

مطالعه‌ی کیفیت هوا در مناطق غرب و جنوب غرب کشور براساس محصولات ضخامت نوری سنجنده‌ی MODIS

Original Article

ساویز صحت کاشانی* (دانشجوی دکتری)

غلامعلی کمالی (دانشیار)

گروه هواشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

مجید وظیفه‌دوست (استادیار)

گروه مهندسی آب، دانشگاه گیلان

عباسعلی علی‌اکبری بیدختی (استاد)

مؤسسه‌ی ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

رخداد گرد و غبار به‌عنوان یکی از پدیده‌های بارز در مناطق خشک و نیمه‌خشک تأثیر بسزایی در کیفیت هوا دارد. در این پژوهش به‌منظور تخمین شدت رخداد گرد و غبار از محصولات ضخامت نوری سنجنده‌ی مادیس استفاده شده است. ضخامت نوری آلاینده‌ها براساس شاخص‌های مبتنی بر تفاضل بازتابش سطحی و اختلاف دمای درخشندگی در طول موج‌های ۱۱ و ۱۲ میکرومتر محاسبه شده است. این شاخص‌ها به‌منظور تخمین وسعت و بارسازی گرد و غبار، پس از تعیین آستانه‌های دمایی محاسبه شده‌اند. همبستگی منفی بین پارامتر دید افقی و ضخامت نوری هواویزها و نیز رابطه‌ی همبستگی مثبت خطی قابل ملاحظه‌ی بین غلظت ذرات معلق PM_{10} و ضخامت نوری هواویزها در طول موج 550° نانومتر برقرار است. تحلیل آماری، مبین توانایی روش مذکور در تفکیک گرد و غبار از آلاینده‌های پیش‌زمینه و کاربرد آن در بهینه‌سازی بارسازی گرد و غبار و شدت آن در منطقه است.

واژگان کلیدی: سنجنده‌ی مادیس، بارسازی گرد و غبار، دید افقی، ضخامت نوری هواویزها.

۱. مقدمه

ذرات گرد و غبار در طول موج‌های مرئی تا فروسرخ حرارتی به‌ویژه در چند سال اخیر و در پی راه‌اندازی ماهواره‌های هواشناسی و محیطی صورت گرفته است.^[۱] مشاهدات ماهواره‌ی، محدودیت‌های ایستگاه‌های زمینی را برطرف می‌کنند و این توانایی را دارند که به‌عنوان مکمل ایستگاه‌های زمینی مورد استفاده قرار گیرند.^[۱] شیوه‌های مختلفی به‌منظور آشکارسازی طوفان‌های گرد و غبار از سایر عارضه‌ها با استفاده از کانال‌های مرئی و نزدیک به مادون،^[۲-۵] و طول موج‌های مادون قرمز حرارتی،^[۸-۱۱] و یا ترکیب آنها صورت گرفته است.^[۱] اساس الگوریتم آشکارسازی هواویزها براساس داده‌های ماهواره‌ی بر مبنای تحلیل تابندگی و یا بازتابندگی در باندهای مرئی و اختلاف دمای درخشندگی در باندهای مادون قرمز حرارتی استوار است.^[۱] سنجنده‌ی مادیس (MODIS)^۳ که بر روی دو سکوی اکوا^۴ و ترا^۵ نصب شده است، به‌منظور تعیین ویژگی‌های رخداد گرد و غبار و پیش آن مفید است.^[۱۱] به‌منظور تفکیک آلاینده‌های معدنی از عوارض زمینی که بازتابش مشابه دارند، پژوهش‌های فراوانی در ارتباط با دمای درخشندگی^۶ صورت گرفته است.^[۱۲،۱۳] از آنجا که آلبیدوی رخداد گرد و غبار در طول موج ۱۲ میکرومتر بیشتر از طول موج

رخداد گرد و غبار در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان در وضعیت کیفیت هوای منطقه، چرخه‌های آب و انرژی، و اکوسیستم مؤثر است. به دلایلی همچون عمر کوتاه پدیده‌ی گرد و غبار، چندگانه‌ی مقیاس‌بودن و واکنش‌های شدید آن با شرایط هواشناختی، آشکارسازی این پدیده به‌عنوان یکی از پارامترهای تأثیرگذار در کیفیت هوای شهری همواره با چالش روبرو است.^[۱] ذرات گرد و غبار قادر هستند پرتوهای خورشیدی و زمینی را در هر دو محدوده‌ی طیفی مرئی^۱ و مادون قرمز^۲ تغییر دهند. به‌دلیل خواص نوری ویژه‌ی ذرات گرد و غبار، تابندگی مشاهداتی توسط ماهواره‌ها می‌تواند مبین مشخصات طیفی این رخداد باشد، که از مولکول‌های هوا، ابرها، و سطح زیرین متمایز است.^[۱] بی‌شک آشکارسازی طوفان‌های گرد و غبار، پیش سمت و سرعت حرکت این طوفان‌ها و وسعت مناطق تحت تأثیر و تخمین غلظت ریزگردها می‌تواند در کاهش صدمات ناشی از طوفان‌های گرد و غبار نقش مهمی ایفا کند. آشکارسازی طوفان‌های گرد و غبار با تکیه بر رفتار طیفی منحصر به فرد

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۲/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۳/۳/۲۰، پذیرش ۱۳۹۳/۴/۲

میانگین دید بین ۱۰۰۰ متر و ۲۰۰۰ متر شده‌اند، در دوره‌ی آماری ۲۰۰۹-۲۰۰۰ با استفاده از داده‌های مشاهداتی ۳۵ ایستگاه هواشناسی هم‌دید با ۸ گزارش هم‌دید اصلی در طول شبانه‌روز به‌گونه‌ی که معرف خوبی از کل منطقه باشد، شناسایی و از طریق روش‌های آماری تحلیل شده‌اند. موارد مطالعاتی براساس کد ۰۶ دستورالعمل سازمان هواشناسی جهانی (WMO) ۱° مبین گرد و غباری است که باد در خارج از ایستگاه ایجاد کرده است.

