



سنگش از دور

GIS ایران

سنجش از دور و GIS ایران  
Iranian Remote Sensing & GIS

۱-۱۶



## تخمین ترکیبات شیمیایی، غلظت و ارتفاع طوفان‌های گرد و غبار با استفاده از تصاویر و داده‌های ماهواره‌های MODIS & CALIPSO

فرزانه شفیعی<sup>۱\*</sup>، علی درویشی بلورانی<sup>۲</sup>، سعید پورمنافی<sup>۳</sup>، عباس شاهسونی<sup>۴</sup>

۱. کارشناس ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد
۲. استادیار گروه سنجش از دور و GIS دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
۳. استادیار گروه محیط‌زیست دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۴. گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۴/۱۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱/۲۷

### چکیده

طوفان گردوغبار یکی از پدیده‌های جوی است که آثار و پیامدهای زیست‌محیطی نامطلوبی برجای می‌گذارد. بررسی ترکیبات فیزیکی و شیمیایی گردوغبارهای اخیر نشان می‌دهد این گردوغبارها صرفاً متشکل از دانه‌های خاک، شن، ماسه و ذرات نمک نیستند، بلکه ترکیب پیچیده‌ای از عناصر شیمیایی اند، عناصری از قبیل فلزات قلیایی خاکی، کربن، سیلیس، آلومینیوم، پتاسیم، کلسیم و برخی دیگر از عناصر آلی مشاهده می‌شود که تمامی این عناصر می‌توانند اثرات مضر در سلامت محیط‌زیست و به‌ویژه بر موجودات زنده داشته باشند. در این تحقیق شهر اهواز که طی دهه گذشته شاهد طوفان‌های چندی بوده است، بررسی شد. با استفاده از نمونه‌های اندازه‌گیری شده عناصر مورد مطالعه در ایستگاه زمینی و آنالیزهای آزمایشگاهی، محتویات هفت رخداد گردوغبار تعیین شد. تصاویر ماهواره‌های MODIS و داده‌های CALIPSO، به ترتیب، جهت شناسایی عناصر و تعیین غلظت این طوفان‌ها مورد تحلیل قرار گرفتند. پس از تهیه تصاویر MODIS و انجام دادن تصحیحات مورد نیاز، مقادیر طیفی محل نمونه‌برداری ایستگاه زمینی روی تصاویر مشخص شد. با استفاده از روش کمترین مربعات و cross-validation مدل‌سازی ارتباط بین باندهای MODIS و نتایج حاصل از مشاهدات زمینی ایجاد شد. پس از مقایسه و تحلیل نتایج به‌دست‌آمده، مشخص شد که برای عنصر سیلیس، نسبت باند ۲۱ به باند ۲۶ با میزان RMSE در حدود ۱.۲۸، شاخص مناسبی جهت تعیین ترکیبات طوفان‌های گردوغبار با استفاده از تصاویر ماهواره‌های MODIS به‌شمار می‌رود. همچنین، آلومینیوم از نسبت باند ۲۵ به باند ۲۶ با میزان RMSE در حدود ۲.۰۸، کلسیم از نسبت باند ۲۴ به باند ۲۵ با میزان RMSE در حدود ۲.۳، سدیم از نسبت باند ۲۳ به باند ۲۷ با میزان RMSE در حدود ۰.۴۸ و منیزیم از نسبت باند ۱۵ به باند ۲۴ با میزان RMSE در حدود ۰.۷۸، برای شناسایی این عناصر در تصاویر ماهواره‌های MODIS شاخص‌های مناسبی‌اند. با توجه به نتایج و شاخص‌های به‌دست‌آمده برای هر عنصر، تعیین ترکیبات و میزان غلظت عناصر موجود در طوفان‌های گردوغبار، بدون استفاده از نمونه‌های زمینی و فقط با به‌کارگیری تصاویر MODIS و روش به‌دست‌آمده امکان‌پذیر می‌شود. همچنین، با استفاده از داده‌های ماهواره‌های CALIPSO در روزهای مورد مطالعه، مشخص شد که در روزهای گرم سال که نمونه‌برداری زمینی انجام گرفته، میزان غلظت و تراکم گرد غبار بیشتر از روزهای سرد سال است و ارتفاع گردوغبار به شش کیلومتری سطح زمین می‌رسد.

**کلید واژه‌ها:** طوفان گردوغبار، ترکیبات مواد تشکیل‌دهنده طوفان‌ها، داده‌های ماهواره‌های MODIS و CALIPSO.

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: تهران، خیابان وصال شیرازی، دانشگاه تهران، دانشکده جغرافیا، دپارتمان سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، کدپستی ۱۱۷۳۸۶۷۵۲۱.

تلفن: ۰۹۱۲۷۰۰۷۸۲۲.

Email: farzaneh.shafiei@gmail.com

## ۱- مقدمه

تحقیقات درمورد رسوبات کف اقیانوس‌ها نشان می‌دهد که سابقه بروز طوفان‌های گردوغبار به هفتاد میلیون سال پیش، قبل از دوره کرتاسه زمین‌شناسی می‌رسد (Shao et al., 2011). غلظت گردوغبار تولیدشده توسط فعالیت‌های انسانی به‌طور پیوسته از زمان آغاز انقلاب صنعتی در حال افزایش است. اثر این ذرات در جو روی تابش امواج الکترومغناطیسی، با پخش و جذب امواج است (Kawata et al., 2007). طوفان‌های گردوغبار معمولاً از ذرات بسیار ریزی تشکیل شده که عموماً اندازه آنها از ۱۰۰-۶۰ میکرومتر کمتر است و امکان دارد به‌وسیله باد تا فواصل نزدیک انتقال یابند. اما ذراتی که اندازه آنها حدود ۲ میکرومتر است، ممکن است تا فواصل بسیار دور جابه‌جا شوند (Tian et al., 2010). ذرات گردوغبار تا ارتفاع ۶ کیلومتر و تا مسافت ۶۰۰۰ کیلومتر قابل انتقال اند و حتی ممکن است دید افقی را تا ۱ کیلومتر کاهش دهند. گسترش سطحی این پدیده به‌گونه‌ای است که امکان دارد مناطق وسیعی از کشور یا حتی قاره‌ای را تحت تأثیر قرار دهد. تحقیقات اخیر در امریکا نشان داده که بین ظاهر شدن غلظت‌های بالای ذرات موجود در هوا با افزایش مرگ‌ومیر ناشی از بیماری‌های قلبی و عروقی، تنفسی و سرطان ریه ارتباط مستقیمی وجود دارد (Samet et al., 2000; Pope et al., 2002). اثر ذرات معلق و کانی‌های معدنی گردوغبار در طیف الکترومغناطیس باعث می‌شود این طیف طول‌موج کوتاه را به فضا بتاباند و طول‌موج بلند را جذب کند و در نتیجه، باعث گرم شدن کره زمین می‌شود (Xia et al., 2009). بررسی‌های مربوط به فراوانی روزهای گردوغباری ایران نشان می‌دهد که چاله‌های مرکزی ایران بیشترین روزهای گردوغباری را دارند. آمارهای سازمان هواشناسی کشور نشان می‌دهد میانگین روزهای غبارآلود، طی پنجاه سال گذشته در شهرهای اهواز و آبادان، به‌طور میانگین، به‌ترتیب، ۶۵ و ۸۲ روز بوده است که فراوانی وقوع آن در مرداد ماه بیش از ماه‌های دیگر برآورد می‌شود. در زمان پدیده

گردوغبار، مراجعه بیماران ریوی به مراکز درمانی اهواز با رشد ۷۰ درصدی روبه‌رو بوده است (ایران‌منش و همکاران، ۱۳۸۴).

برای شناسایی میزان عناصر موجود در گردوغبار از ایستگاه‌های زمینی آلودگی سنج استفاده می‌شود. اندازه‌گیری‌های این ایستگاه‌ها دقت بالایی دارند، اما این اندازه‌گیری‌ها فقط محدوده‌های اطراف ایستگاه اندازه‌گیری را پوشش می‌دهد و تعداد آنها کم و هزینه‌بر است. فقط با اتکا به اندازه‌گیری‌های زمینی برای برآورد حجم آلودگی‌ها، با در نظر گرفتن منبع، شناسایی مسیر حرکت و خصوصیات شیمیایی انواع آلودگی‌ها در مناطق گوناگون که ایستگاه‌های زمینی آلودگی‌سنج مناسب در آنها تعبیه نشده است، به مشکلات فراوان منجر می‌شود (Kaufman, 1997).

در تحقیقی که در دانشگاه سئول کره جنوبی در سال ۲۰۰۳ انجام گرفت، نتایج نشان داد که غلظت سرب در زمان گردوغبار آسیایی بیش از سه برابر روزهای عادی است. طبق این نتایج، پدیده گردوغبار آسیایی یکی از مهم‌ترین منابع گردوغبار است که عناصری مانند آهن، کلسیم، منیزیم، آلومینیوم و سیلیس دارد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد نسبت اجزای ریز به اجزای درشت در دوره پدیده گردوغبار آسیایی بسیار افزایش می‌یابد (Kim et al., 2003). در مطالعات زراسوندی و همکاران در سال ۱۳۹۰، با تکیه بر آنالیز XRD، ذرات تشکیل‌دهنده گردوغبار را در استان خوزستان بررسی کردند و بیان کردند که این ذرات را در خوزستان می‌شود در سه گروه کانی‌ها خلاصه کرد: ۱. گروه کربنات (کانی غالب: کلسیت)، ۲. گروه سیلیکات (کانی غالب: کوارتز) و ۳. گروه رس‌ها (کانی غالب: کائولن). هُمز و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۴)، ویانا و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۸) و وانگ و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۰۵) نیز هم‌زمان با پدیده گردوغبار به آنالیز ذرات پرداخته‌اند.

