نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال ششم، شماره نخست، بهار ۱۳۹۷

Vol.6, No.1, Spring 2018

۱۷۱-۱۸۴

این مقاله در اولین کنفرانس ملی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی به‌عنوان 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 OMI و MODIS (مطالعه موردی: کلان شهر تهران)

ابوالفضل احمدیان[1*]، محمدرضا مباشری[2]، علی اکبر متکان[3]

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 برخودار 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 این‌منظور 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 ترکیب 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: ۸۸۷۷۰۲۱۳-۰۲۱

Email : ahmadian@dena.kntu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.171]

۱- مقدمه

آلودگی هوا تغییر در ویژگی‌های طبیعی جو براثر مواد شیمیایی، غباری یا عامل‌های زیست‌شناختی است. بر اساس تعریف بهداشت عمومی، آلودگی هوا جزء عوامل برهم زننده تعادل جامعه و در نتیجه مخل بهداشت عمومی می‌باشد. وسایل نقلیه موتوری از جمله منابع مصنوعی اساسی آلوده کننده هوا هستند که شامل آلاینده‌هایی همچون دی‌اکسیدنیتروژن[1] 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 پخشی 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 (بیماری های 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[2]، 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[3] 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

[1] Nitrogen Dioxide (NO2)

[2] Ozone Monitoring Instrument (OMI)

[3] Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.171]

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[1] 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 مَتیو و همکاران به مقایسه داده‌های ماهواره ای و زمینی به‌دست آمده برای NO2 پرداختند [۷]. برای این منظور از ۴۱۳۸ سری داده مربوط به ۲۵ ایستگاه در ایالت کالیرفنیا 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[2] صورت گرفت [۸]. در این پژوهش از داده‌های هوابرد شهر زوریخ در سوئیس در دو نوبت صبح و عصر و در یک روز تابستانی آفتابی و بدون ابر استفاده شد. استفاده از داده‌های این طیف سنج به‌منظور 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.

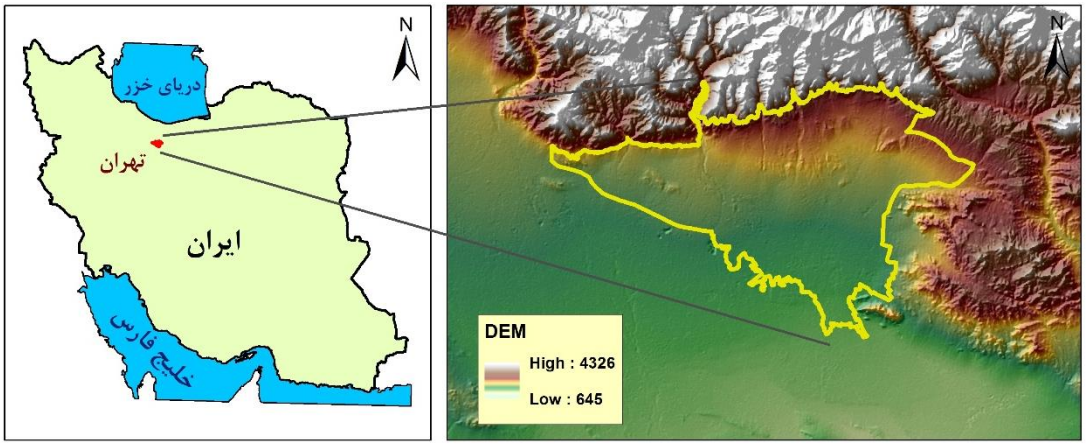
۳- منطقه مورد مطالعه و داده ها

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)).

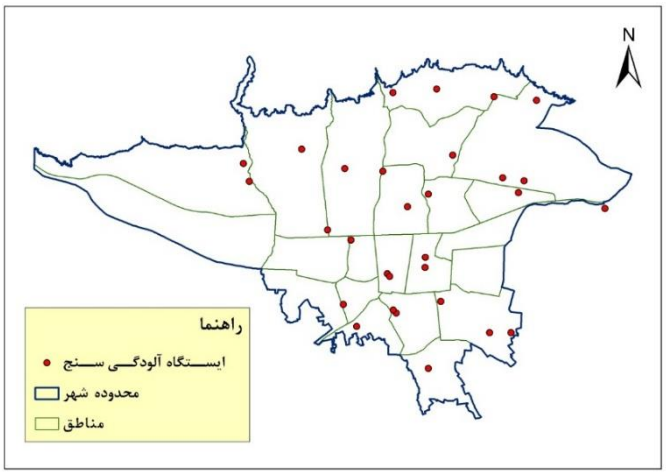
داده‌های مورد استفاده در این پژوهش به دو بخش داده‌های زمینی و داده‌های ماهواره‌ای تقسیم می‌شود. داده‌های زمینی شامل داده‌های آلودگی هوا اندازه‌گیری شده در ایستگاه های سنجش آلودگی در سطح شهر، مدل رقومی ارتفاعی[3]، داده‌های هواشناسی و همچنین نقشه‌های بزرگ مقیاس موجود از شهر می‌باشد (شکل (۲)).

