



Investigating the Relationship between Air Pollutants and Remote Sensing Indices (NDVI, NDBI, LST, and ATI) in Tehran

Sayedeh Zeinab Shogrkhodaei^a, Amanollah Fathnia^{b*}, Sirous Hashemi Darebadami^c

^a PhD Candidate in Climatology, Razi University, Kermanshah, Iran

^b Associate Professor in Climatology, Razi University, Kermanshah, Iran

^c PhD Candidate in Remote Sensing and Geographic Information System, Tehran University, Tehran, Iran

Received: 23 November 2022

Revised: 1 February 2023

Accepted: 8 February 2023

Abstract

Intra-urban air pollution is a major environmental and public health concern worldwide. As the capital of Iran, Tehran is increasing its population day by day, and it has caused problems such as air pollution, and its severity is subject to change every year. The aim of this study was to find a relationship between Remotely Sensed Indices with pollutants and air pollution modeling in Tehran. Pearson correlation coefficient was used to investigate the relationship between independent variables and pollutants and multivariate linear regression model was used to model it. Independent variables in this study are Land Surface Temperature (LST), Normalized Vegetation Difference Index (NDVI), Apparent Thermal Inertia (ATI), and Normalized Difference Built-Up Index (NDBI). The data obtained from Landsat 8 satellite images and MODIS sensor were used. Moreover, air pollution parameters were CO, NO₂ and SO₂, which were prepared in two spring (April) and summer (August July) of 2017. ENVI, ArcGIS and SPSS software were used to analyze the images and evaluate the relationship between the Remotely Sensed Indices and air pollutants and modeling. The results showed that the highest correlation between LST and SO₂ is in the spring (0.24), NDVI and SO₂ is in the spring (-0.36), ATI and CO is in the summer, and between NDBI and SO₂ is in the summer. Also, the results of the model for the statistical coefficient of determination (R^2) showed a value between 0.33 and 0.8, and for the statistical root-mean-square error (RMSE) showed a value of 5.05-47.47. It was also found that NDVI and LST are inversely related, and that NDBI was indirectly related to air pollutants.

Keywords: Air Pollution, Pearson Correlation, Tehran City, Remote Sensing Index

*.Corresponding Author: Amanollah Fathnia Email: a_fathnia@razi.ac.ir Tel: +989192970334

How to cite this Article: Shogrkhodaei, S. Z., Fathnia, A., & Hashemi Darebadami, S. (2023). Investigating the relationship between air pollutants and remote sensing indices (NDVI, NDBI, LST and ATI) in Tehran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(3), 123-144.

DOI: 10.22067/geoeh.2023.79729.1305



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant With open access mandates, by publishing its articles under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 12, Issue 3 - Number 47, Fall 2023

<https://geoeh.um.ac.ir>

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.79729.1305>

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال دوازدهم، شماره چهارم و هفتم، پاییز ۱۴۰۲، صص ۱۴۴-۱۲۳

مقاله پژوهشی

بررسی ارتباط آلاینده‌های هوا با شاخص‌های سنجش‌ازدور (ATI و LST، NDBI، NDVI) در شهر تهران

سیده‌زینب شگرخدایی - دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

امان‌اله فتح‌نیا^۱ - دانشیار اقلیم‌شناسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

سیروس هاشمی‌دره‌بادامی - دانشجوی دکتری سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۱۲ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۱۱/۱۹

چکیده

آلودگی هوای شهری یک نگرانی عمده زیست‌محیطی و بهداشت عمومی در سراسر جهان است. هرروزه بر جمعیت شهر تهران به‌عنوان پایتخت ایران افزوده می‌شود که مشکلاتی از قبیل آلودگی هوا را به دنبال داشته و هر سال بر شدت آن نیز افزوده می‌شود. از این رو هدف این مطالعه یافتن ارتباط شاخص‌های سنجش‌ازدوری با آلاینده‌های هوا در سطح شهر تهران است. شاخص‌های مورد استفاده در این مطالعه شامل: دمای سطح زمین (LST)، شاخص نرمال شده تفاضلی پوشش گیاهی (NDVI)، اینرسی حرارتی ظاهری (ATI) و شاخص تفاضلی نرمال شده مناطق ساخته شده (NDBI) استخراج شده از داده‌های تصاویر سنجنده OLI و مودیس، همچنین پارامترهای آلاینده هوا شامل CO، NO₂ و SO₂ طی ماه‌های آگوست، جولای و آوریل سال ۲۰۱۷ است. برای بررسی ارتباط بین شاخص‌های سنجش‌ازدور و آلاینده‌ها از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. نتایج نشان داد در فصل بهار بالاترین مقدار همبستگی مثبت بین LST و SO₂ (۰/۲۴) و بیشترین میزان همبستگی منفی بین NDVI و SO₂ (-۰/۳۶) مشاهده شد.

Email: a_fathnia@razi.ac.ir

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۹۲۹۷۰۳۳۴

نحوه ارجاع به این مقاله:

شگرخدایی، سیده‌زینب؛ فتح‌نیا، امان‌اله؛ هاشمی‌دره‌بادامی، سیروس؛ ۱۴۰۲. بررسی ارتباط آلاینده‌های هوا با شاخص‌های

سنجش‌از دور (ATI و LST، NDBI، NDVI) در شهر تهران. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۱۲(۳)، صص ۱۴۴-۱۲۳

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.79729.1305>

همچنین در فصل بهار بالاترین همبستگی مشاهده شده بین ATI و CO (۰/۲۴) و NDBI و SO₂ (۰/۲۷) وجود داشت. علاوه بر این ارتباط قوی و منفی بین NDBI و NDVI به ترتیب در فصل بهار و تابستان (۰/۸۴، -۰/۹۱) وجود دارد.

کلیدواژه‌ها: آلودگی هوا، همبستگی پیرسون، شهر تهران، شاخص سنجش ازدوری.

۱- مقدمه

گسترش مناطق شهری تأثیر قابل توجهی بر کاربری زمین با تغییر پوشش گیاهی به مسکونی و تجاری و زیرساخت‌های مرتبط با آن دارد که باعث افزایش درجه حرارت زمین می‌شود (ابراهیم و رسول^۱، ۲۰۱۷). سطوح غیرقابل نفوذ عمدتاً با مواد غیرقابل نفوذی مانند آسفالت، بتن و سنگ، ساخته می‌شوند. سطوح غیرقابل نفوذ شهری مانند سطوح سنگلاخی بیابان رفتار می‌کنند، چراکه این سطوح رسانایی و ذخیره‌سازی گرمای بالایی در مقایسه با سطوح قابل نفوذ (پوشش گیاهی) دارند (بارنز^۲ و همکاران، ۲۰۰۱). جایگزین شدن پوشش طبیعی زمین با ساخت‌وسازهای شهری، اثرات خنک‌کنندگی سطوح طبیعی را از بین می‌برد (گورسوسکی^۳ و همکاران، ۱۹۹۸) و استفاده از سوخت‌های فسیلی برای سرمایش و گرمایش باعث افزایش دمای هوای محیط می‌شود که در ادامه این تغییرات، جزیره حرارتی به وجود می‌آید (هاشمی دره‌بادامی، ۱۳۹۴). جزایر حرارتی شهری، مرگ‌ومیر مرتبط با گرما و آلودگی را افزایش و آسایش حرارتی را کاهش می‌دهد و تقاضا برای انرژی را بالا می‌برد (میرزایی^۴، ۲۰۱۵). آلودگی هوا به‌طور مستقیم با سلامت انسان در ارتباط است (ارکو^۵ و همکاران، ۲۰۱۸؛ آتکینسون^۶ و همکاران، ۲۰۱۳). از این رو برای حفظ قلیل قبول کیفیت هوا، همواره نیازمند اطلاعات به‌موقع تغییرات آن هستیم (موزومدر^۷ و همکاران، ۲۰۱۳). کلان‌شهر تهران در یک قرن اخیر با شتاب بسیار رشد کرده و این رشد سریع سبب تحولات و تغییرات مهمی در شکل فضایی آن شده است (رفیعیان و شالی، ۱۳۹۱). از آنجایی که دو گروه عمده صنایع آلاینده در اطراف تهران شامل تولید خودرو و سوخت هستند و از طرفی در شهر، مصرف‌کنندگان خانگی، مصرف‌کنندگان اصلی انرژی هستند؛ به این ترتیب دو گروه اصلی آلاینده هوا صنایع و خانوارها هستند (وفا-آرانی^۸ و همکاران، ۲۰۱۴). راه‌ها و شریان‌های ارتباطی شهر تهران با جمعیت حدود ۹ میلیون نفر حجم بالایی از اتومبیل‌ها را در تمام ساعات شبانه‌روز جابه‌جا می‌کند که عامل اصلی تولید دی‌اکسیدنیترژن، دی‌اکسید گوگرد (نورپور و فیض، ۱۳۹۳) و مونوکسیدکربن (سجادیان،