1. Holmes et al.
2. Viana et al.
3. Wang et al.

طول موج ۲.۱۲ میکرومتر وجود هواویز و ذرات معلق در مشاهدات ماهواره‌ای تأثیر محسوسی ندارد. به این ترتیب، در این طول موج امکان محاسبه بازتابندگی سطحی وجود دارد. اما در طول موج ۰.۶۴۴ میکرومتر، تأثیر ذرات معلق در اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای محسوس است. بنابراین اگر در این طول موج بازتابندگی سطح مشخص باشد، می‌شود بازتابندگی ناشی از ذرات معلق را برآورد کرد. براساس مشاهدات محققان، بین بازتابندگی سطح در طول موج ۰.۶۴۴ و ۲.۱۲ میکرومتر ارتباطی وجود دارد که با استفاده از آن می‌شود بازتابندگی سطحی را در طول موج ۰.۶۴۴ میکرومتر محاسبه کرد (Kaufman, 1997). برای برآورد میزان حضور هواویزها در گردوغبار هر منطقه، به‌ویژه آلودگی‌های هوا با منشأ انسانی، بهترین راهکار بررسی مقدار آلدوی تفرق منفرد است (بهرام و همکاران، ۱۳۹۳). پایش منابع گردوغبار در شمال شرق آسیا با استفاده از داده‌های دو سنجنده MODIS و NOAA به‌طور هم‌زمان صورت گرفت. اختلاف دمای درخشندگی<sup>۴</sup> (BTDR) بین باندهای ۴ و ۵ سنجنده NOAA و نیز باندهای تشعشی سنجنده MODIS و داده‌های اندازه‌گیری‌شده ایستگاه‌های هواشناسی، به جهت تهیه و آزمون نقشه‌های طوفان ماسه و گردوغبار در ناحیه صحرائی مغولستان و شمال چین به کار رفت. نتایج نشان داد که نقشه‌های طوفان گردوغبار را می‌شود از باندهای تشعشی سنجنده‌ها استخراج کرد (Ochirkhuyang et al., 2008). هوانگ و همکاران<sup>۵</sup> (2007) برای ردیابی گردوغبار شمال غرب چین، مشاهدات حاصل از ابزارهای ماهواره‌ای امواج ماکروویو، مادون قرمز و مرئی را تلفیق کردند. نتایج نشان داد که اندازه‌گیری‌های ماکروویو برای ردیابی گردوغبار در زیر پوشش‌های ابر به کار می‌روند، درحالی‌که اندازه‌گیری‌های مرئی و مادون قرمز برای سامانه‌های بدون ابر مفیدند.

در دیگر مطالعات محققان مشخص شد نسبت کلسیم به آلومینیوم شاخص خوبی برای تعیین منابع بالقوه تولید گردوغبار به‌شمار می‌رود. طبق این شاخص، با محاسبه این نسبت و مقایسه عدد به‌دست‌آمده با نسبت کلسیم به آلومینیوم خاک‌ها در مناطق گوناگون، منشأ گردوغبار مشخص می‌شود (Wang et al., 2009). البته طبق مطالعات ژوانگ<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۲ روی عناصر آلومینیوم، آهن، منگنز، سیلیس، سدیم، وانادیوم، کبالت، نیکل و کروم در آئروسول‌های جمع‌آوری‌شده از شهرهای کشور چین، مشخص شد منشأ آنها منابع پوسته زمین بوده است، درحالی‌که منبع عناصر سرب، روی، کادمیوم، مس، آرسنیک و سلنیوم از آلاینده‌های انسانی است که با باد وارد این شهرها می‌شوند (Jacquelyn et al., 2009). در شرایط گردوغبار، یون‌های  $Na^+$  و  $NH_4^+$ ،  $Cl^-$ ،  $NO_3^-$ ،  $Ca^{+2}$ ،  $SO_4^{2-}$  دارای بالاترین غلظت بوده‌اند. این یون‌ها به سه دسته تقسیم شدند:  $Ca^{+2}$ ،  $Na^+$  و  $Mg^{2+}$  یون‌های شکل‌گرفته از زمین،  $Cl^-$ ،  $SO_4^{2-}$  و  $K^+$  یون‌هایی که هم حاصل آلودگی‌های زیست‌محیطی گوناگون به‌شمار می‌روند و هم احتمال دارد از پوسته زمین باشند، و یون‌های  $NH_4^+$  و  $NO_3^-$  که بیشتر حاصل آلودگی‌های زیست‌محیطی گوناگون‌اند. یون‌هایی که در دسته نخست قرار می‌گیرند، بخش اصلی ذرات هوا را در شرایط گردوغبار به خود اختصاص می‌دهند (Wang et al., 2006). در مطالعه دیگری با استفاده از مدل GEOS-CHEM (مدلی که خصوصیات شیمیایی ذرات معلق را وارد محاسبات می‌کند)، بهبود همبستگی مکانی بین PM-AOD حاصل شد. در این تحقیق، ضریب همبستگی در منطقه مورد مطالعه از ۰.۲۹ تا ۰.۶۸-۰.۵۴ ارتقا یافت (Van Dankelaar, 2006). همچنین بویا<sup>۲</sup> (۲۰۱۰) معتقد است وارد کردن پارامترهای فصلی در بهبود همبستگی بین AOD و غلظت ذرات معلق تأثیر بسیاری دارد.

مطالعات روی شناسایی طول‌موج مؤثر در گردوغبار، به‌وسیله رمز<sup>۳</sup> (۲۰۰۷)، مشخص کرد در

1. Zhuang  
2. Boya  
3. Remer  
4. Brightness Temperature Difference  
5. Huang et al.

ردیابی بر پایه دمای درخشندگی تلفیق‌شده از امواج ماکروویو و امواج مادون قرمز مناسب‌تر از روشی بود که فقط بر پایه اختلاف دمای درخشندگی امواج مادون قرمز باشد. اکرم<sup>۱</sup> (۱۹۸۹) حساسیت باندهای مادون قرمز حرارتی را در مقایسه با گردوغبار بررسی کرد و دریافت که اختلاف دمای درخشندگی بین باندهای ۳ و ۷ و ۱۲ میکرومتر ردیابی رخداد گردوغبار امکان‌پذیر می‌کند. او در ادامه مطالعاتش، اختلاف دمای درخشندگی بین باندهای ۸ و ۱۱ میکرومتر و ۱۱ و ۱۲ میکرومتر را برای هواویزهای زیرین سپهر به‌طور جداگانه تحلیل کرد و دریافت که معمولاً مقدار اختلاف دمای درخشندگی در حضور گردوغبار زیرین سپهری بین طول‌موج‌های ۸ و ۱۱ میکرومتر مثبت و برای ۱۱ و ۱۲ میکرومتر منفی است (Ackerman, 1997). شاخص یکپارچه مادون قرمز حرارتی (TIIDI) برای شناسایی گردوغبار توسعه داده شده است که شاخص بهینه‌ای معرفی شد. اگرچه به‌کارگیری این شاخص ما را به دقت بیش از ۶۵ درصد نمی‌رساند، سادگی روش و در دسترس بودن و پوشش گسترده داده‌های سنجنده MODIS سبب سرعت در شناسایی گردوغبار می‌شود (عطایی و همکاران، ۱۳۹۴).

با ارسال ماهواره CALIPSO به فضا، زمینه دسترسی به اطلاعات گردوغبار به وسیله فناوری LIDAR هموارتر شد (Engel-Cox, Hoff et al. 2006). ماهواره CALIPSO می‌تواند ذرات معلق در هوا را روی سطوح روشن و در زیر ابرهای نازک و همچنین، در شرایط آسمان صاف شناسایی کند. یکی از مزایای متمایز آن اندازه‌گیری مستقیم ساختار عمودی ذرات گردوغبار در مقیاس منطقه‌ای و جهانی است. مأموریت اصلی این ماهواره مطالعه نقش هواویزها و ابرها در سیستم آب‌وهوایی جهانی است. این ماهواره شامل محصولاتی است که برای مقایسه و تحلیل طوفان‌ها در راستای شناسایی تراکم و ارتفاع گردوغبار به کار می‌رود (Geng et al., 2011).

شناسایی عناصر موجود در گردوغبار با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS<sup>۲</sup> و ارتفاع توده‌های گردوغبار با استفاده از داده‌های ماهواره CALIPSO<sup>۳</sup> از اهداف اصلی این تحقیق است.

ردیابی بر پایه دمای درخشندگی تلفیق‌شده از امواج ماکروویو و امواج مادون قرمز مناسب‌تر از روشی بود که فقط بر پایه اختلاف دمای درخشندگی امواج مادون قرمز باشد. اکرم<sup>۱</sup> (۱۹۸۹) حساسیت باندهای مادون قرمز حرارتی را در مقایسه با گردوغبار بررسی کرد و دریافت که اختلاف دمای درخشندگی بین باندهای ۳ و ۷ و ۱۲ میکرومتر ردیابی رخداد گردوغبار امکان‌پذیر می‌کند. او در ادامه مطالعاتش، اختلاف دمای درخشندگی بین باندهای ۸ و ۱۱ میکرومتر و ۱۱ و ۱۲ میکرومتر را برای هواویزهای زیرین سپهر به‌طور جداگانه تحلیل کرد و دریافت که معمولاً مقدار اختلاف دمای درخشندگی در حضور گردوغبار زیرین سپهری بین طول‌موج‌های ۸ و ۱۱ میکرومتر مثبت و برای ۱۱ و ۱۲ میکرومتر منفی است (Ackerman, 1997). شاخص یکپارچه مادون قرمز حرارتی (TIIDI) برای شناسایی گردوغبار توسعه داده شده است که شاخص بهینه‌ای معرفی شد. اگرچه به‌کارگیری این شاخص ما را به دقت بیش از ۶۵ درصد نمی‌رساند، سادگی روش و در دسترس بودن و پوشش گسترده داده‌های سنجنده MODIS سبب سرعت در شناسایی گردوغبار می‌شود (عطایی و همکاران، ۱۳۹۴).

