

## واکاوی و مقایسه تولیدات ماهواره‌ای و شبیه‌سازی شده AOD در تحلیل گردوغبارهای غرب ایران (۲۰۱۸-۲۰۰۰)

کاوه محمدپور<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی تهران، ایران.

محمد سلیقه، دانشیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی تهران.  
علی درویشی بلورانی، استادیار گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

طیب رضئی، استادیار مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، کرج، ایران.

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۲۰ پذیرش نهایی: ۱۳۹۸/۰۴/۰۵

### چکیده

گردوغبار، تحت تأثیر تعامل سیستم اتمسفر - زمین بوده و با تغییر در انرژی تابشی، شیمی و فیزیک اتمسفر، اقلیم یک منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابر ضرورت نقش گردوغبارها و پراکنش فضایی-دینامیکی گسترده آنها و نیز وجود تکنیک‌های پیشرفته سنجش‌ازدور و مدل‌سازی در شبیه‌سازی گردوغبار، در پژوهش حاضر سعی در مقایسه، کمی‌سازی و شبیه‌سازی رفتار گردوغبار با استفاده از عمق نوری آتروسول (AOD) MODIS و MACC گردید. میزان همبستگی پیرسون بین داده‌ها نشان داد که در منطقه مورد مطالعه بین سنجنده و مدل ارتباط معنی‌داری وجود دارد و کمترین همبستگی در استان همدان مشاهده شد. توزیع سالانه AOD نمایان ساخت که مقدار گردوغبار دارای دو دوره فعال (۲۰۱۰-۲۰۰۰) و غیرفعال (۲۰۱۸-۲۰۱۰) بود. همچنین، توزیع ماهانه AOD نشان داد که منطقه مورد مطالعه در ماه‌های آوریل تا آگوست دارای بیشترین غلظت گردوغبار است؛ که همخوانی ماهانه AOD بین مدل و سنجنده به تفکیک استان در ماه‌های مرطوب (دسامبر تا مارس) بیشتر از ماه‌های خشک (آوریل تا نوامبر) است. توزیع مکانی گردوغبار در هر دو سنجنده و مدل دارای الگوی کلی مورب مکانی جنوبی-شمالی است و با افزایش عرض جغرافیایی از مقدار آن کاسته می‌شود، اما این تغییرات در MODIS منظم‌تر از MACC است.

واژه‌های کلیدی: عمق نوری آتروسول (AOD)، MACC، MODIS، غرب ایران.

## مقدمه

گردوغبارها تحت عنوان عمده‌ترین نوع از آئروسول‌ها هستند که انتقال انرژی تابشی را به‌صورت مستقیم (جذب و پخش تابش) (Tegen et al., 1996, 1997; A. Jayaraman et al., 1998; Satheesh and Ramanathan, 2000; Harrison et al., 2001; S. Jayaraman et al., 2001; Sokolik et al., 2001; Haywood et al., 2003; Bangert et al., 2012) و غیرمستقیم (ویژگی‌های میکرو فیزیک، تشکیل هسته تراکم و نور) (Levin et al., 1996; Rosenfeld et al., 1997; Wurzler et al., 2000; Nakajima et al., 2001; Penner et al., 2001; Bangert et al., 2012) تحت تأثیر قرار می‌دهند. همچنین، گردوغبارها بر روی تغییر دمای هوا، شکل‌گیری ابر، همرفت و میزان بارش اثر می‌گذارند (Bryson and Barreis, 1967; Maley, 1982; Lohmann and Feichter, 2005; Wong and Dessler, 2005; Rosenfeld et al., 2008; Wong et al., 2009). درواقع آئروسول‌ها و به‌ویژه گردوغبار از نظر تغییراتی که در فیزیک و شیمی اتمسفر ایجاد می‌کنند، اقلیم یک منطقه را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد (Kaufman et al., 2002; Lohmann and Feichter, 2005; IPCC, 2013).

در سال‌های اخیر، افزایش سنجنده‌ها و مدل‌های مختلف با دقت زمانی و مکانی مختلف امکان پژوهش در حیطه گردوغبار را دوچندان نموده است (Mao et al., 2014). از این میان، مهم‌ترین مطالعات به بررسی عمق نوری آئروسول (AOD) به‌عنوان کلیدی‌ترین پارامتر در تحلیل گردوغبار پرداخته‌اند. در دو دهه اخیر، پارامتر AOD به‌عنوان اصلی‌ترین پارامتر ثبت‌شده در مشاهدات زمینی، ماهواره‌ها و مدل‌های پیشرفته جهانی توجه بسیاری از پژوهشگران را در بررسی گردوغبار به خود جلب کرده است (Morcrette et al. 2009; Mangold et al. 2011; Mao et al., 2014; Cuevas et al, 2015; Xuemei Zong et al., 2015). علاوه بر مشاهدات زمینی<sup>۱</sup> سنجنده‌هایی همچون MODIS، MISR، CALIPSO و SeaWiFi نیز عمق نوری آئروسول را تولید می‌کنند که خاموشی نور توسط آئروسول را در ستونی از جو در بالای سطح زمین نشان می‌دهد (Levy et al., 2013; Sayer et al., 2013; van Donkelaar et al., 2010, 2015; Ma et al., 2016). پارامتر AOD تخمینی است از مقدار کاهش نور خورشید در ستونی از جو توسط ذرات معلق که به علت جذب یا پراکنش نور اتفاق می‌افتد و به‌عنوان کلیدی‌ترین فاکتور در مطالعات اثرات آب و هوایی آئروسول‌ها و آلودگی‌های جوی می‌باشد (Pan et al., 2010; Mao et al., 2014). شایان‌ذکر است، قبلاً در مطالعات مذکور میزان AOD مدل و سنجنده با مشاهداتی زمینی در اقصی نقاط جهان به‌ویژه در منطقه مدیترانه و خاورمیانه صحت‌سنجی شده است (Morcrette et al. 2009; Mangold et al. 2011; Cuevas et al, 2015; Xuemei Zong et al., 2015; و به همین دلیل در پژوهش حاضر به صحت‌سنجی پرداخته نشده است.

اگرچه مطالعات محدودی به مقایسه آئروسول و گردوغبار با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده مدل‌ها با تولیدات ماهواره-ای پرداخته‌اند (Morcrette et al. 2009; Mangold et al. 2011; Cuevas et al, 2015)، اما، برخی از پژوهش‌ها با تمرکز بر روی کمیت‌های ماهانه و روزانه‌ی عمق نوری آئروسول (AOD) در باند مرئی میانی نشان دادند که داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های زمینی و ماهواره‌ای در مناطق گردوغباری و سواحل دریا همخوانی معنی‌داری باهم دارند (Morcrette et al. 2009; Mangold et al. 2011)؛ هرچند که در برخی موارد مشاهده می‌شود که مدل‌ها مقدار حداکثرها را نادیده می‌گیرند (Mangold et al. 2011). همچنین، پژوهش‌های انجام‌گرفته در ایران نشان می‌دهد که

<sup>۱</sup>- AERONET<sup>۲</sup>- Aerosol Optical Depth

این پژوهش‌ها با دقت مکانی پایین ( $1 \times 1$  درجه قوسی یا ۱۰۰ کیلومتر مربع) بوده و مقدار گردوغبار را با استناد به مشاهدات زمینی مقایسه و تحلیل کرده‌اند. این پژوهش‌ها با هدف ارزیابی مسیریابی پسگرد گردوغبار، ارتباط گردوغبار غرب ایران با بیابان‌های عراق، سوریه و عربستان، تأثیر آئروسول بر شار تابش، مقایسه باندهای متفاوت یک سنجنده طی روز خاص و یا تحلیل ارتباط بارش و دما با استفاده از مقدار AOD انجام گرفته‌اند (Gharibzadeh et al., 2017; Ashrafi et al., 2018; Namdari et al., 2018; Arkian & Nicholson, 2014). در جدیدترین مطالعات در ایران، پژوهشگران نیز بیشتر علاقه‌مند به ردیابی و مسیریابی، تحلیل فراوانی روزهای گردوغباری و تحلیل همدیدی و ماهواره‌ای رخدادهای مشخص در قالب رخدادهای محدود و چندروزه در نیمه غربی ایران داشته‌اند (ززولی و همکاران، ۱۳۹۳؛ اکبری و فرحبخشی، ۱۳۹۵؛ زینالی، ۱۳۹۵؛ ساری صراف و همکاران، ۱۳۹۶؛ حجازی زاده و همکاران، ۱۳۹۷؛ ترکاشوند، ۱۳۹۷). که علی‌رغم تلاش‌ها در این خصوص، مطالعات جامعی در دهه اخیر در استفاده از AOD و سنجنش‌ازدور ماهواره‌ای و مدل‌سازی در مقیاسی مشابه پژوهش‌های جامع و طولانی‌مدت جهانی (Cuevas et al., 2015; Mao et al., 2014) مشاهده نمی‌شود. پس، در غرب ایران نیاز به یک بررسی طولانی‌مدت رخدادهای گردوغبار در سری‌های زمانی روزانه یک دوره کامل سنجنش‌ازدوری و پراکنش فضایی و زمانی در قالب شبیه‌سازی و سنجنش‌ازدور ماهواره‌ای است. فلذا، با توجه به نتایج متنوع حاصله از مدل‌ها و الگوریتم‌ها در مناطق مختلف جهان، عدم قطعیت و چگونگی رفتار پیچیده گردوغبار هنوز بحثی باز در مطالعات محسوب می‌گردد. بنابراین، واکاوی و تحلیل گردوغبار با انواع مختلفی از داده‌های باز واکاوی و شبیه‌سازی‌شده و تکنیک‌های سنجنش‌ازدور کمک شایان توجهی به درک صحیح‌تر رخدادهای گردوغبار است، که معمول‌ترین و کارآمدترین پارامتر مورداستفاده در تحلیل آن‌ها، تحلیل عمق نوری آئروسول (AOD) توسط سنجنده‌ها و نهایتاً مدل‌هاست (Morcrette et al., 2009; Mao et al., 2014; Cuevas et al., 2015; Xuemei Zong et al., 2015). به همین منظور داده‌های ماهواره‌ای و شبیه‌سازی‌شده از لحاظ ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود چون چند زمانه بودن، چند طیفی بودن، وسعت منطقه تحت پوشش و ابعاد بررسی، امکانات مناسبی را برای مطالعه پدیده‌های دینامیکی گسترده همچون گردوغبار ارائه می‌دهند (Mei et al., 2008).

