

برآورد غلظت آلاینده‌های PM_{10} و $PM_{2.5}$ در کلان شهر تهران با استفاده از داده‌های سنجنده مودیس ماهواره‌های آکوا و ترا

احمد پهلوان^{۱*}، راضیه پهلوان^۲، علی اسماعیلی^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی سنجش از دور، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته

۲- کارشناس ارشد پژوهشکده هواشناسی

۳- استادیار گروه مهندسی سنجش از دور، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته

چکیده

آلودگی هوا یکی از مهمترین مشکلات زندگی شهری و شهرهای پرجمعیت است. از جمله مسائل مهم برای کاهش و مقابله با این مشکل، برآورد و تخمین میزان آلودگی هواست. از سنجنده‌ها با توجه به نوع کاربرد آن‌ها می‌توان برای این کار استفاده کرد. معمول‌ترین این سنجنده‌ها، سنجنده مودیس می‌باشد که بر روی دو ماهواره ترا و آکوا نصب شده است. سنجنده مودیس به علت تعداد باندهای طیفی زیاد، محدوده باندهای طیفی باریک، تصویربرداری روزانه از سطح زمین، رایگان و در دسترس بودن تصاویر آن، می‌تواند به عنوان بهترین انتخاب برای برآورد میزان آلودگی، به خصوص ذرات معلق باشد. در این تحقیق از داده‌های ۲۰ ایستگاه زمینی که در سطح شهر تهران سنجش آلاینده‌ها را در هر ساعت از شبانه روز انجام می‌دهند برای یک بازه ۸۵ روزه (۴ مهر الی ۲۹ آذر سال ۱۳۹۱)، استفاده شده است. این ایستگاه‌ها به طور منظم در سطح شهر تهران پراکنده نشده‌اند به طوری که در بعضی مناطق ایستگاه‌ها تراکم بالا داشته و در بعضی مناطق ایستگاهی برای سنجش وجود ندارد. بنابراین ماهواره‌ها با توجه به پوشش پیوسته سطح زمین از نظر مکانی و زمانی می‌توانند مکمل خوبی برای برآورد غلظت آلاینده‌ها باشند. در این مقاله دقت برآورد غلظت آلاینده‌های PM_{10} و $PM_{2.5}$ حاصل از مقادیر عمق نوری هواویزهای محصولات MOD04 و MYD04 سنجنده مودیس مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داد یک رابطه خطی بین عمق نوری هواویز و غلظت PM_{10} و $PM_{2.5}$ (که در ایستگاه‌های زمینی اندازه‌گیری می‌شود) وجود دارد. نتایج حاصل میزان همبستگی نسبتاً بالا ۰/۶۷ الی ۰/۸۱ بین داده‌های دورسنجی و زمینی را نشان می‌دهد. داده‌های عمق نوری هواویز در برآورد غلظت آلاینده‌های PM_{10} نسبت به غلظت آلاینده‌های $PM_{2.5}$ موفق‌تر عمل کرد.

کلمات کلیدی: عمق نوری هواویز، سنجنده مودیس، ماهواره ترا، ماهواره آکوا، ارزیابی دقت، PM_{10} ، $PM_{2.5}$ ، تهران

مقدمه

آلودگی هوا مسئله‌ای است که مستقیماً با سلامتی انسان و طبیعت ارتباط دارد. در سال‌های اخیر آلودگی هوا در کشورهای در حال توسعه و توسعه یافته به یکی از عوامل اصلی مرگ و میر تبدیل شده است. به طوریکه طبق مطالعات سازمان محیط زیست ۷۰ درصد مرگ و میرها در تهران ناشی از مشکلات تنفسی و قلبی است که این مشکلات ارتباط مستقیم یا غیرمستقیم با آلودگی هوای تهران دارد. از این رو مطالعه بر روی آلودگی‌های شهری و منطقه‌ای در چند سال اخیر رشد زیادی داشته است. در چند سال اخیر با پیشرفت علم سنجش از دور و فن‌آوری‌های ماهواره‌ای شاهد توانایی در پایش آلودگی هوا به خصوص سنجش هواویزها^۱ در این حوزه علمی هستیم. به طوریکه در حال حاضر سنجنده‌های مودیس، میسر و ژئوس به منظور سنجش از دور هواویزها به کار برده می‌شوند. سنجنده مودیس نشان داده است که توانایی بالایی در بررسی و برآورد میزان ذرات معلق در هوا دارد، به طوریکه چند محصول این سنجنده متعلق به هواویزها می‌باشد. اهمیت این موضوع به حدی است که بر روی ماهواره با کاربرد هواشناسی مانند متئوست و سنجنده سویری را برای پایش هواویزها قرار داده‌اند.

غلظت ذرات معلق یکی از شاخص‌های آلودگی هواست که توسط ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا به صورت ۲۴ ساعته اندازه‌گیری می‌شود. ذرات معلق علاوه بر تهدید سلامت انسان‌ها، باعث تأثیر بر روی مقدار تابش خورشید به زمین، تغییر سیستم زیست محیطی زمین، تأثیر روی الگوهای جریان جوی، تغییر دمای سطحی زمین و بارش و کاهش دید نیز می‌شوند. به جرأت می‌توان گفت مهم‌ترین آلاینده در شهرهای ایران، ذرات معلق هستند. در کشورهای مختلف مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است. اما در ایران به خصوص شهر تهران که یکی از آلوده‌ترین شهرهای دنیاست، مطالعات بسیار کمی انجام شده است. با توجه به اینکه مدل‌های زیادی توسط محققین برای برآورد غلظت ذرات معلق ارائه شده، اما این مدل‌ها کاربرد جهانی ندارد و برای هر منطقه دقت‌های متفاوتی دارد. با توجه به اهمیت این موضوع نیاز به ارزیابی مدل‌ها و الگوریتم‌های ارائه شده در

مناطق مختلف احساس می‌شود. برای این منظور در این مقاله ارزیابی دقت محصول MOD04 سنجنده مودیس ماهواره ترا و MYD04 سنجنده مودیس ماهواره آکوا با داده‌های ایستگاه‌های زمینی سنجش آلودگی انجام شده است. در سال ۱۹۹۷ الگوریتم اهداف تیره برای محاسبه ذرات معلق با تفکیک مکانی ۱۰×۱۰ کیلومتر، توسط کافمن و همکارانش ارائه شد که اساس آن تعیین پیکسل‌های تاریک در باندهای مادون قرمز میانی و سپس برآورد بازتابندگی آن‌ها در طول موج‌های ۴۷۰ و ۶۶۰ نانومتر از تصاویر سنجنده مودیس می‌باشد. یکی از مشکلات این الگوریتم عدم برآورد عمق نوری هواویز برای مناطق با بازتابندگی بسیار بالا مانند دشت‌ها می‌باشد. در برخی از مناطق شهری با بافت پراکنده و وجود زمین خالی موجب بازتابندگی بالا از سطح خاک به سمت ماهواره می‌شود و الگوریتم، عمق نوری هواویز را نمی‌تواند در این مناطق محاسبه نماید. هرچند این محدودیت در برآورد عمق نوری هواویز توسط این الگوریتم وجود دارد، اما به علت اینکه داده‌های آن به صورت روزانه و استاندارد موجود می‌باشد و به راحتی قابل دریافت است می‌توان از آن برای دیگر مناطق شهر که مشکلی در برآورد عمق نوری هواویز ندارد استفاده نمود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