در سال ۲۰۰۶، انگل<sup>۲</sup> بیان داشت ترکیب داده‌های LIDAR و تصاویر ماهواره‌ای MODIS و اندازه‌گیری‌های زمینی امکان آن را دارند تا اساس تشکیل نمایش سه‌بعدی کیفیت هوا باشند. یکپارچه‌سازی و استفاده هم‌زمان این سه نوع مشاهدات سودمندتر از استفاده جداگانه آنهاست. مشاهدات میدانی گردوغبار، به‌طور کلی، به پوشش زمانی و مکانی محدود شده است. در مقابل، مشاهدات ماهواره‌ای با پوشش فضایی و بدون وقفه ابزاری مؤثر برای نظارت بر توزیع ذرات معلق جهانی است. سنسورهای ماهواره‌ای گوناگون، مانند AVHRR، TOMS، MODIS، MISR، OMI، و SeaWiFS به تهیه AOD می‌پردازند. محصولات سنسورهای غیرفعال به‌طور عمده، شامل اطلاعات کمی مربوط به توزیع عمودی ذرات معلق در هواست (Zarzycki and Bond, 2010). ماهواره کالیپسو مکمل

1. Ackerman  
2. Engel  
3. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer  
4. Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation



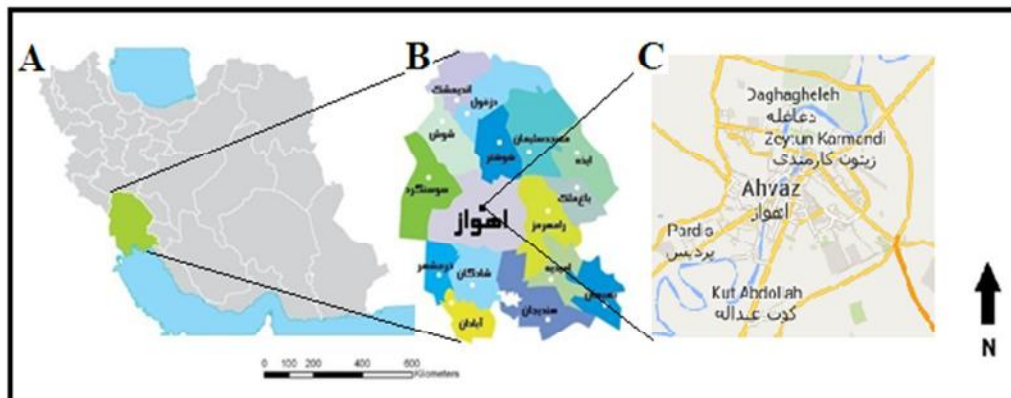
## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

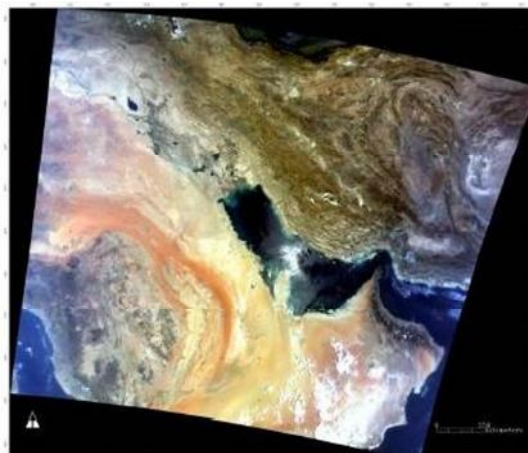
اهواز، مرکز استان خوزستان و یکی از کلان‌شهرهای ایران، در موقعیت جغرافیایی  $31^{\circ}20'$  عرض شمالی و  $48^{\circ}40'$  طول شرقی در بخش جلگه‌ای خوزستان و با ارتفاع ۱۸ متر از سطح دریا قرار دارد. بر پایه تازہ‌ترین آمار رسمی، ۳۲٪ مردم استان خوزستان در کلان‌شهر اهواز زندگی می‌کنند. نمونه‌برداری در ایستگاه زمینی، در موقعیت جغرافیایی  $31^{\circ}17'51''$  و در طول  $48^{\circ}39'1''$  شرقی، واقع در پشت‌بام مؤسسه تحقیقات ملی سلامت اهواز و در فاصله ده متری از سطح زمین انجام گرفته است. این ارتفاع اثر رفت‌وآمد ماشین‌ها و نیز اثر ساختمان‌ها در الگوهای باد را به کمترین میزان می‌رساند. مدت زمان نمونه‌برداری ۲۴ ساعت، از ۸ صبح تا ۸ صبح روز بعد، است اما در روزهای گردوغبار، با توجه به شدت گردوغبار، زمان نمونه‌برداری بین ۴-۶

ساعت بوده است. در این تحقیق، نمونه‌گیری از عناصر در هفت روز متفاوت در سال ۱۳۸۹ انجام شد. ایستگاه انستیتو تحقیقات ملی سلامت اهواز در شمال‌غرب این شهر و در جهت باد غالب و همچنین، دور از صنایع، در نقطه ورودی شهر قرار گرفته است (شکل ۱).

سنجنده MODIS در قدرت تفکیک‌های مکانی ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر دارای حساسیت رادیومتریکی ۱۲ بیتی در ۳۶ باند طیفی و دامنه طیفی از طول‌موج‌های ۰/۴-۱۴/۴ میکرومتر تصویربرداری کرده که این قابلیت‌ها نیازهای کاربران گوناگون را برطرف می‌کند (Savtchenko et al., 2004). این سنجنده در مدار ۷۰۵ کیلومتری از سطح زمین قرار دارد، پهنای نوارهای تصویربرداری آن ۲۳۳۰ کیلومتر است و در نتیجه، در هر یک یا دو روز، پوشش جهانی را فراهم می‌کند. باندهای طیفی ۱، ۳ و ۷ در بازبانی اطلاعات گردوغبار پرکاربردند (Remer et al, 2005).



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه. (A) نقشه کشور، (B) استان خوزستان، (C) محل نمونه‌برداری در اهواز

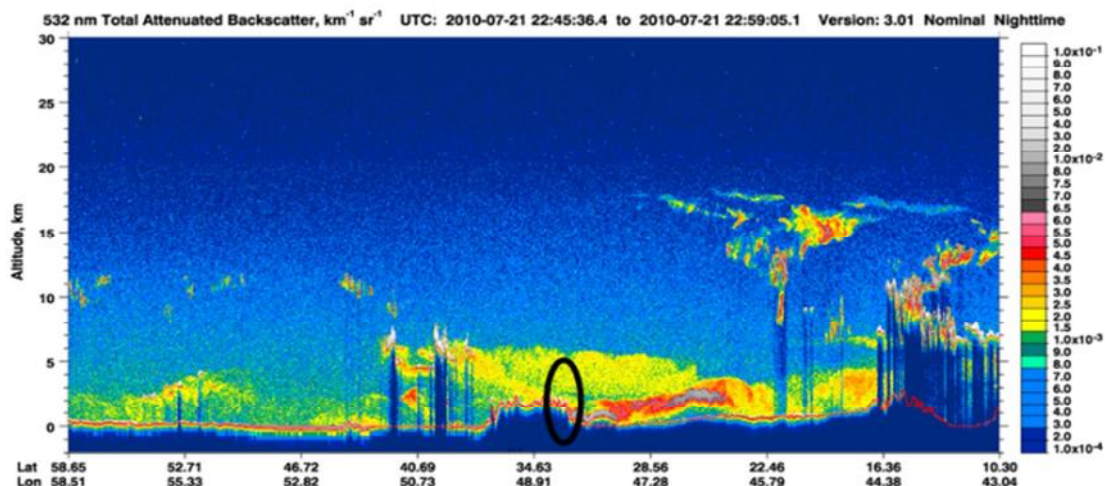


شکل ۲. تصویر ماهواره‌ای MODIS ترکیب رنگی باند ۱، ۳ و ۴

### – تصویر مجموع سیگنال بازتابی عمودی و موازی

در طول موج ۵۳۲ نانومتر ماهواره CALIPSO با استفاده از این محصول، تشخیص عوارض از یکدیگر و حذف نویزها امکان‌پذیر خواهد بود. در شکل ۳، یک نمونه داده این ماهواره در یکی از زمان‌های نمونه‌گیری، به همراه مقیاس رنگ آن، آورده شده است. سیگنال‌های بازتابی با کدهای رنگی متفاوتی نمایش داده می‌شوند. آنچه در تصویر مجموع سیگنال بازتابی وجود دارد، خط ممتد قرمز در محدوده ارتفاعی نشان‌دهنده سطح زمین است و به وسیله آن می‌شود پستی و بلندی منطقه را مشاهده کرد. در توصیف مقیاس رنگ به کاررفته در سمت راست هر تصویر، قسمت مربوط به رنگ‌های آبی پراکندگی مولکولی و پراکندگی ضعیف گردوغبار را نمایش می‌دهد و ذرات معلق در هوا با رنگ زرد و قرمز و نارنجی مشخص می‌شوند. برای ابرها، در صورتی که ابر ضخامت زیادی داشته باشد، سیگنال‌های بازتابی در تصویر در محدوده خاکستری ترسیم می‌شوند، در حالی که ابرهای ضعیف‌تر به رنگ‌های زرد و قرمز نمایش داده می‌شوند. در هر تصویر، می‌شود ارتفاع هواپیزها و ابرها را در محل مختصات جغرافیایی که در پایین تصویر مشخص شده و با استفاده از قسمت Altitude در سمت چپ تصویر، برحسب کیلومتر محاسبه کرد.