هدف مطالعه حاضر مقایسه داده‌های شبیه‌سازی‌شده با مشاهدات ماهواره‌ای در باند ۵۵۰ نانومتر بر روی غرب ایران است؛ که اساساً منطقه‌ای گردوغباری به حساب نمی‌آید بلکه گردوغبارهای حاصله در مناطق غربی ایران دارای منشأهای خارجی همچون بیابان‌های عراق، سوریه و عربستان و شمال آفریقا است (Akbari & Farahbakhshi, 2015; Ashrafi et al., 2014). در همین راستا، انجام تحلیل رفتار پیچیده گردوغبار با توجه به خلأ مطالعاتی موجود در ایران ضروری به نظر می‌رسد. فلذا، موضوع موردبررسی با کمک سنجنش‌ازدور و سنجنده MODIS تحت عنوان مشاهدات ماهواره‌ای و داده‌های شبیه‌سازی‌شده در مدل MACC می‌تواند گامی نوین و بااهمیت در مطالعه و شناسایی رفتار رخداد گردوغبار در گذر زمان در دو دهه اخیر بر روی ایران باشد. همچنین، در این بررسی به مقایسه تغییرات توزیع فضایی گردوغبار با استفاده از مدل‌سازی و سنجنش‌ازدور بر روی منطقه مورد مطالعه پرداخته و گردوغبار را مورد واکاوی قرار می‌دهد.

## داده‌ها و روش کار

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش، استان‌های ایلام، کرمانشاه، کردستان، لرستان و همدان می‌باشد که با استفاده از پارامتر AOD در دو سری داده شامل: ۱- داده‌های شبیه‌سازی شده در مدل MACC با دقت مکانی ۱۴ کیلومتر مربع و مقیاس زمانی ۳ ساعته و ۲- تولیدات سنجنده MODIS نصب بر روی ماهواره Terra با دقت مکانی ۱۰ کیلومتر مربع مورد بررسی قرار گرفت. تولیدات این سنجنده از مجموعه ۶ (Collection 6.1) استخراج و از الگوریتم Deep Blue استفاده شده است. جدول (۱) ویژگی‌های داده‌های مورد استفاده را نشان داده است.

جدول (۱). ویژگی‌های داده‌های مورد استفاده در تحقیق

| Data  | Spatial Resolution | Time Scale | Dimensions | Layers/Cells | Extent                 | period    | Area      |
|-------|--------------------|------------|------------|--------------|------------------------|-----------|-----------|
| MACC  | 14km <sup>2</sup>  | Daily      | ۲۲×۲۳      | 3653/560     | X: 45.41276 - 50.00153 | 2003-2012 | West Iran |
| MODIS | 10km <sup>2</sup>  |            |            | 6489/560     | Y: 32.1126 - 36.50776  | 2000-2018 |           |

به منظور تحلیل طوفان‌های گردوغبار در منطقه مورد مطالعه در دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ از روش‌های آماری و شبیه‌سازی پارامتر AOD در MACC و MODIS بهره گرفته شده و رخدادهای گردوغباری مورد پردازش قرار گرفتند. روش کار بدین صورت است که قبل از هرگونه پردازش آماری داده‌های تولید شده به ابعاد ۲/۲×۰/۲ درجه جهت مقایسه تبدیل گردید. سپس، میانگین روزانه AOD در ابعاد مکانی ۲۲×۲۳ پیکسل تشکیل و میانگین ۵۶۰ پیکسل برای محدوده مورد مطالعه در ماتریسی با ارایه ۳۶۵۳×۵۶۰ برای MACC و ۶۴۸۹×۵۶۰ برای MODIS در سری‌های زمانی روزانه جهت استخراج میزان AOD تشکیل گردید، و میانگین AOD در طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ برای MODIS و در طی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ برای MACC با استفاده از معادلات ۱-۱ تا ۲-۲ محاسبه گردید. سپس، پراکنش فضایی میزان AOD در طی ماه‌های گردوغباری سال برای ایستگاه‌های سینوپتیک و سراسر استان مورد مطالعه با استفاده از مجموعه بسته‌های R برای سری زمانی روزانه در طول دوره مورد مطالعه استخراج شد. در نهایت، توزیع مکانی میزان AOD بدست آمده با استفاده از تابع کریجینگ (Kriging) درونیابی گردید. معادلات (۱-۱)، (۱-۲)، (۱-۳) و معادلات (۲-۱) و (۲-۲) محاسبه میانگین AOD را برای کل دوره در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد:

$$1-1). AOD_l = \begin{bmatrix} \tau_{1,1}^l & \tau_{1,2}^l & \dots & \tau_{1,j}^l \\ \tau_{2,1}^l & \tau_{2,2}^l & \dots & \tau_{2,j}^l \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tau_{i,j}^l & \tau_{i,j}^l & \dots & \tau_{i,j}^l \end{bmatrix} \quad l = 1, \dots, n$$

$$1-2). AOD_l = [\tau_{ij}^l]$$

$$1-3). \overline{AOD}_l = \frac{\sum_{i=1}^l AOD_{l22 \times 23}}{l}$$

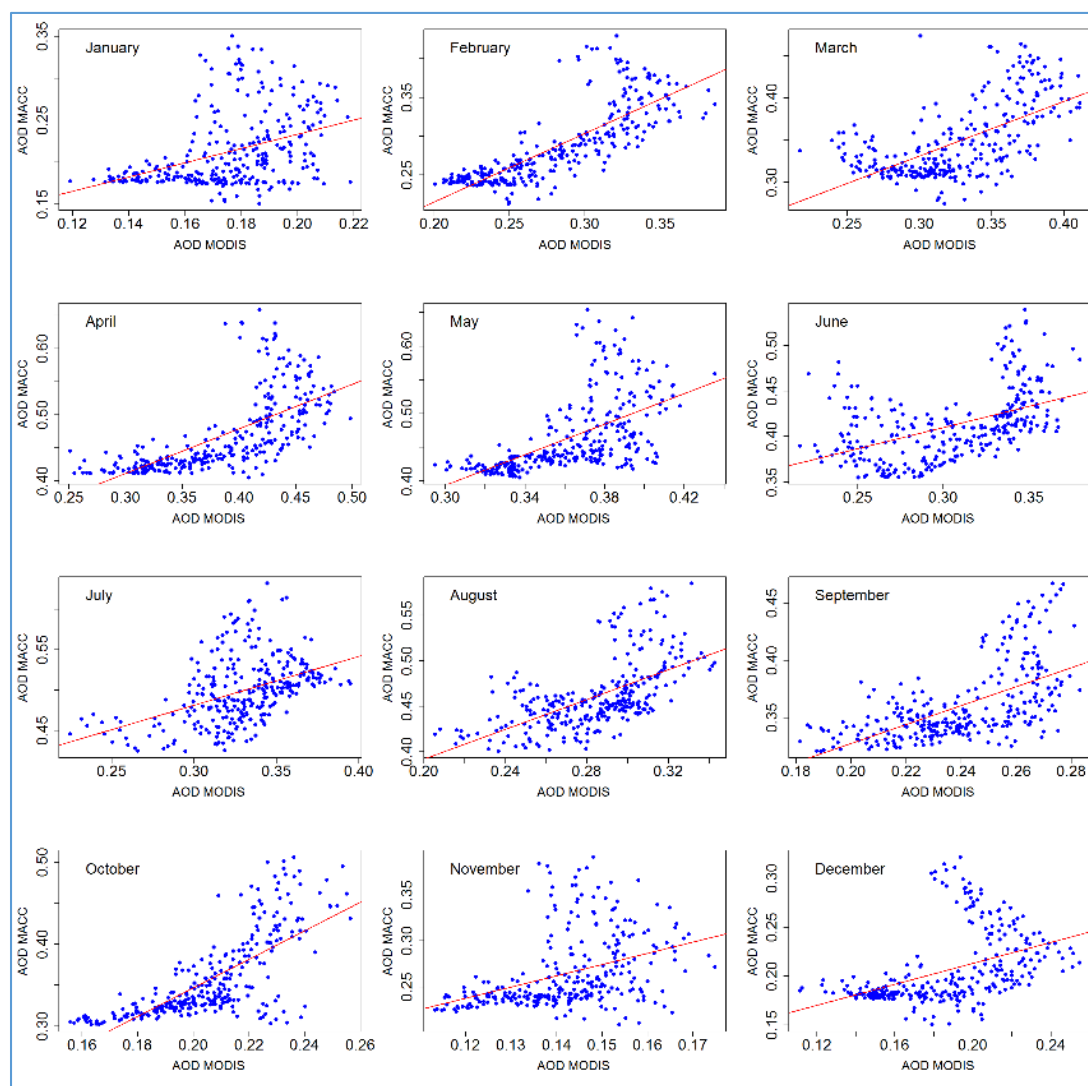
$$2-1). \overline{AOD}_{Area}^{daily} = \frac{\sum_{pix=1}^n (\tau_1 + \dots + \tau)}{n}$$

$$2-2). \overline{AOD}_{Area}^{Period} = \frac{\sum_{l=1}^l (\overline{AOD}_1 + \dots + \overline{AOD}_l)}{l}$$

در معادله فوق،  $(\tau)$ : عمق نوری آئروسول در سطر  $(i)$  و ستون  $(j)$  در لایه  $(l)$ ؛  $(l)$ : سری زمانی یا تعداد لایه؛  $(i)$ : تعداد سطر ماتریس؛  $(j)$ : تعداد ستون ماتریس؛  $n$  برابر با تعداد پیکسل در لایه  $(l)$ .