[1] Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS)
[2] Airborne Prism EXperiment (APEX)
[3] Digital Elevation Model (DEM)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.171]



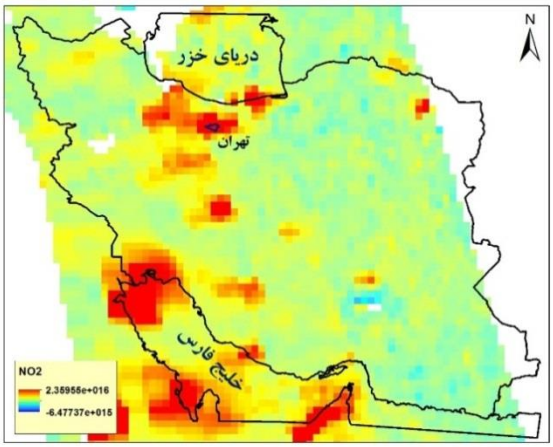
شکل ۱: موقعیت محدوده مطالعاتی (کلان‌شهر تهران)



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

داده‌های ماهواره‌ای نیز شامل تصاویر OMI (برای NO2) و MODIS می‌باشد. سنجنده OMI بر روی ماهواره Aura قرار دارد که به‌منظور 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 ۲۷۰-۳۶۵ نانومتر و ۳۵۰-۵۰۰ نانومتر اندازه‌گیری می‌کند. تصاویر OMI بصورت روزانه و با قدرت تفکیک مکانی ۲۴*۱۳ تا ۴۸*۲۴ کیلومتر مربع در نادیر اخذ می‌شوند. این تصاویر برای پایش چندین گاز مهم موجود در جو از جمله NO2، ازن، فرمالدئید، دی اکسید کلر و منوکسید برم استفاده می‌شوند (شکل (۲)) [۱۰]. همچنین این تصاویر برای تعیین میزان و ارتفاع ابرها استفاده می‌گردد [۱۱]. تصاویر MODIS نیز به‌صورت 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.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.171]



شکل ۳: نمونه‌ای از تصویر NO2 سنجنده OMI

۴- روش انجام پژوهش

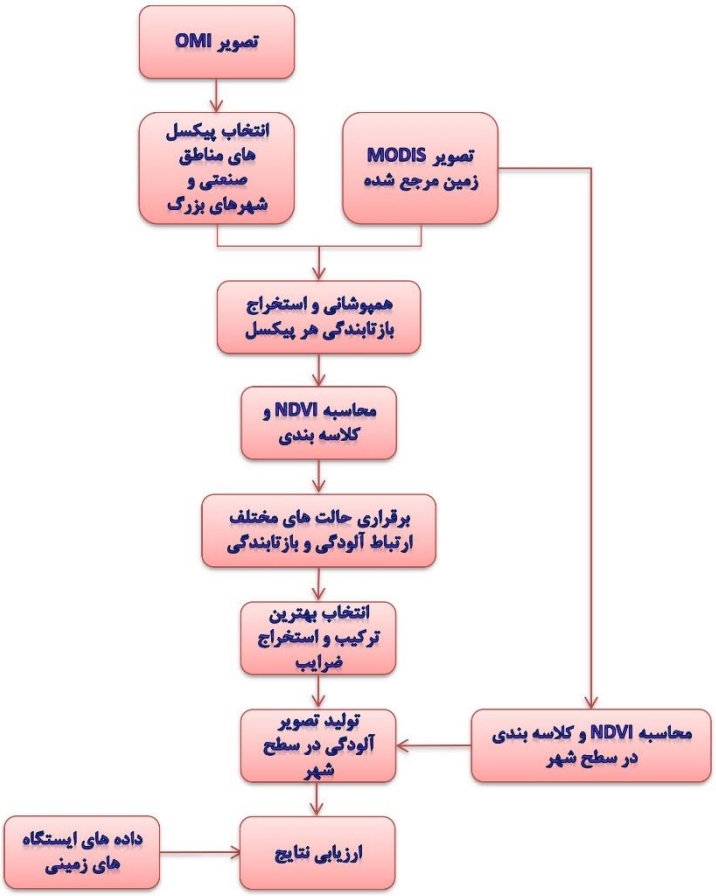
همانگونه که در بخش‌های قبل توضیح داده شد هدف از انجام این پژوهش تعیین میزان آلودگی NO2 در سطح شهر می‌باشد. برای این منظور ابتدا سعی در برقراری ارتباط بین تصاویر OMI و MODIS خواهد شد و سپس از طریق تصاویر MODIS آلودگی در سطح شهر به‌دست خواهد آمد. فرض اساسی در انجام این پژوهش این است که آلودگی هوا اثر متفاوتی 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[1] 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 پیکسل‌های MODIS ابتدا کلاسه‌بندی صورت گرفته و سپس با استفاده از رابطه بهینه 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