ماهواره CALIPSO در ۲۸ آوریل ۲۰۰۶، طی برنامه‌ای مشترک میان سازمان فضایی امریکا<sup>۱</sup> و سازمان فضایی فرانسه<sup>۲</sup> به فضا پرتاب شد. این ماهواره در مداری یکسان با ماهواره Aqua، با نام A-Train، و به فاصله زمانی ۹۰ ثانیه بعد از آن در حال گردش است. این مجموعه ماهواره‌ها در مدار قطبی خورشیدآهنگی، با ارتفاع ۷۰۵ کیلومتر و زمان عبور محلی ۱۳:۳۰ از مدار استوا قرار دارند. مدار A-Train شامل ماهواره‌های OCO، Aqua، Cloudsat، CALIPSO، PARASOL، Glory و Aura است. داده‌های ماهواره CALIPSO پارامترهایی مانند مجموع سیگنال بازپخش عمودی و موازی در ۵۳۲ نانومتر، سیگنال بازپخش عمودی در ۵۳۲ نانومتر، سیگنال بازپخش در ۱۰۶۴ نانومتر، ارتفاع، طول جغرافیایی و عرض جغرافیایی دارد (شکل ۳). رزولوشن مکانی عمودی با تغییرات ارتفاع تغییر می‌کند. داده‌های این ماهواره، یکبار در روز به ایستگاه زمینی منتقل می‌شوند، بایگانی داده‌ها به DMS انتقال داده می‌شود و در مرکز تحقیقات LANGLEY NASA پردازش می‌شوند. DMS طیف گسترده‌ای از داده را در لایه‌های متفاوت، برای بالا بردن کیفیت و دقت محصولات با داده‌های فرعی، مانند هواشناسی ترکیب می‌کند.



شکل ۳. تصویر مجموع سیگنال بازتابی عمودی و موازی CALIPSO در طول موج ۵۳۲ نانومتر

1. NASA
2. CNES

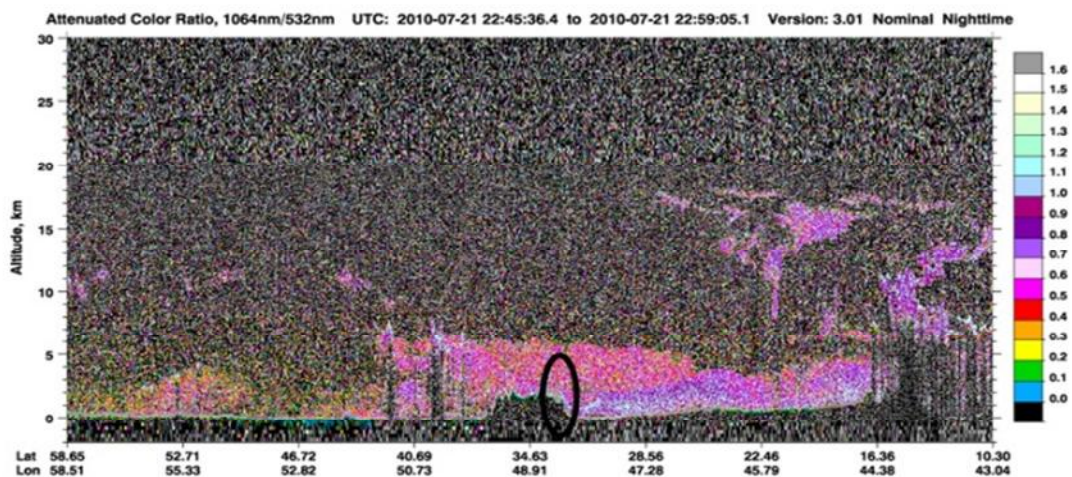
افقی به دست می‌آید، می‌شود برای تفکیک ذرات کروی و غیرکروی استفاده کرد. مقیاس رنگی این تصویر بیان می‌کند محدوده مربوط به مقدار هواویزهای گردوغبار در این تصاویر تقریباً در محدوده<sup>۳</sup> ۰.۱۵ است، در حالی که برای ابرهایی مانند ابر سیروس، در محدوده<sup>۴</sup> ۰.۲۵ تا ۰.۴ است (http://www-calipso.larc.nasa.gov/CALIPSO HOME → CALIPSO User's Guide → Browse Tutorial). با بهره‌گیری از این تصویر، افزون بر شناسایی ارتفاع گردوغبار روی منطقه، می‌شود ابرهای روی منطقه را تفکیک و شناسایی کرد. با توجه به اینکه تفکیک گردوغبارهای متراکم از ابرها کار دشواری است، استفاده از این تصاویر در سنجش از دور امکان این کار را فراهم کرده است. در شکل ۵ نمونه‌ای از این تصویر قرار گرفته که نشان می‌دهد در تاریخ نمونه‌گیری، ابر سیروسی روی منطقه وجود ندارد و گردوغبار میزان تراکم بالاتری دارد.

### – تصویر نسبت ضریب پراکندگی نرمال شده<sup>۱</sup> در طول موج ۱۰۶۴ نانومتر به ضریب پراکندگی نرمال در ۵۳۲ نانومتر

این محصول برای به دست آوردن اطلاعات از اندازه ذرات به کار می‌رود. در شکل ۴، نمونه‌ای از این محصول با مقیاس رنگی این تصویر مشخص شده است. در این تصویر، ذرات با مقادیر کمتر یا مساوی یک هواویز را نشان می‌دهند و ذرات بزرگ‌تر از یک ابرهای محدوده تصویربرداری را نشان می‌دهند. این تصویر که در یکی از تاریخ‌های نمونه‌گیری زمینی تصویربرداری شده، در ۲۰۱۰/۷/۲۱ روی محل نمونه برداری، نشان می‌دهد میزان گردوغبار منطقه نمونه‌گیری، واقع در اهواز، به نسبت اطراف ارتفاع بیشتری دارد و محدوده تراکم گرد غبار به ارتفاع ۶.۵ کیلومتری رسیده است.

### – تصویر نسبت دیپلاریزاسیون<sup>۲</sup> در طول موج ۵۳۲ نانومتر

از این تصویر که از نسبت دیپلاریزاسیون عمودی به

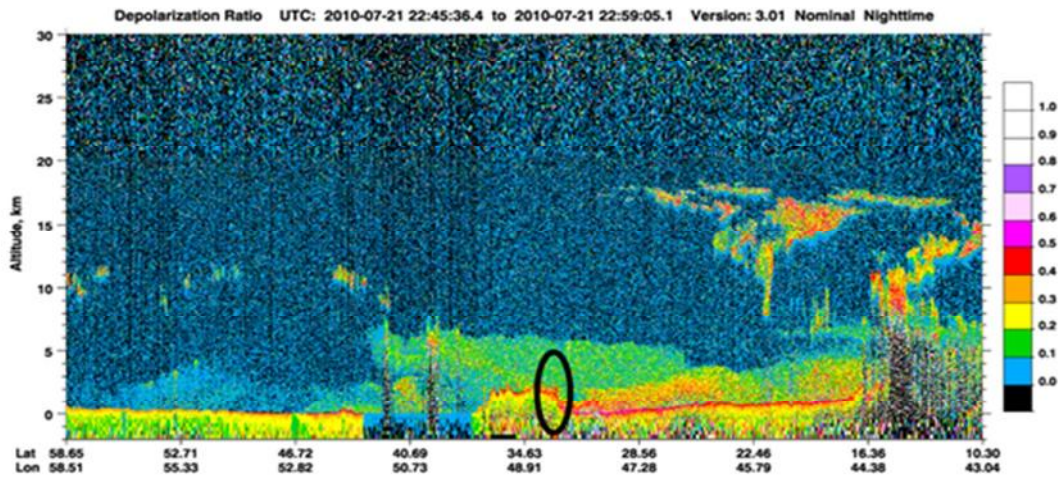


شکل ۴. تصویر نسبت ضریب پراکندگی نرمال شده در طول موج ۱۰۶۴ نانومتر به ضریب پراکندگی نرمال در ۵۳۲ نانومتر

1. Normalized Scattering Coefficient
2. Depolarization ratio
3. range



تخمین ترکیبات شیمیایی، غلظت و ارتفاع طوفان‌های گرد و غبار با استفاده از ...