### شرح و تفسیر نتایج

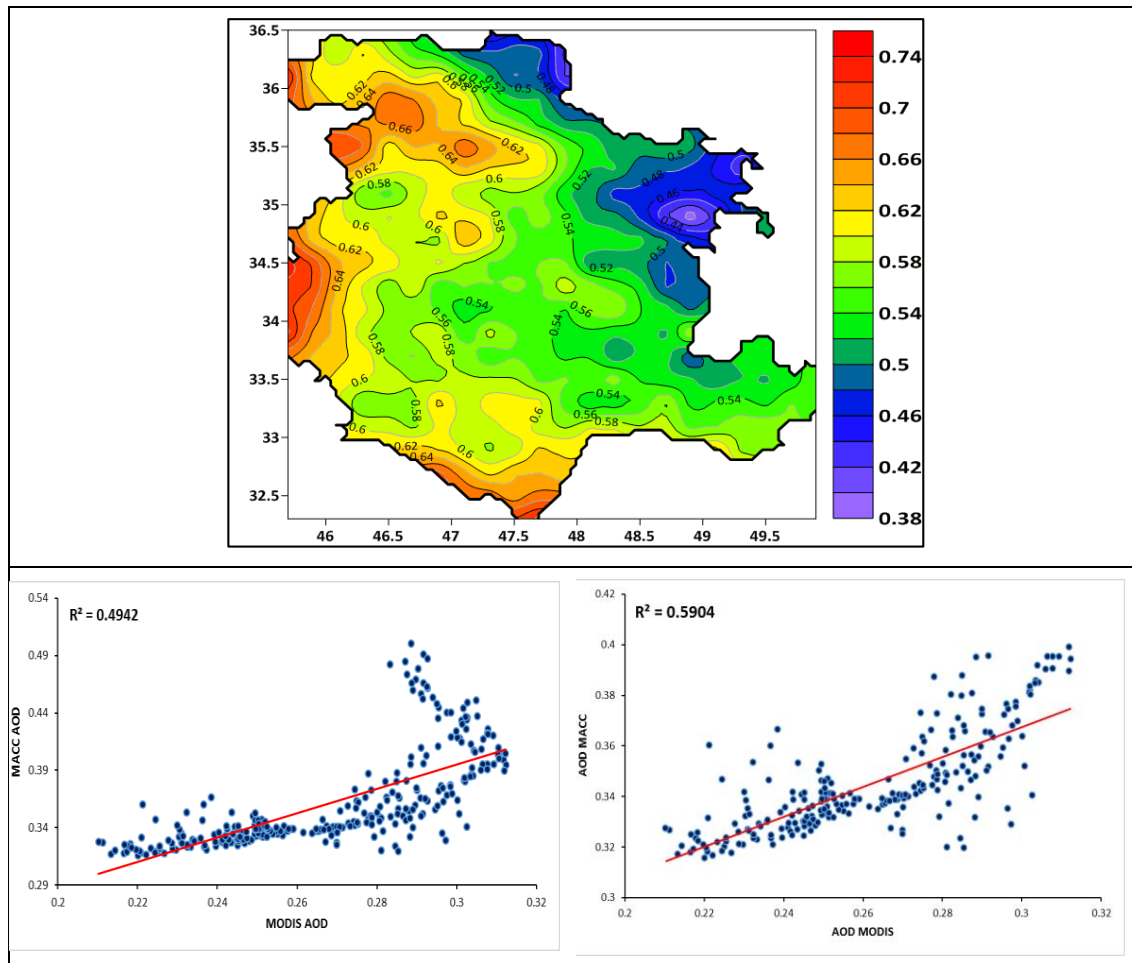
همبستگی عمق نوری آتروسل بین MODIS و MACC در شکل ۲ (چپ) نشان می‌دهد که میزان عمق نوری آتروسل در سطح منطقه‌ی مورد مطالعه بین یاخته‌های مدل و سنجنده بالا ( $R^2 = 49$ ) است. در یاخته‌هایی که مقدار AOD افزایش داشته است از میزان همبستگی کاسته شده و همبستگی بالا در یاخته‌هایی مشاهده شده است که دارای AOD کمتر از ۰/۳۵ می‌باشند. به عبارت دیگر، اختلاف برآورد AOD در مقدارهای بالاتر بوده و از همبستگی کمتری برخوردار است که این موضوع ناشی از مقدار بیشتر آن در برخی از پیکسل‌های مدل مورد بررسی نسبت به مشاهدات سنجنده بوده است. بنابراین بعد از حذف یاخته‌های دارای AOD بزرگ‌تر از ۰/۳۵، میزان ضریب تعیین به ۰/۵۹ می‌رسد (شکل ۲: راست). همچنین شکل ۴ (نقشه) نقشه همبستگی مکانی (همبستگی بین ۰/۳۸ تا ۰/۷۶) را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده ارتباط معنی‌دار بین پیکسل‌های MACC و MODIS در سطح منطقه مورد مطالعه می‌باشد و این ارتباط در استان‌های غربی منطقه مورد مطالعه بیشتر از شمال شرق منطقه (همدان) نمایان است. شایان ذکر است، تغییرات حاصله از همبستگی بین سنجنده و مدل در پژوهش حاضر به دلیل اینکه از بهترین تخمین پارامتر AOD در سنجنده MODIS استفاده شده و از پیکسل‌های کم‌اهمیت (flag 0) چشم‌پوشی شده است، چشمگیرتر است. جدول (۱) مقایسه میانگین AOD سنجنده و مدل در کل منطقه مورد مطالعه را نشان داده است. در مجموع، همبستگی بین سنجنده و مدل در برآورد میزان گردوغبار بالاست (شکل ۲)؛ و در سطح کل منطقه مورد مطالعه، بالاترین همبستگی بین داده‌های AOD سنجنده و مدل مربوط به ماه فوریه و اکتبر می‌باشد (جدول ۱ و شکل ۱).



شکل (۱). نمودار پراکندگی میانگین ماهانه AOD 550nm بین پیکسل های MACC و MODIS در کل منطقه مورد مطالعه

جدول (۱). مقایسه میانگین ماهانه AOD 550nm بین MACC و MODIS در کل منطقه مورد مطالعه

| فصل     | ماه     | MAE  | RMSE | r    | R <sup>2</sup> |
|---------|---------|------|------|------|----------------|
| زمستان  | ژانویه  | 0.04 | 0.05 | 0.39 | 0.15           |
|         | فوریه   | 0.02 | 0.03 | 0.80 | 0.63           |
|         | مارس    | 0.03 | 0.04 | 0.61 | 0.37           |
| بهار    | آوریل   | 0.08 | 0.09 | 0.68 | 0.45           |
|         | می      | 0.10 | 0.11 | 0.57 | 0.33           |
|         | ژوئن    | 0.10 | 0.11 | 0.49 | 0.23           |
| تابستان | جولای   | ۰.۱۶ | ۰.۱۷ | ۰.۴۴ | ۰.۱۹           |
|         | اگوست   | ۰.۱۷ | ۰.۱۸ | ۰.۵۹ | ۰.۳۵           |
|         | سپتامبر | ۰.۱۲ | ۰.۱۲ | ۰.۵۹ | ۰.۳۵           |
| پاییز   | اکتبر   | 0.15 | 0.15 | 0.72 | 0.52           |
|         | نوامبر  | 0.12 | 0.12 | 0.39 | 0.15           |
|         | دسامبر  | 0.03 | 0.04 | 0.45 | 0.20           |



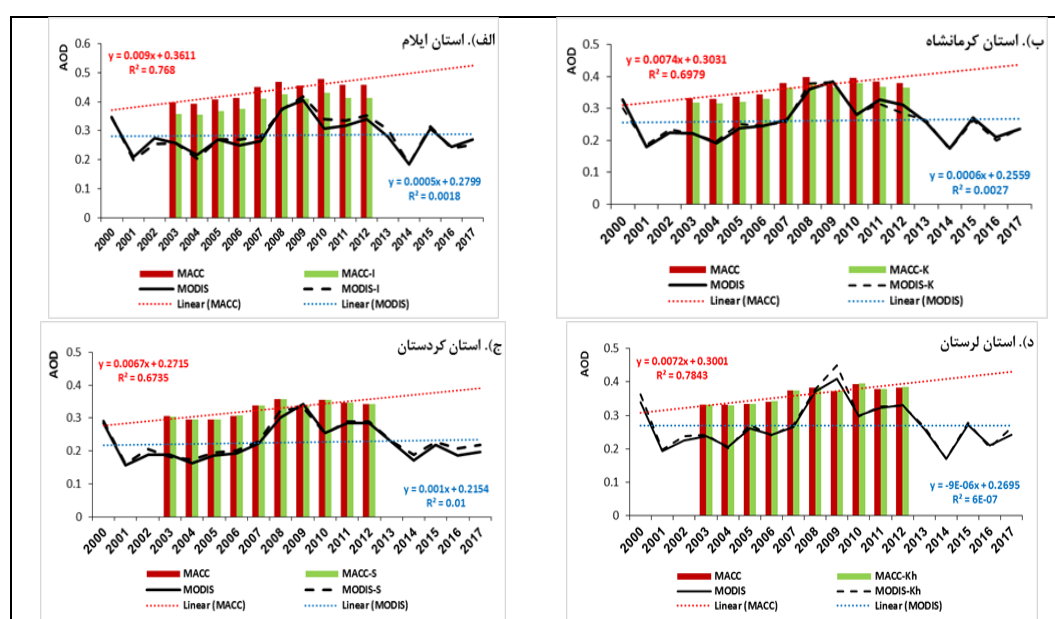
شکل (۲). همبستگی میانگین سالانه AOD 550nm بین پیکسل‌های MACC و MODIS در منطقه مورد مطالعه

