

آنالیز زمانی و مکانی طوفان‌های گردوغبار در شهر کرمانشاه

سیدهدایت شیخ قادری؛ کارشناس ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

طوبی علیزاده^۱؛ دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

پرویز ضیائی‌ان فیروزآبادی؛ دانشیار سنجش از دور، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

رحمن شریفی؛ کارشناسی ارشد آب و هواشناسی، گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۰۷ پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۱۱/۲۵

چکیده

پژوهش حاضر با هدف آنالیز زمانی و مکانی طوفان‌های گردوغبار طی بازه‌ی زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸ در شهر کرمانشاه با بهره‌گیری از مدل مسیریابی HYSPLIT و پروداکت MCD۱۹A۲ سنجنده‌ی مودیس در سامانه‌ی تحت وب گوگل ارث انجین انجام گرفت. جهت مسیریابی منشأ ذرات گردوغبار از روش لاگرانژی مدل HYSPLIT در ۴۸ ساعت قبل از وقوع پدیده گردوغبار در کرمانشاه در سه سطح ارتفاعی ۲۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ متری مورد استفاده قرار گرفت. یافته‌های حاصل از نقشه‌های ردیابی مدل HYSPLIT حاکی از آن است که مسیر کلی برای انتقال گردوغبار به منطقه مورد مطالعه مسیر شمال غرب - جنوب شرق با منشأ بیابان‌های عراق و سوریه در سه ارتفاع ۲۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ متری در روزهای ۱۷ ژوئن ۲۰۱۶ و ۲۷ اکتبر ۲۰۱۸ و همچنین مسیر جنوب غرب به غرب با منشأ کویت، شمال عربستان و بخشی از عراق در ۲ نوامبر ۲۰۱۷ می‌باشد. نتایج نقشه‌های حاصل از پروداکت MCD۱۹A۲ سنجنده‌ی مودیس علی‌الخصوص نقشه‌های تناوب رخداد، غلظت تجمعی، تغییرات مکانی و نقشه بیشترین میزان AOD نشان از همبستگی بالا با نقشه‌های مسیریابی شده مستخرج از مدل HYSPLIT دارد. به‌طور کلی بر اساس یافته‌های حاصل از نقشه‌های مستخرج از پروداکت MCD۱۹A۲ سنجنده مودیس طی بازه‌ی زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸ شهر کرمانشاه، مناطق مرکزی و شرقی همواره بیشتر از دیگر مناطق شهر درگیر طوفان گردوغبار گردیده و در این راستا مناطق فوق به‌صورت متوسط، نسبت به دیگر مناطق شهر بیشتر با آلودگی ناشی از گردوغبار مواجه بوده‌اند. در این راستا نتایج نهایی نشان‌دهنده‌ی همبستگی بالا بین داده‌های PM_{۱۰} واقعی و مقادیر AOD مشتق شده از سنجنده مودیس می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: گردوغبار، AOD، مودیس، HYSPLIT، کرمانشاه، گوگل ارث انجین.

مقدمه

یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی به وجود آمده در منطقه خاورمیانه و ایران در سال‌های اخیر پدیده گردوغبار می‌باشد. این پدیده امروزه به یکی از مشکلات اساسی در مناطق خشک و نیمه‌خشک تبدیل شده است. پدیده‌ی گردوغبار به‌عنوان پدیده‌ای اقلیمی در تمام شرایط آب و هوایی رخ می‌دهد که اثرات نامطلوب اجتماعی، اقتصادی، زیست‌محیطی و تجاری را سبب می‌گردد. همچنین حجم فراوان ذرات حمل شده به تروپوسفر، بیلان انرژی را تحت تأثیر قرار می‌دهد که متعاقب آن شرایط آب و هوایی و اقلیم آن ناحیه نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد (شمسی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱). از عوامل اصلی و مؤثر در رخداد پدیده گردوغبار، موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی مناطق منشأ و مناطق تحت تأثیر این پدیده می‌باشد. قرارگیری ایران در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان و از طرف دیگر مجاورت با کشورهای چون عربستان، عراق و سوریه که دارای فقر پوشش گیاهی بوده و به دلیل بارش اندک و دمای بالا اغلب مساحت این کشورها از بیابان تشکیل شده است و تحت تأثیر شرایط بیابانی، ناپایداری هوا و جریان باد در این مناطق که معمولاً شدید می‌باشد باعث بلند شدن گردوغبار از این نواحی می‌گردد (میری، ۱۳۹۰). پدیده‌ی طوفان‌های گردوغبار در سال‌های اخیر با تشدید بیابان‌زایی در کشورهای عراق و عربستان و سوریه جنبه‌های مختلفی از زندگی مردم کرمانشاه که در همسایگی کانون‌های گردوغباری هستند را متأثر ساخته است. با توجه به اهمیت آثار منفی طوفان‌های گردوغبار و همچنین روند افزایشی آن‌ها بررسی، تشخیص و تحلیل زمانی و مکانی ویژگی‌های این ریزگردها به منظور مدیریت این بحران و جلوگیری از اثرات زیان‌آور این ریزگردها بسیار مهم می‌باشد (Goudie, ۲۰۰۱). درگذشته به‌طور کلی پایش ذرات گردوغبار به کمک ایستگاه‌های زمینی انجام می‌گرفت که به دلیل ماهیت اندازه‌گیری نقطه‌ای از دقت بسیار بالایی برخوردار بودند اما گستره مکانی بسیار کوچکی شامل ستونی از گردوغبار بر فراز ایستگاه را پوشش می‌دادند، همچنین به دلیل نیاز به رسیدگی و مراقبت پیوسته از ایستگاه این امکان وجود داشت که در بازه‌های زمانی مختلفی به دلیل نقض فنی در ایستگاه، آرشيو داده‌های ایستگاه ناقص گردد. در چنین شرایطی دسترسی به منبعی مناسب که بتواند اطلاعات دقیقی از این پدیده‌ی دینامیک و تغییرات آن در گذر زمان در اختیار قرار دهد بسیار حائز اهمیت است. در این راستا در دهه‌های اخیر با پرتاب ماهواره‌های مختلف به مدار کره زمین و همچنین افزایش دقت سنجنده‌های ماهواره‌ای، استفاده از داده‌ها و تصاویر ماهواره‌ای به‌منظور تحلیل و بررسی پدیده‌های مختلف حوزه‌های زیست‌محیطی را ممکن ساخته است. به کمک تصاویر ماهواره‌ای و تکنیک‌های سنجش‌ازدور می‌توان تغییرات آتروسفیرهای موجود در اتمسفر شامل گردوغبار را در ابعاد مکانی بسیار وسیع با دقت بالا و به‌صورت روزانه پایش و مطالعه نمود. در این میان مطالعات مربوط به پایش تغییرات زمانی و مکانی چنین پدیده‌ی دینامیکی نیازمند اخذ و پردازش تصاویر ماهواره‌ای زیادی است که این حجم از داده می‌تواند زمان تجزیه‌وتحلیل و پردازش‌ها را بالا ببرد. لذا در دسترس بودن منبعی که بتواند این حجم از پردازش‌ها را کاهش دهد، می‌تواند مثر ثمر باشد. یکی از منابع اطلاعاتی که در پایش زمانی تغییرات قابلیت زیادی دارد، می‌توان به سامانه تخصصی سنجش‌ازدور تحت وب^۲ (GEE) اشاره کرد. گوگل ارث انجین یک پلتفرم رایانش ابری است که در سال ۲۰۱۰ توسط گوگل راه‌اندازی شد (Kumar and Mutanga, ۲۰۱۸). این سامانه تحت وب از زیرساخت محاسباتی گوگل و مجموعه داده‌های سنجش‌ازدور که در دسترس هستند استفاده می‌کند (Corelick et al, ۲۰۱۷). گوگل

^۲. Google Earth Engine

ارث انجین جدیدترین پلتفرم پردازش تصاویر ماهواره‌ای است که با فراهم آوردن امکان دسترسی آزاد کاربران به مجموعه داده‌های سنجنش‌ازدور، فرآیند کشف علمی را تسهیل می‌کند (Amani, et al, ۲۰۱۹,; Tamiminig, et al ۲۰۲۰). در واقع در این سامانه کاربران نیازی به نرم‌افزار و دانلود تصاویر مختلف برای پردازش ندارند. همچنین این سامانه توانسته است بسیاری از فرایندهای پردازش تصاویر ماهواره‌ای را در سال‌های اخیر آسان کند. در این میان طی سال‌های گذشته همراه با پیشرفت‌های چشم‌گیر سامانه گوگل ارث انجین، پروداکت‌های آماده هم که کاربران را از پیش‌پردازش‌های مختلف مانند تصحیح رادیومتریک، اتمسفری و هندسی و غیره بی‌نیاز می‌کند، توسعه‌یافته‌اند. یکی از پروداکت‌های بسیار مهم و کاربردی پروداکت آماده عمق اپتیکی آئروسول^۳ AOD سنجنده مودیس می‌باشد. پروداکت AOD سنجنده MODIS به‌صورت روزانه و با توان تفکیک مکانی ۱ کیلومتری در اختیار کاربران قرار می‌گیرد. در حقیقت پروداکت AOD نشان‌دهنده میزان آئروسول‌های موجود در جو و غلظت آن است. مطابق تعریف، عمق اپتیکی معیاری از ممانعت ذرات معلق و گردوغبار در برابر رسیدن نور خورشید به زمین است. به‌عبارت‌دیگر، ذرات معلق موجود در هوا توسط مکانیسم‌های جذب و پخش، ممانعت توسط پارامتر بدون بعد عمق اپتیکی تعیین می‌گردد. این معیار می‌تواند تا حدی تعیین‌کننده میزان کدورت هوا نیز باشد (Qi, et al, ۲۰۱۳). به‌طور مثال عدد ۰/۰۱ برای مقدار عمق اپتیکی، بیانگر آسمانی صاف و شفاف است درحالی‌که مقدار ۰/۴ نشان‌دهنده آسمانی کدر و تار است (Ichoku, et al, ۲۰۰۳). در همین راستا طی دو دهه اخیر، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به‌منظور پایش و ارزیابی گردوغبار در مطالعات داخلی و خارجی، افزایش چشمگیری داشته است (Lin et al, ۲۰۱۶; Mehta et al; ۲۰۱۶; Vijayakumar et al, ۲۰۱۶). در ادامه به بعضی از مهم‌ترین این تحقیقات که گاهاً با بهره‌گیری از سامانه‌ی گوگل ارث انجین بوده اشاره خواهد شد. کاسکاووتیس و همکاران (Kaskaoutis, et al, ۲۰۰۷) جهت پایش فصلی ذرات معلق بر فراز یونان از آمار طولانی‌مدت ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵ شاخص AOD محصول MODIS استفاده کردند. آن‌ها حداقل مقدار AOD را در زمستان ۰/۲ و ماکزیمم مقدار آن را در تابستان ۰/۴۵ مشاهده کردند. (راشکی و همکاران، ۲۰۱۶)، تغییرات زمانی و مکانی طوفان‌های گردوغبار منطقه سیستان ایران را با استفاده از داده‌های شاخص گردوغبار AI عمق نوری ذرات AOD حاصل سنجنده‌های MODIS, OML, TOMS و MISR را بررسی کردند و غلظت بالاتر ذرات معلق در اتمسفر در طول تابستان را نتیجه عمل ترکیبی خشک شدن فصلی دریاچه هامون و بادهای قوی لولار دانستند. (نامداری و همکاران، ۲۰۱۶)، با استفاده از میانگین ماهانه عمق اپتیکی گردوغبار را در بخش‌های غربی ایران و مناطق متأثر از آن‌ها در طول دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ را بررسی کردند. بر اساس نتایج این پژوهش، در بیشتر سال‌ها، جولای بالاترین میانگین AOD را دارد. (محمودی و ریگی چاهی، ۲۰۱۹) با بهره‌گیری پروداکت ماهانه‌ی AOD سنجنده‌ی مودیس در سامانه‌ی گوگل ارث انجین به پایش و ارزیابی تغییرات گردوغبار در حوضه‌ی جازموریان در جنوب‌شرقی ایران در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ پرداختند. یافته‌ی پژوهش آن‌ها حاکی از آن بود که تغییرات AOD برای ماه‌های ژانویه، فوریه، آوریل و مه قابل‌توجه بوده است و به‌طورکلی در ماه ژانویه این روند صعودی‌تر بوده است. (رضوی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۹) با بهره‌گیری پروداکت AOD سنجنده‌ی مودیس در سامانه تحت وب گوگل ارث انجین به بررسی پدیده گردوغبار در استان گلستان با تأکید بر شاخص عمق اپتیکی و سمت و سرعت باد پرداختند. یافته‌های پژوهش آن‌ها حاکی از این است که در سال ۱۳۸۸ مقدار AOD بیشترین شدت و غلظت را داشته و بیشترین میزان