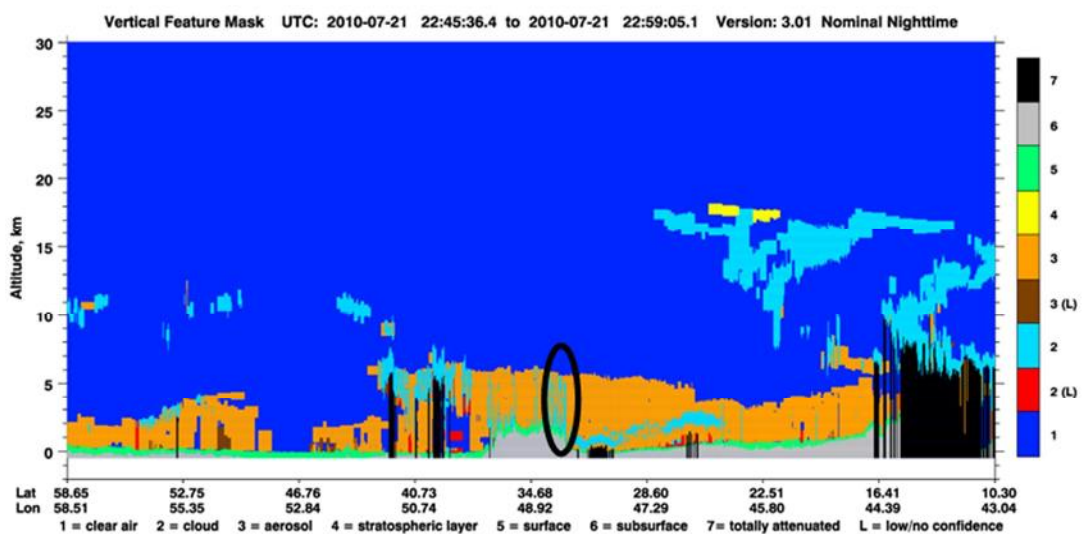
شکل ۵. تصویر نسبت مقادیر پلاریزه‌نشده عمودی به مقادیر پلاریزه‌نشده موازی در طول موج ۵۳۲ نانومتر

#### – محصول VFM

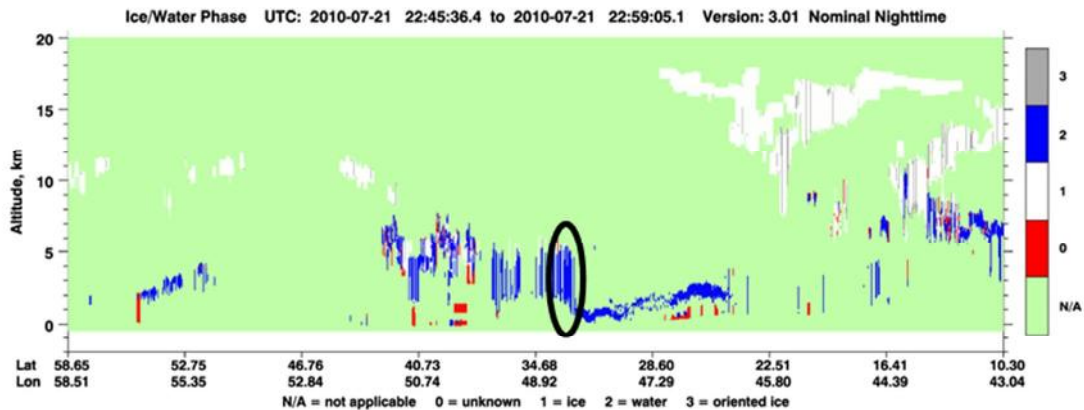
در شکل ۶ نمونه‌ای از این تصویر روی منطقه مطالعاتی نمایش داده شده است. با استفاده از این تصویر و لژاند مربوط به آن، دیگر عوارض به‌راحتی از یکدیگر تفکیک و قابل شناسایی می‌شوند. در منطقه مطالعاتی میزان ابر کمی وجود دارد و تراکم گردوغبار بیشتر است. روی منطقه تا ارتفاع ۶.۵ کیلومتری هوای پاک وجود ندارد.

#### – محصول Ice/Water phase

در این محصول می‌شود به‌راحتی میزان تراکم و ارتفاع قطرات آب و یخ را روی منطقه مشاهده کرد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، تراکم قطرات آب از گردوغبار تفکیک شده و روی منطقه مطالعاتی، میزان قطرات آب در مقایسه با مناطق اطراف بیشتر و در ارتفاع شش کیلومتری از منطقه است.



شکل ۶. تفکیک عوارض و پدیده‌های گوناگون با استفاده از محصول VFM



شکل ۷. تفکیک یخ از آب در لایه‌های ابر با محصول Ice/Water phase

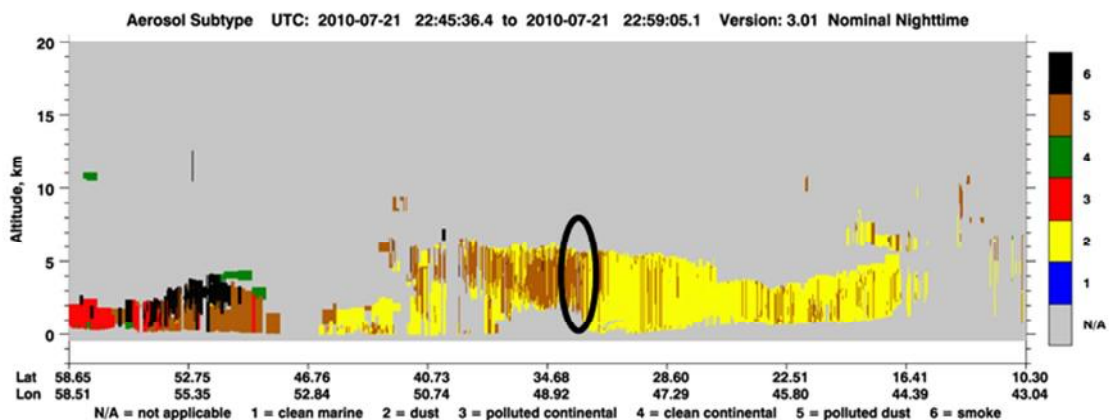
برای تطبیق مطالعات سنجش از دور و اطلاعات زمینی جهت تعیین میزان صحت و حصول دقت بیشتر، در مراحل گوناگون مطالعات از نمونه‌های زمینی مورد استفاده در مطالعات شاهسونی و همکاران (۱۳۹۲) استفاده شد که از ذرات معلق در هوا و تحلیل اجزا و عناصر موجود در آنها نمونه‌گیری کرده است. نمونه‌گیری‌ها با دستگاه نمونه‌بردار با حجم زیاد<sup>۱</sup> صورت گرفته و ذرات معلق با قطر کمتر از ۱۰ میکرومتر<sup>۲</sup> و کل ذرات معلق<sup>۳</sup> هریک، جداگانه، تجزیه و تحلیل شده‌اند. با

#### محصول Aerosol Subtype

با به‌کارگیری این محصول، تراکم و ارتفاع گردوغبار، گردوغبارهای آلوده، گردوغبارهای قاره‌ای و دود روی منطقه از یکدیگر تفکیک و شناسایی می‌شوند. با توجه به شکل ۸، گردوغبار و آلودگی‌های قاره‌ای روی منطقه نمونه‌گیری وجود دارد.

#### ۲-۲- روش کار

پس از تهیه تصاویر و داده‌های ماهواره‌ای مورد نظر،



شکل ۸. تفکیک عوارض و پدیده‌های گوناگون با استفاده از محصول Aerosol Subtype

1. Hi-Vol
2. PM10
3. TSP

باند‌ها با عناصر نمونه‌گیری شده مقایسه و ارزیابی شد. با توجه به تعداد کم نمونه‌های زمینی در این تحقیق، برای دستیابی به نتایج با دقت بالاتر در جهت شناسایی عناصر نمونه‌گیری شده، با بهره بردن از تصاویر MODIS، از روش Cross-Validation استفاده شد. اعتبارسنجی ضربدری<sup>۵</sup> که گاه تخمین گردشی نیز نامیده می‌شود، روشی برای ارزیابی است که نشان می‌دهد نتایج تحلیل‌های آماری مجموعه داده‌ها تا چه اندازه تعمیم‌پذیر و مستقل از داده‌های آموزشی است. این تکنیک به‌طور ویژه در موارد پیش‌بینی به‌کار می‌رود تا مشخص شود مدل مورد نظر تا چه اندازه در عمل مفید خواهد بود. به‌طور کلی، هر دور اعتبارسنجی ضربدری شامل افزایش داده‌ها به دو زیرمجموعه مکمل، تحلیل یکی از آن زیرمجموعه‌ها (داده‌های آموزشی) و تحلیل اعتبارسنجی با استفاده از داده‌های مجموعه دیگر (داده‌های اعتبارسنجی یا تست) است. برای کاهش پراکندگی، عمل اعتبارسنجی چندین بار با افزایش گوناگون انجام و از نتایج اعتبارسنجی‌ها میانگین گرفته می‌شود. هنگامی که جمع‌آوری داده‌های بیشتر مشکل، پرهزینه و یا ناممکن باشد، استفاده از اعتبارسنجی ضربدری کمک می‌کند از فرضیات بایاس شده با داده‌های فعلی که تعمیم‌پذیر نیستند، دوری شود.

در اعتبارسنجی K-Fold، داده‌ها به K زیرمجموعه افزایش می‌شوند. از این K زیرمجموعه، هر بار یکی برای اعتبارسنجی و K-1 تای دیگر برای آموزش به‌کار می‌روند. این روند K بار تکرار می‌شود و در هر تکرار، همه داده‌ها دقیقاً یکبار برای آموزش و یکبار برای اعتبارسنجی به‌کار می‌روند. در نهایت، میانگین نتیجه این K مرتبه اعتبارسنجی به‌منزله تخمینی نهایی برگزیده می‌شود. البته می‌شود از روش‌های دیگر برای ترکیب نتایج استفاده کرد. در این تحقیق، با توجه به تعداد روزهای نمونه‌گیری زمینی K در محاسبات برابر با هفت قرار گرفت.

1. Digital number
2. Root Mean Square Error
3. Fit
4. RMSE
5. cross-validation

توجه به مقدار بسیار اندک برخی عناصر در واحد حجم، مانند مولیبدین، باریم، بریلیم، کروم، سرب، کادمیم در این تحقیق بررسی نشده‌اند. عناصر گردوغبار مورد بررسی در این تحقیق سیلیس، سدیم، آلومینیوم، کلسیم و منیزیم هستند که به‌نسبت عناصر دیگر در طوفان‌های گردوغبار، برحسب میکروگرم در هر متر مکعب برای هفت روز متفاوت در سال ۱۳۸۹، فراوانی بیشتری دارند (شکل ۹).

