

این مقاله در اولین کنفرانس ملی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی به عنوان مقاله برگزیده انتخاب شده است که پس از تکمیل، داوری مجدد و اخذ پذیرش در این شماره از نشریه به چاپ می‌رسد.

پهنه‌بندی NO₂ جوی در شهرهای صنعتی با استفاده از تصاویر MODIS و OMI (مطالعه موردی: کلان شهر تهران)

ابوالفضل احمدیان^{۱*}، محمدرضا مباحثی^۲، علی اکبر متکان^۳

۱- دانشجوی دکتری سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- استاد گروه سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- استاد گروه سنجش از دور و GIS، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۳۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۰۸

چکیده

جو سامانه گازی طبیعی پویا و پیچیده‌ای است که زندگانی در سیاره زمین به آن وابسته است. غلظت ذرات معلق موجود در جو از مهمترین شاخص‌های آلودگی هوا محسوب شده و به همین علت از توجه زیادی برخوردار است. تهران یکی از آلوده‌ترین شهرهای جهان می‌باشد که عوامل متعددی در آلودگی هوای آن دخالت دارند. بنابراین تعیین مقدار آلودگی در مناطق مختلف شهر می‌تواند منجر به راهکارهایی جهت کاهش اثرات منفی آن شود. ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا در سطح شهر مقادیر آلودگی را در محدوده ایستگاه با دقت بسیار خوب اندازه‌گیری می‌کنند، اما به دلیل هزینه‌های بالای نصب و نگهداری، امکان نصب تعداد زیادی از آنها در سطح شهر وجود ندارد. همچنین در مناطقی که از ایستگاه‌ها فاصله دارند برای محاسبه میزان آلودگی نیاز به تخمین می‌باشد. دی اکسید نیتروژن یکی از مهمترین اجزاء آلودگی هوا در کلان شهرها می‌باشد که در این پژوهش برای تعیین آن در سطح شهر با استفاده از سنجش از دور تلاش خواهد شد. برای این منظور از تصاویر سنجنده OMI که میزان این آلودگی را بصورت روزانه و در مناطق مختلف ارائه می‌کند استفاده شده است. این تصاویر مقادیر آلودگی را در پیکسل‌هایی با ابعاد بزرگ ارائه می‌کنند که برای مناطق شهری مناسب نمی‌باشد. در این پژوهش با استفاده همزمان از تصاویر OMI و مادیس ۵۰۰ متری سعی در برقراری ارتباط بین بازتابندگی و میزان آلودگی در باندهای مختلف شده است. بر این اساس ابتدا ارتباط میزان آلودگی و بازتابندگی در چندین منطقه صنعتی و شهر بزرگ بررسی شد. سپس ترکیب‌های خطی معادلات مختلف در باندهای مختلف مادیس در نظر گرفته شد و بهترین معادله-باند با استفاده از داده‌های آزمون مشخص گردید. در انتها روش به‌دست آمده در سطح شهر تهران پیاده‌سازی و تصاویر توزیع آلودگی برای روزهای مختلف به‌دست آمد. به منظور ارزیابی نتایج به‌دست آمده از داده‌های ایستگاه‌های زمینی استفاده شد که جذر میانگین مربع خطاها برابر ۰.۲۹ و جذر میانگین مربع خطاهای نسبی برابر ۴۴/۳ درصد به‌دست آمد. خطای مدل برای مقادیر زیاد آلودگی در حدود ۱۵ درصد و برای مقادیر کم آلودگی تا ۱۰۰ درصد می‌باشد. همچنین با استفاده از تجمیع تصاویر به‌دست آمده در روزهای مختلف مناطق بحرانی و دارای آلودگی زیاد در سطح شهر مشخص گردید.

کلیدواژه‌ها: سنجش از دور، آلودگی هوا، دی اکسید نیتروژن، مادیس، OMI.

*نویسنده مکاتبه کننده: تهران، خیابان ولی عصر، تقاطع میرداماد غربی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری

تلفن: ۰۲۱-۸۸۷۷۰۲۱۳

Email : ahmadian@dena.kntu.ac.ir

۱- مقدمه

آلودگی هوا تغییر در ویژگی‌های طبیعی جو بر اثر مواد شیمیایی، غباری یا عامل‌های زیست‌شناختی است. بر اساس تعریف بهداشت عمومی، آلودگی هوا جزء عوامل برهم زننده تعادل جامعه و در نتیجه محل بهداشت عمومی می‌باشد. وسایل نقلیه موتوری از جمله منابع مصنوعی اساسی آلوده کننده هوا هستند که شامل آلاینده‌هایی همچون دی‌اکسیدنیتروژن^۱ که جزء مهمترین آلوده کننده‌های هوا است می‌شود. با توجه به اینکه آلودگی هوا تاثیر مستقیم بر روی سلامت انسان دارد لذا پایش میزان آلودگی از جمله موارد مهم در مدیریت کلان شهرها می‌باشد. یکی از راه‌های اندازه‌گیری و پایش آلودگی هوا در شهرها نصب ایستگاه‌های مختلف آلودگی‌سنج در سطح شهر و در مناطق مختلف می‌باشد. از آنجائیکه نصب ایستگاه‌های زیاد در شهر و نگهداری آن‌ها نیازمند صرف هزینه‌های زیادی می‌باشد، این راهکار در مدیریت و پایش آلودگی زیاد مورد توجه نمی‌باشد. همچنین با وجود اینکه اندازه‌گیری‌های ایستگاه‌های زمینی آلودگی دارای دقت بالا هستند، اما ایستگاه‌ها دارای پخش تنک و غیر همگن می‌باشند و اندازه‌گیری‌ها تنها برای محدوده‌های اطراف آنها معتبر می‌باشد [۱]. بنابراین روش‌هایی که بتوانند با صرف هزینه کمتر میزان آلودگی را در نقاط مختلف شهر تعیین نمایند، می‌توانند به پایش آلودگی کمک بسزایی نمایند. بنابراین استفاده از روش سنجش از دور با توجه به هزینه‌های پایین آن در مقایسه با روش‌های دیگر در این زمینه ضروری و لازم به نظر می‌رسد.

دی اکسید نیتروژن یکی از مهمترین گازهای موجود در تروپوسفر می باشد که بطور مستقیم یا غیر مستقیم بر روی سلامتی انسان (بیماری‌های ریوی یا قلبی و عروقی) و اکوسیستم اثر دارد [۲ و ۳]. علاوه بر عوامل

طبیعی در تولید دی اکسید نیتروژن، بخش عمده‌ای از NO₂ تروپوسفر مربوط به فعالیت‌های انسان به‌ویژه احتراق سوخت‌های فسیلی می‌باشد. از آنجائیکه دی اکسید نیتروژن یکی از مهمترین اجزاء آلودگی هوا در کلان شهرها می‌باشد در این پژوهش برای تعیین آن در سطح شهر با استفاده از سنجش از دور تلاش خواهد شد. با استفاده از سنجنده OMI^۲، تصاویر آلودگی NO₂ به‌صورت روزانه و برای مناطق مختلف تولید می‌شود. این تصاویر دارای قدرت تفکیک مکانی پایین می‌باشند (۰/۲۵ درجه) و برای مناطق شهری قابل استفاده نمی‌باشد. در این پژوهش سعی در برقراری یک ارتباط بین این تصاویر و تصاویر MODIS^۳ می‌باشد. با توجه به قدرت تفکیک مکانی بالاتر تصاویر MODIS در صورت برقراری این ارتباط، امکان پایش آلودگی در مناطق شهری فراهم خواهد شد.

