صحت‌های بازیابی را گزارش کردند که به طور کلی با روش DDV و داده‌های AERONET قابل مقایسه است و حدود ۵۰٪ تا ۷۰٪ از مجموعه‌ها در محدوده خطای مورد انتظار قرار می‌گیرند (Wei & Sun, 2018). متأسفانه قدرت تفکیک مکانی این محصولات با MODIS در AOD ۱۰ کیلومتر و AOD MISR در ۱۷/۶ کیلومتر نسبتاً پایین است (Omari et al., 2019). برخی از مطالعات هم از الگوریتم DB برای دستیابی به قدرت تفکیک مکانی بالا در نینگبو و پکن<sup>۴</sup> براساس ماهواره‌های Environment Satellite 1 و Landsat 8 OLI همت گماشتند. (Chen et al., 2020). برخی دیگر نیز از الگوریتم ترکیبی DT و DB برای بازیابی AOD شهری از Landsat 8 OLI و MODIS در چین استفاده نمودند (Jin et al., 2021; Lin et al., 2021).

Tian و همکاران (۲۰۱۸) اخیراً به بازیابی AOD در منطقه خشک یا نیمه خشک شمال سین کیانگ، چین همت گماشتند. الگوریتم DT برای مناطق با بازتاب کم، مانند پوشش گیاهی متراکم، اعمال می‌شود و الگوریتم DB برای مناطق بازتابنده روشن استفاده می‌شود. با این حال، هر دو الگوریتم DT و DB اثر بازتاب دو طرفه سطح را نادیده می‌گیرند. این پژوهش روشی را برای بازیابی AOD در مناطق خشک یا نیمه خشک ارائه می‌دهد که در آن نکات کلیدی، تخمین دقیق بازتاب سطح و مفروضات منطقی مدل ریزگرد

(2010; Sayer et al., 2012; Levy et al., 2013). پوشش گیاهی متراکم در باندهای آبی (۴۷۰ نانومتر) و قرمز (۶۶۰ نانومتر) بازتاب کمتری نسبت به سایر پوشش‌های زمینی با بازتاب زیاد دارد. نسبت سیگنال‌های ماهواره‌ای ارائه شده توسط ریزگرد در این دو باند نسبتاً بالاتر است. اطلاعات ریزگرد را می‌توان با دقت بالا در چنین مناطقی بازیابی نمود (Sun et al., 2016). در روش DDV سهم بازتاب سطح با بهره‌گیری از همبستگی بین مادون قرمز با طول موج کوتاه (SWIR)<sup>۱</sup> (۲۱۰۰ نانومتر) و قرمز (۶۶۰ نانومتر) و آبی (۴۷۰ نانومتر) و اثر ناچیز ذرات معلق در SWIR حذف می‌شود (Omari et al., 2019). در اکثر شرایط، به استثنای طوفان‌های غبار، ریزگرد در هوا تقریباً در آن طول موج شفاف هستند و بازتاب باندهای قرمز و آبی را می‌توان به راحتی از بازتاب ظاهری آن تخمین زد. این روش از آن زمان بهبود یافته و برای بازیابی AOD از چندین سنسور ماهواره‌ای استفاده شده است (Sun et al., 2016). با این حال، این رویکرد محدودیت‌های زیادی را نسبت به اهداف روشن نشان داد که در آن پوشش گیاهی یا کم است یا وجود ندارد، مانند مناطق خشک و نیمه‌خشک و در مناطق شهری. سهم بازتاب سطحی در بازتاب اندازه‌گیری شده بالای جو (TOA)<sup>۲</sup> بسیار بیشتر است و بنابراین بازیابی AOD روی چنین اهدافی بسیار پیچیده‌تر است (Omari et al., 2019). روش SYNTAM با ادغام داده‌های سنجنده MODIS دو سکوی TERRA و AQUA توانسته برخی محدودیت‌های موجود در به دست آوردن ضخامت نوری ریزگرد توسط روش DDV را برطرف کرده و نتایج قابل قبولی ارائه دهد. جهانی چهره برق و آخوندزاده هنزائی (۱۳۹۶) با استفاده از روش SYNTAM نقشه ضخامت نوری ریزگردهای هوا برای منطقه‌ای از ایران تهیه کردند. Tang و همکاران (۲۰۲۱) به برآورد غلظت توده‌ای PM<sub>2.5</sub> با قدرت تفکیک فوق‌العاده بالا براساس نظریه پراکندگی Mie با استفاده از تصاویر Landsat8 OLI بر روی دلتای رودخانه مروارید پرداختند.

3- Sahara Desert

4- Ningbo and Beijing

1- Shortwave Infrared

2- Top of Atmosphere

شده از تصاویر Landsat 8 OLI با استفاده از اندازه‌گیری‌های AOD از چهار ایستگاه AERONET واقع در مناطق با سطوح روشن تأیید شد.

Chen و همکاران (۲۰۲۰) به بازیابی AOD با قدرت تفکیک خوب در مناطق شهری نیمه‌خشک با استفاده از داده‌های Landsat با مطالعه موردی در ارومچی، شمال غربی چین پرداختند. این مطالعه، براساس توالی بلندمدت داده‌های MOD09A1 از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۸ و تولید LUT، از الگوریتم DB برای بازیابی AOD از داده‌های Landsat TM/OLI از منطقه ارومچی با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر (در طول موج ۵۵۰ نانومتر) استفاده کرد. با این وجود، قدرت تفکیک مکانی محصولات AOD ۵۰۰ متری تولید شده هنوز در مناطقی که ذرات معلق در فضا و زمان بسیار متغیر هستند مانند محیط‌های شهری نسبتاً پایین است. در این حالت توصیه می‌شود از بازتاب TOA و LSR همان سنجنده در حل معادله انتقال تابشی استفاده شود (Omari et al., 2019). در چنین سناریویی، اثرات جهت بر روی بازتاب TOA اندازه‌گیری شده می‌تواند ناچیز باشد زیرا مشاهدات با زاویه دید ثابت مانند تصاویر Landsat نسبتاً یکسان هستند. علاوه بر این، در مناطق روشن، می‌توان فرض کرد که بازتاب سطح نسبتاً پایدار است و تغییرات بازتاب TOA در مدت مشابه عمدتاً به دلیل بارگذاری AOD جوی است (Hagolle et al., 2015).

Omari و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که در نواحی خشک کشور امارات متحده عربی استفاده از LSR سالانه از مقادیر از پیش محاسبه شده برای محاسبه AOD مناسب است. از طرفی Tian و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که در نواحی خشک یا نیمه خشک استفاده از LSR ماهانه برای محاسبه AOD برای محصولات MODIS مناسب است. به این منظور در تحقیق حاضر، استفاده از LSR از پیش محاسبه شده تصاویر Landsat به‌عنوان سهم بازتاب سطح در بازیابی AOD در یک منطقه شهری، تامنراسست<sup>۳</sup>، الجزایر بررسی شده است. ضمناً با توجه به تفاوت منطقه مورد بررسی

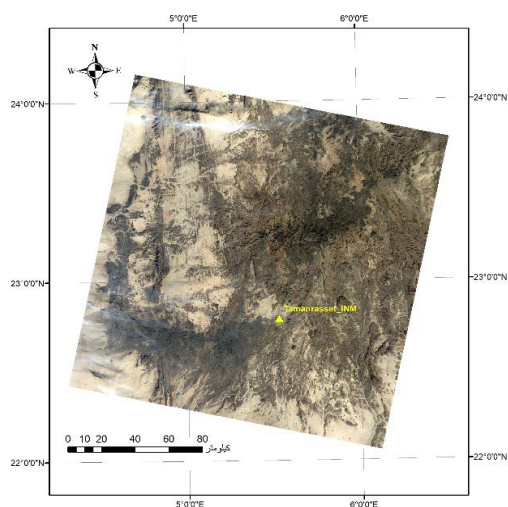
است. برای کاهش عدم قطعیت در بازتاب سطح، یک پایگاه داده حداقل LSR در قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر برای هر ماه براساس محصول MODIS ساخته شد. علاوه بر این، یک مدل اصلاح تابع توزیع بازتاب دو طرفه (BRDF)<sup>۱</sup> برای جبران اثر ناهمسانگردی بازتاب سطحی اتخاذ شد. پارامترهای ریزگرد، از جمله AOD، تک پراکندگی آلدوی، ضریب نامتقارن، توان آنگستروم<sup>۲</sup> و ضریب شکست پیچیده، براساس مشاهده دو نورسنج خورشیدی نصب شده در شمال سین‌کیانگ از جولای تا آگوست ۲۰۱۴ تعیین شد. AOD بازیابی شده از تصاویر MODIS با اندازه‌گیری‌های زمینی و محصول ریزگرد Terra-MODIS (MOD04) اعتبارسنجی شد. AOD ۵۰۰ متری بازیابی شده از MODIS سازگاری بالایی با اندازه‌گیری‌های AOD مبتنی بر زمین با میانگین ضریب همبستگی بیش از ۰.۹۲ نشان داد. براساس نتایج، الگوریتم AOD جدید برای نشان دادن شرایط ریزگرد در سین‌کیانگ نسبت به محصول استاندارد DB مناسب‌تر است. الجزایر کشور بزرگی است که اطلاعات کمی در مورد تنوع مکانی و زمانی AOD دارد و قدرت تفکیک مکانی کم در محصولات موجود، پیش‌بینی بارهای ریزگرد (ذرات معلق در هوا) در مقیاس محلی را به‌خصوص برای مناطق خشک جنوبی بسیار دشوار می‌کند. در نتیجه، بازیابی AOD با داده‌های با قدرت تفکیک مکانی بالاتر برای تعیین میزان آلودگی هوا و اطلاعات مربوط به کیفیت هوا بسیار مهم است. تلاش‌های قبلی برای بازیابی AOD از تصاویر با قدرت تفکیک بالا انجام شده است (Bilal et al., 2013).

