



Civil and Project Journal
<http://www.cpjournals.com/>

Research Article

A Review of Subway Development Impact on Air Pollution, a Case Study of China

SeyedAref Hosseini^{1*}, Reza Amin², Ali Khodaii³

1*-B.Sc. student, Civil & Environmental Engineering, AmirKabir University of Technology, Tehran, Iran

2- M.Sc. graduate, Transportation Engineering, AmirKabir University of Technology, Tehran, Iran

3-Full professor, Department of Civil & Environment, AmirKabir University of Technology, Tehran, Iran

Received: 19 April 2024; Revised: 01 May 2024; Accepted: 18 May 2024; Published: 21 May 2024

Abstract

This study meticulously reviews the impact of subway development on air pollution, focusing on China as a case study. Amidst rapid urbanization and escalating private vehicle usage, China's air pollution has soared, prompting significant investments in public transportation as a mitigation strategy. This article examines how subway expansions correlate with changes in air quality across multiple Chinese cities, drawing from high-frequency data on air pollutants like PM₁₀, PM_{2.5}, NO_x, SO₂, and CO. A notable finding is that new subway openings generally lead to a decrease in PM₁₀ and PM_{2.5} levels, with reductions averaging 17% across different cities. However, the study also identifies complexities in the relationship between subway development and air pollution reduction. While short-term impacts occasionally show increased pollutant levels, likely due to construction activities, long-term analysis reveals more consistent improvements. For example, after subway line inaugurations, PM₁₀ levels initially rise by approximately 5% but subsequently decrease by around 9% over more extended periods. These dynamics underscore the effectiveness of subways in reducing air pollution, particularly in high-density urban areas, though the benefits may vary based on local conditions and the scale of the subway network. By integrating comprehensive spatial econometric analyses, this research not only highlights the direct benefits of subway infrastructure on environmental health but also enriches the policy dialogue concerning sustainable urban transport solutions in mega-urban settings.

Keywords: Subway Development, Air Pollution, Chinese Cities, particulate matter, Environmental Impacts

Cite this article as Hosseini, S., Amin, R. and Khodaii, A. (2024). A Review of subway development impact on air pollution, a case study of China. (e195432). Civil and Project Journal, 6(3), e195432 doi: <https://doi.org/10.22034/cpj.2024.454841.1281>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2024 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: arefhoseini250@yahoo.com



نشریه عمران و پروژه
<http://www.cpjournals.com/>

مروری بر اثر توسعه مترو بر آلودگی هوا، مطالعه موردی چین

سیدعارف حسینی^{۱*}، رضا امین^۲، علی خدایی^۳

- ۱- دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران برنامه ریزی حمل و نقل، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۳- استاد تمام و عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۳۱ فروردین ۱۴۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۲ اردیبهشت ۱۴۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۲۹ اردیبهشت ۱۴۰۳؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ خرداد ۱۴۰۳

چکیده

این مطالعه تأثیر توسعه مترو را بر آلودگی هوا، با تمرکز بر چین به عنوان یک مطالعه موردی، مرور می‌کند. در میان شهرنشینی سریع و افزایش استفاده از وسایل نقلیه شخصی، آلودگی هوای چین به شدت افزایش یافته است و باعث سرمایه گذاری قابل توجهی در حمل و نقل عمومی به عنوان یک استراتژی کاهش شده است. این مقاله به بررسی این موضوع می‌پردازد که چگونه گسترش مترو با تغییرات کیفیت هوا در چندین شهر چین مرتبط است و از داده‌های با فرکانس بالا در مورد آلاینده‌های هوا مانند ذرات معلق، اکسیدهای نیتروژن و مونوکسید کربن استفاده می‌کند تا به کاهش متوسط ۱۷٪ در سطوح ذرات معلق در شهرهای مختلف دست یابد. با این حال، این مطالعه همچنین پیچیدگی‌هایی را در ارتباط بین توسعه مترو و کاهش آلودگی هوا شناسایی می‌کند. در حالی که احتمالاً به دلیل فعالیت‌های ساخت و ساز، اثرات کوتاه مدت گهگاه افزایش سطوح آلاینده را نشان می‌دهد، تجزیه و تحلیل بلندمدت بهبودهای پایدارتری را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، پس از افتتاح خط مترو، سطح ذرات معلق با قطر کمتر از ۱۰ میکرومتر در ابتدا تقریباً ۵٪ افزایش می‌یابد اما متعاقباً در دوره‌های طولانی‌تر حدود ۹٪ کاهش می‌یابد. این پویایی‌ها بر اثربخشی متروها در کاهش آلودگی هوا، به ویژه در مناطق شهری با تراکم بالا تأکید می‌کند، اگرچه مزایا ممکن است بر اساس شرایط محلی و مقیاس شبکه مترو متفاوت باشد. این تحقیق با ادغام تحلیل‌های اقتصادسنجی فضایی جامع و سایر روش‌های تحلیلی، نه تنها مزایای مستقیم زیرساخت‌های مترو را بر سلامت محیط زیست برجسته می‌کند، بلکه گفت‌وگوی سیاستی در مورد راه‌حل‌های حمل و نقل شهری پایدار در محیط‌های کلان شهری را نیز غنی می‌کند.

کلمات کلیدی: توسعه مترو، آلودگی هوا، شهرهای چین، ذرات معلق، تأثیرات زیست‌محیطی

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: arefhoseini250@yahoo.com

۱- مقدمه

آلودگی هوا به عنوان یکی از مهم ترین چالش های زیست محیطی پیش روی مناطق شهری در سراسر جهان، به ویژه در کشورهای در حال توسعه و به سرعت در حال صنعتی شدن ظاهر شده است. اثرات نامطلوب آلودگی هوا بر سلامت انسان، سیستم های زیست محیطی و بهره وری اقتصادی به خوبی مستند شده است، که منجر به نگرانی های فزاینده و خواستار استراتژی های کاهش موثر می شود (Zhao et al., 2019).

در چین، مشکل آلودگی هوا به سطوح هشداردهنده ای رسیده است، به طوری که شهرهای بزرگ اغلب مملو از مه و دود خطرناک هستند و از استانداردهای ملی و بین المللی کیفیت هوا فاصله زیادی دارند. مقصر اصلی مشکلات آلودگی هوای چین، شهرنشینی سریع و صنعتی شدن است که با رشد اقتصادی قابل توجه این کشور در چند دهه گذشته همراه بوده است. با افزایش جمعیت شهری و گسترش فعالیت های صنعتی، تقاضا برای انرژی و حمل و نقل به شدت افزایش یافته است که منجر به افزایش انتشار گازهای گلخانه ای از نیروگاه ها، کارخانه ها و وسایل نقلیه شده است (Hao et al., 2016).

ذرات معلق (پی.ام)^۲، اکسیدهای نیتروژن^۳، دی اکسید گوگرد^۴، مونوکسید کربن^۵ و سایر آلاینده های مضر به طور پیوسته در هوا جمع می شوند و خطرات جدی برای سلامت عمومی و محیط زیست به همراه دارند. در میان منابع مختلف آلودگی هوا، انتشارات وسایل نقلیه به ویژه در مراکز شهری پرجمعیت به عنوان عامل مهمی مطرح شده است (Goel & Gupta, 2015).

رشد انفجاری مالکیت خودروهای شخصی که به دلیل افزایش ثروت و سیستم های ناکافی حمل و نقل عمومی ایجاد شده است، تراکم ترافیک و متعاقب آن انتشار آلاینده های ناشی از انتشار گازهای گلخانه ای را تشدید کرده است. بر اساس گزارش وزارت محیط زیست، حمل و نقل جاده ای ۶۳ درصد مونوکسید کربن، ۳۷ درصد اکسیدهای نیتروژن و بیش از ۲۰ درصد از انتشار ذرات معلق با قطر کمتر از ۲٫۵ میکرومتر (پی.ام.۲٫۵) در مناطق شهری در سراسر چین را به خود اختصاص داده است (Li & Yin, 2012).

دولت چین با درک فوریت این وضعیت، مجموعه ای از سیاست ها و ابتکارات را با هدف مهار آلودگی هوا و ترویج توسعه پایدار شهری به اجرا درآورده است. یکی از راهبردهای کلیدی، سرمایه گذاری گسترده در زیرساخت های حمل و نقل عمومی، به ویژه ساخت و توسعه سیستم های مترو در شهرهای بزرگ بوده است. مترو راه حلی امیدوارکننده برای چالش های دوگانه تراکم ترافیک و آلودگی هوا ارائه می دهد. با ارائه یک روش حمل و نقل کارآمد، قابل اعتماد و سازگار با محیط زیست، شبکه های مترو این پتانسیل را دارند که استفاده از وسایل نقلیه شخصی و انتشار آلاینده های مرتبط را کاهش دهند. «اثر مورینگ» نشان می دهد که بهبود پوشش مترو و دسترسی به آن می تواند باعث تغییر حالت از خودروهای شخصی به حمل و نقل عمومی شود، در نتیجه تراکم ترافیک را کاهش داده و سطح آلودگی هوا را کاهش می دهد (Mohring, 1972).

با این حال، تاثیر توسعه مترو بر کیفیت هوا یک معادله ساده نیست. در حالی که «اثر مورینگ» یک نتیجه مثبت را پیش بینی می کند، «اثر ویکری» معتقد است که بهبود زیرساخت های حمل و نقل ممکن است تقاضای سفر اضافی را ایجاد کند، که منجر به «اثر ایجاد ترافیک» شود که به طور بالقوه می تواند مزایای کاهش استفاده از وسایل نقلیه خصوصی را جبران کند (Duranton & Turner, 2011).

¹ China

² PM

³ NOx

⁴ SO₂

⁵ CO

⁶ PM_{2.5}

علاوه بر این، ساخت و بهره‌برداری از سیستم‌های مترو می‌تواند از طریق انتشار ذرات معلق ناشی از فعالیت‌های ساختمانی و مصرف انرژی برای تامین انرژی قطارها و ایستگاه‌ها به آلودگی هوا کمک کند (Gendron-Carrier et al., 2022). با توجه به این پیچیدگی‌ها و نیروهای متقابل، تأثیر خالص توسعه مترو بر سطوح آلودگی هوا همچنان یک سوال تجربی است که توجه قابل توجهی را از سوی محققان و سیاست‌گذاران به خود جلب کرده است. در حالی که چندین مطالعه این رابطه را در شهرها یا مناطق خاص مورد بررسی قرار داده‌اند، یافته‌ها متفاوت بوده است. برخی از بهبود کیفیت هوا پس از توسعه مترو خبر داده‌اند در حالی که دیگران هیچ تأثیر قابل توجه یا حتی کوتاه‌مدت در سطوح آلودگی پیدا نکرده‌اند (Rivers et al., 2017).

هدف این مطالعه کمک به تحقیقات رو به رشد در مورد پیوند مترو-آلودگی هوا با انجام یک تجزیه و تحلیل جامع از چندین شهر چینی است که در سال‌های اخیر تحت گسترش شبکه مترو مورد توجه قرار گرفته‌اند. این تحقیق با استفاده از داده‌های کیفیت هوا با فرکانس بالا و به‌کارگیری استراتژی‌های تجربی قوی، تأثیر توسعه مترو را بر آلاینده‌های مختلف هوا از جمله ذرات معلق با قطر کمتر از ۱۰ میکرومتر (پی.ام.۱۰)، پی.ام.۲.۵، اکسیدهای نیتروژن، دی اکسید گوگرد و مونوکسید کربن بررسی می‌کند. استفاده از یک اندازه‌گیری پیوسته از تراکم شبکه مترو، امکان بررسی تأثیر حاشیه‌ای گسترش مترو بر کیفیت هوا را فراهم می‌کند (Li et al., 2019).

این رویکرد اثرات سرریز بالقوه در کل شبکه و شهر را در نظر می‌گیرد و درک جامع تری از رابطه بین توسعه مترو و سطوح آلودگی هوا ارائه می‌دهد. علاوه بر این، این مطالعه از رویکرد تفاوت در تفاوت‌های مبتنی بر فاصله (DID) برای رسیدگی به نگرانی‌های درون‌زایی بالقوه ناشی از انتخاب مکان غیرتصادفی ایستگاه‌های مترو و عوامل مشاهده‌نشده که ممکن است بر توسعه مترو تأثیر بگذارد، استفاده می‌کند (Bajari et al., 2012).

این تحقیق با روشن کردن رابطه پیچیده بین توسعه مترو و کیفیت هوا، به تلاش‌های مداوم برای رسیدگی به چالش‌های زیست‌محیطی مبرمی که مناطق در حال شهرنشینی با آن مواجه هستند، کمک می‌کند و در عین حال طراحی و اجرای سیاست‌های حمل‌ونقل مؤثر و سرمایه‌گذاری‌های زیرساختی را نیز اطلاع‌رسانی می‌کند.

۲- مرور ادبیات

مجموعه تحقیقاتی رو به رشدی رابطه بین زیرساخت‌های حمل‌ونقل عمومی و کیفیت هوای شهری را با تمرکز ویژه بر تأثیرات سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی و مترو جدید یا توسعه یافته بررسی کرده‌اند. از یک طرف، تعدادی از مطالعات از این ایده حمایت می‌کنند که افزایش عرضه حمل‌ونقل عمومی منجر به بهبود کیفیت هوا می‌شود، در درجه اول با کاهش انتشار وسایل نقلیه از طریق اثر "انحراف ترافیک" در حالی که مسافران از خودروهای شخصی به حالت‌های حمل‌ونقل عمومی تغییر می‌کنند. (Chen & Whalley, 2012) از اولین کسانی بودند که شواهدی در این مورد پیدا کردند، با استفاده از رویکرد ناپیوستگی رگرسیون برای نشان دادن اینکه افتتاح یک خط ریلی جدید در تایپه^۳ منجر به کاهش ۵-۱۵ درصدی غلظت مونوکسید کربن (CO) شد، اگرچه آنها هیچ موردی را شناسایی نکردند.

تأثیر بر گاز اوزون^۴ سطح زمین به طور مشابه، (da Silva et al., 2012) با مقایسه سطوح آلودگی هوا در ساؤپائولو^۵ قبل، در حین و پس از اعتصاب مترو، یک تجزیه و تحلیل آزمایشی طبیعی انجام دادند و افزایش قابل مشاهده در آلاینده‌ها را در روزهای اعتصاب که استفاده از مترو کاهش یافت، یافتند. برخی نیز تخمین زدند که گسترش خدمات ریلی در آلمان از سال

¹ PM10

² Difference-in-difference

³ Taipei

⁴ O3

⁵ São Paulo

۱۹۹۴ تا ۲۰۰۴ کاهش قابل توجهی در تصادفات جاده‌ای، حجم ترافیک و انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند اکسید نیتروژن و دی اکسید نیتروژن با اثرات ضعیف‌تر بر مونوکسید کربن به همراه داشت.