۲- پیشینه پژوهش

با توجه به قدرت تفکیک مکانی پایین تصاویر OMI (در حدود ۲۱ کیلومتر) استفاده از این تصاویر برای مناطق شهری که دارای وسعت زیاد نمی‌باشند، مناسب نیست. بنابراین از این تصاویر بیشتر برای بررسی در مناطق وسیع استفاده می‌شود. عمده کارهای صورت گرفته بر روی این تصاویر در مناطق شهری مربوط به ارزیابی نتایج در مناطق شهری که وسعت زیادی دارند، می‌شود. ارزیابی NO₂ ستونی به‌دست آمده از OMI با استفاده از ترکیب مشاهدات زمینی و داده‌های اخذ شده توسط هواپیما (هوابرد) توسط لامسال و همکاران در سال ۲۰۱۴ برای چندین منطقه مختلف صورت گرفت [۴]. با وجود پیچیدگی زیاد در ارزیابی داده‌های ماهواره‌ای به‌دست آمده، مشخص گردید NO₂ ستونی

^۲ Ozone Monitoring Instrument (OMI)^۳ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)^۱ Nitrogen Dioxide (NO₂)

سوئیس در دو نوبت صبح و عصر و در یک روز تابستانی آفتابی و بدون ابر استفاده شد. استفاده از داده‌های این طیف سنج به منظور پیدا کردن منبع آلودگی، تولید ورودی برای مدل انتشار آلودگی و برقراری ارتباط بین اندازه‌گیری‌های زمینی و ماهواره‌ای مفید می‌باشد. در نهایت مشخص گردید مناطق مرکزی شهر، اطراف فرودگاه و منطقه سوزاندن زباله‌ها به‌عنوان مناطق با آلودگی زیاد NO₂ می‌باشند.

۳- منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

کلان شهر تهران یکی از آلوده‌ترین شهرهای جهان می‌باشد و عوامل متعددی در آلودگی آن دخالت دارند که در بین آنها عوامل جغرافیایی از اهمیت بیشتری برخوردارند. شهر تهران با مساحتی حدود ۸۰۰ کیلومتر مربع در دامنه جنوبی رشته کوه البرز و در یک محیط نیم بسته قرار دارد. وجود شرایط وارونگی دمایی فراوان و استقرار مداوم سیستم‌های پر فشار در طول سال همه از ویژگی‌های طبیعی منطقه هستند که نمی‌توان آنها را تعدیل کرده و یا از بین برد. از طرف دیگر عوامل انسانی مانند جمعیت زیاد و استقرار زیاد کارخانه‌ها در سطح شهر و بویژه در غرب و جنوب غرب آن میزان آلودگی شهر را دوچندان می‌کنند [۹]. با توجه به موارد ذکر شده کلان‌شهر تهران به‌عنوان محدوده مطالعاتی انتخاب گردید (شکل (۱)).

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش به دو بخش داده‌های زمینی و داده‌های ماهواره‌ای تقسیم می‌شود. داده‌های زمینی شامل داده‌های آلودگی هوا اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های سنجش آلودگی در سطح شهر، مدل رقومی ارتفاعی^۳، داده‌های هواشناسی و همچنین نقشه‌های بزرگ مقیاس موجود از شهر می‌باشد (شکل (۲)).

به‌دست آمده با مجموعه‌ای از داده‌های زمینی مشاهده شده ارتباط دارد.

الگوریتم عملیاتی به‌دست آوردن NO₂ از طریق تصاویر OMI توسط بوسلا و همکاران در سال ۲۰۰۶ شرح داده شده است [۵]. در این الگوریتم از روش DOAS^۱ استفاده می‌گردد که با استفاده از داده‌های زمینی و اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای صورت می‌گیرد [۶]. در این روش از جذب NO₂ در محدوده ۴۰۰ تا ۴۵۰ نانومتر (که سایر جذب کننده‌ها جذب کمتری در این محدوده دارند) استفاده می‌شود. در نهایت مشخص گردیده است که به منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر در محاسبه NO₂، استفاده از یک شبکه‌بندی سالیانه میانگین در پروفایل‌های تروپوسفریک NO₂ و یک پروفایل استراتوسفریک میانگین نیاز می‌باشد.

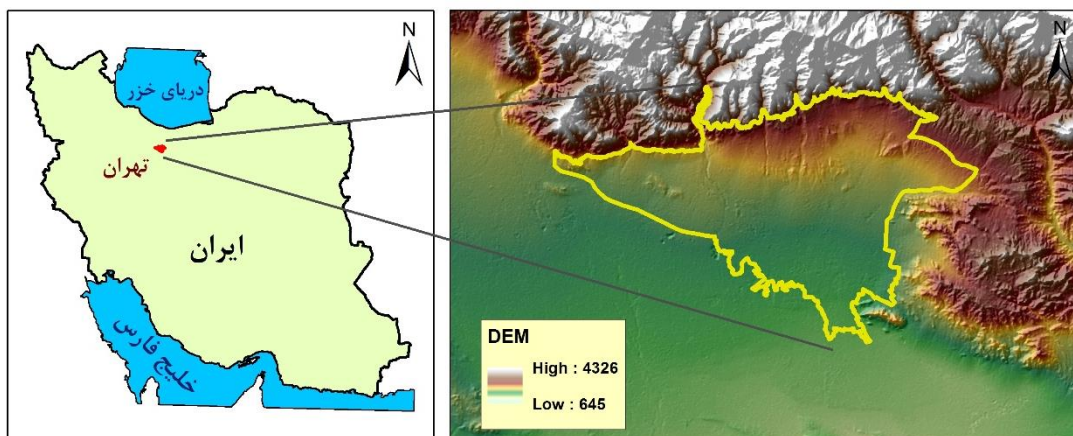
در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۲ متیو و همکاران به مقایسه داده‌های ماهواره‌ای و زمینی به‌دست آمده برای NO₂ پرداختند [۷]. برای این منظور از ۴۱۳۸ سری داده مربوط به ۲۵ ایستگاه در ایالت کالیفرنیا در سال ۲۰۰۵ استفاده شد. هدف آنها تعیین یک ضریب مقیاس با استفاده از ارتباط بین اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای و غلظت سطحی آلودگی بود. پس از این مقایسه آنها به این نتیجه رسیدند که با استفاده از تصاویر OMI می‌توان غلظت NO₂ را در سطوح پایین به‌دست آورد و این داده‌ها می‌توانند ابزاری مفید برای بررسی آلودگی NO₂ در مناطق مختلف شهری باشند.

