Urban Ecology Researches *Open Access*

Vol. 16(4), (Series 41): 61-78

DOI: 10.30473/grup.2025.71204.2856

E-ISSN: 2538-3949 P-ISSN: 2538-3930

ORIGINAL ARTICLE

Future Study of Key Drivers for Achieving a Low-Carbon City: A Case Study of Tabriz Metropolis

Behnam Aali[1], Firouz Jafari[*2], Iraj Teymuri[3]

1. MSc., Department of Urban and Regional Planning, Tabriz University, Tabriz, Iran.
2. Associate Professor, Department of Urban and Regional Planning, Tabriz University, Tabriz, Iran.
3. Associate Professor, Department of Urban and Regional Planning, Tabriz University, Tabriz, Iran.

***Correspondence**
Firouz Jafari
Email: f-jafari@tabrizu.ac.ir

Receive Date: 07/May/2024
Revise Date: 16/April/ 2025
Accept Date: 03/June/2025

How to cite
Aali, B., Jafari, N., & Teymuri, I. (2026). Future Study of Key Drivers for Achieving a Low-Carbon City: A Case Study of Tabriz Metropolis. *Urban Ecology Researches*, 16(4), 61-78.

ABSTRACT

Climate change poses a serious threat to cities and their inhabitants. The primary driver of this change is the emission and production of greenhouse gases, where cities play a vital role. Tabriz, a metropolis with industrial centers, daily traffic of thousands of vehicles, and consumption of millions of liters of gasoline, faces significant challenges related to air pollution and greenhouse gas emissions. This research aims to identify and analyze the key factors influencing the realization of low-carbon urban development in Tabriz. Employing a descriptive-analytical methodology and MICMAC software, the study examines the relationships among 28 key factors. The statistical population comprised experts and specialists in urban planning and environmental science, from which a sample of 30 individuals was selected using a targeted sampling method. Data were collected through a literature review, expert interviews, and questionnaires. Following analysis, the factors were classified. The results indicate that the protection and development of natural resources, the use of renewable energy, increased walking and pedestrian trips, a small-scale urban structure, and ecosystem protection are key drivers for achieving low-carbon urban development in Tabriz. Moreover, the research demonstrates that synergy among these factors can positively impact the city's sustainable development. Therefore, Tabriz's transition to a low-carbon city requires attention to these identified key factors and the development of comprehensive and integrated policies. These policies should focus on incentivizing renewable energy development, promoting compact urban design, and creating sustainable infrastructure to reduce carbon emissions and improve the quality of life for Tabriz's citizens.

KEYWORDS

Sustainable development, Low-Carbon, Future Study, Micmac, Tabriz.

Copyright © 2026, by the author (s). Published by Payame Noor University, Tehran, Iran.
This is an open access article under the CC BY (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

نشریه علمی

پژوهش‌های بوم‌شناسی شهری

سال شانزدهم، شماره چهارم، (پیاپی ۴۱)، زمستان۱۴۰۴، (۷۸-۶۱)

DOI: 10.30473/grup.2025.71204.2856

E-ISSN: 2538-3949 P-ISSN: 2538-3930

«مقاله پژوهشی»

آینده‌پژوهی عوامل پیشران بر تحقق‌پذیری شهر کم‌کربن: مطالعه موردی کلان‌شهر تبریز

بهنام عالی[۱]، فیروز جعفری[۲*]، ایرج تیموری[۳]

۱. کارشناسی ارشد، گروه برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۲. دانشیار، گروه برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۳. دانشیار، گروه برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

***نویسنده مسئول:** فیروز جعفری
رایانامه: f-jafari@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۳

استناد به این مقاله:
عالی، بهنام؛ جعفری، فیروز و تیموری، ایرج (۱۴۰۴). آینده‌پژوهی عوامل پیشران بر تحقق‌پذیری شهر کم‌کربن: مطالعه موردی کلان‌شهر تبریز. *فصلنامه علمی پژوهش‌های بوم‌شناسی شهری*، ۱۶(۴)، ۶۱-۷۸.