Sun و همکاران (۲۰۱۶) روشی را برای تخمین LSR برای بازیابی AOD در مناطق روشن ارائه کرد، و این روش برای بازیابی AOD برای تصاویر Landsat 8 OLI با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر استفاده شد. یک پایگاه داده LSR با محصول بازتاب سطحی MODIS (MOD09A1) ساخته شد و این پایگاه داده همچنین برای تخمین LSR تصاویر Landsat 8 OLI مورد استفاده قرار گرفت. AOD بازیابی

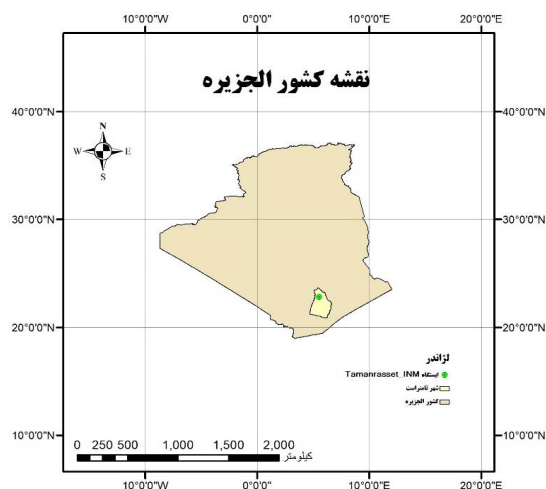
1- Bidirectional Reflectance Distribution Function

2- Ångström exponent

3- Tamanrasset



(ب)



(الف)

نگاره ۱: الف) محدوده مکانی مورد مطالعه و ایستگاه زمینی AERONET مورد بررسی

ب) ترکیب رنگی طبیعی باندهای قرمز، سبز و آبی از یک تصویر OLI Landsat-8

نسبت به تحقیق Omari و همکاران (۲۰۱۹) از مقادیر از پیش محاسبه شده LSR ماهانه Landsat 8 OLI استفاده شد. در نهایت طبق پیشینه‌های بررسی شده این رویکرد در منطقه جنوب الجزایر برای اولین بار با تصاویر Landsat 8 OLI پیاده‌سازی و ارزیابی شده است و به‌عنوان نوآوری این تحقیق محسوب می‌شود. اهداف اصلی پژوهش حاضر عبارتند از:

- استفاده از تصاویر Landsat 8 OLI با قدرت تفکیک بالا برای برآورد AOD در شهر تامنراست براساس حل نظریه انتقال تابش.
- سنجش کارایی استفاده از بانک‌های اطلاعاتی از پیش محاسبه شده LSR که با استفاده از داده‌های بدون ابر یک ماهه Landsat-8 تولید شده است.
- ارزیابی نتایج بازیابی AOD با استفاده از اندازه‌گیری‌های زمین AERONET.

اصلی توآرگ<sup>۱</sup> الجزایر است و در ارتفاع متوسط ۱۳۷۷ متر از سطح دریا واقع شده است. این منطقه در طول جغرافیایی و عرض جغرافیایی به ترتیب ۲۲,۷۸۳ و ۵,۵۱۷ واقع شده است (Achour et al., 2017). تامنراست در ابتدا به‌عنوان یک پاسگاه نظامی برای محافظت از مسیرهای تجاری فرا صحرایی تأسیس شد. با توجه به موقعیت آن در منطقه جنوبی کشور، تامنراست فصول تابستانی طولانی‌تر و گرم‌تری را تجربه می‌کند و مشخصه آن دمای روزانه حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد است که گاهی اوقات بین ژوئن و سپتامبر از ۳۸ درجه سانتی‌گراد فراتر می‌رود. این شهر با قرار گرفتن در صحرای بایر در طول سال به شدت خشک است و طبق گزارش‌ها میانگین بارندگی سالانه حدود ۴۳ میلی‌متر است. همچنین، این شهر به‌طور کلی مسطح است و توسط کوه‌های بیابانی عظیم احاطه شده است (Benhadji Serradj et al., 2022).

منطقه مورد مطالعه در جنوب الجزایر در قاره آفریقا واقع شده است. الجزایر، جمهوری دموکراتیک خلق الجزایر، کشوری در شمال آفریقا در ساحل دریای مدیترانه است. در عرض جغرافیایی از ۱۸,۹۶ تا ۳۷,۰۹ درجه شمالی و در طول جغرافیایی از ۸,۶۸ درجه غربی تا ۱۱,۹۵ درجه شرقی

## ۲- منطقه و داده‌های مطالعه

### ۲-۱- منطقه مطالعه

تامنراست، همچنین به‌عنوان Tamanghasset یا Tamenghest شناخته می‌شود، یک شهر واحد و مرکز استان Tamanrasset در جنوب الجزایر، در کوه‌های Ahaggar است. این شهر

نتایج با داده‌های ایستگاه نظارتی زمینی AERONET ابتدا شهر زنجان مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های مربوط به تایل ۳۵/۱۶۶ مربوط به این شهر از لحاظ همزمانی داده‌های تصاویر Landsat 8 OLI با داده‌های ایستگاه نظارتی زمینی AERONET مورد بررسی قرار گرفت. نکته قابل توجه عدم همزمانی در بسیاری از تاریخ‌ها بود.

با بررسی صورت گرفته در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸ تنها ۱۸ تصویر Landsat 8 OLI با داده‌های ایستگاه نظارتی زمینی AERONET همزمان بودند. البته این هم زمانی نیز در همین ۱۸ تصویر در برخی موارد با اختلاف بیش از  $\pm ۳۰$  دقیقه بوده است. از طرف دیگر داده‌های ایستگاه‌های زنجان در طول موج‌های ۴۴۰ و ۶۷۵ نانومتر موجود بود و فاقد داده‌های ۵۰۰ نانومتر بود. وجود این طول موج منجر به محاسبه دو عدد برای AOD در طول موج ۵۵۰ نانومتر می‌شود؛ به این منظور میانگین آن‌ها برای ارزیابی استفاده می‌شود و لذا این خود می‌تواند نتایج نزدیک‌تر به واقعیت ارائه دهد. این مورد در بسیاری از ایستگاه‌های AERONET سایر کشورها قابل دسترسی است.

از طرف دیگر شهر زنجان جزء شهرهای پاک کشور به لحاظ ریزگرد و آلودگی هوا محسوب می‌شود و کمتر با این پدیده مواجه است. همچنین با بررسی ۲۴ ایستگاه AERONET مستقر در کشورهای حاشیه خلیج فارس مشخص شد که فقط سه ایستگاه Masdar\_Institute، Mezaira و DEWA\_ResearchCentre از سال ۲۰۱۵ به بعد فعال بوده‌اند. این سه ایستگاه AERONET مربوط به کشور امارات متحده عربی هستند.

با توجه به اینکه در محدوده این کشور تحقیقات قبلی صورت گرفته است تلاش این مقاله کار بر روی منطقه‌ای فاقد سابقه پژوهشی مناسب قبلی بوده است. با در نظر گرفتن تمامی این موارد مطالعه موردی به جای کشور ایران از مکانی دیگر با داده‌های کامل‌تر و همچنین دارا بودن مشکل ریزگرد و اقلیم خشک یعنی جنوب کشور الجزایر انتخاب شد.