۲.۲. الگوریتم بارسازی بر مبنای داده‌های سنجنده‌ی مادیس

در این پژوهش داده‌های سنسجش از دور Level ۱B سنجنده‌ی مادیس مربوط به ماهواره‌ی ترا برای رخدادهای گرد و غبار شاخص سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ با قدرت‌های تفکیک مکانی ۵۰۰ متر و یک کیلومتر از وبگاه ناسا (NASA) [۱۱] اخذ شده است. ۱۲ داده‌های سطح اول شامل بازتابندگی و تابندگی بالای جو است، که مشخصات کالیبره و تصحیح شده دارند. [۱۸] این تذکر لازم است که تصاویر با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر با هدف استخراج شاخص‌های انعکاسی و تصاویر با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر به‌منظور استخراج شاخص‌های حرارتی و نیز تعیین آستانه‌ی آشکارسازی ابر به‌کارگرفته شده است (جدول ۱). سنجنده‌ی مادیس با در اختیار داشتن ۳۶ باند طیفی مختلف از محدوده‌ی مرئی (۰/۴۱۵ μm) تا مادون قرمز (۱۴/۲۳۵ μm)، داده‌هایی با ۳ قدرت تفکیک مکانی: ۲۵۰ متر، ۱۲ و ۵۰۰ متر، ۱ و ۱ کیلومتر، ۱۵ دارند. از آنجا که تصویربرداری ۴ بار در روز از یک منطقه صورت پذیرفته است و تصاویر تنوع تفکیک مکانی دارند، لذا در تحلیل رخداد گرد و غبار مفید است. پس از تصحیح هندسی تصاویر و برش منطقه‌ی مورد مطالعه، مقادیر رادینانس ۱۶ تصاویر مربوط به طول موج‌های مذکور با استفاده از عکس تابع پلانک به دمای درخشندگی تبدیل شده است. تصحیحات و پردازش تصاویر در محیط نرم‌افزار ۹/۱ ERDAS IMAGINE صورت پذیرفته است. همچنین در این پژوهش از داده‌های ضخامت نوری هواویزها در طول موج ۵۵۰ نانومتر مربوط به محصولات سطح ۳، ۱۲ سنجنده‌ی مادیس استفاده شده است؛ که به‌عنوان یکی از پارامترهای شاخص مبین توزیع هواویزهای حاصل از گرد و غبار در نظر گرفته شده است. از طرفی با استفاده از داده‌های غلظت ذرات معلق PM_{۱۰} ارتباط بین دید افقی، ضخامت نوری هواویزها در طول موج ۵۵۰ نانومتر و غلظت ذرات معلق PM_{۱۰} بررسی شده است. مشخصات داده‌های زمینی و ماهواره‌ی مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است.

۲.۲.۱. شاخص تفاضل نرمال‌شده‌ی گرد و غبار (NDDI)

به‌منظور بارسازی و تعیین گستره‌ی طوفان‌های گرد و غبار در روز از شاخص گرد و غبار تفاضلی نرمال‌شده استفاده شده است. مشخصات طیفی منحصر به فرد طوفان‌های گرد و غبار سبب می‌شود تا بتوان با استفاده از نسبت تفاضل و تجمیع بازتابش‌های سطحی در طول موج‌های ۲/۱۳ میکرومتر و ۰/۴۶۹ میکرومتر، نسبت به تفکیک گرد و غبار از سایر عارضه‌ها اقدام کرد. شاخص NDDI به‌صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:

$$NDDI = (\rho_{2,13\mu m} - 0,469\rho_{\mu m}) / (\rho_{2,13\mu m} + 0,469\rho_{\mu m}) \quad (1)$$

که در آن، $\rho_{2,13\mu m}$ و $\rho_{0,469\mu m}$ انعکاس از تارک جو (TOA) در $2,13\mu m$ و $0,469\mu m$ است. [۱۹] به‌منظور تفکیک گرد و غبار از اراضی با زمینه‌ی روشن از قبیل بیابان‌ها و اراضی کویری که در منطقه‌ی مرئی با بازتابش مشابهی با طوفان‌های