چکیده

تغییرات اقلیمی، شهرها و انسان‌ها را با خطرات جدی مواجه ساخته و پیامدهای ناگواری به همراه دارد. مهم‌ترین عامل این تغییرات، انتشار گازهای گلخانه‌ای است که شهرها در تولید آن نقش بسزایی دارند. کلان‌شهر تبریز نیز به دلیل وجود مراکز صنعتی، تردد روزانه هزاران خودرو و مصرف میلیون‌ها لیتر بنزین، با آلودگی هوا و انتشار گازهای گلخانه‌ای دست‌به‌گریبان است. هدف این پژوهش، شناسایی و تحلیل عوامل کلیدی مؤثر بر تحقق توسعه شهری کم‌کربن در تبریز است. پژوهش حاضر با استفاده از روش توصیفی-تحلیلی و نرم‌افزار MICMAC، روابط میان ۲۸ عامل کلیدی را بررسی می‌کند. جامعه آماری شامل کارشناسان و متخصصان حوزه شهرسازی و محیط زیست بود که با روش نمونه‌گیری هدفمند، ۳۰ نفر به‌عنوان نمونه انتخاب شدند. داده‌های پژوهش از طریق مرور ادبیات، مصاحبه با خبرگان و پرسشنامه گردآوری و پس از تحلیل، عوامل دسته‌بندی شدند. نتایج پژوهش نشان داد که حفاظت و توسعه منابع طبیعی، استفاده از انرژی تجدیدپذیر، میزان بالای سفرهای پیاده و پیاده‌روی، ساختار شهری خرد مقیاس و حفاظت از اکوسیستم، پیشران‌های تحقق توسعه شهری کم‌کربن در تبریز هستند. این پژوهش همچنین نشان داد که هم‌افزایی میان عوامل مختلف می‌تواند تأثیرات مثبتی در توسعه پایدار شهر تبریز داشته باشد. با توجه به نتایج پژوهش، گذار به شهر کم‌کربن در تبریز نیازمند توجه به عوامل کلیدی شناسایی شده و تدوین سیاست‌های جامع و یکپارچه است؛ سیاست‌هایی که بتوانند از طریق حفاظت از منابع طبیعی، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و ایجاد زیرساخت‌های پایدار، زمینه را برای کاهش انتشار کربن و بهبود کیفیت زندگی شهروندان فراهم کنند.

واژه‌های کلیدی

توسعه پایدار، کم‌کربن، آینده‌پژوهی، میک‌مک، تبریز.

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است. © ۱۴۰۴ ناشر این مقاله، دانشگاه پیام نور است.
این مقاله تحت گواهی زیر منتشرشده و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.
This is an open access article under the CC BY (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

مقدمه

تغییرات اقلیمی به یکی از جدی‌ترین چالش‌های جهانی تبدیل شده است و تأثیرات آن در ابعاد مختلف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی مشهود است. انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه در مناطق شهری، به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل گرمایش زمین، بالا آمدن سطح آب دریاها و ایجاد مشکلات زیست‌محیطی شناخته (Duan & Wang, 2019؛ میر سعیدی و همکاران، ۱۴۰۲). شهرها با سهمی بیش از ۷۰ درصد از انتشار کربن جهانی، نه‌تنها هسته بقای انسانی و توسعه اجتماعی هستند، بلکه کانون انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز محسوب می‌شوند (Seto et al., 2014).

توسعه سریع شهرنشینی، رشد زیرساخت‌ها، فعالیت‌های صنعتی و استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی، شهرها را به کانون اصلی انتشار کربن تبدیل کرده است (Shan et al., 2018؛ ولی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۱). این روند نگران‌کننده نیازمند مداخله فوری و سیاست‌گذاری‌های مؤثر است (هاشمی و همکاران، ۱۴۰۱).

در پاسخ به این چالش، مفهوم توسعه شهری کم‌کربن مطرح شده است. این مفهوم بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از طریق برنامه‌ریزی و مدیریت شهری، در کنار حفظ رشد اقتصادی و بهبود کیفیت زندگی تأکید دارد (Moloney & Horne, 2015). شهرهای کم‌کربن با بهره‌گیری از نوآوری‌های فناورانه، چارچوب‌های سیاست‌گذاری پایدار و مشارکت فعال بین دولت‌ها، بخش خصوصی و جامعه مدنی، به دنبال کاهش اثرات زیست‌محیطی و ارتقای پایداری شهری هستند (Gao et al., 2025).

در ایران، باوجود اینکه سهم کشور در مقایسه با کشورهای توسعه‌یافته کم‌تر است، اما روند رشد انتشار گازهای گلخانه‌ای بسیار نگران‌کننده بوده و طی سه دهه اخیر میانگین رشد سالانه ۳/۳ درصدی داشته است (مرکز پژوهش‌های مجلس، ۱۴۰۲). در سال ۲۰۲۰، ایران در رتبه ششم جهانی ازنظر انتشار کربن قرار گرفته و از برخی کشورهای صنعتی پیشی گرفته است (باقری، ۱۴۰۱). تبریز، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین کلان‌شهرهای ایران، نمونه‌ای بارز از این مسئله است.