(نگاره ۱) واقع شده است (Takilalte et al., 2022). این کشور بزرگ‌ترین کشور آفریقا و جهان عرب است و از شمال شرقی با تونس هم‌مرز است. به شرق توسط لیبی؛ به جنوب شرقی توسط نیجر؛ در جنوب غربی توسط مالی، موریتانی و صحرای غربی؛ به غرب توسط مراکش؛ و از شمال توسط دریای مدیترانه محدود می‌شود. این کشور از یک جغرافیای نیمه‌خشک برخوردار است و بیشتر جمعیت در شمال حاصلخیز زندگی می‌کنند و صحرا بر جغرافیای جنوب حاکم است. مساحت الجزایر ۲/۳۸ میلیون کیلومتر مربع و جمعیت آن ۴۲ میلیون نفر برآورد شده است (Fekih et al., 2022). پایتخت و بزرگ‌ترین شهر الجزیره است که در انتهای شمال و در ساحل مدیترانه واقع شده است.

کویرها بخش قابل توجهی (حدود ۸۵٪) از کل منطقه الجزایر را پوشش می‌دهند و عمدتاً با انواع و شکل‌های مختلف تپه‌های شنی اشغال شده‌اند. این تپه‌ها از پاکت‌های ماسه‌ای کوچک‌تر تا تپه‌های بسیار بزرگ به‌ویژه در قسمت جنوبی کشور متغیر هستند و آن‌ها را به یک منظره غالب در الجزایر تبدیل می‌کند. این محیط خشک و نیمه‌خشک الجزایر باعث می‌شود که غالباً در معرض شیوع گرد و غبار عمده باشد که به حمل و نقل ریزگردها، ماده ذره‌ای و سایر آلاینده‌های هوا در سراسر کشور کمک می‌کند (Bouallala et al., 2020; Mostefaoui et al., 2019). طوفان‌ها می‌توانند با انتقال ذرات موجود در هوا، کیفیت هوا را به شدت تحت تأثیر قرار دهند و از این‌رو، به‌طور کلی بر توزیع مکانی AOD کل کشور تأثیر می‌گذارند. آب و هوا که غالباً خشک است با آب و هوای ساحلی و کوهستانی منطقه‌ای منجر به انواع محیط‌زیست مانند جزایر مدیترانه‌ای، ساحلی و بیابانی می‌شود که منجر به اختلاف رطوبت نسبی و در نتیجه اختلاف در خواص نوری ریزگرد می‌شود.

## ۲-۲- داده‌های مورد استفاده

در پژوهش حاضر تلاش شد ابتدا مطالعه موردی از کشور ایران انتخاب شود. بنابراین با توجه به اعتبارسنجی

## فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (۳۳)

بازیابی عمق نوری ریزگردها با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ / ... ۲۷

است که به صورت رابطه (۲) محاسبه می شود.

$$\alpha = -\frac{\ln(\tau_a(\lambda_1)/\tau_a(\lambda_2))}{\ln(\lambda_1/\lambda_2)} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\beta = \frac{\tau_a(\lambda_1)}{\lambda_1^{-\alpha}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این مطالعه، از داده های AOD پردازش شده در سطح ۲،۰ برای تأیید بازیابی AOD استفاده می شود. میانگین اندازه گیری های AOD در  $30 \pm$  دقیقه از عبور Landsat-OLI استخراج می شود (Omari et al., 2019). اندازه گیری AOD از ایستگاه Tamanrasset\_INM در طول دوره مطالعه منظم نبود. برخی شکاف های زمانی در داده ها وجود داشت و داده های AERONET مربوط به تاریخ و زمان عبور Landsat-OLI وجود نداشت. به این منظور تصاویر مربوط به تاریخ های مذکور مورد بررسی قرار نگرفت.

جدول ۱: اطلاعات مربوط به ایستگاه AERONET مورد استفاده

نام	Tamanrasset_INM
موقعیت	تامراست، الجزایر
عرض جغرافیایی	22.79000° شمالی
طول جغرافیایی	5.53000° شرقی
ارتفاع	1377.0 متر
سایت تجهیزات Tamanrasset در پشت بام مرکز هواشناسی منطقه ای در Tamanrasset واقع شده است. این منطقه بدون فعالیت های صنعتی در ارتفاعات صحرای الجزایر قرار دارد. Tamanrasset-Assekrem یک ایستگاه WMO سازمان جهانی دیده بان جوی است.	

### ۲-۲-۲- داده های Landsat-8 OLI

سنجنده سری Landsat مجموعه ای از داده ها را با یک چرخه ۱۶ روزه تکرار مسیر زمینی ارائه می کند. Landsat TM دارای هفت باند طیفی است: شش باند مرئی (VIS) - مادون قرمز نزدیک (NIR) در ۳۰ متر و یک باند مادون قرمز

### ۲-۲-۱- AERONET

چندین ایستگاه AERONET در الجزایر نصب شده است. بیشتر این ایستگاه ها اطلاعات به روز و مداوم را ارائه نمی دهند و در حال حاضر در نواحی جنوبی تنها یک ایستگاه AERONET دارای اطلاعات مناسبی است. ایستگاه Tamanrasset\_INM بر اساس موقعیت مکانی آن (نشان داده شده در نگاره ۱) و در دسترس بودن داده های AOD تاریخی برای بازه زمانی در نظر گرفته شده (۲۰۱۶-۲۰۱۵) انتخاب شده است. AERONET شبکه ای از مجموعه نورسنج های خورشید است که اندازه گیری مداوم طولانی مدت را امکان پذیر می کند و مطالعه اولیه خصوصیات مختلف ریزگرد را در اختیار پژوهشگران قرار می دهد. سه سطح کیفیت داده های پردازش شده AERONET<sub>AOD</sub> وجود دارد. در سطح ۱،۰، ابرها حذف نمی شوند، در داده های سطح ۱،۵، ابرها حذف می شوند و در نهایت سطح ۲،۰ که ابرها حذف می شوند، و تضمین کیفیت داده ها ارائه شده است (Farahat & Abuelgasim, 2022; She et al., 2022).

اندازه گیری های نورسنج های خورشیدی بر اساس مشاهدات مستقیم به سمت خورشید (تابش مستقیم خورشید) در هشت باند طیفی (۳۴۰، ۳۸۰، ۴۴۰، ۵۰۰، ۶۷۰، ۸۷۰، ۹۴۰ و ۱۰۲۰ نانومتر) برای ارزیابی توزیع مکانی و تغییرات زمانی ستون کل AOD و توزیع ابعاد ریزگرد با هدف اعتبارسنجی بازیابی های ماهواره ای از خواص نوری ریزگرد است. برای محاسبه AOD در ۵۵۰ نانومتر، از مقادیر AOD در ۴۴۰ نانومتر، ۵۰۰ نانومتر و ۶۷۵ نانومتر مربوط به داده های AERONET استفاده می شود. به این منظور با کمک روش توان آنگستروم به مانند روابط زیر محاسبات صورت می گیرد.

$$\tau_a(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن  $\tau_a(\lambda)$  مقدار AOD در طول موج  $\lambda$  است،  $\lambda$  برابر مقدار طول موج،  $\beta$  ضریب کدورت<sup>۱</sup> و  $\alpha$  شاخص باند

جدول ۲: لیست باندهای طیفی Landsat 8 و مشخصات آنها (Omari et al., 2019)

کانال	باند Landsat-8 OLI (nms)	طول موج مرکزی (nms)	قدرت تفکیک مکانی (m)
Coastal/Aerosol	Band 1 (453-433)	443	30
Blue	Band 2 (515-450)	483	30
Green	Band 3 (600-525)	560	30
Red	Band 4 (680-630)	660	30
NIR	Band 5 (885-845)	865	30
SWIR 1	Band 6 (1660-1560)	1650	30
SWIR 2	Band 7 (2300-2100)	2220	30
Panchromatic	Band 8 (680-500)	640	15
Cirrus	Band 9 (1390-1360)	1375	30

شد (جدول ۳). مقادیر عدد دیجیتال (DN) با استفاده از ضرایب فاکتورهای مقیاس‌بندی موجود در فایل ابر داده Landsat-8 OLI به بازتاب TOA تبدیل شد. مقادیر DN داده‌های Landsat 8 OLI را می‌توان با استفاده از ضرایب فاکتورهای مقیاس مجدد بازتاب (روابط ۴ و ۵) به بازتاب طیفی TOA تبدیل کرد:

$$\rho_{\lambda} = MQ_{cal} + A \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\rho^* = \frac{\rho_{\lambda}}{\cos(\theta_{SZ})} = \frac{\rho_{\lambda}}{\sin(\theta_{SE})} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن  $\rho_{\lambda}$  بازتاب TOA بدون اصلاح برای زاویه خورشیدی است،  $Q_{cal}$  مقدار DN استاندارد کمی شده و کالیبره شده است،  $M$  ضریب مقیاس‌بندی مجدد ضربی مختص هر باند،  $A$  ضریب مقیاس‌بندی مجدد جمعی مختص هر باند،  $\theta_{SZ}$  زاویه نقطه اوج خورشیدی محلی<sup>۱</sup>،  $\theta_{SE}$  زاویه ارتفاع خورشید محلی<sup>۲</sup> و  $\rho^*$  بازتاب TOA است (Sun et al., 2016).