^۳. Aerosol Optical Depth

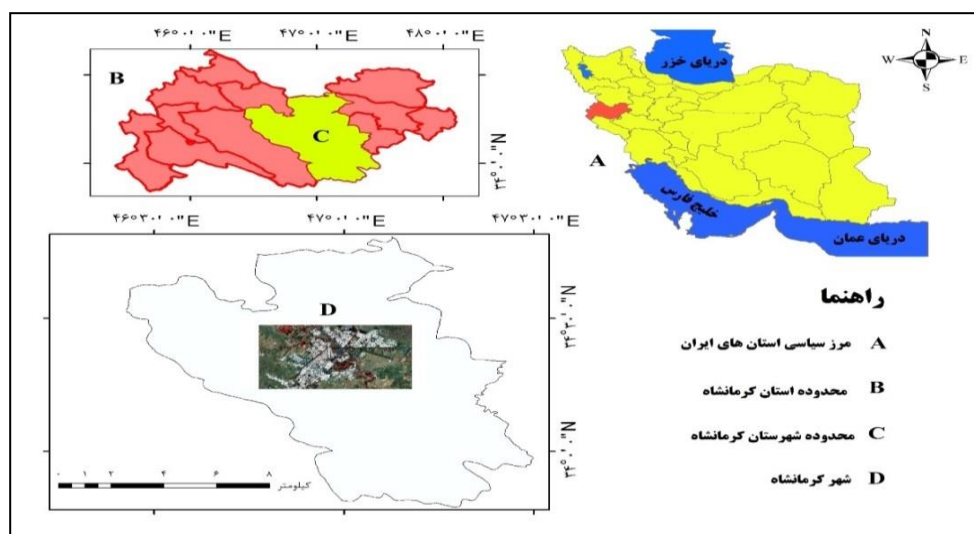
گردوغبار مربوط به ماه‌های تیر و مرداد بوده است. همچنین نتایج نهایی آن‌ها نشان‌دهنده‌ی این است که جهت گردوغبار در این استان غالباً غربی و جنوب‌غربی می‌باشد. (ناصرپور و همکاران، ۱۳۹۲) مطالعه‌ای باهدف شناسایی الگوهای سینوپتیکی مؤثر در ایجاد طوفان‌های گردوغبار و تشخیص مناطق خیزش این طوفان‌ها در جنوب غرب ایران برای دوره ۲۰۱۲-۱۹۹۰ با بهره‌گیری از تحلیل سینوپتیکی و پردازش تصاویر ماهواره‌ای NOAA/AVHRR انجام دادند. در ادامه‌ی همین مطالعات رانجان و همکاران و درویشی بلورانی و همکاران نیز در مطالعه و ارزیابی‌های خود مربوط به پدیده‌ی گردوغبار از سامانه‌ی نوین گوگل ارث انجین بهره گرفته‌اند (Ranjan, et al, ۲۰۲۰; Bolorani, et al, ۲۰۲۱).

با توجه به ادبیات تحقیق در ارزیابی و پژوهش‌های مربوط به پدیده‌ی گردوغبار، در سال‌های گذشته آنالیز تغییرات زمانی و مکانی این پدیده‌ی زیست‌محیطی با استفاده از فناوری سنجش از دور تسهیل شده است. هدف از پژوهش حاضر آنالیز زمانی و مکانی طوفان‌های گردوغبار در شهر کرمانشاه با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده‌ی مودیس می‌باشد. به‌طور کلی در این تحقیق با بهره‌گیری از پروداکت AOD سنجنده‌ی مودیس در محیط سامانه‌ی گوگل ارث انجین و همچنین میزان PM_{۱۰} موجود در هوا حاصل از ایستگاه‌های زمینی، وضعیت طوفان‌های با غلظت زیاد در شهر کرمانشاه در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸، مسیریابی، ارزیابی و مطالعه گردید.

داده‌ها و روش کار

• قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه

منطقه کرمانشاه در غرب ایران به دلیل نزدیکی به بیابان‌های کشورهای مجاور در معرض رخدادهای گردوغباری متعدد است. با توجه به مسیر حرکت سامانه‌ها و نحوه‌ی قرارگیری ناوه‌ها و کم فشارها در روزهای متفاوت، مهمترین چشمه‌های گردوغبار وارد به این منطقه، صحرای سوریه، کویت، بیابان‌های مرکزی و غربی عراق و بیابان نفود در عربستان است. از نظر موقعیت جغرافیایی محدوده‌ی مورد مطالعه در بین ۴۶ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۴ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۴ دقیقه عرض شمالی از نصف النهار گرینویچ قرار دارد. شهرستان کرمانشاه مساحتی بالغ بر ۲۴۶۴۰ کیلومتر مربع و ایستگاه آن ۱۴۲۰ متر از سطح دریا ارتفاع دارد. دارای آب و هوای خشک و نیمه خشک با جبهه‌های مرطوب مدیترانه‌ای است. متوسط میزان بارندگی آن بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ میلیمتر می‌باشد و میانگین دمای سالیانه ۱۶ درجه سانتیگراد است. جهت وزش بادهای غالب در این منطقه در طول سال غربی بوده که همراه با نوساناتی در جهت شمال غرب و جنوب غربی است (شکل ۱).

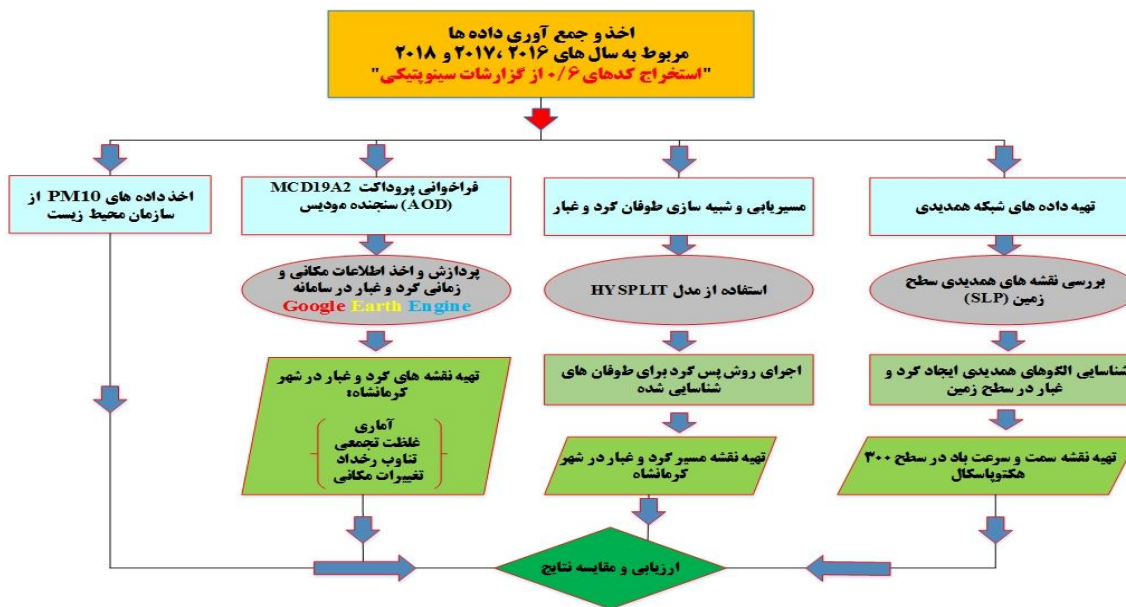


شکل ۱- موقعیت جغرافیایی شهر کرمانشاه در استان

• داده‌های مورد استفاده و روش کار

در پژوهش حاضر به منظور واکاوی و ارزیابی تغییرات زمانی و مکانی و هم‌چنین بررسی میزان غلظت گردوغبار در شهر کرمانشاه در سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸ از پروداکت آماده عمق اپتیکی آئروسول AOD با عنوان MCD19A2 سنجنده‌ی MODIS با بهره‌گیری از پردازشگر آنی گوگل ارث انجین انجام گرفت. همچنین جهت تحلیل سینوپتیک علل وقوع طوفان‌های گردوغبار از مجموعه داده‌های پیش‌بینی میان‌مدت جوی مرکز اروپایی^۴ با قدرت تفکیک ۰/۱۲۵ درجه قوسی شامل، فشار تراز دریا SLP، مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال در منطقه مورد مطالعه استفاده گردید. با استفاده از داده‌های فوق در به‌کارگیری نرم‌افزار GRADS؛ الگوهای بادی و سامانه‌ی همدیدی مؤثر در حمل و انتقال ریزگردها به شهر کرمانشاه ترسیم شد. در مرحله بعد با استفاده از مدل HYSPLIT، ذرات گردوغبار در سه سطح ۲۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ متری از سطح زمین در حواصل زمانی ۶ تا ۴۸ ساعت قبل از رخداد گردوغبار به روش لاگرانژی ردیابی شدند. در نهایت جهت ارزیابی و صحت نتایج حاصله از میزان ذرات معلق موجود در هوا (PM_{۱۰}) که توسط ایستگاه‌های زمینی اخذ شده‌اند، استفاده گردید و نهایتاً میزان همبستگی میزان AOD های حاصل از سنجنده مودیس و داده‌های زمینی محاسبه شد. (مدل مفهومی شکل ۲).

^۴. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts



شکل ۲: روند اجرای تحقیق

• پروداکت MCD19A2 سنجنده‌ی MODIS

داده‌های سنجنده MODIS به‌صورت آماده در قالب پروداکت‌های موضوعی در زمینه‌های مختلف منتشر می‌شود. یکی از این‌ها پروداکت عمق اپتیکی آئروسول AOD است. در حقیقت پروداکت AOD نشان‌دهنده میزان آئروسول‌های موجود در جو و غلظت آن است. هرچه مقدار عددی AOD بالاتر باشد میزان آئروسول‌ها نیز بیشتر است و به‌عنوان یکی از داده‌های مهم در مطالعات گردوغبار همواره مورد استفاده قرار می‌گیرد.