در کار دیگری که توسط پاپ و همکاران در سال ۲۰۱۲ انجام شد، تولید نقشه‌های با قدرت تفکیک مکانی بالا از چگالی ستونی عمودی NO₂ با استفاده از طیف سنج هوایی APEX^۲ صورت گرفت [۸]. در این پژوهش از داده‌های هواپرد شهر زوریخ در

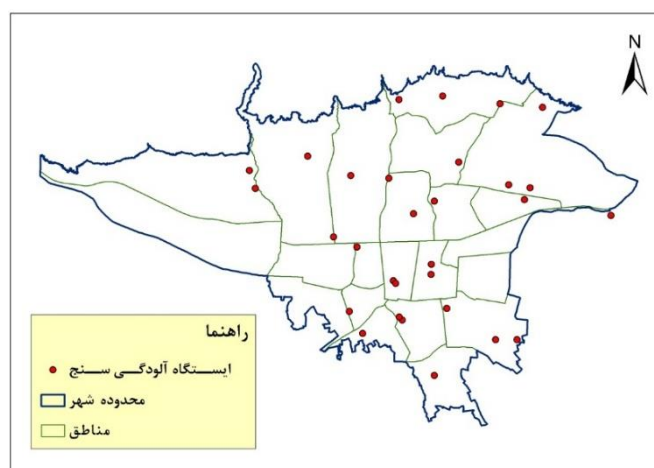
^۱ Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS)

^۲ Airborne Prism Experiment (APEX)

^۳ Digital Elevation Model (DEM)



شکل ۱: موقعیت محدوده مطالعاتی (کلان شهر تهران)



شکل ۲: موقعیت ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا در سطح شهر تهران

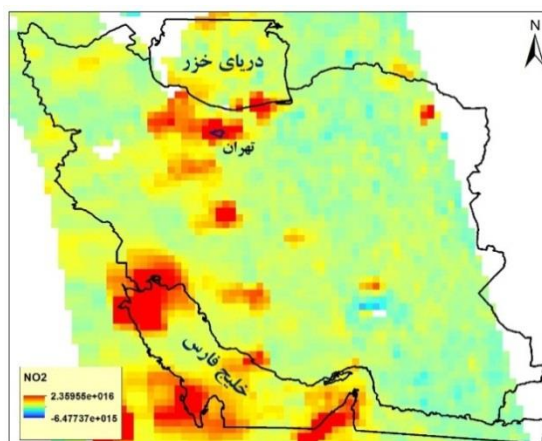
مهم موجود در جو از جمله NO_2 ، ازن، فرمالدئید، دی اکسید کربن و مونوکسید برم استفاده می‌شوند (شکل (۲)) [۱۰]. همچنین این تصاویر برای تعیین میزان و ارتفاع ابرها استفاده می‌گردد [۱۱]. تصاویر MODIS نیز به صورت روزانه در ۳۶ باند و با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر اخذ می‌شوند، در این پژوهش از تصاویر ۵۰۰ متری آن که در ۷ باند می‌باشد استفاده می‌شود. در این پژوهش از تصاویر ۲۳ روز مختلف که در سال ۲۰۱۰ اخذ شده‌اند، استفاده شده است.

داده‌های ماهواره‌ای نیز شامل تصاویر OMI (برای NO_2) و MODIS می‌باشد. سنجنده OMI بر روی ماهواره Aura قرار دارد که به منظور مطالعه جو طراحی شده است [۴]. ماهواره در یک مدار خورشید آهنگ قرار دارد و لحظه گذر آن ساعت ۱۳:۴۵ به وقت محلی می‌باشد. OMI یک سیستم تصویربرداری طیفی است که پراکنش نور اتمسفر و سطح زمین را در دو محدوده طیفی شامل ۳۶۵-۲۷۰ نانومتر و ۵۰۰-۳۵۰ نانومتر اندازه‌گیری می‌کند. تصاویر OMI بصورت روزانه و با قدرت تفکیک مکانی ۲۴*۱۳ تا ۲۴*۴۸ کیلومتر مربع در نادر اخذ می‌شوند. این تصاویر برای پایش چندین گاز

پیکسل‌های MODIS ابتدا کلاسه‌بندی صورت گرفته و سپس با استفاده از رابطه پهنه هر کلاس میزان آلودگی در آن پیکسل محاسبه می‌گردد. در انتها نیز به‌منظور ارزیابی نتایج به‌دست آمده میزان آلودگی به‌دست آمده با مقادیر ثبت شده در ایستگاه‌های زمینی سنجش آلودگی مورد مقایسه قرار خواهند گرفت.

۴-۱- کلاسه بندی تصویر OMI

با توجه به هدف این پژوهش که تعیین آلودگی در سطح شهر می‌باشد در اولین مرحله اقدام به تعیین پیکسل‌هایی در تصویر OMI گردید که در مناطق صنعتی و یا شهرهای بزرگ قرار گرفته‌اند (شکل (۵)). از این پیکسل‌ها به‌منظور ساخت مدل ارتباط بین آلودگی و بازتابندگی استفاده خواهد شد. پس از انتخاب پیکسل‌ها به منظور تعیین بازتابندگی در هر کدام از پیکسل‌ها، همپوشانی تصاویر OMI و MODIS در روزهای مختلف صورت گرفت. از آنجائیکه ابعاد هر پیکسل OMI چندین برابر پیکسل‌های MODIS می‌باشد میانگین بازتابندگی پیکسل‌هایی که در یک پیکسل OMI قرار گرفته‌اند، به‌عنوان بازتابندگی آن پیکسل در باندهای مختلف در نظر گرفته شد (شکل (۶)). حال با استفاده از بازتابندگی به‌دست آمده برای هر پیکسل اقدام به محاسبه شاخص NDVI شد و برای کلاسه‌بندی پیکسل‌ها از این شاخص استفاده گردید. با توجه به اینکه پیکسل‌های ۵۰۰ متری در سطوح شهری عمدتاً دارای مقادیر مثبت برای شاخص NDVI هستند، بنابراین کلاسه بندی برای مقادیر مثبت این شاخص انجام گرفت. در این پژوهش شاخص NDVI به ۵ قسمت (بصورت ۰/۰۵-، ۰/۰۵-، ۰/۱-، ۰/۱-، ۰/۱۵- و بیش‌تر از ۰/۲) تقسیم‌بندی شد که بر اساس آن پیکسل‌ها در ۵ کلاس مختلف قرار گرفتند.