نتایج حاصله از میانگین سالانه عمق نوری آتروسول (AOD) در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که تغییرات سالانه مقدار AOD از سال ۲۰۰۰ تا سال ۲۰۰۹ در سنجنده MODIS و از سال ۲۰۰۳ تا سال ۲۰۱۰ در MACC افزایش چشمگیری داشته است (شکل ۳). لازم به یادآوری است که مقدار AOD در سطح هر استان با نشانه MODIS و MACC و در سطح ایستگاه‌ها همراه با پسوند لاتین (ایلام: I، کرمانشاه: K، سنندج: S، خرم‌آباد: Kh و همدان: H) نشان داده شده است. شکل ۳ نشان می‌دهد که استان ایلام و ایستگاه سینوپتیک ایلام با بیشترین میزان AOD به ترتیب بین حداقل ۰/۳۹۸ تا حداکثر ۰/۴۷۷ در بین استان‌های مورد مطالعه و بین حداقل ۰/۳۵ تا حداکثر ۰/۴۳ در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه بر اساس مدل هستند.

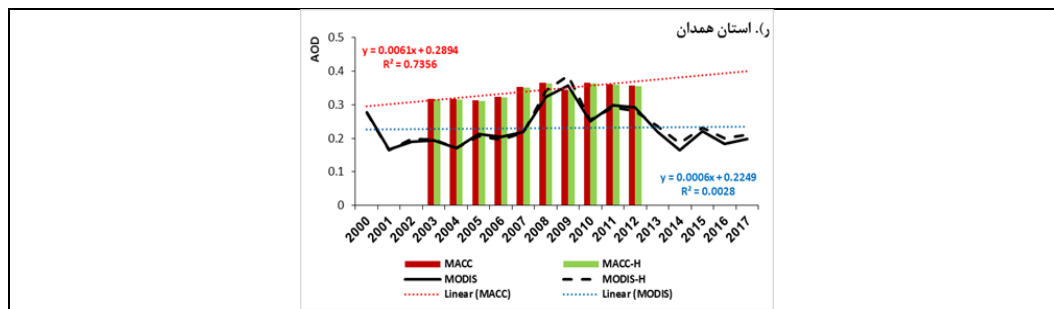
بررسی روند سالانه عمق نوری آتروسول در شکل ۳ نشان می‌دهد که مقدار AOD در پنج استان مورد مطالعه از سال ۲۰۰۰ تا سال ۲۰۰۹ در سنجنده MODIS روند افزایشی را نشان می‌دهد و از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ دارای شیب کاهشی است. شایان ذکر است، مقدار محاسبه شده در سال ۲۰۰۰ به دلیل کمبود تصاویر سنجنده MODIS از ماه ژانویه تا مارس مقدار بیشتری را نشان می‌دهد و نمی‌تواند نماینده واقعی AOD در تمام سطح منطقه مورد مطالعه در این سال باشد. نکته قابل ملاحظه بررسی سالانه AOD در این است که برخلاف بقیه استان‌ها و ایستگاه‌های مورد مطالعه، میزان AOD سنجنده در سطح استان لرستان با ایستگاه خرم‌آباد در سال ۲۰۰۸ دارای اختلاف قابل ملاحظه‌ای است و در ایستگاه

خرم‌آباد نسبت به سطح استان بیشتر مشاهده می‌شود. تفاوت چشمگیر استان لرستان با دیگر استان‌های کردستان، کرمانشاه و ایلام در این نکته است که مقدار AOD سنجنده (۰/۴۴) بیشتر از مدل (۰/۳۷) در سال ۲۰۰۹ گزارش شده است، این مقدار در ایستگاه خرم‌آباد تفاوت چشمگیری را نسبت به سطح استان داشته و برآورد پایین مدل را در ایستگاه خرم‌آباد و سطح استان لرستان نسبت به سنجنده نشان می‌دهد (شکل ۳: د). اختلاف مشابه استان لرستان در میانگین AOD مدل و مشاهدات سنجنده در شکل ۳ (ر) برای ایستگاه سینوپتیک همدان نیز صادق است. در مجموع، میانگین AOD سالانه بدست آمده از الگوریتم Deep Blue سنجنده در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه بجز در مواردی همچون ایستگاه‌های همدان و خرم‌آباد در سایر استان‌های مورد مطالعه مقدار کمتری را نسبت به مدل نشان داد. همچنین روند تغییرات سالانه در مدل در کل دهه مورد مطالعه از ۲۰۰۳-۲۰۱۲ روبه افزایش بوده است. ولی AOD مشاهداتی سنجنده در همه استان‌ها تا سال ۲۰۰۹ افزایش داشته و بعد از سال ۲۰۰۹ این روند رو به کاهش گذاشته است (شکل ۳).

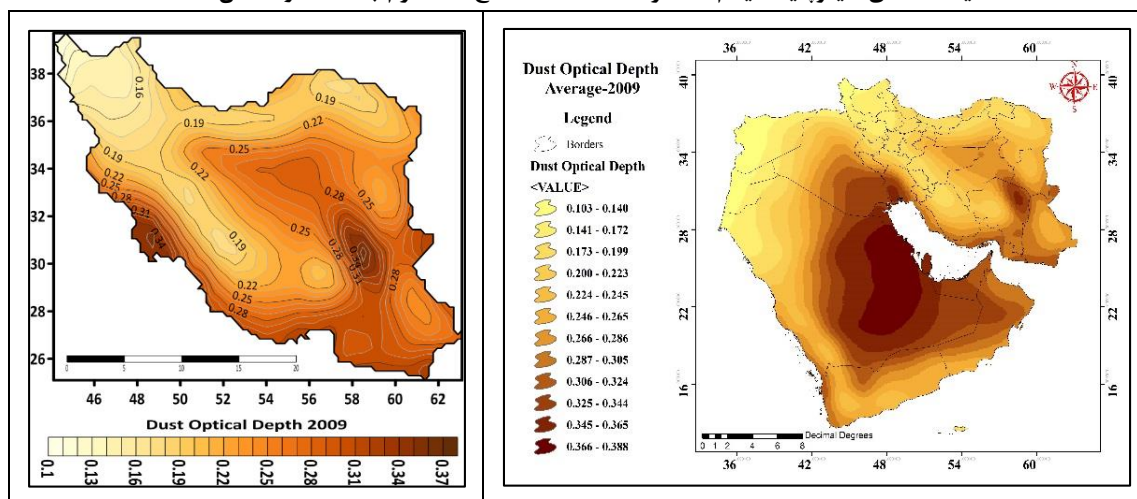
شکل ۴ نقشه میانگین عمق نوری گردوغبار (DOD) را در سال ۲۰۰۹ نشان می‌دهد که در این سال سنجنده و مدل در برآورد AOD در استان‌های مورد مطالعه باهم منطبق بوده‌اند. در شکل ۴ به‌وضوح نمایان است که مقدار گردوغبار دارای الگوی جنوبی- شمالی است و از عرض جغرافیایی تبعیت می‌کند که دلیل روشنی بر موقعیت استان‌ها با توجه به فصول و ماه‌های تولید و انتقال گردوغبار و مجاورت آن‌ها با منابع مستعد گردوغبار در خاورمیانه دارد. روند افزایشی گردوغبار حاصل از پژوهش اخیر، بیشتر در مطالعات انجام شده در غرب کشور نیز نشان داده شده است (Akbari & Namdari et al., 2018; Farahbakhshi, 2015; Arkian & Nicholson, 2018). و افزایش و شدت گردوغبار را تأیید می‌کند. همچنین، این میزان افزایش گردوغبار تا سال ۲۰۰۹ نیز در مطالعه‌ای با مقیاس جهانی با استفاده از AOD سنجنده MODIS بررسی شده است (Mao et al., 2008)، و می‌توان گفت که این روند افزایشی شدید گردوغبار در منطقه مورد مطالعه تابع فعالیت منابع گردوغبار در منطقه خاورمیانه بوده است و منابع گردوغباری محلی و داخلی چندان نقش اساسی در آلودگی منطقه نداشته‌اند.