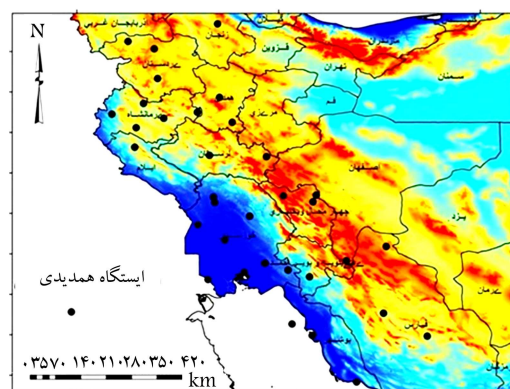
۱۱ میکرومتر است، [۱۳، ۱۴] بنابراین اختلاف دمای درخشندگی^۷ طول موج‌های ۱۱ و ۱۲ میکرومتر مربوط به رخداد گرد و غبار منفی می‌شود، که به‌عنوان یک شیوه به‌منظور شناسایی پدیده‌ی گرد و غبار با استفاده از مشاهدات مادون قرمز حرارتی^۸ مطرح است. [۸] از طرفی ضخامت نوری هواویزها^۹ در طول موج ۵۵۰ نانومتر، ارتباط نزدیکی با دمای درخشندگی باندهای ۲۰، ۳۰، ۳۱ و ۳۲ سنجنده‌ی مادیس دارد، که می‌تواند به‌عنوان معیار مناسبی برای تعیین شدت رخداد گرد و غبار در نظر گرفته شود. [۱۱] با افزایش مقادیر میانگین ضخامت نوری هواویزها، مقادیر میانگین روزانه‌ی دید کاهش می‌یابد و همبستگی خوبی بین غلظت ذرات معلق PM_{۱۰} و ضخامت نوری هواویزها برقرار است. [۱۵] از طرفی انباشت هواویزها در جو با غلظت‌های متفاوت، شرایط نورشناخت جو و به‌دنبال آن دید افقی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. [۱۶] هدف از این پژوهش، معرفی شاخص‌های حرارتی و انعکاسی در بارسازی رخداد گرد و غبار و متمایزسازی گرد و غبار از سایر عارضه‌های زمینی و ابرها با استفاده از الگوریتم‌های تعریف شده است. به‌علاوه با معرفی رابطه‌ی همبستگی معناداری بین شاخص‌های مبتنی بر تفاضل بازتابش سطحی و اختلاف دمای درخشندگی در طول موج‌های ۱۱ و ۱۲ میکرومتر سنجنده‌ی مادیس، ضخامت نوری آلاینده‌ها تخمین زده خواهد شد و ارتباط آن با مقادیر دید افقی و غلظت ذرات معلق PM_{۱۰} ارزیابی می‌شود.

۲. داده‌ها و روش کار

منطقه‌ی مورد مطالعه‌ی نواحی غرب و جنوب غربی ایران در محدوده‌ی طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۸۶ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۶۸ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۷ درجه و ۸۳ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۶۸ دقیقه شمالی قرار دارد (شکل ۱). بیشتر گرد و غبارهای فراگیر و گسترده‌ی مشاهده‌شده در منطقه‌ی مذکور، منشاء فرامحلی دارد. به‌علاوه مناطق ذکرشده در مسیر ورود چرخنده‌ها و سامانه‌های منتقل‌کننده‌ی گرد و غبار به کشور هستند. [۱۷]

۲.۱. وضعیت دید افقی

یکی از کمیت‌های مؤثر در وضعیت دید افقی، ذرات گرد و غبار هستند. براساس دستورالعمل کدها و روش‌های دیدبانی سطح زمین سازمان هواشناسی جهانی، دید افقی پیشینه‌ی مسافتی است که یک دیدبان می‌تواند اشیاء را با نور معمولی به‌خوبی تشخیص دهد. در این پژوهش ابتدا فراوانی رخدادهای گرد و غباری که منجر به کاهش



شکل ۱. موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه.

جدول ۱. مشخصات باندهای سنجنده‌ی مادیس به‌کار گرفته‌شده.

نام باند	محدوده‌ی طیفی (میکرون)	قدرت تفکیک مکانی (متر)
۳	۰٫۴۷۹ - ۰٫۴۵۹	۵۰۰
۷	۲٫۱۵۵ - ۲٫۱۰۵	۵۰۰
۳۱	۱۱٫۲۸۰ - ۱۰٫۷۸۰	۱۰۰۰
۳۲	۱۲٫۲۷۰ - ۱۱٫۷۷۰	۱۰۰۰

ذرات معلق و گرد و غبار در جو و با پیکسل‌هایی با ابعاد 10×10 کیلومتر مربع استفاده شده است. عمق نوری یا ضخامت نوری هواویزها، پارامتری بی‌بعد است که میزان عبوردهی پرتو نور در جو را نشان می‌دهد و بیان‌گر میزان جذب و پراکنش ناشی از هواویزها در مسیر عبوری نور است.^[۲۲] مقادیر بالای ضخامت نوری مبین انباشت بالای هواویزها در ستون جو و در نتیجه دید افقی کمتر است.^[۲۳]

۳. نتایج و بحث

۳.۱. بارسازی گرد و غبار با استفاده از شاخص‌های گرد و غبار

از آنجا که دمای درخشندگی مربوط به باندهای ۳۱ و ۳۲ سنجنده‌ی مادیس (طول موج‌های ۱۱ و ۱۲ میکرومتر) متأثر از رخداد گرد و غبار است، بنابراین اختلاف دمای درخشندگی طول موج‌های ۱۱ و ۱۲ میکرومتر کمتر از صفر می‌تواند به منظور بارسازی گرد و غبار به‌کار گرفته شود (شکل ۲ ب). در این مطالعه مشخص شده است که آستانه‌ی دمایی کوچک‌تر و مساوی 0.5 - کلون، توانایی بارسازی توده‌های گرد و غبار از عوارض زمینی را دارد. این آستانه‌ی دمایی با تحقیقات شائو^[۲۱]، هم‌خوانی دارد. هم‌چنین به منظور ممانعت از آشکارسازی نواحی ابری، دمای درخشندگی باند ۳۱ با آستانه‌ی دمایی کمتر از 2.78 کلون در نظر گرفته شده است. به‌منظور تعیین مقادیر آستانه‌های گرد و غبار، ابتدا تصاویر به‌صورت بصری تحلیل شده‌اند (شکل ۲ الف). در گام بعدی با هدف افزایش دقت، نمونه‌هایی از پیکسل‌های گرد و غبار بر روی تصاویر رنگ اصلی سنجنده‌ی مادیس مربوط به منطقه‌ی مورد مطالعه، مشخص و هیس‌توگرام مربوط ترسیم شده است. در شکل‌های ۳ و ۴ آستانه‌های مربوط به گرد و غبار موجود بر روی خشکی‌ها و گرد و غبار موجود بر روی دریا برای شاخص گرد و غبار تفاضلی نرمال شده و شاخص تفاضلی دمای درخشندگی باندهای ۳۱ و ۳۲ سنجنده‌ی مادیس مشخص شده است. از آنجا که بازتابش ذرات گرد و غبار در باند ۳، کمینه و در باند ۷، بیشینه است، خصوصیات طیفی منجر به تفکیک گرد و غبار از ابرهای حاوی یخ می‌شود (شکل ۲ الف)؛ چرا که ابرهای حاوی یخ در باند ۳، بازتابش بیشینه دارد و مقادیر شاخص گرد و غبار تفاضلی نرمال‌شده مربوط به ابرها منفی است.^[۱۹] در این مطالعه، آستانه‌ی دمایی 0.28 به‌منظور آشکارسازی گرد و غبار در نظر گرفته شده است، که با نتایج کو و همکاران،^[۲۱] هم‌خوانی دارد.