محصول MCD19A2 نسخه ۶ سنجنده‌ی مودیس^۵ (طیف‌سنج تصویربرداری با وضوح متوسط) است که به صورت ترکیبی چند زوایه‌ای روی دو ماهواره‌ی آکوا و ترا AOD قرار گرفته است. این پروداکت که از نظر اتمسفری تصحیح شده با توان تفکیک مکانی ۱ کیلومتر به‌صورت روزانه برداشت می‌گردد^۶. در واقع عمق اپتیکی آئروسول AOD (ضخامت نوری آئروسول) سطحی را نشان می‌دهد که ذرات موجود در هوا (آئروسول‌ها) از عبور نور از جو جلوگیری می‌کنند. آئروسول‌ها نور خورشید ورودی را پراکنده و جذب می‌کنند که باعث کاهش دید و افزایش عمق نوری می‌شود. از دید ناظری که روی زمین است با AOD کمتر ۰/۱ آسمان آبی روشن و با حداکثر دید قابل مشاهده است. با افزایش AOD از ۰/۱ به ۰/۵ و خصوصاً بالای ۰/۳ گردوغبار آنقدر زیاد می‌شود که خورشید قابل مشاهده نیست. داده‌های AOD محصول MCD19A2 حاوی زیر مجموعه باند آبی AOD در محدوده‌ی طیفی ۰/۴۷ میکرومتر، باند سبز AOD در محدوده‌ی ۰/۵۵ میکرومتر هست. در واقع این محصول در کنار پایش طوفان‌های گردوغبار، کاربردهای دیگری همچون شناسایی خاکسترهای آتش‌فشانی و آلودگی هوا هم دارد.

^۱. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

^۲. <https://worldview.earthdata.nasa.gov>

• پردازش پروداکت MCD19A2 در سامانه GEE

در راستای استخراج نقشه‌های مختلف از گردوغبار در سه سال مختلف ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ ابتدا محدوده‌ی مطالعاتی شهر کرمانشاه در سامانه‌ی GEE فراخوانی گردید. در ادامه کد (MODIS/006/MCD19A2_GRANULES) ee.ImageCollection مربوط به پروداکت MCD19A2 سنجنده‌ی مودیس به محیط کد نویسی سامانه GEE اضافه شد. در گام بعدی با استفاده از دستور clip(geometry) این پروداکت جهانی بر اساس محدوده شهری کرمانشاه برش داده شده و در ادامه به منظور فراخوانی تصاویر مربوط به سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ که در آن بیشترین میزان گردوغبار در ایستگاه‌های زمینی شهر کرمانشاه ثبت شده بود اقدام گردید (جدول ۱).

جدول ۱. تصاویر اخذشده سنجنده مودیس در شهر کرمانشاه متناسب با ایستگاه‌های زمینی در محیط GEE

تصاویر پروداکت MCD19A2 سنجنده مودیس	
سال	تاریخ میلادی
۲۰۱۶ (۱۳۹۵)	۲۰۱۶/۶/۱۴ تا ۲۰۱۶/۶/۱۸
۲۰۱۷ (۱۳۹۶)	۲۰۱۷/۱۰/۲۸ تا ۲۰۱۷/۱۱/۳
۲۰۱۸ (۱۳۹۷)	۲۰۱۸/۱۰/۲۰ تا ۲۰۱۸/۱۰/۲۹

پس از فراخوانی تصاویر، از بین دو باند ۰/۴۷ و ۰/۵۵ میکرومتر باند با عمق اپتیکی ۰/۵۵ میکرومتر انتخاب می‌گردد. در واقع علت انتخاب این باند نسبت به باند ۰/۴۷ میکرومتر مربوط به پخش اتمسفری است؛ به این صورت که پخش اتمسفری طول موج‌های بلند معمولاً ناشی از ذرات گردوغبار موجود در جو است در حالی که پخش اتمسفری طول موج‌های کوتاه ناشی از ذرات مولکولی موجود در جو می‌باشد (فاطمی و رضایی، ۱۳۹۶). در این راستا با توجه به منابع موجود یک ضریب مقیاس^۷ ۰/۰۰۱ برای تصحیح باند عمق اپتیکی ۰/۵۵ در نظر گرفته می‌شود^۸. پس از تصحیحات و آماده‌سازی تصاویر مورد نظر ابتدا اقدام به تهیه‌ی نقشه‌های آماری حداقل، حداکثر، میانگین و میانه گردوغبار برای هر یک از سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ گردید. بعد از آن به ترتیب نقشه‌های غلظت تجمعی، تناوب رخداد و تغییرات مکانی برای شهر کرمانشاه تولید شد. برای تهیه‌ی نقشه‌ی غلظت گردوغبار به این صورت عمل شد که تراکم AOD برای هر کدام از سال‌های مورد نظر به صورت پیکسل به پیکسل محاسبه و جمع می‌شوند تا مشخص گردد که در طول بازه‌ی مورد نظر کدام مناطق شهر کرمانشاه بیشترین میزان غلظت و تراکم گردوغبار را داشته‌اند.

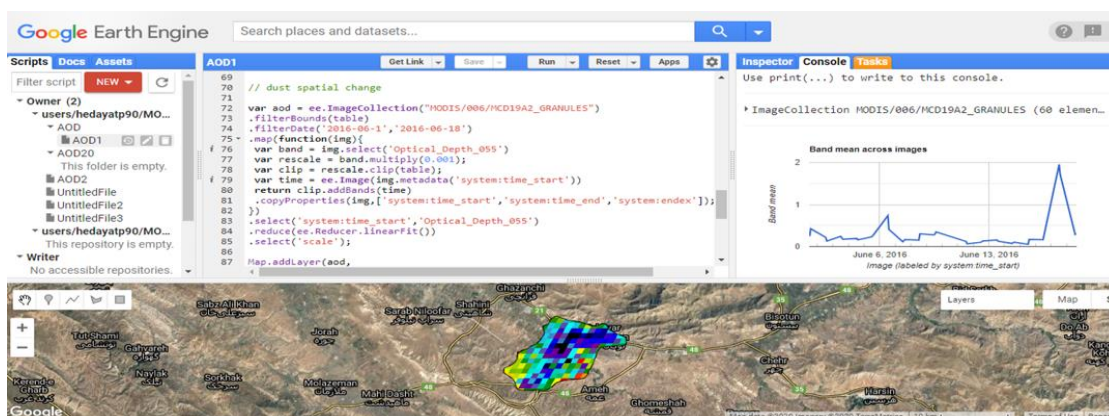
به منظور تهیه‌ی نقشه‌ی تناوب رخداد در طول بازه‌ی مورد نظر برای هر کدام از سال‌های مورد نظر به این صورت عمل شد که ابتدا مقادیر بالای AOD ۰/۵ به بالا به عنوان پدیده گردوغبار و AOD های کمتر از آن به عنوان عدم وجود گردوغبار در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که به صورت کلی مقدارهای AOD بیشتر از ۰/۵ یا ۱ برای گردوغبار در نظر گرفته شده است که هر دو مورد قابل استناد است^۹.

^۷. scale factor

^۸. <https://worldview.earthdata.nasa.gov>

^۹. <https://worldview.earthdata.nasa.gov>

در این تحقیق با توجه به شدت گردوغبار موجود در شهر کرمانشاه در سه سال مورد نظر مقدار حداقل AOD ۰/۵ در نظر گرفته شد. پس از آن برای اینکه مشخص شود کدام مناطق رخدادهای بیشتر و کدام مناطق رخداد کمتر گردوغباری را تجربه کرده‌اند تمام AOD های بالاتر از مقدار ۰/۵ عدد ۱ و کمتر از آن عدد صفر به آن اختصاص داده شده و نهایتاً تعداد رخدادهای برای هر کدام از سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ با هم جمع می‌گردند. در ادامه برای اینکه مشخص شود کدام مناطق در گذر زمان با افزایش میزان گردوغبار مواجه بوده‌اند و کدام مناطق روند کاهشی داشته‌اند اقدام به تهیه نقشه‌ی تغییرات مکانی گردوغبار خواهد شد. در واقع برای تهیه نقشه‌ی تغییرات مکانی رگرسیون خطی رابطه‌ی AOD با زمان در نظر گرفته شده و در آن تغییرات افزایشی و کاهشی پدیده‌ی گردوغبار متناسب با زمان نمایش داده می‌شود که مقادیر آن بین ۳+ تا ۳- متغیر است. در واقع هر چه مقدار این عدد به ۳+ نزدیک‌تر باشد یعنی اینکه گردوغبار روند افزایشی داشته است و هرچه این عدد کمتر باشد حاکی از آن است روند گردوغبار کاهشی بوده است. در نهایت پس از تهیه‌ی تمام نقشه‌های موردنظر جهت خروجی گرفتن با اندازه‌ی پیکسل سایز ۱ کیلومتر اقدام گردید. در (شکل ۳) محیط کد نویسی سامانه گوگل ارث انجین نشان داده شده است.



شکل ۳. محیط کد نویسی سامانه‌ی تحت وب گوگل ارث انجین

• مدل مسیریابی HYSPLIT

برای تعیین مسیر گردوغبار از مدل ترکیبی لاگرانژی با امکان ردیابی پسگرد ذرات در ترازهای مختلف جو موسوم به مدل HYSPLIT^{۱۰} استفاده شد. در این مدل موقعیت اولیه ذرات گردوغبار شامل مؤلفه‌های مکانی آلودگی، اطلاعات هواشناسی مانند سرعت و جهت باد از جمله پارامترهای مورد نیاز است. ذرات با توجه به سرعت و جهت باد در هوا حرکت می‌کنند و نرم‌افزار به ثبت مسیر آن‌ها می‌پردازد. این مدل، مدلی دوگانه برای محاسبات خط سیر حرکت گردوغبار، پراکندگی و شبیه‌سازی نه‌نشینی آن با استفاده از رویکردهای PUFF و ذرات است که در آن محاسبه مسیر و غلظت آلاینده با استفاده از حداقل پارامترهای هواشناسی انجام گرفت. روش محاسبه مدل، ترکیبی میان دیدگاه‌های اویلری و لاگرانژی است و به همین دلیل HYSPLIT را مدلی دوگانه می‌نامند (بهیار، ۲۰۱۵).

۱. Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory

دو دیدگاه اساسی بر این مدل حاکم است:

- ۱- رویکرد لاگرانژی: در این رویکرد قضیه از دید فردی که با بسته هوا در حرکت است، بررسی می‌شود. به این ترتیب مجموع غلظت ذرات در هر شبکه در طول مسیر حرکت تعیین می‌شود.
- ۲- رویکرد اویلری: در این حالت قضیه از دید فردی که در مکان ثابت ایستاده است، بررسی می‌شود. غلظت ذرات برای هر شبکه با استفاده از حرکات پخش و انتقال ذرات تعیین می‌گردد. از آنجایی که رهیافت لاگرانژی هر ذره در زمان‌های مختلف موقعیت‌های متفاوتی خواهد داشت، بنابراین این امکان فراهم می‌شود که مدل‌های پایه لاگرانژی پس از انتخاب ذره در موقعیت مکانی و زمانی خاص، حرکت آن را در گام‌های زمانی دلخواه به سمت آینده^{۱۱} یا به سمت زمان‌های گذشته یا پس‌گرد^{۱۲} ردیابی کنند، بنابراین در پژوهش حاضر از روش لاگرانژی استفاده شد (بهیار، ۲۰۱۵)

• صحت سنجی

در پژوهش حاضر به منظور ارزیابی نهایی نتایج، نمودار پراکنش نقطه‌ای بین مقادیر داده‌های PM_{10} برگرفته از سازمان محیط‌زیست استان کرمانشاه و مقادیر AOD مستخرج از سنجنده MODIS، ترسیم شد و بر این اساس با استفاده از ضریب تعیین R^2 ، یافته‌های نهایی مورد ارزیابی و مقایسه قرار می‌گیرد.