حرارتی در ۱۲۰ متر. Landsat OLI دارای ۱۱ باند طیفی است: شش باند VIS-NIR در ۳۰ متر، دو باند مادون قرمز حرارتی در ۱۰۰ متر، یک باند پانکروماتیک در ۱۵ متر، و دو باند (ساحلی و سیروس) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر. در این مطالعه، داده‌ها به دو سال تقسیم می‌شوند و تایل مورد استفاده ۴۴/۱۹۲ است. Landsat TM تا سال ۲۰۱۱ کار کرد و Landsat OLI در سال ۲۰۱۳ شروع به کار کرد (Chen et al., 2020).

بهبودهای بیشتر در Landsat-8 OLI شامل افزایش قدرت تفکیک رادیومتریکی از ۸ به ۱۲ بیت، ارتقاء نسبت سیگنال به نویز و توابع پاسخ طیفی به‌ویژه برای باند مادون قرمز نزدیک است (Pahlevan & Schott, 2013; Irons et al., 2012). جزئیات بیشتر در مورد ویژگی‌های Landsat-8 OLI در جدول ۲ نشان داده شده است. سیاست داده‌های جدید اجرا شده توسط ناسا و سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) به کاربران داده‌های سنجش از راه دور دسترسی رایگان به داده‌های لندست را امکان‌پذیر می‌کند (Omari et al., 2019). در این مطالعه، ۲۳ صحنه بدون ابر Landsat-8/OLI سطح L1G تصحیح شده TOA از مرکز مشاهدات و علوم منابع زمین USGS (EROS) از ژانویه ۲۰۱۵ تا دسامبر ۲۰۱۶ که در منطقه مورد مطالعه ما به‌دست آمد، دانلود

1- Digital Number

2- Local solar zenith angle

3- Local sun elevation angle

استفاده از آن بر روی اهداف روشن، عدم قطعیت‌های قابل توجهی ایجاد می‌کند. بر روی سطح زمین مانند مناطق بیابانی، خشک، نیمه‌خشک و شهری، مطالعات بسیاری نشان داد که به‌کارگیری از باند DB می‌تواند بر این محدودیت غلبه کند. علاوه بر این، تلاش‌هایی برای توسعه روش‌هایی برای بازیابی AOD با قدرت تفکیک بالاتر از حسگرهای با قدرت تفکیک مکانی متوسط و بالا از جمله داده‌های Landsat، MODIS و GF-1 انجام شده است. سهم LSR در این روش‌ها عمدتاً مبتنی بر استفاده از محصولات موجود MODIS با قدرت تفکیک ۵۰۰ متر یا براساس ایجاد یک پایگاه داده تاریخی از داده‌های LSR بایگانی شده لندست با قدرت تفکیک ۳۰ متر است (Omari et al., 2019).

Wei و همکاران (۲۰۱۷) فرض می‌کنند که تغییرات LSR به‌طور ماهانه بر روی مناطق روشن (در سطوح پیچیده شهری) محدود هستند. از طرفی Omari و همکاران (۲۰۱۹) با ایده مشابه فرض می‌کنند که تغییرات LSR به‌طور سالانه بر روی مناطق روشن (نواحی خشک و بیابانی مانند: امارات متحده عربی) محدود هستند. برای بازیابی AOD با قدرت تفکیک بالا از تصاویر Landsat-8/OLI از یک LSR از پیش محاسبه شده استفاده کردند. روش آن‌ها فرض می‌کند که LSR در طی یک سال نسبتاً ثابت است و سهم LSR در آن بازیابی AOD با استفاده از Landsat-8 به‌دست آمده در آن سال براساس پیکسل ساخته می‌شود. مقدار پیکسل مطابق با حداقل از تمام LSR تاریخی از همان پیکسل به‌دست آمده در آن سال خاص طی دوره ۲۰۱۷-۲۰۱۶ است. از طرفی این مطالعه روش فوق را با استفاده از داده‌های به دست آمده برای دوره ۲۰۱۶-۲۰۱۵ در منطقه مورد مطالعه با در نظر گرفتن تغییرات LSR به‌طور ماهانه بررسی می‌کند. نگاره شماره ۲، LSR را در باند آبی در منطقه مورد مطالعه در شش تاریخ نشان می‌دهد که سال ۲۰۱۵ را پوشش می‌دهد (سال ۲۰۱۵ به‌عنوان نمونه انتخاب شد و رفتار مشابه در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ مشاهده شد). LSR از LEDAPS<sup>۱</sup> که

جدول ۳: اطلاعات زمانی مربوط به تصاویر Landsat 8 مورد

استفاده در این پژوهش

2015/01/13	2015/01/29
2015/04/03	2015/04/19
2015/05/05	2015/05/21
2015/06/06	2015/06/22
2015/08/09	2015/08/25
2015/11/13	2015/11/29
2015/12/15	2015/12/31
2016/02/17	2016/03/04
2016/04/05	2016/04/21
2016/05/23	2016/07/10
2016/10/30	2016/11/15
2016/12/01	

### ۳- روش‌شناسی

#### ۳-۱- تعیین بازتاب سطح زمین

مانع اصلی در بازیابی AOD با استفاده از داده‌های سنجش از دور نوری، تعیین دقیق مقادیر LSR است (Omari et al., 2019). برای بهبود تخمین بازتاب سطح روی سطوح پیچیده، تلاش‌های گسترده‌ای انجام شده است و دو طرح معمول برای انواع سطوح زمین با توجه به ویژگی‌های متنوع آن‌ها پیشنهاد شده است. سطوح زمین به دو دسته مختلف تقسیم می‌شوند: (۱) مناطق با پوشش گیاهی بالا، که LSR را می‌توان با سهولت بیشتری تخمین زد، و (۲) مناطق روشن، که عمدتاً شامل شهری، بیابانی، زمین‌های بایر و خشک/نیمه خشک با پوشش گیاهی کم یا تنک است؛ برآورد دقیق بازتاب در این مناطق دشوارتر است (Wei et al., 2017).

در مناطق پوشش گیاهی، روابط تجربی بین LSR باندهای طیفی مختلف معمولاً برای تخمین سهم LSR در باندهای خاص مورد استفاده برای بازیابی AOD به‌کار برده می‌شود. این روش، به‌ویژه از رابطه بین باندهای SWIR (کمتر تحت تأثیر بارگذاری ریزگرد) و باندهای قرمز و آبی (به‌شدت تحت تأثیر AOD در جو) استفاده می‌کند. چنین رویکردی فقط بر روی اهداف با مقادیر کم LSR اعمال می‌شود و

جایی که  $l$  تصویر مصنوعی را نشان می‌دهد.  $l_1, l_2, \dots$  و  $l_k$  تصاویر مختلف بازتاب سطح لندست ۸ را در یک ماه معین نشان می‌دهند.  $i$  و  $j$  به ترتیب نشان‌دهنده سطر و ستون در یک تصویر هستند.

### ۳-۲- جدول جستجو (LUT)

روش بازیابی AOD توسعه یافته در این مطالعه براساس یک LUT ساخته شده با استفاده از مدل انتقال تابشی 6S است. مزیت استفاده از مدل 6S توانایی آن در تخمین اجزای مستقیم و پراکندگی با استفاده از تعداد محدودی ورودی برای هر باند طیفی در کل حوزه خورشیدی است. مدل انتقال تابشی، بازتاب TOA را با استفاده از پراکندگی اتمسفری تابش خورشیدی و LSR شبیه‌سازی می‌کند. با فرض یک سطح همگن لامبرتین در زیر صفحه موازی، بازتاب TOA را می‌توان به صورت رابطه (۷) توصیف کرد:

$$\rho_{TOA}(\mu_s, \mu_v, \varphi, \lambda) = \rho_0(\mu_s, \mu_v, \varphi, \lambda) + \frac{\tau(\mu_s)\tau(\mu_v)\rho_s(\mu_s, \mu_v, \varphi, \lambda)}{(1 - S(\lambda)\rho_s(\mu_s, \mu_v, \varphi, \lambda))} \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در این رابطه  $\rho_{TOA}(\mu_s, \mu_v, \varphi, \lambda)$  بازتاب TOA است،  $\rho_0(\mu_s, \mu_v, \varphi, \lambda)$  بازتاب جو (ریزگرد و Rayleigh) است.  $\tau(\mu_s)$  انتقال جوی در جهت خورشید و  $\tau(\mu_v)$  انتقال جو در جهت سنجنده است.  $\mu_s$  و  $\mu_v$  کسینوس زوایای اوج (زینتی) خورشید و سنجنده هستند و  $\rho_s(\mu_s, \mu_v, \varphi, \lambda)$  بازتاب سطحی است.