مساحت شهر تهران در حدود ۷۳۰ کیلومتر مربع می‌باشد و از نظر جغرافیایی در حد فاصل طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲ دقیقه شرقی تا ۵۱ درجه و ۳۶ دقیقه شرقی، به طول تقریبی ۵۰ کیلومتر و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه شمالی تا ۳۵ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی به عرض تقریبی ۳۰ کیلومتر گسترده شده است (تارنمای ویکیپدیا). ارتفاع شهر در جنوب، در فرودگاه مهرآباد ۱۲۰۰ متر و در شمال به ۲۰۰۰ متر می‌رسد. اگرچه شیب عمومی شهر به طرف جنوب است ولی در داخل شهر، ناهمواری بسیار است. ارتفاعات البرز دیواره شمالی و کوه‌های محدوده بی‌بی شهربانو دیواره شرقی شهر را تشکیل می‌دهند. اما نواحی جنوبی و غربی تهران چندان مرتفع نیستند. با توجه به اینکه بادهای غالب تهران جهت غربی داشته و

بیشتر کارخانه‌های صنعتی نیز در غرب آن مستقر هستند، می‌توان انتظار داشت که سدهای کوهستانی شمال و شرق مانع خروج مواد زایدی شوند که توسط این بادها به داخل فضای شهر آورده می‌شوند و این به نوبه خود موجب می‌شود که هوای شهر به ویژه در نواحی مرکز و شرق در اغلب اوقات آلوده باشد.

شیب عمومی شمال به جنوب تهران در وضعیت وارونگی دمای تهران اثر دارد. برای مثال اگر ارتفاع لایه وارونگی در فرودگاه مهرآباد ۱۰۰ متر باشد، در منطقه مهرآباد مواد آلاینده در ارتفاع بالاتر از سطح زندگی مردم قرار دارند، در صورتیکه در نواحی شمالی‌تر به جهت شیب زمین فاصله تا لایه وارونگی کمتر شده و تراکم آلاینده‌ها شدیدتر شده و هوا آلوده‌تر می‌شود. مهمترین عامل اقلیمی موثر در آلودگی هوای تهران وارونگی دما می‌باشد که به دو صورت تابشی و همدیدی ایجاد می‌شوند. وارونگی تابشی بر اثر تابش شبانه زمین و سرد شدن سطح آن بوجود می‌آید و وارونگی همدیدی بر اثر استقرار سامانه‌های پایدار جوی پر فشار و زبانه‌های آن‌ها ایجاد می‌شوند. هر دو پدیده ویژگی اصلی دوره سرد سال هستند. بدین جهت آلودگی هوای تهران در دوره سرد سال شدیدتر است.

محصول MOD04 و MYD04 سنجنده مودیس

سنجنده مودیس بر روی دو ماهواره ترا و آکوا قرار داده شده است اما با این وجود برخی تفاوت‌های فنی بین آن‌ها وجود دارد. محصولات مودیس برای ماهواره‌های ترا و آکوا به ترتیب با پسوندهای MO و MY نامگذاری می‌شوند. عرض نواری برداشت آن ۲۳۳۰ کیلومتر می‌باشد و تمام سطح زمین را هر یک الی دو روز به طور کامل تصویربرداری می‌کند. آشکارسازهای سنجنده، داده‌ها را در ۳۶ باند طیفی اخذ می‌کنند و دارای حساسیت رادیومتریکی ۱۲ بیت در ۳۶ باند طیفی است، دامنه طیفی طول موج‌های آن ۰/۴۰۵-۱۴/۳۸۵ میکرومتر می‌باشد. این سنجنده در ۲ باند طیفی (باند ۱ و ۲) تصاویر با تفکیک مکانی ۲۵۰ متر، در ۵ باند طیفی (باند ۳ تا

۷) تصاویری با تفکیک مکانی ۵۰۰ متر و در ۲۹ باند دیگر تصاویری با تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر برداشت می‌کند. زاویه اسکن آن ± 55 درجه در دو طرف پاسو (۱۱۰ درجه) بوده و در مدار ۷۰۵ کیلومتر از سطح زمین قرار دارد.

داده‌های سنجنده مودیس به علت تعداد باندهای زیاد این سنجنده و باریک بودن محدوده طیفی هر باند می‌تواند برای مطالعات مختلف استفاده گردد. به طوریکه محصولات زیادی از این سنجنده در حال حاضر موجود و به صورت رایگان قابل دریافت می‌باشد. محصولات این سنجنده به طور کلی به چهار گروه: الف) محصولات کالیبراسیونی^۱، ب) محصولات جو (هواویزها، بخار آب، پوشش ابر، نمایه‌های جوی)، ج) محصولات زمینی (بازتاب سطح، شاخص پوشش گیاهی، شاخص سطح برگ، تبخیر و تعرق)، د) محصولات اقیانوسی (کلروفیل، دمای سطح دریا، رنگ اقیانوس) طبقه‌بندی می‌شود.

داده‌هایی که در این تحقیق از آن‌ها استفاده شده محصول MOD04-L2 و MYD04-L2 سنجنده مودیس می‌باشد. این محصول دارای اطلاعات توزیع و میزان عمق نوری هواویزها در محدوده اقیانوس‌ها و قاره‌ها است. تفکیک مکانی این محصول ۱۰×۱۰ کیلومتر بوده و هر محصول بازه زمانی ۵ دقیقه‌ای را پوشش می‌دهد. به طور معمول زمان تصویربرداری سنجنده مودیس ماهواره ترا از ایران بین ساعات ۱۰:۳۰ الی ۱۱:۳۰ و سنجنده مودیس ماهواره آکوا ۱۲:۲۵ الی ۱۳:۲۵ به وقت محلی است. مشخصات داده‌های استفاده شده در جدول (۱ و ۲) آورده شده است.

در این مقاله از ۱۲ محصول MOD04 برای ۱۲ روز مختلف در بازه ۸۵ روزه و از ۱۳ محصول MYD04 برای ۱۳ روز در بازه ۶۰ روزه در فصل پاییز استفاده شده است. روزهای انتخاب شده از روزهای تقریباً آلوده شهر تهران انتخاب شدند. برای روزهای دیگر به علت پاک بودن هوا و یا ابری بودن هوا داده عمق نوری هواویز برای شهر تهران موجود نبوده است.