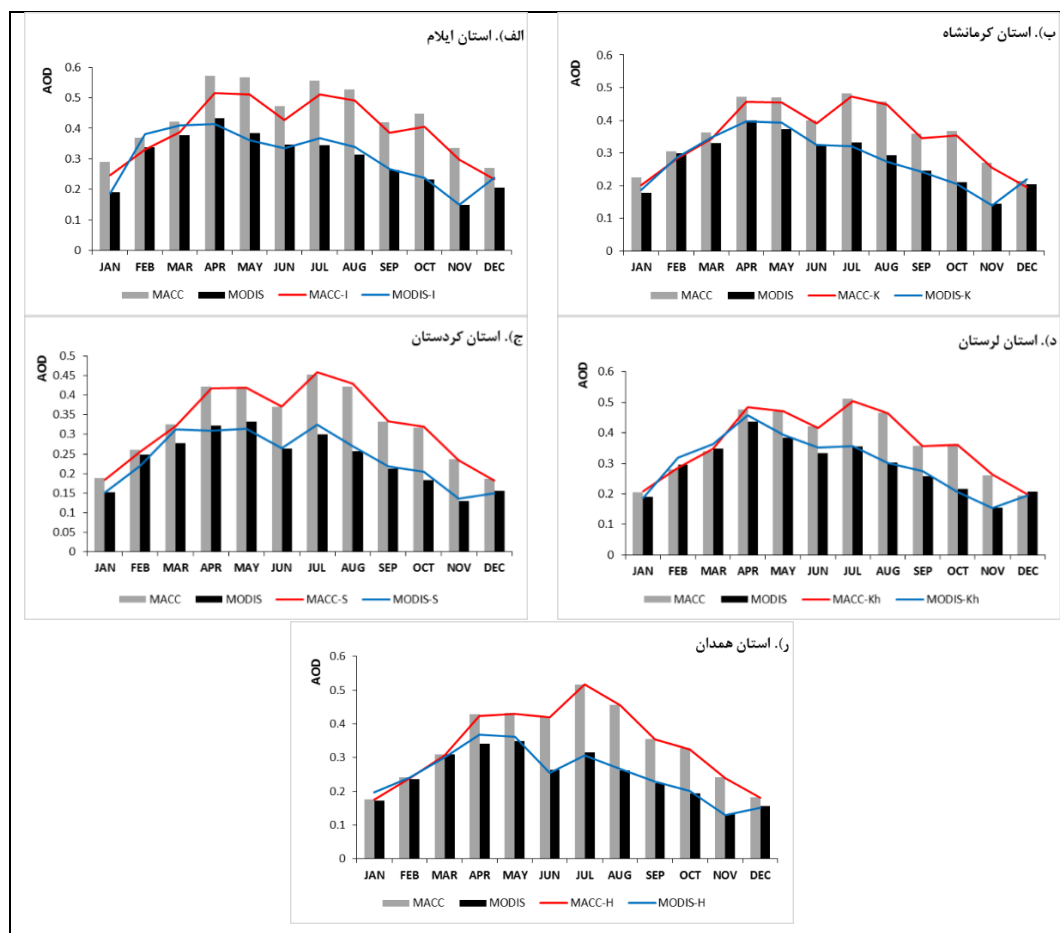
شکل (۳). میانگین سالانه AOD 550nm در استان‌های ایلام، کرمانشاه، کردستان، لرستان و همدان (MACC & MODIS) و ایستگاه‌های سینوپتیک ایلام (I)، کرمانشاه (K)، سنندج (S)، خرم‌آباد (Kh) و همدان (H)



شکل (۴). نقشه میانگین سالانه عمق نوری گردوغبار در سال ۲۰۰۹

نتایج حاصل از بررسی توزیع میانگین ماهانه AOD در منطقه مورد مطالعه در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق شکل ۵ میزان AOD مدل در سطح پنج استان مورد مطالعه نسبت به میزان مشاهدات سنجنده در ماه‌های مختلف سال بیشتر است. شکل ۵ نشان می‌دهد که بیشترین مقدار گردوغبار در بین استان‌ها و ایستگاه‌های مورد مطالعه، متعلق به استان ایلام (۰/۵۷) و ایستگاه سینوپتیک ایلام (۰/۵۱) در ماه آوریل و حداقل آن مربوط به ماه دسامبر برابر با ۰/۲۶ و ۰/۲۳ به ترتیب برای استان و ایستگاه سینوپتیک ایلام بر اساس مدل است. میزان مورد بحث در مشاهدات ماهواره‌ای بین ۰/۱۴ تا ۰/۴۳ و ۰/۱۵ تا ۰/۴۱ به ترتیب برای استان و ایستگاه سینوپتیک ایلام می‌باشد (شکل ۵: الف). همچنین کمترین مقدار عمق نوری آئروسول متعلق به استان کردستان و ایستگاه سینوپتیک سنندج بین ۰/۱۸ تا ۰/۴۵ برای مدل و بین ۰/۱۲ تا ۰/۳۳ برای مشاهدات ماهواره بود (شکل ۵: ج). در مجموع، کمترین میزان همخوانی و حداکثر اختلاف در میزان AOD بین سنجنده و مدل در بین استان‌های مورد مطالعه از جولای تا نوامبر به چشم می‌خورد که جزو ماه‌های خشک سال به حساب می‌آیند (شکل ۵). به‌طوری‌که در ماه‌های مرطوب سال از دسامبر تا مارس در سطح استان‌ها و ایستگاه‌های مورد مطالعه، مقدار AOD قابل توجهی نمایان نیست و ماهواره و مدل میزان مشابهی را نشان می‌دهند. یافته‌های MODIS و MACC در منطقه مورد مطالعه بیان می‌کنند که توزیع زمانی ماهانه گردوغبار از آوریل تا آگوست دارای بیشترین غلظت است. بنابراین، میزان شدت گردوغبار تا سال ۲۰۰۹ در منطقه خاورمیانه و در فصل تابستان و بهار و انتقال آن به غرب کشور در مطالعات پیشین خاورمیانه تأیید شده است که تحت تأثیر تغییرات پارامترهای آب و هوایی همچون سرعت بالای باد بر روی دریای سرخ و بیابان‌های عربستان، تغییرات رطوبت نسبی، کاهش بارش و کاهش رطوبت خاک

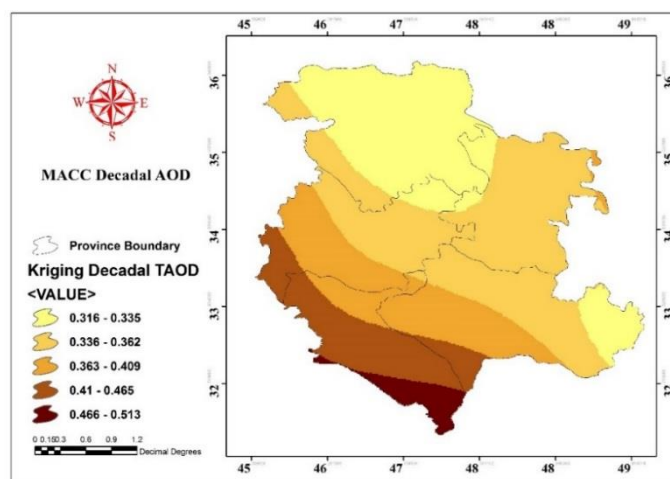
(Klingmüller et al., 2016; Chin et al., 2014) و نیز تغییرات کاربری زمین (Notaro et al., 2015) در منطقه خاورمیانه بوده و منجر به تشدید فعالیت های گردوغبار شده است. موضوع موردبجی که در این پژوهش نیز به تبعیت از روند گردوغبار در خاورمیانه، افزایش چشمگیری را در فصل بهار و تابستان در منطقه مورد مطالعه نشان داد.



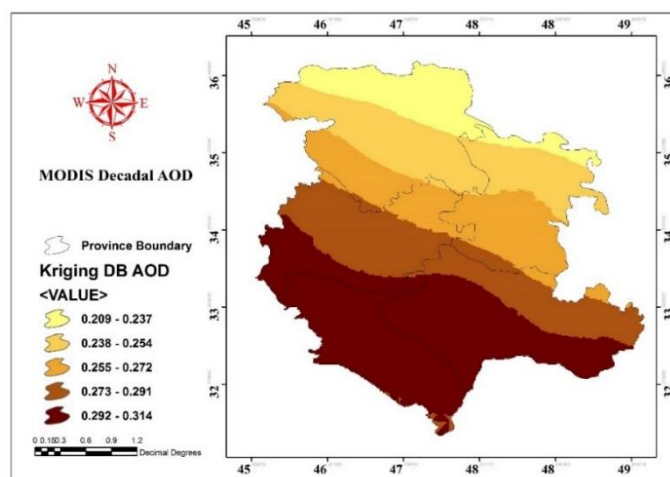
شکل (۳). میانگین ماهانه AOD 550nm در استان های ایلام، کرمانشاه، کردستان، لرستان و همدان (MACC & MODIS) و ایستگاه های سینوپتیک ایلام (I)، کرمانشاه (K)، سنندج (S)، خرم آباد (Kh) و همدان (H)

درون یابی توزیع مکانی میانگین در MACC طی دهه مورد مطالعه نشان داد که روند تغییرات مکانی از جنوب و ایستگاه ایلام به شمال کاهش داشته و به کمترین مقدار خود در شمال استان کردستان می رسد (شکل ۵). مطابق شکل ۵، بیشترین مقدار AOD در کل استان ایلام و غرب و جنوب استان کرمانشاه مشاهده می شود. شرق استان لرستان و شمال استان کردستان دارای کمترین گردوغبار در دهه مورد بررسی بر اساس مدل است. استان ایلام با بیشترین سطح گردوغبار تحت عنوان آلوده ترین استان گردوغباری در منطقه مورد مطالعه نمایان شده است (شکل ۵). پراکندگی مکانی گردوغبار در سطح استان کرمانشاه نیز نشان می دهد که بخش های غربی و جنوب غرب استان آلوده به حساب می آیند. همچنین توزیع فضایی گردوغبار در استان لرستان نشان می دهد که بیشترین گردوغبار مربوط به غرب استان و در هم جوار با استان ایلام به چشم می خورد که به تدریج به طرف شرق استان از غلظت آن کاسته می شود. آلاینده گردوغبار و سطح پوشش آن در استان همدان تقریباً یکسان بوده و AOD همه سطح استان بین ۰/۳۳ تا ۰/۳۶ می باشد (شکل ۵).