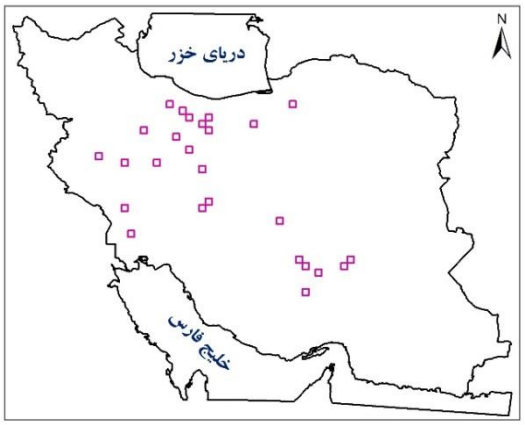
با توجه به هدف این پژوهش که تعیین آلودگی در سطح شهر می‌باشد در اولین مرحله اقدام به تعیین پیکسل‌هایی در تصویر OMI گردید که در مناطق صنعتی و یا شهرهای بزرگ قرار گرفته‌اند (شکل (۵)). از این پیکسل‌ها به‌منظور ساخت مدل ارتباط بین آلودگی و بازتابندگی استفاده خواهد شد. پس از انتخاب پیکسل‌ها به منظور تعیین 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، ۰٫۱-۰٫۰۵، ۰٫۱۵-۰٫۱، ۰٫۲-۰٫۱۵ و بیشتر از ۰٫۲) تقسیم‌بندی شد که بر اساس آن پیکسل‌ها در ۵ کلاس مختلف قرار گرفتند.

[1] Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.171]



شکل ۴: روندنمای انجام پژوهش



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



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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.171]

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 به‌دست 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.

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

در این رابطه W میزان آلودگی و A و B مقادیری به‌دست آمده از بازتابندگی پیکسل می‌باشد. در واقع مقادیر A و B ترکیبی از معادله-باندهای مختلف می‌باشند که به‌صورت معادلات مختلف در ۷ باند MODIS در نظر گرفته خواهند شد که برای به‌دست 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)):

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

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 به‌دست خواهد آمد. همچنین مقادیر به‌دست آمده از تصاویر OMI به‌عنوان آلودگی پیکسل در نظر گرفته می‌شوند. حال با حل معادلات مقادیر $\alpha\ , \beta\ , \gamma$ به‌دست می‌آیند. از آنجایی‌که به تعداد ترکیب‌های مختلف معادله-باند که در نظر گرفته می‌شود، مقادیر متفاوت برای ضرایب به‌دست می‌آید که در مرحله بعد سعی در به‌دست آوردن بهترین حالت برای آنها می‌گردد.