شرح و تفسیر نتایج

• مطالعه همدیدی، تعیین منشأ و مسیر گردوغبار با مدل HYSPLIT

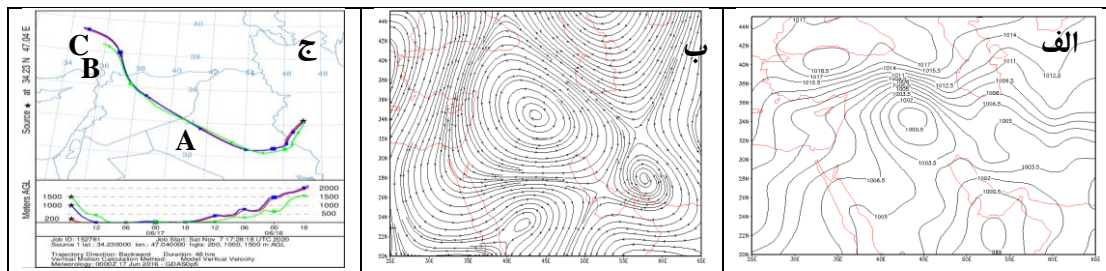
با توجه به بررسی‌های انجام شده، روزهای ۱۷ ژوئن ۲۰۱۶، ۲ نوامبر ۲۰۱۷ و ۲۷ اکتبر ۲۰۱۸ به علت تداوم وجود گردوغبار و غلظت بالای آن در شهر کرمانشاه، برای بررسی همدید و تعیین کانون این گردوغبارها بر مبنای الگوریتم مدل HYSPLIT از رویکرد لاگرانژی ذرات گردوغبار انتخاب شدند.

(شکل ۴، الف) نقشه فشار تراز دریا در روز ۱۷ ژوئن ۲۰۱۶ را نشان داده است. همان‌طور که در این نقشه پیداست، در این روز سیستم کم‌فشار حرارتی با فشار ۱۰۰۰/۵ هکتوپاسکال در سطح منطقه فعال بوده و زبانه‌های آن به سمت شرق و روی منطقه مورد مطالعه کشیده شده است، اما در شمال غرب این کم‌فشار، پرفشاری با ۱۰۱۸/۵ هکتوپاسکال بر روی ترکیه مستقر بوده و کنش و واکنش این سامانه منجر به ایجاد شیب فشاری متأثر از جریانات پرفشاری عرض‌های بالاتر شده است. این اختلاف فشار باعث افزایش سرعت باد و شکل‌دهی جریاناتی از شمال غرب به سمت جنوب شرق ایران شده است (شکل ۴، ب). بررسی مدل نشان می‌دهد که در این روز ذرات غباری در ارتفاعات زیر ۱۵۰۰ متری مسیر افقی را ابتدا از سوریه طی کرده و سپس با عبور از بیابان‌های مرکزی و غربی عراق و با انتشار عمودی ناچیزی به سمت شرق ادامه داده‌اند و با یک جهش عمودی در ساعات پایانی در ارتفاعات بالاتر از ۲۰۰ متری به مرزهای غربی کشور نفوذ کرده و به منطقه منتقل شده‌اند (شکل ۴، ج). منشأ هر سه سطح ارتفاعی گردوغبار شهر کرمانشاه، کشورهای همسایه بوده‌اند که حاکی از آشفته‌گی جریان هوا را در

^{۱۱}. forwar

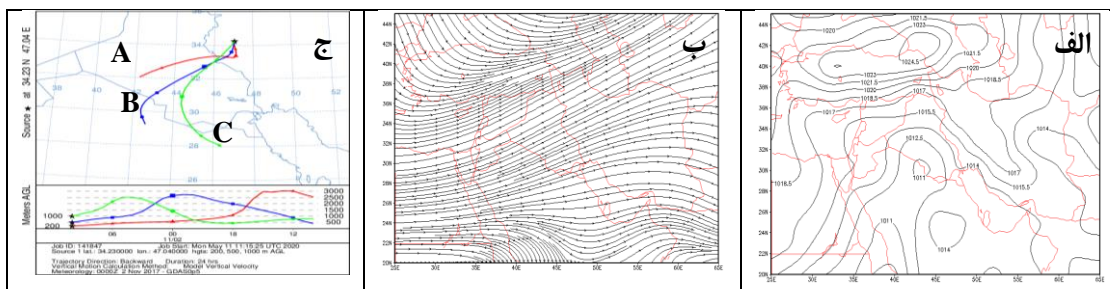
^{۱۲}. backward

منطقه دارد. به همین دلیل است که پیک اصلی یا بیشترین غلظت PM_{10} ، $2125/346$ میکروگرم بر متر مکعب در این توفان به ثبت رسیده است و تعداد ساعات دوام این توفان گردوغبار به ۲۱ ساعت در این روز رسیده است.



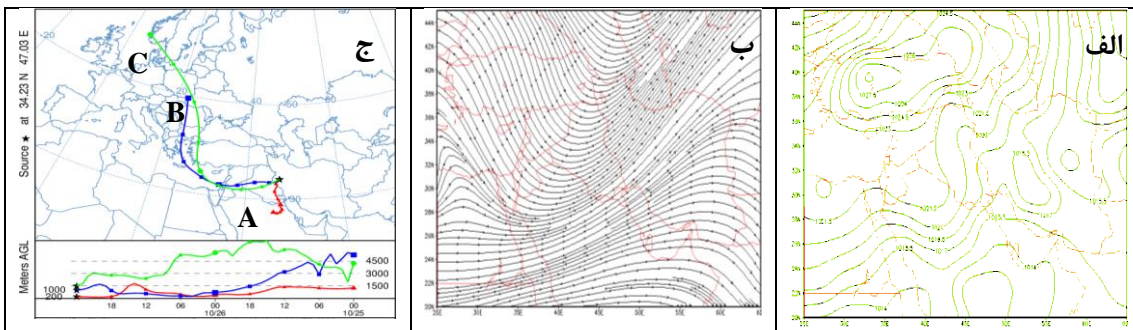
شکل ۴: الف) فشار سطح دریا؛ ب) جریان باد تراز ۳۰۰؛ ج) نقشه ردیابی ذرات گردوغبار HYSPLIT روز ۱۷ ژوئن ۲۰۱۶

شکل ۵، الف) نقشه فشار تراز دریا در روز دوم نوامبر ۲۰۱۷ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نقشه پیداست، در این روز سیستم کم‌فشار حرارتی با فشار ۱۰۱۱ هکتوپاسکال سطح منطقه فعال می‌باشد؛ اما در شمال غرب این کم‌فشار، پرفشاری با $1024/5$ هکتوپاسکال بر روی ترکیه مستقر است که منجر به ایجاد شیب فشاری متأثر از جریانات پرفشاری عرض‌های بالاتر شده است این اختلاف فشار باعث افزایش سرعت باد و شکل‌دهی جریاناتی از شمال غرب به سمت جنوب شرق ایران شده است. با توجه به نقشه جریانات تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال می‌توان مشاهده کرد که وجود پرفشار عربستان در جنوب غرب و یک کم‌فشار حرارتی در شمال غرب منطقه مورد مطالعه با حرکات خود باعث همگرایی جریانات و افزایش سرعت باد شده‌اند (شکل ۵، ب). مشاهده نقشه‌های ردیابی نشان می‌دهد که طی این روز (۲ نوامبر) مبدأ ذرات غباری در مسیر A و در ارتفاع ۲۰۰ متری از لحاظ ارتفاعی به نسبت روزهای دیگر در سطوح پایین‌تری (کمتر از ۵۰۰ متر) حرکت خود را از چشمه گردوغبار به سمت منطقه مورد مطالعه آغاز نموده است. در مسیر A مبدأ ذرات بیابان‌های مرکزی و غرب عراق بوده است؛ و مبدأ ذرات مسیره‌های B و C شمال عربستان و جنوب عراق بوده است که در ارتفاع ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ متر به غرب ایران رسیده است. منشأ هر سه سطح ارتفاعی گردوغبار شهر کرمانشاه، کشورهای همسایه بوده‌اند. به همین دلیل است که پیک اصلی یا بیشترین غلظت PM_{10} ، $1033/7$ میکروگرم بر مترمکعب در این توفان به ثبت رسیده است و تعداد ساعات دوام این توفان به ۱۷ ساعت در این روز رسیده است. عامل اصلی نزول ذرات بر روی ایران کمتر شدن اثر جریانات سیکلونی و حاکمیت پرفشار بوده است (شکل ۵، ج).



شکل ۵: الف) فشار سطح دریا؛ ب) جریان باد تراز ۳۰۰؛ ج) نقشه ردیابی ذرات گردوغبار HYSPLIT روز ۲ نوامبر ۲۰۱۷

نقشه فشار تراز دریا در (شکل ۶، الف) روز ۲۷ اکتبر ۲۰۱۸ را در نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نقشه پیداست، در این روز سیستم کم‌فشار حرارتی با فشار ۱۰۱۸/۵ هکتوپاسکال همچنان در سطح منطقه فعال می‌باشد و زبانه‌های آن به منطقه مورد مطالعه نفوذ کرده است؛ اما در شمال غرب این کم‌فشار، پرفشاری با ۱۰۲۷/۵ هکتوپاسکال بر روی ترکیه مستقر است که باعث ایجاد شیب فشاری متأثر از جریانات پرفشاری عرض‌های بالاتر شده است این اختلاف فشار باعث افزایش سرعت باد و شکل‌دهی جریاناتی از شمال غرب به سمت جنوب شرق ایران شده است. با توجه به نقشه جریانات تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال می‌توان مشاهده کرد که وجود پرفشار عربستان در جنوب غرب و یک کم‌فشار حرارتی در شمال غرب منطقه مورد مطالعه باعث حرکات خود باعث همگرایی جریانات و افزایش سرعت باد شده‌اند (شکل ۶، ب). مشاهده نقشه‌های ردیابی نشان می‌دهد که طی این روز (۲۷ اکتبر) مبدأ ذرات غباری در دو مسیر A و B در ارتفاع‌های ۲۰۰ متری و ۱۰۰۰ متری از لحاظ ارتفاعی به نسبت روزهای دیگر در سطوح پایین‌تری (کمتر از ۵۰۰ متر) حرکت خود را از چشمه گردوغبار به سمت منطقه مورد مطالعه آغاز نموده‌اند. با این تفاوت که در مسیر A مبدأ ذرات شمال عربستان و کویت و جنوب عراق بوده است و مبدأ ذرات مسیر B داخل خاک سوریه و در بیابان‌های غرب و مرکزی عراق قرار دارد؛ اما مبدأ گردوغبار مسیر C منطبق بر جریانات باد می‌باشد که از بیابان‌های سوریه آغاز و با عبور از بیابان‌های غربی و مرکزی عراق، در ارتفاع ۱۰۰۰ متر به غرب ایران رسیده است. منشأ هر سه سطح ارتفاعی گردوغبار شهر کرمانشاه، کشورهای همسایه بوده‌اند. به همین دلیل است که پیک اصلی یا بیشترین غلظت PM_{10} ، ۲۴۱۹ میکروگرم بر مترمکعب در این توفان به ثبت رسیده است و تعداد ساعات دوام این طوفان به ۲۲ ساعت در این روز رسیده است (شکل ۶، ج).