۳.۲. تخمین ضخامت نوری با استفاده از شاخص‌های گرد و غبار

از آنجا که اختلاف دمای درخشندگی باندهای ۳۱ و ۳۲ سنجنده‌ی مادیس نسبت به ضخامت نوری هواویزها حساس است،^[۱۹] قابلیت جداسازی پیکسل‌های گرد و غبار سنگین از پیکسل‌های گرد و غبار با شدت کم را دارند، اما شناسایی پیکسل‌هایی که ضخامت نوری متوسط دارند، به راحتی ممکن نیست. بررسی رخدادهای گرد و غبار نشان می‌دهد که ضخامت نوری هواویزها،

گرد و غبار هستند، علاوه بر شاخص گرد و غبار تفاضلی نرمال شده از دمای درخشندگی حد آستانه در بازه $12.270 - 11.770 \mu m$ نیز کمک گرفته می‌شود. گرد و غبار در مقایسه با اراضی بیابان، دمای کمتری دارد.^[۷]

۳.۲.۲. شاخص تفاضل دمای درخشندگی

شیوه‌ی بارسازی رخداد گرد و غبار بر اساس خصوصیات مربوط به دمای درخشندگی طول موج‌های ۱۱ و ۱۲ میکرومتر در محدوده‌ی مادون قرمز حرارتی است. با توجه به تأثیر عمده‌ی که ذرات گرد و غبار در میزان بازتابش و دمای درخشندگی باندهای ۳۱ و ۳۲ سنجنده‌ی مادیس می‌گذارند، از تفاضل دمای درخشندگی دو باند مذکور به‌منظور بارسازی توده‌های گرد و غبار استفاده شده است.^[۲۰] از آنجا که آلبدوی^{۲۰} رخداد گرد و غبار در طول موج ۱۲ میکرومتر بیشتر از طول موج ۱۱ میکرومتر است،^[۱۳] بنابراین اختلاف دمای درخشندگی طول موج‌های ۱۱ و ۱۲ میکرومتر مربوط به رخداد گرد و غبار منفی می‌شود (رابطه‌ی ۲):

$$BT_{11} - BT_{12} < 0 \quad (2)$$

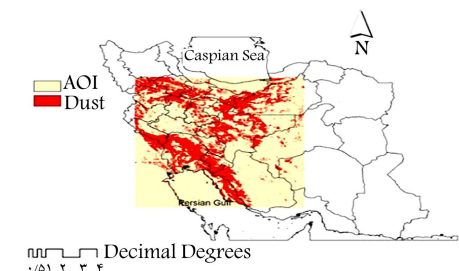
که در آن، BT_{11} دمای درخشندگی مربوط به محدوده‌ی طیفی ۱۱ میکرومتر و BT_{12} دمای درخشندگی مربوط به محدوده‌ی طیفی ۱۲ میکرومتر است. با توجه به اینکه ابرها در باندهای حرارتی در مقایسه با دیگر پدیده‌های زمینی، دمای پایین‌تری دارند و از طرفی در باندهای مرئی طیف الکترومغناطیسی، میزان بازتابندگی بالاتری دارند؛ بنابراین به‌منظور تفکیک ابرها از گرد و غبار، دمای درخشندگی باند ۳۱ با آستانه‌ی دمایی کمتر از 2.78 کلون در نظر گرفته شده است.

۳.۲. ضخامت نوری

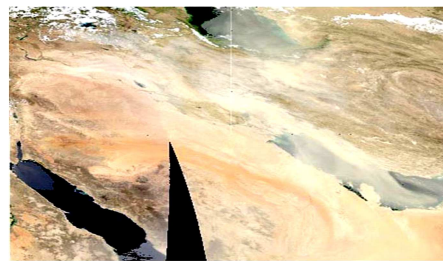
با توجه به پیشرفت‌های صورت‌گرفته در زمینه‌ی سنجش از دور، اندازه‌گیری آلاینده‌ها در شرایط طبیعی و در مقیاس وسیع امکان‌پذیر است. در این زمینه کاهش قابل توجه در هزینه‌ها و نیروی انسانی در مقایسه با روش‌های زمینی حائز اهمیت است.^[۲۱] ضخامت نوری هواویزها در طول موج 0.55 نانومتر سنجنده‌ی مادیس به‌عنوان یک پارامتر بدون بعد، مستقیماً با غلظت ذرات معلق هوا ارتباط دارد و به‌عنوان معیاری مهم برای تشخیص هواویزهای موجود در جو در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش از محصولات سطح ۳ سنجنده‌ی مادیس به‌عنوان ابزاری با هدف استخراج کمی

جدول ۲. مشخصات داده‌های زمینی و ماهواره‌ی مورد استفاده.