1 Ibrahim & Rasul

2 Barnes

3 Gorsevski

4 Mirzaei

5 Erqou

6 Atkinson

7 Mozumder

8 Vafa- Arani

۱۳۹۴؛ متکان و همکاران، ۱۳۸۸) است. به‌طورکلی تراکم بالای شهر تهران و تمرکز صنایع در حاشیه شهر موجب بروز جزایر حرارتی و آلودگی هوای شهری شده است (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۷). ازاین‌رو بررسی ارتباط پارامترهای آلودگی هوا با شاخص‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند به فهم بهتر و برنامه‌ریزی دقیق‌تر برای کاهش سطوحی که باعث تشدید آلودگی هوا می‌شود کمک کند. یکی از محدودیت‌هایی که بیشتر در مطالعات انجام شده در آسیا و کشورهای توسعه نیافته مشاهده می‌شود تعداد پایین ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا است که امکان نمایش توزیع آلودگی هوا را با دقت زیاد محدود می‌کند (امینی^۱ و همکاران، ۲۰۱۴). برخی مطالعات که با محدودیت در ایستگاه‌های پایش آلودگی روبرو بوده‌اند از متغیرهایی مانند پوشش گیاهی در ارتباط با آلاینده‌ها استفاده کرده‌اند (وو^۲ و همکاران، ۲۰۱۷). استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور می‌تواند برای شناخت پوشش زمین مرتبط با آلاینده‌ها به محققان کمک کند تا بررسی دقیقی از کیفیت هوا داشته باشند. سنجش‌ازدور تکنیکی است که امکان نظارت و نمایش تغییرات پدیده‌های سطح زمین را در طول زمان فراهم می‌آورد (سهرابی‌نیا و خورشیددوست^۳، ۲۰۰۷). تحقیقات مختلفی در سطح جهان و ایران در ارتباط با آلاینده‌ها و کاربری اراضی صورت گرفته است که در اینجا به برخی موارد اشاره می‌شود. برخی از مطالعات انجام شده برای مدل‌سازی آلودگی هوا با استفاده از تکنیک LUR نشان داده‌اند که استفاده از داده‌های ماهواره‌ای نتیجه را بهبود می‌بخشد (ویتنو^۴ و همکاران، ۲۰۱۳). محمدی و همکاران (۱۳۹۷) برای پیش‌بینی آلاینده‌های PM_{10} ، CO ، NO_2 در شهر تهران از مدل رگرسیون کاربری اراضی، استفاده کردند. وحدت و علی‌محمدی (۱۳۹۹) با مطالعه تغییرپذیری ساعتی رابطه پارامترهای کاربری اراضی با آلاینده CO ، به این نتیجه رسیدند که مدل‌های کلی و ساعتی بخصوص در فصل تابستان در تخمین آلاینده CO نسبت به دیگر آلاینده‌ها بالاتر است. نتایج بررسی فضایی آلاینده‌های هوا در شهر اصفهان نشان می‌دهد که مهم‌ترین آلاینده‌های هوا حجم ترافیک، جمعیت و کاربری اراضی است (شریفی سده و احمدی ندوشن، ۱۳۹۷). مطالعات نشان می‌دهد با گسترش شهرنشینی، بیابان‌زایی و هر فرآیندی که در نتیجه افزایش سطوح غیرگیاهی باشد، دمای هوا افزایش می‌یابد (فیضی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۳). نتایج تحقیقات در شهر تهران نشان می‌دهد طی سه دهه اخیر (۱۹۸۵-۲۰۱۵) بین مقدار سطوح ساخته شده و مقدار دمای سطح ارتباط قوی و مثبت وجود دارد (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۶). مطابق با مطالعات انجام شده، گسترش سطوح نفوذناپذیر رابطه مستقیم با دمای هوا و رابطه معکوس با پوشش گیاهی دارد (اصغری سراسکانرود و امامی، ۱۳۹۷؛ خسروی و همکاران، ۱۳۹۶؛ ساسان‌پور و همکاران، ۱۳۹۲؛ بوادی^۵ و همکاران، ۲۰۱۳؛ یوآن و بائور^۶، ۲۰۰۷). همچنین ارتباط

1 Amini

2 Wu

3 Sohrabinia and Khorshiddoust

4 Vienneau

5 Buyadi

6 Yuan & Bauer

مثبت و معنی دار بین LST و پارامترهای آلودگی هوا وجود دارد (هاشم و سلطان^۱، ۲۰۱۰)، به گونه‌ای که با افزایش مقدار LST بر مقدار آلاینده‌ها افزوده می‌شود (ژنگ^۲ و همکاران، ۲۰۱۷؛ آروین و همکاران، ۱۳۹۶). در مطالعات انجام شده مرتبط با شهر تهران، اغلب ارتباط شاخص‌هایی مانند LST و NDVI با آلودگی هوا بررسی شده است و ارتباط شاخص‌هایی مانند NDBI که با سطوح ساخته شده و راه‌های ارتباطی درون‌شهری مرتبط است و شاخص اینرسی حرارتی ظاهری با آلودگی هوا مورد توجه قرار نگرفته است. لذا هدف این مطالعه بررسی ارتباط شاخص‌های سنجش‌ازدوری (سطوح نفوذناپذیر^۳ (NDBI))، دمای سطح زمین^۴ (LST)، اینرسی حرارتی ظاهری^۵ (ATI) و شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی^۶ (NDVI) استخراج شده از تصاویر سنجنده OLI و TIRS و MODIS با پارامترهای آلاینده‌های هوا (NO_2 ، SO_2 و CO) با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون است.

۲- مواد و روش

۲-۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه ابتدا داده‌های ۲۳ ایستگاه آلودگی‌سنجی شهر تهران شامل NO_2 ، SO_2 و CO طی ماه‌های آوریل، آگوست و جولای سال ۲۰۱۷ از شرکت کنترل ترافیک وابسته به شهرداری تهران و سازمان محیط‌زیست اخذ گردید (<http://air.tehran.ir>). موقعیت ایستگاه‌های آلودگی‌سنجی شهر تهران در شکل ۱ نمایش داده شده است.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

1 Hashim& Sultan

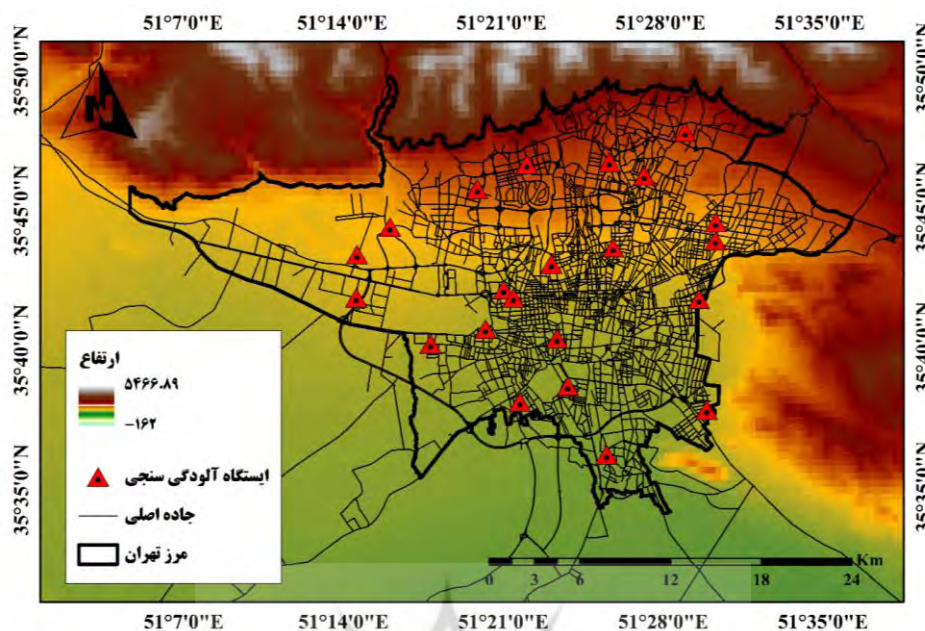
2 Zheng

3 Normalized Difference Built-up Index

4 Land Surface Temperature

5 Apparent Thermal Inertia

6 Normalized Difference Vegetation Index



شکل ۱- موقعیت مکانی ایستگاه‌های آلودگی سنجی شهر تهران

همچنین برای استخراج شاخص‌های سنجش‌ازدوری (NDVI، LST، NDBI و ATI) و چند شاخص محاسبه شده از ترکیب سطوح نفوذناپذیر با LST و NDVI از تصاویر سنجنده‌های OLI/TIRS و MODIS استفاده شد. ویژگی داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱- تعداد و زمان تصاویر مورد استفاده در مطالعه

تعداد تصاویر	قدرت تفکیک مکانی	تاریخ تصویربرداری	سنجنده
۳ تصویر	۳۰ متر	۲۰۱۷/۰۴/۲۰	OLI/TIRS(Landsat8)
		۲۰۱۷/۰۷/۲۵	
		۲۰۱۷/۰۸/۲۶	
۸ تصویر ۱۰ روزه و ۴ تصویر ۱۶ روزه	۲۵۰ متر	آوریل ۲۰۱۷	MODIS (Terra, Aqua) (تصاویر ۸ روزه و ۱۶ روزه)
		جولای ۲۰۱۷	
		آگوست ۲۰۱۷	

۲-۲- روش پژوهش

برای استخراج شاخص‌های سنجش‌ازدوری، ابتدا در نرم‌افزار ENVI تصحیحات هندسی و رادیومتریک انجام گرفت. سپس با محاسبه شاخص‌های مربوطه (NDVI، ATI، NDBI، LST)، نتایج در نرم‌افزار ArcMap تجزیه و تحلیل شدند. برای بررسی مقدار همبستگی از نرم‌افزار SPSS و روش پیرسون استفاده شد.

۲-۲-۱- محاسبه شاخص‌های سنجش‌ازدور

بازیابی دمای درخشندگی

دمای درخشندگی با استفاده از ضرایب کالیبراسیون سنجنده از رابطه ۱ به‌دست آمد:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad \text{رابطه ۱}$$

T دمای درخشندگی در سطح سنجنده برحسب کلوین (K)، L_λ تابش طیفی در بالای اتمسفر در سنجنده [W/ $(m^2 sr \mu m)$], K_2 ضریب کالیبراسیون برحسب کلوین (۷۷/۸۹ برای باند ۱۰ و ۴۸۰/۸۹ برای باند ۱۱)، K_1 ضریب کالیبراسیون برحسب [W/ $(m^2 Sr \mu m)$] (۱۳۲۱/۰۸ برای باند ۱۰ و ۱۲۰۱/۱۴ برای باند ۱۱) (هاشمی‌دره‌بادامی، ۱۳۹۴).