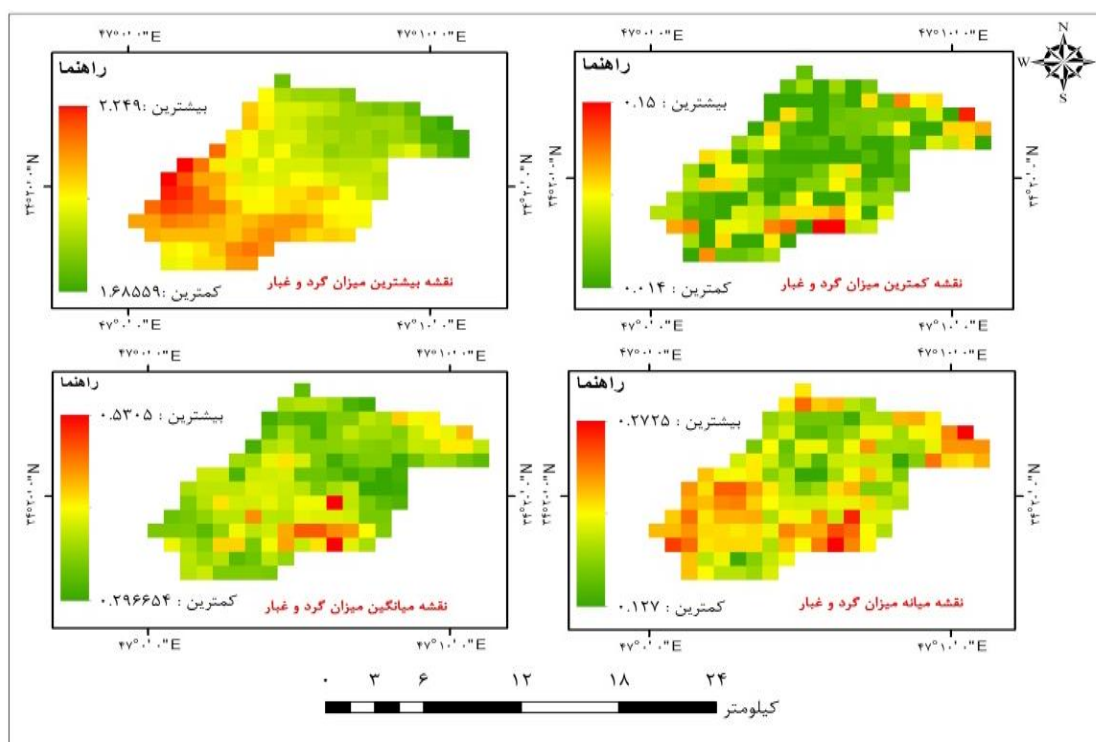
شکل ۶: الف) فشار سطح دریا؛ ب) جریان باد تراز ۳۰۰؛ ج) نقشه ردیابی ذرات گردوغبار HYSPLIT روز ۲۷ اکتبر ۲۰۱۸

• نقشه‌های مستخرج از پروداکت MCD۱۹A۲

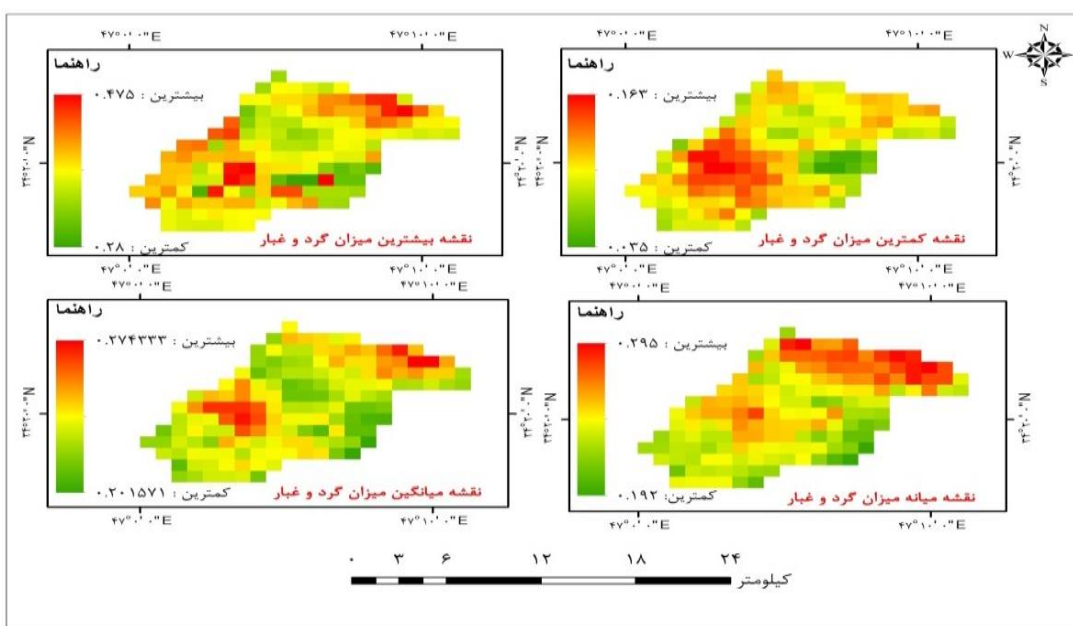
پس از پردازش تصاویر حاصل سنجنده‌ی مودیس در سامانه GEE نهایتاً نقشه‌های مستخرج از پروداکت AOD برای سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ آماده‌سازی شدند.

یافته‌های حاصل نقشه‌های آماری حاکی از آن است که در سال ۲۰۱۶ بیشترین میزان گردوغبار در مناطق جنوب و جنوب‌غربی بوده است. در این راستا در نقشه‌ی کمترین میزان گردوغبار در سال ۲۰۱۶ اکثر مناطق شهر کرمانشاه غیر از مناطق محدودی میزان AOD کمی داشته‌اند. از نظر میانگین میزان گردوغبار شرق شهر و از نظر میانه هم غیر از مراکز شهر بقیه‌ی مناطق میزان AOD نسبتاً بیشتر بوده است (شکل ۷، الف). از طرفی در سال ۲۰۱۷ میزان بیشترین میزان گردوغبار

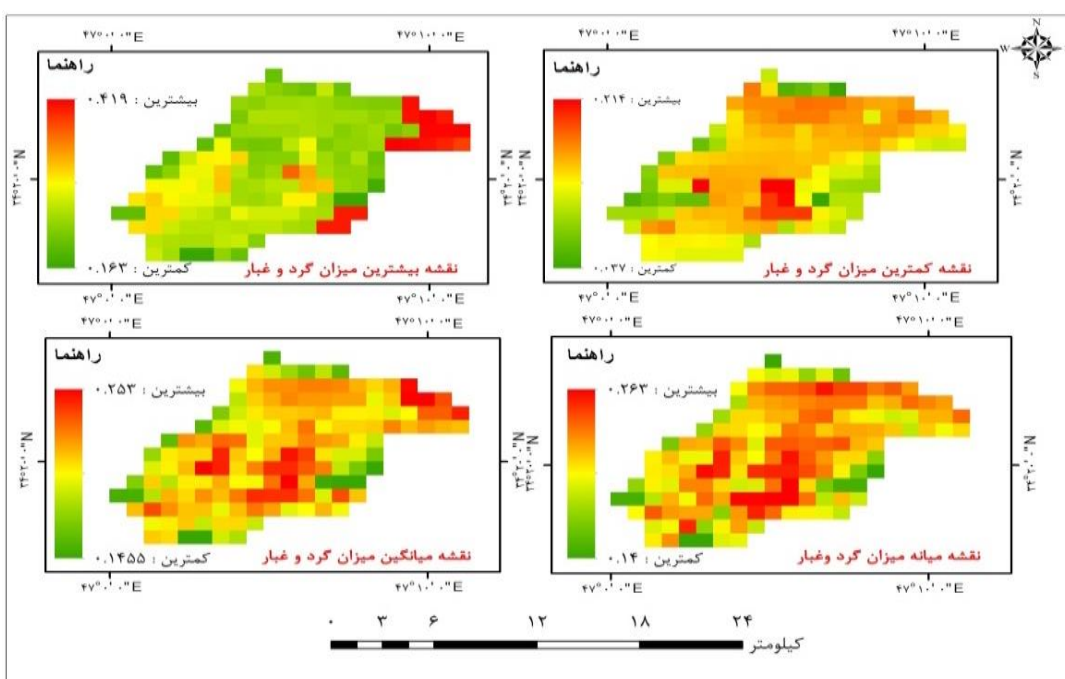
مربوط به مناطق مرکز، شمال شرق و قسمت‌های محدودی از غرب شهر کرمانشاه بوده است. همچنین نقشه‌ی کمترین میزان گردوغبار نشان دهنده‌ی این است که غیر از مناطق مرکزی، بقیه مناطق شهر تقریباً با میزان AOD کمتری مواجه بوده‌اند. در این میان نقشه‌های میانگین و میانه گردوغبار به ترتیب نشان دهنده‌ی این است که مراکز شهر و شمال شرق بیشتر از دیگر مناطق آلودگی داشته‌اند (شکل ۷، ب). نقشه‌ی بیشترین میزان گردوغبار در سال ۲۰۱۸ نشان دهنده‌ی این است که بیشترین میزان AOD مربوط به مناطق شرق و شمال شرق است. نقشه‌ی کمترین میزان گردوغبار هم حاکی از آن است کمترین میزان AOD به ترتیب در مناطق حاشیه‌ی شهر و پس از آن مناطق مرکزی شهر ثبت شده است. در این راستا نقشه‌ی میانگین و میانه نشان دهنده‌ی این است که مراکز شهر و شمال شرق AOD های بیشتری را تجربه کرده‌اند (شکل ۷، ج).