جدول شماره ۱- نام و مشخصات زمانی محصول مورد استفاده سنجنده مودیس ماهواره تر

نام محصول (MOD04)	روز از سال (DOY)	تاریخ میلادی (۲۰۱۲)	تاریخ شمسی	ساعت تصویربرداری به وقت ایران
MOBAOD.A2012269.0700.051.2012270034527	۲۶۹	۲۵ سپتامبر	۱۳۹۱ مهر ۰۴	۱۰:۳۰
MOBAOD.A2012281.0725.051.2012285162809	۲۸۱	۰۷ اکتبر	۱۳۹۱ مهر ۱۶	۱۰:۵۵
MOBAOD.A2012284.0755.051.2012285180131	۲۸۴	۱۰ اکتبر	۱۳۹۱ مهر ۱۹	۱۱:۲۵
MOBAOD.A2012291.0800.051.2012292125303	۲۹۱	۱۷ اکتبر	۱۳۹۱ مهر ۲۶	۱۱:۳۰
MOBAOD.A2012313.0725.051.2012314023904	۳۱۳	۰۸ نوامبر	۱۳۹۱ آبان ۱۸	۱۰:۵۵
MOBAOD.A2012334.0740.051.2012334231543	۳۳۴	۲۹ نوامبر	۱۳۹۱ آذر ۰۹	۱۱:۱۰
MOBAOD.A2012336.0730.051.2012336145459	۳۳۶	۰۱ دسامبر	۱۳۹۱ آذر ۱۱	۱۱:۰۰
MOBAOD.A2012338.0715.051.2012339203133	۳۳۸	۰۳ دسامبر	۱۳۹۱ آذر ۱۳	۱۰:۴۵
MOBAOD.A2012345.0725.051.2012345140259	۳۴۵	۱۰ دسامبر	۱۳۹۱ آذر ۲۰	۱۰:۵۵
MOBAOD.A2012347.0710.051.2012347143736	۳۴۷	۱۲ دسامبر	۱۳۹۱ آذر ۲۲	۱۰:۴۰
MOBAOD.A2012352.0730.051.2012352140652	۳۵۲	۱۷ دسامبر	۱۳۹۱ آذر ۲۷	۱۱:۰۰
MOBAOD.A2012354.0715.051.2012357002223	۳۵۴	۱۹ دسامبر	۱۳۹۱ آذر ۲۹	۱۰:۴۵

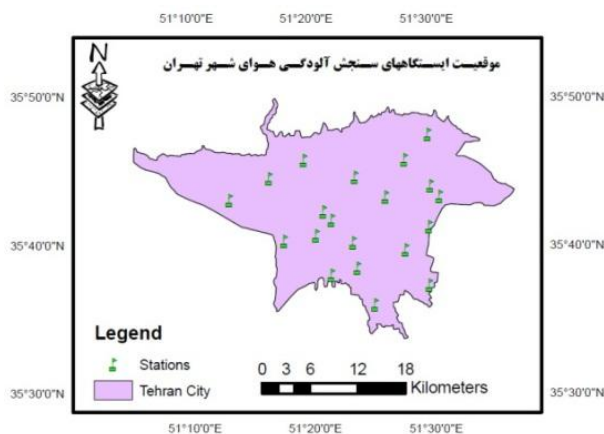
جدول شماره ۲- نام و مشخصات زمانی محصول مورد استفاده سنجنده مودیس ماهواره آکوا

نام محصول (MYD04)	روز از سال (DOY)	تاریخ میلادی (۲۰۱۲)	تاریخ شمسی	ساعت تصویربرداری به وقت ایران
MYBAOD.A2012274.0855.051.2012275223952	۲۷۴	۳۰ سپتامبر	۱۳۹۱ مهر ۰۹	۱۲:۲۵
MYBAOD.A2012277.0925.051.2012277194753	۲۷۷	۰۳ اکتبر	۱۳۹۱ مهر ۱۲	۱۲:۵۵
MYBAOD.A2012281.0900.051.2012281200749	۲۸۱	۰۷ اکتبر	۱۳۹۱ مهر ۱۶	۱۲:۳۰
MYBAOD.A2012284.0930.051.2012284234342	۲۸۴	۱۰ اکتبر	۱۳۹۱ مهر ۱۹	۱۳:۰۰
MYBAOD.A2012291.0935.051.2012291202243	۲۹۱	۱۷ اکتبر	۱۳۹۱ مهر ۲۶	۱۳:۰۵
MYBAOD.A2012295.0915.051.2012295203922	۲۹۵	۲۱ اکتبر	۱۳۹۱ مهر ۳۰	۱۲:۴۵
MYBAOD.A2012298.0945.051.2012298200912	۲۹۸	۲۴ اکتبر	۱۳۹۱ آبان ۰۳	۱۳:۱۵
MYBAOD.A2012302.0920.051.2012303220534	۳۰۲	۲۸ اکتبر	۱۳۹۱ آبان ۰۷	۱۲:۵۰
MYBAOD.A2012305.0950.051.2012306172145	۳۰۵	۰۱ نوامبر	۱۳۹۱ آبان ۱۱	۱۳:۲۰
MYBAOD.A2012314.0945.051.2012320021604	۳۱۴	۱۰ نوامبر	۱۳۹۱ آبان ۲۰	۱۳:۱۵
MYBAOD.A2012320.0905.051.2012321025101	۳۲۰	۱۶ نوامبر	۱۳۹۱ آبان ۲۶	۱۲:۳۵
MYBAOD.A2012321.0950.051.2012322164152	۳۲۱	۱۷ نوامبر	۱۳۹۱ آبان ۲۷	۱۳:۲۰
MYBAOD.A2012334.0920.051.2012340131516	۳۳۴	۲۹ نوامبر	۱۳۹۱ آذر ۰۹	۱۲:۵۰

داده‌های ایستگاه سنجش آلودگی هوا

در این مطالعه از اطلاعات ۲۰ ایستگاه سنجش آلودگی هوای شهر تهران که به صورت نامتقارن توزیع شده‌اند استفاده گردید. این ایستگاه‌ها میزان غلظت آلاینده‌های مختلف را که در ارتفاع کمی از سطح زمین قرار دارند در طول شبانه‌روز به صورت ساعتی اندازه‌گیری می‌کنند. منوکسید کربن، ازن، دی اکسید نیتروژن، سرب، ذرات معلق با قطر آتروپدینامیکی کمتر از ۱۰ میکرون و ۲٫۵ میکرون نمونه‌ای از

این آلاینده‌ها می‌باشد که توسط ایستگاه‌ها اندازه‌گیری می‌شوند. از بین این ۲۰ ایستگاه سنجش آلودگی، ۱۳ ایستگاه متعلق به شرکت کنترل کیفیت هوای تهران و ۷ ایستگاه متعلق به سازمان حفاظت محیط زیست می‌باشد. شکل (۱) نحوه توزیع و موقعیت این ۲۰ ایستگاه را نشان می‌دهد.