شواهد جدیدتر از رشد سریع شبکه مترو در شهرهایی مانند دهلی (Goel & Gupta, 2015) و در ۱۴ شهر بزرگ چین (Liang & Xi, 2016) همچنین خطوط جدید مترو را با کاهش آلاینده‌های کلیدی خودرو مانند دی اکسید نیتروژن و مونوکسید کربن مرتبط می‌کند. مطالعات تجربی به طور کلی به مکانیسم انحراف ترافیک با نشان دادن مزایای بیشتر کیفیت هوا در مناطق با فعالیت اقتصادی بالاتر (Chen & Whalley, 2012) و در دوره‌های اوج سفر (Liang and Xi, 2016) اشاره می‌کنند که احتمال تغییر حالت بیشتر است.

با این حال، همه تحقیقات از این دیدگاه حمایت نمی‌کنند که توسعه حمل‌ونقل عمومی کیفیت هوا را بهبود می‌بخشد. برخی تحقیقات در ایالات متحده و (Rivers et al., 2016) با بررسی اعتصابات حمل‌ونقل در شهرهای کانادا شواهد کمی یافتند که نشان دهد افزایش عرضه ترانزیت باعث کاهش سطح کلی آلودگی در معیارهای مختلف آلاینده‌ها می‌شود. در حالی که اثر انحراف ترافیک می‌تواند انتشار گازهای گلخانه‌ای را با ایجاد انگیزه برای جابه‌جایی خودروها کاهش دهد، اثر ایجاد ترافیک نشان می‌دهد که دسترسی بهتر حمل‌ونقل و کاهش ازدحام نیز می‌تواند تقاضای کلی بیشتر سفر و گسترش شهری را افزایش دهد و به طور بالقوه استفاده از وسایل نقلیه و آلودگی را افزایش دهد (Mohring, 1972).

(Xiao et al., 2021) با استفاده از رویکرد اختلاف در تفاوت‌های چند دوره‌ای داده‌های روزانه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۲ را تجزیه و تحلیل می‌کند و پیشرفت‌های قابل توجهی در کیفیت هوا پس از افتتاح مترو، در شهرهایی با وضعیت‌های اقتصادی و اندازه جمعیت متفاوت نشان می‌دهد. این تحقیق با یافته‌های قبلی همسو بوده و آن را گسترش می‌دهد. (Zheng et al., 2019)، (Chen & Whalley, 2012) و (Liang & Xi, 2016) پتانسیل حمل‌ونقل ریلی را برای کاهش انتشار کربن و سطوح آلاینده تشخیص دادند. (Xiao et al., 2021) با استفاده از یک شاخص جامع آلودگی هوا و تست‌های استحکام، بینش‌های ظریفی را در مورد تأثیرات زمانی و آلاینده‌های خاص سیستم‌های مترو ارائه می‌کند.

(Ye & Sato, 2023) نیز به طور انتقادی تحقیقات موجود در مورد رابطه بین توسعه سیستم مترو و کیفیت هوای شهری را مورد بررسی قرار می‌دهد و ناسازگاری‌های یافته‌ها را در مطالعات مختلف برجسته می‌کند. تحقیقات قبلی عمدتاً تأثیر مترو را از طریق افتتاح خطوط جدید اندازه‌گیری می‌کرد که منجر به نتایج متفاوتی شد: برخی از مطالعات بهبود کیفیت هوا را پس از گسترش گزارش کردند در حالی که برخی دیگر هیچ تغییر قابل توجهی یا حتی بدتر شدن را مشاهده نکردند. (Ye & Sato, 2023) استدلال می‌کنند که چنین اختلافاتی احتمالاً ناشی از روش‌شناسی‌ها و عوامل زمینه‌ای متفاوت مانند چیدمان شهری، آب و هوا و شرایط اقتصادی است که در تحلیل‌های گذشته به اندازه کافی کنترل نشده‌اند. برای پرداختن به این چالش‌های روش‌شناختی، آن‌ها استفاده از «تراکم ایستگاه مترو» را به عنوان معیاری قوی‌تر و جامع‌تر برای ارزیابی اثرات سیستم‌های مترو بر آلودگی هوا پیشنهاد می‌کنند

سهم کلیدی این مطالعه، تجزیه و تحلیل اثرات موضعی گسترش مترو بر آلودگی هوا در داخل شهرها، مناطق متضاد نزدیک ایستگاه‌های جدید به ایستگاه‌های دورتر و بازه‌های زمانی مختلف است. بسیاری از کارهای قبلی فقط بر روی اثرات سطح شهر متمرکز شده بودند. رویکرد تفاوت در تفاوت‌های ما با استفاده از داده‌های دانه‌ای امکان برآورد اثرات تعادل میان‌مدت فراتر از اثرات کوتاه‌مدت اختلال را فراهم می‌کند. علاوه بر این، ما ناهمگونی را در بین شهرها بر اساس اندازه جمعیت، سطوح توسعه

¹ NO

² NO₂

³ Canada

⁴ Robustness Tests

اقتصادی و آلودگی پایه بررسی می‌کنیم - عواملی که می‌توانند هم سطوح آلودگی و هم واکنش‌های سواری به بهبود حمل و نقل را تحت تأثیر قرار دهند.

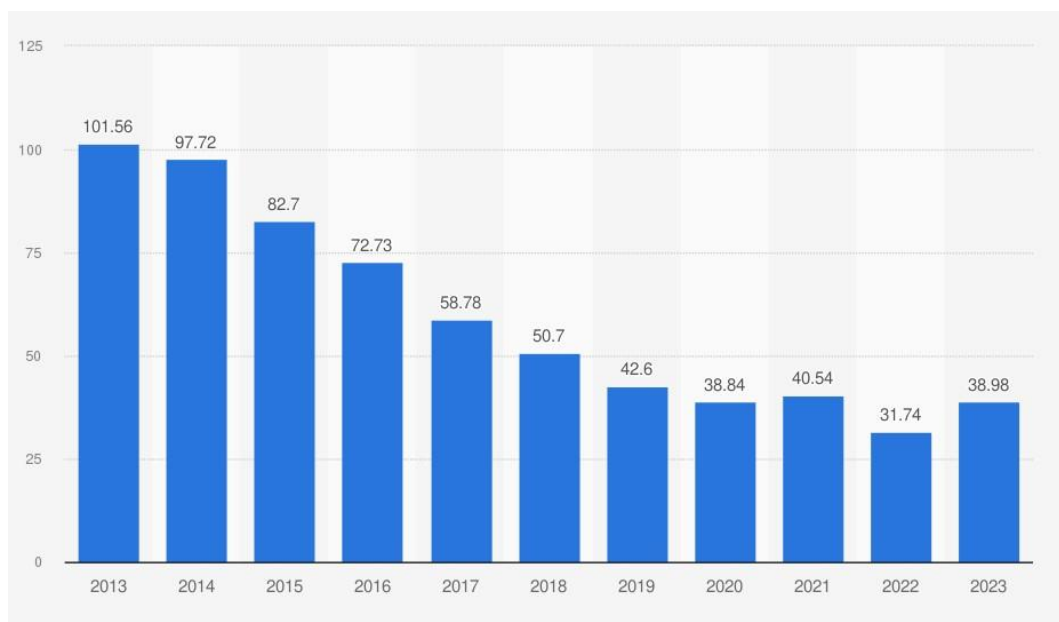
۳- پیشینه توسعه مترو و آلودگی هوا در چین

۳-۱- پیشینه توسعه مترو و کیفیت هوا در پکن^۱

پکن در دهه‌های اخیر به دلیل رشد سریع اقتصادی و افزایش مالکیت وسایل نقلیه، چالش‌های شدید آلودگی هوا را تجربه کرده است. از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۶، تولید ناخالص داخلی سرانه چین به طور قابل توجهی افزایش یافت که منجر به بدتر شدن کیفیت هوا در شهرهای بزرگی مانند پکن شد. میانگین سطح پی.ام.۲.۵ در پکن از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷ حدود دو برابر استاندارد ملی و شش تا ده برابر بیشتر از استاندارد ایالات متحده بود (Li et al., 2019).

برای مقابله با بدتر شدن آلودگی هوا و تراکم ترافیک ناشی از افزایش تعداد وسایل نقلیه، دولت شهرداری پکن اقدامات متعددی را اجرا کرد. پکن در دو دهه گذشته تحت توسعه سریع سیستم متروی خود قرار گرفته است. شبکه متروی پکن از چند خط در اوایل دهه ۲۰۰۰ به یک سیستم گسترده با خطوط متعدد و بیش از ۳۰۰ ایستگاه در اواخر دهه ۲۰۱۰ تبدیل شده است. این گسترش با هدف ارائه یک جایگزین حمل و نقل سازگار با محیط‌زیست و کاهش تراکم ترافیک و آلودگی هوا ناشی از افزایش تعداد وسایل نقلیه شخصی انجام شد.

شکل ۱ داده‌های سالانه غلظت پی.ام.۲.۵ از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳، شدت مشکل آلودگی هوای پکن را با تجاوزهایی مکرر از استانداردهای ملی (۳۵ میکروگرم بر مترمکعب) و بین‌المللی (۱۰-۱۲ میکروگرم بر مترمکعب) کیفیت هوا نشان می‌دهد. با این حال، برای بررسی تأثیر بالقوه گسترش سیستم مترو بر کاهش سطوح آلودگی هوا در پکن، به تحلیل بیشتری نیاز است.



شکل ۱: میانگین سالانه پی.ام.۲.۵ در شهر پکن از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳ (China: Annual PM2.5 Levels Beijing 2023 | Statista, 2024).

¹ Beijing

۲-۳- پیشینه توسعه مترو و کیفیت هوا در نانجینگ^۱

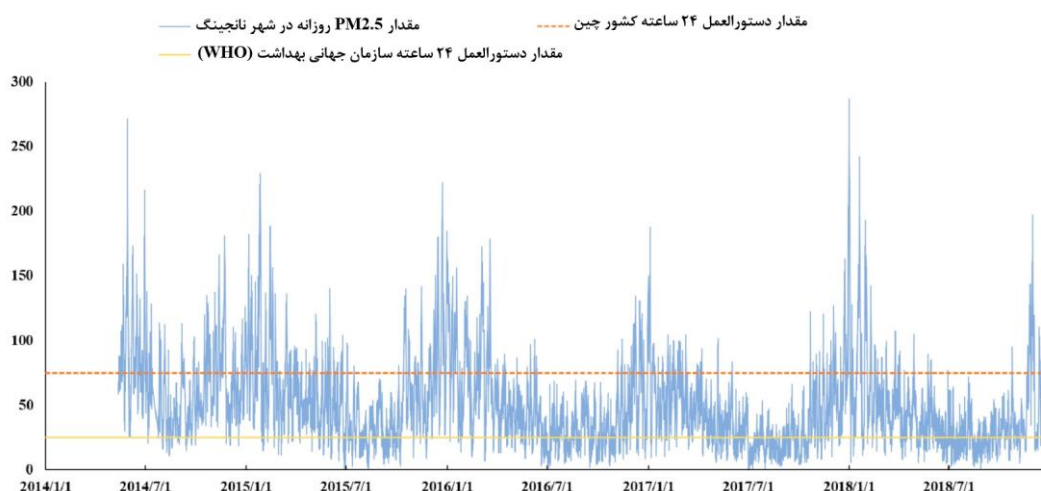
نانجینگ، قطب اصلی در منطقه دلتای رودخانه یانگ تسه^۲، هم رشد سریع اقتصادی و هم کیفیت هوا رو به وخامت طی دهه‌های گذشته تجربه کرده است. با شهرنشینی و صنعتی شدن پایدار، سطح آلودگی هوای نانجینگ به تدریج بدتر شده و خطرات زیست‌محیطی و بهداشتی قابل توجهی را به همراه دارد.

داده‌های ارائه شده در شکل ۲ تغییر روزانه غلظت پی.ام.۲.۵ در نانجینگ را از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ نشان می‌دهد. سطح غلظت در بیشتر روزهای این دوره از مقدار دستورالعمل ۲۴ ساعته سازمان جهانی بهداشت^۳ و سطح میانگین سالانه فراتر رفته است. به ۵۲٫۴ میکروگرم بر مترمکعب رسید که حدود دو سوم استاندارد سالانه چین است.

نانجینگ با درک نیاز به توسعه شهری پایدار، تلاش‌های هماهنگی برای گسترش سیستم متروی خود انجام داده است. قبل از سال ۲۰۱۴، نانجینگ تنها دو خط مترو با ۵۵ ایستگاه در حال فعالیت داشت که نشان دهنده یک مرحله کند توسعه است. با این حال، پس از میزبانی بازی‌های المپیک جوانان ۲۰۱۴، نانجینگ وارد عصر ساخت‌وساز سریع مترو شد. از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸، هشت خط مترو جدید ساخته شد که در مجموع به ۳۷۸٫۳۸ کیلومتر رسید. این کیلومتر کارکرد، نانجینگ را در رتبه چهارم در میان شهرهای چین با سیستم مترو و اولین شهری در چین قرار داد که به پوشش کامل دسترسی به خدمات مترو در تمام مناطق دست یافت.

شکل ۳ (Zheng et al., 2021) نمایشی بصری از گسترش شبکه مترو از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ را ارائه می‌کند که استقرار تدریجی یک سیستم مترو به خوبی توسعه یافته را نشان می‌دهد. با نگاهی به آینده، نانجینگ برنامه‌های بلندپروازانه‌ای برای گسترش بیشتر شبکه متروی خود دارد، با ۷ خط اضافی در حال حاضر در حال ساخت و هدف طول کل ۱۰۱۱٫۲ کیلومتر تا پایان سال ۲۰۳۰، طبق گفته طرح جامع شهر نانجینگ در دست برنامه‌ریزی است.

گسترش سیستم متروی نانجینگ با هدف ترویج تحرک شهری پایدار و کاهش بالقوه آلودگی هوا با کاهش وابستگی به وسایل نقلیه شخصی و تشویق به استفاده از حمل‌ونقل عمومی است. با این حال، شواهد تجربی بیشتری برای ایجاد ارتباط بین توسعه مترو و بهبود کیفیت هوا در نانجینگ مورد نیاز است.

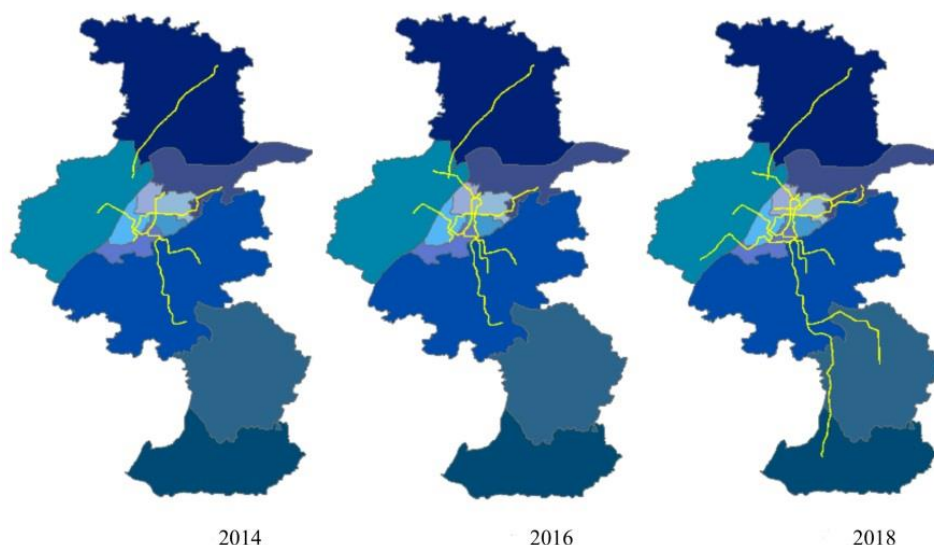


شکل ۲: تغییر روزانه PM2.5 در شهر نانجینگ (Zheng et al., 2021).