(الف)



(ب)

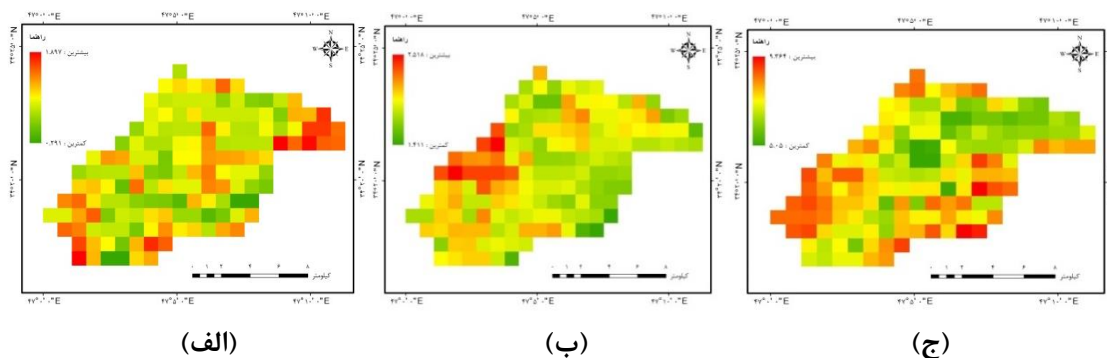


(ج)

شکل ۷: نقشه‌های آماری AOD مربوط به سال‌های (الف): ۲۰۱۶، (ب): ۲۰۱۷ و (ج): ۲۰۱۸ حاصل از تصاویر مودیس

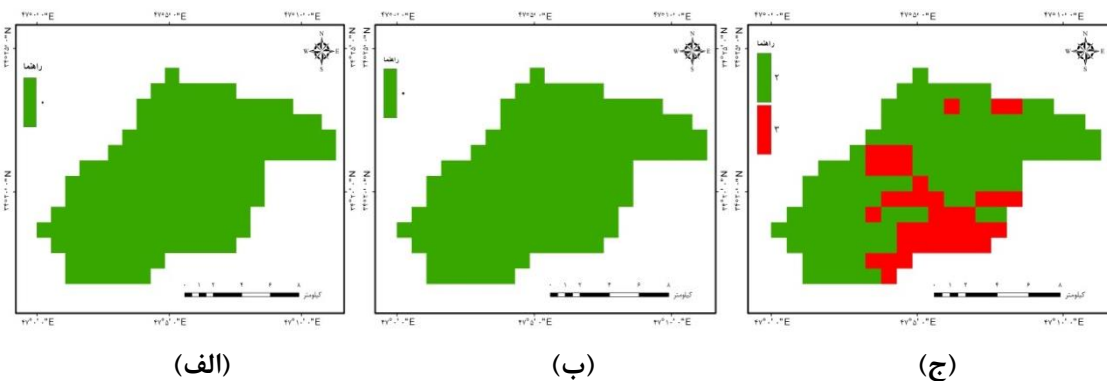
در ادامه (شکل ۸) نقشه‌های مربوط به غلظت تجمع، تناوب رخداد و تغییرات مکانی AOD به ترتیب برای سال‌های

۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ نشان داده شده است.



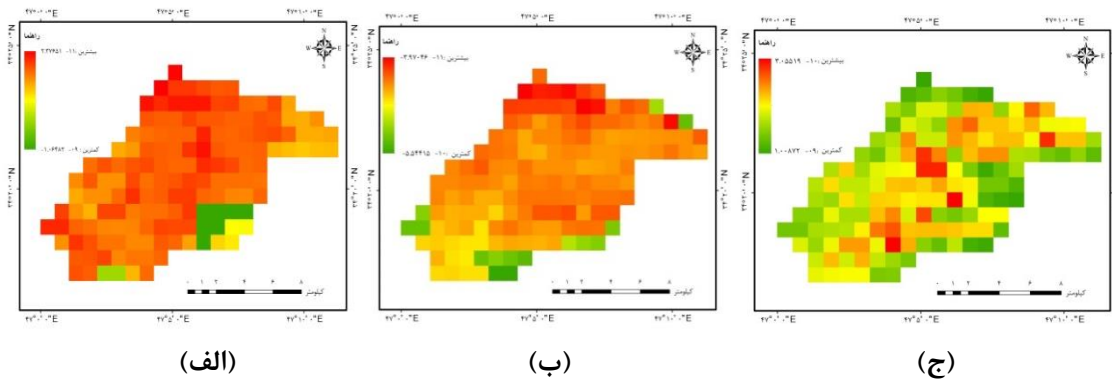
شکل ۸: نقشه غلظت تجمعی AOD مربوط به سال‌های (الف): ۲۰۱۶، (ب): ۲۰۱۷ و (ج): ۲۰۱۸ حاصل از تصاویر مودیس

یافته‌های حاصل از نقشه‌های غلظت تجمعی (شکل ۸، الف) حاکی از آن است که گردوغبار ایجاد شده در سال ۲۰۱۶ بیشتر در حاشیه‌های شهر بوده و در این مناطق میزان تراکم و غلظت AOD نسبت به مناطق مرکزی شهر و شمال شرق بیشتر است. این در حالی است که در طوفان رخ داده در سال ۲۰۱۷ (شکل ۸، ب) غلظت و تراکم گردوغبار در غرب شهر بیشتر از مناطق دیگر بوده و پس از آن مناطق جنوبی و جنوب غرب بیشترین میزان آلودگی را تجربه کرده‌اند. همچنین نتایج حاصل از نقشه‌ی غلظت گردوغبار ۲۰۱۸ (شکل ۸، ج) حاکی از آن است که بیشترین میزان غلظت و تراکم AOD در مناطق شمال شرق، قسمت محدودی از مناطق مرکزی و جنوب غربی اتفاق افتاده است و مناطق فوق بیشتر از مناطق دیگر آلودگی را تجربه کرده‌اند.



شکل ۹: نقشه تناوب رخداد AOD مربوط به سال‌های (الف): ۲۰۱۶، (ب): ۲۰۱۷ و (ج): ۲۰۱۸ حاصل از تصاویر مودیس

همان‌طور که در (شکل ۹) مشاهده می‌شود نقشه‌های تناوب رخداد برای هر کدام از طوفان‌های گردوغبار سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ نشان داده شده است. یافته‌های این بخش از پژوهش حاکی از آن است که در سال ۲۰۱۶ (شکل ۹، الف) مناطق مرکزی، جنوب شرق و قسمت محدودی از شمال شهر کرمانشاه حداکثر ۳ بار دیگر مناطق شهر حداقل ۲ بار رخداد گردوغبار در آن اتفاق افتاده است. به این معنی که در مناطق فوق، در طول بازه‌ی مدنظر یعنی ۱۵ خرداد تا ۲۹ خرداد، رخداد گردوغبار در آن‌ها تکرار شده و به‌طور کلی پیکسل‌هایی که مقدار AOD های بالای ۰/۵ داشته‌اند ۲ و ۳ بار گردوغبار را تجربه کرده‌اند. از طرف دیگر همان‌طور که در قسمت‌های (شکل ۹، ب و ج) که به ترتیب مربوط به سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ است رخداد گردوغبار بدون تکرار بوده و تنها یک‌بار پیکسل‌های با مقادیر بالای ۰/۵ در آن‌ها ثبت شده است.



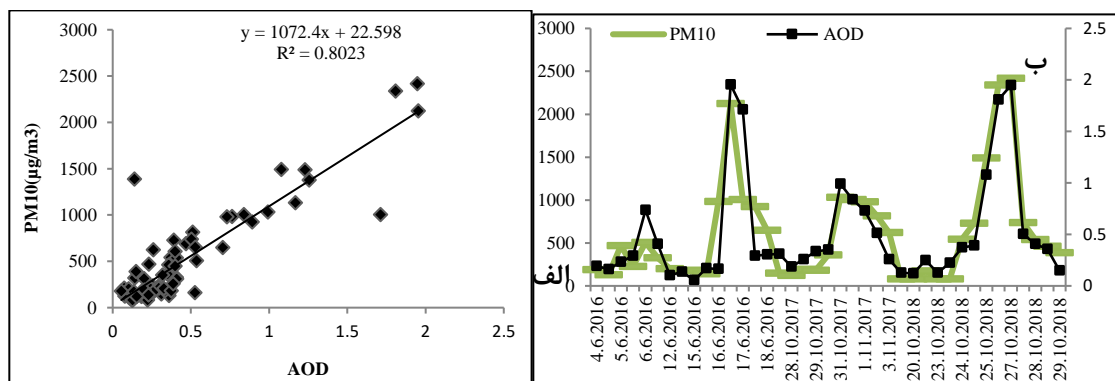
شکل ۱۰: نقشه تغییرات مکانی AOD مربوط به سال‌های (الف): ۲۰۱۶، (ب): ۲۰۱۷ و (ج): ۲۰۱۸ حاصل از تصاویر مودیس

همان‌طور که در قسمت (شکل ۱۰، الف) نشان داده شده است، مناطق حاشیه‌ای شهر از نظر مقدار AOD در طول زمان روند کاهشی را داشته و در این راستا مناطق مرکزی شهر در طول زمان روند افزایشی را تجربه کرده است. در این راستا علاوه بر مناطق مرکزی، قسمت‌هایی از شمال شرق شهر نیز روند افزایشی قابل استناد است. به‌طور کلی با توجه به راهنمای نقشه میزان AOD در مناطق حاشیه‌ای نیز زیاد است اما نسبت به مناطق مرکزی شهر میزان گردوغبار روند کاهشی را داشته‌اند. همچنین در (شکل ۱۰، ب) با توجه به راهنمای نقشه و بازه‌ی مقادیر ثبت شده میزان AOD در سطح شهر چندان قابل توجه نیست اما به‌طور کلی نتایج حاکی از آن است که غیر از قسمت‌های محدودی از جنوب، جنوب‌شرق، جنوب‌غرب و شمال‌شرق، بقیه‌ی مناطق شهر از نظر میزان AOD روند افزایشی داشته و در این میان مناطق شمال و شمال‌غرب در طول زمان بیشتر از دیگر مناطق روند افزایشی را تجربه کرده‌اند. در نهایت با توجه به نقشه‌ی تغییرات مکانی سال ۲۰۱۸ (شکل ۱۰، ج) یافته‌ها نشان‌دهنده‌ی این است که میزان AOD فقط در قسمت‌های محدودی یعنی جنوب، شرق، جنوب‌شرق و به‌صورت محدود در شمال‌شرق در طول زمان میزان گردوغبار روند کاهشی را داشته‌اند و دیگر مناطق شهر خصوصاً مرکز، جنوب‌غرب و شمال شهر در بازه‌ی زمانی روند میزان گردوغبار افزایشی و به‌طور کلی قابل توجه بوده است.

• نتایج ارزیابی صحت

در پژوهش حاضر داده‌های واقعی PM_{10} از ایستگاه‌های پایش آلودگی سازمان محیط‌زیست استان کرمانشاه دریافت شد و همچنین مقادیر AOD از ماهواره MODIS برای هر سه طوفان گردوغبار مورد مطالعه در تاریخ‌های ۱۷ ژوئن ۲۰۱۶، ۲ نوامبر ۲۰۱۷ و ۲۷ اکتبر ۲۰۱۸ به دست آمد. به‌طور کلی همان‌طور که در (شکل ۱۱، ب) مشاهده می‌شود همبستگی بسیار خوبی بین PM_{10} داده‌های واقعی و مقادیر AOD مشتق شده از ماهواره MODIS ($n=71$; $R^2=0/8$) در منطقه مورد مطالعه وجود دارد. (شکل ۱۱، الف) نمودار پراکندگی AOD در مقابل PM_{10} را برای ماه‌های ژوئن ۲۰۱۶، نوامبر ۲۰۱۷ و اکتبر ۲۰۱۸ نشان می‌دهد. بیشترین میانگین مقادیر AOD روزانه طی سه رویداد مهم گردوغبار به ترتیب ۱/۱۷، ۱/۹۵ و ۱/۹۵ است. در پژوهش‌های مشابهی که توسط دی و همکاران (Dey, et al, ۲۰۰۴) گزارش شده، نشان‌دهنده AOD بالا در توفان‌های گردوغبار است. بعد از آن برای دهلی‌نو (Sharma et al, ۲۰۱۲) و (Alam et al, ۲۰۱۴) در خاورمیانه و جنوب‌غرب آسیا پژوهش‌هایی

صورت گرفته است؛ بنابراین، بررسی ویژگی‌های نوری ساعتی ممکن است علائم قابل توجهی را قبل از وقوع طوفان‌های شدید گردوغبار در مطالعات آینده پیدا کند.



