



Spatial Comparison of Concentrations of Traffic-Related Air Pollutants (TRAPs) in a Pedestrian Walkway and an Adjacent Roadway

Azadeh Tavakoli^{*1} and Shima Khorrami²

Received 22/Dec/2025

Revised: 08/Feb/2026

Accepted: 16/Mar/2026

(PP.:133-150)

Abstract:

Introduction: Traffic related air pollution poses a significant challenge to environmental and public health. This study aims to evaluate the effectiveness of converting Sabzeh Meydan Street in the center of Zanjan into a pedestrian walkway and its impact on the region's air quality. Due to the absence of pre-implementation data, the study focused on monitoring and comparing pollutant concentrations on the walkway versus the vehicle path.

Research Method: Air pollutant sampling (SO₂, NO₂, O₃, and PM₁₀) was conducted over three seasons: summer, fall, and winter, on various days of the week, and in two-time shifts: morning and evening. A total of 30 sampling stations were established within the walkway area and along the adjacent roadway to assess the effects of eliminating vehicle traffic in a similarly used, directed, and located area.

Results and Discussion: The findings indicated that the construction of the walkway did not significantly reduce air pollutant concentrations. In fact, an increase in ozone levels was observed during the summer in the walkway area. Pollutant concentrations varied on different days of the week and between morning and evening periods. Nevertheless, in most instances, the levels met the national standards, as well as those set by the US Environmental Protection Agency and the World Health Organization.

Conclusion: The results suggest that pedestrian walkway construction can contribute to improved air quality when integrated into a comprehensive policy package that includes traffic control, resource management, and an understanding of pollutant chemical processes. While the Sabzeh Meydan walkway in Zanjan has successfully fulfilled its social and physical functions, it has not achieved satisfactory environmental outcomes.

Keywords: Pedestrian Walkway, Air pollution, Sampling, Sabzeh Meydan, Zanjan.

¹**Associate Prof.**, Department of Civil Eng., Faculty of Engineering and Sustainable Development Research Center, Uni. of Zanjan, Zanjan, Iran. (Corresponding Author) atavakoli@znu.ac.ir

²**M.A.**, Environmental Science, Faculty of Science, Uni. of Zanjan, Zanjan, Iran.

مقایسه فضایی غلظت آلاینده‌های ترافیکی هوا (TRAPs) در پیاده‌راه و مسیر خودرویی

آزاده توکلی^{1*} و شیما خرمی²

تاریخ پذیرش: 1404/اسفند/25	تاریخ بازنگری: 1404/بهمن/19	تاریخ دریافت: 1404/دی/01
(صفحات: 133-150)		

چکیده

مقدمه: آلودگی هوا ناشی از ترافیک به عنوان چالشی جدی در حوزه محیط زیست و سلامت مطرح است. هدف این پژوهش مقایسه فضایی غلظت آلاینده‌های هوا در پیاده راه و مسیر خودرویی مجاور به منظور ارزیابی عملکرد پروژه تبدیل سبزه میدان به پیاده راه در شهر زنجان است. با توجه به فقدان داده‌های پیش از اجرا به عنوان مهمترین محدودیت پژوهش، این مطالعه بر پایش و مقایسه فضایی غلظت آلاینده‌ها در پیاده راه نسبت به مسیر خودرویی متمرکز شد.

روش تحقیق: نمونه‌برداری از آلاینده‌های هوا (PM_{10} و O_3 ، NO_2 ، SO_2) در سه فصل تابستان، پاییز و زمستان؛ در روزهای مختلف هفته و در دو نوبت صبح و عصر انجام شد. تعداد 30 ایستگاه در محدوده پیاده راه و امتداد مسیر ماشین‌رو انتخاب تا اثر حذف تردد خودروها در منطقه‌ای با کاربری یکسان، جهت و موقعیت مشابه مورد مقایسه فضایی قرار گیرد.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد احداث پیاده راه تأثیر محسوسی بر کاهش غلظت آلاینده‌های هوا نداشته و برای آلاینده ازن، حتی افزایش مقادیر در فصل تابستان در منطقه پیاده راه مشاهده شد. غلظت آلاینده‌ها در روزهای مختلف هفته و بازه زمانی صبح و عصر رفتار متفاوتی نشان می‌دهد. با این وجود در اکثر موارد استانداردهای ملی، حفاظت محیط زیست آمریکا و سازمان جهانی بهداشت رعایت شده است.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد پیاده راه‌سازی زمانی می‌تواند به بهبود کیفیت هوا منجر شود که به عنوان بخشی از یک بسته سیاستی جامع شامل کنترل ترافیک، مدیریت منابع پیرامونی و درک فرآیندهای شیمیایی آلاینده‌ها اجرا شود. پیاده راه سبزه میدان زنجان کارکرد اجتماعی و کالبدی خود را ایفا کرده است ولی در حوزه محیط زیستی دستاورد مورد پذیرشی نداشته است.

واژگان کلیدی: پیاده راه، آلودگی هوا، نمونه‌برداری، سبزه میدان، زنجان.

¹دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی و مرکز تحقیقات توسعه پایدار، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. (نویسنده مسئول)
atavakoli@znu.ac.ir

²کارشناسی ارشد علوم محیط زیست، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

1- مقدمه

یکی از چالش‌های جدی محیط زیستی و سلامت عمومی در مناطق شهری آلودگی هوای ناشی از ترافیک (TRAP¹) است. سازمان جهانی بهداشت (WHO) این نوع آلودگی را یکی از اصلی‌ترین عوامل افزایش مرگ و میر زودرس در جهان می‌داند به‌طوری‌که 4.2 میلیون مرگ زودرس در سال 2019، ناشی از آلودگی هوای محیطی تخمین زده می‌شود (WHO, 2024). مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی در گزارش اردیبهشت 1404 به ارزیابی نرخ مرگ و میر و خسارت‌های اقتصادی آلودگی هوا در کشور ایران پرداخته است. بر طبق ارزیابی وزارت بهداشت در سال 1402، تعداد 30692 مورد مرگ (از 57 شهر با جمعیت تقریبی 48 میلیون نفر) منتسب به آلودگی هوا شده است. خسارت اقتصادی این معضل 12 میلیارد دلار تخمین زده می‌شود. براساس مطالعات چنانچه هزینه‌های بیماری ناشی از آلودگی هوا نیز مدنظر قرار گیرد، این رقم به 23 میلیارد دلار (5 درصد تولید ناخالص داخلی) می‌رسد (Islamic Consultative Assembly Research Center, 2025).

یکی از اقداماتی که با هدف کاهش ترافیک و در نتیجه آن بهبود کیفیت هوا در مناطق شهری، به‌ویژه هسته مرکزی شهرها مورد استفاده قرار می‌گیرد، اعمال محدودیت تردد خودرو و در برخی موارد احداث پیاده‌راه‌هاست. حذف ترافیک سواره از خیابان‌ها و فراهم نمودن بستر مناسب برای حضور شهروندان و گردشگران، در اغلب موارد تجربه‌ای موفق و دستاوردهای ارزنده‌ای به همراه داشته است و موجب ظهور شکل جدیدی از خیابان‌ها با عنوان پیاده راه شده است. محبوبیت پیاده راه نه صرفاً برای مردم و گردشگران بلکه در نزد مدیران شهری نیز گسترش یافته تا جایی که نه تنها در شهرهای بزرگ بلکه شهرهای متوسط و کوچک، تمام تلاش خود را برای ایجاد پیاده راه در مرکز شهرها به کار گرفته‌اند (Habibi & Haghi, 2018). طی سه دهه اخیر جنبش گسترده‌ای علیه حرکت وسایل نقلیه موتوری و کاهش تحرکات پیاده راه در جهان پدید و سبب گسترش فضاهای پیاده شده است (Fallah Manshadi et al., 2012).

1-1- مروری بر پیشینه پژوهش

نخستین تلاش با تأکید بر تردد عابران در فضاهای شهری در کتاب «مرگ و زندگی شهرهای بزرگ آمریکایی» اثر جین جیکوبز نمود پیدا کرد که با معرفی اصطلاح «چشم‌ان ناظر خیابان» در سال 1961 ارتقای کیفیت هوای خیابان‌های شهری را با احداث پیاده راه مطرح ساخت. در سال‌های بعد پژوهش‌های فراوانی با تمرکز بر این دیدگاه انجام شد. در ادامه مطالعات در چهار دسته اصلی طبقه‌بندی و به‌صورت انتقادی بررسی می‌شوند: (1) مطالعات میدانی میزان مواجهه عابران، (2) مطالعات مدل‌سازی عددی، (3) مطالعات قبل-بعد مداخلات ترافیکی و (4) مطالعات داخلی. خلاصه مطالعات کلیدی در جدول 1 ارائه شده است.

دسته اول مطالعات میدانی را شامل می‌شود که به ارزیابی میزان مواجهه عابران با آلاینده‌های هوا پرداخته‌اند. Kaur و همکاران (2005) در پژوهشی در لندن نشان دادند که مواجهه عابران با $PM_{2.5}$ ، CO و ذرات فوق‌ریز به زمان روز، سمت خیابان و موقعیت حرکت وابسته است. همچنین مواجهه شخصی عابران بیش از مقادیر ثبت شده در ایستگاه‌های ثابت بود که نشان دهنده اهمیت پایش به‌صورت سیار است. Amorim و همکاران (2013) نشان دادند انتخاب مسیر وجود درختان می‌تواند میانگین مواجهه دانش‌آموزان با CO را کاهش دهد. در ادامه Cepeda و همکاران (2017) در مرور نظام‌مند خود تأکید کردند که با وجود فواید سلامتی پیاده‌روی، انتخاب مسیرهای کم‌ترافیک و طراحی مناسب فضاهای پیاده ضروری است. با این حال، این مطالعات به بررسی تأثیر حذف کامل ترافیک بر غلظت زمینه آلاینده‌ها نپرداخته‌اند.

دسته دوم مطالعات، مدل‌سازی عددی را به جای اندازه‌گیری‌های واقعی و هزینه‌بر مبنای مطالعات خود قرار دادند. به عنوان نمونه، O'Regan و همکاران (2024) با مدل‌سازی عددی نشان دادند پیاده راه‌سازی سه خیابان می‌تواند NO_2 را تا $6 \mu g/m^3$ کاهش دهد. نقطه قوت این رویکرد، امکان پیش‌بینی سناریوهای مختلف است، اما محدودیت آن عدم قطعیت‌های مدل و نیاز به تأیید میدانی است.