¹ Nanjing

² Yangtze River

³ WHO



شکل ۳: گسترش شبکه مترو در شهر نانجینگ و حومه در سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ (Zheng et al., 2021).

۳-۳- پیشینه توسعه مترو و کیفیت هوا در کشور چین

شهرنشینی سریع چین با یک نقطه منفی قابل توجه همراه بوده است: آلودگی هوا. شهرهای بزرگ با سطح کیفیت هوای ناسالم دست و پنجه نرم می‌کنند که بر سلامت عمومی و محیط‌زیست تأثیر می‌گذارد. در پاسخ، سیاستگذاران چینی با هدف کاهش تراکم ترافیک و در نتیجه، آلودگی هوا، سرمایه‌گذاری زیادی در سیستم‌های مترو کرده‌اند.

چین دارای گسترده‌ترین شبکه متروی جهان است که تا پایان سال ۲۰۱۹ بیش از ۶۷۰۰ کیلومتر راه اندازی شده است (Sun et al., 2022). ساخت‌وساز با سرعتی سریع ادامه دارد و سالانه صدها کیلومتر به آن افزوده می‌شود. این گسترش گسترده زیرساخت به محققان اجازه می‌دهد تا تأثیر توسعه مترو را بر معیارهای مختلف کیفیت هوا تجزیه و تحلیل کنند.

با این حال، این رابطه کاملاً ساده نیست. برخی از مطالعات نشان می‌دهد که تأثیر مثبت ممکن است با توسعه بیشتر مترو در شهری که در حال حاضر دارای یک شبکه قوی است، کاهش یابد. علاوه بر این، عواملی مانند الگوهای آب و هوا و خود استراتژی توسعه (تمرکز بر مسافت پیموده شده در مقابل ایستگاه‌ها) می‌تواند بر اثربخشی مترو در کاهش آلودگی تأثیر بگذارد. مطالعات نشان می‌دهد که افزایش مسافت پیموده شده مترو و تعداد خطوط می‌تواند منجر به کاهش سطح PM_{2.5} شود، در حالی که تأثیر آن بر PM₁₀ ممکن است کمتر قابل توجه باشد (De et al., 2020).

شهرنشینی سریع و گسترش اقتصادی چین، توسعه سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی کارآمد و گسترده را ضروری کرده است. مترو، به عنوان یک سیستم حمل‌ونقل ریلی شهری با ظرفیت بالا، به عنوان یک راه حل محوری برای تقاضاهای رو به رشد جابجایی شهری ظاهر شده است و به طور قابل توجهی به کاهش تراکم ترافیک و آلودگی کمک می‌کند.

در دو دهه گذشته، چین شاهد شتاب بی سابقه‌ای در برنامه‌ریزی، ساخت و بهره‌برداری از شبکه‌های مترو بوده است. جدول ۱ یک نمای کلی از پیشرفت‌های سیستم مترو در ۳۷ شهر در سرزمین اصلی چین تا سال ۲۰۱۹ ارائه می‌کند. تاریخچه عملیاتی، مقیاس شبکه‌های مترو (شامل طول کل، تعداد خطوط و ایستگاه‌ها) و میانگین سرنشینان روزانه را شرح می‌دهد. در کنار همبستگی این معیارها با جمعیت ساکن و تولید ناخالص داخلی هر شهر. این مجموعه داده یک دیدگاه منحصر به فرد در رابطه بین گسترش زیرساخت‌های مترو و پویایی گسترده‌تر شهری و اقتصادی در چین ارائه می‌دهد.

جدول ۱: اطلاعات توسعه مترو در ۳۷ شهر کشور چین (Lin et al., 2021).

سیستم مترو													
شهرها	جمعیت ساکن	تولید ناخالص ملی	تاریخچه عملیات	طول	تعداد خطوط	تعداد ایستگاه‌ها	میانگین مسافر روزانه						
شرق چین													
شانگهای	<۲۰ میلیون	<۳۰۰۰ میلیارد یوان	<۲۰ سال	<۴۰۰ کیلومتر	<۱۰ خط	<۳۰۰ ایستگاه	<۵۰۰۰ هزار						
هانگژو	۵-۱۰ میلیون	۱۰۰۰-۲۰۰۰ میلیارد یوان	۶-۱۰ سال	۱۰۱-۲۰۰ کیلومتر	۳-۵ خط	۵۱-۱۰۰ ایستگاه	۱۰۰۰-۲۰۰۰ هزار						
جینان	۵-۱۰ میلیون	۵۰۰-۱۰۰۰ میلیارد یوان	۱-۵ سال	۱-۵۰ کیلومتر	۱-۲ خط	۱-۵۰ ایستگاه	>۲۰۰ هزار						
نانجینگ	۵-۱۰ میلیون	۱۰۰۰-۲۰۰۰ میلیارد یوان	۱۱-۲۰ سال	۳۰۱-۴۰۰ کیلومتر	۶-۱۰ خط	۱۰۱-۲۰۰ ایستگاه	۵۰۰۰-۲۰۰۰ هزار						
نینگبو	۵-۱۰ میلیون	۱۰۰۰-۲۰۰۰ میلیارد یوان	۱-۵ سال	۵۱-۱۰۰ کیلومتر	۳-۵ خط	۵۱-۱۰۰ ایستگاه	۵۰۰-۱۰۰۰ هزار						
چینگدائو	۵-۱۰ میلیون	۱۰۰۰-۲۰۰۰ میلیارد یوان	۱-۵ سال	۱۰۱-۲۰۰ کیلومتر	۳-۵ خط	۵۱-۱۰۰ ایستگاه	۵۰۰-۱۰۰۰ هزار						
ژیامن	>۵ میلیون	>۵۰۰ میلیارد یوان	۱-۵ سال	۵۱-۱۰۰ کیلومتر	۱-۲ خط	۵۱-۱۰۰ ایستگاه	۲۰۰-۵۰۰ هزار						
چانگژو	>۵ میلیون	۵۰۰-۱۰۰۰ میلیارد یوان	۱-۵ سال	۱-۵۰ کیلومتر	۱-۲ خط	۱-۵۰ ایستگاه	>۲۰۰ هزار						
فوژو	۵-۱۰ میلیون	۵۰۰-۱۰۰۰ میلیارد یوان	۱-۵ سال	۵۱-۱۰۰ کیلومتر	۱-۲ خط	۱-۵۰ ایستگاه	۲۰۰-۵۰۰ هزار						
هفی	۵-۱۰ میلیون	۵۰۰-۱۰۰۰ میلیارد یوان	۱-۵ سال	۵۱-۱۰۰ کیلومتر	۳-۵ خط	۵۱-۱۰۰ ایستگاه	۲۰۰-۵۰۰ هزار						
نانچنگ	۵-۱۰ میلیون	۵۰۰-۱۰۰۰ میلیارد یوان	۱-۵ سال	۵۱-۱۰۰ کیلومتر	۱-۲ خط	۱-۵۰ ایستگاه	۲۰۰-۵۰۰ هزار						
سوژو	۱۰,۲۰-۲۰ میلیون	۱۰۰۰-۲۰۰۰ میلیارد یوان	۶-۱۰ سال	۱۰۱-۲۰۰ کیلومتر	۳-۵ خط	۱۰۱-۲۰۰ ایستگاه	۱۰۰۰-۲۰۰۰ هزار						
ووشی	۵-۱۰ میلیون	۱۰۰۰-۲۰۰۰ میلیارد یوان	۱-۵ سال	۵۱-۱۰۰ کیلومتر	۱-۲ خط	۱-۵۰ ایستگاه	۲۰۰-۵۰۰ هزار						
زوژو	۵-۱۰ میلیون	۵۰۰-۱۰۰۰ میلیارد یوان	۱-۵ سال	۱-۵۰ کیلومتر	۱-۲ خط	۱-۵۰ ایستگاه	>۲۰۰ هزار						
شمال چین													
پکن	<۲۰ میلیون	<۳۰۰۰ میلیارد یوان	<۲۰ سال	<۴۰۰ کیلومتر	<۱۰ خط	<۳۰۰ ایستگاه	<۵۰۰۰ هزار						
تیانجین	۱۰,۲۰-۲۰ میلیون	۱۰۰۰-۲۰۰۰ میلیارد یوان	<۲۰ سال	۱۰۱-۲۰۰ کیلومتر	۳-۵ خط	۱۰۱-۲۰۰ ایستگاه	۱۰۰۰-۲۰۰۰ هزار						
هوهوت	>۵ میلیون	>۵۰۰ میلیارد یوان	۱-۵ سال	۱-۵۰ کیلومتر	۱-۲ خط	۱-۵۰ ایستگاه	>۲۰۰ هزار						
شیجیاژوانگ	۱۰,۲۰-۲۰ میلیون	۵۰۰-۱۰۰۰ میلیارد یوان	۱-۵ سال	۱-۵۰ کیلومتر	۱-۲ خط	۱-۵۰ ایستگاه	۲۰۰-۵۰۰ هزار						
مرکز چین													
ووهان	۱۰,۲۰-۲۰ میلیون	۱۰۰۰-۲۰۰۰ میلیارد یوان	۶-۱۰ سال	۳۰۱-۴۰۰ کیلومتر	۶-۱۰ خط	۲۰۱-۳۰۰ ایستگاه	۵۰۰۰-۲۰۰۰ هزار						
چانگشا	۵-۱۰ میلیون	۱۰۰۰-۲۰۰۰ میلیارد یوان	۱-۵ سال	۵۱-۱۰۰ کیلومتر	۳-۵ خط	۵۱-۱۰۰ ایستگاه	۱۰۰۰-۲۰۰۰ هزار						
ژنگژو	۱۰,۲۰-۲۰ میلیون	۱۰۰۰-۲۰۰۰ میلیارد یوان	۶-۱۰ سال	۱۰۱-۲۰۰ کیلومتر	۳-۵ خط	۵۱-۱۰۰ ایستگاه	۱۰۰۰-۲۰۰۰ هزار						

جنوب چین						
گوانگژو	۲۰-۱۰,۱	۳۰۰۰-۲۰۰۰,۱	۲۰۰۰ سال	۴۰۰۰ کیلومتر	۱۰۰ خط	۳۰۰-۲۰۱ ایستگاه
شنژن	۲۰-۱۰,۱	۳۰۰۰-۲۰۰۰,۱	۲۰-۱۱ سال	۴۰۰-۳۰۱ کیلومتر	۱۰-۶ خط	۳۰۰-۲۰۱ ایستگاه
دانگوان	۱۰-۵ میلیون	۱۰۰۰-۵۰۰ میلیارد یوآن	۵-۱ سال	۵۰-۱ کیلومتر	۲-۱ خط	۵۰-۱ ایستگاه
فوشان	۱۰-۵ میلیون	۱۰۰۰-۵۰۰ میلیارد یوآن	۱۰-۶ سال	۵۰-۱ کیلومتر	۲-۱ خط	۵۰-۱ ایستگاه
نانینگ	۱۰-۵ میلیون	۵۰۰۰ میلیارد یوآن	۵-۱ سال	۱۰۰-۵۱ کیلومتر	۵-۳ خط	۱۰۰-۵۱ ایستگاه
شمال شرقی چین						
چانگچون	۱۰-۵ میلیون	۱۰۰۰-۵۰۰ میلیارد یوآن	۲۰-۱۱ سال	۵۰-۱ کیلومتر	۲-۱ خط	۵۰-۱ ایستگاه
دالیان	۱۰-۵ میلیون	۱۰۰۰-۵۰۰ میلیارد یوآن	۲۰-۱۱ سال	۱۰۰-۵۱ کیلومتر	۲-۱ خط	۵۰-۱ ایستگاه
هاربین	۲۰-۱۰,۱ میلیون	۱۰۰۰-۵۰۰ میلیارد یوآن	۱۰-۶ سال	۵۰-۱ کیلومتر	۲-۱ خط	۵۰-۱ ایستگاه
شنیانگ	۱۰-۵ میلیون	۱۰۰۰-۵۰۰ میلیارد یوآن	۱۰-۶ سال	۱۰۰-۵۱ کیلومتر	۵-۳ خط	۱۰۰-۵۱ ایستگاه
شمال غربی چین						
شیان	۱۰-۵ میلیون	۱۰۰۰-۵۰۰ میلیارد یوآن	۱۰-۶ سال	۲۰۰-۱۰۱ کیلومتر	۵-۳ خط	۲۰۰-۱۰۱ ایستگاه
لانژو	۵۰ میلیون	۵۰۰۰ میلیارد یوآن	۵-۱ سال	۵۰-۱ کیلومتر	۲-۱ خط	۵۰-۱ ایستگاه
اورومچی	۵۰ میلیون	۵۰۰۰ میلیارد یوآن	۵-۱ سال	۵۰-۱ کیلومتر	۲-۱ خط	۵۰-۱ ایستگاه
جنوب غربی چین						
چونگچینگ	۲۰۰ میلیون	۳۰۰۰-۲۰۰۰,۱ میلیارد یوآن	۱۰-۶ سال	۴۰۰-۳۰۱ کیلومتر	۱۰-۶ خط	۲۰۰-۱۰۱ ایستگاه
چنگدو	۲۰-۱۰,۱ میلیون	۲۰۰۰-۱۰۰۰,۱ میلیارد یوآن	۱۰-۶ سال	۴۰۰۰ کیلومتر	۱۰-۶ خط	۳۰۰-۲۰۱ ایستگاه
گوئیانگ	۵۰ میلیون	۵۰۰۰ میلیارد یوآن	۵-۱ سال	۵۰-۱ کیلومتر	۲-۱ خط	۵۰-۱ ایستگاه
کونمینگ	۱۰-۵ میلیون	۱۰۰۰-۵۰۰ میلیارد یوآن	۱۰-۶ سال	۱۰۰-۵۱ کیلومتر	۵-۳ خط	۱۰۰-۵۱ ایستگاه

داده‌های جدول به طور قطعی مقیاس و دامنه قابل توجه توسعه سیستم مترو در سراسر چین را نشان می‌دهد و بر نقش استراتژیک آن در حمل‌ونقل و توسعه شهری تأکید می‌کند. برخی بینش‌های کلیدی از این تجزیه و تحلیل ظاهر می‌شود:

۱. مقیاس و دسترسی: طول گسترده شبکه های مترو، به ویژه در کلان شهرهایی مانند شانگهای و پکن، سرمایه‌گذاری های قابل توجهی را که در زیرساخت‌های حمل‌ونقل عمومی انجام شده را برجسته می‌کند. این شهرها دارای برخی از بزرگ‌ترین سیستم‌های مترو در جهان هستند که تقاضای بالا برای راه‌حل‌های جابجایی شهری کارآمد در مناطق پرجمعیت را برآورده می‌کنند.