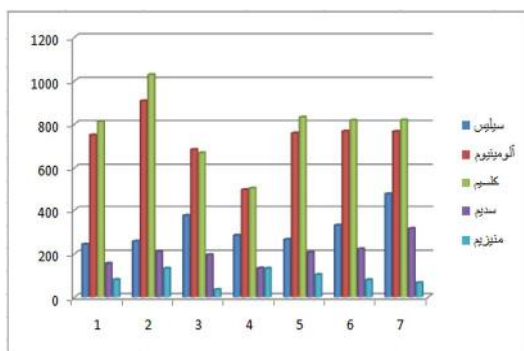
در مرحله آنالیز تصاویر MODIS، برای تعیین پیکسل‌های واقع در محل جمع‌آوری نمونه‌های زمینی و مقایسه آنها با مقادیر ثبت‌شده در مطالعات زمینی، نخست با استفاده از مختصات جغرافیایی، منطقه نمونه‌گیری زمینی بر تصاویر ماهواره‌ای منطبق شد. با توجه به ماهیت پدیده گردوغبار که معمولاً به‌صورت همگن در مناطق رسوب‌گذاری مشاهده می‌شود و با توجه به ابعاد پیکسل‌ها (۱۰۰۰\*۱۰۰۰ متر)، میانگین مقادیر یک پنجره ۳\*۳ پیکسل در اطراف منطقه نمونه‌گیری شده انتخاب شد. به این ترتیب، برای هر باند از سنجنده MODIS، داده‌های ماهواره‌ای متناظر با آن در منطقه مورد مطالعه محاسبه و ثبت شد. در نهایت، با داشتن مقادیر متناظر با هر روز گردوغبار از تصاویر ماهواره‌ای، با مقادیر عناصر موجود در نمونه‌های زمینی امکان مقایسه و تحلیل فراهم شد.

برای ایجاد ارتباط بین مقادیر DN<sup>۱</sup> هر باند در تصاویر MODIS و مقادیر اندازه‌گیری شده روی ایستگاه زمینی، با استفاده از روش کمترین مربعات<sup>۲</sup>، میزان خطای به‌دست‌آمده برای هر عنصر برای هر باند جداگانه محاسبه شد. در واقع، کمترین مربعات روشی برای برازش<sup>۳</sup> یک مدل به داده‌هاست و بهترین مدل برازش شده بر مجموعه‌ای از داده‌ها مدلی است که در آن، مجموع مربع باقی‌مانده‌ها کمینه باشد. منظور از باقی‌مانده‌ها<sup>۴</sup> اختلاف بین داده مشاهده شده و مقداری است که از مدل به‌دست می‌آید. در این تحقیق، نتایج به‌دست‌آمده از روش کمترین مربعات با استفاده از DN ماهواره MODIS به‌منزله ماتریس معلومات، و عناصر نمونه‌برداری شده زمینی به‌منزله ماتریس مشاهدات در نظر گرفته شد. سپس مقدار باقی‌مانده برای تک‌تک

به دست آمد.

### ۲-۳- نتایج

مقادیر هریک از عناصر نمونه‌گیری شده در هفت روز مورد نظر به صورت نمودار در شکل ۴ مشخص شده است. با توجه به نمودار، حاصل میزان کلسیم و آلومینیوم به نسبت دیگر عناصر گردوغبار در روزهای مطالعاتی بیشتر است.



شکل ۹. مقادیر اندازه‌گیری شده عناصر مورد نظر در هفت روز متفاوت برحسب میکروگرم در هر متر مکعب (منبع: شاهسونی، ۱۳۸۹)

در جدول ۱، با استفاده از روش تک‌باند، باندی که از میان ۳۶ باند ماهواره MODIS، کمترین خطا را برای هر عنصر دارد، مشخص شد.

جدول ۱. باند مناسب برای پیش‌بینی عنصر نمونه‌برداری شده با روش تک‌باند

عناصر	RMSE	باند	طول موج
سیلیس	۹۲.۲۸	۲	$\mu\text{m} 0.44$
آلومینیوم	۸۴.۴۹	۲	$\mu\text{m} 0.44$
کلسیم	۵۲.۲۸	۱۰	$\mu\text{m} 0.67$
سدیم	۴۱.۰۸	۲	$\mu\text{m} 0.44$
منیزیم	۱۱.۳۷	۱۸	$\mu\text{m} 1.37$

با استفاده از رابطه (۱)، دو باندی که از میان ۳۶ باند ماهواره MODIS، از نسبت‌گیری آنها کمترین خطا را به دست می‌آوردند، مشخص شد (جدول ۲). برای هر عنصر، دو باندی که از نسبت آنها کمترین خطا حاصل شد، با علامت اختصاری  $b_i$  و  $b_j$  نشان داده شدند.

در مرحله شاخص‌سازی، برای اعتبارسنجی در مقایسه با نتایج حاصل از نمونه‌های زمینی، ابتدا هر باند در محاسبات کمترین مربعات، جداگانه بررسی شد. سپس با توجه به میزان RMSE کمتر برای هر عنصر، باندی که توانایی بهتری در تشخیص عنصر مورد نظر داشت، شناسایی شد و نتایج نهایی از روش تک‌باند در جدول ۱ قرار گرفت. در مرحله دوم حاصل رابطه (۱) که از نسبت تک‌تک باندها به یکدیگر به دست آمده، در محاسبات کمترین مربعات و اعتبارسنجی ضربدری قرار گرفت. پس از تحلیل نتایج آماری، باند مناسب با کمترین خطا برای شناسایی هر عنصر پیش‌بینی شد. سپس با استفاده از رگرسیون خطی، میزان همبستگی میان دو باند محاسبه شد (جدول ۲).

رابطه (۱)  

$$\frac{b_i}{b_j}$$
 $i$  و  $j$  شماره باندهای ماهواره MODIS هستند و  $b_i$  و  $b_j$  مقادیر DN باندهای ماهواره MODIS، به ترتیب، از ۱ تا ۳۶ هستند.

در مرحله بعد، روش دیگری برای کاهش میزان RMSE به کار برده شد. در این مرحله، مقدار حاصل از نسبت نرمال‌شده اختلاف میان دو باند که از رابطه (۲) به دست آمد، در محاسبات کمترین مربعات و اعتبارسنجی ضربدری قرار گرفت و نتایج به دست آمده برای پیش‌بینی باند مناسب با کمترین خطا و میزان همبستگی دو باند محاسبه شد (جدول ۳).

رابطه (۲)  

$$\frac{b_i - b_j}{b_i + b_j}$$
 $i$  و  $j$  شماره باندهای ماهواره MODIS هستند و  $b_i$  و  $b_j$  مقادیر DN باندهای ماهواره MODIS، به ترتیب از ۱ تا ۳۶ محسوب می‌شوند.

پس از آنالیز تصاویر ماهواره MODIS و شناسایی مناسب‌ترین باند برای هر عنصر، به معرفی محصولات CALIPSO در یکی از تاریخ‌های نمونه‌گیری به چگونگی شناسایی تراکم و میزان ارتفاع گردوغبار روی منطقه پرداخته شد. سپس با مقایسه همه تصاویر در هریک از تاریخ‌های مورد مطالعه، نتایج این پژوهش

همچنین در جدول ۳، دو باندی نمایش داده شدند که کمترین خطا را از رابطه (۲) دارند. به صورت گردوغبار وارد جو می‌شوند (عطایی و همکاران، ۱۳۸۹). وقوع طوفان‌های گردوغبار با

جدول ۲. دو باند مناسب برای پیش‌بینی عنصر نمونه‌برداری شده با استفاده از رابطه (۱)

عنصر	RMSE	bi	طول موج bi	bj	طول موج bj	میزان همبستگی دو باند
سیلیس	۱.۲۸	۲۱	۳.۷۵ μm	۲۶	۴.۵۱ μm	۰.۴۳
آلومینیوم	۲.۰۸	۲۵	۴.۴۶ μm	۲۶	۴.۵۱ μm	۰.۹۷
کلسیم	۲.۳۰	۲۴	۴.۰۵ μm	۲۵	۴.۴۶ μm	۰.۳۷
سدیم	۰.۴۸	۲۳	۳.۹۵ μm	۲۷	۶.۷۱ μm	۰.۰۹
منیزیم	۰.۷۸	۱۵	۰.۹۳ μm	۲۴	۴.۰۵ μm	۰.۲۵

جدول ۳. دو باند نرمال شده مناسب برای پیش‌بینی عنصر نمونه‌برداری شده از رابطه (۲)

عنصر	RMSE	bi	طول موج bi	bj	طول موج bj	میزان همبستگی دو باند
سیلیس	۱۷.۸	۲۶	۴.۵۱ μm	۲۵	۴.۴۶ μm	۰.۹۷
آلومینیوم	۱۰.۹۸	۲۳	۳.۹۵ μm	۲۵	۴.۴۶ μm	۰.۳۴
کلسیم	۲۰.۹۸	۲۴	۴.۰۵ μm	۲۵	۴.۴۶ μm	۰.۳۷
سدیم	۶.۷۴	۲۲	۳.۹۵ μm	۲۵	۴.۴۶ μm	۰.۳۵
منیزیم	۷.۸۰	۲۴	۴.۰۵ μm	۲۵	۴.۴۶ μm	۰.۳۷

شرایط اقلیمی محلی مانند بارندگی و دما و نیز ویژگی‌های سطح زمین همچون پوشش گیاهی، پوشش برف روی سطح زمین و بافت خاک ارتباط نزدیکی دارد. برخی پژوهشگران بر این باورند که در برخی مناطق، مانند شرق آسیا، میان وقوع ریزگردها و سرعت باد در مجاورت سطح زمین همبستگی بسیاری وجود دارد. در حالی که در برخی تحقیقات، به دلیل داشتن منشأ محلی، هیچ‌گونه همبستگی مطلوبی بین سرعت باد و فراوانی وقوع ریزگرد مشاهده نشده است (جلالی و همکاران، ۱۳۹۰). برخی پژوهشگران عقیده دارند تغییرات اقلیمی منطقه‌ای در وقوع طوفان‌های گردوغبار نقش مهمی بازی می‌کند. همچنین، آنها نشان دادند که دمای بالای هوا، بارندگی کم، پوشش گیاهی فقیر و سرعت زیاد باد شرایط مساعدی برای وقوع طوفان‌های گردوغبار فراهم می‌کنند (Nastagdori et al., 1999).