جدول 1- خلاصه مطالعات کلیدی پیشینه پژوهش

Tab. 1- Summary of key studies research background

نوع پژوهش	منبع	روش	یافته اصلی	شکاف و محدودیت
میدانی؛ میزان مواجهه	Kaur et al. (2005)	نمونه برداری سیار لندن	مواجهه به زمان، مکان و سمت خیابان وابسته است	عدم بررسی مداخلات شهری
میدانی؛ میزان مواجهه	Amorim et al. (2013)	نمونه برداری مسیر مدرسه	انتخاب مسیر و درختان کاهش مواجهه با CO	تمرکز بر CO
مطالعه مروری	Cepeda et al. (2017)	مرور نظام مند	عابران در معابر پرتراфик در معرض خطرند	عدم ارائه داده های جدید
مدل سازی	O'Regan et al. (2024)	مدل سازی عددی	کاهش NO ₂ تا 6 µg/m ³	نیاز به تأیید میدانی
مطالعه قبل- بعد	Van Soesbergen (2024)	حسگرهای کم هزینه	کاهش آلاینده ها؛ بازتوزیع ترافیک	تمرکز بر بافت اروپایی
مطالعه قبل- بعد	Salas et al. (2021)	تحلیل ایستگاه های ثابت	کاهش NO ₂ در مادرید	عدم بررسی آلاینده های ثانویه
مطالعه قبل- بعد	Yang et al. (2022)	پایش قبل- بعد LTN ¹	کاهش ترافیک؛ بازتوزیع به معابر مرزی	وابستگی به طراحی LTN
مطالعه قبل- بعد	Atkinson et al. (2009)	پایش ایستگاهی	کاهش برخی آلاینده ها؛ افزایش ازن	عدم پایش موضعی
مطالعه میدانی	Boniardi et al. (2025)	علم شهروندی و مدل سازی	کاهش NO ₂ در اطراف مدارس	محدود به مناطق مدرسه
داخلی	Haydari & Mohammadi (2020)	پرسش نامه	مطلوبیت از منظر شهروندان	بدون پایش آلاینده ها
داخلی	Ghorbani et al. (2015)	مدل DPSIR	بهبود میکروکلیم و کیفیت هوا	عدم ارتباط با ترافیک سواره

Doozdoozani, 2025). در این مجموعه که چهارمین گروه تحقیقات را رقم می زند، قربانی و همکاران (2015) با مدل DPSIR به بهبود میکروکلیم و کیفیت هوا در پل طبیعت اشاره کردند، اما این مطالعه در زمینه کاهش ترافیک سواره قابل مقایسه با پژوهش حاضر نیست. تنها مطالعه مرتبط با محدوده سبزه میدان زنجان، توسط حیدری و محمدی (2020) انجام شده که بر مطلوبیت از منظر شهروندان متمرکز بوده و هیچ اندازه گیری از آلاینده های هوا در آن صورت نگرفته است.

2-1- شکاف های علمی پژوهش ها

مرور نظام مند پیشینه، شکاف های علمی مختلفی را نشان می دهد. (1) بیشتر مطالعات میدانی انجام شده در کشورهای اروپایی صورت گرفته و در شهرهای ایران با وجود احداث پیاده راه های متعدد، ارزیابی عملکرد محیط زیستی یا پایش میدانی انجام نشده است. (2) بررسی همزمان آلاینده های اولیه و ثانویه هرگز پیش از این مورد مطالعه قرار نگرفته است و (3) در اغلب مطالعات، الگوی تغییرات غلظت آلاینده ها در فصول، روزهای هفته و ساعات مختلف بررسی نشده است.

مطالعات قبل- بعد مداخلات ترافیکی سومین گروه تحقیقات این حوزه را شامل می شود. Van Soesbergen و Mulligan (2024) در پروژه Strand-Aldwych لندن با شبکه حسگرهای کم هزینه نشان دادند پیاده راه سازی منجر به کاهش آلاینده ها در محدوده پیاده راه می شود، اما تغییرات کیفیت هوا در خیابان های مجاور به الگوی باز توزیع ترافیک وابسته است. Salas و همکاران (2021) در ارزیابی محدودیت های ترافیکی مادرید و Yang و همکاران (2022) در مطالعه محله های کم ترافیک به همین نتیجه رسیدند. Atkinson و همکاران (2009) در بررسی طرح عوارض ترافیکی لندن، کاهش برخی آلاینده ها را همراه با افزایش ازن در برخی موارد گزارش کردند. این تناقض نشان می دهد که مداخلات ترافیکی الزاماً به کاهش همه آلاینده ها، به ویژه آلاینده های ثانویه، منجر نمی شود. Boniardi و همکاران (2025) نیز با رویکرد علم شهروندی، کاهش مؤثر NO₂ را در پی محدودیت های ترافیکی اطراف مدارس گزارش کردند.

در ایران، پژوهش های پیاده راه ها عمدتاً بر جنبه های اجتماعی و کالبدی متمرکز بوده است (Sadeghi & Akbarzadeh et al., 2016؛ Sobhan-Ardakani, 2013؛ Shirouyезд & Araghiyan & Rafiyyan, 2016).

2- روش تحقیق

مطالعه حاضر از نوع مطالعات شبه تجربی² با طرح پس از مداخله با گروه مقایسه غیر هم ارز³ است. در این پژوهش به دلیل عدم دسترسی به داده‌های پیش از اجرا، امکان انجام مطالعه قبل - بعد وجود نداشت. از این رو، با انتخاب مسیر خودرویی مجاور به عنوان گروه مقایسه، وضعیت غلظت آلاینده‌ها در پیاده راه (گروه مداخله) و مسیر خودرویی (گروه مقایسه) در یک مقطع زمانی مشخص (پس از مداخله) با یکدیگر مقایسه شده است.

این پژوهش در بخش مرکزی و قدیمی شهر زنجان، منطقه سبزه میدان، صورت گرفته است. امروزه سبزه میدان مرکزی اجتماعی و اقتصادی در بافت شهر دارد و از نظر موقعیتی نیز مرکز فیزیکی شهر است. چند تک بنای تاریخی از جمله عمارت دارایی و عمارت ذوالفقاری نشانه‌های باقی مانده از بافت تاریخی در منطقه است. خیابان اصلی شهر، خیابان امام، از مرکز شهر عبور می‌کند و خیابان‌های ذوالفقاری و فردوسی از شمال و جنوب به آن منتهی می‌شود. کاربری‌های تجاری مثل اغذیه فروشی، ابزار فروشی، عطاری، خشکبار فروشی و غیره در محور غربی فضا قرار گرفته‌اند. در محور جنوبی، کاربری‌های تجاری، مذهبی (مسجد جامع) و اقتصادی (بازار) واقع شده است. مسجد و مدرسه جامع معروف به مسجد سید در قلب بافت تاریخی شهر قرار گرفته است. در آذرماه سال 1397، با هدف کاهش ترافیک، حفظ آرامش و بهبود کیفیت فضای شهری، اقدام به احداث پیاده راه در این منطقه شد. پیاده راه حداقل سبزه میدان تا میدان انقلاب و به عنوان بخشی از چشم‌انداز خط گردشگری و جاذبه‌های شهر زنجان نیز محسوب می‌شود. کل این مسیر سنگ‌فرش و نورپردازی شد تا برای قدم زدن مناسب باشد. مجموعه بازار و سردر آن در محور جنوبی فضا قرار دارد. اکثر شهروندان و عابران که قصد ورود به بازار را دارند، از فضای سبزه میدان تردد می‌نمایند. شکل 1 به معرفی منطقه مورد مطالعه و کاربری‌های اطراف پرداخته است.

3-1- نوآوری‌های پژوهش

پژوهش حاضر با هدف پر کردن شکاف‌های فوق، دارای نوآوری‌های زیر است:

- 1) نخستین مطالعه میدانی در ایران که به پایش مستقیم و مقایسه فضایی غلظت آلاینده‌های هوا (NO_2 , SO_2 , PM_{10} , O_3) در پیاده راه و مسیر خودرویی مجاور پرداخته است
- 2) استفاده از روش مقایسه فضایی برای جبران فقدان داده‌های پیش از اجرا در ارزیابی پیاده راه مورد مطالعه
- 3) پوشش زمانی گسترده و نمونه‌برداری در سه فصل، هفت روز هفته و دو نوبت صبح و عصر
- 4) بررسی همزمان آلاینده‌های اولیه و ثانویه برای درک بهتر فرآیندهای فتوشیمیایی.