شکل ۱۱: الف) سری زمانی PM_{10} و MODIS AOD (۵۵۰ نانومتر) بیش از کرمانشاه برای سه رویداد مهم طوفان گردوغبار در ۱۷ ژوئن ۲۰۱۶، ۲ نوامبر ۲۰۱۷ و ۲۷ اکتبر ۲۰۱۸. ب) پراکندگی PM_{10} و AOD.

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل نقشه‌های سینوپتیک در واقع عامل اصلی ایجادکننده‌ی پدیده‌ی موج گردوغبار طی روزهای مورد مطالعه در تاریخ‌های ۱۷ ژوئن ۲۰۱۶، ۲ نوامبر ۲۰۱۷ و ۲۷ اکتبر ۲۰۱۸ در شهر کرمانشاه، علاوه بر ناپایداری ایجاد شده توسط کم‌فشارهای حرارتی سطح زمین، تحرکات پرفشار عربستان که باعث همگرایی جریان‌ها به سمت غرب شده‌اند، استقرار یک بریده کم‌فشار در سطوح میانی جو در این رخداد به خوبی نمایان است به طوری که با وجود ناپایداری در تراز میانی جو، عدم وجود رطوبت کافی در سامانه‌های منتقل شده به غرب کشور، عبور جریان‌ها از بیابان‌های عراق، سوریه و عربستان عدم رطوبت کافی چه در سطح و چه در عمق خاک در داخل کشور و در کشورهای همسایه موجب شکل‌گیری چشمه گردوغبار و انتقال آن به منطقه مورد مطالعه گردیده است. همچنین بررسی نقشه‌های ردیابی حاصل از مدل HYSPLIT نشان می‌دهد که دو مسیر کلی برای انتقال گردوغبار به منطقه مورد مطالعه قابل تشخیص است: ۱- مسیر شمال‌غرب-جنوب‌شرقی که با عبور از روی هسته‌های گردوغبار شکل گرفته در بیابان‌های عراق و سوریه عمل انتقال گردوغبار به نیمه غربی ایران را انجام می‌دهد؛ این مسیر را می‌توان ورود گردوغبار به منطقه در ۳ ارتفاع ۲۰۰، ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متری در روزهای ۱۷ ژوئن ۲۰۱۶ و ۲۷ اکتبر ۲۰۱۸ دانست. در واقع با توجه به مسیر شمال‌غربی و جنوب‌شرقی طوفان‌های گردوغبار، می‌توان با نتایج نقشه‌ی تناوب رخداد در سال ۲۰۱۶ ارتباط مستقیم برقرار نمود؛ به این صورت که در نقشه‌ی حاصله دقیقاً هرچه از مسیر شمال‌غرب به جنوب‌شرق شهر کرمانشاه حرکت کنیم، قابل استناد است که تعداد رخداد‌های گردوغباری نیز بیشتر شده است. همچنین یافته‌های حاصل از نقشه‌های آماری، غلظت تجمعی و تغییرات مکانی سال ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ نیز تا حد زیاد با مسیر و روند حرکتی طوفان فوق ارتباط نسبتاً مستقیمی دارد. به این صورت که با توجه به جهت و مسیر گردوغبار، یافته‌های حاصل از نقشه‌های AOD نیز نشان‌دهنده‌ی این است که مناطق شرقی شهر به‌طور کلی میزان گردوغبار بیشتری را تجربه کرده‌اند. در این راستا هرچند گاهاً در بخشی از خروجی‌ها مناطق شمال‌شرق شهر نیز میزان AOD های قابل توجهی

مشاهده می‌شود که علت این امر می‌تواند جهت باد غالب در شهر کرمانشاه یعنی مسیر غربی - شرقی باشد که بر روند اصلی مسیر گردوغبار (شمال غربی-جنوب شرقی) تأثیر گذاشته است. ۲- مسیر جنوب غرب به غرب ایران و شهر کرمانشاه که در هر سه ارتفاع ۲۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ متری که سرچشمه اصلی گردوغبار در روز ۲ نوامبر ۲۰۱۷ می‌باشد، منبع ذرات این مسیر کویت، شمال عربستان و بخشی از عراق می‌باشد. بررسی مسیر ذرات نشان می‌دهد که این ذرات ابتدا توسط سامانه‌های کم‌فشار مستقر در منطقه به سطوح بالاتر منتقل شده است. در این راستا با توجه به نتایج حاصل از نقشه‌های AOD مستخرج از پروداکت MCD19A2 برای سال ۲۰۱۷ می‌توان ارتباط نسبتاً مستقیمی بین جهت مسیر گردوغبار و نقشه‌های حاصله برقرار نمود. به این صورت که یافته‌های نقشه‌های آماری و غلظت تجمعی حاکی از آن است که میزان AOD در مناطق غرب شهر کرمانشاه همواره بیشتر از دیگر مناطق است. در این میان با توجه به مسیر حرکت طوفان گردوغبار که منشأ آن جهت جنوب غربی به طرف غرب ایران بوده و یافته‌های نقشه‌ی تغییرات مکانی که هرچه از جنوب غرب به سمت مرکز و شمال شرق حرکت کنیم میزان AOD نیز بیشتر شده؛ می‌توان ارتباط مستقیم بین نتایج حاصله برقرار نمود.

در این میان در کنار همبستگی نتایج حاصل از نقشه‌های حاصله در سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ و همچنین مسیر و جهت گردوغبار در بازه‌های زمانی فوق، ارتباط تنگاتنگ و بالایی نیز بین مقدار AOD های مستخرج از پروداکت MCD19A2 سنجنده مودیس و داده‌های PM₁₀ برگرفته شده از ایستگاه‌های میدانی برقرار است. به‌طور کلی بر اساس یافته‌های حاصل از نقشه‌های آماری، غلظت تجمعی، تناوب رخداد و تغییرات مکانی مستخرج از پروداکت MCD19A2 سنجنده مودیس طی بازه‌ی زمانی ۴ تا ۱۸ ژوئن ۲۰۱۶، ۲۸ اکتبر تا ۳ نوامبر ۲۰۱۷ و ۲۰ تا ۲۹ اکتبر ۲۰۱۸ از شهر کرمانشاه، مناطق مرکزی و شرقی همواره بیشتر از دیگر مناطق شهر درگیر طوفان گردوغبار هستند. به این صورت که این مناطق به‌صورت متوسط، نسبت به دیگر مناطق شهر بیشتر با آلودگی ناشی از گردوغبار مواجه هستند. اگرچه در پژوهش‌های داخلی کمتر از محصولات سنجنده‌ی مودیس مانند MCD19A2 استفاده شده اما مطالعات خارج از کشور همانند سورک هامر و همکاران، کلینگمولر و همکاران و اندک مطالعات داخلی نشان‌دهنده‌ی این است که این پروداکت نتایج قابل قبول داشته و امکان مطالعه‌ی سریع و با دقت بالا را فراهم می‌کند (Klingmüller, et al, ۲۰۱۶; Sorek-Hamer, et al). با توجه به یافته‌های حاصل از این پژوهش و همبستگی بالا بین نتایج حاصل از خروجی‌ها قابل استناد است که استفاده از پروداکت MCD19A2 سنجنده‌ی مودیس بسیار کارآمد و در این راستا پردازش این تصاویر در سامانه‌ی گوگل ارث انجین هم از نظر زمانی و هم از نظر دقت می‌تواند بهینه باشد. در همین راستا مطالعات گوناگونی که با بهره‌گیری از داده‌های AOD سنجنده‌ی مودیس که در محیط GEE انجام گرفته و همچنین مطالعاتی که با بهره‌گیری از مدل HYSPLIT برای مسیریابی طوفان‌های گردوغبار انجام گرفته نتایج حاصل از این پژوهش را مورد تأیید قرار می‌گیرد. به این منظور نتایج (محمودی و ریگی چاهی، ۲۰۱۹) و رنجان و همکاران و بلورانی و همکاران (۲۰۲۱; Bolorani, et al, ۲۰۲۰; Ranjan, et al) که هرکدام به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم از پروداکت AOD سنجنده‌ی مودیس و پردازشگر گوگل ارث انجین استفاده کرده بودند نتایج حاصل از این پژوهش را مورد تأیید قرار می‌دهد. همچنین پژوهش‌های دیگری مانند مطالعات دانگ و دای و گودی و میدلتون نیز در سراسر جهان جهت تعیین منشأ و مناطق تحت پوشش گردوغبار با استفاده داده‌های سنجنش از دور انجام گرفته که حاکی از آن است که پروداکت AOD سنجنده‌ی مودیس می‌تواند به‌طور نسبتاً دقیق مناطق تحت سیطره‌ی گردوغبار را شناسایی کند (Goudie ۲۰۰۰) ;

(Dong and Dai, 2013 and Middleton, 2013) در این راستا مطالعه‌ی (رضوی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۹) که با استفاده از پروداکت AOD سنجنده‌ی مودیس در سامانه GEE به ارزیابی پدیده گردوغبار با تأکید بر سمت و سرعت باد پرداخته بودند، نتایج پژوهش (علیزاده و همکاران، ۱۴۰۰) که در آن به ردیابی و شبیه‌سازی عددی طوفان گردوغبار در شهر کرمانشاه پرداخته و بررسی نقشه‌های ردیابی HYSPLIT نشان از این موضوع که بیابان‌های مرکزی و غربی عراق و صحرای سوریه کانون‌های اصلی گردوغبار برای منطقه مورد مطالعه بودند نیز با نتایج حاصل از این پژوهش همخوانی بالایی دارند. در این میان در کنار نتایج قابل قبول پروداکت AOD سنجنده‌ی مودیس در پایش و ارزیابی طوفان‌های گردوغبار در سطح جهان، مطالعات انجام گرفته در صحت سنجی این پروداکت با داده‌های زمینی PM_{10} مانند پژوهش‌های سیلاخوری و همکاران و مورکرت نیز نشان‌دهنده‌ی دقت مناسب پروداکت فوق در برآورد میزان غلظت گردوغبار است (Silakhori et al., 2018 Morcrette, 2009). همان‌طور که از مقایسه‌ی نتایج پژوهش‌های انجام شده با نتایج حاضر از این تحقیق مشخص است، یافته‌های به دست آمده ارتباط و همخوانی بالایی باهم دارند. هرچند این مطلب بارها در تحقیقات گوناگونی به اثبات رسیده، اما چنین وضعیتی نیازمند تلاش برای حل این مشکل به صورت فرا منطقه‌ای است. نه اینکه لزوماً تنها در سطح ایران و شهر کرمانشاه بر آن تأکید شود.