مطالعات جامع و عمیق در مورد شهر تبریز از ضرورت بالایی برخوردار است. الگوهای توسعه شهری نامناسب در این کلان‌شهر، افزایش مصرف انرژی و چالش‌های زیست‌محیطی متعددی را به همراه داشته است. تمرکز جمعیت، افزایش وسایل نقلیه موتوری، مصرف سوخت‌های فسیلی و فعالیت‌های صنعتی، کلان‌شهر تبریز را به کانون انتشار گازهای گلخانه‌ای تبدیل کرده است. این عوامل نه‌تنها به آلودگی هوا و تغییرات اقلیمی منجر شده‌اند، بلکه بر سلامت شهروندان و پایداری محیط زیست نیز تأثیرات منفی گذاشته‌اند (خدادادی و همکاران، ۱۴۰۲). همچنین، آب‌وهوای خاص تبریز با زمستان‌های سرد و تابستان‌های گرم، الگوهای مصرف انرژی را تحت تأثیر قرار داده و چالش‌ها و فرصت‌های ویژه‌ای را برای اجرای استراتژی‌های کاهش کربن ایجاد کرده است (Shabestari & Mirzaii, 2019).

تحقیقات نشان داده‌اند که گذار به سمت توسعه شهری کم‌کربن نیازمند تحلیل سیستماتیک و جامع عوامل تأثیرگذار است. روش میک‌مک [1] (ماتریس ضربات متقاطع اعمال‌شده بر طبقه‌بندی) به‌عنوان ابزاری کارآمد برای شناسایی و تحلیل روابط میان عوامل کلیدی مطرح شده است (Nazlabadi et al., 2023). این روش امکان بررسی روابط مستقیم و غیرمستقیم بین عوامل مؤثر بر کاهش انتشار کربن را فراهم می‌آورد.

سؤال اصلی پژوهش: پیشران‌های کلیدی مؤثر بر تحقق شهر کم‌کربن در کلان‌شهر تبریز کدمند و چگونه می‌توان با تحلیل روابط میان این پیشران‌ها، راهکارهایی عملی برای سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی شهری ارائه داد؟ همچنین اهداف تحقیق شامل:

- شناسایی عوامل کلیدی محرک توسعه شهری کم‌کربن در تبریز؛
- تحلیل روابط مستقیم و غیرمستقیم میان این عوامل با استفاده از روش میک‌مک؛
- ارائه پیشنهادهایی برای سیاستگذاران و برنامه‌ریزان شهری جهت تسهیل گذار به آینده کم‌کربن.

اهمیت این تحقیق در پتانسیل آن برای ارائه تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر شواهد جهت انتقال پایداری شهری و کاهش انتشار کربن نهفته است. همچنین این پژوهش با تمرکز بر زمینه خاص کلان‌شهر تبریز، به ارائه راهکارهای عملی برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و بهبود کیفیت زندگی شهروندان کمک می‌کند.

مبانی نظری

چارچوب نظری

با ورود به قرن بیست و یکم، مسائل مربوط به امنیت انرژی و گرم شدن کره زمین ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌عنوان نتیجه برخورد انسان با طبیعت، نگرانی‌های گسترده‌ای را در سطح جهانی برانگیخته است. تغییرات اقلیمی باعث ایجاد وضعیت‌هایی می‌شود که احتمال توالی بلایای طبیعی، مهاجرت جمعیت‌های بزرگ و تهدید ثبات اقتصادی و سیاسی کشورها را افزایش می‌دهد (Dai Qing & Matsuoka, 2013).

در پی طرح مفهوم توسعه پایدار و تأکید بر ابعاد آن، بعد اقتصادی

از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شد. نظریه‌پردازان توسعه پایدار تأکید دارند که دستیابی به پایداری واقعی مستلزم حفظ یا بهبود اقتصاد همراه با حفاظت از محیط زیست است (Gordon, 1996). در این راستا، مفهوم اقتصاد کم‌کربن به‌عنوان راه‌حلی برای دستیابی به تعادل میان توسعه اقتصادی و حفاظت از منابع زیست‌محیطی معرفی شد. این مفهوم که نخستین بار در سال ۲۰۰۳ در گزارش هیئت دولت بریتانیا مطرح شد، بر کاهش استفاده از منابع تجدید ناپذیر و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای استوار است و به‌عنوان یکی از تحولات تأثیرگذار پس از انقلاب صنعتی و انقلاب اطلاعاتی شناخته می‌شود (خسروی، ۱۳۹۰).