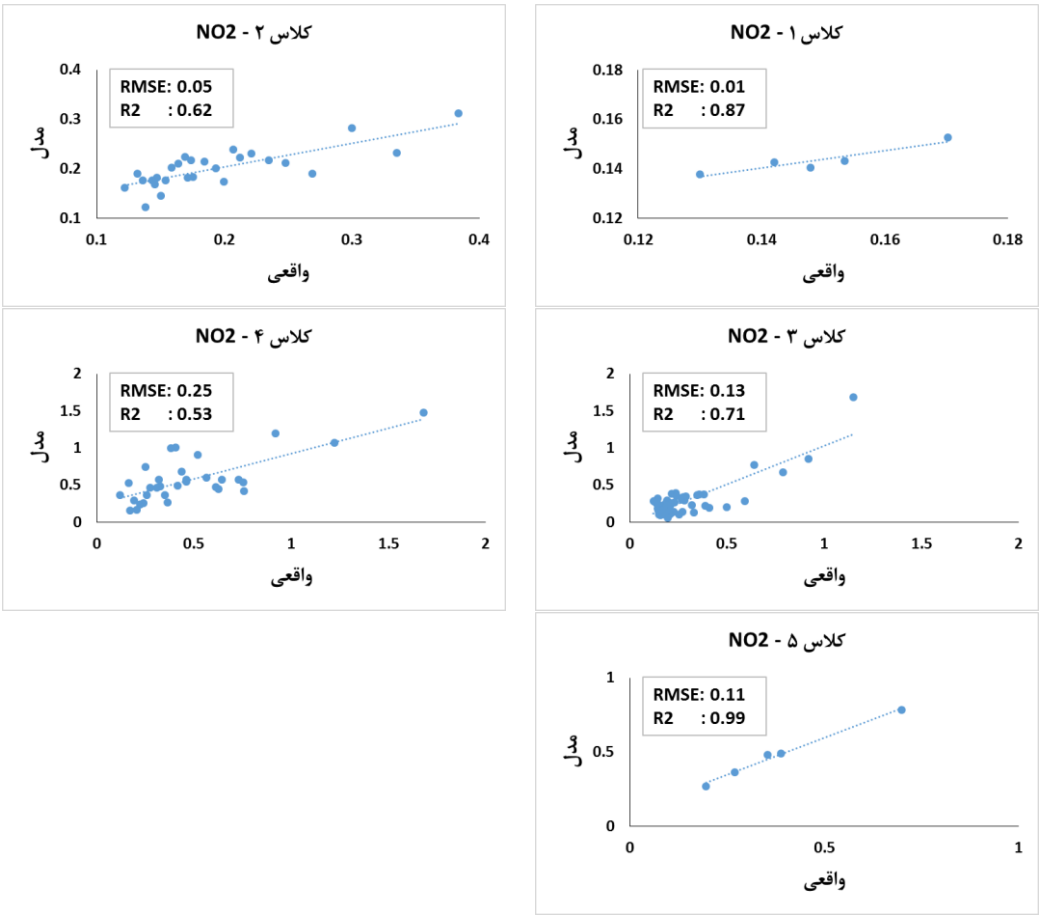
برای این منظور از بخشی از داده‌ها که در مدلسازی استفاده نشده است به‌منظور تست مدل استفاده خواهد شد.

با توجه به کلاسه بندی پیکسل‌ها در مرحله قبل حل معادله برای هر کلاس به‌صورت 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 به‌صورت 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 به‌دست آمده از مدل مورد مقایسه قرار گرفت (شکل (۷)). در این حالت پارامترهایی از قبیل خطای میانگین جذر مربعات[1] ، ضریب تشخیص[2] ، 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 به‌صورت مجزا انجام شده است لذا برای هر کلاس یک ترکیب باند-معادله به‌دست آمد (جدول (۱)). در جدول (۲) مقادیر به‌دست آمده برای بهترین ترکیب‌های معادله-باند در کلاس‌های مختلف نشان داده شده است. مقادیر به‌دست 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.

[1] Root Mean Square Error (RMSE)
[2] Coefficient of Determination (R2)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.171]



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	R2	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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

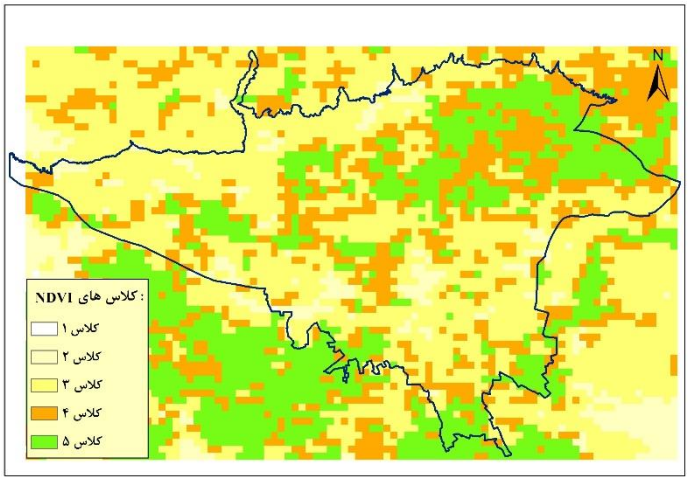
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.171]

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 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.