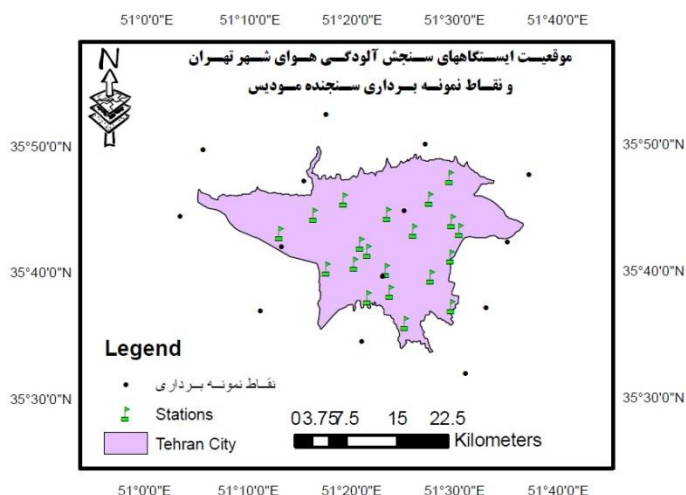


شکل شماره ۱- نحوه پراکندگی ۲۰ ایستگاه سنجش آلودگی هوا در سطح تهران، (سمت راست) تصویر ماهواره‌ای منطقه مطالعاتی، (سمت چپ) موقعیت منطقه مطالعاتی

محصولات سطح دوم نیز مانند محصولات سطح اول زمین مرجع نیستند. محصولات هواپز سطح دوم (MOD04-L2) (MYD04-L2، شامل اطلاعاتی راجع به هواپزها، عمق نوری و تجمع توده‌ها است، که می‌توان برای مطالعات بر روی ذرات معلق و محل تمرکز آنها استفاده کرد. این محصول به صورت یک ماتریس با ابعاد 203×135 است و تفکیک مکانی هر پیکسل 10×10 کیلومتر مربع می‌باشد که سطحی با وسعت 2030×1350 کیلومتر از سطح زمین توسط هر تصویر نمونه‌برداری می‌شود. با توجه به اینکه شهر تهران به ترتیب طول و عرض 50 کیلومتر و 30 کیلومتر دارد، در شکل (۲) می‌توان دید که با 14 پیکسل تمام سطح شهر تهران پوشش داده می‌شود. نقاط سیاه رنگ در شکل (۲) نشان دهنده نحوه پوشش مراکز پیکسل تصویر در شهر تهران می‌باشد. در این تحقیق از داده‌های سطح دوم استفاده شده است.

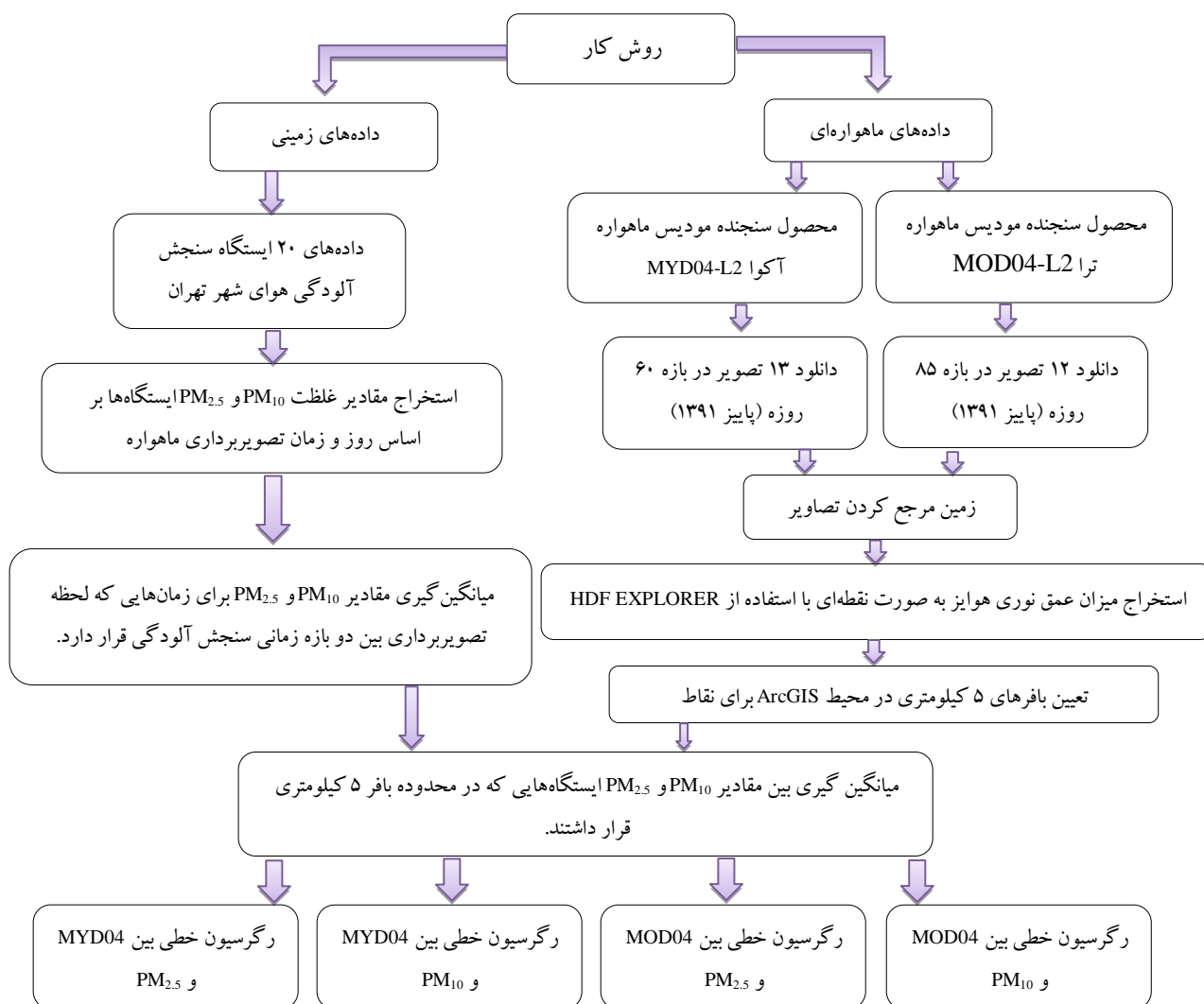
مرکز بایگانی هوافضا و توزیع علوم زمین گودارد (GESDAAC)، مسئولیت توزیع محصولات سطح اول و بالاتر را به عهده دارد. اکثر داده‌های مودیس که توسط GESDAAC تهیه می‌شود، به فرمت HDF و به صورت یک ماتریس با اعداد صحیح بدون علامت است. محصولات سطح دوم بسته به نوع آنها تفکیک مکانی یک الی 10 کیلومتر دارند. محصولات سطح سوم و چهارم دارای تفکیک‌های مکانی و زمانی مختلفی هستند که تفکیک مکانی بین $4/63$ الی 100 کیلومتر و تفکیک زمانی روزانه تا سالانه دارند.

محصولات سطح اول باید توسط کاربر براساس نوع سیستم تصویر مورد نظر زمین مرجع شوند برای اینکار می‌توان از فایل‌های همراه HDF-EOS استفاده نمود. این محصولات به صورت روزانه بوده و می‌توان برای تهیه تصاویر رنگی، تحلیل‌های کیفی و کمی از آنها استفاده نمود.