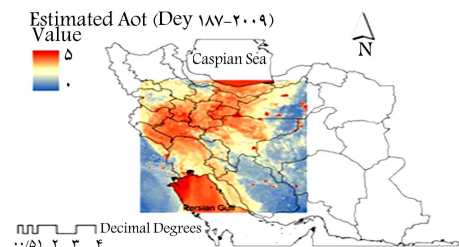
نوع داده	کاربرد	دوره‌ی زمانی	منبع مورد استفاده
دید افقی	تخمین مشاهداتی گرد و غبار	۲۰۰۹ تا ۲۰۰۰	سازمان هواشناسی کشور
PM _{۱۰}	بررسی غلظت گرد و غبار	۲۰۰۹	سازمان حفاظت محیط زیست
MOD ₀₂	بارسازی گرد و غبار	۲۰۰۹-۲۰۰۸	سنجنده‌ی مادیس
MOD ₀₃ AD	ارزیابی شدت گرد و غبار	۲۰۰۹	سنجنده‌ی مادیس



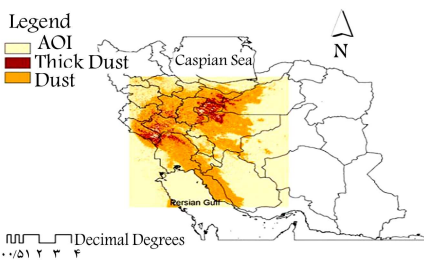
الف) تصویر بازسازی شده ی رخداد گرد و غبار در تاریخ ۶ ژوئیه ی ۲۰۰۹ با روش NDDI



الف) تصویر True Color رخداد گرد و غبار در تاریخ ۶ ژوئیه ی ۲۰۰۹



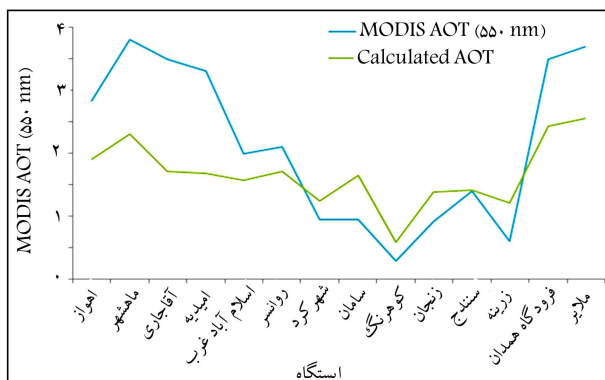
ب) تصویر بازسازی شده ی AOT محاسباتی با استفاده از شاخص NDDI و اختلاف دمای درخشندگی طول موج ۱۱ و ۱۲ میکرومتر رخداد گرد و غبار در تاریخ ۶ ژوئیه.



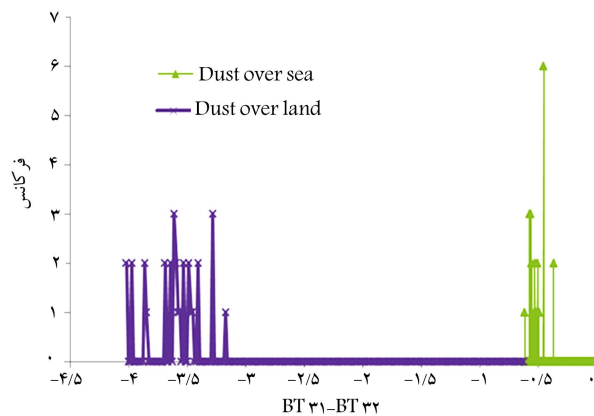
ب) تصویر بازسازی شده ی رخداد گرد و غبار در تاریخ ۶ ژوئیه ی ۲۰۰۹ با روش اختلاف دمای درخشندگی.

شکل ۵. مقایسه بین تصویر بازسازی شده رخداد گرد و غبار با روش NDDI و تصویر بازسازی شده AOT محاسباتی با استفاده از شاخص NDDI و اختلاف دمای درخشندگی.

شکل ۲. مقایسه بین تصویر رنگ واقعی رخداد گرد و غبار و تصویر بازسازی شده با روش اختلاف دمای درخشندگی.

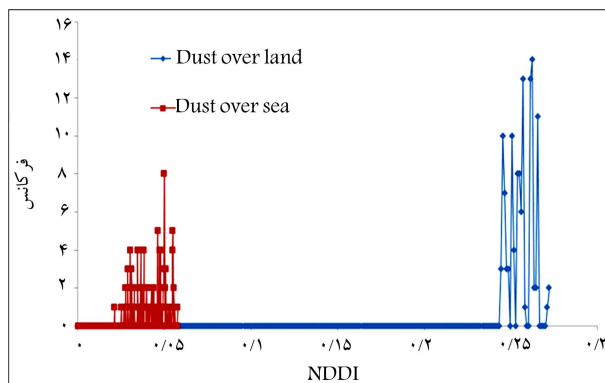


شکل ۶. مقایسه‌ی بین MODIS AOT در محدوده‌ی ۵۵۰ نانومتر و AOT محاسباتی با استفاده از شاخص NDDI و اختلاف دمای درخشندگی طول موج‌های ۱۱ و ۱۲ میکرومتر رخداد گرد و غبار در تاریخ ۶ ژوئیه.