نتیجه‌گیری

قرارگیری ایران در منطقه گرم و خشک کره زمین و مجاورت با بیابان‌های جنب حاره مانند عراق، سوریه و عربستان باعث به وجود آمدن مداوم مخاطره گردوغبار در نیمه غربی ایران شده است. در این راستا منطقه کرمانشاه در غرب ایران به دلیل نزدیکی به بیابان‌های کشورهای مجاور همواره در معرض رخدادهای گردوغباری متعدد است. در این تحقیق به منظور بررسی تغییرات زمانی و مکانی مهمترین و شدیدترین طوفان‌های گردوغبار در کلان‌شهر کرمانشاه طی بازه‌ی زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸ از مدل مسیریابی HYSPLIT و پروداکت آماده‌ی $MCD19A2$ سنجنده‌ی مودیس در سامانه‌ی تحت وب گوگل ارث انجین بهره گرفته شد. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که در سه رویداد مهم طوفان گردوغبار در روزهای ۱۷ ژوئن ۲۰۱۶ و ۲۷ اکتبر ۲۰۱۸ منشأ آن بیابان‌های عراق و سوریه و ۲ نوامبر ۲۰۱۷ سرچشمه اصلی مسیر کویت، شمال عربستان و بخشی از عراق بوده است. همچنین نتایج نقشه‌های مستخرج از پروداکت $MCD19A2$ سنجنده مودیس (نقشه‌های آماری، غلظت جمعی، تناوب رخداد و تغییرات مکانی) نشان‌دهنده‌ی این است که طی بازه‌ی زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸ در شهر کرمانشاه همواره مناطق مرکزی و شرقی به طور متوسط نسبت به مناطق دیگر شهر بیشتر با آلودگی ناشی از گردوغبار مواجه بوده‌اند. در این میان در کنار همبستگی بالا بین خروجی‌های مسیریابی، نقشه‌های مستخرج از تصاویر سنجنده مودیس و داده‌های PM_{10} یافته‌های این پژوهش دقت، سرعت و توانایی بالای سامانه‌ی تحت وب گوگل ارث انجین (GEE) را پردازش تصاویر سنجنده‌ی مودیس جهت ارزیابی و پایش سریع ذرات گرد و غبار نشان می‌دهد. به‌طور کلی گستردگی بیابان‌های وسیع خاستگاه گردوغبار، بیابان‌زایی رو به رشد، خشک‌سالی‌های مداوم و نقش عوامل انسانی در مدیریت نابخردانه سرزمین، رویدادهای گردوغباری در غرب ایران را به چالش زیست‌محیطی کنترل ناپذیر تبدیل کرده است.

منابع

- ارجمند، مریم؛ علیرضا راشکی و حسین سرگزی. ۱۳۹۷. پایش زمانی و مکانی پدیده گردوغبار با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در جنوب شرق ایران، با تأکید بر منطقه جازموریان. *فصلنامه علمی- پژوهشی اطلاعات جغرافیایی سپه*. (۱۰۶): ۱۶۸-۱۵۳: ۲۷.
- رضوی زاده، سمانه؛ حمیدرضا عباسی و فاطمه درگاهیان. ۱۴۰۰. بررسی پدیده گردوغبار در استان گلستان، با تأکید بر شاخص عمق اپتیکی و سمت و سرعت باد. *مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*. (۵۳): ۱۵: ۶۷-۵۸.
- شمسی پور، علی اکبر و طاهر صفر راد. ۱۳۹۱. تحلیل ماهواره‌ای - همدیدی پدیده گردوغبار تیرماه ۱۳۸۸. *مجله پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی*، شماره ۷۹: ۱۱۱-۱۲۶.
- علیزاده، طویی، مجید رضایی بنفشه؛ غلامرضا گودرزی و سیدهدایت شیخ قادری. ۱۴۰۰. ردیابی و شبیه‌سازی عددی طوفان گردوغبار در شهر کرمانشاه. *نشریه مدیریت بیابان*، (۲): ۹: ۱-۱۴.
- فاطمی، سیدباقر و یوسف رضایی. ۱۳۹۶. *مبانی سنجش‌ازدور*، چاپ پنجم، انتشارات آزاده، تهران.
- میری، مرتضی. ۱۳۹۰. واکاوی - همدیدی پدیده گردوغبار در نیمه غربی ایران، *پایان‌نامه کارشناسی ارشد*، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.
- ناصرپور، سمیه؛ بهلول علیجانی و پرویز ضیائیان. ۱۳۹۴. منشایی توفان‌های گردوغبار در جنوب غرب ایران با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های هوا. *پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی (پژوهش‌های جغرافیایی)*. (۱): ۴۷: ۳۶-۲۱.
- Alam, K., T. Trautmann., T. Blaschke., and F. Subhan., ۲۰۱۴. Changes in aerosol optical properties due to dust storms in the Middle East and Southwest Asia. *Remote Sensing of Environment*, ۱۴۳: ۲۱۶-۲۲۷.
- Amani, M., S. Mahdavi., M. Afshar., B. Brisco., W. Huang., S. Mohammad Javad Mirzadeh., and C. Hopkinson. ۲۰۱۹. Canadian wetland inventory using Google Earth engine: the first map and preliminary results. *Remote Sensing*, ۱۱ (۷): ۸۴۲.
- Behyar, M.B., ۲۰۱۵. Zoning the Degree of Risk of Fog and Dust Storms in the Country's road Network using Satellite data. *Geographical Research Quarterly*, ۳۰(۲): ۱۰۵-۱۲۵.
- Bolloorani, A.D., N.N. Samany., R., Papi and M. Soleimani. ۲۰۲۱. Dust source susceptibility mapping in Tigris and Euphrates basin using remotely sensed imagery. *CATENA*, ۲۰۹: ۱۰۵۷۹۵.
- Dey, S., S.N. Tripathi., R.P. Singh and B.N. Holben. ۲۰۰۴. Influence of dust storms on the aerosol optical properties over the Indo- Gangetic basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, ۱۰۹(۲۰): ۱۳-۱.
- Dong, Z., X. Yu., X. Li and J. Dai. ۲۰۱۳. Analysis of variation trends and causes of aerosol optical depth in Shaanxi Province using MODIS data. *Chinese Science Bulletin*, ۵۸(۳۵): ۴۴۸۶-۴۴۹۶.
- Gorelick, N., M. Hancher., M. Dixon., S. Ilyushchenko., D. Thau and R. Moore. ۲۰۱۷. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, ۲۰۴: ۱۸-۲۷.
- Goudie, A.S and N.J. Middleton. ۲۰۰۰. *Dust storms in southwest Asia*. Acta Universitatis Carolinae, Supplement, ۷۳۸۳.
- Goudie, A.S and N.J. Middleton. ۲۰۰۱. Saharan dust storms: nature and consequences. *Earth-science reviews*, ۵۶(۱-۴): ۱۷۹-۲۰۴.
- Ichoku, C., L. A. Remer., Y. J. Kaufman., R. Levy., D. A. Chu., D. Tanré and B. N. Holben. ۲۰۰۳. MODIS observation of aerosols and estimation of aerosol radiative forcing over southern Africa during SAFARI ۲۰۰۰. *Journal of geophysical research: atmospheres*, ۱۰۸ (۱۳).
- Kaskaoutis, D. G., P. Kosmopoulos. H. D. Kambezidis and P. T. Nastos. ۲۰۰۷. Aerosol climatology and discrimination of different types over Athens, Greece, based on MODIS data. *Atmospheric Environment*, ۴۱(۳۴): ۷۳۱۵-۷۳۲۹.
- Klingmüller, K., A. Pozzer., S. Metzger., G.L. Stenchikov and J. Lelieveld. ۲۰۱۶. Aerosol optical depth trend over the Middle East. *Atmospheric Chemistry and Physics*, ۱۶(۸): ۵۰۶۳-۵۰۷۳.
- Kumar, L and O. Mutanga. ۲۰۱۸. Google Earth Engine applications since inception: Usage, trends, and potential. *Remote Sensing*, ۱۰(۱۰): ۱۵۰۹.
- Lin, C., Y. Li., A.K. Lau., X. Deng., K. Tim., J.C. Fung., C. Li., Z. Li., X. Lu and X. Zhang. ۲۰۱۶. Estimation of long-term population exposure to PM_{۲.۵} for dense urban areas using ۱-km MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, ۱۷۹: ۱۳-۲۲.

- Lyapustin, A and Y. Wang. ۲۰۱۸. MODIS Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction (MAIAC) Data User's Guide. NASA: Greenbelt, MD, USA.
- Mehta, M., R. Singh. A. Singh and N. Singh. ۲۰۱۶. Recent global aerosol optical depth variations and trends- A comparative study using MODIS and MISR level ۲ datasets. *Remote Sensing of Environment*, ۱۸۱: ۱۳۷-۱۵۰.
- Mahmoudi, P and C.H. Allahbakhsh Rigi. ۲۰۱۹. Analyzing the time series changes trend of the Aerosol Optical Depth (AOD) index of Terra satellite's MODIS sensor for Jazmorian basin in the southeast of Iran during.
- Morcrette, J. J., O. Boucher., L. Jones., D. Salmond., P. Bechtold., A. Beljaars and A. Untch. ۲۰۰۹. Aerosol analysis and forecast in the European Centre for medium-range weather forecasts integrated forecast system: Forward modeling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, ۱۱۴(۶): ۱۷-۱.
- Namdari, S., K. K. Valizade., A. A. Rasuly and B. S. Sarraf. ۲۰۱۶. Spatio-temporal analysis of MODIS AOD over western part of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, ۹(۳): ۱۹۱.
- Qi, Y., J. Ge and J. Huang. ۲۰۱۳. Spatial and temporal distribution of MODIS and MISR aerosol optical depth over northern China and comparison with AERONET. *Chinese Science Bulletin*, ۵۸(۹۴): ۲۴۹۷-۲۵۰۶.
- Rashki, A., D.G. Kaskaoutis., P.G. Eriksson., C.D.W. Rautenbach., C. Flamant and F. A. Vishkaee. ۲۰۱۴. Spatio-temporal variability of dust aerosols over the Sistan region in Iran based on satellite observations. *Natural hazards*, ۷۱(۱): ۵۶۳-۵۸۵.
- Ranjan, A. K., A. K. Patra and A. K. Gorai. (۲۰۲۰). Effect of lockdown due to SARS COVID-۱۹ on aerosol optical depth (AOD) over urban and mining regions in India. *Science of the Total Environment*, ۷۴۵: ۱۴۱۰۲۴.
- Sharma, D., D., Singh and D.G. Kaskaoutis. ۲۰۱۲. Impact of two intense dust storms on aerosol characteristics and radiative forcing over Patiala, northwestern India. *Advances in Meteorology*, ۲۰۱۲.
- Silakhori, E., H.N. Gharemakhor and A. Aghtabai. ۲۰۱۸. Desertification risk assessment of Incheh-broun area in Golestan province using ESAs model. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, ۲۵(۱): ۶۳-۷۰.
- Sorek-Hamer, M., I. Kloog., P. Koutrakis., A. W. Strawa., R. Chatfield., A. Cohen and D. M. Broday, ۲۰۱۵. Assessment of PM_{۲.۵} concentrations over bright surfaces using MODIS satellite observations. *Remote Sensing of Environment*, ۱۶۳: ۱۸۰-۱۸۵.
- Tamiminia, H., B. Salehi., M. Mahdianpari., L. Quackenbush., S. Adeli and B. Brisco. ۲۰۲۰. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, ۱۶۴: ۱۵۲-۱۷۰.
- Vijayakumar, K., P.C.S. Devara., S.V.B. Rao and C.K. Jayasankar. ۲۰۱۶. Dust aerosol characterization and transport features based on combined ground-based, satellite and model-simulated data. *Aeolian Research*, ۲۱: ۷۵-۸۵.