

توزیع زمانی-مکانی ذرات معلق ($PM_{2.5}$) با رویکرد محیط‌زیست در غرب و جنوب

ایران بر مبنای سنجنده‌های SeaWifs، MISR و MODIS

محمود احمدی^{۱*} و عباسعلی داداشی رودباری^۲

۱. دانشیار، آب و هواشناسی، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین، تهران، ایران.

۲. دانشجوی دکتری آب و هواشناسی شهری، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین، تهران، ایران

dadashiabbasali@gmail.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۱۵

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۰۲

چکیده

ذرات معلق موجود در جو، نقش چشمگیری در سامانه آب‌وهوا و سلامت عمومی دارند. اهمیت ذرات معلق، توجه بسیاری به توسعه روش‌هایی برای برآورد ذرات معلق ($PM_{2.5}$) کرده است. هدف از این پژوهش، توزیع زمانی-مکانی ذرات معلق ($PM_{2.5}$) در غرب و جنوب غرب ایران است. در این راستا داده‌های عمق نوری هواویز (AOD_{550nm}) سه سنجنده SeaWifs، MISR و MODIS طی دوره آماری ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۶ اخذ و سپس با استفاده از روش رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) با کاربست ایستگاه‌های کنترل کیفی هوا مقدار $PM_{2.5}$ با تفکیک ۰/۰۱ درجه قوسی محاسبه شد. کارایی مقادیر برآورد شده با استفاده از روش‌های R^2 و RMSE تأیید شد. نتایج نشان داد استان خوزستان ($15/29 \mu m/m^3$) بیشینه و استان همدان ($10/16 \mu m/m^3$) کمینه $PM_{2.5}$ را دارا هستند. بیشینه ضریب تغییرات و روند $PM_{2.5}$ در مناطق مرزی به دلیل بار ورودی هواویزهای گردوغباری است. مقدار ذرات معلق از جنوب به شمال و غرب به شرق روندی کاهشی را به دلیل توپوگرافی پیچیده، عوامل بیوفیزیکی، عوامل هواشناسی و دوری از چشمه‌های گردوغباری دارند. بر اساس دستورالعمل کیفیت هوا (AQG) و استاندارد سازمان محیط‌زیست ایران به ترتیب ۲۶/۳۱ و ۴۰/۱۱ درصد از منطقه مورد مطالعه کمتر از دستورالعمل‌های نامبرده قرار دارند.

کلیدواژه

برآورد ذرات معلق، ذرات معلق ($PM_{2.5}$)، سنجش‌ازدور، عمق نوری هواویز (AOD)، غرب و جنوب غرب ایران.

۱. سرآغاز

۲/۵ ($PM_{2.5}$) آثار منفی بسیاری بر سلامت انسانی از جمله سرطان ریه، التهاب ریوی و بیماری‌های قلب و عروق دارند (Van Donkelaar et al., 2006). این ذرات بین ۶۰ تا ۷۰ درصد کل ذرات را تشکیل می‌دهند و نقش چشمگیری در واداشت تابشی از طریق جذب و پراکندگی نور خورشید دارند و همان‌طور که گفته شد کیفیت هوا و سلامتی عمومی را نیز به شدت کاهش می‌دهند (Silva et al., 2013). اندازه‌گیری منطقه‌ای این ذرات برای مطالعات اپیدمیولوژی، طراحی راهبردی کنترل کیفیت هوا و

ارزیابی آلودگی هوا به یکی از نگرانی‌های روزافزون جهانی تبدیل شده است و تأثیر چشمگیری بر آب‌وهوا و محیط‌زیست دارد. تاکنون راهبردهای گوناگونی برای کنترل و مدیریت آلودگی هوا ارائه شد که در این بین شاخص‌های سنجش کیفیت هوا به‌طور گسترده‌ای در پایش کیفیت هوا استفاده می‌شوند (احسان‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵). یکی از شاخص‌های بسیار مهم در سنجش کیفیت هوا شاخص $PM_{2.5}$ است. ذرات معلق با قطر کمتر از μm

PM_{2.5} منطقه‌ای با استفاده از داده‌های AOD به‌دست‌آمده از سنجنده MODIS^۷ و داده‌های هواشناسی توسعه دادند که این مدل قادر به توضیح ۷۳/۸۰ درصد دگرگونی PM_{2.5} منطقه دلتای رودخانه Pearl چین بود. با وجود این باید توجه داشت که روابط توسعه داده‌شده بر اساس محیط جغرافیایی و شرایط هواشناسی می‌تواند متفاوت باشند و برای تمامی مناطق قابل اجرا نباشند (Hoff & Christopher, 2009). علت این امر چندان دور از انتظار نیست چرا که شرایط هواشناسی محلی، ترکیبات شیمیایی هواپزها، تراپرد ذرات در حالت قائم و افقی، واکنش‌های شیمیایی توسط فتوشیمی، فرایندهای فیزیکی همچون تراکم تغییرپذیری بالایی دارند (Zhang et al., 2009; Massoud et al., 2011).

فرایندهای شکل‌گیری و تغییرات هواپزهای موجود در جو بسیار پیچیده است؛ از این رو پژوهشگران بسیاری در مناطق مختلف جهان از کاربردهای گوناگونی برای برآورد ذرات معلق (PM) استفاده کردند. Kumar و همکاران (۲۰۰۷) دریافتند که ۱ درصد تغییر در AOD باعث تغییرات ۰/۵۲ درصد تا ۰/۳۹ درصد در PM_{2.5} کلان‌شهر دهلی‌نو می‌شود. Chen و همکاران (۲۰۱۴) با ارزیابی همبستگی بین AOD و PM در جنوب کشور چین دریافتند که ارتباط این دو پارامتر در شرایط رطوبت نسبی کم بهتر عمل می‌کند. Van Donkelaar و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از داده‌های مشاهداتی ماهواره غلظت ذرات معلق را در سطح جهانی ارزیابی کردند و به این نتیجه دست یافتند که داده‌های ماهواره‌ای در برآورد PM_{2.5} کارایی بالایی دارند. Sorek-Hamer و همکاران (۲۰۱۵) به ارزیابی غلظت PM_{2.5} با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS در دو منطقه فلسطین اشغالی و دره San Joaquin در کالیفرنیا مرکزی ایالات متحده آمریکا پرداختند؛ نتایج آن‌ها نشان داد الگوریتم دیپ‌بلو (Deep Blue (DB)) سنجنده MODIS به‌طور چشمگیری می‌تواند به برآورد PM_{2.5} به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک بپردازد. Van

پیش‌بینی کیفیت هوا بسیار ارزشمند خواهد بود (Al-Saadi et al., 2005). در سال ۲۰۱۳، ۸۷ درصد از جمعیت جهان در مناطقی با مقدار PM_{2.5} بیش‌تر از دستورالعمل کیفیت هوا (AQG^۲) سازمان بهداشت جهانی (WHO^۳) زندگی می‌کردند که به مرگ حدود ۲/۹ میلیون نفر انجامید که در شرایط فقر زندگی می‌کردند (Forouzanfar et al., 2016). با راه‌اندازی ماهواره‌ها و بهبود مستمر در فناوری بازیابی داده‌ها مطالعات مرتبط با PM_{2.5} از پویایی بالاتری برخوردار شدند (Zhang & Li, 2015). روش بازیابی داده‌های PM_{2.5} بر اساس داده‌های ماهواره‌ای طی دوره‌های آماری بلندمدت به‌ویژه برای مناطقی که هیچ داده اندازه‌گیری شده‌ای در دسترس نیست؛ کمک چشمگیری به مطالعات آب‌وهوایی و آلودگی هوا می‌کند. عمق نوری هواپزها (AOD^۴) مشتق شده از داده‌های ماهواره‌ای، برای نظارت بر PM_{2.5} بسیار کارا است. این مهم زمانی اهمیت بیشتری دارد که در کشورهای در حال توسعه همچون ایران، داده‌های زمینی در دسترس نیستند یا اینکه توزیع زمانی مناسبی ندارند (Yap & Hashim, 2012). AOD حاصل از ماهواره را می‌توان به‌طور تجربی تبدیل به PM_{2.5} کرد (Koelemeijer et al., 2006) تاکنون مدل‌های تجربی زیادی برای ارزیابی غلظت PM_{2.5} برای مناطق مختلف جهان توسعه داده شد (Schaap et al., 2009; van Donkelaar et al., 2010; Lee et al. 2011; You et al., 2016). برآورد دقیق از PM_{2.5} مستلزم کاربردهای پارامترهای سطحی، داده‌های جغرافیایی و اطلاعات هواشناسی محلی است که بر این اساس به توسعه مدل‌های پیچیده‌تری همچون مدل‌های رگرسیونی چندگانه و غیرخطی می‌انجامد (You et al., 2016).