بازیابی توان تشعشعی سطح زمین (LSE) به روش آستانه NDVI

شاخص NDVI بر پایه ارتباط جذب انرژی در محدوده طیفی قرمز توسط کلروفیل و افزایش انعکاس در انرژی مادون‌قرمز نزدیک برای پوشش گیاهی سالم استوار است (لنی، ۱۹۹۶) و از رابطه ۲ به‌دست آمد:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad \text{رابطه ۲}$$

ρ_{NIR} بازتاب باند مادون‌قرمز نزدیک ρ_{RED} بازتاب باند قرمز است. شاخص NDVI به‌دست آمده از دو سنجنده به‌منظور تفکیک مکانی بهتر با هم ادغام شد (امیری^۲ و همکاران، ۲۰۰۹). سپس در محیط ArcMap با استفاده از ابزار Raster calculator میانگین NDVI محاسبه و برای هر ایستگاه استخراج گردید.

برای محاسبه کسر پوشش گیاهی، تصاویر NDVI به‌صورت خطی بین خط خاک خشک ($NDVI_{min}$) و پوشش گیاهی متراکم ($NDVI_{max}$) از رابطه ۳ استفاده شد. این عملیات خطی می‌تواند خطای رخ داده در عملیات کالیبراسیون و تصحیح اتمسفری را کاهش دهد (امیری^۳ و همکاران، ۲۰۰۹).

$$FVC = \left[\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right]^2 \quad \text{رابطه ۳}$$

1 Lenney
2 Amiri
3 Amiri

$NDVI_{min}$ مربوط به کمترین مقدار $NDVI$ (خاک خشک) و $NDVI_{max}$ مربوط به بیشترین مقدار $NDVI$ (پوشش گیاهی مترکم) است. با محاسبه FVC توان تشعشعی از رابطه ۴ محاسبه شد:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= a + b \rho_{red} \quad (FVC = 0) & \xrightarrow{TIRS1} & 0.979 - 0.046 r_{OLI-B4} \\ & & \xrightarrow{TIRS2} & 0.982 - 0.027 r_{OLI-B4} \\ \varepsilon &= \varepsilon_S (1 - FVC) + \varepsilon_V FVC \quad (0 < FVC < 1) & \xrightarrow{TIRS1} & 0.971(1 - FVC) + 0.987 FVC \\ & & \xrightarrow{TIRS2} & 0.977(1 - FVC) + 0.989 FVC \\ \varepsilon &= 0.99 \quad (FVC = 1) & & \end{aligned} \quad \text{رابطه ۴}$$

ρ_{red} بازتاب در باند قرمز سنجنده OLI (باند ۴)، a و b ضرایب همبستگی خطی بازتاب باند قرمز با توان تشعشعی، ε_S توان تشعشعی خاک، ε_V توان تشعشعی پوشش گیاهی (هاشمی دره‌بادامی، ۱۳۹۴).

بازیابی دمای سطح زمین با روش پنجره مجزا (SW)

الگوریتم SW با استفاده از دو باند حرارتی معادله ارائه شده توسط سویرینو و همکاران (۱۹۹۷) و اعمال شده بروی سنجنده‌های مختلف رصد زمین توسط سویرینو و مونوز (۲۰۰۸) است.

$$\begin{aligned} T_S &= T_i + c_1(T_i - T_j) + c_2(T_i - T_j)^2 + c_0 \\ &+ (c_3 + c_4 W)(1 - \varepsilon)(c_5 + c_6 W) \Delta \varepsilon \end{aligned} \quad \text{رابطه ۵}$$

T_i و T_j دمای درخشندگی در سطح سنجنده در باندهای مورد استفاده در الگوریتم، ε میانگین توان تشعشعی از دو باند $\varepsilon = 0.5(T_i - T_j)$ ، $\Delta \varepsilon$ تفاضل توان تشعشعی دو باند $\Delta \varepsilon = (T_i - T_j)$ ، W مقدار محتوای بخار آب اتمسفر (گرم بر سانتی متر مربع) و C_0 تا C_6 ضرایب SW که از داده‌های شبیه‌سازی شده تعیین می‌شود. این ضرایب در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- مقادیر ضرایب مورد استفاده در الگوریتم

ضریب	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
ارزش	-۰/۲۶۸	۱/۳۷۸	۰/۱۸۳	۵۴/۳	-۲/۲۳۸	-۱۲۹/۲۰	۱۶۴

بازیابی آبدوی سطح

چندین الگوریتم توسط لیانگ (۲۰۰۵) مطرح شدند که به منظور استخراج آبدوی در سنجنده‌های پهن باند با استفاده از ترکیب باندهای مختلف با تطبیق باندهای متناظر OLI با باندهای سنجنده ETM+، از الگوریتم مورد استفاده برای بازیابی آبدوی از باندهای ETM+ برای بازیابی آبدوی سنجنده OLI توسط رابطه ۶ استفاده شد:

$$\alpha_{short} = 0.365\alpha_2 + 0.130\alpha_4 + 0.373\alpha_5 + 0.085\alpha_6 + 0.072\alpha_7 - 0.0018 \quad \text{رابطه ۶}$$

محاسبه اینرسی حرارتی

اینرسی حرارتی ظاهری (ATI) با استفاده از داده‌های LST در شب و روز و آبدوی سطح زمین از رابطه ۷ محاسبه شد (پرایس^۱، ۱۹۸۵):

$$ATI = \frac{1 - Albedo}{T_{sday} - T_{snight}} \quad \text{رابطه ۷}$$

در اینجا، ATI اینرسی حرارتی ظاهری، T_{sday} و T_{snight} دمای سطح زمین در روز و شب است. محاسبه اینرسی حرارتی در بافر ۱۰۰۰ متر در شکل ۲ نشان داده شده است.

محاسبه شاخص سطوح نفوذناپذیر NDBI

NDBI به عنوان شاخصی برای شدت توسعه شهری و هم شاخصی برای سطوح نفوذناپذیر شهری مورد استفاده قرار می‌گیرد (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۷). مقدار NDBI بین +۱ تا -۱ است. مقدار مثبت برای پهنه‌های آبی و مناطق تراکم بالای ساخت و ساز، در حالی که مقدار منفی برای نمایش دیگر انواع پوشش زمین به کار برده می‌شود (ابراهیم و رسول، ۲۰۱۷):

$$NDBI = \frac{MIR_{um} - NIR_{um}}{MIR_{um} + NIR_{um}} \quad \text{رابطه ۸}$$

که در اینجا NIR_{um} معرف باند طول موج کوتاه مادون قرمز و MIR_{um} معرف باند حرارتی است.

۲-۲-۲- محاسبه میزان همبستگی

ضریب همبستگی پیرسون یکی از پرکاربردترین روش‌های آماری است که به بررسی جهت و اندازه هم خطی بودن بین متغیر مستقل و وابسته می‌پردازد (کیم^۱ و همکاران، ۲۰۱۵). برای محاسبه این ضریب از نرم‌افزار SPSS استفاده شد.

۳- نتایج

۳-۱- غلظت آلاینده‌های NO_2 ، SO_2 و CO و ارزیابی دقت داده‌ها

میانگین غلظت آلاینده‌ها در فصل بهار برای CO برابر $2/24$ ppm، برای NO_2 برابر $44/92$ ppb، برای SO_2 برابر $7/08$ ppb است. در فصل تابستان میانگین غلظت CO برابر با $2/41$ ppm، مقدار NO_2 برابر با $50/27$ ppb، میانگین غلظت SO_2 برابر با $6/12$ ppb است. با توجه به غلظت‌های به‌دست آمده بیشینه مقدار آلاینده‌های CO و NO_2 مربوط به فصل تابستان و بیشینه مقدار SO_2 مربوط به فصل بهار بوده است. نتایج توصیف پارامترهای آلودگی هوا در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- توصیف آماری پارامترهای آلودگی هوای مورد استفاده

فصل	آلاینده	حداکثر	حداقل	میانگین
بهار	CO	۵/۵	۰/۴	۲/۲۴
	NO_2	۹۷	۲/۵	۴۴/۹
	SO_2	۳۶	۱	۷/۰۸
تابستان	CO	۶۱	۰/۶	۲/۴۱
	NO_2	۱۱۲	۷	۵۰/۲۷
	SO_2	۳۰	۱	۶/۱۲

برای ارزیابی دقیق برای بررسی ارتباط بین دمای سطح زمین به‌دست آمده از سنجنده مادیس و دمای اندازه‌گیری شده توسط ایستگاه هواشناسی فرودگاه امام مقدار RMSE در دو فصل بهار و تابستان محاسبه شد. مقدار RMSE به دست آمده در هر دو فصل در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به جدول صحت داده‌های به‌دست آمده از سنجنده مادیس را می‌توان تأیید کرد.

جدول ۴- محاسبه مقدار RMSE بین داده‌های میانگین روزانه فرودگاه امام و LST

فصل	بهار	تابستان
RMSE	۵/۷۴	۳/۴۴

۲-۳- ارتباط شاخص‌های سنجش‌ازدور و آلاینده‌های هوا

با توجه به ضرایب به‌دست آمده از محاسبه ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های سنجش‌ازدور (LST، NDVI، ATI، NDBI) و آلاینده‌های NO_2 ، SO_2 و CO (جدول ۵) مشخص شد که تمام آلاینده‌ها در هر دو فصل بهار و تابستان با شاخص NDVI رابطه منفی داشتند. این رابطه برای آلاینده SO_2 در فصل بهار قوی‌تر (۰/۳۶-) بود. LST با غلظت آلاینده‌ها ارتباط مثبت دارد. این ارتباط برای SO_2 در فصل بهار قوی‌تر (۰/۲۴) از سایر آلاینده‌ها بود. بین ATI و آلاینده‌ها نیز ارتباط مثبت مشاهده شد، یعنی کاهش و افزایش آلاینده‌ها با مقدار ATI در یک راستا است. همچنین مشخص شد که بیشترین مقدار همبستگی برای آلاینده CO در فصل تابستان (۰/۲۴) است. ارتباط بین NDBI و آلاینده‌ها در هر دو فصل مثبت و بیشترین مقدار برای آلاینده SO_2 در تابستان (۰/۲۷) بود.