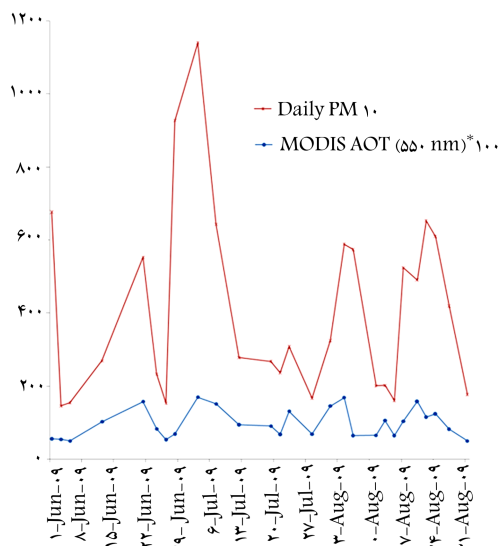


شکل ۳. فراوانی مقادیر مربوط به گرد و غبار موجود بر روی خشکی‌ها و گرد و غبار موجود بر روی دریا با استفاده از روش تفاضل دمای درخشندگی باندهای ۳۱ و ۳۲ سنجنده‌ی MODIS.

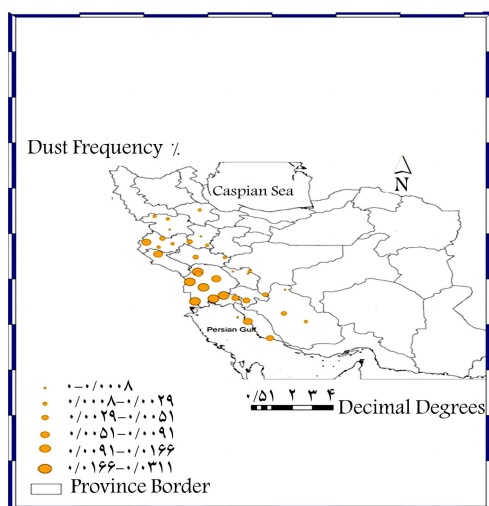
همبستگی خوبی با دمای درخشندگی باندهای ۳۱ و ۳۲ سنجنده‌ی مادیس و شاخص گرد و غبار تفاضلی نرمال شده دارد. بدین ترتیب تخمین ضخامت نوری هواویزها در یک فضای چند بُعدی و براساس شاخص‌های ذکر شده قابل محاسبه است (شکل ۵ ب). همچنین با استفاده از تحلیل رگرسیون، ضرایب در معادله‌ی ۳ تعریف شده‌اند. شکل ۶، مقایسه بین ضخامت نوری سنجنده‌ی مادیس در طول موج ۵۵۰ نانومتر و ضخامت نوری محاسباتی با استفاده از شاخص NDDI و اختلاف دمای درخشندگی طول موج‌های ۱۱ و ۱۲ میکرومتر رخداد گرد و غبار در تاریخ ۶ ژوئیه و شکل ۷، پراکنش ضخامت نوری سنجنده‌ی مادیس در طول موج ۵۵۰ نانومتر و ضخامت نوری محاسباتی با استفاده از شاخص NDDI و اختلاف دمای درخشندگی طول موج‌های ۱۱ و ۱۲ میکرومتر رخداد گرد و غبار در تاریخ ۶ ژوئیه را نشان می‌دهد. روند تغییرات ضخامت نوری محاسباتی با ضخامت



شکل ۴. فراوانی مقادیر مربوط به گرد و غبار موجود بر روی خشکی‌ها و گرد و غبار موجود بر روی دریا با استفاده از شاخص NDDI.



شکل ۹. مقایسه‌ی بین ضخامت نوری سنجنده‌ی مادیس در طول موج ۵۵۰ نانومتر و PM_{10} تابستان ۲۰۰۹ برای ایستگاه اهواز.

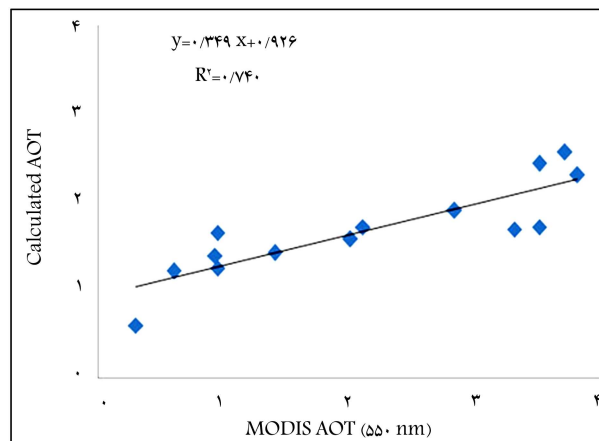


شکل ۱۰. درصد فراوانی رخداد گرد و غبار با کاهش میانگین دید بین ۱۰۰۰ متر و ۲۰۰۰ متر طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۰۹.

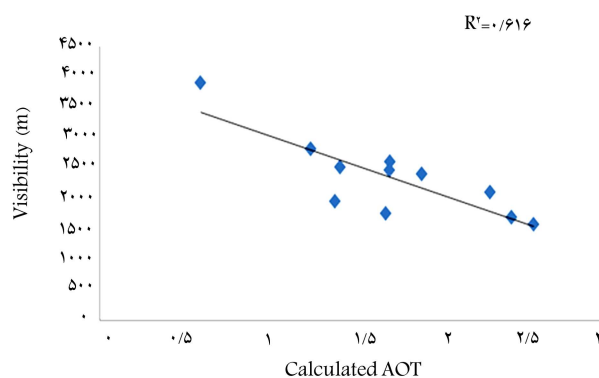
شکل ۱۰، کاهش میانگین دید بین ۱۰۰۰ متر و ۲۰۰۰ متر از غرب به شرق منطقه قابل رؤیت است، که با وزش بادهای شمال غربی و جنوب غربی در اراضی بیابانی موجود در عراق و عربستان در نتیجه‌ی استقرار سامانه‌های کم‌فشار بر روی عراق و کم‌فشار حرارتی عربستان و پاکستان در سطح زمین و نیز وجود سامانه‌ی پُراارتفاع جنب حاره در تراز میانی جو در نواحی جنوب غرب در تابستان و نیز نتایج به‌دست‌آمده‌ی فخرایی‌پور،^[۲۵] و سی‌سی‌پور،^[۲۶] هم‌خوانی دارد.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش شدت رخداد گرد و غبار با استفاده از محصولات ضخامت نوری سنجنده‌ی مادیس تخمین زده شده است. با توجه به اینکه ضخامت نوری



شکل ۷. پراکنش MODIS AOT در محدوده‌ی ۵۵۰ نانومتر و AOT محاسباتی با استفاده از شاخص NDDI و اختلاف دمای درخشندگی طول موج‌های ۱۱ میکرومتر و ۱۲ میکرومتر رخداد گرد و غبار در تاریخ ۶ ژوئیه.