شکل شماره ۲- نحوه قرار گرفتن مراکز پیکسل ۱۰×۱۰ کیلومتری محصول مودیس در سطح تهران

دیagram ذیل نمایانگر مراحل انجام تحقیق می‌باشد:



شکل شماره ۳- مراحل انجام تحقیق

عمق نوری هواویزها

جهت استخراج عمق نوری هواویزهایی که در بالای سطح خشکی‌ها قرار دارند از روش اهداف تیره استفاده می‌شود، در این روش، استخراج اطلاعات کمی هواویزها از داده‌های سنجنده مودیس، نیازمند الگوریتم‌ها و محاسبات پیچیده‌ای است، که ناسا این پردازش‌ها را انجام داده و نتایج را برای کاربران، در اینترنت قرار می‌دهد.

۲۵ سری از این داده‌ها که ۱۲ تایی آن‌ها مربوط به سنجنده مودیس ماهواره ترا و ۱۳ تایی دیگر مربوط به سنجنده مودیس ماهواره آکوا می‌باشد برای تاریخ‌های ذکر شده در جداول یک و دو، از تارنمای سنجنده مودیس دریافت شده است (نمونه‌ای از محصولات این سنجنده‌ها در شکل ۴ آورده شده است). این داده‌ها وسعت بسیار زیادی، حدوداً یک و نیم برابر وسعت ایران را پوشش می‌دهند. برای استخراج مقادیر پیکسل‌های مورد نظر، ابتدا داده‌ها بر مبنای سیستم مختصات WGS84 زمین مرجع شدند. با استفاده از نرم‌افزار HDF Explorer فایل‌ها بازخوانی گردید و بر اساس مختصات شهر تهران (۵۱°۲۰' تا ۵۱°۳۶' شرقی و ۳۵°۳۴' تا ۳۵°۵۰' شمالی) مقادیر پیکسل‌ها که نشان دهنده میزان عمق نوری هواویزها هستند استخراج گردید. در بعضی روزها به علت آلودگی زیاد و صاف بودن آسمان توانستیم مقادیر را برای حداکثر تعداد پیکسل‌ها (۱۴ پیکسل) استخراج نماییم (نقاط سیاه رنگ در شکل ۲ نشان دهنده موقعیت داده‌های نقطه‌ای است که توسط نرم‌افزار نمونه‌برداری شده‌اند). اما در روزهای دیگر به علت ابری بودن آسمان یا پاک بودن هوای مناطقی از شهر تهران مقادیر عمق نوری هواویزها در داده‌ها موجود نبودند.

همانطور که می‌دانیم عمق نوری هواویز به عنوان میزان فراوانی آلاینده‌ها به صورت انتگرال ضریب میرایی آلاینده‌ها در امتداد ستون قائم جو از سطح زمین تا سنجنده تعریف می‌شود که نشان دهنده غلظت تمامی آلاینده‌ها در این ستون است. اما طبق تحقیقات انجام شده مقدار عمق نوری هواویز در شهر تهران بیشتر تحت تاثیر غلظت ذرات معلق قرار دارد تا غلظت دیگر آلاینده‌ها، هر چند دخیل کردن آلاینده‌های

دیگر در مدل‌ها می‌تواند باعث بهبود مدل گردد. در این تحقیق فقط بر روی ارتباط غلظت ذرات معلق در سطح زمین بحث شده است و دیگر عوامل وارد نشده‌اند.

مقادیر عمق نوری هواویز در بازه صفر الی یک اندازه‌گیری می‌شوند. مقدار صفر نشان دهنده عدم وجود داده در منطقه، مقادیر زیر ۰/۲ نشان دهنده هوای صاف با دید مناسب و مقدار یک نشان دهنده شرایط نامناسب و آلودگی زیاد است و اعداد بین ۰/۲ الی ۱ بین دو وضعیت هوایی صاف و آلوده قرار دارند. به طور کلی برای آب و هوای قاره‌ای اگر تغییرات عمق نوری هواویز بین صفر تا ۰/۲ باشد شرایط مناسبی از نظر پاک‌ی هوا وجود دارد. اما میزان عمق نوری هواویز در یک مدل محلی که عمده شرایط هوایی آن گرد و غباری است، بین ۰/۵ تا ۱ می‌باشد.

ایستگاه‌های سنجنش آلودگی هوای شهر تهران را بر اساس مختصات جغرافیایی در محیط ArcGIS پیاده نمودیم. سپس با توجه به اینکه مراکز پیکسل مربوط به عمق نوری هواویز زمین مرجع شده‌اند و دارای مختصات می‌باشند در محیط نرم‌افزار ArcGIS مشخص می‌کنیم. لازم به ذکر است که به علت برخی عوامل همچون وجود ابر یا عدم توانایی الگوریتم در محاسبه عمق نوری هواویز تمام پیکسل‌ها حاوی مقدار نمی‌باشد از طرفی دیگر ممکن است ایستگاه‌های سنجنش آلودگی به علت نقص فنی در زمان مورد نظر ما داده‌ای را ثبت نکنند. پس از پیاده‌سازی مراکز پیکسل حاوی مقدار عمق نوری هواویز، حد آستانه‌ای با شعاع ۵ کیلومتر تعریف می‌کنیم. هر ایستگاهی زمینی که در این حد آستانه قرار گرفت داده غلظت PM_{10} و $PM_{2.5}$ آن را برای پیکسل در نظر می‌گیریم. به عبارت دیگر مقدار عمق نوری هواویز در آن پیکسل با مقادیر غلظت PM_{10} و $PM_{2.5}$ اندازه‌گیری شده در آن ایستگاه‌ها ارتباط دارد. سنجنش آلودگی در ایستگاه‌های زمینی در هر ساعت به صورت منظم اندازه‌گیری می‌شود، اما ممکن است ماهواره در ساعت ۱۰:۳۰ تصویربرداری کرده باشد و عمق نوری هواویز را برای آن ساعت خاص بدست آورده باشد، که در این صورت از

میانگین گیری مقادیر نزدیکترین ساعات سنجش آلودگی در ایستگاه زمینی به عنوان مثال ساعات ۱۰ و ۱۱ استفاده نمودیم.