همان‌طور که بحث شد تاکنون روش‌های مختلفی برای برآورد PM_{2.5} از داده‌های ماهواره‌ای توسعه داده شد برای مثال Gupta & Christopher (۲۰۰۹) از روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN^۵) برای برآورد غلظت PM_{2.5} روزانه استفاده کردند. Song و همکاران (۲۰۱۴) مدل رگرسیونی وزن‌دار جغرافیایی (GWR^۶) را برای برآورد

خوش‌سیما و همکاران (۱۳۹۴) به تخمین تمرکز ذرات معلق (PM₁₀) در جو با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور، ایستگاه‌های زمینی و پارامترهای هواشناختی با کاربست شبکه عصبی مصنوعی طی دوره دسامبر ۲۰۰۹ تا سپتامبر ۲۰۱۰ در منطقه زنجان پرداختند و به این نتیجه رسیدند که ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی با مقادیر پیش‌بینی شده برای روش همبستگی ساده چند متغیره و شبکه عصبی به ترتیب برابر ۰/۶۲ و ۰/۸۲ است و دریافتند که استفاده از شبکه عصبی قادر به پیش‌بینی روابط پیچیده بین پارامترهای ورودی و خروجی است، در مقایسه با روش همبستگی ساده چند متغیره، برای برآورد تمرکز PM₁₀ مناسب‌تر است. قربانیان و محمد زاده (۱۳۹۷) با استفاده از رگرسیون‌های غیرخطی به برآورد غلظت و تولید نقشه پراکندگی ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرون با استفاده از تصاویر سنجش‌ازدور و اندازه‌گیری‌های زمینی در شهر تهران برای ۸ روز در سال ۱۳۹۶ پرداختند نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد میانگین مجذور همبستگی رگرسیون‌های خطی، نمایی، لگاریتمی و توانی به ترتیب برابر با ۰/۵۹۱۲، ۰/۵۸۲۶، ۰/۵۸۰۸، ۰/۵۷۸۲ به دست آمده است. بر اساس نتایج به دست آمده رگرسیون نمایی بهترین عملکرد را برای تولید نقشه پراکندگی آلودگی داشته است. مطالعات انجام شده در ایران عمدتاً بر مناطق آسیب‌پذیر شهری تمرکز دارند در حالی که مطالعات مرتبط با مناطق مختلف اکولوژیکی بسیار محدود است همچنین تاکنون مطالعه‌ای بلندمدت از مقدار PM_{2.5} در سطح منطقه‌ای در غرب و جنوب و غرب ایران انجام نشده است. از این رو پژوهش حاضر برای نخستین بار با اهداف ۱. ارزیابی مقدار PM_{2.5} در مناطق مختلف اکولوژیکی؛ ۲. برآورد ذرات معلق با قطر کمتر از ۲/۵ μm (PM_{2.5}) موجود در جو غرب و جنوب غرب ایران با استفاده از داده‌های سنجنده‌های SeaWiFS^۸، MISR^۹ و MODIS در یک دوره آماری ارزیابی بلندمدت (۱۹۹۸-۲۰۱۶) و ۳. صحت سنجی داده‌های برآورد شده ماهواره‌ای انجام شد. دستاوردهای

Donkelaar و همکاران (۲۰۱۶) به برآورد جهانی ذرات معلق با استفاده از روش آماری-ژئوفیزیکی ترکیبی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، مدل‌ها و داده‌های مشاهداتی پرداختند نتایج آن‌ها نشان داد که برآورد PM_{2.5} بر اساس داده‌های عمق نوری هواویزهای ماهواره‌ای نتیجه بسیار مناسبی را ارائه می‌دهد به طوری که R² به دست آمده بین AOD و PM_{2.5} ۰/۸۱ بوده است. همچنین آن‌ها دریافتند که برآورد PM_{2.5} در مناطقی که گردوغبار بیابانی بالایی دارند باعث افزایش عدم قطعیت در تخمین ذرات معلق می‌شود. Ma و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی، تغییرات بلندمدت غلظت PM_{2.5} بر اساس داده‌های سنجنده MODIS در جنگل‌های بارانی گرمسیری جنوب شرق آسیا را ارزیابی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که همبستگی بالایی بین AOD و PM_{2.5} در منطقه مطالعه شده وجود دارد. دامنه ضریب تعیین به دست آمده نیز در فصل خشک بین ۰/۵۸-۰/۸۹ و در فصل مرطوب ۰/۳۳ است و بیشینه PM_{2.5} در شمال تایلند و ویتنام و منطقه مرکزی کشور لائوس به دلیل سوختن زیست توده بوده است.

در ایران نیز پژوهش‌های بسیاری ذرات معلق موجود در جو را مورد مطالعه قرار دادند؛ اما پژوهش‌های که بر اساس داده‌های ماهواره‌ای انجام شده باشند از تعداد کمتری برخوردار هستند. حجازی و همکاران (۱۳۹۱) توزیع مکانی ذرات معلق با قطر کمتر از ۲/۵ میکرومتر در شهر تهران را با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که آلودگی ناشی از ذرات معلق در مرکز شهر تهران از تراکم بیشتری برخوردار است. پهلوان و همکاران (۱۳۹۳) در پژوهشی به برآورد غلظت آلاینده‌های PM₁₀ و PM_{2.5} در کلان‌شهر تهران با استفاده از داده‌های سنجنده ماهواره‌های Terra و Aqua پرداختند؛ نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که رابطه‌ای خطی بین عمق نوری هواویز و غلظت PM₁₀ وجود دارد. نتایج حاصل میزان همبستگی نسبتاً بالا ۰/۶۷ الی ۰/۸۱ بین داده‌های سنجش از دور و زمینی را نشان می‌دهد.

ذرات معلق در هر مکانی با توجه به ویژگی‌های جغرافیایی مختلف فراهم شود و در نهایت الگویی کلی برای منطقه ارائه شود.

این پژوهش می‌تواند برای حوزه‌های سلامت عمومی، محیط‌زیست، کیفیت هوا و تغییرات آب‌وهوایی تحت واداشت تابشی ذرات موجود در جو مفید باشد.

۲. مواد و روش‌ها

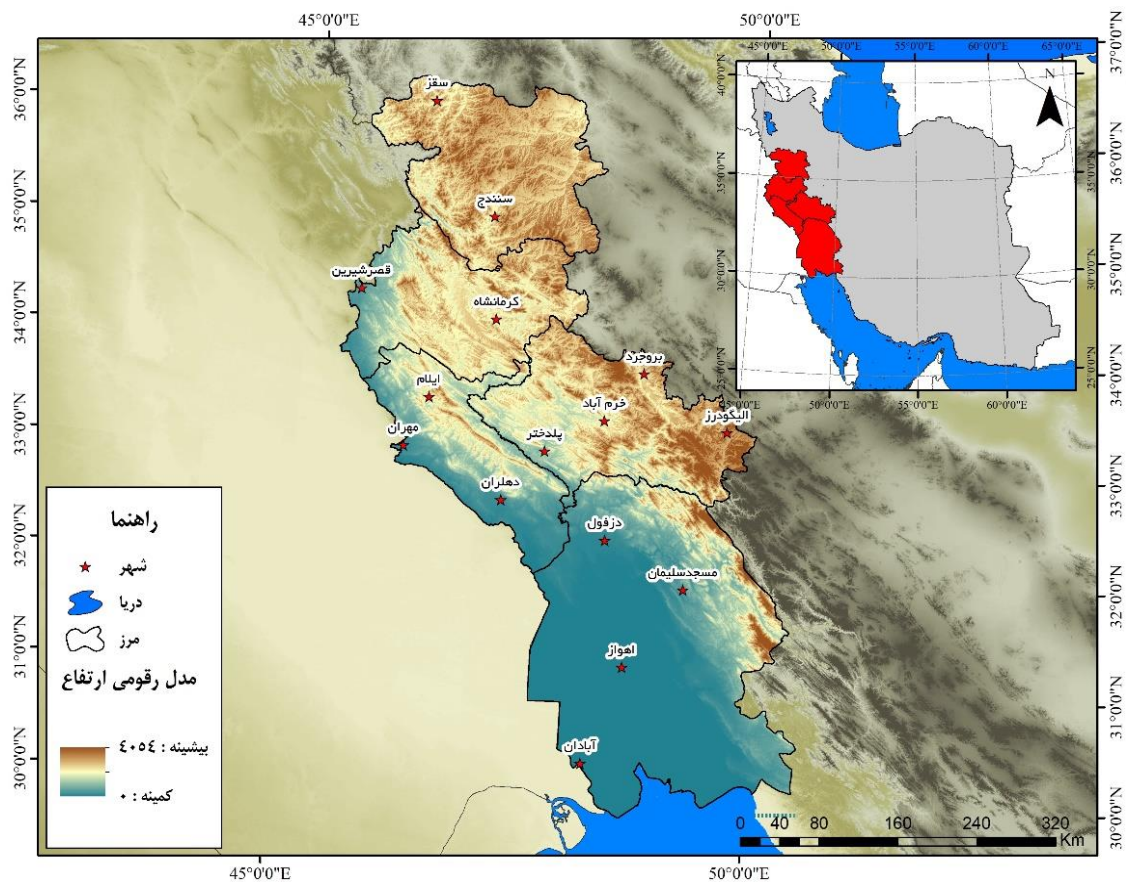
۲.۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه پژوهش پهنه غرب و جنوب غرب ایران شامل پنج استان کردستان، کرمانشاه، همدان، ایلام و خوزستان است (شکل ۱). دو دلیل برای انتخاب این منطقه وجود دارد: ۱. برخوردار بودن این پهنه از مقدار چشمگیر هواویزهای گردوغباری و مهم‌ترین دروازه ورود هواویزها به کشور و ۲. وجود سطوح مختلف ارتفاعی در این پهنه و گسترش طولی و عرضی مناسب آن به منظور بررسی تأثیر تمام عوامل هواشناسی و زمینی است که، امکان تبیین

۲.۲. داده‌های تحقیق

۲.۲.۱. ایستگاه‌های پایش کیفی هوا

در این پژوهش از داده‌های ساعتی ذرات معلق با قطر کمتر از $2.5/5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$) که مربوط به آلاینده‌های هواست از مجموعه ایستگاه‌های سازمان حفاظت محیط‌زیست کشور برای ۳ سال اخیر (۲۰۱۳-۲۰۱۶) که داده کامل موجود بوده، اخذ شد. از این داده‌ها برای صحت‌سنجی داده‌های $\text{PM}_{2.5}$ برآورد شده از داده‌های ماهواره‌ای با استفاده از روش‌های آماری ضریب تعیین (R^2)^۱ و ریشه متوسط مربع خطا (RMSE^{11}) استفاده شد.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

OrbView-2 (AKA SeaStar) مشغول فعالیت بوده است و همان‌طور که گفته شد مأموریت اصلی آن اندازه‌گیری کلروفیل تولیدشده با فیتوپلانکتون‌های دریایی بود. تفکیک مکانی این سنجنده ۱/۱ (LAC) و ۴/۵ کیلومتر (GAC) در ۸ باند طیفی بین ۴۰۲ تا ۸۸۵ نانومتر است. داده‌های عمق نوری هواویزها (AOD) این سنجنده تحت عنوان فرآورده (Sayer et al., 2012) ارائه شد (SWDB_L3M05 v004).