تأثیر زاویه مشاهده محدود است زیرا داده‌های Landsat معمولاً با زاویه دید ثابت به دست می‌آیند. بازتاب سطح را می‌توان از پایگاه داده LSR از پیش محاسبه شده تخمین زد. مطالعات قبلی پراکندگی Rayleigh را به عنوان تابعی از فشار اتمسفر یا ارتفاع مرتبط می‌دانند (Omari et al., 2019). دقت بازیابی AOD هنوز به استفاده از مدل ریزگرد مناسب بستگی دارد. محبوب‌ترین مدل‌های ریزگرد شامل شهری،

با استفاده از شبیه‌سازی دوم سیگنال ماهواره‌ای در مدل انتقال تابشی طیف خورشیدی (معروف به 6S) تخمین زده شد، به دست آمد. دقت تصحیح جوی LEDAPS در مقایسه با بازتاب مشتق شده AERONET در محیط مشابه، ۰/۰۵ برآورد شده است (Wei et al., 2017). محدودیت‌ها شامل استفاده از AOD ثابت براساس پارامتر دید است. تأثیر استفاده از LEPADS به عنوان LSR ناچیز است زیرا بازتاب از پیش محاسبه شده استفاده شده با حداقل بارگذاری AOD در سطح پیکسل مطابقت دارد (Omari et al., 2019).

همچنین نگاره شماره ۲ نشان می‌دهد که LSR در سطح شهر و مناطق اطراف آن بالاتر است و مقادیر بیش از ۰/۲ دارد و در سمت شرق تصاویر مقادیر کم‌تری را دارا هستند. علاوه بر این، نشان می‌دهد که LSR در هر ماه نسبتاً ثابت است. انتظار می‌رود که این نتایج به‌ویژه به دلیل وجود محیط خشک و کم بودن پوشش گیاهی، به‌ویژه در منطقه مورد مطالعه تغییر نکنند. بعلاوه، این امر به‌ویژه از آنجایی است که پوشش گیاهی به‌طور کلی عامل محرک تغییر سطح زمین در نظر گرفته می‌شود. در چنین محیط‌های اراضی، تأثیر BRDF کاهش می‌یابد زیرا پوشش گیاهی یکی از اصلی‌ترین عوامل مؤثر بر LSR است. در مطالعه حاضر، از تکنیک حداقل بازتاب ماهانه برای بازیابی AOD در این منطقه استفاده شده است. در نتیجه، تصاویر ساخته شده LSRها در ماه‌های مختلف سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ در فرآیند بازیابی مورد استفاده قرار گرفتند. فرآیند انتخاب LSRهای مرجع ابتدا براساس انتخاب تصاویر آسمان صاف بود. تصاویر دارای مه/ابر رد شدند. سپس تصاویر انتخاب شده برای ساخت تصاویر مصنوعی مورد استفاده قرار گرفتند که در آن هر پیکسل با کمترین بازتاب سطحی تمام تصاویر انتخابی ماهانه مطابقت دارد تا پیکسل LSR برای ماه مربوطه باشد (رابطه ۶).

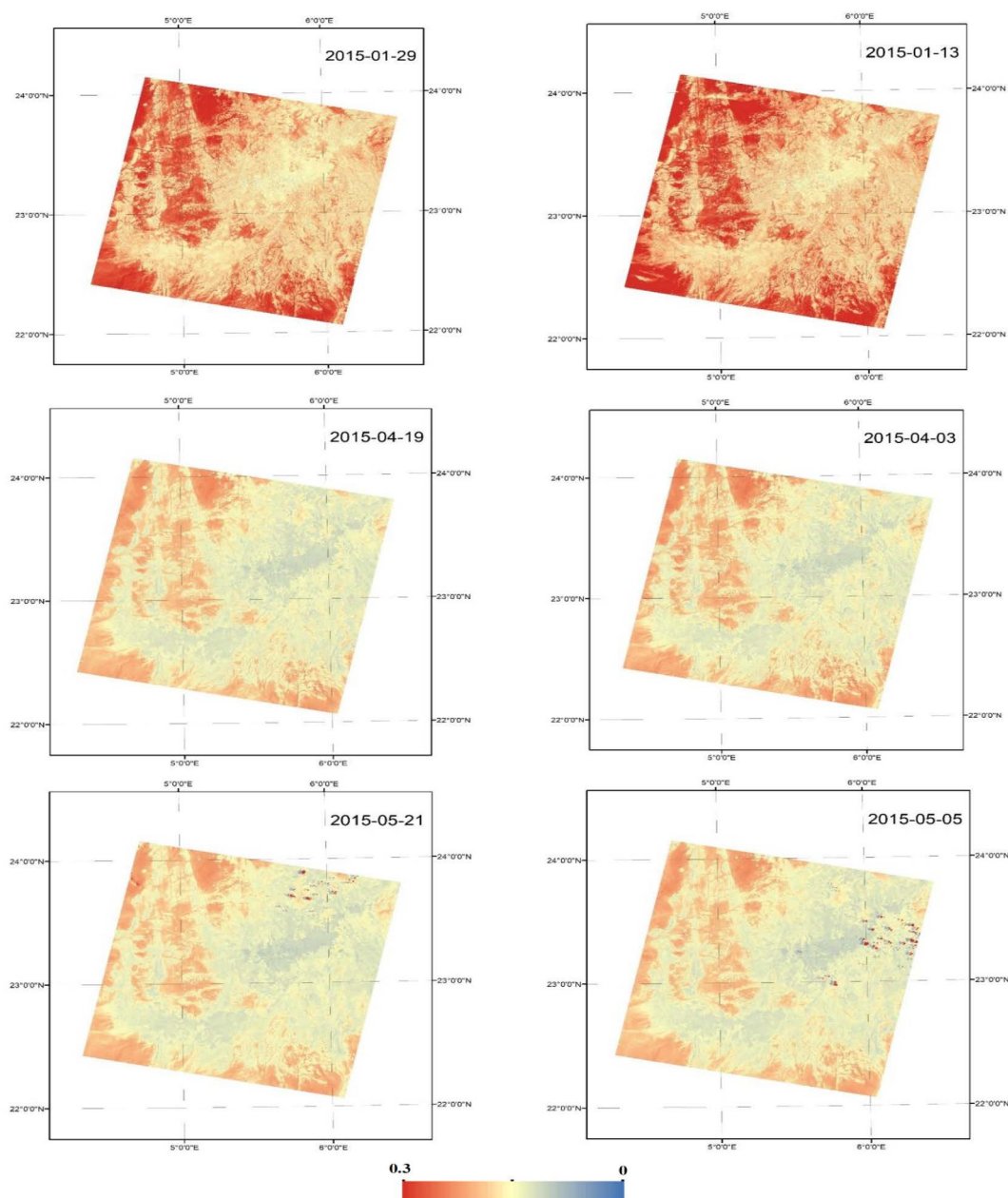
$$l(i, j) = \text{Second\_Min}(l_1(i, j), l_2(i, j), \dots, l_k(i, j)) \quad \text{رابطه (۶)}$$

## فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی ( )

بازیابی عمق نوری ریزگردها با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ ... / ۳۱

داد که خواص ریزگرد عمدتاً بین نوع استاندارد شهری و قاره‌ای با ارجاع به داده‌های AERONET مشابه است (Sun *et al.*, 2016). در این مطالعه، داده‌های Landsat-8 OLI با دقت انتخاب شدند تا از تأثیر طوفان‌های گرد و غبار جلوگیری شود. سپس LUT با استفاده از مدل انتقال تابشی 6S ساخته شد. پارامترهای ورودی شامل هندسه مشاهده، پارامترهای ریزگرد و دامنه‌های آنها در جدول ۴ نشان داده شده است.