جدول شماره ۳- مقادیر عمق نوری هواویز برای سنجنده مودیس ماهواره ترا و مقادیر غلظت PM₁₀ و PM_{2.5} زمینی

ردیف	تاریخ شمسی	مقادیر PM ₁₀ (μg/m ³)	مقادیر PM _{2.5} (μg/m ³)	عمق نوری هواویز برای سنجنده مودیس ماهواره ترا
۱	۱۳۹۱ مهر ۰۴	۸۹/۷۷	۴۱/۳۸	۰/۵۷
*۲	۱۳۹۱ مهر ۱۶	۱۰۴/۹۳	۵۵/۴۲	۰/۶۳
*۳	۱۳۹۱ مهر ۱۹	۸۴/۳۲	۳۷/۰۹	۰/۴۵
*۴	۱۳۹۱ مهر ۲۶	۸۱/۹۷	۴۶/۴۳	۰/۳۸۵
۵	۱۳۹۱ آبان ۱۸	۸۰/۷۴	۳۴/۲۵	۰/۲۹۵
*۶	۱۳۹۱ آذر ۰۹	۷۰/۱۲	۳۵/۰۵	۰/۲۶
۷	۱۳۹۱ آذر ۱۱	۸۵/۳	۴۴/۲۶	۰/۳۸
۸	۱۳۹۱ آذر ۱۳	۸۶/۳۵	۴۲/۵	۰/۴۲
۹	۱۳۹۱ آذر ۲۰	۹۰/۳۱	۴۲/۵۹	۰/۳۸
۱۰	۱۳۹۱ آذر ۲۲	۵۴/۸۸	۲۶/۲۶	۰/۲۰
۱۱	۱۳۹۱ آذر ۲۷	۶۱/۳۶	۳۸	۰/۳۰
۱۲	۱۳۹۱ آذر ۲۹	۶۲/۴۸	۲۸/۴۵	۰/۲۵

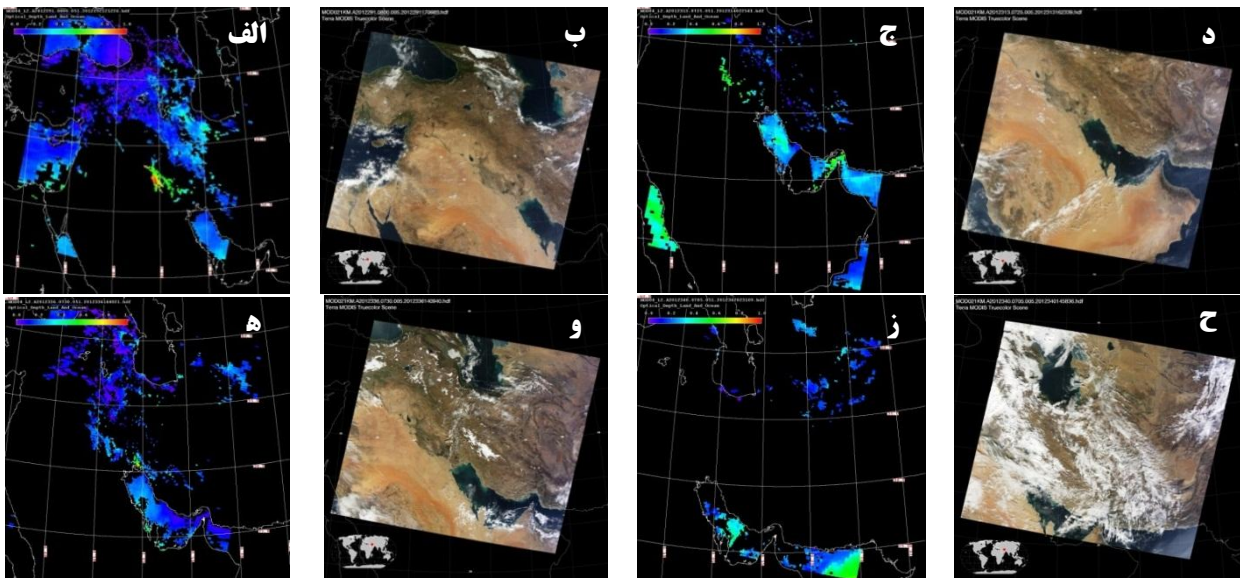
جدول شماره ۴- مقادیر عمق نوری هواویز برای سنجنده مودیس ماهواره آکوا و مقادیر غلظت PM₁₀ و PM_{2.5} زمینی

ردیف	تاریخ شمسی	مقادیر PM ₁₀ (μg/m ³)	مقادیر PM _{2.5} (μg/m ³)	عمق نوری هواویز برای سنجنده مودیس ماهواره آکوا
۱	۱۳۹۱ مهر ۰۹	۱۸/۰۸	۱۱/۱۹	۰/۱۵
۲	۱۳۹۱ مهر ۱۲	۵۲/۴۰	۲۹/۷۲	۰/۳۲
*۳	۱۳۹۱ مهر ۱۶	۱۰۵/۳۰	۵۵/۶۷	۰/۶۸
*۴	۱۳۹۱ مهر ۱۹	۸۴/۷۸	۳۷/۲۶	۰/۵۵
*۵	۱۳۹۱ مهر ۲۶	۸۲/۵۴	۴۶/۷۵	۰/۶۲
۶	۱۳۹۱ مهر ۳۰	۶۷/۵۴	۳۸/۲۱	۰/۴۳
۷	۱۳۹۱ آبان ۰۳	۲۷/۳۳	۱۶/۶۳	۰/۲۵۵
۸	۱۳۹۱ آبان ۰۷	۱۶/۷۸	۲۷/۳۹	۰/۲۲۵
۹	۱۳۹۱ آبان ۱۱	۴۹/۵۱	۳۷/۳۷	۰/۳۰
۱۰	۱۳۹۱ آبان ۲۰	۵۷/۵۷	۴۰/۲۴	۰/۳۱۵
۱۱	۱۳۹۱ آبان ۲۶	۲۹/۶۶	۲۲/۸۷	۰/۱۸
۱۲	۱۳۹۱ آبان ۲۷	۴۶/۷۸	۲۹/۴۵	۰/۴۸
*۱۳	۱۳۹۱ آذر ۰۹	۷۰/۲۵	۳۵/۲۷	۰/۳۴

سنجنده مودیس برای تعدادی از روزهای فصل پاییز می‌باشد. لازم به ذکر است که ۴ روز از روزهای انتخاب شده (که با * مشخص شده‌اند) مشابه بوده، اما به دلیل تفاوت زمان عبور ماهواره ترا و آکوا از فراز ایران مقادیر نمونه‌برداری متفاوت می‌باشند.

با در اختیار داشتن مقادیر زمینی غلظت PM_{10} و $PM_{2.5}$ و همچنین مقادیر عمق نوری هواویز سنجنده مودیس ماهواره ترا و آکوا با استفاده از روش رگرسیون خطی، می‌توان ارتباط میان این دو پارامتر را بررسی نمود.

جدول های ۳ و ۴ نشان دهنده مقادیر غلظت PM_{10} و $PM_{2.5}$ ایستگاه‌های زمینی و همچنین مقادیر عمق نوری هواویز



شکل شماره ۴- (الف) عمق نوری هواویز برای روز ۲۶ مهر ۹۱ و (ب) نمایش بصری و تفسیرهای کیفی تصویر برای ۲۶ مهر ۹۱ که باندهای ۳، ۱، ۴ به ترتیب انتخاب شدند. (ج) عمق نوری هواویز برای روز ۱۸ آبان ۹۱ و (د) نمایش بصری تصویر ۱۸ آبان ۹۱. (ه) عمق نوری هواویز برای روز ۱۱ آذر ۹۱ و (و) نمایش بصری تصویر ۱۱ آذر ۹۱. (ز) یک روز ابری که مقادیر عمق نوری هواویز محاسبه نشده است و (ح) نمایش بصری تصویر روز ابری.