جدول ۵- نتایج ضریب همبستگی پیرسون بین آلاینده‌ها و داده‌های سنجش‌ازدور

Index	CO		NO ₂		SO ₂	
	بهار	تابستان	بهار	تابستان	بهار	تابستان
LST	۰/۱۳	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۲۴	۰/۱۹
NDVI	-۰/۰۵	-۰/۰۴	-۰/۲۹	-۰/۰۹	-۰/۳۶	-۰/۲۹
ATI	۰/۱۲	۰/۲۴	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۰۶
NDBI	۰/۰۱	۰/۱۷	۰/۰۲	۰/۲۴	۰/۰۳	۰/۲۷

۳-۳- همبستگی پیرسون بین سه شاخص LST، NDVI و ATI با NDBI

نتایج مربوط به مقدار همبستگی پیرسون بین سه شاخص LST، NDVI و ATI با NDBI در جدول ۶ نشان داده است. طبق نتایج، ارتباط منفی و قوی بین NDBI و NDVI در هر دو فصل تابستان (۰/۸۴-) و بهار (۰/۹۱-) وجود دارد. این ارتباط بیانگر این موضوع است که هرچقدر سطوح غیرقابل نفوذ افزایش یابد، از مقدار NDVI به‌شدت کاسته می‌شود. ارتباط مثبتی بین NDBI و LST در هر دو فصل مشاهده شد و مقدار آن برای تابستان (۰/۲۲) بیشتر از بهار (۰/۱۵) است، یعنی با افزایش مقدار سطوح غیرقابل نفوذ بر مقدار LST نیز افزوده شده و بیشترین مقدار در فصل تابستان (۰/۲۲) مشاهده شد. همبستگی NDBI و ATI نیز مثبت است و بیشترین آن در فصل تابستان (۰/۴۴)

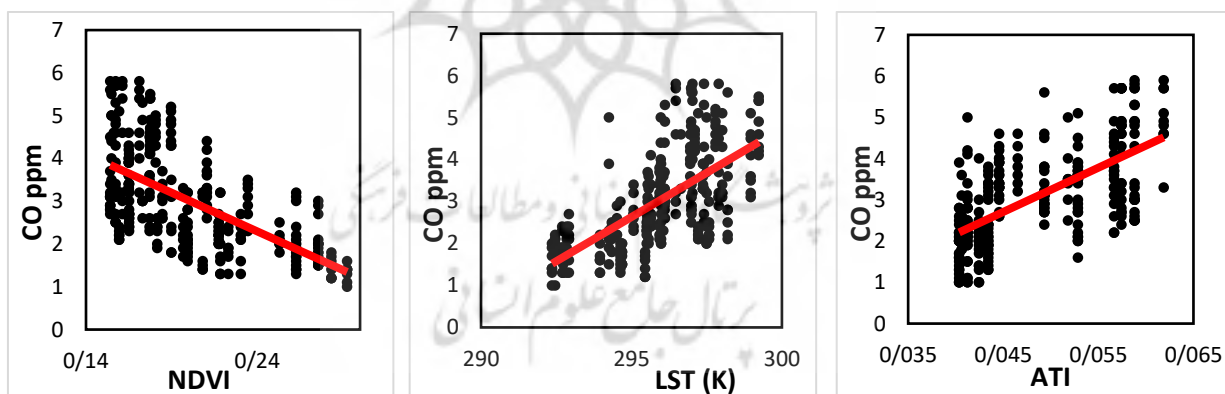
قرار دارد. ضریب همبستگی پیرسون برای سه شاخص LST، NDVI و ATI با NDBI در جدول ۶ نشان داده شده است.

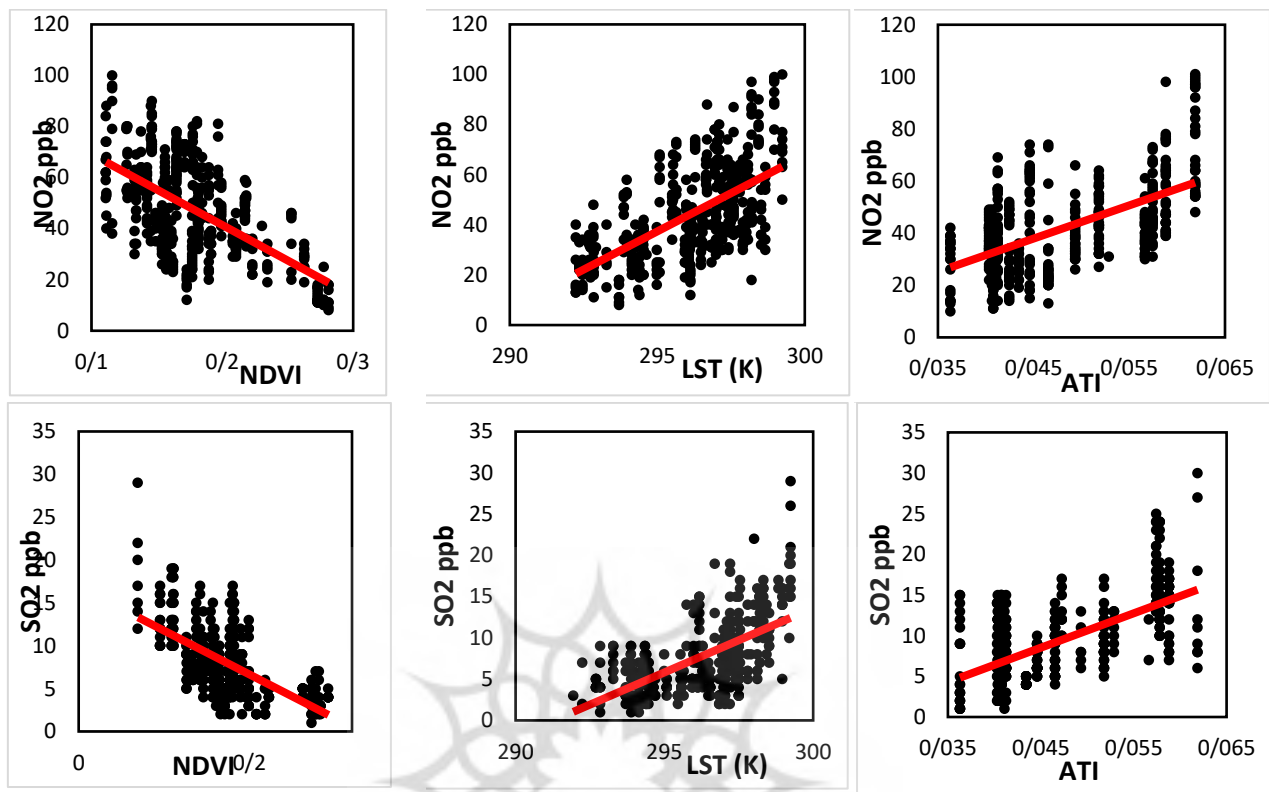
جدول ۶- محاسبه ضریب همبستگی پیرسون بین سه شاخص LST، NDVI و ATI با NDBI

Index	LST		NDVI		ATI	
	بهار	تابستان	بهار	تابستان	بهار	تابستان
NDBI	۰/۱۵	۰/۲۲	-۰/۹۱	-۰/۸۴	۰/۲۷	۰/۴۴

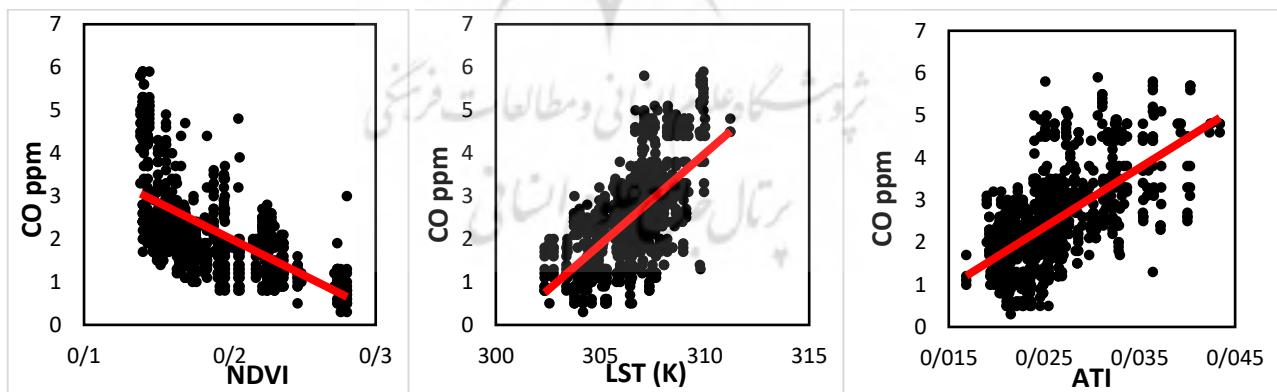
پراکندگی داده‌های مربوط به آلاینده‌های NO_2 ، SO_2 و CO در فصل بهار و تابستان نسبت به شاخص‌های سنجش‌ازدور (LST، INERTIA و NDVI) در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است.