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

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.

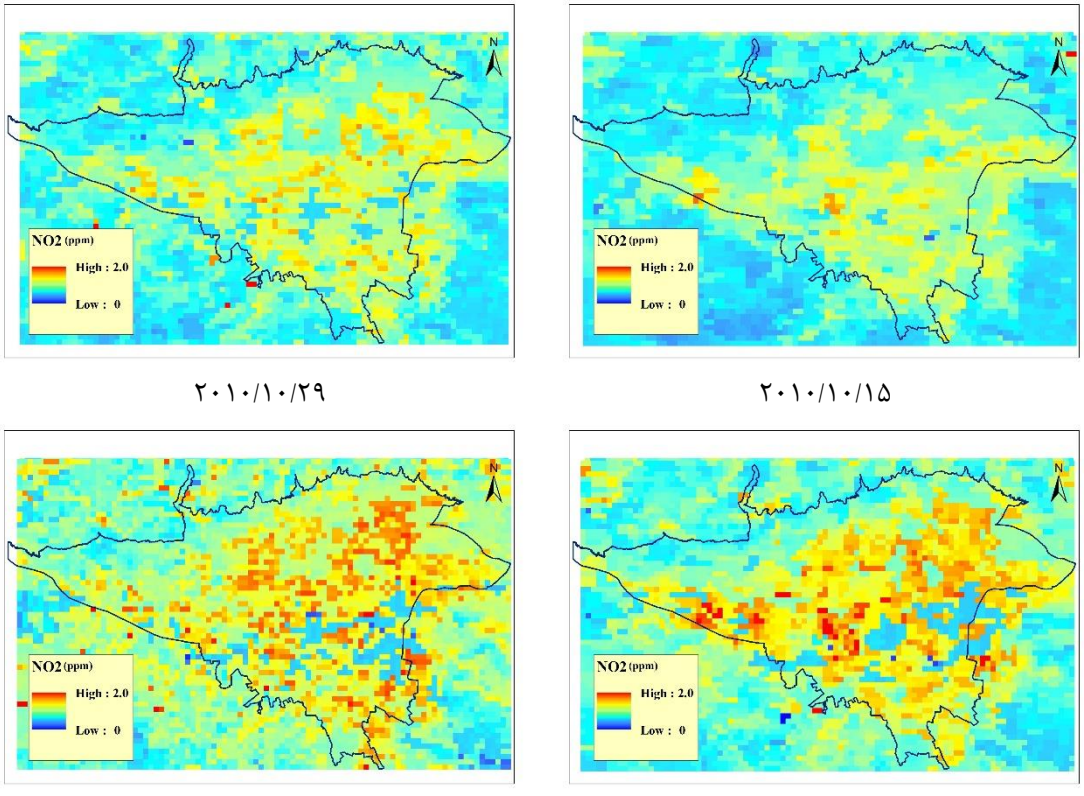
مناطق قرمز رنگ دارای مقادیر بیشتر NO2 و مقادیر آبی رنگ دارای مقادیر کمتر می‌باشند. همانگونه که مشاهده می‌شود آلودگی NO2 در دو تصویر اول مقدار کمتر و در دو تصویر بعدی دارای مقدار بیشتری می‌باشد. برای بررسی دقت تصاویر به‌دست آمده از داده‌های ایستگاه‌های زمینی استفاده گردید. برای این منظور موقعیت ایستگاه‌های 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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.171]

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.

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.