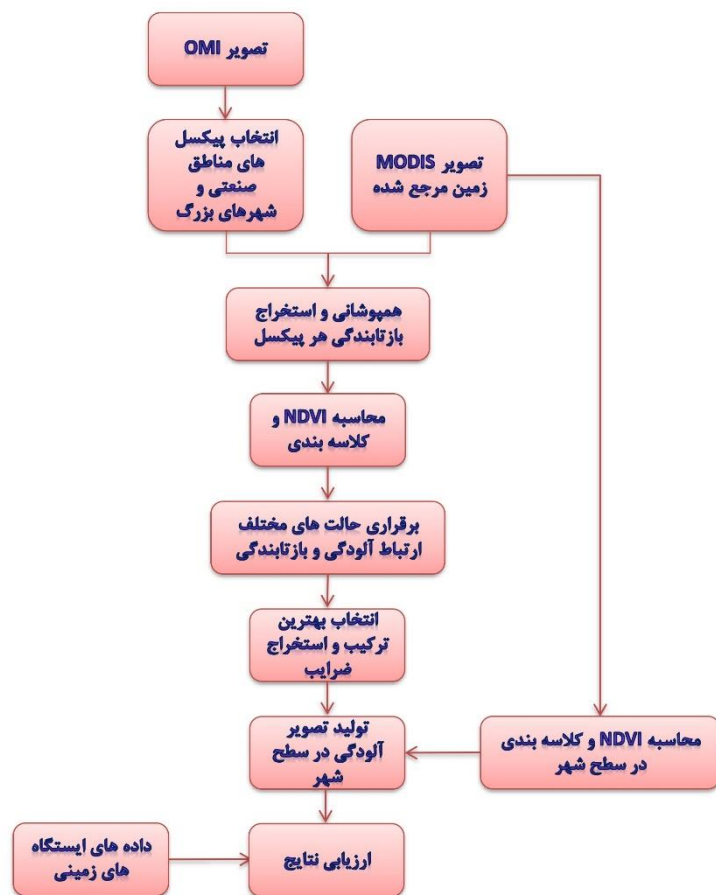


شکل ۳: نمونه‌ای از تصویر NO₂ سنجنده OMI

۴-۲ روش انجام پژوهش

همانگونه که در بخش‌های قبل توضیح داده شد هدف از انجام این پژوهش تعیین میزان آلودگی NO₂ در سطح شهر می‌باشد. برای این منظور ابتدا سعی در برقراری ارتباط بین تصاویر OMI و MODIS خواهد شد و سپس از طریق تصاویر MODIS آلودگی در سطح شهر به‌دست خواهد آمد. فرض اساسی در انجام این پژوهش این است که آلودگی هوا اثر متفاوتی بر روی بازتابندگی سطوح مختلف دارد. برای این منظور همانگونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود ابتدا تعدادی از پیکسل‌های OMI که مربوط به مناطق صنعتی و بعضی از شهرهای بزرگ (که دارای آلودگی هوا) هستند، انتخاب می‌شوند. با همپوشانی این پیکسل‌ها و تصاویر MODIS، بازتابندگی هر پیکسل در باندهای مختلف به‌دست خواهد آمد. در مرحله بعد با استفاده از شاخص گیاهی تفاضلی بهنجار^۱ کلاسه‌بندی پیکسل‌ها انجام خواهد شد و سپس با استفاده از ترکیب‌های مختلف معادله-باند ارتباط مورد بررسی قرار می‌گیرد. حال بهترین ترکیب برای هر کلاس به‌دست آمده و ضرایب مربوطه استخراج می‌گردد. در مرحله بعد کار به سطح شهر تعمیم داده می‌شود و با استفاده از بازتابندگی

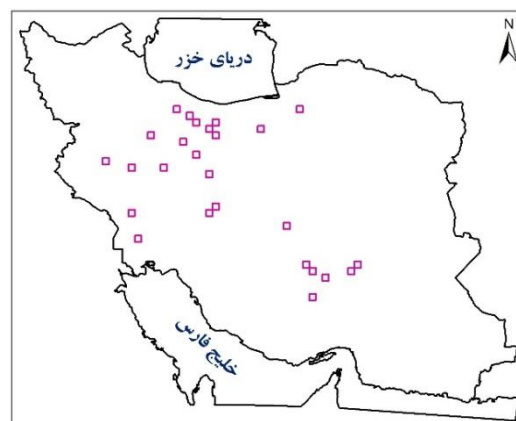
¹ Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)



شکل ۴: روندنمای انجام پژوهش



شکل ۶: همپوشانی یک پیکسل OMI و تصویر MODIS
۵۰۰ متری



شکل ۵: پیکسل های انتخابی OMI (مناطق صنعتی و شهرهای بزرگ)

برای این منظور از بخشی از داده‌ها که در مدلسازی استفاده نشده است به منظور تست مدل استفاده خواهد شد.

با توجه به کلاسه بندی پیکسل‌ها در مرحله قبل حل معادله برای هر کلاس به صورت مجزا صورت خواهد گرفت و در نهایت برای هر کلاس بهترین ضرایب تعیین خواهد شد. در این خصوص لازم به ذکر است به منظور انتخاب بخشی از داده‌ها برای مدلسازی در هر کلاس، ابتدا داده‌ها بر اساس میزان آلودگی به صورت نزولی مرتب شد و سپس نسبت به انتخاب داده‌های مدل و تست اقدام گردید. دلیل این امر استفاده از تمام محدوده آلودگی برای مدلسازی و تست مدل می‌باشد.

پس از حل معادله در حالت‌های مختلف با استفاده از برنامه نویسی در محیط متلب، به منظور تعیین بهترین حالت از داده‌های تست استفاده گردید. بدین صورت که در هر پیکسل مقادیر تصویر OMI بعنوان میزان واقعی آلودگی، با مقادیر به دست آمده از مدل مورد مقایسه قرار گرفت (شکل (۷)). در این حالت پارامترهایی از قبیل خطای میانگین جذر مربعات^۱، ضریب تشخیص^۲، خطای نسبی و شیب خط برازش داده شده محاسبه و با در نظر گرفتن همزمان این پارامترها بهترین حالت (ترکیب معادله-باند) انتخاب گردید. با توجه به اینکه مدلسازی برای کلاس‌های مختلف به صورت مجزا انجام شده است لذا برای هر کلاس یک ترکیب باند-معادله به دست آمد (جدول (۱)). در جدول (۲) مقادیر به دست آمده برای بهترین ترکیب‌های معادله-باند در کلاس‌های مختلف نشان داده شده است. مقادیر به دست آمده برای ضرایب، مقادیر ثابت بوده و با استفاده از بازتابندگی و ترکیب معادله-باند معادله مربوطه مقدار آلودگی در پیکسل‌های دیگر قابل محاسبه می‌باشد.

۴-۲- برقراری ارتباط بین آلودگی OMI و بازتابندگی

برای برقراری ارتباط بین بازتابندگی در پیکسل‌های OMI و مقدار آلودگی در آنها از بازتابندگی میانگین به دست آمده برای پیکسل‌ها در مرحله قبل استفاده شد. در این پژوهش سعی در استفاده همزمان از ۲ باند برای برقراری ارتباط بازتابندگی و آلودگی شده است. بنابراین از رابطه (۱) برای این منظور استفاده شده است.

$$W_{OMI} = A * \alpha + B * \beta + \gamma \quad \text{رابطه (۱)}$$

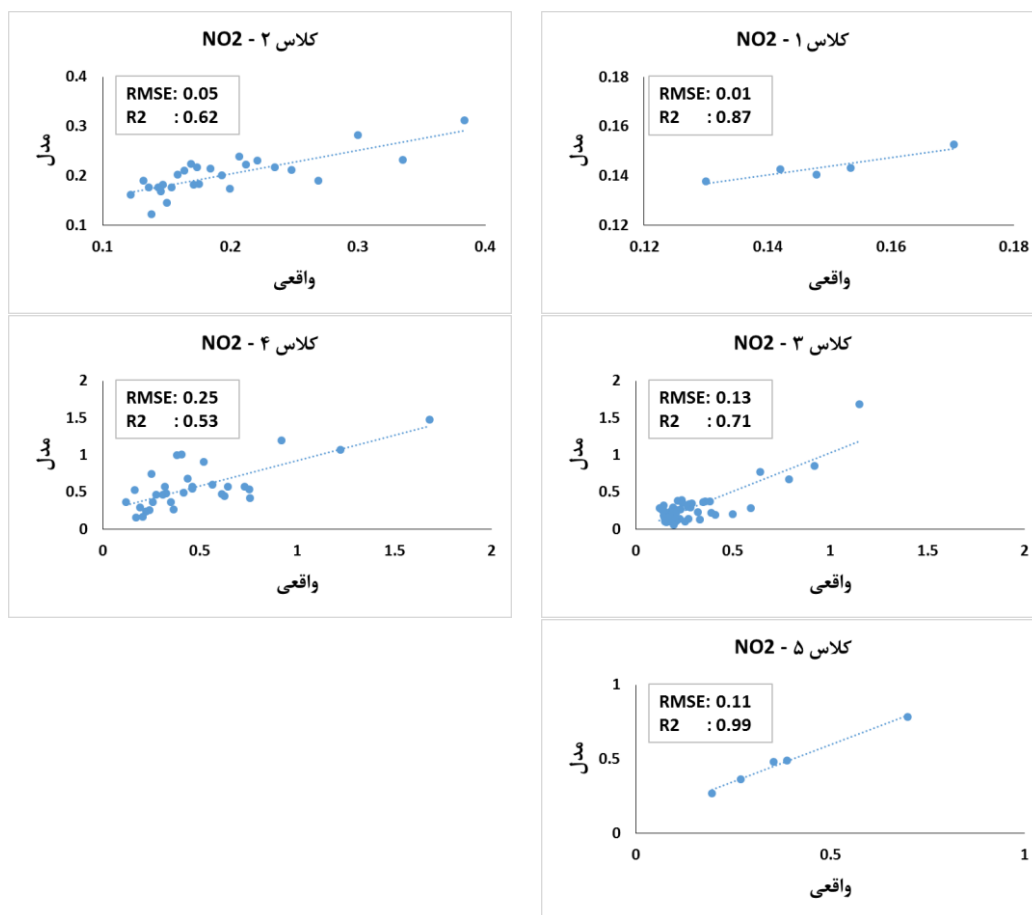
در این رابطه W میزان آلودگی و A و B مقادیری به دست آمده از بازتابندگی پیکسل می‌باشد. در واقع مقادیر A و B ترکیبی از معادله-باندهای مختلف می‌باشند که به صورت معادلات مختلف در ۷ باند MODIS در نظر گرفته خواهند شد که برای به دست آوردن آنها از روابط گوناگون بین ۲ باند مختلف استفاده خواهد شد. برخی از روابط استفاده شده در این حالت به شرح زیر می‌باشد (رابطه (۲)):