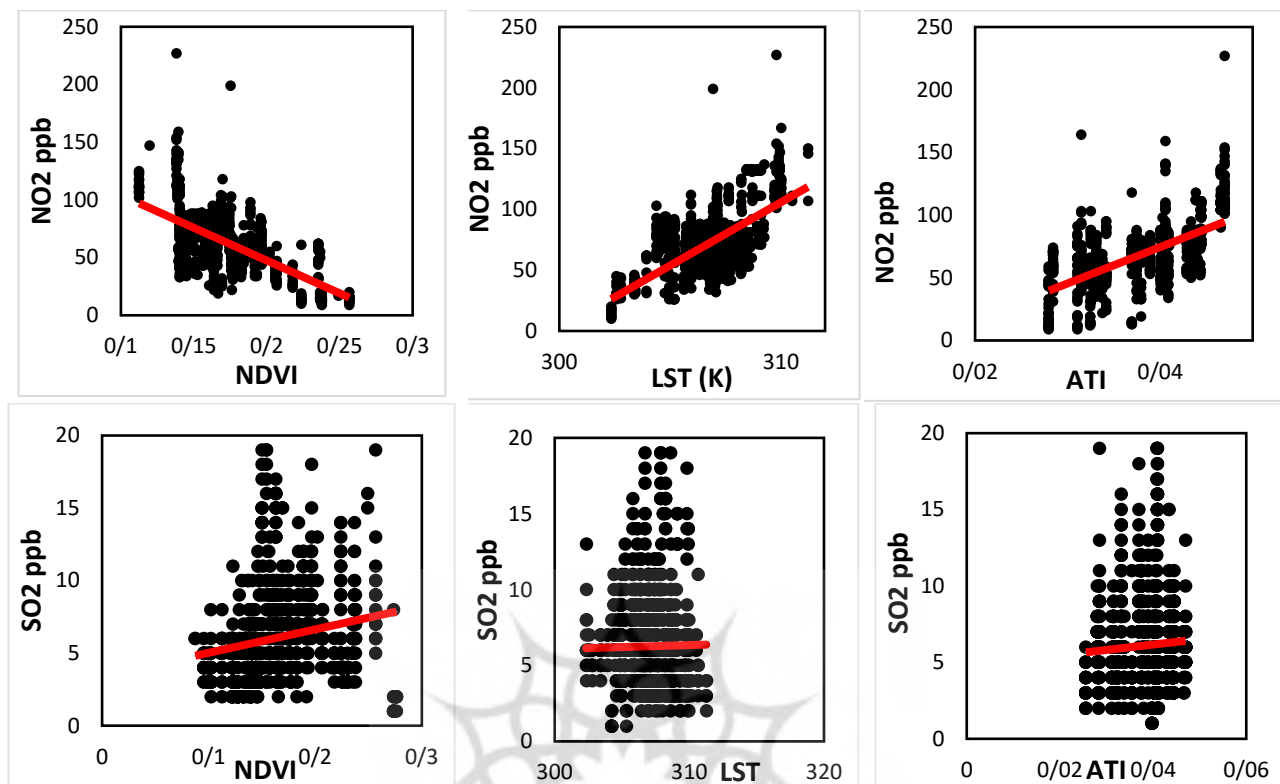
بررسی نمودار پراکندگی ارتباط آلاینده‌های NO_2 ، SO_2 و CO با شاخص‌های سنجش‌ازدوری در فصل بهار نشان می‌دهد که این ارتباط با شاخص پوشش گیاهی حالت معکوس و با شاخص‌های دمای سطح خاک و اینرسی حرارتی حالت مستقیم دارد. همچنین خروجی نقشه NDBI (شکل ۴) و آلاینده‌های CO ، NO_2 و SO_2 در فصل تابستان و بهار در شکل ۵ نمایش داده شده است. براساس نقشه NDBI مناطق مرکزی، جاده‌های شهری، مناطق جنوبی و شرقی بیشترین تمرکز سطوح نفوذناپذیر وجود دارد. مقایسه پراکندگی فضایی آلاینده‌ها با شاخص NDBI تا حد زیادی تطابق بین مراکز و مناطق با سطوح نفوذناپذیر و غلظت‌های بالای آلودگی هوا را نشان می‌دهد.



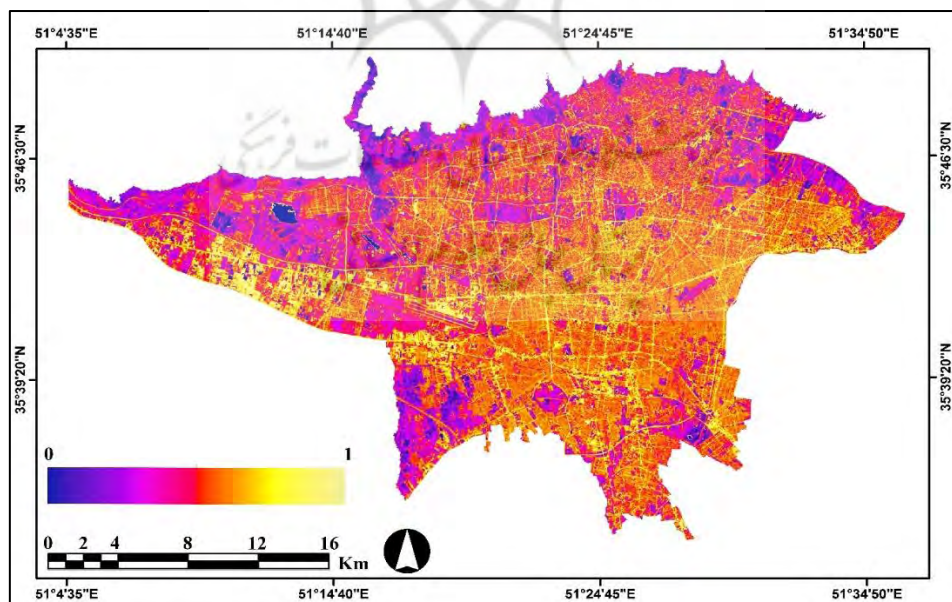


شکل ۲- پراکندگی داده‌های مربوط به آلاینده‌های NO₂، SO₂ و CO در فصل بهار نسبت به شاخص‌های سنجش‌ازدور (NDVI و LST، INERTIA)

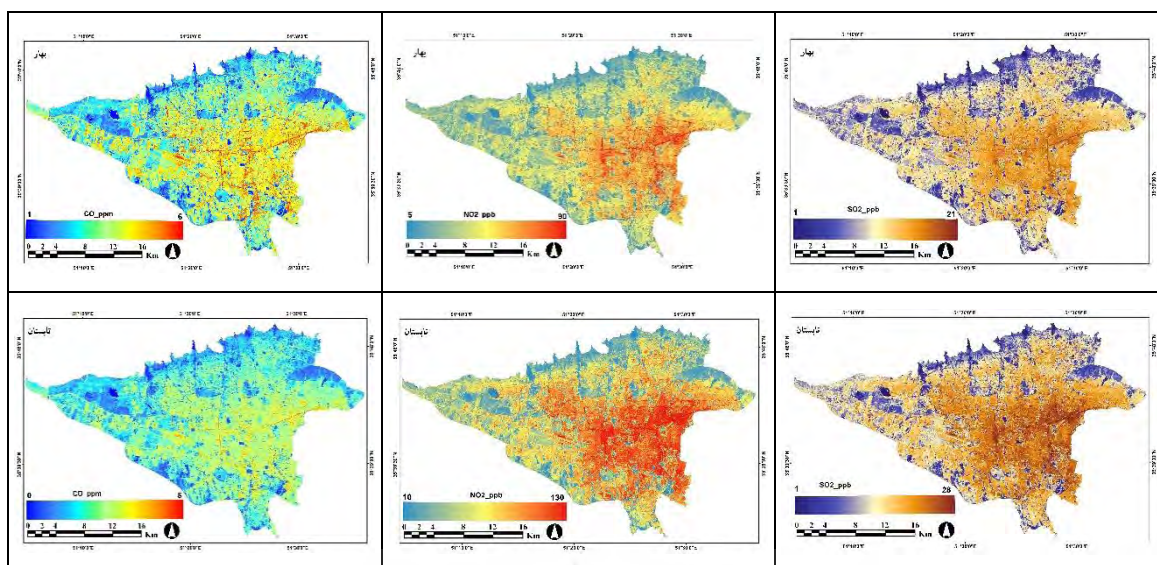




شکل ۳- پراکندگی داده‌های مربوط به آلاینده‌های NO₂، SO₂ و CO در فصل تابستان نسبت به شاخص‌های سنجش‌ازدور (NDVI و LST, INERTIA)



شکل ۴- مقدار شاخص NDBI در محدوده مطالعاتی



شکل ۵- پراکندگی آلاینده‌های CO و SO_2 ، NO_2 در تابستان و بهار در محدوده مطالعاتی

پراکندگی آلاینده‌های هوا در فصل تابستان و بهار (شکل ۵) نشان می‌دهد که مناطق شرقی و مرکزی شهر تهران که منطبق بر سطوح نفوذناپذیر یا ساخته شده است آلودگی هوای بیشتری در این مناطق متمرکز است و در فصل تابستان هر سه آلاینده هوا میزان غلظت بیشتری در این مناطق دارد.