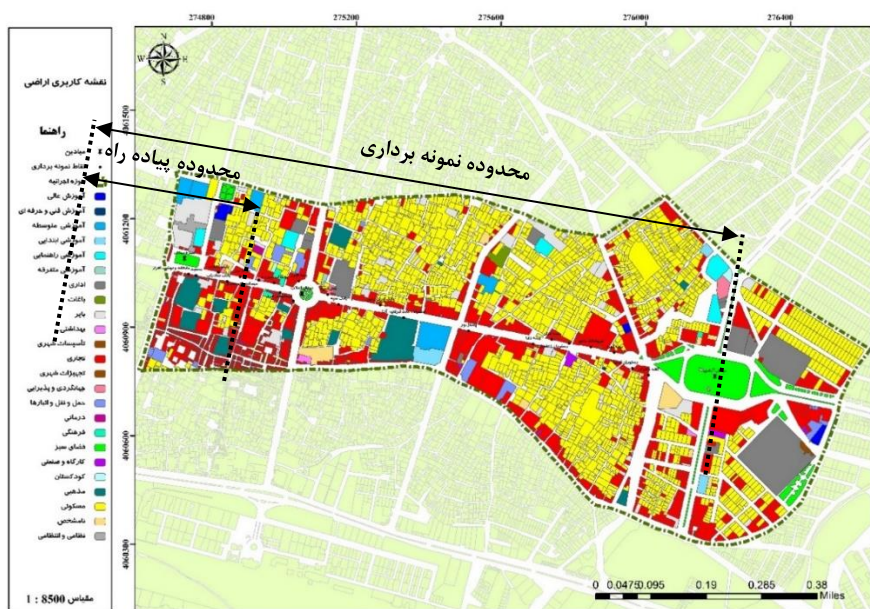
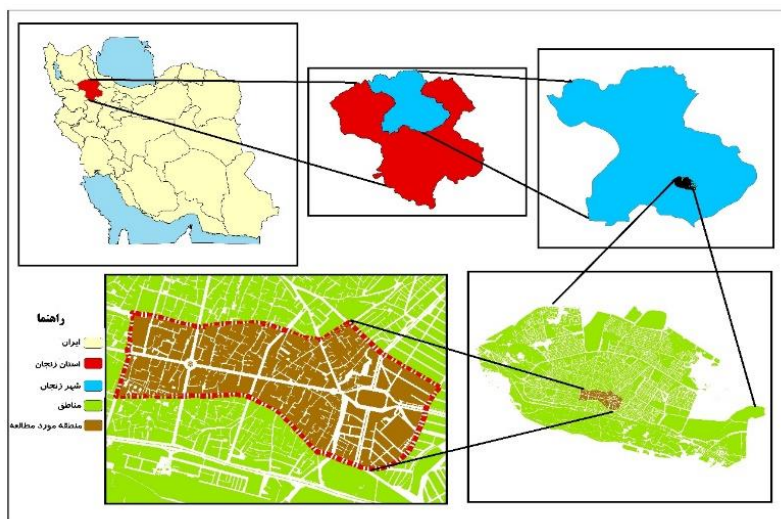
4-1- مسأله و پرسش پژوهش

با توجه به شکاف علمی شناسایی شده، پژوهش حاضر به دنبال پاسخ به پرسش زیر است:

- 1) آیا احداث پیاده راه سبزه میدان زنجان (با حذف تردد خودرو) منجر به کاهش غلظت آلاینده‌های ترافیکی هوا در مقایسه با مسیر خودرویی مجاور شده است؟
- 2) الگوی تغییرات غلظت آلاینده‌ها در فصول، روزهای هفته و ساعات مختلف چگونه است؟

5-1- اهداف پژوهش

- 1) اندازه‌گیری غلظت PM_{10} , SO_2 , NO_2 , O_3 در یک منطقه مرکزی شهری
- 2) مقایسه فضایی غلظت آلاینده‌های ترافیکی (TRAPs) در پیاده راه و مسیر خودرویی مجاور (مطالعه موردی: سبزه میدان زنجان)
- 3) تحلیل الگوی تغییرات زمانی (فصلی، روزانه و ساعتی) غلظت آلاینده‌ها
- 4) بررسی تأثیر حذف تردد خودرو بر آلاینده‌های اولیه (NO_2 , SO_2 , PM_{10}) و ثانویه (O_3)
- 5) مقایسه غلظت آلاینده‌ها با استانداردهای ملی ایران و بین‌المللی (WHO, USEPA)



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه، کاربری‌های فعال و موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری

Fig. 1- Study area, active uses and sampling stations

رطوبت محیط بالای 80 درصد بود، امکان نمونه‌برداری نبود و داده‌ای ثبت نشد.

نمونه‌برداری از آلاینده‌های هوا شامل گوگرد دی‌اکسید (SO_2)، نیتروژن دی‌اکسید (NO_2)، ازن (O_3) و ذرات معلق سایز 10 میکرون (PM_{10}) در سه فصل سال (تابستان، پاییز و زمستان) انجام شد. با هدف ارزیابی‌های دقیق‌تر، نمونه‌برداری‌ها در کلیه روزهای هفته (شنبه تا جمعه) و در دو نوبت صبح (ساعت 10:00 تا 12:00) و عصر (تابستان: 17:00 تا 19:00؛ پاییز و زمستان: 16:00 تا 18:00) صورت گرفت. انتخاب ساعت‌های نمونه‌برداری براساس مشاهدات میدانی و در نظر گرفتن ساعات اوج تردد و رفت‌وآمد است. برای نمونه‌برداری از آلاینده‌های مورد اشاره (SO_2 ، NO_2 ، O_3 و PM_{10}) از دستگاه Aeroqual S500 (ساخت کشور نیوزلند) با سنسورهای سیار و به‌صورت میانگین لحظه‌ای استفاده شد. روش نمونه‌برداری بر اساس دستورالعمل مرجع USEPA برای گازها و روش هم‌ارز برای ذرات معلق انجام شد. پروتکل نمونه‌برداری سیار براساس سنسورهای الکتروشیمیایی برای آلاینده‌های گازی و فناوری پراکندگی نور لیزری برای آلاینده‌های ذره‌ای استوار است. برای هر دور از نمونه‌برداری، سنسور مورد نظر بر روی دستگاه نصب و مسیر یک دور کامل طی شد. در هر ایستگاه سه عدد برداشت و میانگین مقادیر به‌عنوان غلظت ایستگاه موردنظر یادداشت شد. مشخصات و ویژگی‌های سنسورها در جدول 2 ارائه شده است. دستگاه در حین نمونه‌برداری در ارتفاع تنفسی (1.5 متری از سطح زمین) و در فاصله مناسب از دیوار و موانع قرار گرفت.

نتایج نمونه‌برداری‌ها وارد نرم‌افزارهای Excel 2019 و IBM SPSS 26 شد تا نمودارهای مربوطه ترسیم و تحلیل‌های آماری انجام شود. سطح معنی‌داری در این پژوهش برابر 0.05 مدنظر قرار گرفته است. همچنین استانداردهای معتبر ملی از جمله استانداردهای سازمان حفاظت محیط زیست ایران و استانداردهای بین‌المللی و رسمی (سازمان جهانی بهداشت و سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا) برای مقایسه و تحلیل داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

پژوهش با هدف ارزیابی کیفیت هوا و تعیین نقش پیاده‌راه در کاهش آلودگی هوا انجام شد. نمونه‌برداری هوا از ابتدای پیاده‌راه (تقاطع خیابان فردوسی) تا انتهای پیاده‌راه (میدان انقلاب) انجام شد. از آنجایی که نمونه‌برداری در سطح پیاده‌راه به تنهایی نمی‌توانست معیاری از تأثیر این احداث را نشان دهد و داده‌های مربوط به غلظت آلاینده‌های هوا قبل از احداث پروژه، به‌عنوان مهمترین محدودیت پژوهش در دسترس نیست، از مقایسه فضایی⁴ برای بررسی تأثیرات استفاده شده است. این روش که در مطالعات مشابه نیز به‌کار گرفته شده است (Van Soesbergen & Mulligan, 2024; Salas et al., 2021) بر این اصل استوار است که با انتخاب یک منطقه با حداکثر شباهت ممکن، می‌توان اثر حذف ترافیک را بر کیفیت هوا بررسی کرد.

برای این کار مسیری مشابه، در همان امتداد و موقعیت (از میدان انقلاب تا میدان آزادی) و در فاصله کوتاهی از پیاده‌راه برای نمونه‌برداری مقایسه‌ای انتخاب شد. مقایسه فضایی این فرصت را فراهم کرد تا در یک بافت مشابه، کاربری‌های همسان، جهت باد یکسان و حتی بار ترافیکی مشابه، بتوان تنها اثر حذف تردد خودروها بر کیفیت هوا را مورد مطالعه قرار داد. در محدوده نمونه‌برداری تعداد 30 ایستگاه انتخاب شد. 9 ایستگاه ابتدایی (ایستگاه‌های 1 تا 9) در محدوده پیاده‌راه، 3 ایستگاه در اطراف میدان مرکزی (10، 11 و 12) و باقی ایستگاه‌ها (13 الی 30) در مسیر تردد خودروها قرار می‌گیرد. روش نمونه‌گیری به‌صورت هدفمند-سیستماتیک انجام شد. ایستگاه‌ها با فاصله تقریباً یکنواخت 40 الی 54 متری در امتداد هر دو مسیر استقرار یافتند. همچنین در نقاط کلیدی نظیر میدان انقلاب (نقطه اتصال دو مسیر)، ورودی بازار و مسجد جامع، پارکینگ‌ها و فرعی‌ها ایستگاه برای پوشش تنوع کاربری‌ها در نظر گرفته شد.

براساس مطالعات پیشین، سمت خیابان می‌تواند بر غلظت آلاینده‌ها تأثیرگذار باشد. بنابراین، در تمام نمونه‌برداری‌ها، نمونه‌برداری در ضلع جنوبی خیابان انجام شد. در روزهایی که بارش‌های جوی رخ داد و یا

جدول 2- مشخصات ابزارهای اندازه گیری و سنسورهای مورد استفاده
Tab. 2- Specifications of measuring instruments and sensors used

آلاینده	نوع سنسور	محدوده اندازه گیری	حداقل حد تشخیص	دقت کالیبراسیون	رزولوشن
SO ₂	GSE	0-10 ppm	0.04 ppm	< ± 0.05 ppm < ± 10% 0.5-10 ppm	0.01 ppm
NO ₂	GSE	0-1 ppm	0.005 ppm	< ± 0.02 ppm < ± 10% 0.2-1 ppm	0.001 ppm
O ₃	GSS	0-0.15 ppm	0.001 ppm	< ± 0.005 ppm	0.001 ppm
PM ₁₀	Laser particle counter	0.000 to 1.000 mg/m ³	0.001 mg/m ³	± (0.005 mg/m ³ + 15 % of reading)	0.001 mg/m ³

3- نتایج و بحث

در پژوهش حاضر غلظت آلاینده‌های هوا (گوگرد دی‌اکسید، نیتروژن دی‌اکسید، ازن و ذرات معلق سایز 10) در سه فصل (تابستان، پاییز و زمستان)، در دو نوبت روز (صبح و عصر) در طی روزهای هفته (شنبه تا جمعه) در مسیر پیاده راه مرکزی شهر زنجان و خیابان مجاور مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. در مجموع حدود 5040 داده غلظت در این پژوهش ثبت شد. هدف اصلی پژوهش ارزیابی تأثیر پیاده راه در کاهش غلظت آلاینده‌های هوا بود. به‌منظور انتخاب آزمون آماری مناسب، فرض توزیع نرمال داده‌ها با استفاده از آزمون Kolmogorov-Smirnov (با سطح معنی‌داری 0.05) مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به توزیع غیر نرمال هر چهار آلاینده مورد بررسی، از آزمون‌های ناپارامتریک استفاده شد. برای مقایسه غلظت آلاینده‌ها در دو گروه مستقل (مانند صبح و عصر)، از آزمون Mann-Whitney U و برای مقایسه بیش از دو گروه مستقل (مانند فصول، مناطق و مقایسه روزهای هفته)، از آزمون Kruskal-Wallis استفاده شد. در مواردی که آزمون Kruskal-Wallis معنی‌دار بود، مقایسه چندگانه‌های دو به دو با استفاده از آزمون تعقیبی و با اعمال تصحیح Bonferroni (جهت کنترل خطای نوع اول) انجام شد. در ادامه به بررسی نتایج این تحلیل و الگوهای حاکم در انتشار آلاینده‌ها و ترکیبات پرداخته شده است. آمار توصیفی داده‌های پژوهش در جدول 3 ارائه شده است.