$$b_i + b_j, b_i - b_j, b_i * b_j, \frac{b_i}{b_j}, \frac{b_i - b_j}{b_i + b_j}, \dots \quad \text{رابطه (۲)}$$

که b_i و b_j در معادلات فوق بازتابندگی در ۲ باند مختلف از ۷ باند MODIS می‌باشد. حل معادلات بالا بدین صورت است که ابتدا برای مقادیر A و B ترکیب‌های مختلف معادله-باند در نظر گرفته می‌شود و سپس در معادله اصلی جایگزاری می‌گردند. برای مثال برای هر کدام از روابط فوق با در نظر گرفتن ۷ باند، ۲۱ حالت مختلف به دست خواهد آمد. همچنین مقادیر به دست آمده از تصاویر OMI به عنوان آلودگی پیکسل در نظر گرفته می‌شوند. حال با حل معادلات مقادیر α, β, γ به دست می‌آیند. از آنجایی که به تعداد ترکیب‌های مختلف معادله-باند که در نظر گرفته می‌شود، مقادیر متفاوت برای ضرایب به دست می‌آید که در مرحله بعد سعی در به دست آوردن بهترین حالت برای آنها می‌گردد.

¹ Root Mean Square Error (RMSE)

² Coefficient of Determination (R²)



شکل ۷: مقایسه نتایج برای ترکیب‌های معادله-باند در کلاس‌های مختلف

جدول ۱: بهترین ترکیب معادله-باند به‌دست آمده برای کلاس‌های مختلف

کلاس NDVI	معادله A	معادله B	R ²	RMSE
۱	$\ln(b2+b7)/\ln(b2-b7)$	$\exp(b3/b6)$	۰٫۸۷	۰٫۰۱
۲	$(b5-b7)/(b5+b7)$	$\ln(b6+b7)/\ln(b6-b7)$	۰٫۶۲	۰٫۰۵
۳	$(b1-b4)/(b1+b4)$	$\ln(b1-b4)/\ln(b1+b4)$	۰٫۷۱	۰٫۱۳
۴	$\ln(b1+b4)/\ln(b1-b4)$	$\ln(b2+b3)$	۰٫۵۳	۰٫۲۷
۵	$b2+b7$	$\ln(b2+b7)/\ln(b2-b7)$	۰٫۹۹	۰٫۱۰

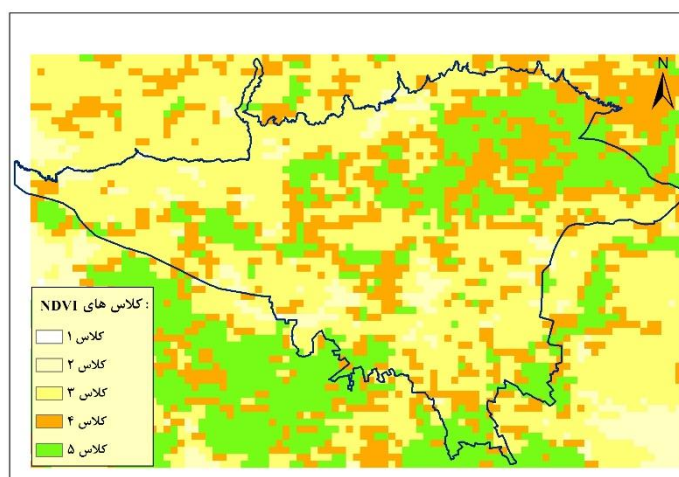
ترکیب معادله-باند مربوطه می‌توان مقدار آلودگی را در پیکسل‌های دیگر محاسبه کرد. بنابراین برای تولید تصویر آلودگی در سطح شهر (در ابعاد ۵۰۰ متر) ابتدا لازم است کلاسه بندی پیکسل‌ها با استفاده از شاخص NDVI انجام گیرد (شکل (۸)). سپس برای محاسبه آلودگی در هر پیکسل بسته به اینکه پیکسل در کدام کلاس قرار دارد از ترکیب باند-معادله و ضرایب به‌دست آمده برای آن استفاده شده و مقادیر آلودگی در پیکسل محاسبه می‌گردد. بنابراین تصویر آلودگی در روزهای مختلف در سطح شهر با استفاده از این مدل به‌دست می‌آید.

جدول ۲: ضرایب به‌دست آمده برای بهترین ترکیب در هر کلاس

کلاس NDVI	α	β	γ
۱	۰/۳۰	۰/۰۶	-۰/۴۴
۲	-۱/۰۹	-۰/۳۳	۰/۷۸
۳	۸/۴۲	-۱۴/۳۳	۹/۸۴
۴	۳/۹۳	-۰/۹۶	۲/۸۰
۵	-۰/۰۲	۰/۶۳	۰/۶۶

۳-۴- تولید تصویر آلودگی در سطح شهر

ضرایب به‌دست آمده در مرحله قبل مقادیر ثابت می‌باشند که با استفاده از آنها و



شکل ۸: کلاسه‌بندی پیکسل‌ها در سطح شهر تهران با استفاده از NDVI

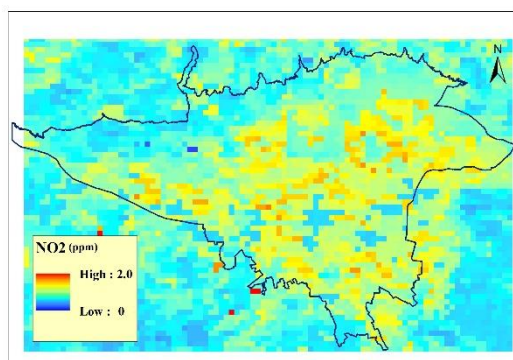
مناطق قرمز رنگ دارای مقادیر بیشتر NO₂ و مقادیر آبی رنگ دارای مقادیر کمتر می‌باشند. همانگونه که مشاهده می‌شود آلودگی NO₂ در دو تصویر اول مقدار کمتر و در دو تصویر بعدی دارای مقدار بیشتری می‌باشد. برای بررسی دقت تصاویر به‌دست آمده از داده‌های ایستگاه‌های زمینی استفاده گردید. برای این منظور موقعیت ایستگاه‌های زمینی و میزان آلودگی آنها در روی تصویر مشخص گردید (شکل (۱۰)). همانگونه که مشاهده می‌شود در ایستگاه‌های زمینی نیز برای روزهایی که تصاویر مقدار آلودگی کم را