شکل ۸. پراکنش دید بین ۱۰۰۰ متر و ۲۰۰۰ متر و AOT محاسباتی با استفاده از شاخص NDDI و اختلاف دمای درخشندگی طول موج‌های ۱۱ و ۱۲ میکرومتر رخداد گرد و غبار در تاریخ ۶ ژوئیه.

نوری سنجنده‌ی مادیس در طول موج ۵۵۰ نانومتر، هم‌خوانی خوبی دارند و مجذور ضریب همبستگی ۰/۷۴ دارند. به علاوه همان‌گونه که در شکل ۸ مشخص است، بین پراکنش دید بین ۱۰۰۰ متر و ۲۰۰۰ متر و ضخامت نوری محاسباتی مجذور ضریب همبستگی ۰/۶۱۶ برقرار است:

$$AOT = 0.786446 + 0.337196 * BTd - 3.55592 * NDDI \quad (3)$$

۳.۳. ارتباط بین دید افقی و عمق نوری هواویزها

در این پژوهش، ضخامت نوری هواویزها با استفاده از شاخص‌های اختلاف دمای درخشندگی و NDDI محاسبه شده است. همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، با افزایش مقادیر میانگین روزانه‌ی ضخامت نوری هواویزها در طول موج ۵۵۰ نانومتر دید افقی کاهش می‌یابد. به علاوه با توجه به شکل ۹، رابطه‌ی همبستگی مثبت خطی قابل ملاحظه‌ی بین غلظت ذرات معلق PM_{10} و ضخامت نوری هواویزها برای ایستگاه اهواز در فصل تابستان برقرار است، که با نتایج مطالعات یان و همکاران،^[۱۵] مطابقت دارد. با توجه به اینکه عمق نوری هواویزها توسط ماهواره در راستای قائم اندازه‌گیری می‌شود و دید در راستای افقی بررسی می‌شود، ضروری است که لایه‌ی مرزی همگن در نظر گرفته شود.^[۲۴] از طرفی مطابق

سطح گسترش رخداد گرد و غبار مفید به نظر می‌رسد. به‌علاوه مشخص شده است که آستانه‌های دمایی به منظور تفکیک گرد و غبار از اراضی بیابان، ابرها و نیز گرد و غبار موجود بر روی دریا قادر است نقصان مربوط به نقش رادانسان سطح روشن در بارزسازی گرد و غبار را مرتفع می‌سازد. به‌طورکلی می‌توان گفت کاربرد هم‌زمان شاخص‌های NDDI و BTd منجر به کاهش نقاط ضعف در مقایسه با استفاده‌ی مجزای شاخص‌ها می‌شود؛ چرا که شاخص‌های انعکاسی به تنهایی قادر به متمایزسازی گرد و غبارهای هوابرد از اراضی بیابان و شن‌های موجود بر روی زمین نیستند و باید به‌صورت ترکیبی با باندهای حرارتی مورد استفاده قرار گیرند. در پایان این تذکر لازم است که نتایج این پژوهش ناشی از چند نمونه‌ی رخداد گرد و غبار است، بنابراین به‌منظور تعمیم آن، انجام موارد مطالعاتی بیشتری پیشنهاد می‌شود.

هواویزها، همبستگی خوبی با دمای درخشندگی باندهای ۳۱ و ۳۲ سنجنده‌ی مادیس و شاخص NDDI دارد، تخمین مقادیر ضخامت نوری هواویزها در یک فضای چند بُعدی و براساس شاخص‌های ذکرشده ممکن است. از آنجا که روش ذکرشده قابلیت تفکیک گرد و غبار از آلاینده‌های پس‌زمینه را دارد، در پیش‌بینی شدت رخداد گرد و غبار مؤثر به‌نظر می‌رسد. از طرفی همبستگی منفی بین دید افقی و ضخامت نوری هواویزها با استفاده از شاخص‌های گرد و غبار و دید افقی و رابطه‌ی همبستگی مثبت خطی خوبی بین غلظت ذرات معلق PM_{10} و ضخامت نوری هواویزها در طول موج 550° نانومتر برقرار است. به‌علاوه نتایج نشان می‌دهد که شیوه‌ی بارزسازی رخداد گرد و غبار با استفاده از اختلاف دمای درخشندگی مربوط به طول موج‌های فرورسرخ حرارتی و تعیین آستانه‌ی دمای درخشندگی برای بارزسازی گرد و غبار به همراه شاخص NDDI به‌منظور تعیین

پانوشته‌ها

1. visible (VS)
2. infrared (IR)
3. moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS)
4. Aqua
5. Terra
6. brightness temperature (BT)
7. brightness temperature difference (BTd)
8. thermal- infrared
9. aerosol optical thickness
10. world meteorological organization (WMO)
11. national aeronautics and space administration (NASA)
12. modis.gsfc.nasa.gov
13. MOD 02 Qkm
14. MOD 02 Hkm
15. MOD 02 1km
16. Radiance
17. MOD08_D3
18. normalized difference dust index
19. top of atmosphere
20. Albedo
21. Zhao

منابع (References)

1. Zhao, T.X.P., Ackerman, S. and Guo, W. "Dust and smoke detection for multi-channel imagers", *International Journal of Remote Sensing*, **2**(10), pp. 2347-2367 (2010).
2. Zhao, T.X.P. "Asian dust detection from the satellite observations of moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS)", *Aerosol and Air Quality Research*, **12**(6), pp. 1073-1080 (2012).
3. Taghavi, F. "The persian gulf 12th April 2007 dust storm: Observation and model analysis", *EUMETSAT Meteorological Satellite Conference Proceedings (P52Darmeschtad)*, Germany (2008).