۳.۲. محاسبه PM_{2.5} از داده‌های ماهواره‌ای

۳.۲.۱. برآورد PM_{2.5} از سنجنده‌های SeaWifs، MISR و MODIS

به منظور برآورد PM_{2.5} از داده‌های ماهواره‌ای از رابطه (۱) استفاده می‌شود (Van Donkelaar et al., 2016):

$$SAT PM_{2.5} = \frac{\sum_{n=1}^N \frac{1}{NRRMSD_n} \times \left(\frac{\Delta AOD_{adj,n}}{AOD_n}\right)^{-1} \times N_{obs,n}^2 \times PM_{2.5,n}}{\sum_{n=1}^N \frac{1}{NRRMSD_n} \times \left(\frac{\Delta AOD_{adj,n}}{AOD_n}\right)^{-1} \times N_{obs,n}^2} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، $\Delta AOD_{adj,n}$ و AOD_n حداقل روی ۰/۰۱ تنظیم شده‌اند. برای حداکثر پنج مشاهده در هر ماه به منظور مقیاس (مقیاس پایه) تنظیم شد. N_{obs} نیز تراکم مشاهده پراکنده را ارزیابی می‌کند. مقادیر بیش از سه انحراف معیار نیز با استفاده از روش درون‌یابی خطی جایگزین شدند (Van Donkelaar et al., 2016).

۳.۲.۲. رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR)

برای محاسبه میانگین سالانه PM_{2.5} ماهواره‌ای از روش رگرسیونی وزن‌دار جغرافیایی (GWR) استفاده شد. روشی آماری است که اجازه می‌دهد تغییرپذیری فضایی در ضرایب پیش‌بین یک رابطه (پیش‌بینی متغیر پاسخ) مبتنی بر رگرسیون خطی ایجاد شود و امکان استفاده از ساختار فضایی هر دو متغیر پیش‌بینی کننده و ضرایب آن را می‌دهد. فرمول کلی پیشنهادی بر اساس ایستگاه‌های زمینی به شرح رابطه (۲) است.

$$(GM PM_{2.5} - SAT PM_{2.5}) = \beta_1 DST + \beta_2 SNAOC + \beta_3 ED \times DU \quad (2)$$

۲.۲. تابش سنج تصویربرداری با توان تفکیک متوسط (MODIS)

تابش سنج تصویربرداری با توان تفکیک متوسط (MODIS) ابزاری کلیدی در مأموریت‌های سیستم نظارت بر سطح زمین است (EOS^{۱۲}) که سطح زمین را هر ۱ تا ۲ روز یکبار تصویربرداری کند (Salomonson et al., 1998). سنجنده MODIS توسط دو ماهواره Terra (۱۸ دسامبر ۱۹۹۹) و Aqua (۴ می ۲۰۰۲) پرتاب شد (Barnes et al., 2003). این سنجنده در ۳۶ باند طیفی بین ۰/۴۱۲ تا ۱۴/۳۸ میکرومتر (μm) با تفکیک فضایی ۲۵۰ متر (۲ باند)، ۵۰۰ متر (۵ باند) و ۱۰۰۰ متر (۲۹ باند) به اخذ تصاویر می‌پردازد (Xiong et al., 2009). شعاع اندازه‌گیری MODIS با وضوح فضایی بالا اطلاعات ارزشمندی را درباره ساختار فیزیکی جو و سطح زمین فراهم می‌آورد (Savtchenko et al., 2004). دو الگوریتم Dark Target (DT) (Levy et al., 2013) و Deep Blue (DB) (Sayer et al., 2014) برای ارزیابی خواص هواویزهای بازیابی شده با سنجنده MODIS توسعه داده شدند. الگوریتم DT برای مطالعه بازیابی خواص هواویزها در مناطقی با پوشش گیاهی متراکم توسعه داده شد. درحالی‌که الگوریتم DB برای بازیابی خواص هواویزها در سطوح روشن همانند بیابان‌ها توسعه داده شد (Hsu et al., 2004).

۳.۲.۲. تابش سنج تصویربرداری چند زاویه‌ای (MISR)

سنجنده تابش سنجش تصویربرداری چند زاویه‌ای (MISR) همراه با سنجنده MODIS روی ماهواره Terra نصب شده‌اند از اندازه‌گیری‌های این سنجنده در ناحیه مرئی و فروسرخ نزدیک می‌توان ویژگی‌های هواویزها را مطالعه کرد. این سنجنده در طول یک هفته کل جو زمین را پوشش می‌دهد (بیات، ۱۳۹۲).

۲.۲.۴. سنجنده میدان دید وسیع دریایی (SeaWifs)

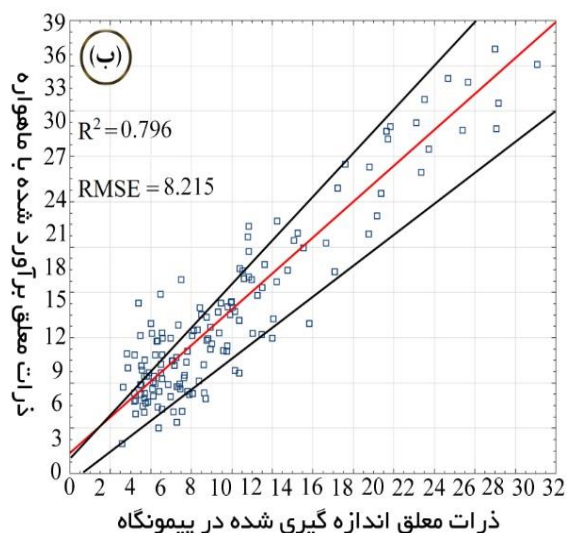
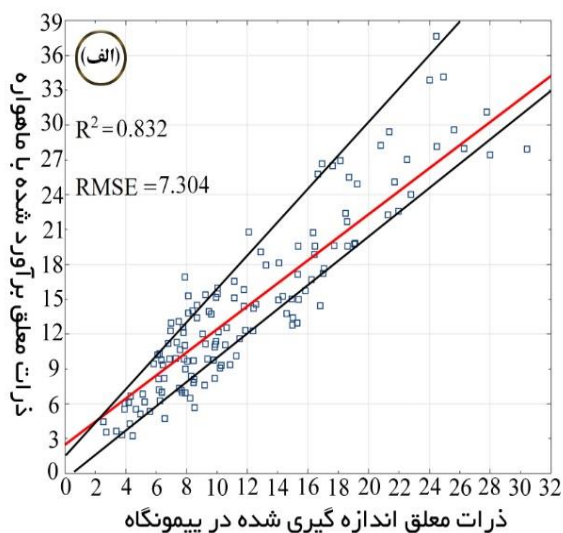
سنجنده SeaWifs برای جمع‌آوری داده‌های بیولوژیکی جهانی سطح اقیانوس‌ها طراحی شد. این سنجنده از سپتامبر ۱۹۹۷ تا دسامبر ۲۰۱۰ روی ماهواره GeoEye's

شاخص آماری ضریب تعیین (R^2) و ریشه متوسط مربع خطا (RMSE) برای دو ایستگاه آبادان و اهواز محاسبه شده است (شکل ۲). همان‌طور که در شکل نیز پیداست مقدار ضریب تعیین ایستگاه آبادان با ۰/۸۳۲ بیش‌تر از ایستگاه اهواز (۰/۷۹۶) است. آماره RMSE نیز برای آبادان ۷/۳۰۴ و برای اهواز ۸/۲۱۵ محاسبه شد (مقدار خطا برای هر یک از سنجنده‌های SeaWifs (آبادان ۷/۳۴۰، اهواز ۸/۲۳۱)، MISR (آبادان ۷/۲۵۱، اهواز ۸/۲۲۵) و MODIS (آبادان ۷/۳۲۲، اهواز ۸/۱۹۱) محاسبه شد). نتایج به‌دست‌آمده از دو ایستگاه که داده‌های آن در دسترس بوده است به‌خوبی نشان داده است که کاربست داده‌های ماهواره‌ای برای مناطقی که ضعف در برداشت داده زمینی دارند راهکاری مؤثر و کم‌هزینه است. همان‌طور که آزمون‌های آماری نشان داده‌اند مقدار $PM_{2.5}$ برآورده شده با استفاده از داده‌های عمق نوری هواویز (AOD) سنجنده‌های SeaWifs، MISR و MODIS از کارایی بالایی در غرب و جنوب غرب ایران برخوردار هستند.

در رابطه β_1 تا β_3 ضرایب پیش‌بین را نشان می‌دهند. GM مقدار $PM_{2.5}$ به‌دست‌آمده از ایستگاه‌های زمینی داده و SAT ماهواره است. ED نمایانگر تفاوت ارتفاع بین مناطق بلند و متوسط تا کم در پیکسل مورد نظر از مجموعه داده ETOPO1 است که از مرکز داده‌های ژئوفیزیکی از آدرس <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/seltopo.html> قابل دریافت است. DU فاصله معکوس تا نزدیک‌ترین سطح شهری است که از فرآورده (MCD12Q1) سنجنده MODIS (Friedl et al., 2010) قابل اخذ است. غلظت ترکیبات برای گردوغبار بیابانی (DST) و مجموع سولفات، نیترات، آمونیوم و کربن ارگانیک (SNAOC) است که به نسبت سهم نسبی هر یک در شبیه‌سازی لحاظ می‌شود (Philip et al., 2014). خروجی نهایی مدل در شبکه با توان تفکیک مکانی ۰/۰۱ درجه قوسی است.