۲. میزان مسافر: ارقام قابل توجه مسافران روزانه در سراسر شهرها نقش مترو را به عنوان یک جزء حیاتی از اکوسیستم حمل‌ونقل شهری منعکس می‌کند. میلیون‌ها مسافر برای سفر روزانه به مترو متکی هستند و این امر کارایی، قابلیت اطمینان و ادغام آن در بافت شهری را تأیید می‌کند.

۳. همبستگی های اقتصادی و جمعیتی: همبستگی بین معیارهای توسعه مترو و تولید ناخالص داخلی و اندازه جمعیت شهرها شواهدی از ماهیت درهم تنیده قدرت اقتصادی، شهرنشینی و توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل عمومی ارائه می‌دهد.

شهرهایی که تولید ناخالص داخلی بالاتر و جمعیت بیشتری دارند، تمایل به سیستم مترو گسترده‌تری دارند، که نشان می‌دهد ظرفیت اقتصادی و فشارهای جمعیتی موجب تقاضا و سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های مترو می‌شود.

۴- مرور روش‌های تحقیق

این مطالعه تأثیر باز شدن خطوط جدید مترو را بر سطوح آلودگی هوا، به ویژه شاخص آلودگی هوا، پی‌ام ۱۰ و پی‌ام ۲.۵، در شهرهای چین بررسی می‌کند. سه روش مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند: تفاوت‌های فضایی (SDID)^۱، تطبیق امتیاز تمایل-تفاوت در تفاوت‌ها (PSM-DID)^۲ و حداقل مربعات معمولی مبتنی بر ناپیوستگی (DB-OLS)^۳.

۴-۱- روش تفاوت‌های فضایی (SDID)

این روش یک تحلیل جامع را برای درک اینکه چگونه توسعه سیستم‌های مترو بر سطوح آلودگی هوا در شهرهای چین تأثیر می‌گذارد، تشریح می‌کند. این امر با استفاده از مدل‌های اقتصادسنجی فضایی به دست می‌آید که نه تنها اثرات مستقیم گسترش مترو، بلکه وابستگی‌های فضایی و اثرات سرریز در سراسر شهرها را نیز در بر می‌گیرد. چنین رویکردی با توجه به ماهیت آلودگی هوا، که به مرزهای اداری پایبند نیست، حیاتی است (Xiao et al., 2020).

معادله ۱ بدون در نظر گرفتن اثرات مکانی به عنوان مدل پایه عمل می‌کند. اساساً سعی می‌کند سطوح آلودگی هوا (POL_{it}) در یک شهر را با توسعه سیستم متروی آن (توسعه مترو) مرتبط کند، در حالی که سایر عوامل (X) را کنترل می‌کند. این مدل شامل یک عبارت خطا (ε) نیز است.

$$\ln POL_{it} = c + \alpha subway_{it} * post_{it} + X_{it}\beta + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

- POL_{it} : سطوح آلودگی هوا را در شهر i در زمان t نشان می‌دهد که از طریق شاخص‌های مختلف مانند AQI و غلظت آلاینده‌های خاص (PM_{2.5}, PM₁₀ و غیره) اندازه‌گیری می‌شود.

- $subway_{it} * post_{it}$: اصطلاح تعاملی که توسعه مترو را در شهر i در زمان t نشان می‌دهد، که در آن توسعه مترو می‌تواند برحسب مسافت پیموده شده، تعداد ایستگاه‌ها یا خطوط اندازه‌گیری شود.

- X_{it} : بردار متغیرهای کنترلی، از جمله وضعیت اقتصادی و مشخصات آب‌وهوایی، برای در نظر گرفتن سایر عوامل موثر بر آلودگی هوا.

- ε_{it} : عبارت خطا در ثبت سایر تأثیرات نامشخص بر آلودگی هوا.

معادلات ۲ الی ۵ مدل پایه را با ترکیب وابستگی‌های فضایی گسترش می‌دهند و تشخیص می‌دهند که آلودگی هوا در یک شهر می‌تواند بر آلودگی در شهرهای مجاور تأثیر بگذارد و تحت تأثیر قرار گیرد.

معادله ۲: مدل خودرگرسیون فضایی (SAR-DID)

$$\ln POL_{it} = \rho \sum_{j=1}^{160} w_{ij} \ln POL_{jt} + \alpha subway_{it} * post_{it} + X_{it}\beta + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

معادله ۲ تأخیر مکانی متغیر وابسته را معرفی می‌کند و ادعان می‌کند که سطوح آلودگی هوا در یک شهر تحت تأثیر سطوح شهرهای مجاور است.

معادله ۳: مدل خطای مکانی (SEM-DID)

¹ AQI

² spatial difference-in-differences

³ propensity score matching-difference in differences

⁴ discontinuity based ordinary least squares

$$\ln POL_{it} = \alpha subway_{it} * post_{it} + X_{it}\beta + \mu_i + v_{it}$$

$$v_{it} = \lambda \sum_{j=1}^{160} w_{ij}v_{jt} + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

معادله ۳ خود همبستگی فضایی را در اصطلاح خطا به حساب می‌آورد، و نشان می‌دهد که عوامل مشاهده‌نشده مؤثر بر آلودگی هوا ممکن است از نظر فضایی همبستگی داشته باشند.

معادله ۴: مدل دوربین فضایی (SDM-DID)

$$\ln POL_{it} = \rho \sum_{j=1}^{160} w_{ij} \ln POL_{jt} + \alpha subway_{it} * post_{it} + X_{it}\beta + \sum_{j=1}^{160} w_{ij}Z_{jt}\theta + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

معادله ۴ ویژگی‌های مدل‌های SAR و SEM را با هم ترکیب می‌کند و هم متغیرهای وابسته و هم متغیرهای مستقل را اضافه می‌کند تا تعاملات فضایی گسترده‌تری را به تصویر بکشد.

معادله ۵: مدل خودهمبستگی فضایی (SAC-DID)

$$\ln POL_{it} = \rho \sum_{j=1}^{160} w_{ij} \ln POL_{jt} + \alpha subway_{it} * post_{it} + X_{it}\beta + \mu_i + v_{it}$$

$$v_{it} = \lambda \sum_{j=1}^{160} w_{ij}v_{jt} + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

معادله ۵ مدلی جامع که شامل متغیرهای وابسته با تأخیر مکانی و یک عبارت خطای همبستگی خودکار مکانی است که تصویر کاملی از وابستگی‌های مکانی را ارائه می‌دهد.

در این روش محاسباتی ارائه نشده و متغیرهای جزئی (در معادلات ۲ الی ۵) تعریف نشده است و فقط داده‌های ورودی و نتایج مورد بررسی قرار گرفته است.

روش مورد بحث به ارائه نتایج یک تحقیق در مورد اثرات توسعه مترو بر آلودگی هوا در ۱۶۰ شهر چین از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ می‌پردازد. این روش با استفاده از یک چارچوب اقتصادسنجی فضایی، نه تنها تأثیر مستقیم آن را بررسی می‌کند بلکه زیرساخت‌های مترو بر کیفیت هوا و همچنین وابستگی‌های فضایی بین شهرها را نیز مورد بررسی قرار می‌دهد. در جداول ۲ تا ۸ توضیح مفصلی از ورودی‌ها و نتایج ارائه شده است.

جدول ۲ آمار توصیفی را برای متغیرهای مورد استفاده در تجزیه و تحلیل روش ۱، از جمله شاخص‌های آلودگی هوا، معیارهای توسعه مترو (به عنوان مثال، مسافت پیموده شده، تعداد ایستگاه‌ها و خطوط)، و متغیرهای کنترلی منعکس‌کننده اقتصادی ارائه می‌کند.

جدول ۲: خلاصه آمار و داده‌ها (روش ۱) (Chen & Xu, 2016; Özokcu & Özdemir, 2017; Gonzalez-Navarro & Turner, 2018).

متغیرها	تعداد	متوسط	انحراف معیار	حداقل	حداکثر	توضیحات متغیر
AOI	۶۴۰	۸۲.۸۵	۲۳.۹۸	۳۳.۱۵۳	۱۷۸.۰۵۳	شاخص کیفیت هوا
PM2.5	۶۴۰	۵۲.۴۳	۱۹.۴	۱۲.۸۹۳	۱۲۹.۷۸۴	غلظت پی.ام.۲.۵
PM10	۶۴۰	۹۰.۷۲	۳۳.۸۴	۲۷.۱۹۲	۲۳۳.۹۵۸	غلظت پی.ام.۱۰
SO2	۶۴۰	۲۵.۴	۱۶.۴۱	۱.۸۰۱	۱۱۴.۵۹۵	غلظت دی اکسید گوگرد
NO2	۶۴۰	۳۴.۳۲	۱۰.۶۳	۱۰.۷۱۲	۶۴.۹۰۵	غلظت دی اکسید نیتروژن
CO	۶۴۰	۱.۱۱	۰.۳۶	۰.۵۱	۲.۵۲	غلظت مونوکسید کربن
O3	۶۴۰	۵۷.۸۷	۱۱	۲۶.۵۷۶	۸۹.۴۱۶	غلظت اوزون
Mileage	۶۴۰	۲۱.۷	۷۹.۷۷	۰	۶۶۹.۶۹۱	مسافت پیموده شده مترو
Ln (mileage)	۶۴۰	۰.۷	۱.۶۶	۰	۶.۵۰۷	لگاریتم مسافت پیموده شده
Line	۶۴۰	۰.۶۶	۲.۳۳	۰	۲۲	تعداد خطوط مترو
Station	۶۴۰	۱۴.۱۲	۴۸.۹۹	۰	۳۸۶	تعداد ایستگاه‌های مترو
Ln (station)	۶۴۰	۰.۶۴	۱.۵۳	۰	۵.۹۵۶	لگاریتم ایستگاه‌ها
PGDP	۶۴۰	۵.۸۲	۰.۴۷	۴.۷۶۶	۷.۱۱۸	لگاریتم تولید ناخالص داخلی سرانه
PGDP2	۶۴۰	۳۴.۰۷	۵.۵۷	۲۲.۷۱۳	۵۰.۶۶۲	مربع لگاریتم تولید ناخالص داخلی سرانه
Eco_den	۶۴۰	۱۱.۸۷	۱.۱۱	۸.۸۲۸	۱۵.۶۳۹	لگاریتم چگالی اقتصادی
S_GDP	۶۴۰	۰.۴۷	۰.۰۹	۰.۱۸۱	۰.۸۴۹	نسبت تولید صنایع ثانویه به تولید ناخالص داخلی
T_GDP	۶۴۰	۰.۴۵	۰.۱	۰.۱۴۴	۰.۸۰۶	نسبت تولید صنعت سوم به تولید ناخالص داخلی
Ln (taxi)	۶۴۰	۷.۸۷	۱.۰۸	۴.۷۱۸	۱۱.۱۳۴	لگاریتم عملکرد تاکسی
Ln (bus)	۶۴۰	۷.۲۲	۱.۰۶	۴.۷۵۴	۱۰.۴۸۶	لگاریتم عملکرد اتوبوس
H_tem	۶۴۰	۲۰.۵۸	۴.۱۹	۹.۴۲۹	۳۰.۴۹۳	میانگین سالانه بالاترین دمای روزانه
L_tem	۶۴۰	۱۱.۷	۵.۷۲	-۱.۰۰۶	۲۴.۲۵۲	متوسط سالانه کمترین دمای روزانه

جدول ۳ نتایج شاخص‌های Moran's I و Geary's C را نشان می‌دهد که برای آزمایش همبستگی فضایی آلودگی هوا در شهرها استفاده می‌شود. مقادیر مثبت معنی‌دار نشان می‌دهد که آلودگی هوا در یک شهر شبیه به شهرهای مجاور است که نشان‌دهنده یک اثر سرریز فضایی است. این یافته استفاده از مدل‌های اقتصادسنجی فضایی را برای توضیح این وابستگی‌ها در تحلیل‌های بعدی توجیه می‌کند.

جدول ۳: نتایج آزمون همبستگی فضایی جهانی AQI و آلاینده‌های هوا در چین طی سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۱۷ (Feng et al., 2018).

متغیرها	Moran's I				Geary's C			
	۲۰۱۷	۲۰۱۶	۲۰۱۵	۲۰۱۴	۲۰۱۷	۲۰۱۶	۲۰۱۵	۲۰۱۴
AQI	۰.۳۵۲***	۰.۳۸۰***	۰.۳۸۵***	۰.۳۳۰***	۰.۶۳۳***	۰.۶۲۶***	۰.۶۲۶***	۰.۶۳۹***
PM2.5	۰.۲۶۵***	۰.۳۰۲***	۰.۳۱۵***	۰.۲۶۷***	۰.۶۷۹***	۰.۶۵۲***	۰.۶۵۲***	۰.۶۶۱***
PM10	۰.۳۵۳***	۰.۳۸۲***	۰.۳۸۸***	۰.۳۴۹***	۰.۶۵۰***	۰.۶۲۷***	۰.۶۲۷***	۰.۶۵۲***
SO2	۰.۲۳۷***	۰.۲۸۰***	۰.۲۸۸***	۰.۲۵۳***	۰.۶۵۶***	۰.۶۵۰***	۰.۶۵۰***	۰.۶۸۴***
NO2	۰.۱۶۱***	۰.۱۷۷***	۰.۱۹۲***	۰.۱۶۵***	۰.۷۶۸***	۰.۷۲۷***	۰.۷۲۷***	۰.۷۴۰***
CO	۰.۱۸۳***	۰.۲۰۷***	۰.۲۱۲***	۰.۱۵۱***	۰.۸۰۷***	۰.۷۷۲***	۰.۷۷۲***	۰.۷۵۹***
O3	۰.۱۷۱***	۰.۱۲۸***	۰.۱۰۵***	۰.۰۸۵***	۰.۸۳۷***	۰.۸۳۹***	۰.۸۳۹***	۰.۷۴۹***

توجه: ***، **، * به ترتیب ۱٪، ۵٪ و ۱۰٪ میزان اهمیت را نشان می‌دهند.

نتایج پایه در جدول ۴ نشان می‌دهد که توسعه مترو، که با مسافت پیموده شده اندازه‌گیری می‌شود، با شاخص آلودگی هوا همبستگی منفی دارد. این نشان می‌دهد که شهرهایی با سیستم مترو گسترده‌تر، کیفیت هوای بهتری دارند. مدل‌های اقتصادسنجی فضایی (SAR، SEM، SDM و SAC) نمای ظریف‌تری نسبت به مدل غیرمکانی (OLS) ارائه می‌دهند، که نشان می‌دهد نادیده گرفتن وابستگی‌های فضایی ممکن است مزایای توسعه مترو در بهبود کیفیت هوا را بیش از حد برآورد کند.

جدول ۴: تأثیر ناهمگنی آلاینده‌های هوا با متغیرهای کنترل (Gendron-Carrier et al., 2022).