4. Guo, J.P., Zhang, X.Y., Che, H.Z., Gong, S.I., An, X., Cao, C.X., Guang, J., Zhang, C.X., Xue, M. and Li, X.W. "Correlation between PM concentration and aerosol optical depth in eastern China", *Atmospheric Environment*, **43**(37), pp. 5876-5886 (2009).
5. Karimi, N., Moridnejad, A., Golian, S., Samani, J.M.V., Karimi, D. and Javadi, S. "Comparison of dust source identification techniques over land in the middle east region using MODIS data", *Can. J. Remote Sensing*, **38**(5), pp. 586-599 (2012).
6. Miller, S.D. "A consolidated technique for enhancing dust storms with MODIS", *Geophysical Research Letters*, **30**(20), pp. 2071-2075 (2003).
7. Qu, J.J., Hao, X., Kafatos, M. and Lingli Wang, L. "Asian dust storm monitoring combining terra and aqua MODIS SRB measurements", *IEEE Geosciences and Remotesensing Letters*, **3**(4), (2006).
8. Ackerman, S.A. "Remote sensing aerosols using satellite infrared observations", *Journal of Geophysical Research*, **102**(D14), pp. 17069-17080 (1997).
9. Darmenov, A. and Sokolik, I.N. "Identifying the regional thermal-IR radiative signature of mineral dust with MODIS", *Geophys. Res. Lett.*, **32**(16), (2005).
10. Evan, A.T., Heidinger, A.K. and Pavolonis, M.J. "Development of a new over-water advanced very high resolution radiometer dust detection algorithm", *Int. J. Remote Sens.*, **27**, pp. 3903-3924 (2006).
11. Hao, X. and Qu, J.J. "Saharan dust storm detection using moderate resolution imaging spectroradiometer thermal infrared bands", *Journal of Applied Remote Sensing*, **1**(1), 9 p. (2007).
12. Roskovensky, J.K. and Liou, K.N. "Differentiating airborne dust from cirrus cloud using MODIS data", *Geophys. Res. Lett.*, **32**, (2005).
13. Huang, J., Ge, J. and Weng, F. "Detection of Asia dust storms using multisensor satellite measurements", *Remote Sensing of Environment*, **110**(2), pp. 186-191 (2007).

14. San-chao, L., Qinhuo, L., Maofang, G. and Liangfu, C. "Detection of dust storms by using daytime and nighttime multi-spectral MODIS images", In Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 294-296 (2006).
15. Yang, H.Y. and Yuan, C.S. "Correlation of atmospheric visibility and meteorological factors in southern Taiwan", the 98th A&WMA Annual Meeting, Minneapolis (21-24 June 2005).
16. Baumer, D., Vogel, B., Versick, S., Rinke, R., Möhler, O. and Schnaiter, M. "Relationship of visibility, aerosol optical thickness and aerosol size distribution in an ageing air mass over south-west Germany", *Atmos. Environ.*, **42**, pp. 989-998 (2008).
17. Zolfaghari, H. and Abedzadeh, H. "The synoptic analysis of dust systems in west of Iran", *Geography and Development*, **2**, pp. 73-188 (2005).
18. Engel-Cox, J.A., Holloman, Ch., Coutant, B. and Raymond, M.H. "Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality", *Atmospheric Environment*, **38**(16), pp. 2495-2509 (2004).
19. Xu, D., Qu, J.J., Niu, S. and Hao, X. "Sand and dust storm detection over desert regions in China with MODIS measurements", *International Journal of Remote Sensing*, **32**(24), pp. 9365-9373 (December 2011).
20. San-chao, L., Qinhuo, L., Maofang, G. and Liangfu, C. "Detection of dust storms by using daytime and nighttime multi-spectral MODIS images", In Geoscience and Remote Sensing Symposium, Denever, USA (2006).
21. Ghorbani Salkhord, R., Mobasheri, M. and Rahimzadegan, M. "The capability of MODIS snesor in air quality and quantity analysis in urban regions", *Climatology Researches*, **2&3**, (2010).
22. World Meteorological Organization, *Manual on Codes*, Suppl. 6 (VIII.2007), WMO, Geneva, Switzerland (1995).
23. Wang, J. and Christopher, S.A. "Intercomparison between satellites derived aerosol optical thickness and PM2.5 mass: Implications for air quality studies", *Geophys. Res. Lett.*, **30**(21), pp. 2095-2116 (2003).
24. Alfoldy, B., Osán, Z., Tóth, S., Török, A., Harbusch, C. and Jahn D. "Aerosol optical depth, aerosol composition and air pollution during summer and winter conditions in Budapest", *Science of the Total Environment*, **383**(1-3), pp. 141-163 (2007).
25. Fakhraiepoor, M. "The evaluation of the relation between dust phenomenon and meteorological parameters in south west of Iran", Master Dissertation, Department of Meteorology, College of Basic Science, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran (2011).
26. Sisipoor, M. "The Evaluation of synoptic conditions influencing dust phenomenon in hormozgan province", Master Dissertation, Department of Meteorology, College of Basic Science, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran (2010).