۵- تجزیه و تحلیل نتایج

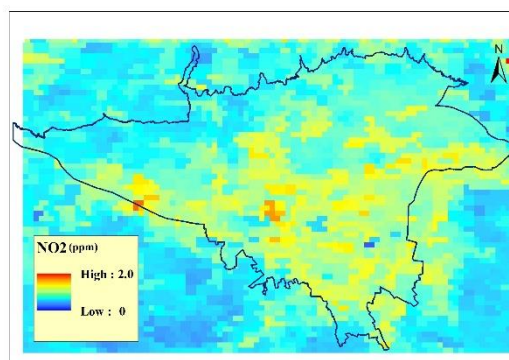
پس از تعیین بهترین ترکیب معادله-باند برای هر کلاس (مطابق جدول (۱)) و به‌دست آمدن ضرایب مربوطه (جدول (۲)) توانایی این معادلات مورد آزمون قرار گرفت. در این رابطه تصاویر چگونگی توزیع گاز NO₂ در روزهای مختلف تولید گردید که در شکل (۹) تصاویر مربوط به چند روز مختلف در سال ۲۰۱۰ نشان داده شده است.

همچنین در بررسی تصاویر مشخص شد در بعضی از ایستگاه‌ها میزان آلودگی ثبت شده زمینی و به‌دست آمده از تصویر بصورت نقطه‌ای با هم مطابقت ندارند. یکی از دلایل این عدم انطباق این است که اندازه‌گیری آلودگی در ایستگاه‌ها به‌صورت نقطه‌ای صورت می‌گیرد در حالیکه ماهواره یکباره ستون مربوط به یک پیکسل را مشاهده کرده و آلودگی را در حجم پیکسل ارائه می‌دهد. برای مثال ممکن است مشاهدات ثبت شده در یک ایستگاه حاکی از عدم وجود آلودگی باشد در حالیکه در لایه‌های بالایی آلودگی وجود داشته و توسط تصاویر ماهواره‌ای ثبت شود.

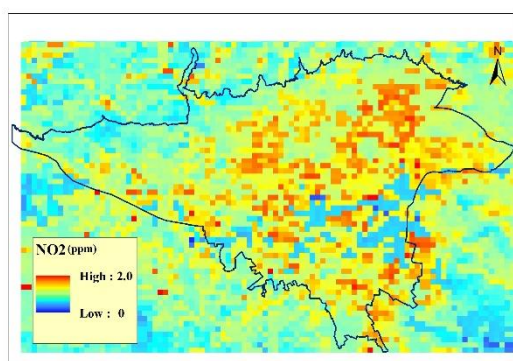
نشان می‌دهند مقادیر کمتر و برای روزهایی که تصاویر مقدار آلودگی بیشتری را نشان می‌دهند مقادیر بیشتر ثبت شده است. برای بررسی دقیق‌تر مقادیر ثبت شده در ایستگاه‌ها و نتایج به‌دست آمده از تصاویر آلودگی به‌دست آمده به‌صورت عددی مورد مقایسه قرار گرفت (شکل ۱۱)). مقدار RMSE به‌دست آمده برابر ۰/۲۹ و RMSE نسبی برابر ۴۴/۳ درصد می‌باشد. مدل برای مقادیر زیاد آلودگی دارای خطای کم (۱۵ درصد) و برای مقادیر کم آلودگی دارای خطای زیاد (۱۰۰ درصد) می‌باشد که با توجه به هدف این پژوهش که تعیین مناطق دارای آلودگی زیاد است مناسب می‌باشد.



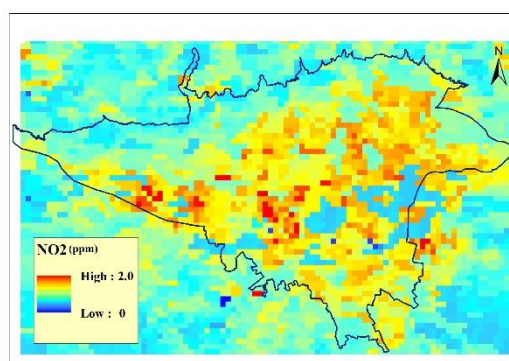
۲۰۱۰/۱۰/۲۹



۲۰۱۰/۱۰/۱۵

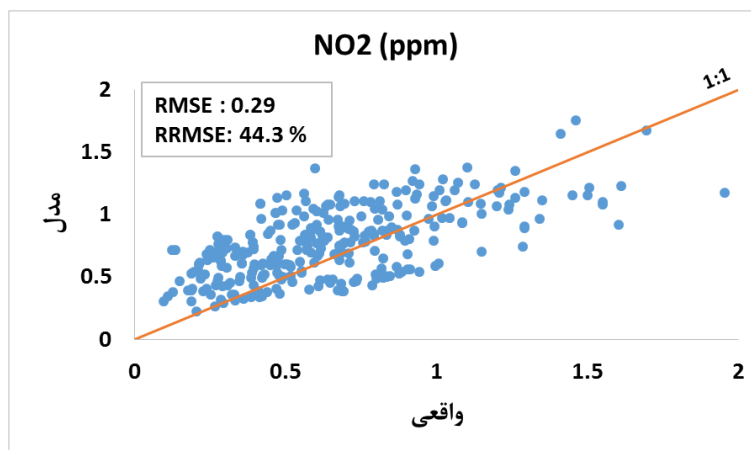
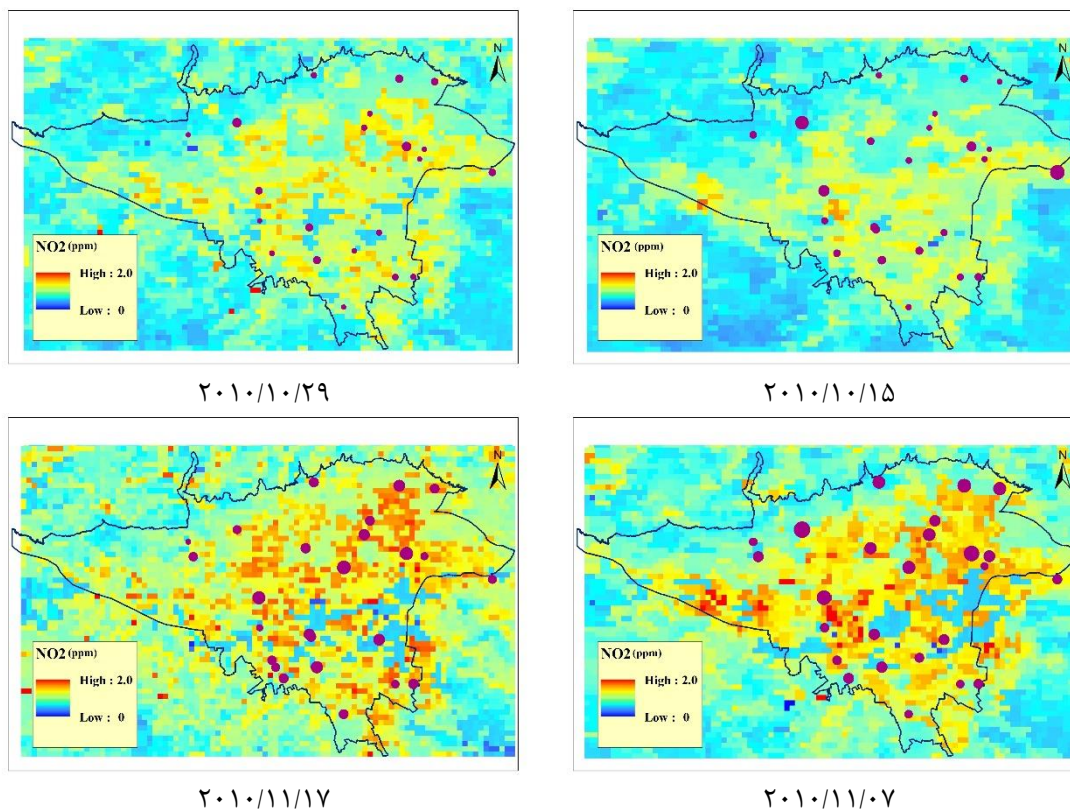