متغیرها	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
	OLS	SAR	SEM	SDM	SAC	SAR	SEM	SDM	SAC
Ln (mileage)	-۰.۰۱۵*	-۰.۰۱۰*	-۰.۰۱۱**	-۰.۰۱۲**	-۰.۰۱۲**	-۰.۰۱۲**	-۰.۰۱۱*	-۰.۰۱۱**	-۰.۰۱۱**

توجه: ***, ** و * به ترتیب میزان اهمیت ۱٪، ۵٪ و ۱۰٪ را نشان می‌دهند. متغیرهای ستون های ۱-۵ شامل اثرات ثابت شهر هستند و نتایج در ستون های ۶-۹ اثرات ثابت سال و اثرات ثابت شهر را در نظر می‌گیرند.

جدول ۵: تأثیر توسعه مترو را بر آلاینده‌های مختلف هوا بررسی می‌کند. یافته‌ها ناهمگونی را در اثرات برجسته می‌کنند. در حالی که توسعه سیستم‌های مترو به طور قابل توجهی غلظت پی.ام.۲.۵ و پی.ام.۱۰ را کاهش می‌دهد، تأثیر قابل توجهی بر سایر آلاینده‌ها ندارد. این نشان می‌دهد که گسترش مترو در کاهش ذرات معلق موثرتر از آلاینده‌های گازی است.

جدول ۵: تأثیر توسعه یک سیستم مترو بر کیفیت هوا با متغیرهای کنترل: نتایج تخمین پایه (Basagaña et al., 2018).

متغیرها	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
	PM2.5	PM10	SO2	NO2	CO	O3	PM2.5	PM10	SO2	NO2	CO	O3
In (mileage)	-۰.۰۱۲*	-۰.۰۰۱	-۰.۰۱۲	-۰.۰۰۹	-۰.۰۱۲	-۰.۰۰۲	-۰.۰۱۲	-۰.۰۰۱	-۰.۰۰۸	-۰.۰۰۹	-۰.۰۱۲	-۰.۰۰۲
متغیرها	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
	PM2.5	PM10	SO2	NO2	CO	O3	PM2.5	PM10	SO2	NO2	CO	O3
In (mileage)	-۰.۰۱۲*	-۰.۰۱۳*	-۰.۰۱۳	-۰.۰۰۷	-۰.۰۱۴	-۰.۰۰۴	-۰.۰۱۲*	-۰.۰۰۱	-۰.۰۰۹	-۰.۰۰۹	-۰.۰۱۲	-۰.۰۰۱

توجه: ***, ** و * به ترتیب میزان اهمیت ۱٪، ۵٪ و ۱۰٪ را نشان می‌دهند. تمام نتایج رگرسیون شامل متغیرهای کنترل، اثرات ثابت شهر و اثرات ثابت سال است.

برای آزمایش استحکام یافته‌ها، جدول ۶ از معیارهای جایگزین توسعه مترو (تعداد خطوط و ایستگاه‌های مترو) استفاده می‌کند. نتایج به طور مداوم نشان می‌دهد که افزایش تعداد خطوط و ایستگاه‌های مترو با سطوح پایین‌تر شاخص آلودگی هوا و پی.ام.۲.۵ مرتبط است، که یافته‌های اولیه در مورد تأثیر مثبت زیرساخت‌های مترو بر کیفیت هوا را تقویت می‌کند.

جدول ۶: تأثیر تعداد خطوط و ایستگاه‌ها در یک سیستم مترو بر آلودگی هوای شهری: تست استحکام (Xiao et al., 2020).

متغیرها	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
	AQI-SAR	PM2.5_SAR	PM10_SAR	AQI_SEM	PM2.5_SEM	PM10_SEM	AQI_SAC	PM2.5_SAC	PM10_SAC	AQI_SDM	PM2.5_SDM	PM10_SDM
line	-۰.۰۲۹***	-۰.۰۳۷***	-۰.۰۲۴***	-۰.۰۲۹***	-۰.۰۳۳***	-۰.۰۲۹***	-۰.۰۲۸***	-۰.۰۳۴***	-۰.۰۲۷***	-۰.۰۲۸***	-۰.۰۳۵***	-۰.۰۲۸***
Ln (station)	-۰.۰۱۳**	-۰.۰۱۵**	-۰.۰۱۱	-۰.۰۱۲*	-۰.۰۱۴*	-۰.۰۰۱	-۰.۰۱۲**	-۰.۰۱۴*	-۰.۰۰۱	-۰.۰۱۲**	-۰.۰۱۵*	-۰.۰۱۴*

توجه: ***, ** و * به ترتیب میزان اهمیت ۱٪، ۵٪ و ۱۰٪ را نشان می‌دهند. تمامی نتایج در این جدول متغیرهای کنترل، اثرات ثابت سال و اثرات ثابت شهر را در نظر می‌گیرند.

با استفاده از داده‌های روزانه در مورد مسافت پیموده شده مترو و آلودگی هوا، جدول ۷ از روش تفاوت در تفاوت (DID) برای ارائه یک بررسی استحکام بیشتر استفاده می‌کند. نتایج با نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه و تحلیل داده‌های تابلویی همخوانی دارد و نشان‌دهنده تأثیر منفی قابل توجه توسعه مترو بر سطوح آلودگی هوا است.

جدول ۷: تاثیر توسعه مترو بر آلودگی هوای شهری با استفاده از روش DID: تست استحکام (Xiao et al., 2020).

متغیرها	۱	۲	۳
	مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳
In (mileage)	-۰.۰۱۴ ***	-۰.۰۰۴ *	-۰.۰۰۵ **
کنترل فاکتور آب‌وهوا	×	✓	✓
کنترل عوامل اقتصادی	×	×	✓
اثر ثابت روز از هفته	✓	✓	✓
اثر ثابت هفته از سال	×	✓	✓
اثر ثابت ماه به سال	×	×	✓
اثر ثابت سال	✓	✓	✓
اثر ثابت شهر	✓	✓	✓

توجه: ***، **، * به ترتیب میزان اهمیت ۱٪، ۵٪ و ۱۰٪ را نشان می‌دهند. عوامل آب‌وهوا داده‌های روزانه هستند، اما عوامل اقتصادی داده‌های سالانه هستند.

تجزیه و تحلیل جامع ارائه شده در جداول ۲ تا ۷ به طور مداوم نشان می‌دهد که توسعه سیستم‌های مترو در شهرهای چین به بهبود کیفیت هوا کمک می‌کند، به ویژه با کاهش سطوح ذرات معلق. رویکرد اقتصادسنجی فضایی بر اهمیت در نظر گرفتن وابستگی‌های فضایی در مطالعات زیست‌محیطی تأکید می‌کند، و نشان می‌دهد که مزایای کیفیت هوا از گسترش مترو یک بعد فضایی دارد و نه تنها بر شهرهای دارای خطوط مترو جدید یا توسعه‌یافته بلکه بر مناطق مجاور آنها نیز تأثیر می‌گذارد.

۴-۲- روش تطبیق امتیاز تمایل-تفاوت در تفاوت‌ها (PSM-DID)

روش ۲ بر اساس روش PSM-DID به تأثیر افتتاح خط جدید مترو بر غلظت PM10 در مناطق شهری چین می‌پردازد. این مدل با استفاده از روش تطبیق امتیاز تمایل-تفاوت در تفاوت‌ها (PSM-DID)، تأثیر کیفیت هوا را با تجزیه و تحلیل داده‌های غلظت روزانه PM10 از ژانویه ۲۰۱۴ تا دسامبر ۲۰۱۷ ارزیابی می‌کند. این بخش، معادله ۶ مورد استفاده در این روش و متغیرهای آن را توضیح می‌دهد (Wang et al., 2020).

معادله ۶ یک چارچوب آماری است که برای ارزیابی تأثیر یک درمان (در این مورد، بازگشایی‌های خط مترو) بر یک متغیر نتیجه (غلظت پی.ام.۱۰) با مقایسه تغییرات نتایج در طول زمان بین یک گروه درمان و یک گروه کنترل استفاده می‌شود. این رویکرد به ویژه برای ارزیابی مداخلات سیاستی یا تغییرات محیطی مفید است، زمانی که آزمایش‌های کنترل تصادفی امکان‌پذیر نباشد. این مطالعه با هدف تعیین اینکه آیا معرفی خطوط جدید مترو در شهرهای چین منجر به بهبود قابل اندازه‌گیری در کیفیت هوا، به‌ویژه از نظر کاهش آلودگی پی.ام.۱۰ می‌شود یا خیر. با ترکیب آب و هوا و متغیرهای زمانی، این مدل به دنبال جداسازی اثر بازگشایی‌های مترو از سایر عوامل خارجی است که می‌تواند بر سطوح پی.ام.۱۰ تأثیر بگذارد، و درک دقیقی از رابطه بین توسعه حمل‌ونقل شهری و سلامت محیط ارائه می‌دهد.

$$\ln(ap_{it}) = \alpha_0 + \alpha_1 treated_{it} * T_{it} + \alpha_2 treated_{it} + \alpha_3 T_{it} + \alpha_4 X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

$\ln(ap_{it})$: لگاریتم طبیعی غلظت آلاینده هوا در شهر i در زمان t . این مطالعه بر روی PM10 به عنوان آلاینده هوا تمرکز دارد.

$treated_{it}$: یک متغیر ساختگی که در صورتی که شهر i دارای بازگشایی‌های خط مترو جدید باشد برابر با ۱ و در صورت عدم وجود بازگشایی مترو برابر با ۰ است. این شهرها را که مستقیماً تحت تأثیر افتتاح خط مترو قرار می‌گیرند از شهرهایی که تحت تأثیر مستقیم نیستند متمایز می‌کند.

T_{it} : یک متغیر ساختگی زمانی که ۰ قبل از باز شدن خط مترو و ۱ بعد از باز شدن خط مترو است. این کمک می‌کند تا تأثیر زمانی افتتاح خط مترو بر کیفیت هوا را به تصویر بکشد.

X_{it} - بردار متغیرهای کنترلی، از جمله شرایط آب و هوایی مانند دمای متوسط، سرعت باد و رطوبت نسبی، و همچنین متغیرهای باینری که وقوع باران، برف یا طوفان را نشان می‌دهد. این متغیرها برای کنترل سایر عواملی که ممکن است بر غلظت پی.ام.۱۰ فراتر از بازگشایی‌های خط مترو تأثیر بگذارند، گنجانده شده‌اند.

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ - ضرایبی که باید تخمین زده شوند، که در آن α_1 اثر متقابل بازگشایی‌های خط مترو را بر غلظت پی.ام.۱۰ نشان می‌دهد، که برای اثرات زمانی و وجود متغیرهای کنترلی تنظیم شده است.

ε_{it} - عبارت خطا، محاسبه عوامل مشاهده نشده موثر بر غلظت پی.ام.۱۰ در شهر i در زمان t .

در این روش محاسباتی ارائه نشده فقط داده‌های ورودی و نتایج مورد بررسی قرار گرفته است.

این مدل با استفاده از روش تطبیق امتیاز-تفاوت در تفاوت (PSM-DID)، داده‌های ژانویه ۲۰۱۴ تا دسامبر ۲۰۱۷ را برای تشخیص اثرات کوتاه‌مدت و بلندمدت توسعه مترو بر کیفیت هوا تجزیه و تحلیل می‌کند. داده‌ها و یافته‌ها در جداول ۸ الی ۱۴ ارائه شده‌اند که هر کدام جنبه‌های متفاوتی از نتایج این روش را برجسته می‌کنند.

جدول ۸ با تعریف متغیرهای اصلی مورد استفاده در تجزیه و تحلیل و ارائه آمار خلاصه آنها، اساس را پی‌ریزی می‌کند. این موارد شامل اندازه‌گیری غلظت روزانه پی.ام.۲، پی.ام.۱۰، سطح مونوکسید کربن، شرایط آب‌وهوایی (دما، رطوبت، بارش) و سایر عوامل محیطی است. این آمار تنوع کیفیت هوا و شرایط محیطی را در طول دوره مورد مطالعه و شهرها نشان می‌دهد و بر پیچیدگی تجزیه و تحلیل عوامل تعیین‌کننده آلودگی هوا تأکید می‌کند.

جدول ۸: تعاریف متغیرها و خلاصه آمار (روش ۲) (Wang et al., 2020).

متغیرها	تعداد مشاهدات	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر	واحد	تعاریف
In(PM2.5)	۱۲۰۹۰	۳.۷۱۱	۰.۶۸۳	۱.۳۸۶	۶.۰۸۴	mg/m ³	غلظت روزانه پی.ام.۲.۵
In(PM10)	۱۲۰۳۴	۴.۳۰۲	۰.۶۱۱	۰	۷.۴۸۹	mg/m ³	غلظت روزانه پی.ام.۱۰
In(CO)	۱۲۰۶۸	۰.۸۷۲	۱.۵۹۷	-۱.۶۰۹	۴.۷۷۱	mg/m ³	غلظت روزانه مونوکسید کربن
treated	۱۲۱۷۰	۰.۵۵۱	۰.۴۹۷	۰	۱	-	-
T	۱۲۱۷۰	۰.۵۰۱	۰.۵	۰	۱	-	-
ifrain	۱۲۱۳۳	۰.۳۷۸	۰.۴۸۵	۰	۱	-	باران/برف/طوفان
In(qw)	۱۲۱۳۸	۶.۸	۰.۷۰۶	۰	۷.۵۶۹	°C	میانگین دما
In(xdsd)	۱۲۱۳۸	۶.۴۹۱	۰.۶۸۴	۰	۷.۱۲۲	%	رطوبت نسبی
In(fs)	۱۲۱۳۸	۲.۲۲۴	۱.۳۱۱	۰	۱۸.۶۲۴	m/s	میانگین سرعت باد

جدول ۹ اطلاعاتی در مورد ویژگی‌های "گروه پردازش" ارائه می‌دهد، که شامل ۷ شهر در چین است که در آن خطوط مترو جدید در طول دوره مطالعه این روش از ژانویه ۲۰۱۴ تا دسامبر ۲۰۱۷ افتتاح شد. شهرها بخشی از یک گروه متمرکز هستند که برای تخمین تغییرات در کیفیت هوا، به ویژه غلظت پی.ام.۱۰، قبل و بعد از معرفی خطوط جدید مترو بسیار بااهمیت است. این جدول برای درک دامنه مطالعه بسیار مهم است، زیرا مناطق شهری را که گسترش مترو در آنها کمیت شده و با معیارهای کیفیت هوا مرتبط است، شناسایی می‌کند.

جدول ۹: ویژگی‌های گروه پردازش (Zhang et al., 2019).