۳. یافته‌ها

۳.۱. صحت سنجی داده‌های $PM_{2.5}$ برآورد شده با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای
صحت سنجی داده‌های $PM_{2.5}$ برآورد شده با استفاده از دو



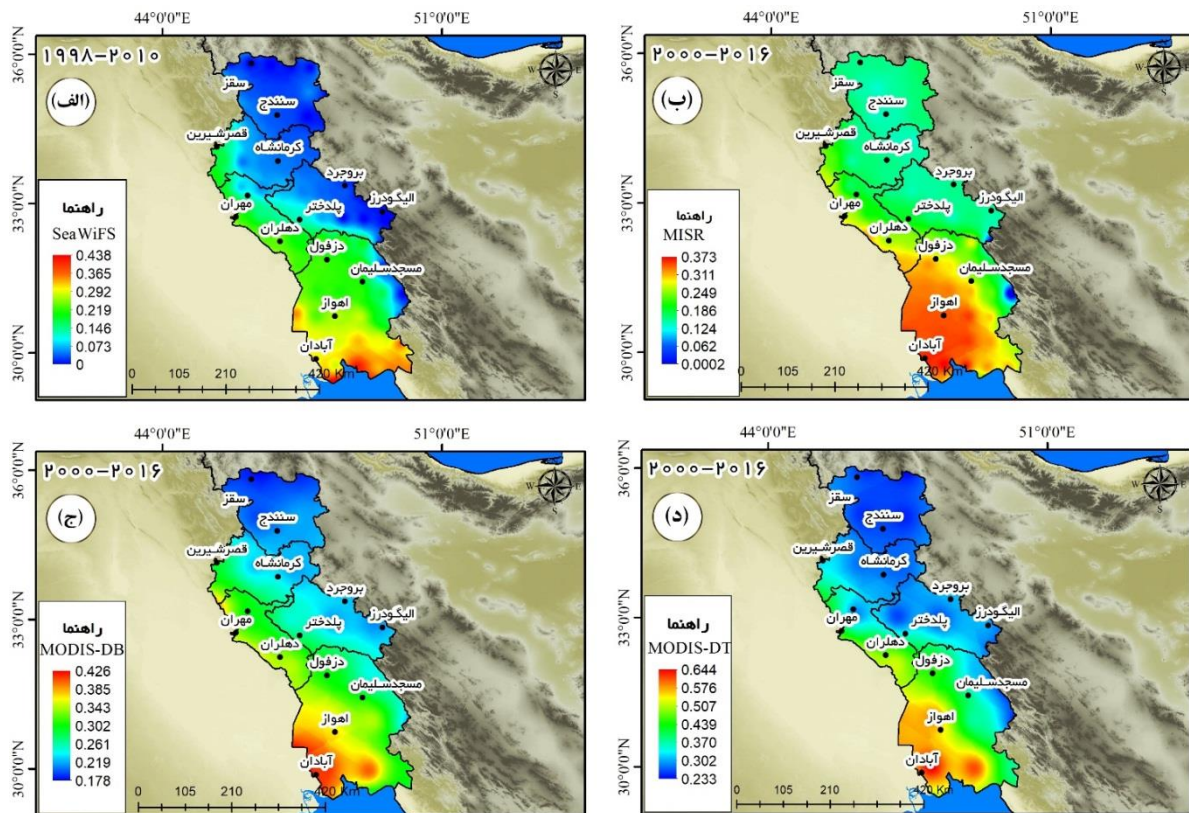
شکل ۲. صحت سنجی داده‌های $PM_{2.5}$ ماهواره‌ای بر مبنای سنجنده‌های SeaWifs، MISR و MODIS؛ الف ایستگاه پایش کیفی هوا شهر آبادان؛ ب ایستگاه پایش کیفی هوا شهر اهواز (μm^3)

استان کرمانشاه و لرستان شناسایی شد. این تفاوت چشمگیر در مقدار هواویز می‌تواند ناشی از تفاوت‌های جمعیتی، توپوگرافی پیچیده، عوامل هواشناسی همچون سرعت کمتر باد، مقدار بالای رطوبت نسبی و بارش، دوری از چشمه‌های گردوغباری و در نهایت پوشش گیاهی باشد. با توجه به این واقعیت که بخش بزرگی از رشته‌کوه زاگرس ارتفاع بیش از ۴۰۰۰ متر دارد مانع از نفوذ هواویزهای گردوغباری به منطقه می‌شود. همچنین مناطق بزرگی از زاگرس پوشیده پوشش گیاهی مناسبی است در نتیجه توپوگرافی پیچیده به همراه پوشش گیاهی مناسب و تراکم پایین جمعیتی و عدم فعالیت قابل توجه انسانی در مناطق نامبرده دلیلی بر مقدار کمتر هواویز نسبت به استان‌های ایلام و خوزستان شده است.

۲.۳. تغییرپذیری سالانه عمق نوری هواویزها (AOD) بر مبنای سنجنده‌های SeaWifs، MISR و MODIS

مقدار بلندمدت ۱۹ ساله AOD در غرب و جنوب غرب ایران نشان‌دهنده توزیع فضایی با تغییرپذیری بالا است که از شرق به غرب و از جنوب به شمال منطقه مورد مطالعه کاهش تدریجی دارد (شکل ۳).

به‌طور خاص، سه منطقه ساحلی خلیج فارس و جنوب غرب استان خوزستان (شهرهای خرمشهر، اروندکنار، بندر ماهشهر، هندیجان و هویزه)، بخش مرکزی خوزستان (بین شهرهای اهواز، مسجدسلیمان و دزفول) و مناطق مرزی و جنوبی استان ایلام (از دشت عباس تا مهران، موسیان و دهلران) با مقادیر سالانه نسبتاً بالا AOD شناخته شده‌اند. کمینه مقدار AOD برای سه سنجنده مورد مطالعه در شرق



شکل ۳. عمق نوری هواویزها (AOD) بر مبنای سنجنده‌های SeaWifs، MISR و MODIS (الف؛ الف) سنجنده SeaWifs؛ (ب) سنجنده MISR، (ج) سنجنده MODIS الگوریتم DB، و (د) سنجنده MODIS الگوریتم DT (مقیاس بدون بعد است)

خوزستان (به استثنا مناطق شمالی و شمال شرقی) ناشی از خشکی این مناطق و کمبود بارش است. احمدی و همکاران (۱۳۹۸b) در تأیید نتایج به‌دست‌آمده برای هواویزهای فصلی ایران نشان دادند تابستان و بهار بیشینه هواویزهای فصلی ایران را به دلیل خشکی بالا از یکسو بار هواویزهای ورودی از سوی دیگر دارند. همچنین باید در نظر داشت که مناطق خشک و نیمه‌خشک واقع در استان‌های غرب و جنوب غرب ایران به دلیل کمبود بارش و درجه حرارت بالا پتانسیل بالایی برای واکنش فتوشیمیایی دارند که به تولید هواویزهای ثانویه می‌انجامد (Kang et al., 2016).

به‌طورکلی سه سنجنده SeaWifs (شکل ۳-الف)، MISR (شکل ۳-ب) و MODIS (شکل ۳-ج، د) الگوی مشابهی را از مقدار هواویزها در منطقه نشان داده‌اند. مناطقی که اختلاف زیادی در AOD را نشان دادند، ناشی از شرایط پیچیده سطح همچون زبری سطح، پوشش گیاهی و سطوح روشن مانند بیابان‌ها یا انواع مختلف هواویزها باشد که خردفیزیک متفاوتی را از خود بروز می‌دهند (Filonchik et al., 2019). همچنین اختلاف بین MODIS و MISR که در دوره زمانی مشترک اطلاعات آن‌ها ارائه شده است می‌تواند ناشی از روش‌های گوناگون پردازش داده و الگوریتم‌های آن‌ها از یکسو و کالیبراسیون مختلف آن‌ها از سوی دیگر باشد (Hsu et al., 2013).

۳.۳. تغییرپذیری مقدار $PM_{2.5}$ برآورد شده مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای

توزیع فضایی غلظت $PM_{2.5}$ سالانه طی دوره ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۶ در شکل (۴) و مشخصات آماری بلندمدت در جدول (۱) نشان داده شد. به‌طورکلی غلظت $PM_{2.5}$ در غرب و جنوب غرب ایران نشان داد که الگوی فضایی مشخص و با تغییرات قوی در کل منطقه وجود دارد. استان خوزستان بیشینه میزان $PM_{2.5}$ را طول سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۶ نشان داد که به‌طور قابل توجهی بیشتر از دیگر استان‌هاست.

شکل (۳) مقدار متوسط بلندمدت AOD را بر اساس داده‌های سنجنده MODIS با دو الگوریتم DB (شکل ۳-ج) و DT (شکل ۳-د) نشان می‌دهد. در مقایسه با مقدار AOD به‌دست‌آمده از سنجنده MISR (شکل ۳-ب) با سنجنده MODIS پیداست که مقدار عمق نوری ذرات به‌دست‌آمده الگوریتم DB سنجنده MODIS با مقدار سنجنده MISR و حتی SeaWifs (شکل ۳-الف) که دوره زمانی مشترک با دو سنجنده دیگر ندارد بسیار نزدیک است. به‌طوری‌که بیشینه AOD هر سه سنجنده مورد مطالعه در جنوب غرب ایران و استان خوزستان قرار دارد اما آنچه بیش‌ازپیش برای الگوریتم DT سنجنده MODIS خودنمایی می‌کند مقدار بیشینه ۰/۶۴۴ است که در مقایسه با الگوریتم DB و مقدار به‌دست‌آمده با سنجنده MISR تفاوت زیادی دارد. علت این امر که الگوریتم DT مقدار زیادی را نشان داده است درجه حرارت بالا در استان خوزستان است. درجه حرارت بالا به ایجاد بازتابندگی بالا می‌انجامد که بر این اساس مقدار AOD به‌دست‌آمده با این الگوریتم برای مناطق خشک و نیمه‌خشک کارایی چندانی نخواهد داشت (Bibi et al., 2017).