1-3 گوگرد دی‌اکسید (SO₂)

مهم‌ترین منشاء انتشار گوگرد دی‌اکسید در مناطق شهری را می‌توان مصرف سوخت‌های فسیلی گوگردار از قبیل گازوئیل دانست. غلظت بالای این ترکیب در

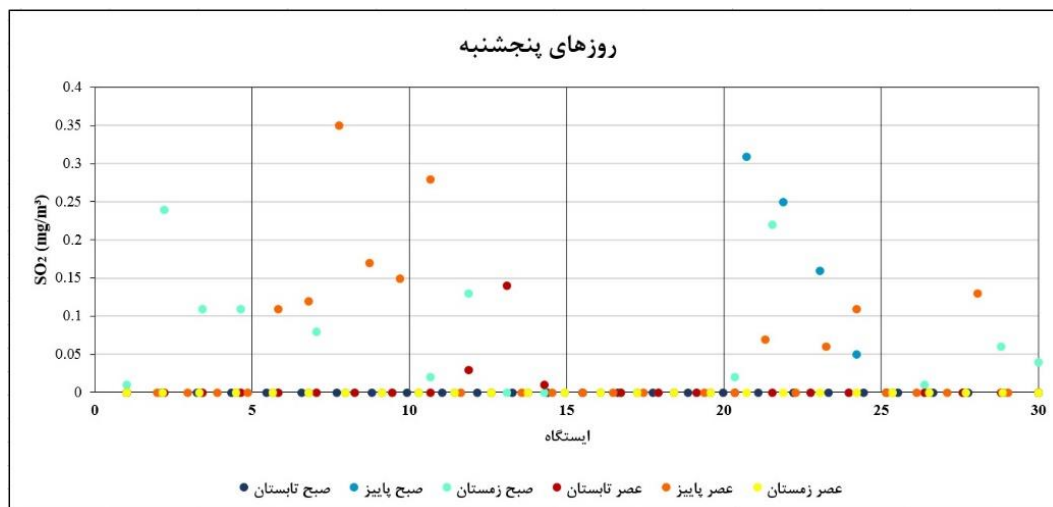
سوخت کشور ایران و توسط خودروهای دیزلی می‌تواند غلظت این آلاینده را در محیط افزایش دهد. در فصول سرد سال و به‌واسطه مصرف مازوت در نیروگاه‌ها معمولاً غلظت این ترکیب در هوا افزایش می‌یابد ولی مناطق شهری و دور از نیروگاه را کمتر تحت تأثیر قرار می‌دهد. در منطقه مورد مطالعه، وجود پایانه اتوبوس‌های شهری، تردد اتوبوس‌های ناوگان حمل و نقل شهری و در برخی موارد ماشین‌های سنگین حمل بار یا بونکرهای سیمان می‌تواند در انتشار این ترکیب مؤثر باشد. ارزیابی مقادیر غلظت گوگرد دی‌اکسید در این پژوهش نشان داد در اغلب موارد غلظت این ترکیب برابر صفر ثبت شده و در نتیجه میانه غلظت SO₂ در تمام فصول و نوبت‌های نمونه‌برداری برابر صفر بود. با توجه به توزیع غیر نرمال غلظت، برای مقایسه‌های آماری مربوط به این ترکیب از آزمون‌های ناپارامتریک استفاده شد. نتایج آزمون Mann-Whitney U نشان داد که اختلاف غلظت SO₂ بین نوبت صبح و عصر از نظر آماری معنی‌دار نیست ($U = 3067$); $Z = -0.666$; $p = 0.506$ ولی نتایج آزمون Kruskal-Wallis نشان داد که اختلاف بین فصول مختلف از نظر آماری معنی‌دار است ($\chi^2 = 8.495$; $df = 2$; $p = 0.014$). آزمون تعقیبی با اصلاح Bonferroni نیز نشان داد غلظت فصل پاییز به‌طور معنی‌داری بالاتر از تابستان است. با این حال، اختلاف بین تابستان و زمستان و پاییز و زمستان از نظر آماری معنی‌دار نبود. برای روزهای پنجشنبه (شکل 2) در مقایسه با دیگر روزهای هفته، غلظت‌های بالاتری مشاهده شد. اگرچه در مناطق پیاده راه و جاهایی که ترافیک بالاتری دارند، غلظت‌های بالاتر این آلاینده ثبت شده است، اما مقایسه سه منطقه مورد بررسی (مسیر پیاده راه، میدان و مسیر خودرویی) توسط آزمون Kruskal-Wallis عدم معناداری اختلاف غلظت

را نشان داد ($\chi^2 = 0.880$; $df = 2$; $p = 0.644$). به بیانی دیگر، غلظت در هر سه منطقه در سطح پایین و مشابهی قرار دارد و احداث پیاده راه تأثیر معناداری بر غلظت این ترکیب نداشته است.

جدول 3- نتایج آماری غلظت آلاینده‌های مورد بررسی در محدوده نمونه‌برداری

Tab. 3- Statistical results of the concentrations of pollutants under investigation in the sampling area

آلاینده	فصل	زمان	کمینه	بیشینه	میانه	میانگین	انحراف معیار
SO ₂	تابستان	صبح	0	0.11	0	0.0014	0.10781
		عصر	0	0.54	0	0.005472	0.044548
	پاییز	صبح	0	0.31	0	0.006639	0.038637
		عصر	0	0.35	0	0.009282	0.041064
	زمستان	صبح	0	0.24	0	0.01	0.034619
		عصر	0	0	0	0	0
NO ₂	تابستان	صبح	0.07	0.139	0.1	0.103145	0.014267
		عصر	0.089	0.141	0.113	0.112403	0.00948
	پاییز	صبح	0.072	0.127	0.097	0.097555	0.008762
		عصر	0.013	0.134	0.101	0.100571	0.011961
	زمستان	صبح	0	0.243	0.065	0.066897	0.045584
		عصر	0	0.232	0.076	0.076503	0.036136
O ₃	تابستان	صبح	0	0.043	0	0.004925	0.007919
		عصر	0	0.044	0	0.006381	0.009066
	پاییز	صبح	0	0.046	0.005	0.009612	0.011777
		عصر	0	0.004	0	2.5477×10^{-5}	0.000318216
	زمستان	صبح	0	0.019	0	0.000992	0.003888
		عصر	0	0	0	0	0
PM ₁₀	تابستان	صبح	0.005	0.147	0.015	0.01921	0.016588
		عصر	0.003	0.108	0.015	0.01986	0.015213
	پاییز	صبح	0.007	0.104	0.017	0.021167	0.014488
		عصر	0.012	0.124	0.033	0.036855	0.017758
	زمستان	صبح	0.004	0.198	0.021	0.025789	0.02285
		عصر	0.002	0.121	0.014	0.018743	0.01776



شکل 2- توزیع غلظت گوگرد دی‌اکسید در روزهای پنجشنبه

Fig. 2- Distribution of sulfur dioxide concentrations on Thursdays

در استاندارد ملی هوای پاک ایران برای محیط‌های آزاد، در بازه زمانی یک‌ساعته، مقدار $196 \mu\text{g}/\text{m}^3$ پیشنهاد شده است (DOE, 2016). استاندارد پیشنهادی سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (USEPA) برای بازه زمانی یک‌ساعته غلظت 75 ppb را مجاز برشمرده است (USEPA, 2023). خطوط راهنمای سازمان جهانی بهداشت (WHO) غلظت را برای مدت زمان 10 دقیقه و 24 ساعته به ترتیب $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ و 40 پیشنهاد می‌کند (WHO, 2021). در مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده با این سه استاندارد مشاهده می‌شود که در مواردی محدود مقادیر از حد استاندارد تخطی داشته ولی در اغلب موارد پایین‌تر از حد استاندارد ثبت شده است.

بررسی مطالعات مشابه این پژوهش نشان می‌دهد که پیاده‌راه‌سازی و محدودیت‌های ترافیکی معمولاً تأثیر معناداری بر غلظت SO_2 ندارند، زیرا عمدتاً از منابع غیرترافیکی مانند صنایع، سوخت‌های پُرگوگرد و گرمایش خانگی منتشر می‌شود. ارزیابی مناطق کم‌انتشار و سیاست محدودیت ترافیکی حاکی از آن است که تغییرات SO_2 اغلب ناچیز بوده و بیشتر به سیاست‌های انرژی و کنترل صنعتی وابسته است تا مداخلات ترافیکی موضعی (Holman et al., 2015; Yang et al., 2018) و پژوهش حاضر نیز موید نتایج به دست آمده در پژوهش‌های پیشین است.