شهر	استان	جمعیت سالانه (ده هزار نفر)	تولید ناخالص داخلی (صد میلیون یوان)	تاریخ افتتاح اولین خط مترو	تاریخ افتتاح خط دوم مترو
چانگشا	هونان	۳۰۴	۷۸۲۵	۲۹ آوریل ۲۰۱۴	۲۱ مارس ۲۰۱۶
نینگیو	ژیجیانگ	۲۳۰	۷۶۱۰	۳۰ می ۲۰۱۴	۲۶ سپتامبر ۲۰۱۵
ووشی	ژیانگسو	۲۴۶	۸۲۰۵	۱ جولای ۲۰۱۴	۲۸ دسامبر ۲۰۱۴
چینگدائو	شاندانگ	۴۸۰	۹۳۰۰	۱۶ دسامبر ۲۰۱۵	۱۰ دسامبر ۲۰۱۷
نانچنگ	ژیانگشی	۱۷۸	۴۰۰۰	۲۶ دسامبر ۲۰۱۵	۳۰ ژوئن ۲۰۱۹
فوژو	فوژیان	۲۰۳	۶۱۹۷	۱۸ ژوئن ۲۰۱۶	۲۶ آوریل ۲۰۱۹
نانپینگ	گوانشی	۳۷۰	۳۷۰۳	۲۸ جولای ۲۰۱۶	۶ ژوئن ۲۰۱۹

داده‌های جمعیت سالانه و تولید ناخالص داخلی (GDP) از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ از سالنامه آماری شهر چین جمع‌آوری شده است.

در بسط این تجزیه و تحلیل، جدول ۱۰ تاثیر بازگشایی‌های مترو را بر غلظت پی.ام.۱۰ در پنجره‌های زمانی مختلف بررسی می‌کند. این نشان می‌دهد که در حالی که اثرات کوتاه‌مدت افزایش سطوح پی.ام.۱۰ را نشان می‌دهد، اثرات بلندمدت (بیش از ۵۰۰ روز پس از افتتاح بررسی شده) کاهش آلودگی پی.ام.۱۰ را نشان می‌دهد. این نشان می‌دهد که مزایای توسعه مترو بر کیفیت هوا در طول زمان آشکارتر می‌شود، احتمالاً با تقویت اثر انحراف ترافیک، مسافران بیشتر مترو را به جای وسایل نقلیه شخصی ترجیح می‌دهند.

جدول ۱۰: برآوردهای PSM-DID با پنجره‌های زمانی متفاوت (Wang et al., 2020).

متغیرها	In(PM10)					In(PM2.5)
	۱	۲	۳	۴	۵	۶
treatedxT	۰.۲۱ ***	۰.۰۵ **	-۰.۰۹ ***	۰.۱۵ ***	۰.۰۸ **	-۰.۰۵ ***
In(qw)	(۶.۹۷) ***	(۳.۳۴) **	(۶.۲۵) ***	(۵.۰۱) ***	(۴.۰۶) **	(۳.۰۹) ***
In(xdsd)	۰.۴۱ ***	۰.۱۵ ***	۱.۱۲ ***	۰.۴۱ ***	۰.۱۶ ***	۱.۱۳ ***
	(۵.۸۰) ***	(۳.۹۰) ***	(۱۸.۷۱) ***	(۵.۷۴) ***	(۳.۹۶) ***	(۱۸.۷۶) ***
In(fs)	۳.۶۳ ***	۰.۱۴ ***	۲.۳۹ ***	۳.۵۶ ***	۰.۱۴ ***	۲.۳۸ ***
	(۱۲.۷۰) ***	(۳.۲۴) ***	(۱۴.۶۳) ***	(۱۲.۵۵) ***	(۳.۱۶) ***	(۱۴.۵۸) ***
ifrain	۰.۸۸ ***	۰.۶۳ ***	۰.۱۶ ***	۰.۸۸ ***	۰.۶۳ ***	۰.۱۶ ***
	(۷.۹۵) ***	(۱۰.۸۷) ***	(۳.۱۵) **	(۷.۹۱) ***	(۱۰.۸۴) ***	(۳.۰۷) ***
ثابت	-۱.۲۸ ***	-۰.۶۱ ***	-۰.۱۴ ***	-۱.۲۸ ***	-۰.۶۲ ***	-۰.۱۴ ***
	(-۹.۴۸) ***	(-۸.۹۳) ***	(-۲.۴۷) **	(-۹.۵۵) ***	(-۸.۹۸) ***	(-۲.۵۰) ***
	-۱۹.۹۷ ***	-۳.۶۸ ***	-۱۵.۴۸ ***	-۱۹.۶۹ ***	-۳.۶۷ ***	-۱۵.۴۵ ***
	(-۱۵.۷۳) ***	(-۱۲.۴۰) ***	(-۲۱.۴۲) ***	(-۱۵.۶۰) ***	(-۱۲.۳۶) ***	(-۲۱.۳۹) ***
پنجره زمانی (روز)	± ۹۰	± ۳۵۰	± ۵۰۰	± ۹۰	± ۳۵۰	± ۵۰۰

توجه: ***, **, * به ترتیب میزان اهمیت ۱٪، ۵٪ و ۱۰٪ را نشان می‌دهند.

در ادامه جدول ۱۱ به بررسی ناهمگونی تأثیر بازگشایی‌های مترو در شهرهایی با اندازه‌های مختلف جمعیت می‌پردازد. یافته‌ها نشان می‌دهد که شهرهای با جمعیت بیشتر (بیش از ۲ میلیون نفر) در مقایسه با شهرهای کوچکتر بهبود قابل توجهی را در کیفیت هوا پس از افتتاح مترو تجربه می‌کنند. این را می‌توان به نرخ‌های بالاتر پذیرش مترو و کاهش قابل توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای وسایل نقلیه در مناطق پرجمعیت‌تر نسبت داد.

جدول ۱۱: برآورد PSM-DID با اندازه‌های مختلف جمعیت (Chang et al., 2017).

متغیرها	In(PM10)				In(PM2.5)	
	۱	۲	۳	۴	۵	۶
treatedxT	۰.۲۴ (۱۵.۰۷) ***	-۰.۰۲ (۱.۷۸) *	-۰.۰۳ (۲.۰۴) **	۰.۱۵ (۸.۰۵) ***	-۰.۰۲ (۱.۵۳) *	-۰.۰۱ (۰.۴۶) *
In(qw)	۰.۴۵ (۶.۳۷) ***	۰.۳ (۶.۴۹) ***	۰.۴۱ (۹.۹۶) ***	۰.۴۶ (۶.۷) ***	۰.۳ (۶.۴۹) ***	۰.۴۱ (۱۰.۰۱) ***
In(xdsd)	۳.۲ (۱۲.۱۱) ***	۱.۶۷ (۱۰.۹۱) ***	۰.۳۹ (۸.۵۹) ***	۳.۱۹ (۱۲.۰۷) ***	۱.۶۶ (۱۰.۸۵) ***	۰.۳۸ (۸.۵۲) ***
In(fs)	-۰.۲۹ (-۴.۱۰) ***	۰.۶۵ (۱۱.۳۰) ***	۰.۴۳ (-۱۸.۷۵) ***	-۰.۲۹ (-۴.۱۶) ***	۰.۶۵ (۱۱.۲۶) ***	۰.۴۳ (۸.۳۷) ***
ifrain	-۰.۵۸ (-۶.۷۰) ***	-۰.۱۷ (-۲.۵۷) **	-۰.۵۹ (-۹.۸۳) ***	-۰.۵۸ (-۶.۷۰) ***	-۰.۱۷ (-۲.۵۸) **	-۰.۵۹ (-۹.۸۷) ***
ثابت	-۱۷.۵۷ (-۱۵.۲۷) ***	-۱۲.۰۴ (-۱۶.۹۳) ***	-۵.۷۳ (-۱۸.۷۵) ***	-۱۷.۵۲ (-۱۵.۲۴) ***	-۱۲ (-۱۶.۸۸) ***	-۵.۷۱ (-۱۸.۷۱) ***
پنجره زمانی (روز)	± ۳۵۰	± ۹۰	± ۳۵۰	± ۳۵۰	± ۹۰	± ۳۵۰
جمعیت (میلیون)	۱-۲	۲-۳	۳-۵	۱-۲	۲-۳	۳-۵

توجه: ***، **، * و به ترتیب میزان اهمیت ۱٪، ۵٪ و ۱۰٪ را نشان می‌دهند.

با تمرکز بر عوامل اقتصادی، جدول ۱۲ اثرات باز شدن مترو بر شهرهایی با سطوح تولید ناخالص داخلی متفاوت را تحلیل می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که شهرهایی با سطوح توسعه اقتصادی بالاتر، کاهش شدیدتری در غلظت پی.ام.۱۰ و پی.ام.۲.۵ پس از باز شدن مترو مشاهده می‌کنند. این می‌تواند نشان‌دهنده زیرساخت‌ها و کارایی بیشتر در استفاده از مترو، و همچنین تفاوت در سطوح پایه آلودگی و نیازهای حمل‌ونقل عمومی باشد.

جدول ۱۲: برآوردهای PSM-DID با سطوح مختلف تولید ناخالص داخلی (Wang et al., 2020).

متغیرها	In(PM10)				In(PM2.5)	
	۱	۲	۳	۴	۵	۶
treatedxT	-۰.۱۰۲ (۷.۳۲) ***	-۰.۲۱۶ (۱۵.۶۶) ***	-۰.۱ (۶.۶۰) ***	-۰.۱۷۸ (۱۱.۸۰) ***	-۰.۱۷۸ (۱۱.۸۰) ***	-۰.۱۷۸ (۱۱.۸۰) ***
In(qw)	۰.۳۱ (۷.۵۳) ***	-۰.۳۸۸ (-۴.۸۶) ***	۰.۳۱ (۷.۵۴) ***	-۰.۳۸۶ (-۴.۸۴) ***	۰.۳۱ (۷.۵۴) ***	-۰.۳۸۶ (-۴.۸۴) ***
In(xdsd)	۲.۴۶ (۱۶.۶۲) ***	۱.۲۴۷ (۳.۱۳) ***	۲.۴۴۸ (۱۶.۵۶) ***	۱.۲۳ (۳.۰۹) ***	۲.۴۴۸ (۱۶.۵۶) ***	۱.۲۳ (۳.۰۹) ***
In(fs)	۰.۱۵۴ (۳.۵۲) ***	۰.۰۱ (۰.۰۱) ***	۰.۱۵ (۳.۴۴) ***	۰.۰۰۸ (۰.۰۰) ***	۰.۱۵ (۳.۴۴) ***	۰.۰۰۸ (۰.۰۰) ***
ifrain	-۰.۱۵۶ (-۲.۹۰) ***	-۱.۴۷۸ (-۶.۰۴) ***	-۰.۱۵۶ (-۲.۹۱) ***	-۱.۴۷۸ (-۶.۰۴) ***	-۰.۱۵۶ (-۲.۹۱) ***	-۱.۴۷۸ (-۶.۰۴) ***
ثابت	-۱۴.۵۰۳ (-۲۱.۱۱) ***	-۸.۳۵۷ (-۴.۶۲) ***	-۱۴.۴۵۶ (-۲۱.۰۶) ***	-۸.۲۸۴ (-۴.۵۹) ***	-۱۴.۴۵۶ (-۲۱.۰۶) ***	-۸.۲۸۴ (-۴.۵۹) ***
پنجره زمانی (روز)	± ۹۰	± ۹۰	± ۹۰	± ۹۰	± ۹۰	± ۹۰
تولید ناخالص داخلی (صد میلیون)	۳۰۰۰-۸۰۰۰	۸۰۰۰-۱۰۰،۰۰۰	۳۰۰۰-۸۰۰۰	۸۰۰۰-۱۰۰،۰۰۰	۳۰۰۰-۸۰۰۰	۸۰۰۰-۱۰۰،۰۰۰

توجه: ***، **، * و به ترتیب میزان اهمیت ۱٪، ۵٪ و ۱۰٪ را نشان می‌دهند.

در نهایت، جدول ۱۳ مکانیسم جایگزینی رانندگی را با اندازه‌گیری تغییرات در سطوح مونوکسید کربن بررسی می‌کند، که نماینده‌ای برای انتشارات وسایل نقلیه است. کاهش قابل توجهی در غلظت دی اکسید کربن پس از افتتاح مترو، به ویژه در درازمدت و در شهرهای بزرگتر یا توسعه یافته اقتصادی، از این ایده حمایت می‌کند که متروها به طور موثر جایگزین استفاده از خودرو می‌شوند، بنابراین یکی از منابع آلودگی هوای شهری را کاهش می‌دهند.

جدول ۱۳: تاثیر بازگشایی‌های مترو بر گاز مونوکسید کربن (Wang et al., 2020).

متغیرها	ln(CO)							
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
TreatedxT	-۰.۱	-۰.۲۶	-۰.۶۲	-۰.۲۸	-۰.۳۸	-۰.۴۲	-۰.۵۹۳	-۰.۵۷۸
	(۲.۰۲) **	(۱۰.۴۱) ***	(۲۰.۶۳) ***	(۸.۸۱) ***	(۱۳.۳۳) ***	(۱۴.۶۳) ***	(۲۰.۹۸) ***	(۱۹.۱۹) ***
ln(qw)	۲.۲۵	۰.۱۵	۱.۱۲	۰.۴۵	۰.۳	۰.۴۱	۰.۳۰۸	-۰.۳۸۸
	(۲۸.۰۱) ***	(۳.۸۲) ***	(۱۸.۷۲) ***	(۶.۷۴) ***	(۶.۴۶) ***	(۹.۹۷) ***	(۷.۴۹) ***	(-۴.۸۶) ***
ln(xdsd)	۳.۷۶	۰.۱۸	۲.۳۷	۳.۱۸	۱.۶۵	۰.۳۸	۲.۴۳۸	۱.۲۱۹
	(۱۵.۲۶) ***	(۳.۵۴) ***	(۱۴.۵۴) ***	(۱۲.۰۴) ***	(۶.۴۶) ***	(۸.۴۷) ***	(۱۶.۴۸) ***	(۳.۰۶) ***
ln(fs)	۰.۱۹	۰.۶۴	۰.۱۶	-۰.۲۹	۰.۶۵	۰.۴۳	۰.۱۵۱	۰.۰۰۹
	(۲.۵۱) ***	(۱۰.۹۶) ***	(۳.۰۹) **	(-۴.۱۴) ***	(۱۱.۲۷) ***	(۸.۳۹) ***	(۳.۴۶) ***	(۰.۱۰)
ifrain	-۰.۳۶	-۰.۶۳	-۰.۱۴	۰.۵۸	-۰.۱۸	-۰.۵۹	-۰.۱۵۸	-۱.۴۸
	(-۴.۰۲) ***	(-۹.۱۸) ***	(-۲.۵۴) **	(-۶.۷۳) ***	(-۲.۶۱) ***	(-۹.۹۱) ***	(-۲.۹۴) ***	(-۶.۰۵) ***
ثابت	-۲۱.۶۶	-۳.۸۷	-۱۵.۴۱	-۱۷.۴۹	-۱۱.۹۷	-۵.۶۹	-۱۴.۳۹۵	-۸.۲۳۴
	(-۱۹.۹۷) ***	(-۱۱.۸۱) ***	(-۲۱.۳۳) ***	(-۱۵.۲۰) ***	(-۱۶.۸۳) ***	(-۱۸.۶۴) ***	(-۲۰.۹۶) ***	(-۴.۵۶) ***
پنجره زمانی (روز)	± ۹۰	± ۳۵۰	± ۵۰۰	± ۳۵۰	± ۹۰	± ۹۰	± ۹۰	± ۹۰
جمعیت (میلیون)				۱-۲	۲-۳	۳-۵		
تولید ناخالص داخلی (صد میلیون)							۳۰۰۰-۸۰۰۰	۸۰۰۰-۱۰,۰۰۰

توجه: ***، ** و * به ترتیب میزان اهمیت ۱٪، ۵٪ و ۱۰٪ را نشان می‌دهند.