قاره‌ای، بیابانی و سوزاندن زیست توده است. در اینجا، تنوع مکانی نوع ریزگرد ضعیف در نظر گرفته شده است و یک مدل قاره‌ای انتخاب شد، زیرا براساس ترکیبی از اجزای مختلف مانند غبار و اقیانوسی است و انتظار می‌رود در فصول مختلف یکسان باشد. ریزگردهای قاره‌ای بر این منطقه و مناطق مشابه مانند شمال آفریقا و آسیای مرکزی تسلط دارند (Wei *et al.*, 2018). تجزیه و تحلیل قبلی نشان



نگاره ۲: بازتاب سطح زمین Landsat-8 OLI از باند آبی در ۶ تاریخ برای سال ۲۰۱۵ در منطقه تامراست

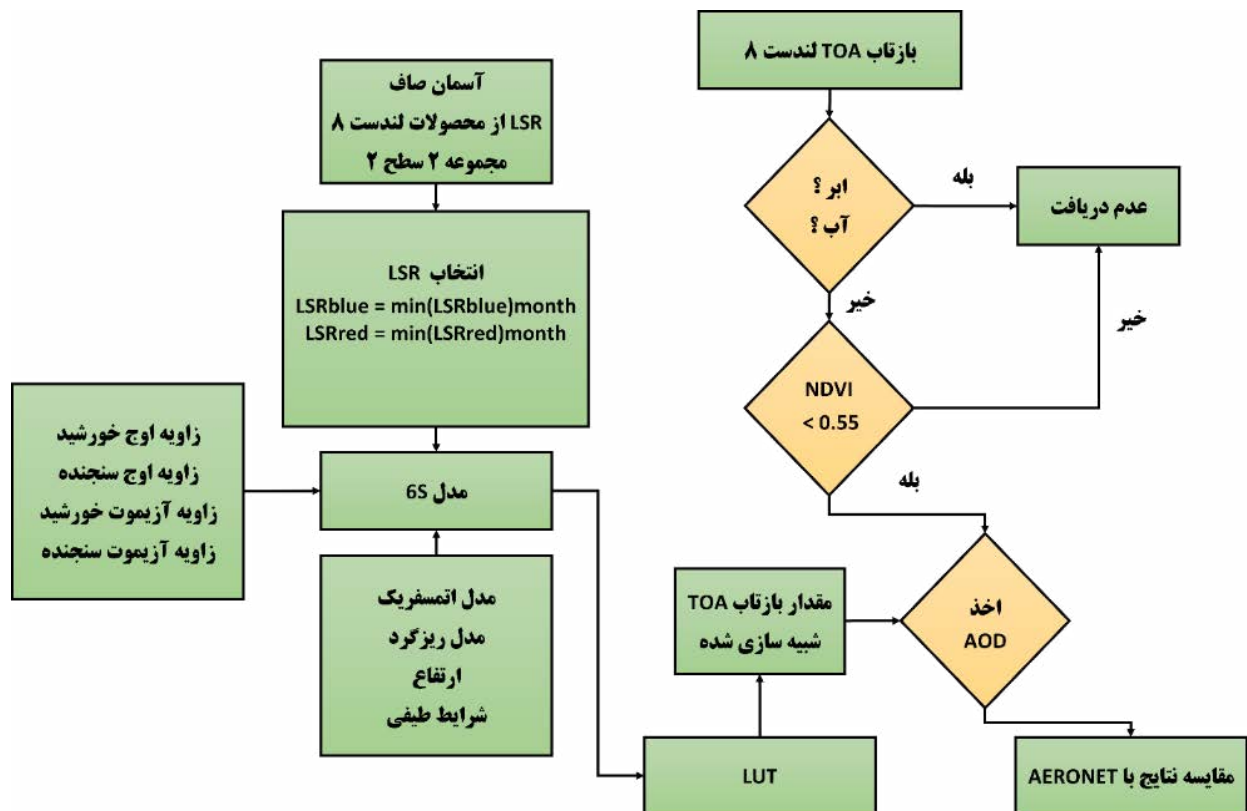
خورشید و سنسور از ۰ تا ۷۰ درجه با گام ۵ درجه و دامنه زاویه‌های آزیموت ۰ تا ۱۸۰ درجه با گام ۱۲ درجه است. با استفاده از این پارامترها، معادله انتقال تابش در حالت رو به جلو اجرا شد تا بازتاب TOA به دست آید. ترکیب متفاوت پارامترهای ورودی و بازتاب TOA خروجی در LUT ذخیره می‌شود.

بازیابی AOD براساس مقایسه بین TOAهای برآورد شده با مدل و موارد مشاهده شده با استفاده از رویکرد بهترین برازش است. با استفاده از چنین رویکردی، AODهای تخمین زده شده مطابق با مورد استفاده شده در تولید TOAهای شبیه‌سازی شده است که با استفاده از یک تابع شایستگی که فاصله را به حداقل می‌رساند، بهترین تناسب را با موارد مشاهده شده دارد (Omari et al., 2019). استراتژی مدل وارونگی برای بازیابی AOD در نمودار نگاره ۳ تشریح شده است.

جدول ۴: مقادیر ورودی برای ساخت LUT

محدوده	پارامترهای ورودی
70 ... 10, 5, 0	زوایای زنیت خورشید و سنسور
180 ... 24, 12, 0	زاویه آزیموت نسبی
0.4, 0.3, 0.2, 0.15, 0.1, 0.05, 0.0	عمق نوری ریزگرد
1.5, 1.2, 1.0, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5	مدل جوی
Mid-latitude summer/winter	مدل جوی
0.3, 0.25, 0.2, 0.15, 0.1, 0.05, 0.0	بازتاب سطح

سایر پارامترهای جوی مانند ازن، دی‌اکسید کربن، مونوکسید کربن و بخار آب به‌عنوان پیش فرض در نظر گرفته شده، زیرا اثرات آنها در بازیابی AOD با استفاده از باند آبی نسبتاً ضعیف است. همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، مطابق مطالعات قبلی (Omari et al., 2019) مقادیر AOD مورد استفاده در ساخت LUT به صورت زیر تنظیم شده‌اند: ۰,۰، ۰,۰۵، ۰,۱، ۰,۵، ۱,۰، ۱,۵، ۲,۰، ۳,۰، ۴,۰، ۵,۰، ۶,۰، ۷,۰، ۸,۰، ۹,۰، ۱,۰، ۱,۲ و ۱,۵. دامنه زوایای زنیت



نگاره ۳: نمایش نمودار روش شناسی فرآیند بازیابی AOD

#### ۴- نتایج و بحث‌ها

نتایج رگرسیون مشاهدات (نگاره ۴) نیز به شرح زیر است. همانطور که مشاهده می‌شود میزان ضریب همبستگی حدود ۸۴ درصد است که نشان از برازش مناسب مدل بر روی داده‌های تحقیق بوده و توانایی بالای مدل را نمایش می‌دهد.

در جدول ۵ مقایسه نتایج به‌دست آمده از تصاویر لندست ۸ و مقادیر مشاهده شده ایستگاه‌های AERONET مشاهده می‌شود. AODهای بازیابی شده در ۵۵۰ نانومتر در یک پنجره ۵ در ۵ پیکسلی در اطراف سایت AERONET به‌طور میانگین محاسبه شدند. مقادیر AERONET در نظر گرفته شده میانگین تمام اندازه‌گیری‌های انجام شده در  $\pm 30$  دقیقه از زمان ثبت تصویر است.

جدول ۶: نتایج رگرسیون مشاهدات

آمار رگرسیون	
0.8422	Multiple R
0.7093	R Square
0.6955	Adjusted R Square
0.1068	Standard Error
23	Observations