توزیع فضایی گردوغبار سالانه Deep Blue سنجنده MODIS در شکل ۶ نشان داده شده است، که مقدار گردوغبار در منطقه مورد مطالعه از جنوب غرب به شمال شرق با کاهش روبه‌رو بوده است. میزان تغییرات گردوغبار در منطقه بین ۰/۲۰ و ۰/۳۱ می‌باشد که استان ایلام با بیشترین مقدار گردوغبار در جنوب منطقه مورد مطالعه و در همجوار با بیابان‌های کشور عراق قابل ملاحظه است. همچنین، جنوب استان ایلام به دلیل ارتفاع کم منطقه نسبت به بقیه مناطق مورد مطالعه دارای غلظت و تراکم گردوغبار بالایی است. بیشترین گردوغبار بعد از ایلام به تفکیک استان مربوط به استان‌های لرستان، جنوب و غرب کرمانشاه، جنوب کردستان، شمال کرمانشاه و جنوب استان همدان می‌باشد. کمترین میزان گردوغبار با توجه به شکل ۶ مربوط به نوار باریکی در شمال استان همدان و شمال استان کردستان هست. در کل، روند مکانی گردوغبار در هر دو سنجنده و مدل از جنوب غرب منطقه مورد مطالعه به شمال شرق بوده است. با این اختلاف که شرق استان لرستان در MACC نسبت به سطح منطقه مورد مطالعه دارای گردوغبار کمتری است. ولی تغییرات فضایی سالانه گردوغبار در MODIS نشان می‌دهد که روند جنوب غرب به شمال شرق در سطح منطقه مورد مطالعه برخلاف مدل به صورت تدریجی و منظم است (شکل ۶).



شکل (۵). نقشه توزیع مکانی میانگین سالانه AOD 550nm برای MACC در غرب ایران (۲۰۰۳-۲۰۱۲)



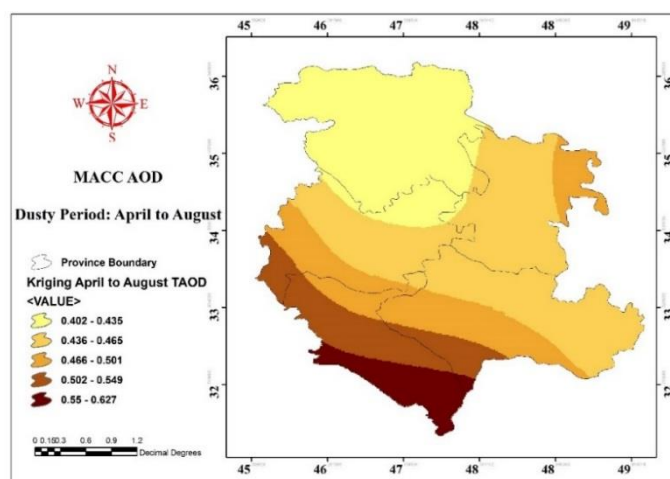
شکل (۶). نقشه توزیع مکانی میانگین سالانه AOD 550nm برای MODIS در غرب ایران (۲۰۰۳-۲۰۱۲)

شکل ۷ و ۸ توزیع فضایی گردوغبار را در سنجنده و مدل در ماه‌هایی از سال نشان می‌دهد که دارای بیشترین گردوغبار در طی دوره مطالعه می‌باشند. شکل ۷ میزان گردوغبار فصل خشک مدل را نشان می‌دهد که از الگوی سالانه مدل پیروی می‌کند و تغییرات گردوغبار از جنوب به شمال در حال کاهش است. به‌طوری‌که حداکثر گردوغبار در ایستگاه‌های جنوبی استان ایلام مشاهده می‌شود و با حرکت به سمت شمال از شدت آن کاسته می‌شود. تفاوت الگوی سالانه و فصلی گردوغبار در استان لرستان نشان می‌دهد که در الگوی سالانه میزان گردوغبار در بخش شرقی استان کمتر از بخش‌های دیگر استان بوده است (شکل ۵) ولی میزان گردوغبار در الگوی فضایی فصلی از روند عرض جغرافیایی پیروی کرده و با افزایش عرض جغرافیایی از میزان گردوغبار کاسته شده است. میزان AOD در سطح استان لرستان در فصل خشک بین حداقل ۰/۴۶ تا حداکثر ۰/۶۳ (شکل ۷) و الگوی سالانه بین حداقل ۰/۳۱ تا حداکثر ۰/۴۶ در حال تغییر بوده است (شکل ۵). همچنین، شکل ۷ نشان می‌دهد که توزیع مکانی گردوغبار در استان همدان بین ۰/۴ تا ۰/۵ و از غرب به شرق افزایش داشته و تابع طول جغرافیایی است. نتایج حاصل از توزیع گردوغبار نیز بر روی استان کردستان نیز نشان داد که کل استان از یکنواختی گردوغبار برخوردار است (شکل ۷) هرچند که در توزیع الگوی سالانه (شکل ۵) آشکار است که بخش‌های غربی به‌طرف جنوب در استان دارای شدت بیشتری نسبت به بخش‌های شمال و شمال شرق دارند.

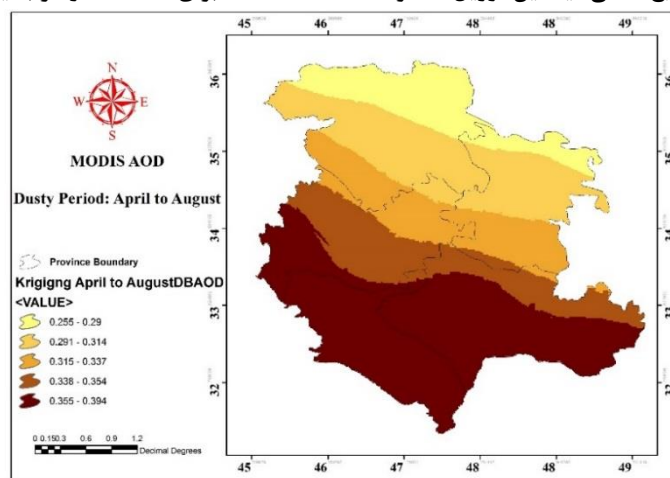
شکل ۸ میزان توزیع مکانی گردوغبار سنجنده MODIS را در طی دوره مورد مطالعه نشان می‌دهد. در شکل ۸ الگوی گردوغبار به‌وضوح نشان می‌دهد که با افزایش عرض جغرافیایی از شدت و تراکم گردوغبار کاسته شده است. میزان شدت AOD در جنوب منطقه و بر روی کل استان ایلام، بخش جنوبی استان کرمانشاه و نیمه جنوبی استان لرستان بیشتر از ۰/۳۵ مشاهده شده است. الگوی سالانه گردوغبار در استان کرمانشاه با الگوی فصل خشک از مارس تا آگوست کاملاً باهم مطابق بود و تنها اختلاف در نوسان غلظت گردوغبار آن‌هاست که در توزیع فصلی بیشتر است.

به‌طور جامع، یافته‌های توزیع مکانی سالانه و فصلی (دوره خشک از آوریل تا آگوست) گردوغبار نشان داد که MACC نسبت به مقدار مشاهداتی MODIS میزان گردوغبار منطقه مورد مطالعه را بیشتر نشان داده است و الگوی گردوغبار در هر دو سنجنده و مدل از جنوب به شمال افزایش نشان می‌دهد. ولی روند مکانی گردوغبار در سنجنده مورد بررسی منظم‌تر از مدل نشان داده شده است به‌طوری‌که در استان همدان میزان گردوغبار سالانه و فصلی در مدل تابع طول جغرافیایی است و از غرب به شرق در حال افزایش است، اما در سنجنده از روند مکانی کل منطقه مورد مطالعه تبعیت می‌کند. بی‌نظمی مذکور برای میانگین سالانه گردوغبار در MACC در شرق استان لرستان نیز قابل ملاحظه است و از روند جنوب به شمال منطقه پیروی نمی‌کند، بلکه از غرب به شرق افزایش نشان می‌دهد. توزیع مکانی گردوغبار در استان‌های ایلام، کرمانشاه و کردستان در MODIS و MACC نشان می‌دهد که گردوغبار در جنوبی‌ترین نقطه استان ایلام دارای بیشترین میزان و از غلظت بالایی برخوردار بوده و کمترین آن در شمال شرق استان کردستان مشاهده می‌شود. این وضعیت در توزیع مکانی گردوغبار نشان داد که گردوغبار در استان‌های غربی منطقه مورد مطالعه تابع عرض جغرافیایی است که توپوگرافی مرتفع استان‌های کرمانشاه و کردستان و مجاورت استان ایلام به منشأهای گردوغبار در توزیع شدت میزان گردوغبار نیز بی‌تأثیر نبوده است. این موضوع در مطالعات قبلی انجام گرفته در غرب کشور نشان داد که با شروع دوره گرم فعالیت گردوغبار افزایش داشته و شدت گردوغبار را به تبعیت از عرض جغرافیایی تحت‌الشعاع قرار داده است (Namdari et al., 2016). پس، فعالیت الگوهای گردش جوی و مجاورت منطقه مورد مطالعه با بیابان‌های عراق، سوریه و عربستان در تشدید گردوغبار قابل توجیه است. در مطالعه اخیر، به دلیل تفکیک مکانی ۱۰ کیلومترمربع

در یاخته‌ها، درک دقیق‌تری از توزیع مکانی گردوغبار استان‌ها و منطقه مورد مطالعه در سطح محلی به نمایش گذاشته شده است که تفکیک مکانی پایین مورد توجه مطالعات قبلی انجام گرفته در غرب ایران از نشان دادن آن‌ها عاجز بودند. بنابراین، دقت مطالعه در پراکنش نظم مکانی جنوب به شمال گردوغبار در استان‌های غربی منطقه مورد مطالعه نشان از رخداد گردوغبار به تبعیت از عرض جغرافیایی است؛ هرچند که از توپوگرافی مرتفع استان‌های کرمانشاه و کردستان نسبت به مناطق پست‌تر در جنوب ایلام، و مجاورت استان ایلام به منابع عمده گردوغبار در توزیع شدت میزان گردوغبار در ایلام و فعالیت الگوهای تابستانه مولد گردوغبار در دوره گرم نمی‌توان چشم‌پوشی کرد.