۲۰۱۰/۱۱/۱۷



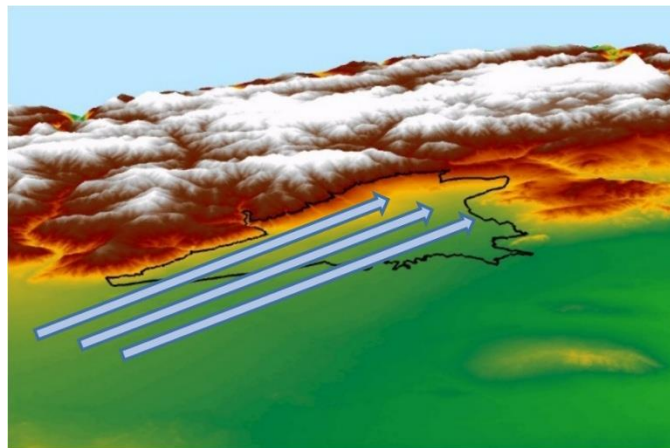
۲۰۱۰/۱۱/۰۷

شکل ۹: تصویر آلودگی هوای NO₂ در سطح شهر تهران در روزهای مختلف



به شرق می‌باشد مطابقت دارد (شکل (۱۲)). بنابراین انتظار می‌رود وزش باد باعث انتقال آلودگی در سطوح بالاتر جو به سمت شرق باشد، که در نتیجه در تصویر برای پیکسل ایستگاه آلودگی کمتر ثبت خواهد شد و برای پیکسل‌های کناری (شرقی) آلودگی بیشتری به‌دست خواهد آمد.

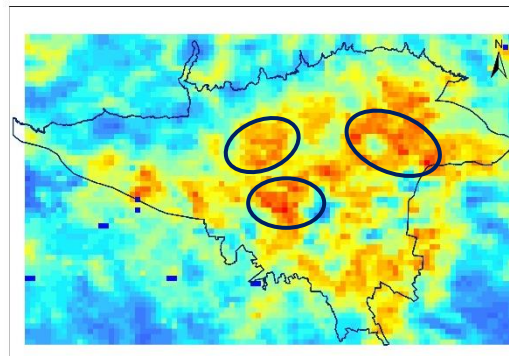
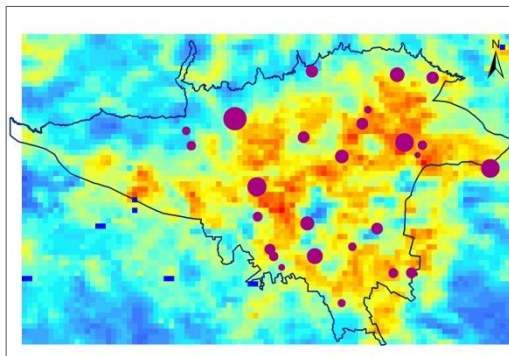
همچنین بررسی تصاویر و داده‌های زمینی نشان داد که عمدتاً برای ایستگاه‌هایی که دارای آلودگی زیاد می‌باشند، در روی تصویر آلودگی با چند پیکسل فاصله در سمت شرق پیکسل ایستگاه مزبور نشان داده شده است. به نظر می‌رسد که این موضوع با جهت باد غالب در شهر تهران که معمولاً به‌صورت غرب



شکل ۱۲: جهت باد غالب در تهران

ایستگاه‌های زمینی نیز این مناطق را به‌عنوان مناطق آلوده نشان می‌دهند. با توجه به اینکه در این مناطق عمدتاً میزان آلودگی هوا زیاد است، تعیین محل آنها در سطح شهر می‌تواند مفید باشد. برای مثال برای این مناطق آلوده می‌توان هشدارهایی زیست‌محیطی، بهداشتی و یا وقوع باران‌های اسیدی داد.

همچنین به‌منظور تعیین مناطق آلوده از تجمیع تصاویر به‌دست آمده در روزهای مختلف استفاده شد و برای بررسی این مناطق همزمان از تجمیع مقادیر ثبت شده در ایستگاه‌های زمینی در روزهای معادل تصاویر استفاده گردیده است (شکل ۱۳). همانگونه که در شکل نیز مشخص است چندین منطقه به‌عنوان مناطق آلوده در سطح شهر مشخص گردیده است که



شکل ۱۳: مناطق با آلودگی زیاد NO₂ در سطح شهر تهران (سمت راست) - مقایسه داده‌های ایستگاه‌های زمینی و مناطق آلوده (سمت چپ)

شهر در یک پیکسل قرار گرفته و امکان تعیین آلودگی در ابعاد کوچک وجود ندارد. تصاویر سنجنده OMI میزان آلودگی NO₂ را در مناطق مختلف و در ابعاد پیکسل بزرگ (۰/۲۵ درجه) اندازه‌گیری می‌کنند. بنابراین در مناطق شهری که عمدتاً ابعادی کوچکتر از یک پیکسل دارند استفاده از این تصاویر مناسب نمی‌باشد. در این پژوهش با برقراری

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

تعیین آلودگی هوا در سطح شهر با توجه به اهمیت آن بر سلامتی انسان از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. یکی از روش‌های تعیین آلودگی استفاده از سنجش از دور می‌باشد. از آنجاییکه تصاویر سنجش از دوری که میزان آلودگی هوا را نشان می‌دهند دارای قدرت تفکیک مکانی پایین هستند، مناطق وسیعی از

زیاد می‌باشد، استفاده از مدل در این مناطق قابل قبول می‌باشد. همچنین بررسی تصاویر و داده‌های زمینی نشان داد که عمدتاً برای ایستگاه‌هایی که دارای آلودگی زیاد می‌باشند، در روی تصویر آلودگی با چند پیکسل فاصله در سمت شرق پیکسل ایستگاه مزبور نشان داده شده است. این موضوع با جهت باد غالب در شهر تهران که معمولاً به صورت غرب به شرق می‌باشد مطابقت دارد.

همچنین برای تعیین مناطقی از شهر که اکثراً دارای آلودگی هستند از تجمیع تصاویر در روزهای مختلف استفاده شد و مناطق بحرانی دارای آلودگی هوا در سطح شهر مشخص گردید.

در روش ارائه شده در این پژوهش تصویر آلودگی NO₂ در سطح شهر بصورت روزانه و با قدرت تفکیک مکانی بالا به دست آمد. تصاویر به دست آمده از لحاظ کیفی با ایستگاه‌های سنجش آلودگی در سطح شهر دارای ارتباط می‌باشند. بنابراین پیشنهاد می‌شود به منظور افزایش دقت مدل از داده‌های بیشتری برای مدلسازی استفاده شود و به روز رسانی مدل مرتباً صورت گیرد. برای بررسی دقیق اثر باد بر روی آلودگی در سطح شهر نیز پیشنهاد می‌شود در خصوص ارائه مدل حرکت باد (شامل جهت و سرعت) در سطح شهر تحقیق شود. همچنین در پژوهش دیگری که توسط نویسندگان این مقاله در دست انجام می‌باشد، ارائه روشی جهت بررسی اثر سایر آلودگی‌ها در نظر گرفته شده است.