جدول ۵: مقایسه نتایج AOD به‌دست آمده از تصاویر لندست

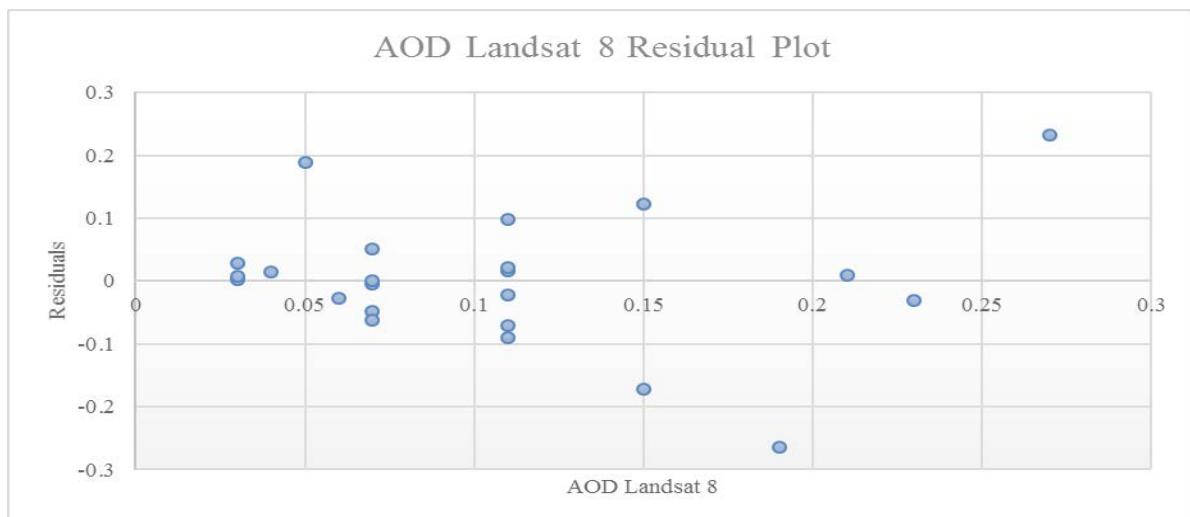
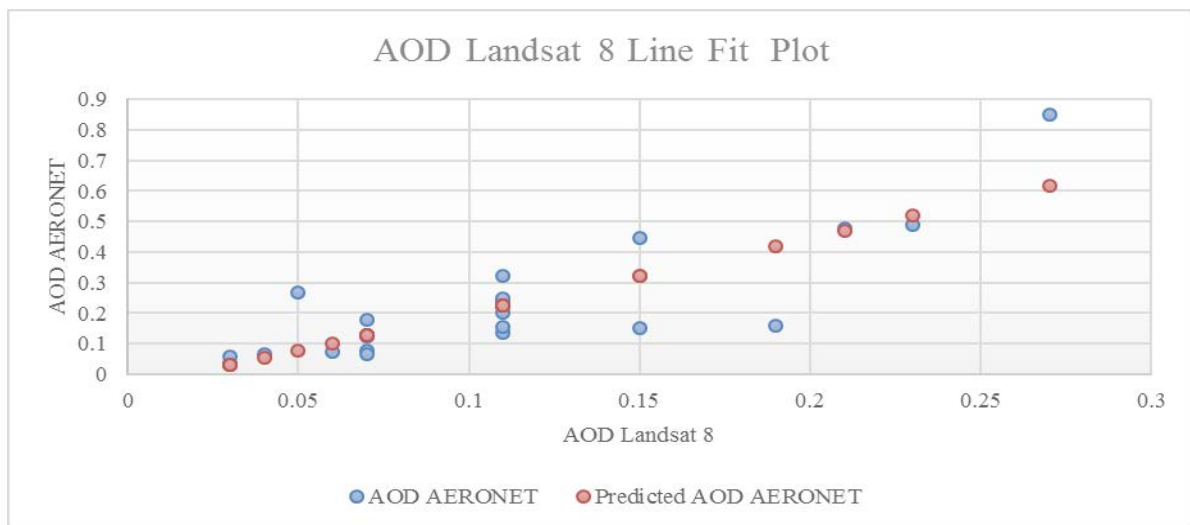
#### ۸ و ایستگاه‌های AERONET

مقادیر AOD ایستگاه‌های AERONET	مقدار AOD لندست ۸	تاریخ
0.0313	0.03	13/01/2015
0.0786	0.07	29/01/2015
0.0750	0.06	03/04/2015
0.1782	0.07	19/04/2015
0.3235	0.11	05/05/2015
0.4788	0.21	21/05/2015
0.4461	0.15	06/06/2015
0.4890	0.23	22/06/2015
0.2671	0.05	09/08/2015
0.1572	0.19	25/08/2015
0.1349	0.11	13/11/2015
0.0645	0.07	29/11/2015
0.0675	0.04	15/12/2015
0.0363	0.03	31/12/2015
0.2414	0.11	17/02/2016
0.1226	0.07	04/03/2016
0.1274	0.07	05/04/2016
0.1518	0.15	21/04/2016
0.8493	0.27	23/05/2016
0.2473	0.11	10/07/2016
0.1538	0.11	30/10/2016
0.2032	0.11	15/11/2016
0.0583	0.03	01/12/2016

ضریب همبستگی (Multiple R) ارائه شده در جدول ۶ نزدیک به عدد  $0.84$  است که همبستگی بالای بین داده‌ها را نشان می‌دهد. ضریب دترمینان (R Square) ارائه شده نشان از مناسب بودن مدل برازش شده دارد. به‌عبارت دیگر نشان‌دهنده تعداد نقاطی هست که روی خطی رگرسیون قرار می‌گیرند.  $R^2$  جمع مربعات انحرافات داده‌ها از میانگین داده‌ها است. در جدول ۶ مقدار  $R^2$  برابر با  $0.709$  است. این یعنی که  $70.9\%$  درصد داده‌ها در این مدل رگرسیون، قرار می‌گیرند. به‌عبارتی  $70.9\%$  درصد متغیرهای وابسته توسط متغیرهای مستقل، تعریف می‌شوند.

خطای استاندارد<sup>۱</sup> هم یک شاخص برای نمایش خوبی برازش مدل به روی داده‌ها و نشان‌دهنده دقت آنالیز است. این شاخص، هر چقدر کوچک‌تر باشد، دقت معادله مدل رگرسیون بالاتر خواهد بود.  $R^2$  درصد اختلاف متغیرهای وابسته که توسط مدل برازش می‌شوند را نشان می‌دهد و خطای استاندارد، مقداری است که میانگین فاصله بین نقاط از خط رگرسیون را نشان می‌دهد. با توجه به کوچک بودن این مقدار مجدداً نشان از مناسب بودن مدل برازش شده است.

1- Standard Error



نگاره ۴: مقایسه بین AOD بازیابی شده در Landsat-8 OLI در برابر AOD AERONET در Tamanrasset\_INM، تامنراست، الجزایر برای دوره ۲۰۱۵-۲۰۱۶

در کل ماه استفاده کرد. علاوه بر این، استفاده از LSR از همان سنسور از نظر تئوریک باید نتایج دقیق‌تری را ارائه دهد از آنجا که زمان و زاویه مشاهده یکسان هستند. شایان ذکر است که داده‌های مورد استفاده در بازیابی در این مطالعه، قبل از استفاده از آن‌ها در فرآیند بازیابی، چندین پردازش پیش انتخاب را طی کردند. پوشش ممکن/مه یکی از آن‌ها بود. فقط داده‌های آسمان صاف نگهداری شد. تأثیر مه در این مطالعه مورد بررسی قرار نگرفت. بنابراین، تصاویر آسمان صاف انتخاب شده واقعاً از تأثیر بارگذاری

این مطالعه بازیابی قوی AOD را در برابر داده‌های AERONET با مقدار  $R^2$  بیش از ۷۰٪ نشان می‌دهد. اختلافات را می‌توان به تعداد محدودی از نقاط و یا فرضیات مربوط به مدل ریزگرد مورد استفاده در این مطالعه نسبت داد. فرض استفاده از LSR از قبل محاسبه شده، دقت این روش را محدود نمی‌کند زیرا نشان داده شد که در شرایط خشک که تغییر در پوشش زمین در ماه‌های مختلف سال ناچیز است، می‌توان از یک تصویر LSR از پیش محاسبه شده به نمایندگی از سهم بازتاب سطح در مدل انتقال تابش

### منابع و مأخذ

۱- ارجمند، راشکی، سرگزی؛ مریم، علیرضا، حسین. (۱۳۹۷). پایش زمانی و مکانی پدیده گرد و غبار با استفاده از داده های ماهواره ای در جنوب شرق ایران، با تأکید بر منطقه جازموریان. فصلنامه علمی- پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر»، ۲۷(۱۰۶)، ۱۵۳-۱۶۸. doi: 10.22131/sepehr.2018.32339

۲- جهانی چهره برق، آخوندزاده هنزائی؛ فاطمه، مهدی. (۱۳۹۶). تخمین ضخامت نوری هواویزها بر روی منطقه ای از ایران با استفاده از تلفیق تصاویر سنجنده های MODIS سکوه ای ماهواره ای TERRA و AQUA. فصلنامه علمی- پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر»، ۲۶(۱۰۳)، ۷۱-۸۱. doi: 10.22131/sepehr.2017.28894

3- Achour, L., Bouharkat, M., Assas, O., & Behar, O. (2017). Hybrid model for estimating monthly global solar radiation for the Southern of Algeria:(Case study: Tamanrasset, Algeria). *Energy*, 135, 526-539.

4- Benhadji Serradj, D. E., Sebitosi, A. B., & Fadlallah, S. O. (2022). Design and performance analysis of a parabolic trough power plant under the climatological conditions of Tamanrasset, Algeria. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(4), 3359-3376.

5- Bilal, M., Nichol, J. E., Bleiweiss, M. P., & Dubois, D. (2013). A Simplified high resolution MODIS Aerosol Retrieval Algorithm (SARA) for use over mixed surfaces. *Remote sensing of environment*, 136, 135-145.