شکل (۷). نقشه توزیع مکانی میانگین آوریل تا آگوست AOD 550nm برای MACC در غرب ایران (۲۰۱۲-۲۰۰۳)



شکل (۸). نقشه توزیع مکانی میانگین آوریل تا آگوست AOD 550nm برای MODIS در غرب ایران (۲۰۱۲-۲۰۰۳)

### نتیجه‌گیری

رخداد گردوغبار فرایند پیچیده‌ای است که تحت تأثیر تعامل سیستم اتمسفر - زمین بوده و اغلب در نتیجه سرعت بالای باد، خاک عریان و خشک و شرایط آب و هوایی خشک ایجاد می‌شود. هرچند که گردوغبار در آسمان استان‌های غربی ایران در دوره‌های قبل نیز وجود داشته است، اما در دو دهه اخیر با توجه به خشک‌سالی‌ها و خشکی‌های پیاپی، کمبود آب و تغییر رطوبت خاک در منابع تولیدکننده گردوغبار، بر شدت آن افزوده است. پس، افزایش تکنیک‌های سنجش از دور و مدل‌های طراحی شده در شبیه‌سازی گردوغبار در دو دهه اخیر می‌تواند مطالعات را به سمتی هدایت کند که دارای کمترین خطا و بیشترین دقت در تحلیل رفتار گردوغبارها بوده و درک دقیقی را نمایان کند. در این بررسی به بررسی

رفتار گردوغبار و مقایسه مدل و سنجنده از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ پرداخته شد. نتایج نشان داد که همبستگی معنی‌داری در منطقه مورد مطالعه بین داده‌های تولید شده سنجنده و مدل وجود دارد و در تمام ماه‌های سال ضریب تعیین مذکور بیشتر از ۰/۴ می‌باشد. یافته‌های حاصل از میزان سالانه گردوغبار در MODIS بر پایه پارامتر AOD نشان داد که مقدار گردوغبار در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ در همه منطقه مورد مطالعه رو به افزایش بوده است و از سال ۲۰۰۹ به بعد این روند سالانه تا سال ۲۰۱۸ روبه کاهش گذاشته است. تغییرات مذکور سالانه AOD در استان ایلام دارای بیشترین مقدار (۰/۴۱) و کمترین مقدار آن نیز متعلق به استان کردستان (۰/۳۳) در سال ۲۰۰۹ بود. یافته‌های MACC نیز نشان دادند که AOD در سال‌های تحت بررسی دارای روند رو رشدی بوده است؛ هرچند که میزان گردوغبار تا سال ۲۰۱۰ دارای شیب شدیدی است ولی از سال ۲۰۱۰ به بعد میزان گردوغبار دارای شیب تغییرات یکنواختی در منطقه مرود مطالعه بود. بنابراین، غرب ایران دو دوره فعال (قبل از سال ۲۰۱۰) و غیرفعال (بعد از سال ۲۰۱۰) گردوغباری در طی ۱۸ سال مورد بررسی را تجربه کرده است. توزیع ماهانه و فصلی میزان گردوغبار نیز نشان داد که میزان AOD در MACC همانند توزیع زمانی سالانه بیشتر از مقدار AOD در MODIS است و اختلاف مذکور در ماه‌های خشک سال بین سنجنده و مدل نسبت به ماه‌های مرطوب چشمگیرتر است. یافته‌های MODIS و MACC در منطقه مورد مطالعه بیان می‌کنند که توزیع زمانی ماهانه گردوغبار از آوریل تا آگوست دارای بیشترین غلظت است.

توزیع مکانی سالانه و فصلی (ماه‌های دارای بیشترین AOD) گردوغبار در پژوهش حاضر نیز نشان داد که شدت برآورد گردوغبار در MACC نسبت به MODIS در منطقه مورد مطالعه بیشتر است. هرچند که میزان گردوغبار در سنجنده و مدل دارای یک الگوی تقریباً مشابه و از جنوب به شمال افزایش دارد، اما روند مذکور در MODIS منظم‌تر از MACC است. ناهم‌هنگی الگوی مکانی مورد بحث AOD در استان همدان بیشتر نمایان است، به‌طوری‌که میزان گردوغبار سالانه و فصل خشک (ماه‌های دارای بیشترین AOD) در MACC تابع طول جغرافیایی است و از غرب به شرق در حال افزایش است، ولی AOD همدان در MODIS از روند مکانی کل منطقه تبعیت کرده و به‌صورت مورب از جنوب استان ایلام تا شمال استان کردستان به تدریج کاهش می‌یابد. همچنین، ناهم‌هنگی بین مدل و سنجنده در الگوی میانگین سالانه نیز نشان داد که میزان گردوغبار در شرق استان لرستان در مدل کمتر از بقیه نقاط استان است و همچون سنجنده از روند منظم جنوب به شمال منطقه پیروی نمی‌کند. بالعکس، توزیع مکانی گردوغبار در استان‌های ایلام، کرمانشاه و کردستان برای MODIS و MACC در جنوبی‌ترین نقطه استان ایلام دارای بیشترین میزان و کمترین آن در شمال شرق استان کردستان مشاهده می‌شود.

## منابع

- اکبری، مهری و فرحناز فرحبخشی. ۱۳۹۵. تحلیل سینوپتیکی و شبیه‌سازی حرکت طوفان‌های شدید گردوغبار (مطالعه مورد: جنوب غرب ایران)، فصلنامه علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی، ۱۶(۵۵): ۲۹۱-۲۷۳.
- ترکاشوند، محمدقاسم. ۱۳۹۷. مدل‌سازی گردش منطقه‌ای جو در رخداد شدیدترین توفان ریز گرد بهاره غرب ایران، مجله مخاطرات محیط طبیعی، ۵(۲): ۱۹-۳۴.
- حجازی زاده، زهرا؛ میثم طولابی نژاد؛ زهرا زارعی چقابلیکی و بهزد امرایی. ۱۳۹۷. پایش طوفان گردوغبار در نیمه غربی ایران مطالعه موردی: طوفان گردوغبار ۱۶-۱۹ ژوئن ۲۰۱۰، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال پنجم، ۴: ۱۰۷-۱۲۴.

ززولی، محمد فلاح، علیرضا وفایی نژاد؛ میر مسعود خیرخواه زرکش و فریبرز احمدی دهکا. ۱۳۹۳. پایش و تحلیل سینوپتیکی پدیده گردوغبار با استفاده از سنجش‌ازدور و GIS، (مطالعه موردی: گردوغبار ۱۸ ژوئن ۲۰۱۲)، فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سیپهر)، ۲۳(۹۱).

زینالی، بتول. ۱۳۹۵. بررسی روند تغییرات فراوانی روزهای همراه با توفان‌های گردوغباری در نیمه غربی ایران، مجله مخاطرات محیط طبیعی، ۵ (۷): ۸۷-۱۰۰.

ساری صراف، بهروز، علی اکبر رسولی، آذر زرین و محمد سعید نجفی. ۱۳۹۶. شبیه قائم سامانه‌های گردوغبار زا در ارتباط با سامانه‌های همدید و توپوگرافی در غرب ایران، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۹ (۲): ۱۶۹-۱۸۹.

Akbary M. and M. Farahbakhshi (2015), Analyzing and Tracing of Dust Hazard in Recent Years in Kermanshah Province, *Int. J. Environ. Res.*, **9**(2):673-682.

Arkian F. & S. E. Nicholson (2018), Long-term variations of aerosol optical depth and aerosol radiative forcing over Iran based on satellite and AERONET data, *Environ Monit Assess* **190**: 1-15.

Ashrafi Khosro, Majid Shafiepour-Motlagh, Alireza Aslemand and Sarmad Ghader (2014), Dust storm simulation over Iran using HYSPLIT, *Journal of Environmental Health Science and Engineering* :1-9.

Bangert, M., and Coauthors (2012) Saharan dust event impacts on cloud formation and radiation over Western Europe, *Atmos. Chem. Phys.*, **12**: 4045–4063.

Chin, M., Diehl, T., Tan, Q., Prospero, J. M., Kahn, R. A., Remer, L. A., Yu, H., Sayer, A. M., Bian, H., Geogdzhayev, I. V., Holben, B. N., Howell, S. G., Huebert, B. J., Hsu, N. C., Kim, D., Kucsera, T. L., Levy, R. C., Mishchenko, M. I., Pan, X., Quinn, P. K., Schuster, G. L., Streets, D. G., Strode, S. A., Torres, O., and Zhao, X.-P. (2014), Multi-decadal aerosol variations from 1980 to 2009: a perspective from observations and a global model, *Atmos. Chem. Phys.*, **14**: 3657–3690, doi:10.5194/acp-14-3657-2014.