هریک از داده‌های ماهواره CALIPSO در یکی از روزهای نمونه‌گیری زمینی روی منطقه مورد مطالعه، با استفاده از طول و عرض جغرافیایی، از دیگر مناطق اطراف متمایز شد و با توجه به ویژگی‌های محصولات تولیدشده در هریک از تاریخ‌های نمونه‌گیری، میزان تراکم و ارتفاع گردوغبار منطقه شناسایی شد.

### ۳- بحث و نتیجه‌گیری

طوفان‌های گردوغبار وقتی پدید می‌آیند که مجموع بارش سالیانه از بارش میانگین بلندمدت به طرز چشمگیری کمتر می‌شود. با افزایش دما در اواخر زمستان و اوایل بهار، دمای هوای مجاور سطح خاک افزایش پیدا می‌کند. این افزایش دما موجب بروز تلاطم و وزش باد در لایه‌های زیرین اتمسفر می‌شود. اگر سرعت وزش باد از سرعت آستانه فرسایش فزونی یابد، بخش زیادی از ذرات خاک از بستر خود جدا و



به ديگر باندها خطای کمتری دارد. همچنين، عنصر Al با ميزان RMSE در حدود ۲۰۰۸ و با استفاده از نسبت باند ۲۵ به باند ۲۶، عنصر Ca با ميزان RMSE در حدود ۲۰۳ و با استفاده از نسبت باند ۲۴ به باند ۲۵، عنصر Na با ميزان RMSE در حدود ۰۰۴۸ و با استفاده از نسبت باند ۲۳ به باند ۲۷، عنصر Mg با ميزان RMSE در حدود ۰۰۷۸ و با استفاده از نسبت باند ۱۵ به باند ۲۴، قابل اندازه‌گیری‌اند. همچنين، ميزان همبستگی باندهای منتخب برای هر عنصر محاسبه شد. نتایج نشان داد که میان باندهای شناسایی شده برای عناصر سيليس، سدیم، کلسيم و منيزيم همبستگی کمی وجود دارد، در صورتی که برای عنصر Al باندهای ۲۵ و ۲۶ کاملاً به هم وابسته‌اند. همه باندهای به‌کاررفته در این روش برای شناسایی عناصر موجود در گردوغبار، در محدوده مادون‌قرمز قرار دارند و درمقایسه با روش Remer (۲۰۰۶) که با تک‌باند کار کرد، به یکدیگر نتایج نزدیکی داشتند. برای شناسایی عناصر سيليس، آلومينيوم و سدیم، استفاده از باند ۲ سنجنده MODIS با طول موج ۰۰۴۴ میکرومتر در محدوده طيف مرئی و توان تفکيک ۲۵۰ متر، درمقایسه با باندهای ديگر خطای کمتری به دست می‌دهد. همچنين برای عنصر کلسيم، باند ۱۰ با طول موج ۰۰۶۷ میکرومتر، درمقایسه با باندهای ديگر، RMSE کمتری دربر داشت که این باند هم در محدوده طيف مرئی قرار دارد و توان تفکيک آن ۱۰۰۰ متر است. همچنين، عنصر منيزيم با استفاده از باند ۱۸ با طول موج ۱۰۳۷ میکرومتر، در محدوده مادون‌قرمز، به نسبت باندهای ديگر کمترین ميزان RMSE را داشت.

در تحليل‌های داده‌ها و محصولات CALIPSO در منطقه نمونه‌گیری، ذرات آب، يخ، ابر، ابرهای سيروس، هوای پاک، گردوغبارهای معدنی و گردوغبارهای آلوده از ذرات گردوغبار تفکيک و ارتفاع آن محاسبه شد. در تصاویری که از منطقه مورد نظر در فصل زمستان به دست آمد، هيچ نوع قطرات آب و يخ و ابر سيروسی در بالای فضای آن منطقه وجود ندارد. درحالی که در

با توجه به مطالعات پيشين و تحقیقات پژوهش حاضر، بين پارامترهای اقلیمی و فراوانی وقوع طوفان‌های گردوغبار در استان خوزستان ارتباط مؤثری وجود دارد، به طوری که دو فصل بهار و تابستان با خشکی آب‌وهوا و کاهش رطوبت موجود در خاک همراه‌اند. در نتیجه، ذرات محلی و فراملی بیشتری بلند می‌شود و افزایش سرعت باد به افزایش ارتفاع گردوغبار در این فصل‌ها می‌انجامد.

با توجه به مطالعات درمورد عناصر گردوغبار، در این تحقیق عناصری که در گردوغبار فراوانی بیشتری داشتند، مانند آلومينيوم، سيليس، کلسيم، سدیم و منيزيم، برای نمونه‌گیری‌های زمینی انتخاب شدند. نتایج حاصل از این تحقیق روی باندهای گوناگون MODIS و ترکیب و به دست آوردن نسبت‌های متفاوت از آنها و محاسبه ميزان کمترین خطا برای هر عنصر با استفاده از روش کمترین مربعات و اعتبارسنجی ضربدری و مقایسه نتایج به دست آمده با یکدیگر، مشخص کرد ميزان RMSE برای عناصر نمونه‌گیری شده با استفاده از نسبت میان دو باند از رابطه (۱)، درمقایسه با حالت تک‌باند خطای بسیار کمتری داشت. استفاده از روش تک‌باند مشخص کرد باند ۲ سنجنده MODIS با طول موج ۰۰۴۴ میکرومتر در محدوده طيف مرئی و توان تفکيک ۲۵۰ متر، به نسبت باندهای ديگر، برای شناسایی عناصر سيليس و آلومينيوم و سدیم خطای کمتری دارد. برای عنصر کلسيم باند ۱۰، درمقایسه با باندهای ديگر، RMSE کمتری دربر داشت که این باند هم در محدوده طيف مرئی قرار دارد. همچنين، عنصر منيزيم با استفاده از باند ۱۸ با طول موج ۱۰۳۷ میکرومتر، در محدوده مادون‌قرمز، کمترین ميزان RMSE را به نسبت باندهای ديگر داشت.

با استفاده از حالت ترکیب دو باند نرمال شده (رابطه ۲)) و مقایسه نتایج، می‌شود گفت استفاده از رابطه (۱) دقت بیشتری دارد و شاخص مناسب‌تری برای شناسایی عناصر گردوغبار است. طبق جدول ۲ مشخص شد که عنصر Si، با ميزان RMSE در حدود ۱۰۲۸، با استفاده از نسبت باند ۲۱ به باند ۲۶، به نسبت

بهرام، ش.، شمس، ش.، محمدزاده، ع.، ۱۳۹۲، بررسی  
ویژگی‌های اپتیکی و اندازه ذرات گردوغبار و  
وابستگی‌های آنها به کمک داده‌های AERONET.  
مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دوره ۳، شماره  
۱۰، صص. ۶۳-۵۴.

تقوی، ف.، اولاد، ا.، صفراد، ط.، ایران‌نژاد، پ.، ۱۳۹۲،  
تشخیص و پایش توفان گردوغبار غرب ایران  
با استفاده از روش‌های سنجش از دور، مجله  
فیزیک و فضا، دوره ۳۹، شماره ۳، صص. ۸۳-۹۶.

زراسوندی، ع.ر.، مر، ف.، نظریور، ا.، ۱۳۹۰، ترکیب  
کانی‌شناختی و ریخت‌شناسی ذرات  
تشکیل‌دهنده پدیده گردوغبار در استان  
خوزستان با تکیه بر آنالیزهای XRD و تصاویر  
SEM، بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، دوره ۱۹،  
شماره ۳، صص. ۵۱۸-۵۱۱.

جلالی، م.، بهرامی، ح.، درویشی بلورانی، ع.، ۱۳۹۰،  
بررسی همبستگی بین پارامترهای اقلیمی با  
وقوع طوفان‌های گردوغبار در استان  
خوزستان، اولین کنگره بین‌المللی پدیده گردوغبار  
و مقابله با آثار زیان‌بار آن، ۲۸-۲۶ بهمن.

عطایی، ش.، آبکار، ع.ا.، محمدزاده، ع.، ۱۳۹۴،  
شناسایی گردوغبار با استفاده از شاخص  
THDI بهبودیافته و به‌کارگیری داده‌های  
سنجنده مادیس، محیط‌شناسی، دوره ۴۱، شماره  
۳، صص. ۵۷۲-۵۶۳.

عطایی، ه.، احمدی، ف.، ۱۳۸۹، بررسی گردوغبار  
به‌عنوان یکی از معضلات زیست‌محیطی  
جهان اسلام، مطالعه موردی استان  
خوزستان، چهارمین کنگره بین‌المللی  
جغرافی‌دانان جهان اسلام.