2-3 نیتروژن دی‌اکسید (NO_2)

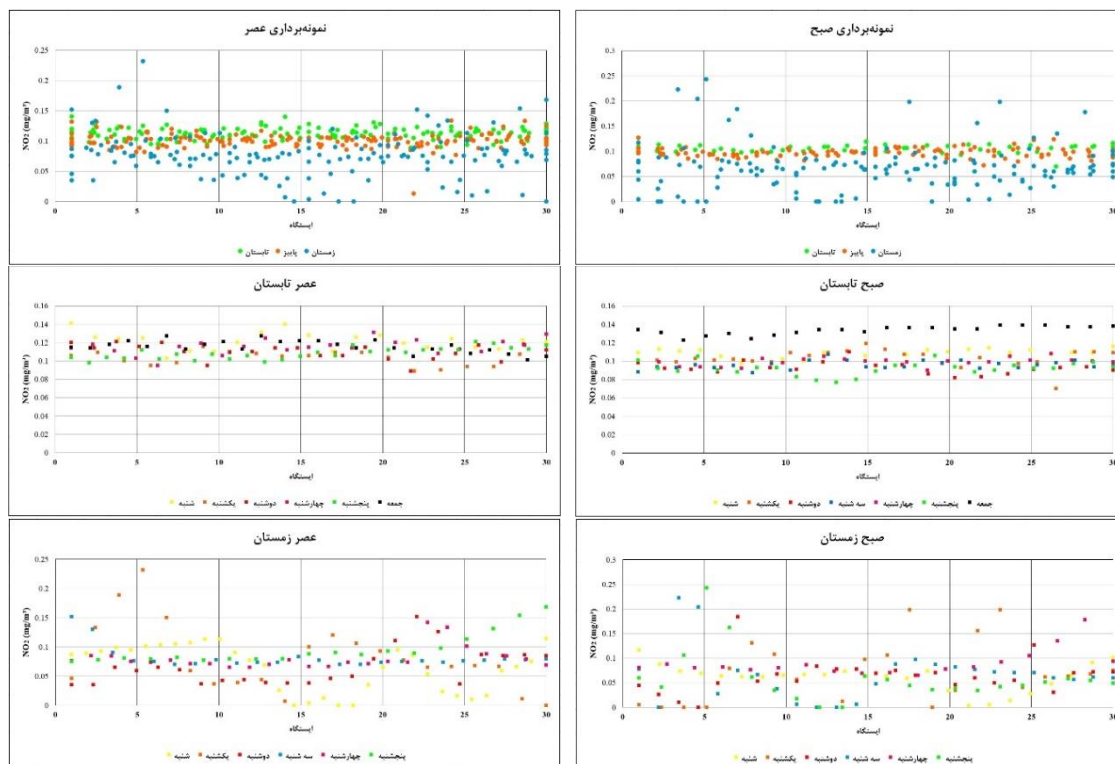
نیتروژن دی‌اکسید (NO_2) در محیط‌های شهری رابطه مستقیم، قوی و اثبات‌شده‌ای با ترافیک شهری دارد و در اغلب شهرها شاخص‌ترین آلاینده ترافیکی محسوب می‌شود. انواع وسایل نقلیه (بنزینی، دیزلی و موتور سیکلت‌ها) در انتشار این ترکیب سهمیم هستند. دمای بالای احتراق در کنار نسبت هوا به سوخت بالاتر در خودروهای دیزلی باعث می‌شود سهم این گروه از خودروها در مقایسه با خودروهای بنزینی بیشتر باشد. در نتیجه سرما و برودت هوا، مصرف بیشتر سوخت و افزایش فراوانی وارونگی‌های دمایی در فصل زمستان انتظار می‌رود غلظت این ترکیب در فصول سرد سال بالاتر باشد.

در مقابل، فصول گرم سال به‌واسطه تأثیر فرآیندهای فتوشیمیایی و اختلاط بهتر جوی غلظت‌های پایین‌تری را تجربه کنند.

نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد غلظت‌های ثبت شده از توزیع نرمال برخوردار نیستند و باید از آزمون‌های ناپارامتریک (Mann-Whitney U و Kruskal-Wallis) در تحلیل‌های آماری استفاده کرد.

در بازه‌های زمانی صبح و عصر، الگوی رفتاری و توزیع غلظت نیتروژن دی‌اکسید در فصول تابستان و زمستان تقریباً مشابه بود. از نظر کمی، غلظت‌های صبحگاه کمی پایین‌تر و در گستره محدودتری قرار می‌گیرد. این در حالی است که رفتار انتشار در فصل زمستان کاملاً متفاوت از دو فصل قبلی است. غلظت‌ها اغلب پایین‌تر و در گستره وسیع‌تری توزیع شده‌اند. وجود پیاده‌راه در فصل زمستان و در بازه زمانی صبح غلظت‌های پایین نیتروژن دی‌اکسید را تجربه کرده ولی در عصرهنگام تأثیر مثبتی در مسیر پیاده‌راه به چشم نمی‌خورد (شکل 3). نتایج آزمون Kruskal-Wallis نشان داد اختلاف غلظت NO_2 فصول مختلف از نظر آماری بسیار معنی‌دار است ($\chi^2 = 306.143$; $\text{df} = 2$; $p < 0.001$). هر سه فصل به‌طور معنی‌داری با یکدیگر متفاوت هستند به‌طوری‌که بیشترین غلظت در تابستان و کمترین در زمستان مشاهده شد.

مقایسه غلظت‌ها به‌صورت روزانه نیز نشان داد در فصل تابستان بازه زمانی صبح غلظت‌های پایین‌تری نسبت به عصر دارد. بالاترین غلظت‌ها در صبح جمعه ثبت شده است و با توجه به باز بودن مسیر پیاده‌راه برای خودروها در این زمان، تفاوت محسوسی میان پیاده‌راه و مسیر خودرویی وجود ندارد. عصرهای تابستان روزهای شنبه غلظت‌های بالاتر را تجربه کرده‌اند اما تفاوت نسبت به دیگر روزهای هفته قابل توجه نیست. از نظر آماری، اختلاف غلظت بین نوبت صبح و عصر بسیار معنی‌دار است ($U = 109914$; $Z = 4.920$; $p < 0.001$). غلظت در ساعات عصر به‌طور معنی‌داری بالاتر از صبح است و این یافته با نتایج آزمون تی نیز هم‌خوانی دارد.



شکل 3- توزیع غلظت نیتروژن دی اکسید در بازه های زمانی مختلف

Fig. 3- Distribution of nitrogen dioxide concentration in different time intervals

با $(\chi^2 = 62.445; df = 2; p < 0.001)$ آزمون تعقیبی با تصحیح Bonferroni نشان داد که غلظت در روزهای کاری به طور معنی داری بالاتر از پنجشنبه و جمعه است، اما بین جمعه و پنجشنبه تفاوت معنی داری وجود ندارد. این یافته نشان می دهد که ترافیک روزهای کاری (شنبه تا چهارشنبه) نقش تعیین کننده ای در افزایش غلظت دارد.

استاندارد هوای پاک ایران (DOE, 2016) برای نیتروژن دی اکسید در بازه زمانی یک ساعته غلظت $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ را پیشنهاد می کند که تقریباً در همه موارد رعایت شده است. سازمان جهانی بهداشت در بازه زمانی 24 ساعته $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ را توصیه می کند (WHO, 2021) که به مراتب سختگیرانه تر از راهنماهای قبلی است. سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا نیز غلظت 100 ppb (معادل $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 188 در میانگین 1 ساعته را اعلام نموده است (USEPA, 2023).

در پژوهش Salas و همکاران (2021) اعمال محدودیت های ترافیکی در مقیاس وسیع به کاهش معنادار غلظت NO_2 در هسته مرکزی شهر مادرید منجر

همچنان تأثیر مثبتی از وجود پیاده راه بر کاهش سطح آلاینده های نیتروژن دی اکسید مشهود نیست. آزمون Kruskal-Wallis نیز نشان داد که اختلاف غلظت بین سه منطقه (پیاده راه، میدان و خیابان خودرویی) از نظر آماری معنی دار نیست، هر سه منطقه در سطح مشابهی قرار دارد و احداث پیاده راه تأثیر معناداری بر تغییر غلظت این آلاینده نداشته است ($\chi^2 = 2.044; df = 2; p = 0.360$). این یافته نشان می دهد که با وجود حذف تردد خودرو در محدوده پیاده راه، غلظت NO_2 در این منطقه تفاوت قابل توجهی با مسیر خودرویی مجاور ندارد. در ادامه می توان ادعا کرد برای فصل پاییز تفاوت محسوسی بین روزهای مختلف هفته یا بازه های زمانی صبح و عصر مشاهده نشد. در فصل زمستان نیز همانگونه که پیش تر اشاره شده تنوع و گستره غلظت ها نسبت به دو فصل قبلی محسوس و شاید بتوان روزهای شنبه و پنجشنبه را متفاوت از روزهای دیگر پنداشت. نتایج آزمون آماری نشان داد اختلاف غلظت بین گروه های مختلف روزهای هفته (روزهای کاری، پنجشنبه ها و جمعه ها) از نظر آماری بسیار معنی دار است

شد. پژوهش دیگری که به ارزیابی تأثیر طرح‌های محله کم ترافیک (LTN) بر کاهش غلظت NO_2 پرداخته بود (Yang et al., 2022) نیز نشان داد اجرای این قبیل طرح‌ها با کاهش ترافیک عبوری می‌تواند تأثیر مثبتی در بهبود کیفیت هوا داشته باشد اما این اثر در خیابان‌های مرزی یکنواخت نبوده و شواهدی از بازتوزیع ترافیک به معابر اطراف مشاهده شد. در پژوهش دیگری که با بهره‌گیری از داده‌های مبتنی بر علم شهروندی و مدل‌سازی سناریو محور به بررسی میزان مواجهه دانش‌آموزان با آلودگی هوا انجام شد، نتایج بیانگر کاهش مؤثر غلظت آلاینده‌های ناشی از ترافیک، به‌ویژه NO_2 در پی مداخلات محدودکننده ترافیک در اطراف مدارس، مانند طرح‌های خیابان مدرسه و محدودیت تردد خودرو بود (Boniardi et al., 2025). مقایسه پژوهش حاضر با این سه مطالعه نشان می‌دهد موفقیت سیاست‌های پیاده راه سازی و اعمال محدودیت‌های ترافیکی در کاهش NO_2 بیش از آنکه به حذف یک محور سواره وابسته باشد، به مقیاس مداخله، مدیریت ترافیک پیرامونی و یکپارچگی سیاست‌های حمل‌ونقل شهری بستگی دارد. در منطقه مورد مطالعه تردد خودروها تا ساعت 9 صبح در محور پیاده راه آزاد بود. در دیگر ساعات روز نیز ورود خودروها جهت تخلیه بار و عدم وجود مانع برای تردد موتورسیکلت‌ها باعث شد علیرغم تغییر کاربری به پیاده راه، الزام کافی برای جلوگیری از ورود وسایل نقلیه به منطقه انجام نشود و در نتیجه پیاده راه در تحقق اهداف محیط زیستی خود به نتایج مورد انتظار نرسد.