اهواز و کرمانشاه مناطقی با جمعیت بالا و صنعتی در غرب و جنوب و غرب ایران هستند این مناطق و شهرهای مجاور آن‌ها به‌ویژه در دلتای رودخانه کارون در استان خوزستان با اقتصاد در حال رشد حجم زیادی از فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و نیازهای روزانه زندگی شهروندان را به همراه دارند که طبیعتاً نقش بارزی را هم در مقدار هواویز ورودی به جو دارند. اما همان‌طور که در بخش‌های مختلف این پژوهش به آن اشاره شد این مقدار از هواویز در استان‌های غربی و جنوب غربی نمی‌تواند از شهرها، احتراق سوخت‌های فسیلی و سوختن زیست‌توده باشد؛ از این‌رو بار ورودی هواویز به‌خصوص در فصول بهار و تابستان است که باعث افزایش چشمگیر هواویز و غلظت بالای ذرات معلق در منطقه مورد مطالعه می‌شود. مقدار بالای هواویزها در مناطق مرزی استان ایلام و استان

جدول ۱. مشخصات آماری $PM_{2.5}$ مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای ($\mu m/m^3$)

دوره	استان / آماره	همدان	کردستان	خوزستان	کرمانشاه	ایلام
۱۹۹۸-۲۰۰۲	کمینه	۵/۷۸۸	۵/۶۰۸	۸/۰۴۹	۷/۱۰۵	۶/۶۶۵
	پیشینه	۱۲/۳۸۳	۱۸/۱۶۶	۲۳/۱۴۹	۱۳/۵۶۱	۱۵/۷۰۰
	دامنه تغییرات	۶/۵۹۵	۱۲/۵۵۸	۱۵/۱۰۰	۶/۴۵۶	۹/۰۳۶
	میانگین	۹/۹۰۳	۱۰/۷۳۴	۱۴/۷۰۰	۹/۷۴۲	۱۰/۲۸۵
۲۰۰۳-۲۰۰۷	کمینه	۷/۲۳۹	۷/۲۹۵	۷/۹۲۱	۶/۱۳۱	۵/۴۳۲
	پیشینه	۱۲/۹۳۱	۱۳/۸۲۸	۲۲/۳۱۴	۱۳/۱۵۵	۱۶/۲۵۶
	دامنه تغییرات	۵/۶۹۲	۶/۵۳۳	۱۴/۳۹۳	۷/۰۲۴	۱۰/۸۲۴
	میانگین	۱۰/۲۵۰	۱۰/۳۳۱	۱۴/۵۳۳	۹/۰۷۷	۹/۸۶۲
۲۰۰۸-۲۰۱۱	کمینه	۸/۲۳۱	۸/۲۶۸	۸/۵۸۱	۷/۶۲۴	۶/۵۹۹
	پیشینه	۱۶/۳۶۱	۱۴/۸۵۸	۳۰/۸۰۹	۱۵/۲۱۲	۲۱/۸۱۶
	دامنه تغییرات	۸/۱۳۱	۶/۵۸۹	۲۲/۲۲۸	۷/۵۸۸	۱۵/۲۱۷
	میانگین	۱۰/۶۵۶	۱۱/۶۴۰	۱۷/۶۹۵	۱۰/۲۷۸	۱۲/۶۶۹
۲۰۱۲-۲۰۱۶	کمینه	۶/۹۷۰	۷/۵۰۳	۶/۷۲۳	۵/۸۲۷	۴/۹۱۳
	پیشینه	۱۱/۶۷۲	۱۳/۳۶۳	۲۰/۸۹۳	۱۲/۶۹۷	۱۵/۴۴۴
	دامنه تغییرات	۴/۷۰۲	۵/۸۶۰	۱۴/۱۶۹	۶/۸۷۰	۱۰/۵۳۱
	میانگین	۹/۲۵۱	۱۰/۴۰۱	۱۲/۸۸۶	۸/۹۳۳	۹/۲۴۴
۱۹۹۸-۲۰۱۶	کمینه	۷/۷۱۶	۷/۷۸۴	۸/۲۱۰	۷/۰۹۰	۶/۰۸۳
	پیشینه	۱۳/۷۶۴	۱۴/۸۲۶	۲۴/۵۴۸	۱۳/۲۰۵	۱۷/۸۸۵
	دامنه تغییرات	۶/۰۴۸	۷/۰۴۲	۱۶/۳۳۸	۶/۱۱۵	۱۱/۸۰۱
	میانگین	۱۰/۱۶۳	۱۰/۹۷۹	۱۵/۲۹۵	۹/۶۸۰	۱۰/۸۶۱
ضرب تغییرات	کمینه	۷/۹۱۰	۷/۲۹۳	۷/۸۵۱	۸/۰۳۷	۹/۲۰۱
	پیشینه	۱۸/۶۰۷	۲۶/۱۹۶	۲۱/۴۹۵	۳۰/۶۰۶	۲۴/۴۲۸
	دامنه تغییرات	۱۰/۶۹۷	۱۸/۹۰۳	۱۳/۶۴۴	۲۲/۵۶۹	۱۵/۲۲۷
	میانگین	۱۰/۹۶۳	۱۴/۱۶۳	۱۵/۱۸۵	۱۳/۶۷۴	۱۶/۸۸۴

مشخص شد به منظور ارزیابی بهتر تغییرات $PM_{2.5}$ سالانه در غرب و جنوب غرب ایران داده‌ها به چهار دوره پنج‌ساله تقسیم‌بندی شدند (تنها استثنا برای دوره چهارم است که سری زمانی ۴ ساله است) دوره سوم (۲۰۰۸-۲۰۱۲) بیشینه مقدار $PM_{2.5}$ را نشان داده است به طوری که متوسط تمامی استان‌ها به بیش‌تر از $10 \mu m/m^3$ رسیده

بعد از استان خوزستان بخش‌های جنوبی استان ایلام بیشینه $PM_{2.5}$ را نشان داده است. به‌طور کلی متوسط سالانه $PM_{2.5}$ در غرب و جنوب غرب ایران $12/258 \mu m/m^3$ است. استان خوزستان با مقدار متوسط بلندمدت $15/295 \mu m/m^3$ بیش‌ترین مقدار را در بین استان‌های مورد مطالعه به خود اختصاص داده است. همان‌طور که در جدول (۱) نیز

در مقابل، کمینه شاخص نیز با افزایش عرض جغرافیایی و دوری از کانون‌های گردوغبار و مراکز صنعتی کاهش داشته است. به طوری که طی دوره آماری بلندمدت بخش‌های شمالی و شمال غرب استان ایلام کمینه شاخص را نشان داده‌اند. استان‌های خوزستان و ایلام به دلیل موقعیت خاص قرارگیری‌شان و تنوع توپوگرافی بیشینه دامنه تغییرات را نشان داده‌اند. ضریب تغییرات $PM_{2.5}$ نیز در منطقه مورد مطالعه بین ۷/۲۹ تا ۳۰/۶۰ درصد در نوسان است. استان همدان کمترین ضریب تغییرات را ۱۰/۹۶ درصد و استان ایلام بیشینه ضریب تغییرات را با ۱۶/۸۸ درصد به خود اختصاص داده است.

۴.۳. توزیع مکانی مقدار $PM_{2.5}$ در غرب و جنوب غرب ایران

شکل (۴-الف) مقدار $PM_{2.5}$ را بر اساس داده‌های ماهواره‌ای مبتنی بر مدل رگرسیون وزن‌داری جغرافیایی (GWR) نشان می‌دهد؛ همان‌طور که در شکل نیز پیداست آثار مناطق شهری و تغییرات ارتفاعی بیشینه ناهمگونی فضایی مقدار $PM_{2.5}$ برآورد شده را نشان می‌دهد. مقدار $PM_{2.5}$ در غرب و جنوب غرب ایران دارای تنوع فضایی بالایی است؛ باید به این نکته اشاره کرد که ذرات معلق ناشی از فرایندهای انسانی، نزدیکی به منابع اصلی گردوغبار و توپوگرافی پیچیده کوهستانی باعث افزایش عدم قطعیت در برآورد $PM_{2.5}$ می‌شود. همچنین کمبود ایستگاه با سری زمانی بلندمدت نیز یکی از مشکلات بزرگ در برآورد $PM_{2.5}$ در غرب و جنوب غرب ایران است. از این رو عدم قطعیت موجود در ذرات معلق برآورده شده بیشتر ناشی از ارزیابی مقدار $PM_{2.5}$ اندازه‌گیری در ایستگاه و رابطه آن با AOD است تا عدم قطعیت عمق نوری هواویزها (AOD) در سری زمانی سنجنده‌های منتخب؛ چرا که عمق نوری هواویزها میزان فراوانی آلاینده‌ها در ستون قائم جو به صورت انتگرال ضریب میرایی آلاینده‌ها در امتداد ستون عمودی جو از سطح زمین تا بالای جو را تعریف می‌کند. به عبارت دیگر عمق نوری

است و استان خوزستان با مقدار متوسط $17/695 \mu m/m^3$ بیشینه مقدار ذرات معلق با قطر کمتر از $2/5$ میکرومتر را به خود اختصاص داده است. بعد از دوره سوم (۲۰۰۸-۲۰۱۲) در دوره چهارم (۲۰۱۳-۲۰۱۶) مقدار شاخص $PM_{2.5}$ افت چشمگیری را نشان داده است به طوری که استان همدان $1/405$ ، استان کردستان $1/239$ ، استان خوزستان $4/809$ ، استان کرمانشاه $1/805$ و استان ایلام کاهش $3/425 \mu m/m^3$ را نشان داده‌اند. این مقدار از تغییرات ذرات معلق در یک دهه نشان از نقش عوامل خارجی قوی در منطقه مورد مطالعه دارد. در تأیید نتایج به دست آمده احمدی و همکاران (۱۳۹۸a) با مطالعه شاخص جذب هواویز (AAI) بر اساس داده‌های سنجنده TOMS دو ماهواره Nimbus 7 (۱۹۷۹-۱۹۹۲) و Earth Probe (۱۹۹۶-۲۰۰۵) و سنجنده OMI (۲۰۰۵-۲۰۱۵) ماهواره EOS Aura دریافتند که بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۸ با تغییر از رژیم غیرفعال به فعال دوره گردوغباری افزایش یافته است و در مقابل از اواخر سال ۲۰۱۲ تا میانه‌های سال ۲۰۱۴ میانگین شاخص جذب هواویز (AAI) مقدار کاهشی را نشان داده است. که با نتایج به دست آمده با غلظت $PM_{2.5}$ هم‌راستا است؛ از این رو هرگونه تغییر در مقدار بار گردوغبار حمل شده به منطقه مورد مطالعه مقدار $PM_{2.5}$ موجود در جو استان غربی و جنوب غربی ایران افزایش چشمگیری خواهد داشت که برای سلامتی انسانی و کیفیت هوا بسیار خطرناک است به طوری که Pope و همکاران (۲۰۰۹) با ارزیابی‌های انجام داده در ایالات متحده آمریکا به این نتیجه رسیدند که کاهش ۱۰ میکروگرم در مترمکعب برای شاخص $PM_{2.5}$ امید به زندگی بین $0/61 \pm 0/30$ سال افزایش می‌یابد که لازم است در این خصوص تمهیدات لازم انجام شود.