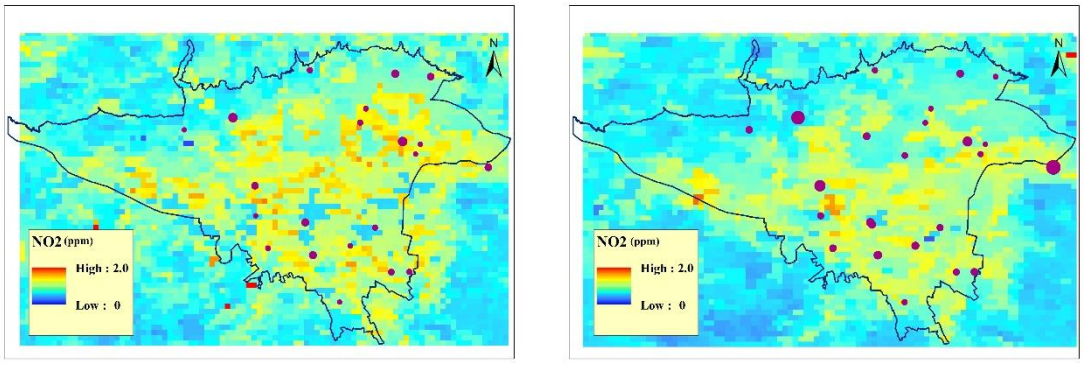
۲۰۱۰/۱۰/۱۵ ۲۰۱۰/۱۰/۲۹

۲۰۱۰/۱۱/۰۷ ۲۰۱۰/۱۱/۱۷

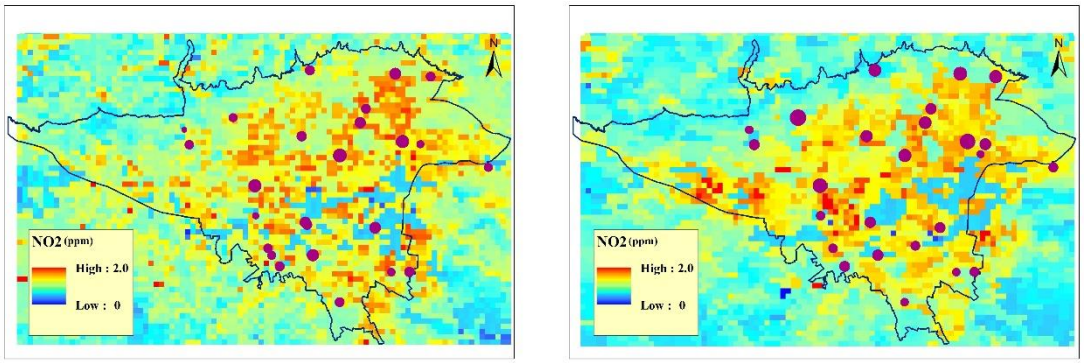
شکل ۹: تصویر آلودگی هوای NO2 در سطح شهر تهران در روزهای مختلف

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.171]

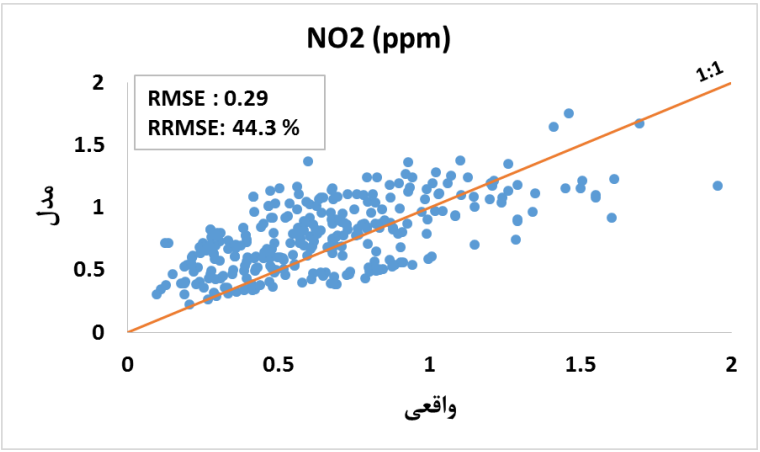


۲۰۱۰/۱۰/۱۵ ۲۰۱۰/۱۰/۲۹



۲۰۱۰/۱۱/۰۷ ۲۰۱۰/۱۱/۱۷

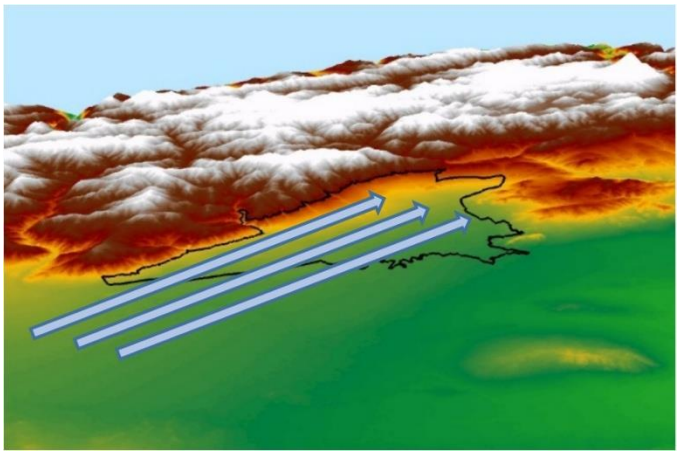
شکل ۱۰ : مقایسه داده‌های ایستگاه‌های زمینی و تصویر به‌دست آمده NO2 در روزهای مختلف