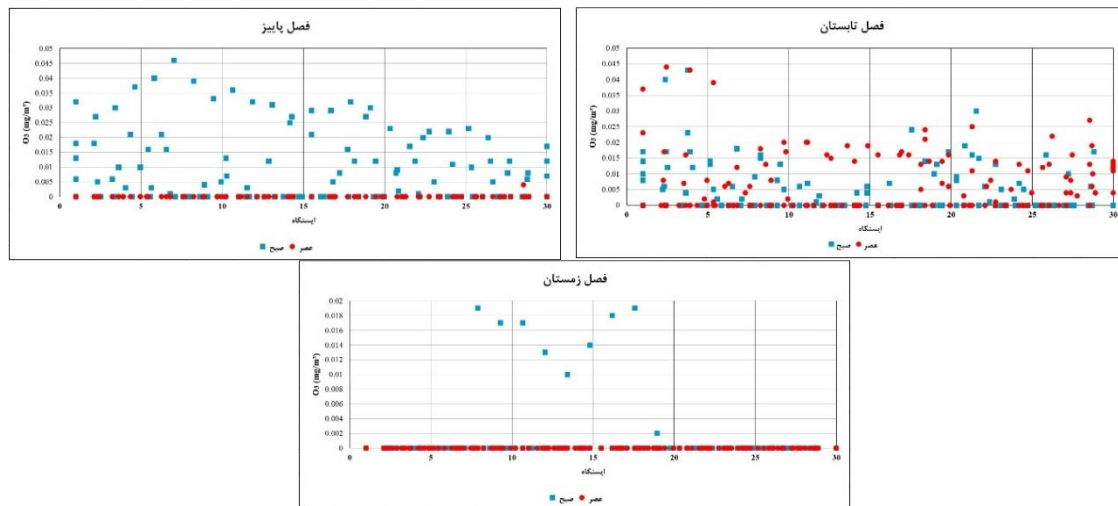
3-3-3-3 اثر (O₃)

برخلاف دو آلاینده قبلی، ازن یک آلاینده ثانویه و از منبع مشخصی منتشر نمی‌شود بلکه در نتیجه حضور دیگر آلاینده‌ها (از قبیل NO_x و ترکیبات آلی فرار) به‌عنوان پیش‌ساز و تابش نور خورشید و اشعه UV تولید می‌شود. انتظار می‌رود در بازه‌های زمانی بعد از ظهر در نتیجه تابش شدید خورشید و تشدید UV و نیز تجمع آلاینده‌های پیش‌ساز و کاهش NO آزاد، غلظت این ترکیب افزایش یابد. به بیانی ساده‌تر، ازن نتیجه غیرمستقیم ترافیک شهری است و رابطه مستقیمی بین

این دو نمی‌توان مشاهده کرد. در تأیید این فرضیه، نتایج آزمون Mann-Whitney U نشان داد که اختلاف غلظت ازن بین نوبت صبح و عصر از نظر آماری بسیار معنی‌دار است ($U = 71632.5$; $Z = -6.435$; $p < 0.001$). میانگین غلظت قبل از ظهر به‌طور معنی‌داری بالاتر از عصر است. این یافته تأیید می‌کند که غلظت ازن در ساعات صبح به‌طور معنی‌داری بیشتر از عصر است که با فرآیندهای فتوشیمیایی تولید ازن در حضور تابش خورشید هم‌خوانی دارد.

از نظر الگوی فصلی نیز انتظار می‌رود فصل تابستان بالاترین مقادیر و پاییز و زمستان با کمترین مقادیر همراه باشد. در فصل پاییز غلظت ازن در بازه زمانی عصر در همه موارد برابر صفر ولی در بازه صبح، مقادیر بالاتری مشاهده می‌شود. در فصل زمستان اکثر موارد (صبح و عصر) غلظت صفر برای ازن ثبت شده است و تنها موارد بالای صفر مربوط به روز دوشنبه و در ناحیه اطراف میدان انقلاب تا امام‌زاده ابراهیم است.

جهت بررسی این ادعا از آزمون Kruskal-Wallis استفاده شد و نشان داد که اختلاف غلظت ازن بین فصول مختلف از نظر آماری بسیار معنی‌دار است ($\chi^2 = 127.965$; $df = 2$; $p < 0.001$). آزمون تعقیبی با تصحیح Bonferroni ثابت کرد هر سه فصل به‌طور معنی‌داری با یکدیگر متفاوت هستند، به‌طوری‌که بیشترین غلظت ازن در تابستان و کمترین آن در زمستان مشاهده شد. این یافته به‌وضوح نشان‌دهنده نقش تعیین‌کننده تابش خورشیدی و دمای هوا در تولید فتوشیمیایی ازن است. ارزیابی توزیع مکانی غلظت ازن در فصول مختلف (شکل 4) نشان می‌دهد در فصل تابستان، هم در بازه زمانی صبح و هم عصر غلظت‌های بالایی از ازن ثبت شده است. اگر چه غلظت ازن در محدوده پیاده راه اندکی بالاتر از سایر مناطق بود، اما این اختلاف از لحاظ آماری تأیید نشد. آزمون Kruskal-Wallis نشان داد اختلاف غلظت ازن بین سه منطقه (پیاده راه، میدان و خیابان خودرویی) از نظر آماری معنی‌دار نیست ($\chi^2 = 4.646$; $df = 2$; $p = 0.098$). این یافته نشان می‌دهد که احداث پیاده راه تأثیر معناداری بر تغییر غلظت ازن نداشته است.



شکل 4- توزیع غلظت ازن در بازه‌های زمانی مختلف

Fig. 4- Distribution of ozone concentration in different time intervals

ترافیکی بر کاهش آلاینده‌های هوا انجام شد (Atkinson et al., 2009) نیز نتایج مشابهی را گزارش داد به‌طوری‌که اقدامات انجام شده حتی در برخی موارد با افزایش غلظت ازن همراه بود. این نتایج نشان می‌دهد حذف ترافیک و اعمال محدودیت‌های خودرویی الزاماً به کاهش آلاینده‌های هوا، از جمله ازن، منجر نمی‌شود.

رفتار متضاد ازن و NO_2 در پژوهش حاضر (افزایش ازن در صبح و افزایش NO_2 در عصر و همچنین الگوی فصلی مشابه هر دو) مؤید رابطه فتوشیمیایی پیچیده بین این دو آلاینده است و نشان می‌دهد که مداخلات ترافیکی نمی‌توانند هر دو آلاینده را به‌طور همزمان کاهش دهند.

4-3 ذرات معلق (PM_{10})

ذرات معلق سایز 10 میکرومتر از منابع متنوعی در محیط‌های شهری منتشر می‌شوند و شناسایی منابع انتشار و سهم هر یک، امری دشوار و در اغلب موارد غیرممکن است. در یک نگاه کلی می‌توان منابع انتشار را در گروه‌های منابع طبیعی (گرد و غبارهای طبیعی، ذرات ناشی از آتش‌سوزی‌ها و ...) و منابع انسان‌ساخت (ترافیک وسایل نقلیه، عملیات تخریب و ساخت و ساز، فعالیت صنایع و ...) دانست. در برخی موارد نیز ذرات معلق به‌عنوان آلاینده ثانویه و در نتیجه واکنش‌های شیمیایی میان گازهای پیش‌ساز (مانند SO_2 ، NO_x ، NH_3 و VOCs) منتشر می‌شود.

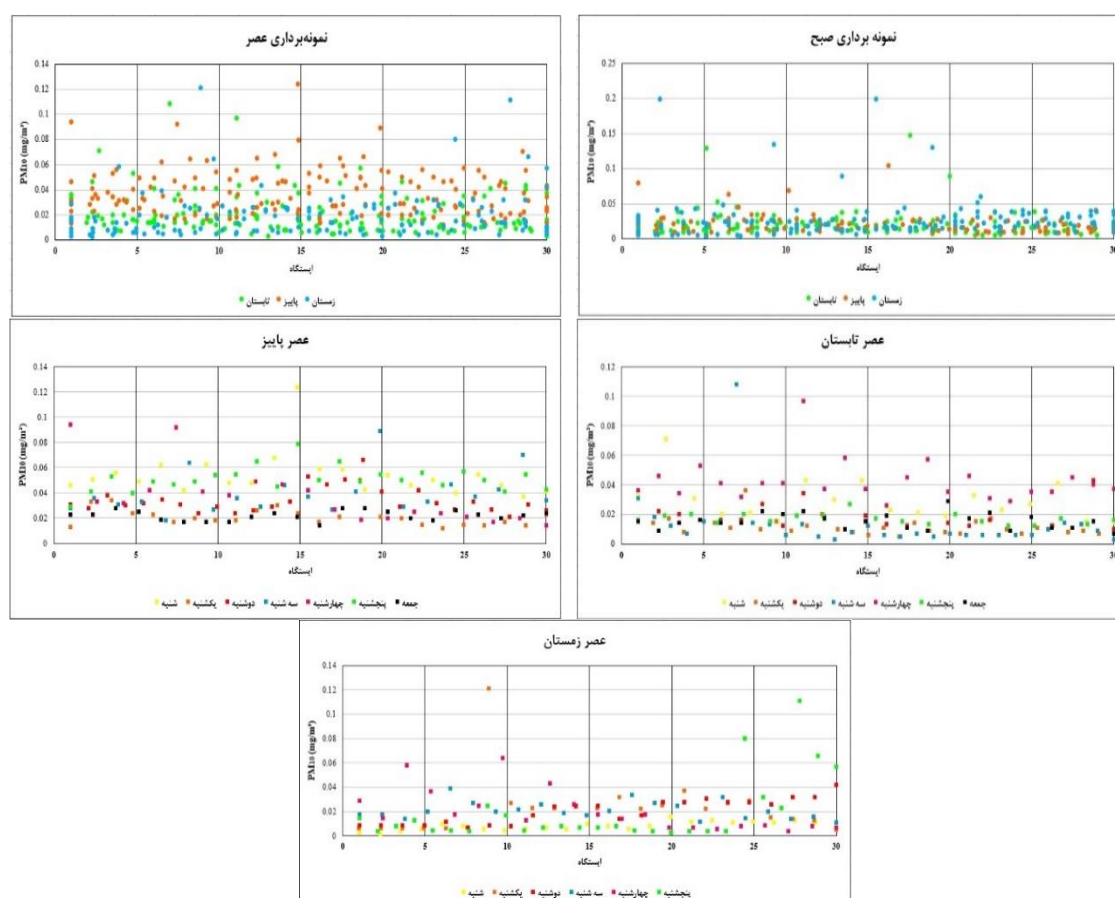
مقایسه آماری روزهای مختلف هفته نشان داد اختلاف غلظت ازن بین روزهای هفته از نظر آماری بسیار معنی‌دار است ($\chi^2 = 17.919$; $df = 2$; $p < 0.001$). غلظت ازن در روزهای کاری به‌طور معنی‌داری بالاتر از پنجشنبه و جمعه است، اما بین جمعه و پنجشنبه تفاوت معنی‌داری وجود ندارد. این یافته نشان می‌دهد که تولید ازن به‌عنوان یک آلاینده ثانویه، صرفاً با کاهش ترافیک کاهش نمی‌یابد و عوامل دیگری مانند افزایش آلاینده‌های پیش‌ساز در روزهای کاری نیز نقش مهمی ایفا می‌کنند.