نتایج و بحث

با استفاده از روش رگرسیون خطی ارتباط بین مقدار عمق نوری هواویز و مقادیر غلظت PM_{10} و $PM_{2.5}$ را برای سنجنده‌های مودیس ماهواره ترا و آکوا بدست آوردیم (شکل ۵). نتایج نشان داد که بین عمق نوری هواویز و مقادیر غلظت PM سنجیده شده در ایستگاه‌های زمینی همبستگی بالایی بین ۰/۶۷ تا ۰/۸۱ وجود دارد.

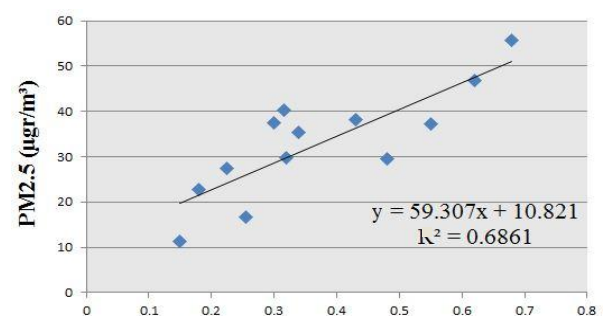
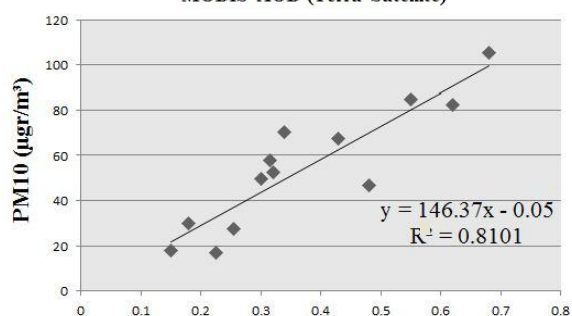
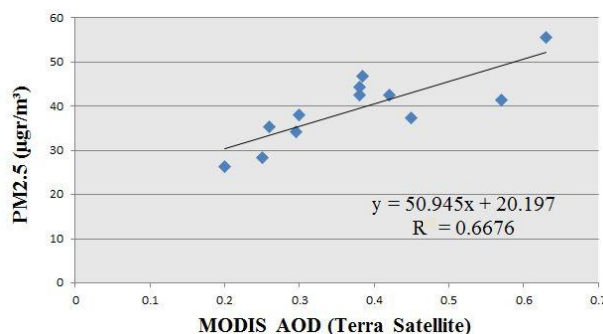
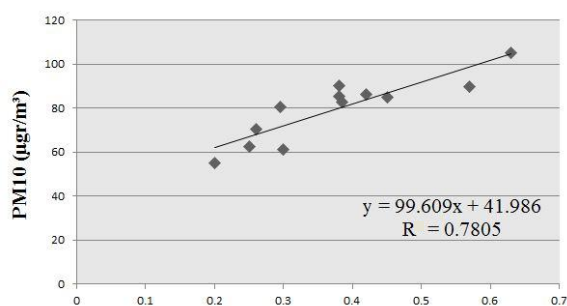
مقادیر عمق نوری هواویز ماهواره ترا با غلظت PM_{10} میزان همبستگی ۰/۷۸ دارد که نسبت به غلظت $PM_{2.5}$ که میزان همبستگی آن ۰/۶۷ می‌باشد، بیشتر است. مقادیر عمق نوری هواویز ماهواره آکوا با غلظت PM_{10} همبستگی ۰/۸۱ دارد که بالاترین همبستگی بین چهار رگرسیون خطی است. عمق نوری هواویز با غلظت $PM_{2.5}$ در همین ماهواره همبستگی ۰/۶۹ دارد که مقدار آن از میزان همبستگی عمق نوری

هواویز همین ماهواره با غلظت PM_{10} کمتر است. با توجه به رگرسیون‌های خطی می‌توان گفت که مقادیر عمق نوری هواویز با مقادیر غلظت PM_{10} نسبت به غلظت $PM_{2.5}$ همبستگی بالاتری داشته و می‌تواند برآورد بهتری از غلظت PM_{10} زمینی داشته باشد. در هر دو ماهواره اختلاف حدوداً ۰/۱۱ تا ۰/۱۲ بین میزان همبستگی غلظت PM_{10} و $PM_{2.5}$ وجود دارد. این اختلاف نشان می‌دهد که هر دو سنجنده علیرغم تفاوت‌های فنی که دارند، به طور نسبی اختلاف برآورد غلظت PM_{10} و $PM_{2.5}$ یکسانی دارند.

مقدار همبستگی بین عمق نوری هواویز و غلظت $PM_{2.5}$ در هر دو سنجنده نشان می‌دهد که سنجنده‌ای که بر روی ماهواره آکوا قرار دارد نسبتاً توانایی بهتری در برآورد $PM_{2.5}$ دارد. همچنین برای غلظت PM_{10} نیز این موضوع صدق

غلظت PM₁₀ در اختیار ما قرار می‌دهد.

می‌کند و سنجنده مودیس ماهواره آکوا برآورد بهتری از



شکل شماره ۵- شکل بالا سمت چپ: رگرسیون خطی بین عمق نوری هواویز ماهواره ترا و PM₁₀، شکل بالا سمت راست: رگرسیون خطی بین AOD ماهواره ترا و PM_{2.5}، شکل پایین سمت چپ: رگرسیون خطی بین AOD ماهواره آکوا و PM₁₀، شکل پایین سمت راست: رگرسیون خطی بین AOD ماهواره آکوا و PM_{2.5} را نشان می‌دهد.

قبول باشد، رابطه دو متغیر را معنادار گویند. همانطور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود مقدار P-Value برای تمامی مدل‌ها بسیار کمتر از ۰/۰۵ است. کمترین مقدار P-Value و بیشترین ضریب همبستگی در مدل‌ها مربوط به ماهواره آکوا می‌باشد که نشان دهنده اطمینان بالا برآورد PM₁₀ توسط ماهواره آکوا می‌باشد.

در جدول (۵) اطلاعات آماری مربوط به مدل‌های فوق آمده است. در بحث آزمون فرضیه، احتمال رد فرضیه صفر وقتی این فرضیه صحیح باشد را P-Value گویند. در رگرسیون، فرضیه صفر احتمال صفر بودن شیب خط معادله رگرسیون را مورد آزمون قرار می‌دهد. در مباحث مهندسی، اگر این احتمال کمتر از ۰/۰۵ و ضریب همبستگی نیز به مقدار قابل

جدول شماره ۵- پارامترهای آماری مربوط به مدل‌های ارائه شده

ماهواره	ذرات معلق	ضریب همبستگی	P-value
ترا	PM _{2.5}	۰/۶۷	۰/۰۰۱
	PM ₁₀	۰/۷۸	۰/۰۰۰۱
آکوا	PM _{2.5}	۰/۶۹	۰/۰۰۰۱
	PM ₁₀	۰/۸۱	<۰۰۰۱