ارتباط بین میزان آلودگی و بازتابندگی، تصویر آلودگی در سطح شهر در ابعاد پیکسل ۵۰۰ متری به دست آمد. برای این منظور ابتدا چندین منطقه صنعتی و شهر بزرگ انتخاب شد و سپس ارتباط مقادیر آلودگی در هر پیکسل با بازتابندگی به دست آمده از تصاویر MODIS مورد بررسی قرار گرفت. روابط مختلف در هر کلاس NDVI در نظر گرفته شد و برای حالت‌های مختلف معادله-باند بررسی گردید و در نهایت بهترین ترکیب برای هر کلاس مشخص شد. در مرحله بعد ابتدا کلاسه‌بندی سطح شهر تهران در ابعاد پیکسل MODIS انجام شد و سپس با استفاده از بهترین ترکیب‌های معادله-باند و ضرایب مربوطه به دست آمده میزان آلودگی در هر پیکسل محاسبه و تصویر توزیع آلودگی در سطح شهر به دست آمد. در انتها نیز به منظور ارزیابی میزان آلودگی به دست آمده از تصاویر با نتایج ثبت شده در ایستگاه‌های زمینی سنجش آلودگی مورد مقایسه قرار گرفت.

در روش ارائه شده با توجه به اینکه تصاویر MODIS به صورت روزانه اخذ می‌شوند تولید تصویر آلودگی در هر روز امکان پذیر می‌باشد. تصاویر به دست آمده از لحاظ کیفی با داده‌های ایستگاه‌های سنجش آلودگی در سطح شهر دارای ارتباط می‌باشند. مقدار RMSE به دست آمده برابر ۰/۲۹ و RMSE نسبی برابر ۴۴/۳ درصد بوده و مدل برای مقادیر زیاد آلودگی دارای خطای نسبی کم (۱۵ درصد) و برای مقادیر کم آلودگی دارای خطای زیاد (۱۰۰ درصد) می‌باشد. بنابراین با توجه به اینکه هدف پژوهش تعیین مناطق با آلودگی

مراجع

- [1] A. Hejazi, "Investigating and Assessing the Relationship Between Air Pollution of Industrial Cities and Respiratory Disease Casualties by Relative Determination of Polluted Areas via MODIS Imagery (Case Study: Tehran)" MSc thesis, K. N. Toosi University of Technology, 2012.
- [2] B. Brunekreef, and S. T. Holgate, "Air pollution and health", Lancet, Vol. 360, 1233-1242, 2002.
- [3] J. N. B. Bell, and M. Treshow, Air Pollution and Plant Life, Chi Chester, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [4] L. N. Lamsal, N. A. Krotkov, E. A. Celarier, W. H. Swartz, K. E. Pickering, E. J. Bucsela, J. F. Gleason, R. V. Martin, S. Philip, H. Irie, A. Cede, J. Herman, A. Weinheimer, J. J. Szykman, and T. N. Knepp, "Evaluation

- of OMI operational standard NO₂ column retrievals using in situ and surface-based NO₂ observations", *Atmos. Chem. Phys.*, Vol. 14, 11587–11609, 2014.
- [5] E. J. Bucsela, E. A. Celarier, M. O. Wenig, J. F. Gleason, J. P. Veefkind, K. F. Boersma, and E. J. Brinksma, "Algorithm for NO₂ Vertical Column Retrieval From the Ozone Monitoring Instrument", *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, VOL. 44, NO. 5, 1245-1258, 2006.
- [6] J. P. Burrows, M. Weber, M. Buchwitz, V. V. Rozanov, A. Ladstätter-Weissenmayer, A. Richter, R. DeBeek, R. Hoogen, K. Bramstedt, and K. U. Eichmann, "The Global Ozone Monitoring Experiment (GOME): Mission concept and first scientific results", *J. Atmos. Sci.*, vol. 56, 151–175, 1999.
- [7] M. J. Bechle, D. B. Millet, J. D. Marshall, "Remote sensing of exposure to NO₂: Satellite versus ground-based measurement in a large urban area", *Atmospheric Environment*, Vol. 69, 345-353, 2013.
- [8] C. Popp, D. Brunner, A. Damm, M. V. Roozendael, C. Fayt, and B. Buchmann, "High-resolution NO₂ remote sensing from the Airborne Prism EXperiment (APEX) imaging spectrometer", *Atmos. Meas. Tech.*, Vol. 5, 2211–2225, 2012.
- [9] Y. Safavi, "Geographical factors in air pollution of Tehran", *Geographical Research*, Vol. 58, 99–112, 2004.
- [10] F. Boersma, E. Bucsela, E. Brinksma, and J. F. Gleason "NO₂", in *OMI Algorithm Theoretical Basis Document*, K. Chance, Ed., vol. 4, ch. 2, 2002.
- [11] J. R. Acarreta, J. F. deHaan, and P. Stammes, "Cloud pressure retrieval using the O₂-O₂ absorption band at 477 nm", *J. Geophys. Res.*, vol. 109, no. D05204, 2004



Distribution of atmospheric NO₂ in the industrial cities using OMI and MODIS images (Case study: Tehran metropolis)

Abolfazl Ahmadian^{*1}, Mohammad Reza Mobasheri², Ali Akbar Matkan³

1- PhD student of Remote Sensing in Department of Geomatics Eng., K. N. Toosi University of Technology

2- Professor in Department of Geomatics Eng., K. N. Toosi University of Technology

3- Professor in Department of RS and GIS, Shahid Beheshti University

Abstract

The atmosphere is a complicated and dynamic system containing natural gases as well as some extra gases produced through different sources. Concentration of suspended particles in the atmosphere is one of the most important indicators of air pollution. Tehran is among the most polluted cities in the world. Being able to determine the amount of pollution in the city's air, may lead to strategies being adopted for reduction of its negative effects. Commonly, measurement of the air pollution is carried out by gauges installed in stations all around the city. These limited number of gauges can precisely measure pollution within the station zone. However, the measured data is not valid for the regions far from stations. NO₂ is one of the most important factors in the air pollution; hence this study attempts to determine it in urban areas using remote sensing. OMI images are routinely providing air pollution data on a daily basis. These images give the amounts of pollution in large pixels which are not appropriate for urban areas. In this study, the concurrent images of MODIS and OMI were used in order to find a relation between pollution and reflectance in different bands. At first, the relationship between pollution and reflectance in industrial areas and large cities were determined. Then different combinations of equations were considered for MODIS bands and the best combination was chosen. At the end, distribution image of pollution was obtained in the city. Evaluation of this equation shows acceptable accuracy in prediction of NO₂ by MODIS images. In addition, critical and highly polluted areas were determined by accumulation of air pollution images on different days. At the end, data of ground stations were utilized in order to evaluate acquired results (RMSE=0.29 and RRMSE=44.3%). The model showed small relative errors (15%) for large amounts of NO₂ and huge errors (100%) for low amounts of pollution.

Key words: Remote Sensing, Air Pollution, Nitrogen dioxide, MODIS, OMI.

Correspondence Address. Address: Remote Sensing Department, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, P.O. Box: 15875-4416, Iran
Tel: +98-21-88770213

Email: ahmadian@dena.kntu.ac.ir