Gharibzadeh Maryam, Khan Alam, Abbasali Aliakbari Bidokhti, Yousefali Abedini, Amir Masoumi (2017), Radiative Effects and Optical Properties of Aerosol during Two Dust Events in 2013 over Zanzan, Iran, *Aerosol and Air Quality Research*, **17**: 888–898.

Harrison, S. P., K. E. Kohfeld, C. Roelandt, and T. Claquin (2001), The role of dust in climate changes today, at the last glacial maximum and in the future, *Earth-Sci. Rev.*, **54** (1–3): 43–80

Haywood, J. M., and O. Boucher (2000), Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review, *Rev. Geophys.*, **38**: 513–543.

Haywood, J., Pete Francis, Simon Osborne, Martin Glew, 1 Norman Loeb, Eleanor Highwood, Didier Tanre', Gunnar Myhre, Paola Formenti, and Edwin Hirst (2003), Radiative properties and direct radiative effect of Saharan dust measured by the C-130 aircraft during SHADE: 1. Solar spectrum, *J. Geophys. Res.*, **108**, D188577, doi: 10.1029/D2002JD002687.

IPCC: Climate Change (2013) the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P. M., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, **1535 p.**, 2013.

Jayaraman, A., D. Lubin, S. Ramachandran, V. Ramanathan, E. Woodbridge, W. D. Collins, and K. S. Zalupuri (1998), direct observation of aerosol radiative forcing over the tropical Indian Ocean during the January-February 1996 pre-INDOEX cruise, *J. Geophys. Res.*, **103** (D12): 13827–13836.

Jayaraman, S., Y. Song, L. Vetrivel, L. Shankar, and A. S. Verkman (2001) Noninvasive in vivo fluorescence measurement of airway-surface liquid depth, salt concentration, and pH, *J. Clin. Invest.* **107**: 317–324.

Kaufman, Y.J., Tanre, D., Boucher, O. (2002) a satellite view of aerosols in the climate system. *Nature* **419**: 215–223.

Klingmüller, K., Pozzer, A., Metzger, S., Stenchikov, G. L., and Lelieveld, J. (2016), Aerosol optical depth trend over the Middle East, *Atmos. Chem. Phys.*, **16**: 5063–5073, doi:10.5194/acp-16-5063-2016.

Levin, Z., E. Ganor, and V. Gladstein (1996), the effect of desert particles coated with sulfate on rain formation in the eastern Mediterranean, *J. Appl. Meteor.*, **35**: 1511–1523.



- Levy, R. C., Remer, L. A., and Dubovik, O. (2007): Global aerosol optical properties and application to Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer aerosol retrieval over land, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **112**: D13210, doi: 10.1029/2006JD007815.
- Levy, R.C., Mattoo, S., Munchak, L.A., et al., (2013) The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. *Atmos. Meas. Tech.* **6** (11): 2989e3034.
- Lohmann, U., Feichter, J., 2005. Global indirect aerosol effects: a review. *Atmospheric Chemistry and Physics* **5**: 715–737.
- Ma, Z.-W., Hu, X.-F., Sauer, A.M., et al., (2016), Satellite-based spatiotemporal trends in PM<sub>2.5</sub> concentrations: China, 2004e2013. *Environ. Health Perspect.* **124** (2), 184e192. <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1409481s>.
- Maley, J. (1982), Dust, clouds, rain types and climatic variations in tropical north Atlantic, *Quat. Res.*, **18**: 1–6.
- Mao K.B., Y. Ma, L. Xia, Wendy Y. Chen, X.Y. Shen, T.J. He, T.R. Xu (2014), Global aerosol change in the last decade: An analysis based on MODIS data, *Atmospheric Environment* **94**: 680-686.
- Mei, Di, Xiushan, Lu, Lin, Sun, Ping, Wang. (2008). A Dust-Storm process dynamic monitoring with multi-temporal MODIS data, the international archives of the photogrammetric, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. **Vol. XXXVII, Part B7**, Beijing, pp 965-970.
- Morcrette, J.-J., Boucher, O., Jones, L., Salmond, D., Bechtold, P., Beljaars, A., Benedetti, A., Bonet, A., Kaiser, J. W., Razinger, M., Schulz, M., Serrar, S., Simmons, A. J., Sofiev, M., Suttie, M., Tompkins, A. M., and Untch, A. (2009), Aerosol analysis and forecast in the ECMWF integrated forecast system. Part I: Forward modelling, *J. Geophys. Res.*, **114**: D06206 doi: 10.1029/2008JD011235.
- Nakajima, T., A. Higurashi, K. Kawamoto, and J. E. Penner (2001), A possible correlation between satellite-derived cloud and aerosol microphysical parameters, *Geophys. Res. Lett.*, **28**: 1171–1174.
- Namdari Soodabeh, Neamat Karimi, Armin Sorooshian, GholamHasan Mohammadie, Saviz Sehatkashani (2018), Impacts of climate and synoptic fluctuations on dust storm activity over the Middle East, *Atmospheric Environment* **173**: 265–276.
- Namdari1 S. & KK Valizade2 & A.A. Rasuly1,3 & B. Sari Sarraf1 (2016), Spatio-temporal analysis of MODIS AOD over western part of Iran, *Arab J Geosci*: **9**:191.
- Notaro, M., Yu, Y., and Kalashnikova, O. V. (2015), Regime shift in Arabian dust activity, triggered by persistent Fertile Crescent drought, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, **120**: 10229–10249, doi: 10.1002/2015JD023855.
- Pan, L., H. Che, F. Geng, X. Xia, Y. Wang, C. Zhu, M. Chen, W. GAO and L. Guo, (2010), Aerosol optical properties based on ground measurements over the Chinese Yangtze Delta Region. *Atmos Environ*, **44**: pp. 2587– 2596.
- Penner, J. E., M. Andreae, H. Annegarn, L. Barrie, J. Feichter, D. Hegg, R. Leaitch, D. Murphy, J. Nganga, and G. Pitari (2001), Aerosols, their direct and indirect effects, in *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, edited by J. T. Houghton et al., pp. 289 – 348, Cambridge Univ. Press, New York
- Rosenfeld, D., Lohmann, U., Raga, G. B., O'Dowd, C. D., Kulmala, M., Fuzzi, S., Reissell, A., and Andreae, M. O. (2008), Flood or Drought: How do aerosols affect precipitation?, *Science*, **321**: 1309–1313, doi:10.1126/science.1160606.
- Rosenfeld, J. E., D. B. Considine, P. E. Meade, J. T. Bacmeister, C.H. Jackman, and M.R. Schoeberl (1997), stratospheric effects of Mount Pinatubo aerosol studied with a coupled two-dimensional model, *J. Geophys. Res.*, **102**: 3649–3670.
- Satheesh, S. K., and V. Ramanathan (2000), large differences in tropical aerosol forcing at the top of the atmosphere and Earth's surface, *Nature*, **405**: 60–63.
- Sayer, A.M., Hsu, N.C., Bettenhausen, C., et al., (2013), Validation and uncertainty estimates for MODIS Collection 6 “Deep Blue” aerosol data. *J. Geophys. Res. Atmos.* **118** (14), 7864e7872. <http://dx.doi.org/10.1002/jgrd.50600>.
- Sokolik, I. N., et al. (2001), Introduction to special section: Outstanding problems in quantifying the radiative impacts of mineral dust, *J. Geophys. Res.*, **106** (D16): 18015–18028
- Tegen, I., A. A. Lacis, and I. Fung (1996), the influence of mineral aerosols from disturbed soils on the global radiation budget, *Nature*, **380**: 419–422, doi: 10.1038/380419a0.



- Tegen, I., P. Hollrig, M. Chin, I. Fung, D. Jacob, and J. Penner (1997), Contribution of different aerosol species to the global aerosol extinction optical thickness: Estimates from model results. *J. Geophys. Res.*, **102 (D20)**: 23895–23916.
- Van Donkelaar, A., Martin, R.V., Brauer, M., et al., (2010), Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: development and application. *Environ. Health Perspect.* **118 (6)**: 847e855.
- Van Donkelaar, A., Martin, R.V., Brauer, M., et al., (2015), Use of satellite observations for long-term exposure assessment of global concentrations of fine particulate matter. *Environ. Health Perspect.* **123 (2)**: 135e143.
- Wong Sun, Andre E. Dessler, Natalie M. Mahowald Ping Yang and Qian Feng (2009), Maintenance of Lower Tropospheric Temperature Inversion in the Saharan Air Layer by Dust and Dry Anomaly, *American Meteorological Society*, **Volume 22**: 5149-5162, **DOI**: 10.1175/2009JCLI2847.1
- Wong, S., and A. E. Dessler (2005), Suppression of deep convection over the tropical North Atlantic by the Saharan air layer, *Geophys. Res. Lett.*, **32**: L09808, **doi**: 10.1029/2004GL022295.
- Wurzler, S. C., T. G. Reisin, and Z. Levin (2000), Modification of mineral dust particles by cloud processing and subsequent effects on drop size distributions, *J. Geophys. Res.*, **105 (D4)**: 4501–4512.
- Xuemei Zong 1, Xiangao Xia 1,2, Huizheng Che (2015), Validation of aerosol optical depth and climatology of aerosol vertical distribution in the Taklimakan Desert, *Atmospheric Pollution Research* **6** : 239-244.