شکل ۱۱ : مقایسه داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌های زمینی و به‌دست آمده از تصاویر مدل NO2

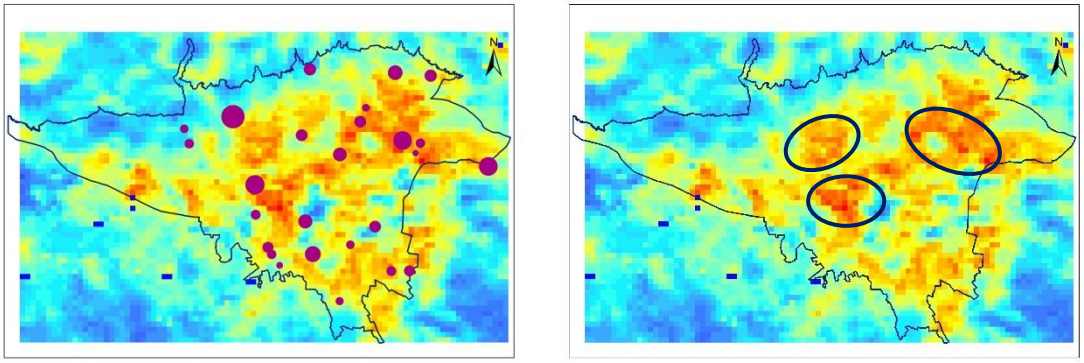
همچنین بررسی تصاویر و داده‌های زمینی نشان داد که عمدتا برای ایستگاه‌هایی که دارای آلودگی زیاد می‌باشند، در روی تصویر آلودگی با چند پیکسل فاصله در سمت شرق پیکسل ایستگاه مزبور نشان داده شده است. به نظر می‌رسد که این موضوع با جهت باد غالب در شهر تهران که معمولا به‌صورت غرب به شرق می‌باشد مطابقت دارد (شکل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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.171]



شکل ۱۲ : جهت باد غالب در تهران

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 ایستگاه‌های زمینی نیز این مناطق را به‌عنوان مناطق آلوده نشان می‌دهند. با توجه به اینکه در این مناطق عمدتا 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.



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

۶- نتیجه گیری 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 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 عمدتا ابعادی کوچکتر از یک پیکسل دارند استفاده از این تصاویر مناسب نمی‌باشد. در این پژوهش با برقراری

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.171]

ارتباط بین میزان آلودگی و بازتابندگی، تصویر آلودگی در سطح شهر در ابعاد پیکسل ۵۰۰ متری به‌دست آمد. برای این منظور ابتدا چندین منطقه صنعتی و شهر بزرگ انتخاب شد و سپس ارتباط مقادیر آلودگی در هر پیکسل با بازتابندگی به‌دست 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 به‌دست آمد. در انتها نیز به‌منظور ارزیابی میزان آلودگی به‌دست 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 به‌صورت روزانه اخذ می‌شوند تولید تصویر آلودگی در هر روز امکان پذیر می‌باشد. تصاویر به‌دست آمده از لحاظ کیفی با داده‌های ایستگاه‌های سنجش آلودگی در سطح شهر دارای ارتباط می‌باشند. مقدار RMSE به‌دست 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 زیاد می‌باشد، استفاده از مدل در این مناطق قابل قبول می‌باشد. همچنین بررسی تصاویر و داده‌های زمینی نشان داد که عمدتا 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 معمولا به‌صورت 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 به‌دست آمد. تصاویر به‌دست 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.

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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.171]

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. Ladstatter-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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.171]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.6, No.1, Spring 2018

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

Abolfazl Ahmadian[*1], Mohammad Reza Mobasheri [2] , Ali Akbar Matkan [3]

1- PhD student of Remote Sensing in Department of GeomaticsEng., 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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.171]