این روش دیدگاه متفاوتی از رابطه بین توسعه مترو و کیفیت هوا در شهرهای چین ارائه می‌دهد. در حالی که یافته‌های اولیه حاکی از افزایش غیرمنتظره در سطوح پی.ام.۱۰ در کوتاه‌مدت پس از افتتاح خط مترو است، تجزیه و تحلیل دقیق‌تر نشان می‌دهد که این اثرات در بلندمدت معکوس می‌شوند، به‌ویژه در شهرهای بزرگ‌تر و از نظر اقتصادی توسعه‌یافته. کاهش سطح دی اکسید کربن اثر انحراف ترافیک گسترش مترو را بیشتر تایید می‌کند.

۳-۴- روش حداقل مربعات معمولی مبتنی بر ناپیوستگی (DB-OLS)

روش ۳ تاثیر سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی شهری بر آلودگی هوا را با تمرکز بر شهرهای چین بررسی می‌کند. این مدل از روش حداقل مربعات معمولی مبتنی بر ناپیوستگی (DB-OLS) برای تجزیه و تحلیل کیفیت هوا، داده‌های اندازه‌شناسی و مشخصات جمعیتی از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۴ استفاده می‌کند. آلودگی در شهرها با سیستم متروی تازه افتتاح شده مشاهده می‌شود که این اثر در شهرهایی با تراکم جمعیت کمتر و درآمد بالاتر کمتر مشخص است (Sun et al., 2022). این بخش، معادله ۷ مورد استفاده در این روش و متغیرهای آن را توضیح می‌دهد:

$$y_{it} = \beta_0 + \beta_1 open_{it} + p(t)' \cdot \delta + \gamma \cdot p(t)' \cdot open_{it} + X_{it}' \theta + \alpha_i + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

- مدل DB-OLS یک چارچوب قوی برای ارزیابی تأثیر علت بازگشایی‌های مترو بر آلودگی هوا با کنترل عوامل متغیر با زمان و ویژگی‌های خاص شهر ارائه می‌دهد.

- y_{it} : گزارش شاخص‌های کیفیت هوا در شهر i در زمان t اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌های هوا مانند PM_{10} ، $PM_{2.5}$ ، SO_2 و CO .

- $openit$: یک متغیر ساختگی که در صورت باز شدن مترو در شهر i در زمان t برابر ۱ و در غیر این صورت ۰ است. این متغیر تأثیر مستقیم بازگشایی‌های مترو بر کیفیت هوا را نشان می‌دهد.

- $p(t)$: تابع چند جمله‌ای زمان، طراحی شده برای نشان دادن روند اساسی آلودگی هوا در طول زمان.

- گاما و دلتا: ضرایبی که به ترتیب اثر زمان و تعامل بین زمان و باز شدن مترو را کمی می‌کنند.

- X_{it} : بردار متغیرهای کنترلی، از جمله شرایط آب‌وهوایی (دما، بارش، سرعت باد و فشار اتمسفر) و ویژگی‌های شهر (تراکم جمعیت، سطح درآمد)، برای محاسبه سایر موارد عوامل موثر بر آلودگی هوا

- α_i : اثرات ثابت شهر برای کنترل ویژگی‌های مشاهده نشده و تغییرناپذیر زمان هر شهر که می‌تواند بر کیفیت هوا تأثیر بگذارد.

- ε_{it} : عبارت خطا، ثبت عوامل مشاهده نشده‌ای که بر کیفیت هوای شهر i در زمان t تأثیر می‌گذارد.

در این روش محاسباتی ارائه نشده فقط داده‌های ورودی و نتایج مورد بررسی قرار گرفته است.

روش ۳ به بررسی رابطه بین سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی شهری و سطوح آلودگی هوا می‌پردازد و به طور خاص بر شهرهای چین تمرکز می‌کند. با تجزیه و تحلیل داده‌های کیفیت هوا، آمار اندازه‌شناسی و پروفایل‌های جمعیتی شهر بین سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴، این روش از رویکرد حداقل مربعات معمولی مبتنی بر ناپیوستگی (DB-OLS) برای تعیین کمیت تأثیر پیشرفت‌های مترو بر کیفیت هوا استفاده می‌کند. در اینجا توضیحات در جداول ۱۶ تا ۱۹ از مطالعه، خلاصه نتایج و نتیجه‌گیری کلی آورده شده است.

جدول ۱۴ شهرهایی را که خطوط جدید مترو را طی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۶ افتتاح کردند، فهرست می‌کند و تاریخ شروع، ایستگاه‌های فعلی و جدید و درآمد را به تفصیل نشان می‌دهد. این جدول بر سرمایه‌گذاری قابل توجه چین در گسترش زیرساخت‌های حمل‌ونقل ریلی شهری خود در شهرهای مختلف تأکید می‌کند، که نشان‌دهنده یک حرکت استراتژیک برای تقویت شبکه‌های حمل‌ونقل عمومی است. این گسترش، بخشی از یک تلاش گسترده‌تر برای مبارزه با تراکم شهری و آلودگی هوا، زمینه را برای تجزیه و تحلیل مزایای زیست‌محیطی چنین پروژه‌های زیربنایی فراهم می‌کند.

جدول ۱۴: افتتاح خطوط و ایستگاه‌های جدید مترو در سال‌های ۲۰۱۳ الی ۲۰۱۶ در چین (Sun et al., 2022).

نام شهر	تاریخ شروع	ایستگاه‌های موجود	ایستگاه‌های جدید	درآمد سالانه (یوآن)
وو‌هان	دسامبر ۲۰۱۳	۵۰	۲۰	۳۹,۰۰۰
نانجینگ	ژانویه ۲۰۱۴	۶۰	۲۳	۴۵,۰۰۰
چانگشا	فوریه ۲۰۱۴	۲	۲۵	۳۸,۰۰۰
شانگهای	دسامبر ۲۰۱۳	۳۴۰	۲۷	۴۵,۰۰۰
کونمینگ	آوریل ۲۰۱۴	۱۶	۱۸	۳۲,۰۰۰
گوآن‌گجو	دسامبر ۲۰۱۳	۱۳۵	۲۴	۴۴,۰۰۰
شیان	سپتامبر ۲۰۱۳	۲۰	۲۳	۳۴,۰۰۰
وو‌وشی	ژانویه ۲۰۱۴	۰	۲۶	۴۲,۰۰۰
دالیان	ژانویه ۲۰۱۴	۱۵	۱۰	۳۴,۰۰۰
نینگو	می ۲۰۱۴	۲	۲۴	۴۲,۰۰۰
ژنگژو	دسامبر ۲۰۱۳	۳	۲۳	۲۷,۰۰۰

جدول ۱۶ آمار خلاصه‌ای از آلاینده‌های هوا را قبل و بعد از باز شدن خطوط مترو، همراه با متغیرهای وضعیت آب‌وهوا (دما، بارش، فشار، سرعت باد) ارائه می‌دهد. این تفاوت‌های مشاهده‌شده در غلظت آلاینده‌های هوا را برجسته می‌کند، که نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در کیفیت هوا پس از بازگشایی‌های مترو است. این جدول ارتباط مستقیمی بین گسترش حمل‌ونقل

ریلی شهری و کاهش سطح آلودگی هوا را نشان می‌دهد و این فرضیه را تقویت می‌کند که سیستم‌های مترو می‌توانند نقش مهمی در کاهش آلودگی هوای شهری ایفا کنند.

جدول ۱۶: خلاصه آمار (روش ۳) (Sun et al., 2022).

متغیرها	قبل از بازگشایی		بعد از بازگشایی		اختلاف
	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	
آلاینده‌های ناشی از ترافیک	PM2.5	۸۰.۵	۳۲.۴۳	۵۴.۸۶	۲۵.۶۴ ***
	SO2	۳۰.۳۲۵۷	۲۳.۵۳۲۸	۲۷.۶۵۲۱	۲.۶۵۳۶ ***
	NO2	۵۰.۱۲۵۲	۲۸.۶۷۳۲	۴۴.۶۲۱۱	۵.۵۰۴۱ ***
	PM10	۱۱۳.۲۶۱۷	۸۳.۷۱۸۷	۹۲.۲۵۱۷	۲۱.۰۱ ***
	CO	۳.۳۲۶۴	۱۷.۸۲۳۲	۴.۶۲۱۷	-۱.۲۹۵۳ ***
شرایط آب‌وهوایی	دما	۱۹۰.۷۲۱۸	۹۰.۵۶۲۱	۱۹۰.۵۲۱۲	۱.۸۰۰۲ ***
	رطوبت	۱۰۰.۶۲۱۷	۱۰۵.۴۱۵۷	۳۸.۷۲۷۱	۷ ***
	فشار	۶۲۳.۲۷۱۸	۲۸۷.۲۶۷۸	۵۷۵.۲۶۸۱	۴۸.۰۰۳۷ ***
	سرعت باد	۲۵.۲۷۱۶	۱۰.۶۲۱۷	۲۸.۶۲۱۷	۱۷.۷۵۸۹ ***

توجه: ***، ** و * به ترتیب میزان اهمیت ۱٪، ۵٪ و ۱۰٪ را نشان می‌دهند.

جدول ۱۷ نتایج رگرسیون DB-OLS را ارائه می‌کند و تأثیر بازگشایی‌های مترو را بر آلاینده‌های مختلف هوا بررسی می‌کند. این گزارش کاهش قابل توجهی در غلظت‌های پی‌ام ۲.۵، دی اکسید گوگرد، دی اکسید نیتروژن، پی‌ام ۱۰ و مونوکسید کربن را با گنجاندن متغیرهای کنترلی مانند شرایط آب‌وهوایی و ویژگی‌های شهر گزارش می‌دهد. یافته‌ها نشان می‌دهد که گسترش سیستم مترو با بهبود قابل توجهی در کیفیت هوا همراه است و اثربخشی حمل‌ونقل ریلی شهری در کاهش سطح آلودگی را تأیید می‌کند.

جدول ۱۷: تأثیر حمل‌ونقل ریلی شهری (مترو) در آلودگی هوا (Sun et al., 2022).

متغیرها	آلودگی ناشی از حمل‌ونقل				
	PM2.5	SO2	NO2	PM10	CO
شامل متغیرهای کنترل	-۰.۳۶۵ **	-۰.۰۸۷ **	-۰.۰۸۶ **	-۰.۲۵۷	-۰.۰۲۴ **
بدون متغیرهای کنترل	-۰.۰۲۱	-۰.۰۴۳	-۰.۰۰۵	-۰.۰۳۷	-۰.۰۳۴
تعامل شهر و آب‌وهوا	-۱۸.۵۶ **	-۲۴.۶۵ ***	-۰.۱۴۷۶ **	-۰.۱۸۷ **	-۰.۰۵۶ **
مشاهدات	۶۵۰۰	۶۵۰۰	۶۵۰۰	۶۵۰۰	۶۵۰۰

توجه: ***، ** و * به ترتیب میزان اهمیت ۱٪، ۵٪ و ۱۰٪ را نشان می‌دهند.

جدول ۱۸ روند کاهش آلودگی هوا قبل و بعد از افتتاح مترو را عمیق‌تر می‌کند. تغییرات روزانه غلظت آلاینده‌ها را محاسبه می‌کند و کاهش مداوم سطح آلودگی پس از باز شدن را نشان می‌دهد. این تجزیه و تحلیل از تأثیر زیست‌محیطی مثبت توسعه مترو حمایت می‌کند و بهبود مداوم کیفیت هوا را در طول زمان نشان می‌دهد.

جدول ۱۸: روند کاهش آلودگی هوا با حمل و نقل ریلی شهری (مترو) (Chen & Whalley, 2012).

متغیرها	آلودگی ناشی از حمل و نقل				
	PM2.5	SO2	NO2	PM10	CO
قبل از	۰.۰۰۵۲ ***	۰.۰۰۴۳ ***	۰.۰۰۵۲ ***	۰.۰۰۸۸ **	۰.۰۰۲۹ ***
بازگشایی	(۰.۰۰۴)	(۰.۰۰۲)	(۰.۰۰۵)	(۰.۰۰۳)	(۰.۰۰۷)
بعد از	۰.۰۰۲۱ ***	۰.۰۰۶۵ ***	۰.۰۰۸۷ ***	۰.۰۰۳۲ ***	۰.۰۰۳۲ ***
بازگشایی	(۰.۰۰۹)	(۰.۰۰۸)	(۰.۰۰۲)	(۰.۰۰۶)	(۰.۰۰۳)
تفاوت	-۰.۰۰۱۶۵	-۰.۰۰۱۶۱	-۰.۰۰۷۳۲	-۰.۰۰۱۷۵	-۰.۰۰۱۸۷
	(۰.۰۰۷)	(۰.۰۰۳)	(۰.۰۰۳)	(۰.۰۰۳)	(۰.۰۰۳)

توجه: ***، ** و * به ترتیب میزان اهمیت ۱٪، ۵٪ و ۱۰٪ را نشان می‌دهند.

داده‌های ارائه شده در روش در مجموع بر مزایای زیست محیطی قابل توجه گسترش سیستم‌های حمل و نقل ریلی شهری در شهرهای چین تأکید می‌کند. افتتاح خطوط جدید مترو صرفاً یک توسعه زیرساختی نیست. این یک مداخله مهم در مبارزه با آلودگی هوای شهری است. یافته‌های این روش نشان می‌دهد که باز کردن مترو منجر به کاهش قابل توجهی در آلاینده‌های مضر می‌شود و اهمیت راه‌حل‌های حمل و نقل پایدار در بهبود کیفیت هوای شهری را برجسته می‌کند. علاوه بر این، روندهای ثابت کاهش آلودگی پس از افتتاح مترو، مزایای زیست محیطی بلندمدت را نشان می‌دهد و نیاز به سرمایه‌گذاری مستمر در زیرساخت‌های حمل و نقل عمومی را به عنوان یک استراتژی کلیدی برای دستیابی به اهداف پایداری شهری و سلامت عمومی تقویت می‌کند.

۵- مقایسه روش‌ها و نتایج:

هر رویکرد اقتصادسنجی مورد استفاده در روش‌های بررسی شده، بینش‌های متمایزی را در مورد پویایی پیچیده بین توسعه مترو و آلودگی هوا ارائه می‌کند، اما آنها از نظر دقت پیش‌بینی و کاربرد عملی متفاوت هستند:

۱. تفاوت‌های فضایی (SDID):

این مدل در ثبت وابستگی‌های فضایی و اثرات سرریز بسیار مؤثر است و آن را برای تجزیه و تحلیل‌های منطقه‌ای یا در مقیاس بزرگ که ممکن است آلودگی هوا محدود نباشد ارزشمند می‌کند. به مرزهای اداری دقت پیش‌بینی بالایی را برای شاخص آلودگی هوا و پی.ام.۲.۵ نشان می‌دهد، اما محدودیت‌هایی را با پی.ام.۱۰ نشان می‌دهد، که نشان می‌دهد این مدل ممکن است برای گازها و ذرات ریزتر مناسب‌تر باشد.