۴- بحث و جمع‌بندی

بر اساس نتایج به دست آمده بین سطوح نفوذناپذیر و دمای سطح زمین رابطه مستقیم وجود دارد (صفراد و همکاران، ۱۳۹۸). باین حال میزان همبستگی در فصل تابستان بیشتر است. می‌توان گفت که با جایگزینی فضاهای سبز با سطوح نفوذناپذیر و افزایش دمای هوا، بیلان انرژی شهری و آلودگی دچار تغییر افزایش می‌شود. میزان بازتاب و نگه داشت انرژی در راستای رنگ و جنس سطوح نفوذناپذیر قرار دارد که موجب افزایش دمای شهری نیز می‌گردد (صفراد و همکاران، ۱۳۹۸). با افزایش ساخت‌وساز، فضاهای سبز شهری و سرعت باد کاهش می‌یابد که این امر سبب افزایش دمای شهری و بالطبع تشکیل جزایر حرارتی و تمرکز آلاینده‌ها می‌شود. مطابق یافته‌های این تحقیق و سایر مطالعات انجام گرفته (محمودزاده و همکاران، ۱۳۹۷؛ ساسان‌پور و همکاران، ۱۳۹۲؛ هاشمی‌دربادامی و همکاران، ۱۳۹۷) ارتباط بین سطوح نفوذناپذیر با دمای سطح و پوشش گیاهی، منفی است، به این معنی که فضاهای سبز دمای پایین‌تری نسبت به مناطق ساخته شده و پوشش آسفالت دارند. مطالعه گوا^۱ و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که میزان دمای سطح زمین در مناطق ساخته شده (نفوذناپذیر) نسبت به مناطق با سطوح نفوذپذیر ۲ درجه سانتی‌گراد بیشتر

است. همچنین براساس نتایج مشخص شد بین NDVI و NDBI رابطه معکوس وجود دارد که این همبستگی در فصل بهار بیشتر است. همچنین بین سطوح نفوذناپذیر و اینرسی حرارتی ظاهری رابطه مستقیم در هر دو فصل بهار و تابستان (همبستگی بیشتر در تابستان) وجود دارد. با توجه به این که اینرسی حرارتی به دو عامل تغییرات آلبو و دمای سطح زمین بستگی دارد، اجسامی که دارای اینرسی و آلبو بالا هستند تغییرات دمایی قابل توجهی را نشان می‌دهند؛ بنابراین اینرسی حرارتی بسته به نوع پوشش زمین، می‌تواند متفاوت باشد که در نتیجه تغییرات در کاربری اراضی ناشی از افزایش شهرنشینی است و تأثیر مستقیمی بر تغییرات دمایی در یک محیط شهری مانند تهران دارد (چن^۱ و همکاران، ۲۰۱۷). شهر تهران طی سال‌های اخیر شاهد تغییراتی در الگوی توزیعی دمایی بوده است. به‌گونه‌ای که با افزایش ساخت‌وساز در سطح شهر، مساحت پهنه‌های با دمای متوسط و بسیار خنک کاهش یافته و پهنه‌های با دمای بالا و بسیار گرم افزایش یافته است. در طی سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۰ بیش از نیمی از پوشش گیاهی نواحی غرب و جنوب غربی تهران تخریب شده است (صفراد و همکاران، ۱۳۹۸)؛ بنابراین افزایش تأسیسات شهری منجر به افزایش سطوح نفوذناپذیر و از بین رفتن سطوح نفوذپذیر مانند پوشش گیاهی می‌گردد. سطوح غیرقابل نفوذ مقادیر آلبو زیاد و رطوبت کمی دارند. تبخیر و تعرق و سایه‌اندازی ساختمان‌ها میزان گرمایی که توسط نماها و سطوح سخت بازتاب می‌شود را افزایش می‌دهد (سانگ^۲ و همکاران، ۲۰۲۰). بررسی نتایج نشان می‌دهد که بین دمای سطح زمین و آلاینده SO₂ در فصل بهار همبستگی بیشتری نسبت به فصل تابستان و سایر آلاینده‌ها وجود دارد. همچنین در فصل بهار و تابستان بیشترین همبستگی بین پوشش گیاهی با آلاینده SO₂ مشاهده می‌شود که با نتیجه مطالعه وو^۳ و همکاران (۲۰۲۲) منطبق است. برای اینرسی حرارتی ظاهری بیشترین همبستگی با CO در فصل تابستان مشاهده شد. افزایش غلظت آلاینده‌ها در تابستان به دلیل سیستم کم فشار حرارتی کویر مرکزی اتفاق می‌افتد. کاهش غلظت آلاینده‌ها در بهار می‌تواند به دلیل اعتدال هوا و کاهش استفاده از انرژی‌های فسیلی برای گرمایش و سرمایش هوا باشد (ملک حسینی و سلیمانی، ۱۳۹۷).

بررسی مقدار NDVI در شهر تهران نشان داد که هرچه پوشش گیاهی پراکنده‌تر باشد میزان دمای سطح زمین نیز بالاتر بوده و بالطبع بیشتر مستعد افزایش غلظت آلاینده‌ها هستند. این در حالی است که مناطق با پهنه‌های بزرگتر پوشش گیاهی با کاهش دما روبرو شده و از میزان غلظت آلاینده‌ها کاسته است که نتیجه مطالعات جی^۴ و همکاران (۲۰۲۰) نیز بیانگر این موضوع است. همچنین جاده‌های درون‌شهری و مسیرهای پر تردد مانند مراکز تجاری غلظت آلاینده‌ها بالاتری نسبت به مناطق کم تردد دارند. تراکم ترافیک در این مناطق به دلیل استفاده از خودروهای شخصی و وسایل حمل و نقل عمومی باعث افزایش غلظت آلاینده‌ها می‌شود. مناطق صنعتی در قسمت‌های شرقی، جنوبی و

1 Chen

2 Song

3 Wu

4 Ge

مناطق پرجمعیت مرکزی شهر تهران سهم بیشتری در آلودگی هوای ناشی از ترافیک را به خود اختصاص می‌دهند؛ زیرا این قسمت‌ها به مناطق پست خشک با رطوبت و سرعت باد کمتر نزدیک‌تر است (جوانبخت و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین تمرکز عمده صنایع در غرب تهران و الگوی غالب بادهای غربی، آلاینده‌های هوا را به سمت مرکز و شرق تهران جابجا می‌کند. در این مناطق ساختمان‌های مرتفع هوای آلوده را در قسمت‌های مرکزی شهر به دام می‌اندازند (قطبی و همکاران، ۲۰۱۶). وجود سدهای کوهستانی شمال و شرق به‌عنوان مانعی برای خروج مواد زاید محسوب می‌شوند که توسط بادهای غربی به داخل فضای شهر آورده شده‌اند. در نتیجه باعث می‌شود که هوای نواحی مرکزی و شرقی آلوده‌تر باشند. افزایش فضای سبز در فصل بهار تا حدود زیادی شرایط مناسبی برای کاهش دما فراهم می‌کند، اما با افزایش دما، پایداری هوا و کاهش سرعت باد در فصل تابستان غلظت آلاینده‌ها (به ویژه NO_2 و CO) افزایش می‌یابد. آلودگی هوا تحت تأثیر عوامل زیادی مانند میزان انتشار از منابع آلودگی، موقعیت جغرافیایی و شرایط هواشناسی قرار دارد (کالیسا^۱ و همکاران، ۲۰۱۸). عوامل هواشناسی نقش پررنگی در شکل‌گیری، تجمع و پراکندگی آلاینده‌های هوا ایفا می‌کند (سلیمان^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). برای مثال افزایش ساعات آفتابی موجب افزایش استفاده از انرژی، پراکندگی گازهای گلخانه‌ای و افزایش آلودگی هوا می‌شود (جوانبخت و همکاران، ۲۰۲۱) که در تابستان شهر تهران این حالت مشهود است. مطابق با نتایج مطالعات صورت گرفته در طی فصول گرم سال الگوی کم‌فشار پاکستان و ایران مرکزی در تراز ۸۵۰ و ۹۲۵ هکتوپاسکال باعث به وجود آمدن جوی ناپایدار و افزایش آلودگی هوا در قسمت شرقی تهران می‌گردد. با این وجود پرارتفاع عربستان عامل اصلی آلودگی هوای شهر تهران محسوب می‌شود که باعث پایداری و نزول هوا در این منطقه می‌شود (لشکری و همکاران، ۱۳۹۹). همچنین مطالعه نشان می‌دهد که استقرار سامانه پرفشار بر روی زاگرس و نواحی جنوبی البرز، وجود زبانه کم‌فشار در نواحی جنوب شرق دریای خزر و وجود پرفشار دیگر در بخش‌های شمال-شرق کشور، کاهش لایه آمیختگی به حدود ۵۰ تا ۲۰۰ متر باعث تشدید آلودگی هوا در شهر تهران می‌شود. همچنین ایجاد نیروی گرادیان فشار باعث شکل‌گیری جریانات ضعیف جنوب و جنوب غربی سطح زمین می‌شود که با محدودیت در شدت و برد بادهای شبانه کوه به دشت و وجود کوه‌ها مانند سدی در مقابل این جریانات، باعث تشدید پایداری جو و انباشتگی آلاینده‌ها در یک لایه نازک سطحی بر روی شهر تهران می‌گردد (سعادت‌آبادی و قصابی، ۱۳۹۰). همه این عوامل سبب می‌شوند که مقدار آلاینده‌ها در تابستان در سطوح نفوذناپذیر که بیشتر در مناطق شرقی و مرکزی تهران متمرکز است، به اوج خود برسد.

1 Kalisa

2 Sulaymon

این مطالعه می‌تواند یک هشدار برای برنامه‌ریزان شهری و مدیران شهری باشد که اقداماتی در جهت حفظ فضاهای سبز و کنترل فضاهای غیرقابل نفوذ انجام دهند تا محیط شهری را به یک محیط سالم با برقراری آسایش حرارتی با افزایش فضاهای سبز و درختان همیشه سبز برای تمام گروه‌های سنی تبدیل کنند.

کتابنامه

اصغری سراسکانرود، صیاد؛ امامی، هادی؛ ۱۳۹۷. پایش دمای سطح زمین و بررسی رابطه کاربری اراضی با دمای سطح با استفاده از تصاویر سنجنده OLI و ETM+ (مطالعه موردی: شهرستان اردبیل). *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، دوره ۱۹، شماره ۵۳، ۲۱۵-۱۹۵.