استانداردهای سازمان حفاظت محیط زیست ایران (DOE, 2016)، سازمان جهانی بهداشت (WHO, 2021) و حفاظت محیط زیست آمریکا (USEPA, 2023) به ترتیب برای ازن محدودیت‌های $148 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (حداکثر هشت ساعته)، $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (میانگین هشت ساعته) و 70 ppb (معادل $137 \mu\text{g}/\text{m}^3$ میانگین هشت ساعته) را پیشنهاد داده‌اند. مقایسه مقادیر ثبت شده با استاندارد شرایط مناسب و ایمن را در همه بازه‌های زمانی و فصول نشان می‌دهد.

براساس نتایج به دست آمده، پیاده راه برای آلاینده ثانویه ازن نیز نتوانست اثر مثبتی اعمال کند و بر خلاف انتظار اولیه، عوامل فتوشیمیایی در فصل تابستان منجر به افزایش غلظت این آلاینده در محدوده پیاده راه شد. مطالعه‌ای در لندن که با هدف بررسی تأثیر اخذ عوارض

همچنین اختلاف غلظت بین فصول مختلف از نظر آماری بسیار معنی دار است ($\chi^2 = 91.943$; $df = 2$; $p < 0.001$) و غلظت فصل پاییز به طور معنی داری بالاتر از تابستان و زمستان است. با این حال، اختلاف بین تابستان و زمستان از نظر آماری معنی دار نبود. در ادامه ارزیابی، موقعیت های مکانی و روزهای هفته مورد تحلیل قرار گرفته است. نمودارها نشان می دهد وجود پیاده راه تأثیر محسوسی بر کاهش غلظت ها نداشته است ولی در نزدیکی میدان انقلاب و در نواحی که حجم بالای ترافیک اتفاق می افتد، غلظت های بالاتری برای PM_{10} ثبت شده است. نتایج آزمون Kruskal-Wallis نشان داد اختلاف غلظت ذرات معلق بین سه منطقه از نظر آماری معنی دار است ($\chi^2 = 7.932$; $df = 2$; $p = 0.019$). همچنین آزمون تعقیبی با تصحیح Bonferroni مشخص کرد غلظت در مسیر خودروها به طور معنی داری بالاتر از پیاده راه است.

اندازه گیری غلظت این ترکیب در فصول مختلف و در بازه های زمانی صبح و عصر در شکل 5 نمایش داده شده است. براساس این شکل ها، عمده مقادیر در غلظت های کمتر از 0.05 mg/m^3 ثبت شده است. در بازه زمانی صبح، تفاوت قابل توجهی میان فصول مشاهده نمی شود در حالی که در نمونه برداری های عصر، غلظت ذرات معلق در فصل پاییز بالاتر و گسترده تر از فصول تابستان و زمستان بود. بررسی تصاویر فصلی نیز تنوع بالاتر غلظت در بازه های زمانی عصر را تأیید می کند. جهت اطمینان از صحت این ادعا از آزمون های آماری استفاده شد. براساس نتایج، اختلاف غلظت PM_{10} بین نوبت صبح و عصر از نظر آماری معنی دار است و میانگین غلظت عصر به طور معنی داری بالاتر از صبح است ($U = 112833.5$; $Z = 2.865$; $p = 0.004$). احتمال داده می شود ذرات معلق در ساعات عصر ناشی از انباشت ترافیک، کاهش لایه مرزی و فعالیت های شهری در طول روز باشد.



شکل 5- توزیع غلظت ذرات معلق (PM_{10}) در بازه های زمانی مختلف

Fig. 5- Distribution of particulate matter (PM_{10}) concentration in different time intervals

(EPA, 2024) برای ذرات معلق سایز 10، هر دو غلظت $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (بازه زمانی 24 ساعته) را پیشنهاد داده است. سازمان جهانی بهداشت (WHO, 2021) میانگین 24 ساعته $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ را برای PM_{10} توصیه کرده است. اگرچه نمونه برداری های این پژوهش در ساعات پیک ترافیک و به صورت کوتاه مدت انجام شده است، اما در برخی موارد غلظت های اندازه گیری شده از این استاندارد فراتر رفته اند. با این حال، به دلیل تفاوت بازه زمانی استاندارد (24 ساعته) با مدت نمونه برداری (لحظه ای)، قضاوت قطعی درباره رعایت یا عدم رعایت استاندارد WHO نیازمند پایش های طولانی مدت تر است.

در رابطه با ذرات معلق سایز 10 میکرون (PM_{10})، نتایج نشان داد بیش از آنکه تابع حذف خودرو از مسیر باشد از شرایط محیطی و منابع ثانویه تأثیر پذیرفته است. مطالعات دیگر نیز موید این واقعیت هستند که احداث پیاده راه یا محدودیت های ترافیکی اغلب تأثیر قابل توجهی بر غلظت PM_{10} ندارند (Chen et al., 2020; Polichetti, 2017) و این آلاینده عمدتاً از منابع غیرترافیکی، باز تعلیق گردوغبار و منابع ثانویه تأمین می شود (Qiu et al., 2017). بنابراین تحلیل رفتار این ترکیب باید همزمان با شناسایی منابع و شرایط هواشناسی انجام شود.

به طور کلی، اگرچه غلظت آلاینده های اندازه گیری شده در اغلب موارد کمتر از استانداردهای ملی و USEPA بوده است، اما در مقایسه با استاندارد سخت گیرانه WHO (به ویژه برای PM_{10} و NO_2)، برخی موارد تخطی مشاهده شد که ضرورت پایش مستمر و اتخاذ سیاست های کاهش آلودگی را نشان می دهد.

4- نتیجه گیری

ارزیابی سطح آلاینده های هوا در پیاده راه سبزه میدان شهر زنجان و مقایسه با خیابان مجاور (در همان راستا، موقعیت، جهت و کاربری) در فصول مختلف، روزهای مختلف و بازه های زمانی صبح و عصر با هدف ارزیابی الگوی تغییرات و تأثیر پیاده راه بر بهبود کیفیت هوا انجام شد.

با این حال، اختلاف بین پیاده راه و میدان و میدان و خیابان از نظر آماری معنی دار نبود. بر این اساس، احداث پیاده راه تا حدی توانسته است غلظت PM_{10} را در محدوده پیاده راه نسبت به خیابان کاهش دهد، اما این کاهش برای رسیدن به تفاوت معنی دار بین هر سه منطقه کافی نبوده است. مقایسه نتایج این بخش با سه آلاینده قبلی نیز نشان می دهد تنها آلاینده ای که تفاوت معنی دار بین پیاده راه و خیابان نشان داد، PM_{10} است. اختلاف غلظت PM_{10} بین روزهای هفته (روزهای کاری، پنجشنبه و جمعه) از نظر آماری معنی دار نیست ($\chi^2 = 0.991$; $df = 2$; $p = 0.609$) و غلظت ذرات معلق در روزهای مختلف هفته الگوی مشخصی ندارد و حتی کاهش ترافیک در روزهای جمعه تأثیر معناداری بر تغییر غلظت این آلاینده نداشته است. وجود منابع غیر ترافیکی، بازتعلیق گرد و غبار و تردها در دیگر مناطق می تواند از عوامل مؤثر در این نتیجه گیری باشد. برخلاف NO_2 که عمدتاً ناشی از ترافیک است، PM_{10} از منابع متنوع تری (مانند گرد و غبار، فعالیت های ساختمانی، صنعت، منابع طبیعی و ثانویه) منتشر می شود که الگوی روزانه مشخصی ندارند. شهر زنجان در زمینه فعالیت صنایع سرب و روی جایگاه ویژه و شاخصی در کشور دارد. فرآیند اسیدشویی در این گروه از صنایع منجر به تولید ذرات گرد و غبار بسیار ریز می شود و در اثر دپوی سطحی به راحتی در معرض جابه جایی و انتشار قرار می گیرند. این موضوع می تواند توجیه کننده غلظت های نسبتاً بالای PM_{10} در منطقه مورد مطالعه (حتی در محدوده پیاده راه) باشد و نشان می دهد که بخش قابل توجهی از آلودگی ذرات معلق در این شهر، ریشه در فعالیت های صنعتی دارد تا ترافیک شهری؛ هر چند اثبات این ادعا نیازمند مطالعات بیشتری است. فاصله ناکافی این صنایع از منطقه شهری در کنار عدم توجه به الگوی باید غالب در مکان یابی این گروه از صنایع باعث شده است انتشار ذرات معلق غبار ناشی از فعالیت این گروه به یک معضل جدی در حوزه محیط زیست و سلامت در شهر زنجان تبدیل شود.

استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست ایران (DOE, 2016) و سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا

غلظت گوگرد دی اکسید (SO_2) در اغلب موارد بسیار پایین یا برابر صفر ثبت شد و الگوی زمانی مشخصی از نظر صبح و عصر مشاهده نگردید. فصل پاییز به طور معناداری نسبت به دیگر فصول، غلظت‌های بالاتری را تجربه می‌کند. ثبت مقادیر بالاتر در روزهای خاص هفته و در نواحی پرتردد نشان می‌دهد که پیاده راه به طور کامل از تأثیر منابع متحرک مصون نیست. همچنین، برخلاف سهم پایین منابع و ریسک محدود این آلاینده، پیاده راه نتوانسته در حذف این آلاینده تأثیر قابل توجهی داشته باشد.

نیترژن دی اکسید (NO_2) به عنوان شاخص‌ترین آلاینده ترافیکی، کاهش یکنواخت و قابل اتکایی در مسیر پیاده راه نشان نداد. وجود پیاده راه، به علت عدم کنترل و مدیریت ترافیک محیط اطراف و کاهش تردها، تأثیری بر این آلاینده نداشت.

بیشترین مقادیر غلظت ثبت شده در بازه‌های زمانی عصر (در مقایسه با صبح)، روزهای کاری (نسبت به روزهای پایانی هفته) و تابستان (نسبت به زمستان) است.

بررسی الگوی تغییرات ازن، به عنوان یک آلاینده ثانویه، نشان داد دما و تابش خورشیدی در کنار وجود آلاینده‌های پیشران، می‌تواند جایگزین ترافیک به عنوان منبع انتشار باشد. به طوری که قبل از ظهر در مقایسه با عصرها، تابستان در برابر فصول سرد سال و روزهای کاری بالاترین داده‌های غلظت را به خود اختصاص داده‌اند.

از میان چهار آلاینده مورد بررسی، ذرات معلق سایز 10 تنها آلاینده‌ای بود که پیاده راه در کاهش غلظت آن نقش معناداری ایفا کرده بود. هرچند وجود عوامل جانبی از جمله صنایع فعال در مجاورت شهر زنجان به عنوان عامل مؤثر و کلیدی در انتشار ذرات معلق در منطقه باعث شده است الگوی انتشار این آلاینده مبرا از ترافیک و روزهای هفته باشد.

نتایج پژوهش نشان می‌دهد که پیاده راه‌سازی به تنهایی و بدون یک بسته سیاستی جامع (شامل مدیریت ترافیک پیرامونی، کنترل منابع انتشار آلاینده‌ها و درک فرآیندهای شیمیایی) نمی‌تواند به بهبود کیفی هوای شهری منجر شود. اگرچه پیاده راه سبز میدان زنجان کارکردهای اجتماعی و کالبدی خود را به خوبی ایفا کرده

است، اما در حوزه محیط زیستی دستاورد قابل قبولی نداشته است. بنابراین، برای کاهش قطعی آلاینده‌ها و اثبات رابطه علت و معلولی، انجام مداخلات ترافیکی در مقیاس وسیع‌تر همراه با پایش مستمر قبل و بعد از اجرا ضروری است.

مهم‌ترین محدودیت این پژوهش، فقدان داده‌های پیش از اجرا بود که امکان استنتاج علیت قطعی بین احداث پیاده راه و تغییر غلظت آلاینده‌ها را فراهم نمی‌کند. همچنین، عدم اندازه‌گیری آلاینده‌های مهم ترافیکی مانند CO ، $PM_{2.5}$ و Black Carbon، تحلیل کمی تأثیر پارامترهای هواشناسی بر غلظت آلاینده‌ها و عدم انجام آنالیز شیمیایی برای شناسایی دقیق منابع انتشار، از دیگر محدودیت‌های این پژوهش محسوب می‌شوند. با وجود این محدودیت‌ها، نتایج این مطالعه می‌تواند به عنوان یک پژوهش پایه برای مطالعات آینده در زمینه ارزیابی پیاده راه‌های شهری در ایران مورد استفاده قرار گیرد.

پی‌نوشت

¹ Traffic Related Air Pollution (TRAP)

² Quasi-Experimental

³ Post-test Only Non-equivalent Control Group Design

⁴ Spatial Comparison

References

Akbarzadeh, A., Ahmadi, H., & Azadeh, R. (2016). Evaluation the desirability of urban sidewalk based on qualitative factors Case study: Alam al-Hoda sidewalk in Rasht city. *Journal of Research and Urban Planning*, 7(25), 125-140. 20.1001.1.22285229.1395.7.25.7.6. [In Persian]

Amorim, J. H., Valente, J., Cascão, P., Rodrigues, V., Pimentel, C., Miranda, A. I., & Borrego, C. (2013). Pedestrian exposure to air pollution in cities: modeling the effect of roadside trees. *Advances in Meteorology*, 2013(1), 964904.

Araghiyan, S., & Rafiiyan, M. (2016). Evaluating the effects of creating pedestrian routes within the neighborhood and improving the environmental quality of residents of Deh Vanak, Tehran. Master's degree, Tarbiat Modares University, Tehran- Iran. [In Persian]

Atkinson, R. W., Barratt, B., Armstrong, B., Anderson, H. R., Beevers, S. D., Mudway, I. S., . . . Tonne, C. (2009). The impact of the congestion



improve urban air quality in European cities. *Atmospheric environment*, 111, 161-169.

Islamic Consultative Assembly Research Center. (2025). Consequences and Costs of Air Pollution in Iran. Tehran. Serial Number: 20676, Subject Number: 250. [In Persian]

Kaur, S., Nieuwenhuijsen, M., & Colville, R. (2005). Pedestrian exposure to air pollution along a major road in Central London, UK. *Atmospheric environment*, 39(38), 7307-7320.

O'Regan, A. C., Grythe, H., Sousa-Santos, G., & Nyhan, M. M. (2024). Modeling the Impact of Pedestrianization on Urban Air Quality. Paper presented at the 2024 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2).

Polichetti, G. (2017). Effect of travel restriction on PM₁₀ concentrations in Naples: One year of experience. *Atmospheric environment*, 151, 12-16.

Qiu, Z., Xu, X., Song, J., Luo, Y., Zhao, R., Zhou, B. X. W., . . . Hao, Y. (2017). Pedestrian exposure to traffic PM on different types of urban roads: A case study of Xi'an, China. *Sustainable cities and society*, 32, 475-485.

Sadeghi, N., & Sobhan-Ardakani, S. (2013). Feasibility study of sidewalk construction as a catalyst for improving the quality of urban space (Case study: Bu Ali axis, Hamadan). *Haft Hesar Journal of Environmental Studies*. 2(5), 13-20. [In Persian]

Salas, R., Perez-Villadoniga, M. J., Prieto-Rodriguez, J., & Russo, A. (2021). Were traffic restrictions in Madrid effective at reducing NO₂ levels? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 91, 102689.

Shirouyezad, B., & Doozdoozani, Y. (2025). Explaining the factors affecting citizens' satisfaction with the vitality of urban sidewalks (Case study: Kermanshah Doctors' Sidewalk). *Interdisciplinary studies in architecture and urbanism development*. 4(1), 155-172. 10.71882/jisaud.2025.1126928. [In Persian]

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2023). National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) for Sulfur Dioxide. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>

charging scheme on ambient air pollution concentrations in London. *Atmospheric environment*, 43(34), 5493-5500.

Boniardi, L., Nobile, F., Stafoggia, M., Michelozzi, P., & Ancona, C. (2025). Assessing the impact of traffic restriction interventions on school air quality: a citizen science-based modelling study. *Environmental research*, 277, 121562.

Cepeda, M., Schoufour, J., Freak-Poli, R., Koolhaas, C. M., Dhana, K., Bramer, W. M., & Franco, O. H. (2017). Levels of ambient air pollution according to mode of transport: a systematic review. *The Lancet Public Health*, 2(1), 23-34.

Chen, S., Zheng, X., Yin, H., & Liu, Y. (2020). Did Chinese cities that implemented driving restrictions see reductions in PM₁₀? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 79, 102208.

DOE. (2016). Outdoor Air Quality Standards. Tehran: Comprehensive Monitoring Office. <https://nacc.doe.ir/portal/home/> [In Persian]

Fallah Manshadi, E., Habibi, S., & Roohi, A. (2012). Pedestrian zones: from vision to action evaluation of pedestrian zone in Tehran bazaar. *Journal of Architecture and Urban Planning*, 5(9), 45-63. 10.30480/AUP.2012.144. [In Persian]

Ghorbani, H., Zahedi, S., & Hedayati-Aghmashhadi, A. (2015). Environmental impact assessment and improvement of ecological performance of Nature Bridge sidewalk construction in the district 3 of Tehran. *Journal of Geographical Urban Planning Research*. 3(2), 247-261. 10.22059/jurbangeo.2015.55352. [In Persian]

Habibi, K., & Haghi, M. R. (2018). The comparison of Iranian and foreign footpaths based on ANP method. *Journal of Iranian Architecture and Urbanism*, 9(1), 5-19. [In Persian]

Haydari, M., & Mohammadi, S. (2020). The desirability of the quality of urban sidewalks (Case study: green sidewalk in Zanzan city square. *Geography (Journal of the Iranian Geographical association)*. 18(65), 69-82. [In Persian]

Holman, C., Harrison, R., & Querol, X. (2015). Review of the efficacy of low emission zones to



Geneva: WHO. ISBN: 978-92-4-003422-8. <https://iris.who.int/handle/10665/345329>.

World Health Organization (WHO). (2024). Development Goal indicator 3.9.1: mortality attributed to air pollution. Geneva: WHO Retrieved from [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).

Yang, M., Ma, T., & Sun, C. (2018). Evaluating the impact of urban traffic investment on SO₂ emissions in China cities. *Energy Policy*, 113, 20-27.

Yang, X., McCoy, E., Hough, K., & de Nazelle, A. (2022). Evaluation of low traffic neighborhood (LTN) impacts on NO₂ and traffic. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 113, 103536.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2024). National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) for Particulate Matter (PM). <https://www.epa.gov/pm-pollution/national-ambient-air-quality-standards-naaqs-pm>

Van Soesbergen, A., & Mulligan, M. (2024). Net impact of London Strand-Aldwych pedestrianisation project on air quality and noise. *Urban climate*, 58, 102231.

World Health Organization (WHO). (2014). Air quality deteriorating in many of the world's cities. last modified.

World Health Organization (WHO). (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.