- کاهش عمومی در شاخص آلودگی هوا:

توسعه مترو منجر به کاهش شاخص آلودگی هوا می‌شود. این روش نشان داد که برای هر ۱۰۰ درصد افزایش در مسافت پیموده شده مترو، شاخص آلودگی هوا تقریباً ۱.۱٪ تا ۱.۲٪ کاهش می‌یابد. همچنین طبق نتایج بررسی شده، اولین توسعه مترو می‌تواند ۷.۳٪ تا ۳۲.۷٪ بر شاخص آلودگی هوا تاثیر داشته باشد.

- تاثیر بر پی.ام.۲.۵ و پی.ام.۱۰:

کاهش غلظت پی.ام.۲.۵ مشاهده شد و نتایج حاکی از کاهش ۱.۳ درصدی در غلظت پی.ام.۲.۵ در سطح اهمیت ۱۰ درصد بود. به طور مشابه، با افزایش مسافت پیموده شده مترو، غلظت پی.ام.۱۰ کاهش یافت اما نتایج به اندازه کافی قابل توجه نیست و به ۱٪ محدود می‌شود.

- عدم تاثیر قابل توجه بر سایر آلاینده‌ها:

طبق نتایج این روش، توسعه متروها تأثیر قابل توجهی بر سطوح دی اکسید گوگرد، دی اکسید نیتروژن، مونوکسید کربن و اوزون نشان نداد.

این یافته‌ها اثربخشی ترکیبی توسعه مترو را در رسیدگی به انواع مختلف آلودگی هوا نشان می‌دهد و تأثیر قابل توجهی بر ذرات معلق را در مقایسه با آلاینده‌های گازی نشان می‌دهد.

۲. تطبیق امتیاز تمایل-تفاوت در تفاوت‌ها (PSM-DID):

این روش در پرداختن به سوگیری‌های انتخاب و ثبت اثرات کوتاه‌مدت و بلندمدت قوی است و افزایش اولیه پی.ام.پی. ۱۰ را نشان می‌دهد که به دنبال آن کاهش می‌یابد. دقت پیش‌بینی متوسط آن با توانایی آن در انعکاس پدیده‌های پیچیده دنیای واقعی که در آن تأثیرات زیرساختی در طول زمان تکامل می‌یابد، تقویت می‌شود.

- تاثیر بر پی.ام.پی. ۱۰:

در این روش، در کوتاه مدت، باز شدن خطوط مترو منجر به افزایش ۵٪ سطوح پی.ام.پی. ۱۰ می‌شود. در دوره‌های طولانی تر، این روش کاهش ۹٪ در سطوح پی.ام.پی. ۱۰ را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده تأثیر تأخیری اما مثبت گسترش مترو بر کیفیت هوا است. همچنین این روش نشان می‌دهد که توسعه مترو در شهرهای با جمعیت بالاتر (در طولانی مدت) می‌تواند اثرگذاری بهتری داشته باشد بطوریکه در شهرهای ۲-۳ میلیون نفر تا ۲٪ و در شهرهای بالای ۳ میلیون نفر تا ۳٪ کاهش پی.ام.پی. ۱۰ مشاهده می‌شود.

- تاثیر بر مونوکسید کربن:

در این روش، در پنجره‌های زمانی مختلف (۹۰ روز، ۳۵۰ روز و ۵۰۰ روز) کاهش میزان مونوکسید کربن را نشان می‌دهد. بطوریکه به ترتیب حدود ۱۰٪، ۲۶٪ و ۶۲٪ کاهش با بازگشایی و توسعه مترو ایجاد شده است.

۳. حداقل مربعات معمولی مبتنی بر ناپیوستگی (DB-OLS):

این روش با دقت پیش‌بینی بالا و تعیین کمیت مستقیم اثرات (به عنوان مثال، کاهش ۱۵ درصدی در AQI)، به ویژه برای ارزیابی اثرات فوری باز شدن مترو این بینش روشن و قابل اجرا را ارائه می‌دهد که برای اجرای سیاست و برنامه ریزی شهری بسیار مهم است.

- این روش بطور کلی نشان می‌دهد که باز شدن خطوط مترو می‌تواند منجر به کاهش متوسط پی.ام.پی. ۲،۵ تا ۱،۸٪، پی.ام.پی. ۱۰ تا ۱،۸٪، دی اکسید نیتروژن تا ۱۴٪، مونوکسید کربن تا ۵٪ و دی اکسید گوگرد تا ۲۴٪ شود.

به طور کلی به نظر می‌رسد DB-OLS از نظر ارائه پیش‌بینی‌های واضح، فوری و قابل سنجش که می‌تواند مستقیماً بر تصمیم‌گیری‌های خط‌مشی تأثیر بگذارد، مؤثرترین است. با این حال، برای برنامه‌ریزی جامع شهری که نیازمند درک تأثیرات منطقه‌ای گسترده‌تر و اثرات بلندمدت است، ترکیب SDID با PSM-DID ممکن است کامل‌ترین دیدگاه را ارائه دهد. این درک دقیق برای سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری که نیاز به تعادل بین نیازهای فوری بهداشت عمومی و اهداف توسعه پایدار بلندمدت دارند، ضروری است.

۶- بحث و نتیجه‌گیری

تحقیقات جامع در مورد ارتباط بین توسعه مترو و کیفیت هوا در چندین شهر چین، بینش‌های متفاوتی را به دست آورده است که به یک رابطه چند وجهی تحت تأثیر عوامل جغرافیایی، اقتصادی و زمانی اشاره می‌کند. رویکرد روشی این مطالعه، با استفاده از روش SDID و روش PSM-DID، ارتباط مثبت بین تراکم شبکه مترو و بهبود کیفیت هوا را روشن کرده است. به طور خاص، یافته‌ها نشان‌دهنده کاهش مداوم سطوح مونوکسید کربن و ذرات معلق در مجاورت خطوط مترو است که بر پتانسیل مترو به عنوان اهرمی برای بهبود محیط‌زیست در محیط‌های شهری تأکید می‌کند.

با این حال، یافته‌های این مطالعه پیچیدگی این رابطه را نیز برجسته می‌کند و اثرات متغیر را در بین آلاینده‌های مختلف و زمینه‌های فضایی نشان می‌دهد. در حالی که کاهش قابل توجه در غلظت پی.ام.پی. ۲،۵، پی.ام.پی. ۱۰ و مونوکسید کربن تأثیر

مثبت زیرساخت‌های مترو را بر آلاینده‌های خاص هوا تأیید می‌کند، تأثیرات غیرقطعی بر اوزون و دی اکسید گوگرد ضرورت طیف گسترده‌تری از اقدامات کنترل آلودگی و استراتژی‌های برنامه‌ریزی شهری را برجسته می‌کند.

افزایش کوتاه‌مدت مشاهده شده در ذرات معلق پس از افتتاح مترو، تبدیل به بهبودهای بلندمدت کیفیت هوا، نشان‌دهنده یک بعد زمانی برای مزایای زیست‌محیطی مترو است. این پویایی بر اهمیت تلاش‌های برنامه‌ریزی شهری پایدار و یکپارچه برای استفاده کامل از پتانسیل کاهش آلودگی سیستم‌های مترو تأکید می‌کند.

علاوه بر این، این مطالعه نشان می‌دهد که چگونه اثربخشی سیستم‌های مترو در کاهش آلودگی هوا توسط اندازه شهر و سطوح درآمد تعدیل می‌شود. این بینش از سیاست‌های توسعه شهری و حمل‌ونقل عمومی متناسب با ویژگی‌ها و نیازهای منحصر به فرد شهرهای مختلف حمایت می‌کند.

این تحقیق با مشارکت در گفتمان در مورد پایداری شهری، نقش حیاتی حمل‌ونقل عمومی، به‌ویژه سیستم‌های مترو را در پرداختن به چالش‌های زیست‌محیطی در اقتصادهایی که به سرعت در حال رشد هستند، برجسته می‌کند. این یافته‌ها از گسترش شبکه‌های مترو به‌عنوان یک مؤلفه راهبردی سیاست زیست‌محیطی شهری حمایت می‌کند، که آماده ارتقای سلامت عمومی، کاهش تراکم ترافیک و تقویت اکوسیستم‌های شهری پایدار است.

در نتیجه، این تحقیق نقش مهم مترو را در کاهش آلودگی هوا تأیید می‌کند، البته در یک تعامل پیچیده از عواملی که رویکردی جامع به برنامه‌ریزی شهری و تدوین سیاست را تضمین می‌کند. بینش‌های به‌دست‌آمده از این مطالعه، راهنمایی‌های ارزشمندی را برای سیاست‌گذاران، برنامه‌ریزان شهری، و سهامداران متعهد به پیشبرد توسعه پایدار و سلامت عمومی در چین و بافت‌های شهری مشابه در سراسر جهان ارائه می‌کند.

۷- مراجع

Li, S., Liu, Y., Purevjav, A. O., & Yang, L. (2019, July). Does subway expansion improve air quality? *Journal of Environmental Economics and Management*, 96, 213–235.

Zheng, S., Zhang, X., Sun, W., & Wang, J. (2019, March). The effect of a new subway line on local air quality: A case study in Changsha. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 68, 26–38.

Xiao, D., Li, B., & Cheng, S. (2020, December). The effect of subway development on air pollution: Evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, 275, 124149.

Wang, Y., Tao, J., Wang, R., & Mi, C. (2020, June 27). Can the New Subway Line Openings Mitigate PM10 Concentration? Evidence from Chinese Cities Based on the PSM-DID Method. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(13), 4638.

Zheng, M., Guo, X., Liu, F., & Shen, J. (2021, January 22). Contribution of Subway Expansions to Air Quality Improvement and the Corresponding Health Implications in Nanjing, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(3), 969.

Sun, J., Sial, M. S., Deng, D., Saxunova, D., Haider, A., & Khan, M. A. (2022, October 27). The Significance of Urban Rail Transit Systems in Mitigating Air Pollution Effects: The Case of China. *Sustainability*, 14(21), 13944.

Lin, D., Nelson, J. D., Beecroft, M., & Cui, J. (2021, May). An overview of recent developments in China's metro systems. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 111, 103783.

- Zhao, H., Geng, G., Zhang, Q., Davis, S. J., Li, X., Liu, Y., Peng, L., Li, M., Zheng, B., Huo, H., Zhang, L., Henze, D. K., Mi, Z., Liu, Z., Guan, D., & He, K. (2019, September 25). Inequality of household consumption and air pollution-related deaths in China. *Nature Communications*, 10(1).
- Hao, Y., Chen, H., & Zhang, Q. (2016, August). Will income inequality affect environmental quality? Analysis based on China's provincial panel data. *Ecological Indicators*, 67, 533–542.
- Goel, D., & Gupta, S. (2015, September 30). The Effect of Metro Expansions on Air Pollution in Delhi. *The World Bank Economic Review*, 31(1), 271–294.
- LI, W., & YIN, S. (2012, April). Analysis on Cost of Urban Rail Transit. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 12(2), 9–14.
- Ye, X., & Sato, M. (2023, August 25). Impact of increased subway station density on air quality in the Yangtze River Delta. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 3(3), 035002.
- Duranton, G., & Turner, M. A. (2011, October 1). The Fundamental Law of Road Congestion: Evidence from US Cities. *American Economic Review*, 101(6), 2616–2652.
- Gendron-Carrier, N., Gonzalez-Navarro, M., Polloni, S., & Turner, M. A. (2022, January 1). Subways and Urban Air Pollution. *American Economic Journal: Applied Economics*, 14(1), 164–196.
- Rivers, N., Saberian, S., & Schaufele, B. (2017). Public Transit and Air Pollution. *SSRN Electronic Journal*.
- Bajari, P., Fruehwirth, J. C., Kim, K. I., & Timmins, C. (2012, August 1). A Rational Expectations Approach to Hedonic Price Regressions with Time-Varying Unobserved Product Attributes: The Price of Pollution. *American Economic Review*, 102(5), 1898–1926.
- Liang, R., Xi, P. (2016). Heterogeneous effects of rail transit on air pollution: an empirical study with RDID. *China Ind. Econ.* 3, 007.
- Chen, Y., & Whalley, A. (2012, February 1). Green Infrastructure: The Effects of Urban Rail Transit on Air Quality. *American Economic Journal: Economic Policy*, 4(1), 58–97.
- Silva, C. B. P. D., Saldiva, P. H. N., Amato-Lourenço, L. F., Rodrigues-Silva, F., & Miraglia, S. G. E. K. (2012, June). Evaluation of the air quality benefits of the subway system in São Paulo, Brazil. *Journal of Environmental Management*, 101, 191–196.
- Sun, J., Sial, M. S., Deng, D., Saxunova, D., Haider, A., & Khan, M. A. (2022, October 27). The Significance of Urban Rail Transit Systems in Mitigating Air Pollution Effects: The Case of China. *Sustainability*, 14(21), 13944.
- Xiao, D., Li, B., & Cheng, S. (2020, December). The effect of subway development on air pollution: Evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, 275, 124149.
- Chen, N., & Xu, L. (2016, November 14). Relationship between air quality and economic development in the provincial capital cities of China. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(3), 2928–2935.
- Özokcu, S., & Özdemir, Z. (2017, May). Economic growth, energy, and environmental Kuznets curve. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 639–647.

Gonzalez-Navarro, M., & Turner, M. A. (2018, November). Subways and urban growth: Evidence from earth. *Journal of Urban Economics*, 108, 85–106.

Basagaña, X., Triguero-Mas, M., Agis, D., Pérez, N., Reche, C., Alastuey, A., & Querol, X. (2018, January). Effect of public transport strikes on air pollution levels in Barcelona (Spain). *Science of the Total Environment*, 610–611, 1076–1082.

Zhang, L., Long, R., & Chen, H. (2019, July). Do car restriction policies effectively promote the development of public transport? *World Development*, 119, 100–110.

Xiao, D., Li, B., Li, Q., An, L., & Cheng, S. (2021, July 30). The effects of subway openings on air quality: evidence from China. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(46), 66133–66157.

China: annual PM2.5 levels Beijing 2023 | Statista. (2024, February 12). Statista.
<https://www.statista.com/statistics/690823/china-annual-pm25-particle-levels-beijing/>

Chang, Y. S., Lee, Y. J., & Choi, S. S. B. (2017, October). Is there more traffic congestion in larger cities? -Scaling analysis of the 101 largest U.S. urban centers-. *Transport Policy*, 59, 54–63.

Mohring, H. (1972). Optimization and Scale Economies in Urban Bus Transportation. *The American Economic Review*, 62, 591-604.