تصاویر مربوط به فصول تابستان، ارتفاع و تراکم قطرات  
آب را می‌شود شناسایی کرد و هیچ اثری از ذرات یخ در  
آن محدوده به چشم نمی‌آید و تراکم گردوغبار آلوده  
بیشتر از گردوغبارهای بیابانی است. در روزهایی که  
نمونه‌گیری در فصل گرم انجام شده است، درمقایسه با  
روزهای فصل سرد، ذرات گردوغبار تراکم و ارتفاع  
بیشتری دارند و در ارتفاع تقریباً شش کیلومتری از  
سطح زمین واقع شده‌اند. درحالی‌که در روزهای سرد،  
میزان تراکم مولکولی ذرات گردوغبار روی منطقه مورد  
نظر کاهش یافته است.

با توجه به نتایج حاصل‌شده، مشخص شد که برای  
اندازه‌گیری میزان غلظت عناصر موجود در گردوغبار، با  
استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS، به‌کارگیری روابط  
و محاسبات یادشده، و با توجه به باندهای شناسایی‌شده  
می‌شود برای هر عنصر به کانی‌شناسی پرداخت. این  
ممکن است به‌منزله مکمل ایستگاه نمونه‌برداری زمینی  
در زمینه پایش عناصر تشکیل‌دهنده طوفان‌های  
گردوغبار، باعث کاهش زمان و هزینه در شناسایی عناصر  
گردوغبار شود. همچنین، می‌شود با استفاده از تصاویر  
ماهواره CALIPSO در هر منطقه، میزان تراکم و ارتفاع  
گرد و غبار را شناسایی کرد.

در پایان، پیشنهاد می‌شود افزون‌بر ایستگاه‌های زمینی  
با استفاده از رادیسوندها همراه با زمان عبور ماهواره‌ها،  
اطلاعات دقیق‌تر و کامل‌تری از ترکیبات عنصری و پروفیل  
عمودی توده‌های گردوغبار به‌دست آورده شود. در این  
صورت، می‌شود انتظار داشت مدل‌های برازشی مناسب‌تر و  
نتایج دقیق‌تری به‌دست آورد.

## منابع

ایران‌منش، ف.، عرب‌خدری، م.، اکرم، م.، ۱۳۸۴،  
بررسی مناطق برداشت ذرات گردوغبار و  
ویژگی‌های انتشار آنها در طوفان‌های منطقه  
سیستان با استفاده از پردازش تصاویر  
ماهواره‌ای، پژوهش‌سازندگی در منابع طبیعی،  
دوره ۱۸، شماره ۲، صص. ۳۳-۲۵.

- Ackerman, S.A., 1997, **Remote Sensing Aerosols Using Satellite Infrared Observations**, Geophysical Research, PP. 17069-17080.
- Bouya, Z., Box, G.P. & Box, M.A., 2010, **Seasonal Variability of Aerosol Optical Properties in Darwi, Australia**, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial physics, Vol. 72, Issue 9, PP. 726-739.
- Brindley, H.E. & Russell, J.E., 2009, **An Assessment of Saharan Dust Loading and the Corresponding Cloud-Free Longwave Direct Radiative Effect from Geostationary Satellite Observations**, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Vol. 114, Issue D23.
- Bullard, J., Baddock, M., McTainsh, G. & Leys, J., 2008, **Sub-Basin Scale Dust Source Geomorphology Detected Using MODIS**, Geophysical Research Letters, Vol. 35, Issue 15.
- Brun, J., Shrestha, P., Barros, A.P., 2011, **Mapping Aerosol Intrusion in Himalayan Valleys Using the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer MODIS and Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation CALIPSO**, Atmospheric Environment, Vol. 45, No. 35, PP. 6382-6392.
- Engel-Cox, J.A., Hoff, R.M., Rogers, R., Dimmick, F., Rush, A.C., Szykman, J.J., Zell, E.R., 2006, **Integrating Lidar and Satellite Optical Depth with Ambient Monitoring for 3-Dimensional Particulate Characterization**, Atmospheric Environment, Vol. 40, No. 40, PP. 8056-8067.
- Geng, F., Qiong, L., Yonghang, C., Zhang, H. & Mao, X., 2011, **Preliminary Study of Vertical Distribution of Aerosols during Dry Haze Period around Shanghai Based on CALIPSO**, ELSEVIER, PP. 217-222.
- Holmes, C.W. & Miller, R., 2004, **Atmospherically Transported Elements and Deposition in the Southeastern United States: Local or Transoceanic?**, Applied Geochemistry, Vol.19, Issue 7, PP. 1189-1200.
- Kaufman, Y.J., 1997, **Passive Remote Sensing of Tropospheric Aerosol and Atmospheric Correction for the Aerosol Effect**, Geophysical Research, Vol. 102, Issue D14, PP. 16815-16830.
- Kawata, Y., Fukui, H., Takemata, K., 2004, **The Validation of Aerosol Optical Thickness Retrieved by Band Correlation Method from MODIS Image Data**, Proceedings of the XXth Congress of ISPRS, Vol. 35, No. B1, PP. 524-527.
- Kim, K.H., Choi, G.H., Kang, C.H., Lee, J.H., Kim, J.Y., Youn, Y.H. & Lee, S.R., 2003, **The Chemical Composition of Fine and Coarse Particles in Relation with the Asian Dust Events**, Atmospheric Environment, Vol. 37, No. 6, PP. 753-765.
- Krueger, B.J., Grassian, V.H., Cowin, J.P. & Laskin, A., 2004, **Heterogeneous Chemistry of Individual Mineral Dust Particles from Different Dust Source Regions: The Importance of Particle Mineralogy**, Atmospheric Environment, Vol. 38, PP. 6253-6261.
- Nastagdori, L. and Jugder, D., Schung, Y., 2002, **Analysis of Dust Storms Observed, Mongolia during, 1937-1999**.
- Ochirkhuyang, L. & Tsolmon, R., 2008, **Monitoring the Source of Trans-National Dust Storms in North East Asia**, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 3, No. 1, PP. 835-839.
- Pope, C.A, Brunett, R.T, Thum, M.J, Calle, E.E, Krewski, D. & Thurston, G.D., 2002, **Long Cacer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-Term Exposure to Fine Particulate Air Pollution**, American Medical Association, Vol. 287, No. 9, PP. 1132-1141.
- Remer, L.A., Kaufman, Y.J., Koren, I., Taner, D., Ginoux, P. & Fan, S., 2005, **Dust Transport and Deposition Observed from the Terra-Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer MODIS Spacecraft over the Atlantic Ocean**, Geophysical research, Vol. 110, Issue D10,
- Remer, L.A., Kaufman, Y.J., Tanré, D., Mattoo, S.,

- Chu, D.A., Martins, J.V., ... & Holben, B.N., 2005, **The MODIS Aerosol Algorithm, Products, and Validation**, Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 62, No. 4, PP. 947-973.
- Samet, J.M., Dominici, F., Currie, F.C., Coursac, I. & Zegar S.L., 2000, **Fine Particulate Air Pollution and Mortality in 20 US Cities, 1994-1987**, The New England Journal of Medicine, PP. 1742-1749.
- Savtchenko, A., Ouzounov, D., Ahmad, S., Acker, J., Leptoukh, G., Koziana, J. & Nickless, D., 2004, **Terra and Aqua MODIS Products Available from NASA GES DAAC**, Advances in Space Research, Vol. 34, No. 4, PP. 710-714.
- Shahsavani, A., Naddafi, K., Haghhighifard, N.J., Mesdaghinia, A., Yunesian, M., Nabizadeh, R., ... & Alimohamadi, M., 2012, **The Evaluation of PM 10, PM 2.5, and PM 1 Concentrations during the Middle Eastern Dust (MED) Events in Ahvaz, Iran, from April through September 2010**, Journal of Arid Environments, Vol. 77, Issue 1, PP. 72-83.
- Shao, G., Xiangyu, L., Chen, J. & Takahiro, M., 2011, **Focal Mechanism and Slip History of the 2011 Mw 9.1 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Constrained with Teleseismic Body and Surface Waves**, Earth, Planets and Space, Vol. 63, No. 7, PP. 559-564.
- Van Donkelaar, A., Martin, R.V. & Park, R.J., 2006, **Estimating Ground-Level PM2.5 Using Aerosol Optical Depth Determined from Satellite Remote Sensing**, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 111, no D21.
- Tian, J. & Dongmei, C., 2010, **A Semi-Empirical Model for Predicting Hourly Ground-Level Fine Particulate Matter (PM2.5) Concentration in Southern Ontario from Satellite Remote Sensing and Ground-Based Meteorological Measurements**, Remote Sensing of Environment, Vol. 114, No. 2, PP. 221-229.
- Wang, Y., Zhuang, G., Sun, Y. & An, Z., 2006, **The Variation of Characteristics and Formation Mechanisms of Aerosols in Dust, Haze, and Clear Days in Beijing**, Atmospheric Environment, Vol. 40, No. 34, PP. 6579-6591.
- Xia, X. & Zong, X., 2009, **Shortwave Versus Longwave Direct Radiative Forcing by Taklimakan**, Geophysical Research Letter.
- Zarzycki, C. & Bond, T.C., 2010, **How Much Can the Vertical Distribution of Black Carbon Affect its Global Direct Radiative Forcing?**, Geophy Res Lett., Vol. 37, Issue 20,
- [http://modis.gsfc.nasa.gov/sci\\_team/meetings/200610/atmos\\_agenda.pdf](http://modis.gsfc.nasa.gov/sci_team/meetings/200610/atmos_agenda.pdf) .