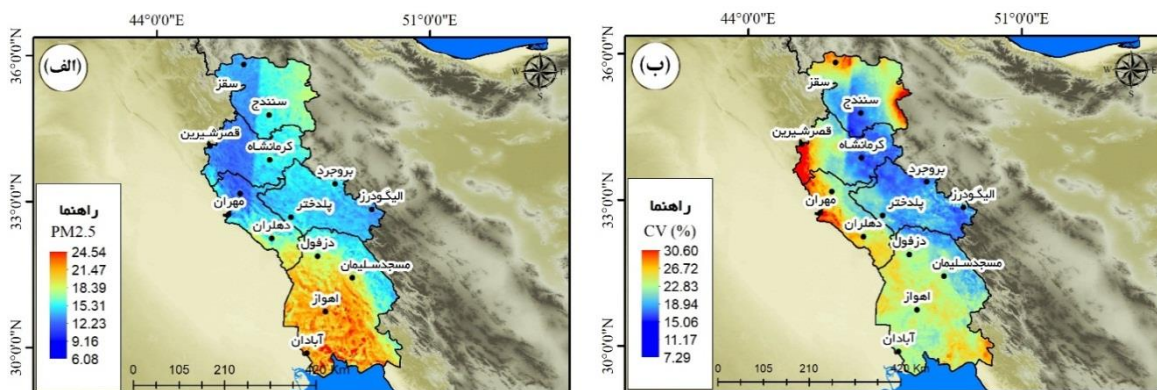
بیشتر پارامترهای آماری مورد مطالعه طی دوره آماری ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۲ (دوره اول تا سوم) روندی افزایشی را نشان داده‌اند و از ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۶، این مقدار نسبت به دوره سوم (۲۰۰۸-۲۰۱۲) کاهش داشته است (جدول ۱). بیشینه مقدار ذرات معلق با قطر کمتر از $2/5$ میکرومتر در جنوب غرب منطقه مورد مطالعه طی تمامی دوره‌ها به دست آمده و

بهداشت جهانی ذرات معلق بیش از $10 \mu m^3/m^3$ (Brauer et al., 2016; Van Donkelaar et al., 2016) و بر اساس استاندارد سازمان محیط زیست ایران بیش از $12 \mu m^3/m^3$ برای سلامتی انسان ناسالم تعریف شده است که بر این اساس تنها ۲۶/۳۱ درصد از منطقه مورد مطالعه کمتر از دستورالعمل سازمان بهداشت جهانی و ۴۰/۱۱ درصد کمتر از استاندارد سازمان محیط زیست ایران قرار دارد که تهدیدی بزرگ برای سلامتی انسانی قلمداد می شود.

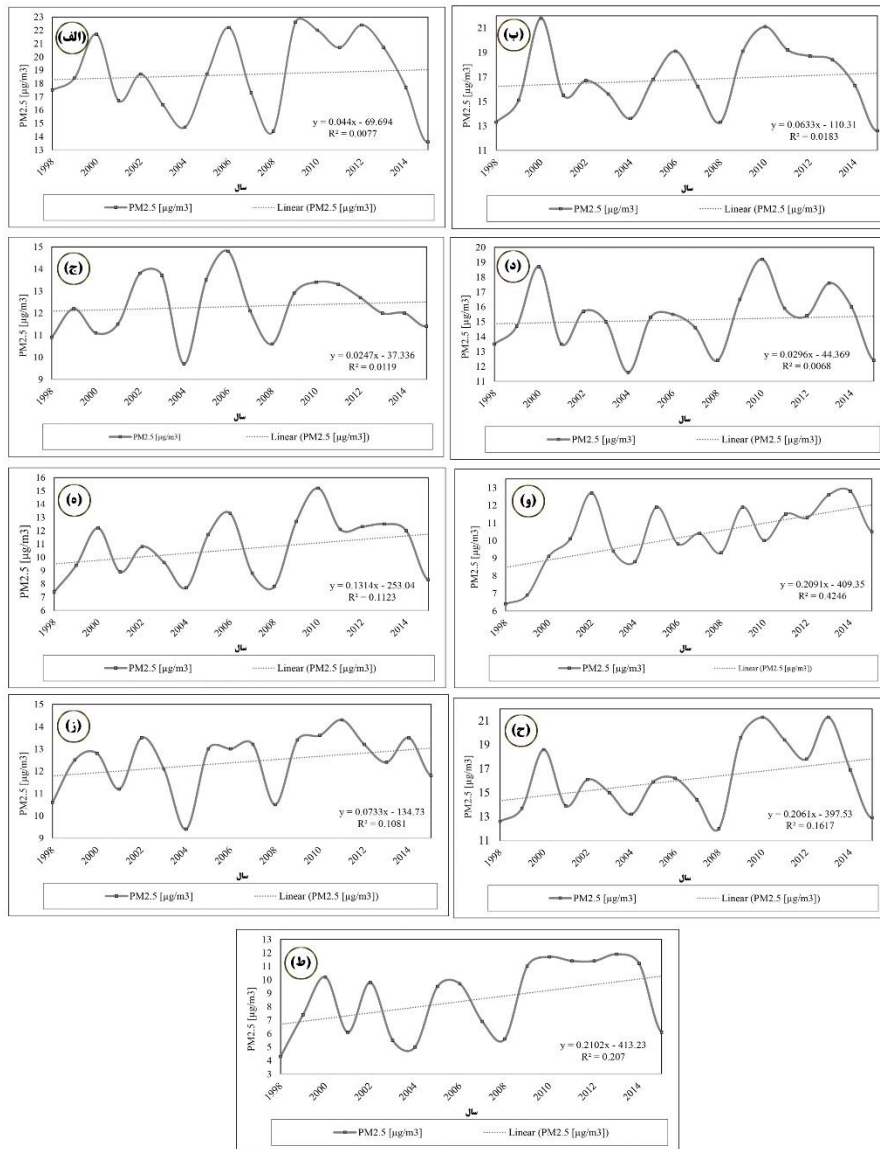
در مناطق صنعتی ذرات معلق ناشی از عامل انسانی به طور چشمگیری به بار $PM_{2.5}$ کمک می کنند. در رابطه با شکل گیری شیمیایی $PM_{2.5}$ مناطق مختلف غرب و جنوب غرب ایران دلایل مختلفی وجود دارد؛ مثلاً غلظت بالای کربن در شهرهای صنعتی همچون اهواز، آتش سوزی های عظیم هورها و در نهایت غلظت بالای ذرات گردوغبار در غرب، جنوب غرب ایران به دلیل نزدیک بودن به چشمه های عظیم گردوغباری (شکل ۳) از جمله دلایل شکل گیری این ذرات است. نکته دیگر که در خصوص ذرات معلق موجود در جو باید به آن توجه داشت کانی شناسی گردوغبار است، که بسته به کانی شناسی منطقه (Singer et al., 2003) تغییرات زیادی را نشان می دهد. گردوغبارها غنی از کوارتز، کربنات ها و فلدسپارها معمولاً قاره ای هستند و احتمالاً از مناطق محلی یا فاصله کوتاه / متوسط می آیند، در حالی که گردوغبار در مواد معدنی خاک رس و سیلیکات بیشتر از مسافت های طولانی تر حرکت می کند.

هواویز نشان دهنده تمام آلاینده هایی است که باعث پراکنش نور می شوند نه فقط غلظت ذرات معلق. لذا کاربست پارامترهای کمکی به ویژه ایستگاه های اندازه گیری را باید عامل اساسی ارزیابی داده های برآورد شده دانست. گردوغبارهای بیابانی حمل شده تحت الگوهای هواشناسی به طور منطقه ای در کاهش و افزایش $PM_{2.5}$ در منطقه مورد مطالعه نقش آفرینی می کنند. عامل دیگری که به شدت می تواند تغییرپذیری ذرات معلق در منطقه مورد مطالعه را با توجه توپوگرافی پیچیده و مسیر عبور سامانه های همسایه تحت تأثیر قرار دهد، نهشت مرطوب است که می تواند دقت داده های ترکیبی و برآورد شده را تحت تأثیر قرار دهد (Van Donkelaar et al., 2016).