<http://dx.doi.org/10.29252/jgs.19.53.195>

آروین، عباسعلی؛ ۱۳۹۷. بررسی جزیره حرارتی در ارتباط با آلودگی هوا در شهر اصفهان. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، دوره ۷، شماره ۱، ۱۲۹-۱۱۵.

<https://doi.org/10.22067/geo.v7i1.64590>

خسروی، یونس؛ حیدری، محمدعلی؛ توکلی، آزاده؛ زمانی، عباسعلی؛ ۱۳۹۶. تحلیل رابطه تغییرات زمانی دمای سطح زمین و الگوی فضایی تغییرات کاربری اراضی (مطالعه موردی: شهر زنجان). *برنامه‌ریزی و آمایش فضا*، دوره ۲۱، شماره ۳، ۱۴۴-۱۱۹.

<http://hsmasp.modares.ac.ir/article-21-4560-fa.html>

رفیعیان، مجتبی؛ شالی، محمد؛ ۱۳۹۱. تحلیل فضایی سطح توسعه یافتگی شهر تهران به تفکیک مناطق شهری. *برنامه‌ریزی و آمایش فضا*، دوره ۱۶، شماره ۴، صص ۴۷-۲۶.

<http://hsmasp.modares.ac.ir/article-21-5052-fa.html>

رنجبرسعادت‌آبادی، عباس؛ قصابی، زهرا؛ ۱۳۹۰. مطالعه همدیدی الگوهای جوی حاکم بر روی تهران در روزهای با آلودگی بسیار شدید هوا. *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، دوره دوم، شمار ۵ و ۶، ۵۶-۳۹.

https://www.sid.ir/fa/VEWSSID/J_pdf/4007513900603.pdf

زبردست، اسفندیار؛ ریاضی، حسین؛ ۱۳۹۳. شاخص‌های محیط انسان ساخت و تأثیرات آن بر آلودگی هوا. *هنرهای زیبا، معماری و شهرسازی*، دوره ۲، شماره ۱، ۶۶-۵۵.

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.22286020.1394.20.1.5.6>

ساسان‌پور، فرزانه؛ ضیائی‌ان، پرویز؛ بهادری، مریم؛ ۱۳۹۲. بررسی رابطه کاربری و پوشش اراضی و جزایر حرارتی شهر تهران. *بین‌المللی انجمن جغرافیای ایران*، دوره ۱۱، شماره ۳۹، ۲۷۰-۲۵۶.

https://gisj.sbu.ac.ir/article_94232_fb3a7adefdf354c9f11d03655c231582.pdf

سجادیان، ناهید؛ ۱۳۹۴. پیش‌بینی آلودگی هوای ناشی از حمل و نقل شهری کلانشهر تهران با بهره‌گیری از تلفیق GIS با مدل LUR و شبکه عصبی مصنوعی. *اطلاعات جغرافیایی*، دوره ۲۴، شماره ۹۵، ۱۲۰-۱۰۷.

<http://ensani.ir/file/download/article/20160405114926-9987-215.pdf>

شرعی پور، زهرا؛ مزرعه‌فراهانی، مجید؛ ۱۳۸۶. بررسی تغییرات اوزون کلی جو و نقش آلاینده SO₂ گشت سپهری (تروپوسفری) در تغییرات اوزون کلی اندازه‌گیری شده با دستگاه دابسون موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران. فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۳، شماره ۳، ۹۹-۱۱۳.

https://jesphys.ut.ac.ir/article_19311.html?lang=fa

شریفی‌سده، مریم؛ احمدی‌ندوشن، مژگان؛ ۱۳۹۷. کاربرد روش رگرسیون کاربری اراضی (LUR) در مدل‌سازی فضایی آلاینده‌های هوا در شهر اصفهان. علوم محیطی، دوره ۱۶، شماره ۲، صص ۲۱۶-۲۰۳.

https://envs.sbu.ac.ir/article_97939_de56c3f37c9dea897a55631186b9350a.pdf

شفیعی، هادی؛ عبداللهی‌کاکرودی، عطاالله؛ کیاورزمقدم، مجید؛ ۱۳۹۶. ارزیابی روند حرارتی، پوشش گیاهی و اراضی ساخته شده کلان شهر تهران در سه دهه اخیر. همایش ملی ژئوماتیک، دوره ۱۰، شماره ۴، ۱۸-۱.

<https://elmnet.ir/vslg?url=https%3A%2F%2Fwww.sid.ir%2Ffa%2Fseminar%2FViewPaper.aspx%3FID%3D89954&type=0&id=20699643>

صفرراد، طاهر؛ یوسفی، یداله؛ رضایی‌طالعی، عاطفه؛ ۱۳۹۸. واکاوای تغییرات سطوح نفوذناپذیر و دمای سطح زمین در قائم شهر. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، دوره ۲، شماره ۶۲، ۱۹۹-۱۸۳.

https://jgs.khu.ac.ir/browse.php?a_id=3374&sid=1&slc_lang=fa

کاوسی، امیر؛ سفیدکار، ریحانه؛ علوی‌مجد، حمید؛ رشیدی، یوسف؛ ایمان‌زاد، معصومه؛ نورمرادی، حشمت‌الله؛ ۱۳۹۲. تحلیل فضایی آلودگی هوای شهر تهران با استفاده از مدل‌های اتولجستیک، اتولجستیک مرکزی شده و روش کریگینگ نشانگر. دانشگاه علوم پزشکی ایلام، دوره ۲۱، شماره ۷، ۲۱۴-۲۰۶.

<http://sjimu.medilam.ac.ir/article-1-1604-fa.html>

لشکری، حسن؛ کیخسروی، قاسم؛ کریمیان، ندا؛ ۱۳۹۹. بررسی الگوهای هم‌مدیدی آلودگی‌های شدید هوا، در لایه وردسپهر زیرین کلان‌شهر تهران. جغرافیا و مخاطرات محیطی، دوره ۹، شماره ۳، ۲۰-۱.

https://geoeh.um.ac.ir/article_34363.html

متکان، علی‌اکبر؛ پوراحمد، احمد؛ منصوریان، حسین؛ میرباقری، بابک؛ حسینی اصل، امین؛ ۱۳۸۸. سنجش کیفیت مکان‌های شهری، با استفاده از روش ارزیابی چند معیاره در GIS (مورد مطالعه: شهر تهران). نشریه سنجش‌ازدور و GIS/ایران، دوره ۱، شماره ۴، صص ۲۰-۱.

https://gisj.sbu.ac.ir/article_94409_ba87d7a537546f4ae539cf143b05ed34.pdf

محمدی، اکبر؛ فرخلو، مهدی؛ زیاری، کرامت‌الله؛ پوراحمد، احمد؛ ۱۳۹۷. استفاده از مدل رگرسیون کاربری اراضی (LUR) برای پیش‌بینی آلاینده‌های CO، NO₂ و PM₁₀ (مطالعه موردی: شهر تهران). پژوهش‌های جغرافیایی انسانی، دوره ۵۰، شماره ۱، صص ۱-۱۶.

<https://doi.org/10.22059/jhgr.2014.51225>

محمودزاده، حسن؛ نقدبیشی، افسانه؛ مؤمنی، سحر؛ ۱۳۹۷. تأثیر کاربری‌های شهری در ایجاد جزایر حرارتی (مطالعه موردی: شهر مشهد). جغرافیا و مخاطرات محیطی، دوره ۷، شماره ۲۷، ۱۰۵-۱۱۹.

<https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.68150>

ملک حسینی، عباس؛ سلیمانی، فریبا؛ ۱۳۹۷. بررسی آلاینده‌های تاثیرگذار بر آلودگی هوای تهران و راهکارهای کنترل با توجه به شاخص کیفیت AQI. *نگرش‌های نو در جغرافیای انسانی*، دوره ۱۰، شماره ۴، ۷۳-۵۶.

https://geography.garmsar.iau.ir/article_544603.html

نورپور، علیرضا؛ فیض، سید محمدعلی؛ ۱۳۹۳. تعیین تغییرات مکانی و زمانی آلاینده‌های گوگرد دی اکسید، نیتروژن دی اکسید و انواع ذرات معلق با استفاده از تکنیک‌های GIS در شهر تهران. *محیط‌شناسی*، دوره ۴۰، شماره ۳، ۷۳۸-۷۲۳.

<https://doi.org/10.22059/jes.2014.52216>

هاشمی‌دره‌بادامی، سیروس؛ ۱۳۹۴. مدل‌سازی تغییرات سالانه جزیره حرارتی شهری و بررسی اثر آن بر میزان تغییرات آلودگی هوا (کلان شهر تهران). استاد راهنما علی درویشی بلورانی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد سنجش‌ازدور، گرایش مطالعات شهری و روستایی دانشگاه تهران: ۱۴۲ صفحه.

<http://jgs.khu.ac.ir/article-1-2745-fa.html>

هاشمی‌دره‌بادامی، سیروس؛ درویشی‌بلورانی، علی؛ علوی‌پناه، سید کاظم؛ ملکی، محمد؛ ۱۳۹۷. تحلیل تغییرات جزیره حرارتی سطوح شهری در روز و شب با استفاده از محصولات چند زمانه سنجنده مادیس (مطالعه موردی: کلانشهر تهران). *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، دوره ۱۹، شماره ۵۲، ۱۲۸-۱۱۳.

<http://jgs.khu.ac.ir/article-1-2745-fa.html>

وحدت، امیرحسین؛ علی‌محمدی، عباس؛ ۱۳۹۹. بررسی تغییرپذیری ساعتی رابطه بین پارامترهای کاربری اراضی و آلاینده CO. با استفاده از مدل رگرسیون کاربری اراضی (LUR) در شهر تهران، *فصلنامه سنجش‌ازدور و GIS ایران*، سال ۱۲، شماره ۱، ۱۸-۱.