6- Bouallala, M. H., Neffar, S., & Chenchouni, H. (2020). Vegetation traits are accurate indicators of how do plants beat the heat in drylands: Diversity and functional traits of vegetation associated with water towers in the Sahara Desert. *Ecological Indicators*, 114, 106364.

7- Chen, X., Ding, J., Wang, J., Ge, X., Raxidin, M., Liang, J., ... & Ding, Y. (2020). Retrieval of fine-resolution aerosol optical depth (AOD) in semiarid urban areas using Landsat data: A case study in Urumqi, NW China. *Remote Sensing*, 12(3), 467.

8- Chudnovsky, A. A. (2021). Monitoring Air Pollution in the Urban Environment by Remote Sensing. *Urban*

ریزگرد اتمسفری رنج نمی برند. همچنین تمام مقادیر امتیاز به دست آمده کمتر از ۱,۰ هستند. با این وجود، رویکرد استفاده از Landsat-8 برای بازیابی AOD هنوز برای اهداف روشن مانند سطوح شهری مانند شهر تامنراست مناسب است.

### ۵- نتیجه گیری

بازیابی AOD در قدرت تفکیک مکانی بالا، در مقایسه با محصولات AOD ۱۰ کیلومتری، یک موضوع فعال پژوهشی است. در این پژوهش، AOD مشتق شده از ماهواره با قدرت تفکیک بالا در مقیاس شهری در شهر تامنراست، الجزایر تولید شده است.

روش توسعه یافته فرض می کند که تغییر پوشش زمین حداقل است و تغییر زمانی در LSR قابل توجه نیست. یک تصویر LSR از پیش محاسبه شده برای نشان دادن بازتاب سطح در فرآیند بازیابی ایجاد شده است. براساس مدل انتقال تابشی 6S، یک LUT برای شبیه سازی بازتاب TOA از LSRهای ساخته شده و مجموعه ای از پارامترهای هندسی و جوی ساخته شد. AODهای بازیابی شده با داده های زمینی AERONET مقایسه شدند.

نتایج نشان می دهد که این رویکرد می تواند به دقت معقولی در بازیابی AOD دست یابد که به حدود ۷۰/۹ درصد در  $R^2$  می رسد. علاوه بر این، این رویکرد برای تخمین AOD در مناطق شهری در مقایسه با محصولات AOD موجود با قدرت تفکیک مکانی پایین مناسب است. نتایج این تحقیق نسبت به نتایج تحقیق Omari و همکاران (۲۰۱۹) بهبود ۴ درصدی را نشان می دهد. نتایج آنها نشان داد که می توان به دقت معقولی در بازیابی AOD رسید که در  $R^2$  حدود ۶۷٪ است. نتایج این تحقیق نشان داد چشم پوشی از تغییرات ماهانه در مقادیر LSR منجر به نتایج مناسبی در بازیابی AOD می شود.

- retrieval over land. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D13).
- 18- Lin, H., Li, S., Xing, J., He, T., Yang, J., & Wang, Q. (2021). High resolution aerosol optical depth retrieval over urban areas from Landsat-8 OLI images. *Atmospheric Environment*, 261, 118591.
- 19- Mostefaoui, M., Ziane, A., Bouraiou, A., & Khelifi, S. (2019). Effect of sand dust accumulation on photovoltaic performance in the Saharan environment: southern Algeria (Adrar). *Environmental Science and Pollution Research*, 26(1), 259-268.
- 20- Omari, K., Abuelgasim, A., & Alhebsi, K. (2019). Aerosol optical depth retrieval over the city of Abu Dhabi, United Arab Emirates (UAE) using Landsat-8 OLI images. *Atmospheric Pollution Research*, 10(4), 1075-1083.
- 21- Pahlevan, N., & Schott, J. R. (2013). Leveraging EO-1 to evaluate capability of new generation of Landsat sensors for coastal/inland water studies. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(2), 360-374.
- 22- Pope III, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., & Thurston, G. D. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Jama*, 287(9), 1132-1141.
- 23- Riffler, M., Popp, C., Hauser, A., Fontana, F., & Wunderle, S. (2010). Validation of a modified AVHRR aerosol optical depth retrieval algorithm over Central Europe. *Atmospheric Measurement Techniques*, 3(5), 1255-1270.
- 24- Sayer, A. M., Smirnov, A., Hsu, N. C., Munchak, L. A., & Holben, B. N. (2012). Estimating marine aerosol particle volume and number from Maritime Aerosol Network data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(18), 8889-8909.
- 25- She, L., Zhang, H. K., Bu, Z., Shi, Y., Yang, L., & Zhao, J. (2022). A Deep-Neural-Network-Based Aerosol Optical Depth (AOD) Retrieval from Landsat-8 Top of Atmosphere Data. *Remote Sensing*, 14(6), 1411.
- 26- Sun, L., Wei, J., Bilal, M., Tian, X., Jia, C., Guo, Y., & Mi, X. (2016). Aerosol optical depth retrieval Remote Sensing: Monitoring, Synthesis, and Modeling in the Urban Environment, 391-422.
- 9- Farahat, A., & Abuelgasim, A. (2022). Effect of cloud seeding on aerosol properties and particulate matter variability in the United Arab Emirates. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(2), 951-968.
- 10- Fekih, A., Abdelouahab, M., & Marif, Y. (2022). Evaluation of wind resource and mapping during 2009–2018 based on ERA5 reanalysis data: a case study over Algeria. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 1-20.
- 11- Hagolle, O., Huc, M., Villa Pascual, D., & Dedieu, G. (2015). A multi-temporal and multi-spectral method to estimate aerosol optical thickness over land, for the atmospheric correction of FormoSat-2, LandSat, VENμS and Sentinel-2 images. *Remote Sensing*, 7(3), 2668-2691.
- 12- Irons, J. R., Dwyer, J. L., & Barsi, J. A. (2012). The next Landsat satellite: The Landsat data continuity mission. *Remote Sensing of Environment*, 122, 11-21.
- 13- Jin, Y., Hao, Z., Chen, J., He, D., Tian, Q., Mao, Z., & Pan, D. (2021). Retrieval of Urban Aerosol Optical Depth from Landsat 8 OLI in Nanjing, China. *Remote Sensing*, 13(3), 415.
- 14- Kaufman, Y. J., & Remer, L. A. (1994). Detection of forests using mid-IR reflectance: an application for aerosol studies. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 32(3), 672-683.
- 15- Kaufman, Y. J., Tanré, D., Remer, L. A., Vermote, E. F., Chu, A., & Holben, B. N. (1997). Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 17051-17067.
- 16- Levy, R. C., Mattoo, S., Munchak, L. A., Remer, L. A., Sayer, A. M., Patadia, F., & Hsu, N. C. (2013). The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(11), 2989-3034.
- 17- Levy, R. C., Remer, L. A., & Dubovik, O. (2007). Global aerosol optical properties and application to Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer aerosol

production in China. Science of The Total Environment, 720, 137567.

over bright areas using Landsat 8 OLI images. Remote Sensing, 8(1), 23.

27- Takilalte, A., Harrouni, S., & Mora, J. (2022). Forecasting global solar irradiance for various resolutions using time series models-case study: Algeria. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 44(1), 1-20.

28- Tang, Y., Deng, R., Li, J., Liang, Y., Xiong, L., Liu, Y., ... & Hua, Z. (2021). Estimation of Ultrahigh Resolution PM<sub>2.5</sub> Mass Concentrations Based on Mie Scattering Theory by Using Landsat8 OLI Images over Pearl River Delta. Remote Sensing, 13(13), 2463.

29- Tian, X., Liu, S., Sun, L., & Liu, Q. (2018). Retrieval of aerosol optical depth in the arid or semiarid region of northern Xinjiang, China. Remote Sensing, 10(2), 197.

30- Wei, J., & Sun, L. (2016). Comparison and evaluation of different MODIS aerosol optical depth products over the Beijing-Tianjin-Hebei region in China. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 10(3), 835-844.

31- Wei, J., Huang, B., Sun, L., Zhang, Z., Wang, L., & Bilal, M. (2017). A simple and universal aerosol retrieval algorithm for Landsat series images over complex surfaces. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 122(24), 13-338.

32- Wei, J., Sun, L., Peng, Y., Wang, L., Zhang, Z., Bilal, M., & Ma, Y. (2018). An improved high-spatial-resolution aerosol retrieval algorithm for MODIS images over land. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123(21), 12-291.

33- Zhao, J., Kong, X., He, K., Xu, H., & Mu, J. (2020). Assessment of the radiation effect of aerosols on maize

---

## COPYRIGHTS

©2024 by the authors. Published by National Geographical Organization. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons [Attribution-NoDerivs 3.0 Unported \(CC BY-ND 3.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/)

---