غلظت متوسط $PM_{2.5}$ در غرب و جنوب غرب ایران $12/258 \mu m^3/m^3$ است؛ رابطه بین $PM_{2.5}$ و AOD می تواند با پارامترهای هواشناسی مانند عمق لایه مخلوط، رطوبت نسبی، دمای هوا و سرعت باد تغییر کند (Pelletier et al., 2007). از آنجایی که بخش چشمگیری از منطقه مورد مطالعه را مناطق کوهستانی در برگرفته است با پوشش قابل توجهی از ابر نیز همراه است که اغلب باعث بازیابی نامشخص یا انتزاعی از AOD می شود (Ford & Heald, 2016). بنابراین، اثر رطوبت نسبی و کسر ابر بر رابطه بین AOD و $PM_{2.5}$ تأثیر می گذارد. بر این اساس باید انتظار داشت که مناطق مرتفع کوهستانی در منطقه مورد مطالعه $PM_{2.5}$ دارای عدم قطعیت بالاتری است. بر اساس دستورالعمل سازمان



شکل ۴. توزیع مکانی $PM_{2.5}$ ؛ الف. مقدار بلندمدت $PM_{2.5}$ سالانه؛ ب. ضریب تغییرات $PM_{2.5}$ سالانه (μm^3)



شکل ۵. تغییرات زمانی $PM_{2.5}$ در ۹ شهر مهم در غرب و جنوب غرب ایران؛ الف. آبادان؛ ب. اهواز؛ ج. خرم‌آباد؛ د. دزفول؛ ه. دهلران؛ و. سقز؛ ز. کرمانشاه؛ ح. مسجدسلیمان و ط. مهران (μm^3)

آبادان (الف-۵)، اهواز (ب-۵)، خرم‌آباد (ج-۵)، دزفول (د-۵)، دهلران (ه-۵)، سقز (و-۵)، کرمانشاه (ز-۵)، مسجدسلیمان (ح-۵) و مهران (ط-۵) ترسیم و در شکل (۵) ارائه شد. همان‌طور که در شکل نیز پیداست روند سری زمانی برای هر ۹ شهر منتخب طی دوره آماری ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۶ افزایشی است. در برخی از ایستگاه‌ها شدت روند بسیار بالاست. به‌طوری‌که شیب روند محاسبه‌شده برای سقز (۰/۴۲)، مهران (۰/۲۰)، مسجدسلیمان (۰/۱۸)، دهلران (۰/۱۱) و کرمانشاه (۰/۱۰) محاسبه شد.

ضریب تغییرات $PM_{2.5}$ در شکل (۴-ب) نشان داده شد؛ همان‌طور که در شکل نیز پیداست بیشینه ضریب تغییرات در مناطق مرزی غرب ایران از دهلران تا قصر شیرین در کرمانشاه کشیده است که بیش از ۳۰ درصد تغییر را نشان داده‌اند. مناطق شمالی و استان کردستان نیز تغییرات زیادی را نشان داده‌اند. بخش‌هایی از جنوب شرق و شمال غرب استان خوزستان نیز تغییرات بالای ۲۵ درصد را نشان داده‌اند. به‌منظور آشکارسازی نوع تغییرات $PM_{2.5}$ سری زمانی به همراه روند خطی برای ۹ شهر منتخب

غربی و جنوب غربی ایران متعلق به دوره ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲ بوده است. همچنین ضریب تغییرات $PM_{2.5}$ طی دوره آماری مورد مطالعه نشان از افزایش بیش از ۳۰ درصد ذرات در مناطق مرزی و مسیر ورود توفان های گردوغباری به ایران بوده است. به طوری که سقز، مهران، مسجد سلیمان، دهلران و کرمانشاه بیشینه شیب روند محاسباتی را نشان دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل GWR ارائه شده در این مطالعه، توانایی پایش توزیع مکانی $PM_{2.5}$ را در مقیاس های گوناگون دارد. دستاوردهای این پژوهش برای استراتژی های آلودگی هوا، ارزیابی ریسک سلامت و مطالعات مربوط به محیط زیست پایدار مؤثر است.

تقدیر و تشکر

مقاله حاضر مستخرج از رساله دکتری آب و هواشناسی (گرایش شهری) دانشگاه «شهید بهشتی» با عنوان «واکوی وردایی زمانی-مکانی الگوهای قائم و افقی ریزگردها و ارزیابی بازخوردهای آب هوایی آن در ایران» است که با پشتیبانی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (بنیاد ملی علم ایران) (INSF) با کد ۹۶۰۰۰۹۹۳ انجام شد. نویسندگان بر خود لازم می دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از بنیاد ملی علم ایران، دانشگاه شهید بهشتی و داوران نشریه محیط شناسی که ما را در انجام و ارتقاء کیفی این پژوهش یاری دادند، اعلام نمایند.

یادداشت ها

1. Particulate Matter ($PM_{2.5}$)
2. Air Quality Guidelines (AQG)
3. World Health Organization (WHO)
4. Aerosol Optical Depth (AOD)
5. Artificial Neural Networks (ANN)
6. Geographically Weighted Regression (GWR)
7. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)
8. Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor (SeaWiFS)
9. Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR)
10. Coefficient of determination (R^2)
11. Root Mean Square Error (RMSE)
12. Earth Observing System (EOS)
13. Absorbing Aerosol Index (AAI)

۴. نتیجه گیری

برآورد ذرات معلق ($PM_{2.5}$) موجود در جو علاوه بر سلامت عمومی و کیفیت هوا بر واداشت تابشی جو و کالیبراسیون تصاویر ماهواره ای از اهمیت شایان توجهی برخوردار است. نتایج نشان داد غرب و جنوب غرب ایران از جنوب به شمال و غرب به شرق مقدار کاهشی را نشان داده اند؛ تغییرپذیری بالا AOD در منطقه مورد مطالعه به نسبت به قابلیت جذب رطوبت هواویزها، تشکیل هواویزهای ثانویه و آلودگی های ناشی از توفان های گردوغباری منطقه ای و عوامل انسانی (نظیر احتراق سوخت های فسیلی) به ویژه در مناطق مجاور مرزهای غربی ایران نسبت داد، که تجمع ذرات در این مناطق به دلیل نزدیکی به چشمه های گردوغباری بالا است. بار هواویز ورودی به ایران تحت توفان های گردوغباری مهم ترین عامل افزایش ذرات معلق ($PM_{2.5}$) در غرب و جنوب غرب ایران است. عوامل داخلی همچون خشک سالی، رشد مناطق شهری و صنایع وابسته به سوخت های فسیلی در درجات بعدی در افزایش مقدار ذرات معلق ($PM_{2.5}$) در منطقه مورد مطالعه نقش آفرینی می کنند. مناطق جمعیتی، توپوگرافی پیچیده کوهستانی، عوامل هواشناسی (سرعت باد، مقدار بالای رطوبت نسبی و بارش) به همراه عوامل بیوفیزیکی سطح همچون پوشش گیاهی و نوع خاک نقش مهمی را در توزیع مکانی ذرات معلق ($PM_{2.5}$) در منطقه مورد مطالعه داشتند که پیش تر توسط (Pelletier et al., 2007) و (Van Donkelaar et al., 2016) تأیید شده است. همچنین احمدی و همکاران (۱۳۹۸b) نقش پوشش گیاهی در تغییرپذیری هواویزها در ایران را اثبات کردند.

ارزیابی تغییرپذیری درون سالی ذرات معلق ($PM_{2.5}$) طی دوره آماری ۱۹ ساله نشان داد از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۲ مقدار $PM_{2.5}$ روندی افزایشی و پس از آن مقدار کاهشی را نشان داده است. این تغییر ناشی از یک رژیم غیرفعال به فعال دوره گردوغباری بوده است که احمدی و همکاران (۱۳۹۸a) نیز با مطالعه شاخص جذب هواویز (AAI^{13}) آن را تأیید کردند. بیشینه ذرات معلق موجود در جو استان های

منابع

- احسان‌زاده، ع. نژاد کورکی، ف. و طالبی، ع. ۱۳۹۵. «مقایسه کاربرد شبکه عصبی مصنوعی، درخت تصمیم، رگرسیون مؤلفه‌های اصلی و رگرسیون خطی چندگانه جهت مدل‌سازی شاخص کیفیت هوای شهری». محیط‌شناسی، ۴۲: ۴۵۵-۴۷۳.
- احمدی، م. داداشی رودباری، ع. و شکیبیا، ع. ۱۳۹۸. «ارزیابی روند شاخص جذب هواویز (AAI) فصلی ایران مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای Earth Probe، Nimbus 7 و EOS Aura»، کنفرانس بین‌المللی گردوغبار در جنوب غرب آسیا، ۳ تا ۵ اردیبهشت ۱۳۹۸، دانشگاه زابل، زابل.
- احمدی، م. شکیبیا، ع. داداشی رودباری، ع. ۱۳۹۸. «بررسی نقش شاخص‌های پوشش گیاهی و مؤلفه‌های جغرافیایی مکان بر عمق نوری هواویزهای فصلی ایران». فیزیک زمین و فضا، ۴۵: ۲۱۱-۲۳۳.
- بیات، ع. ۱۳۹۲. «دسته‌بندی هواویزهای جوی با استفاده از داده‌های قطبیده شیدسنج خورشیدی»، پایان‌نامه دکتری، به راهنمایی دکتر حمیدرضا خالصی فرد، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان.
- پهلوان، ا. پهلوان، ر. اسماعیلی، ع. ۱۳۹۳. «برآورد غلظت آلاینده‌های PM_{10} و $PM_{2.5}$ در کلان‌شهر تهران با استفاده از داده‌های سنجنده مودیس ماهواره‌های آکوا و ترا». نیوار، ۳۸: ۵۷-۶۸.
- حجازی، ع. مباحثی، م. و احمدیان‌مرج، ا. ۱۳۹۱. «تهیه نقشه توزیع مکانی ذرات معلق با قطر کمتر از دونیم میکرومتر در هوای شهر تهران با استفاده از داده‌های سنجنده مودیس». نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، شماره ۲۶: ۱۶۱-۱۷۸.
- خوش‌سیما، م. ثابت‌قدم، س. علی‌اکبری بیدختی، ع. ۱۳۹۴. «تخمین تمرکز ذرات معلق (PM_{10}) در جو با استفاده از داده‌های سنجنش‌ازدور ماهواره‌ای و زمین پایه و پراسنج‌های هواشناسی: کاربرد شبکه عصبی مصنوعی». فیزیک زمین و فضا، ۴۱: ۴۹۹-۵۱۰.
- قربانیان، ا. محمدزاده، ع. ۱۳۹۷. «استفاده از رگرسیون‌های غیرخطی در برآورد غلظت و تولید نقشه پراکندگی ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرون با استفاده از تصاویر سنجنش‌ازدور و اندازه‌گیری‌های زمینی». نشریه علمی پژوهشی علوم و فنون نقشه‌برداری، ۲: ۱۶۳-۱۷۱.
- Al-Saadi, J., Szykman, J., Pierce, R.B., Kittaka, C., Neil, D., Chu, D.A., Remer, L., Gumley, L., Prins, E., Weinstock, L. and MacDonald, C. 2005. Improving national air quality forecasts with satellite aerosol observations. Bulletin of the American Meteorological Society, 86: 1249-1262.
- Barnes, W. L., Xiong, X. and Salomonson, V. V. 2003. Status of terra MODIS and aqua MODIS. Advances in Space Research, 32:2099-2106.
- Bibi, S., Alam, K., Chishtie, F. and Bibi, H. 2017. Characterization of absorbing aerosol types using ground and satellites based observations over an urban environment. Atmospheric environment, 150: 126-135.
- Brauer, M., Freedman, G., Frostad, J., Van Donkelaar, A., Martin, R.V., Dentener, F., Dingenen, R.V., Estep, K., Amini, H., Apte, J.S. and Balakrishnan, K. 2015. Ambient air pollution exposure estimation for the global burden of disease 2013. Environmental science & technology, 50: 79-88.
- Chen, J., Xin, J., An, J., Wang, Y., Liu, Z., Chao, N. and Meng, Z. 2014. Observation of aerosol optical properties and particulate pollution at background station in the Pearl River Delta region. Atmospheric research, 143: 216-227.
- Filonchik, M., Yan, H., Zhang, Z., Yang, S., Li, W. and Li, Y. 2019. Combined use of satellite and surface observations to study aerosol optical depth in different regions of China. Scientific reports, 9: 6174.
- Ford, B. and Heald, C. L. 2016. Exploring the uncertainty associated with satellite-based estimates of premature mortality due to exposure to fine particulate matter. Atmospheric chemistry and physics, 16: 3499-3523.
- Forouzanfar, M.H., Afshin, A., Alexander, L.T., Anderson, H.R., Bhutta, Z.A., Biryukov, S., Brauer, M., Burnett, R., Cercy,