<https://doi.org/10.52547/gisj.12.1.1>

Amini, H., Taghavi-Shahri, S. M., Henderson, S. B., Naddafi, K., Nabizadeh, R., & Yunesian, M. 2014. Land use regression models to estimate the annual and seasonal spatial variability of sulfur dioxide and particulate matter in Tehran, Iran. *Science of the Total Environment*, 488, 343-353. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.04.106>

Amiri, R., Weng, Q., Alimohammadi, A., & Alavipanah, S. K., 2009. Spatial-temporal dynamics of land surface temperature in relation to fractional vegetation cover and land use/cover in the Tabriz urban area, Iran. *Remote sensing of environment* 113(12): 2606-2617. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.07.021>

Atkinson, R. W., Carey, I. M., Kent, A. J., van Staa, T. P., Anderson, H. R., & Cook, D. G., 2013. Long-term exposure to outdoor air pollution and incidence of cardiovascular diseases. *Epidemiology* 24(10): 44-53. <https://doi.org/10.1097/ede.0b013e318276ccb8>

Barnes, K. B., Morgan, J., & Roberge, M., 2001. Impervious surfaces and the quality of natural and built environments. Baltimore: *Department of Geography and Environmental Planning*, Towson University. [www.ijesi.org/papers/Vol\(4\)5/E045027031.pdf](http://www.ijesi.org/papers/Vol(4)5/E045027031.pdf)

Buyadi, S. N. A., Mohd, W. M. N. W., & Misni, A., 2013. Impact of land use changes on the surface temperature distribution of area surrounding the National Botanic Garden, Shah Alam. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 101 (15):516-525.

<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.07.225>

- Chen, Y. C., Chiu, H. W., Su, Y. F., Wu, Y. C., & Cheng, K. S. 2017. Does urbanization increase diurnal land surface temperature variation? Evidence and implications. *Landscape and Urban Planning*, 157, 247-258. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.06.014>
- Erqou, S., Clougherty, J. E., Olafiranye, O., Magnani, J. W., Aiyer, A., Tripathy, S., & Reis, S. E., 2018. Particulate matter air pollution and racial differences in cardiovascular disease risk. *Arteriosclerosis, thrombosis, and vascular biology* 38(4): 935-942. <https://doi.org/10.1161/ATVBAHA.117.310305>
- Feizizadeh, B., Blaschke, T., Nazmfar, H., Akbari, E., & Kohbanani, H. R., 2013. Monitoring land surface temperature relationship to land use/land cover from satellite imagery in Maraqeh County, Iran. *Journal of Environmental Planning and Management* 56(9):1290-1315. <http://dx.doi.org/10.1080/09640568.2012.717888>
- Ge, X., Mauree, D., Castello, R., & Scartezzini, J. L. 2020. Spatio-temporal relationship between land cover and land surface temperature in urban areas: a case study in Geneva and Paris. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(10), 593. <https://doi.org/10.3390/ijgi9100593>
- Ghotbi, S., Sotoudeheian, S., & Arhami, M. 2016. Estimating urban ground-level PM₁₀ using MODIS 3km AOD product and meteorological parameters from WRF model. *Atmospheric Environment*, 141, 333-346. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.06.057>
- Gorsevski, V., Taha, H., Quattrochi, D., & Luvall, J., 1998. Air pollution prevention through urban heat island mitigation: An update on the Urban Heat Island Pilot Project. *Proceedings of the ACEEE Summer Study, Asilomar, CA* 9(10): 23-32. www.aceee.org/files/proceedings/1998/data/papers/0903.PDF
- Guo, L., Liu, R., Men, C., Wang, Q., Miao, Y., & Zhang, Y. (2019). Quantifying and simulating landscape composition and pattern impacts on land surface temperature: A decadal study of the rapidly urbanizing city of Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 654, 430-440. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.108>
- Hashim Mohammed, B., & Abdullah Sultan, M., 2010. Using remote sensing data and GIS to evaluate air pollution and their relationship with land cover and land use in Baghdad City. *Iranian Journal of Earth Sciences* 2(1): 20-24. https://ijes.mashhad.iau.ir/article_522638_4213861c139f0d22ad68e0355e8dc29a.pdf
- Hu, M., Wang, Y., Wang, S., Jiao, M., Huang, G., & Xia, B. 2021. Spatial-temporal heterogeneity of air pollution and its relationship with meteorological factors in the Pearl River Delta, China. *Atmospheric Environment*, 254, 118415. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118415>
- Ibrahim, F., & Rasul, G., 2017. Urban land use land cover changes and their effect on land surface temperature: Case study using Dohuk City in the Kurdistan Region of Iraq. *Climate* 5(1): 1-18. <https://doi.org/10.3390/cli5010013>
- Javanbakht, M., Bolorani, A. D., Kiavarz, M., Samany, N. N., Zebardast, L., & Zangiabadi, M. 2021. Spatial-temporal analysis of urban environmental quality of Tehran, Iran. *Ecological Indicators*, 120, 106901. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106901>
- Jiménez-Muñoz, J. C., & Sobrino, J. A., 2008. Split-window coefficients for land surface temperature retrieval from low-resolution thermal infrared sensors. *IEEE geoscience and remote sensing letters* 5(4): 806-809. <http://dx.doi.org/10.1109/LGRS.2008.2001636>
- Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Skoković, D., Mattar, C., & Cristóbal, J., 2014. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 11(10):1840-1843. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2312032>

- Kalisa, E., Fadlallah, S., Amani, M., Nahayo, L., & Habiyaremye, G. 2018. Temperature and air pollution relationship during heatwaves in Birmingham, UK. *Sustainable cities and society*, 43, 111-120. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.033>
- Kim, K. H., Kabir, E., & Kabir, S. 2015. A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment international*, 74, 136-143. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.005>
- Lenney, M. P., Woodcock, C. E., Collins, J. B., & Hamdi, H., 1996. The status of agricultural lands in Egypt: the use of multitemporal NDVI features derived from Landsat TM. *Remote Sensing of Environment* 56(1): 8-20. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00152-2](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00152-2)
- Liang, S., 2005. Quantitative remote sensing of land surfaces (Vol. 30). John Wiley & Sons. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/047172372X>
- Mirzaei, P. A., 2015. Recent challenges in modeling of urban heat island. *Sustainable Cities and Society* 19:200-206. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.04.001>
- Mozumder, C., Reddy, K. V., & Pratap, D., 2013. Air pollution modeling from remotely sensed data using regression techniques. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 41(2): 269-277. <http://dx.doi.org/10.1007/s12524-012-0235-2>
- Price, J. C., 1985. On the analysis of thermal infrared imagery: The limited utility of apparent thermal inertia. *Remote sensing of Environment* 18(1): 59-73. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(85\)90038-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90038-0)
- Putrenko, V. V., & Pashynska, N. M. 2017. The Use of Remote Sensing Data for Modeling Air Quality in the Cities. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4, 57. <https://doi:10.5194/isprs-annals-IV-5-W1-57-2017>
- Sobrino, J. A., Li, Z. L., Stoll, M. P., & Becker, F., 1996. Multi-channel and multi-angle algorithms for estimating sea and land surface temperature with ATSR data. *International Journal of Remote Sensing* 17(11): 2089-2114. <http://dx.doi.org/10.1080/01431169608948760>
- Sohrabinia, M., & Khorshiddoust, A. M. 2007. Application of satellite data and GIS in studying air pollutants in Tehran. *Habitat International*, 31(2), 268-275. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2007.02.003>
- Song, J., Chen, W., Zhang, J., Huang, K., Hou, B., & Prishchepov, A. V. 2020. Effects of building density on land surface temperature in China: Spatial patterns and determinants. *Landscape and Urban Planning*, 198, 103794. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103794>
- Sulaymon, I. D., Zhang, Y., Hopke, P. K., Hu, J., Rupakheti, D., Xie, X., ... & She, Y. 2021. Influence of transboundary air pollution and meteorology on air quality in three major cities of Anhui Province, China. *Journal of Cleaner Production*, 329, 129641. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129641>
- Vafa-Arani, H., Jahani, S., Dashti, H., Heydari, J., & Moazen, S., 2014. A system dynamics modeling for urban air pollution: A case study of Tehran, Iran. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 31: 21-36. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.05.016>
- Vienneau, D., De Hoogh, K., Bechle, M. J., Beelen, R., Van Donkelaar, A., Martin, R. V., ... & Marshall, J. D. 2013. Western European land use regression incorporating satellite-and ground-based measurements of NO₂ and PM₁₀. *Environmental science & technology*, 47(23), 13555-13564. <https://doi.org/10.1021/es403089q>
- Wu, C. D., Chen, Y. C., Pan, W. C., Zeng, Y. T., Chen, M. J., Guo, Y. L., & Lung, S. C. C. 2017. Land-use regression with long-term satellite-based greenness index and culture-specific sources to model PM_{2.5} spatial-temporal variability. *Environmental pollution*, 224, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.074>

- Wu, H., Hong, S., Hu, M., Li, Y., & Yun, W. 2022. Assessment of the factors influencing sulfur dioxide emissions in Shandong, China. *Atmosphere*, 13(1), 142.
<https://doi.org/10.3390/atmos13010142>
- Yuan, F., & Bauer, M. E., 2007. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of environment* 106(3): 375-386.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.003>
- Zheng, S., Zhou, X., Singh, R., Wu, Y., Ye, Y., & Wu, C., 2017. The spatiotemporal distribution of air pollutants and their relationship with land-use patterns in Hangzhou city, China. *Atmosphere* 8(6):1-18. <https://doi.org/10.3390/atmos8060110>