داده‌های زمینی غلظت PM_{2.5} و PM₁₀ میزان همبستگی بین ۰/۶۷ الی ۰/۸۱ بدست آمد. لازم به ذکر است همبستگی بدست آمده مربوط به بازه مورد نظر و روزهایی می‌باشد که هر دو داده عمق نوری هواویز توسط ماهواره و داده‌های

نتیجه‌گیری

در این مقاله پس از استخراج عمق نوری هواویز مربوط به بازه ۸۵ روزه (۴ مهر الی ۲۹ آذر سال ۱۳۹۱)، برای دو سنجنده مودیس ماهواره‌های ترا و آکوا و مقایسه آن‌ها با

منابع

- ۱- خسروی، محمود، بررسی توزیع عمودی گرد و غبار ناشی از طوفان در خاورمیانه با استفاده از مدل NAAPS مورد: سیستان ایران، چهارمین کنگره بین‌المللی جغرافی دانان جهان اسلام، زاهدان، ۲۵-۲۷، فروردین ۱۳۸۹.
- ۲- دلجو، امیر هوشنگ، مطالعه و بررسی وارونگی دما و ناپایداری بر روی آلودگی هوای شهر تهران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، ۱۳۷۸.
- ۳- صفوی، سید یحیی، علیجانی، بهلول، بررسی عوامل جغرافیایی در آلودگی هوای تهران، پژوهش‌های جغرافیایی، صفحات ۹۹-۱۱۲، ۱۳۸۵.
- ۴- قربانی، رضوان، مباحثی، محمدرضا، رحیم زادگان، مجید، توانایی داده‌های سنجنده مودیس در تحلیل‌های کیفی و کمی کیفیت هوا در مناطق شهری، نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، سال اول، شماره سوم و چهارم، ۱۳۸۹.
- ۵- قربانی، رضوان، مباحثی، محمدرضا، رحیم زادگان، مجید، روشی سریع در برآورد غلظت ذرات معلق با استفاده از سنجنده مودیس، یک مطالعه موردی در تهران، مجله پژوهشی حکیم، دوره پانزدهم، شماره دوم، ۱۳۹۱.
- ۶- قلیزاده، محمد حسین، فرج‌زاده، منوچهر، دارند، محمد، ارتباط آلودگی هوا با مرگ و میر جمعیت شهر تهران، مجله پژوهشی حکیم، دوره دوازدهم، شماره دوم، ۱۳۸۸.
- 7- Chu, A. D., Y. J. Kaufman, C. Ichoku, L. A. Remer, D. Tanreand B. N. Holben "Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land", Geophysical Research Letter 12, pp. 1-4, 2002.
- 8- Emili, E., C. Popp, M. Petitta, M. Riffler, S. Wunderleans M. Zebisch, "PM₁₀ remote sensing from geostationary SEVIRI and polar-orbiting MODIS sensors over the complex terrain of the European Alpineregion", Remote Sensing of Environment 114, pp. 2485-2499, 2010.
- 9- Gupta, P. and C. A. Sundar, "An evaluation of Terra-MODIS sampling for monthly and annual particulate matter air quality assessment over the South eastern United

غلظت ذرات معلق توسط ایستگاه زمینی اندازه‌گیری شده است. این مقدار همبستگی برای سنجنده‌ای مانند مودیس که تفکیک مکانی پایینی دارد بسیار مناسب می‌باشد. این میزان همبستگی بالا می‌تواند به علت تفکیک طیفی بالای سنجنده باشد. با توجه به همبستگی‌های محاسبه شده، PM₁₀ همبستگی بالاتری را نسبت به PM_{2.5} با داده‌های عمق نوری هواویز نشان می‌دهد. همچنین مقدار P-Value مدل‌های مربوط به PM₁₀ مقادیر کمتری نسبت به PM_{2.5} در سنجنده یک ماهواره در شرایط یکسان برای مدل‌سازی نشان می‌دهد که این امر حاکی از توانایی بیشتر سنجنده‌ها در مدل‌سازی PM₁₀ نسبت به PM_{2.5} می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده میزان همبستگی بالا فقط در مناطق تقریباً آلوده وجود دارد و در مناطقی که هوای پاک دارند به علت توانایی پایین سنجنده در محاسبه عمق نوری هواویز، نمی‌توان به داده‌های پردازش شده آن اطمینان نمود. به همین علت داده‌های سنجنده مودیس ماهواره آکوا که در ساعات بین ۱۲:۲۵ الی ۱۳:۲۵ از فراز ایران تصویربرداری می‌نماید به علت افزایش آلاینده‌ها در این ساعات، توانایی بهتری برای برآورد ذرات معلق در سطح شهر را دارا می‌باشد.

همانطور که در متن هم اشاره شد عمق نوری هواویز میزان فراوانی آلاینده‌ها در ستون قائم جو به صورت انتگرال ضریب میرایی آلاینده‌ها در امتداد ستون عمودی جو از سطح زمین تا بالای اتمسفر تعریف می‌شود. به عبارت دیگر عمق نوری هواویز نشان دهنده تمام آلاینده‌هایی که باعث پراکنش نور می‌شوند است نه فقط غلظت ذرات معلق. ضریب همبستگی می‌تواند مقدار بیشتری داشته باشد اگر دیگر آلاینده‌ها نیز در آن دخیل شوند. بنابراین میزان همبستگی استخراج شده نشان دهنده سهم ذرات معلق در میزان عمق نوری هواویز سنجنده شده در ماهواره می‌باشد. در تحقیقی که در حال حاضر نویسندگان در حال انجام هستند، به بررسی تأثیر عوامل آب و هوایی بر روی رابطه بین AOD-PM پرداختند.

- 13- Ogren J. A., "Asystematic approach to insitu observations of aerosol properties", Aerosol Forcing of Climate, 1995.
- 14- Remer, A. and J. Kaufman, "ALGORITHM FOR REMOTE SENSING OF TROPOSPHERIC AEROSOL FROM MODIS: Collection 5Product ID: MOD04/MYD04", NASA/GSFC, 2007.
- 15- Savtchenko, A., D. Ouzounov, S. Ahmad, J. Acker, G. Leptoukh, J. Kozianaand D. Nickless, "Terraand Aqua MODIS products available from NASA GESDAAC", Advances in Space Research 34, pp. 710-714, 2004.
- 16- Sohrabinia, M. and A. M. Khorshiddoust, "Application of satellite data and GIS in studying air pollutants in Tehran". Habitat International 31, pp. 268-275, 2007.
- State", Atmospheric Environment 42, pp. 6465-6471, 2008.
- 10- Jill A. Engel-Cox, Christopher H. Holloman, Basil W. Coutant, Raymond M. Hoff, "Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality", Atmospheric Environment 38, pp. 2495-2509, 2004.
- 11- LI Ling-jun, WANG Ying, ZHANG Qiang, YU Tong, ZHAO Yueand JIN Jun, "Spatial distribution of aerosol pollution based on MODIS data over Beijing, China". Journal of Environmental Sciences 19, pp. 955-960, 2007.
- 12- Martin, R., "Review satellite remote sensing of surface air quality". Atmospheric Environment 42, 7823-7843, 2008.