- K., Charlson, F.J. and Cohen, A.J. 2016. Global, regional, and national comparative risk assessment of 79 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks, 1990–2015: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015. *The Lancet*, 388: 1659-1724.
- Friedl, M. A., Sulla-Menashe, D., Tan, B., Schneider, A., Ramankutty, N., Sibley, A. and Huang, X. 2010. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote sensing of Environment*, 114: 168-182.
- Gupta, P. and Christopher, S. A. 2009. Particulate matter air quality assessment using integrated surface, satellite, and meteorological products: Multiple regression approach. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D14).
- Hoff, R. M. and Christopher, S. A. 2009. Remote sensing of particulate pollution from space: have we reached the promised land?. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 59: 645-675.
- Hsu, N.C., Jeong, M.J., Bettenhausen, C., Sayer, A.M., Hansell, R., Seftor, C.S., Huang, J. and Tsay, S.C. 2013. Enhanced Deep Blue aerosol retrieval algorithm: The second generation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(16): 9296-9315.
- Hsu, N. C., Tsay, S. C., King, M. D. and Herman, J. R. 2004. Aerosol properties over bright-reflecting source regions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(3): 557-569.
- Kang, N., Kumar, K. R., Hu, K., Yu, X. and Yin, Y. 2016. Long-term (2002–2014) evolution and trend in Collection 5.1 Level-2 aerosol products derived from the MODIS and MISR sensors over the Chinese Yangtze River Delta. *Atmospheric research*, 181: 29-43.
- Koelemeijer, R.B.A., Homan, C.D. and Matthijsen, J. 2006. Comparison of spatial and temporal variations of aerosol optical thickness and particulate matter over Europe. *Atmospheric Environment*, 40: 5304-5315.
- Kumar, N., Chu, A. and Foster, A. 2007. An empirical relationship between PM_{2.5} and aerosol optical depth in Delhi Metropolitan. *Atmospheric Environment*, 41: 4492-4503.
- Lee, H. J., Liu, Y., Coull, B. A., Schwartz, J. and Koutrakis, P. 2011. A novel calibration approach of MODIS AOD data to predict PM_{2.5} concentrations. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 11(15).
- Levy, R.C., Mattoo, S., Munchak, L.A., Remer, L.A., Sayer, A.M., Patadia, F. and Hsu, N. C. 2013. The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6: 2989.
- Ma, Y., Xin, J., Zhang, W., Liu, Z., Ma, Y., Kong, L., Wang, Y., Deng, Y., Lin, S. and He, Z. 2019. Long-term variations of the PM_{2.5} concentration identified by MODIS in the tropical rain forest, Southeast Asia. *Atmospheric Research*, 219: 140-152.
- Massoud, R., Shihadeh, A.L., Roumié, M., Youness, M., Gerard, J., Saliba, N., Zaarour, R., Abboud, M., Farah, W. and Saliba, N.A. 2011. Intraurban variability of PM₁₀ and PM_{2.5} in an Eastern Mediterranean city. *Atmospheric Research*, 101: 893-901.
- Pelletier, B., Santer, R. and Vidot, J. 2007. Retrieving of particulate matter from optical measurements: a semiparametric approach. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D6).
- Philip, S., Martin, R.V., van Donkelaar, A., Lo, J.W.H., Wang, Y., Chen, D., Zhang, L., Kasibhatla, P.S., Wang, S., Zhang, Q. and Lu, Z. 2014. Global chemical composition of ambient fine particulate matter for exposure assessment. *Environmental science & technology*, 48: 13060-13068.
- Pope III, C. A., Ezzati, M. and Dockery, D. W. 2009. Fine-particulate air pollution and life expectancy in the United States. *New England Journal of Medicine*, 360: 376-386.
- Salomonson, V.V., Barnes, W.L., Maymon, P.W., Montgomery, H. E. and Ostrow, H. 1989. MODIS: Advanced facility instrument for studies of the Earth as a system. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27: 145-153.
- Savtchenko, A., Ouzounov, D., Ahmad, S., Acker, J., Leptoukh, G., Koziyana, J. and Nickless, D. 2004. Terra and Aqua MODIS products available from NASA GES DAAC. *Advances in Space Research*, 34: 710-714.
- Sayer, A.M., Hsu, N.C., Bettenhausen, C., Ahmad, Z., Holben, B.N., Smirnov, A., Thomas, G.E. and Zhang, J. 2012. SeaWiFS Ocean Aerosol Retrieval (SOAR): Algorithm, validation, and comparison with other data sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117: D3.
- Sayer, A. M., Munchak, L. A., Hsu, N. C., Levy, R. C., Bettenhausen, C. and Jeong, M. J. 2014. MODIS Collection 6 aerosol products: Comparison between Aqua's e-Deep Blue, Dark Target, and "merged" data sets, and usage recommendations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119: 24.

- Schaap, M., Apituley, A., Timmermans, R. M. A., Koelemeijer, R.B.A. and Leeuw, G. D. 2009. Exploring the relation between aerosol optical depth and PM 2.5 at Cabauw, the Netherlands. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9: 909-925.
- Silva, A.M.C.D., Mattos, I.E., Ignotti, E. and Hacon, S.D.S. 2013. Particulate matter originating from biomass burning and respiratory. *Revista de saude publica*, 47: 345-352.
- Singer, A., Ganor, E., Dultz, S. and Fischer, W. 2003. Dust deposition over the Dead Sea. *Journal of Arid Environments*, 53: 41-59.
- Song, W., Jia, H., Huang, J. and Zhang, Y. 2014. A satellite-based geographically weighted regression model for regional PM2. 5 estimation over the Pearl River Delta region in China. *Remote Sensing of Environment*, 154: 1-7.
- Sorek-Hamer, M., Kloog, I., Koutrakis, P., Strawa, A.W., Chatfield, R., Cohen, A., Ridgway, W.L. and Broday, D.M. 2015. Assessment of PM2. 5 concentrations over bright surfaces using MODIS satellite observations. *Remote Sensing of Environment*, 163: 180-185.
- Van Donkelaar, A., Martin, R.V., and Park, R. J. 2006. Estimating ground-level PM2. 5 using aerosol optical depth determined from satellite remote sensing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111: D21.
- Van Donkelaar, A., Martin, R.V., Brauer, M. and Boys, B. L. 2014. Use of satellite observations for long-term exposure assessment of global concentrations of fine particulate matter. *Environmental health perspectives*, 123: 135-143.
- V Van Donkelaar, A., Martin, R.V., Brauer, M., Hsu, N.C., Kahn, R.A., Levy, R.C., Lyapustin, A., Sayer, A.M. and Winker, D.M. 2016. Global estimates of fine particulate matter using a combined geophysical-statistical method with information from satellites, models, and monitors. *Environmental science & technology*, 50: 3762-3772.
- Van Donkelaar, A., Martin, R.V., Brauer, M., Kahn, R., Levy, R., Verduzco, C. and Villeneuve, P. J. 2010. Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: development and application. *Environmental health perspectives*, 118: 847-855.
- Xiong, X., Chiang, K., Sun, J., Barnes, W. L., Guenther, B. and Salomonson, V.V. 2009. NASA EOS Terra and Aqua MODIS on-orbit performance. *Advances in Space Research*, 43: 413-422.
- Yap, X. Q. and Hashim, M. 2012. A robust calibration approach for PM 10 prediction from MODIS aerosol optical depth. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 12: 12.
- You, W., Zang, Z., Zhang, L., Li, Y. and Wang, W. 2016. Estimating national-scale ground-level PM25 concentration in China using geographically weighted regression based on MODIS and MISR AOD. *Environmental Science and Pollution Research*, 23: 8327-8338.
- Zhang, H., Hoff, R. M. and Engel-Cox, J. A. 2009. The relation between Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) aerosol optical depth and PM2. 5 over the United States: a geographical comparison by US Environmental Protection Agency regions. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 59: 1358-1369.
- Zhang, Y. and Li, Z. 2015. Remote sensing of atmospheric fine particulate matter (PM2. 5) mass concentration near the ground from satellite observation. *Remote Sensing of Environment*, 160: 252-262.