شهر کم‌کربن، به‌عنوان بخشی از رویکردهای توسعه پایدار، به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و انطباق با تغییرات اقلیمی توجه دارد. این مفهوم، با بهره‌گیری از اصول کاهش[1] و سازگاری[2]، به دنبال کاهش اثرات تغییرات اقلیمی و هم‌زمان سازگاری با آن است (ASSAf, 2011). شهر کم‌کربن به‌ویژه در ادبیات سیاست‌گذاری و گفتمان‌های مرتبط با شهرهای سبز، شهرهای پایدار و جوامع بوم‌گردی جایگاه قابل توجهی یافته است.

بر اساس پروتکل کیوتو (۲۰۰۲)، شهرها به‌عنوان منابع اصلی انتشار کربن نقش کلیدی در مدیریت تغییرات اقلیمی ایفا می‌کنند. این پروتکل با تصویب ضوابط کاهش انتشار دی‌اکسید کربن، مفهوم «شهر کم‌کربن» را مطرح کرد. شهر کم‌کربن شهری است که الگوهای اقتصادی کم‌کربن و سبک زندگی پایدار را باهدف کاهش ردپای کربن و ترویج محصولات پاکیزه دنبال می‌کند (Cheshmehzangi et al., 2018).

توسعه شهری کم‌کربن بر پایه چندین نظریه و رویکرد نظری استوار است:

نظریه متابولیسم شهری: این نظریه شهرها را به‌عنوان سیستم‌های پیچیده‌ای می‌بیند که انرژی و مواد را مصرف کرده و تولید می‌کنند. شن و همکارانش[3] (۲۰۱۸) با تأکید بر این نظریه، بر اهمیت درک جریان‌های انرژی و مواد در شهرها برای شناسایی نقاط کلیدی کاهش انتشار کربن تأکید می‌کنند (Shan et al., 2018).

نظریه گذار اجتماعی–فنی: این نظریه به تعامل بین فناوری و جامعه در فرآیند تغییر به سمت توسعه کم‌کربن می‌پردازد. هول‌تر و همکارانش[4] (۲۰۱۸) معتقدند که برای موفقیت در این گذار، باید به‌طور هم‌زمان به سازگاری زیرساخت‌ها، اصلاح قوانین و مقررات، تغییر رفتار شهروندان و نوآوری‌های سیاستی توجه شود (Holtz et al., 2018).

نظریه یکپارچگی برنامه‌ریزی شهری: این نظریه بر لزوم ادغام مباحث کم‌کربن در تمامی ابعاد برنامه‌ریزی شهری تأکید می‌کند. زنگ و همکارانش[5](۲۰۱۷) عوامل کلیدی مانند بهینه‌سازی برنامه‌ریزی فضایی، بهبود حمل‌ونقل عمومی و افزایش بهره‌وری انرژی ساختمان‌ها را برای دستیابی به این هدف ضروری می‌دانند (Zhang et al., 2017).

توسعه شهری کم‌کربن شامل سه جزء اصلی و مرتبط به هم است:

– زیرساخت فیزیکی: این جزء شامل تمامی عناصر فیزیکی شهر مانند ساختمان‌ها، شبکه‌های حمل‌ونقل، سیستم‌های انرژی و مدیریت پسماند می‌شود. هدف این است که این زیرساخت‌ها به‌گونه‌ای طراحی و مدیریت شوند که انتشار کربن را به حداقل برسانند.

– سیاست‌گذاری و حکمرانی: سیاست‌های شهری، قوانین و مقررات و همچنین مکانیزم‌های مشارکت عمومی نقش کلیدی در هدایت توسعه کم‌کربن دارند. حکمرانی چند سطحی (Moloney & Horne, 2015)نیز برای هماهنگی بین سطوح مختلف تصمیم‌گیری و مدیریت ضروری است.

– ابعاد اجتماعی: تغییر رفتار شهروندان، افزایش آگاهی عمومی، مشارکت جامعه و ایجاد فرهنگ پایدار ازجمله اجزای مهم توسعه شهری کم‌کربن هستند.

اولازابال و پاسکوال[6] (۲۰۱۵) چندین مسیر برای گذار به سمت توسعه شهری کم‌کربن را شناسایی کرده‌اند که عبارت‌اند از:

– نوآوری و توسعه فناوری: توسعه و گسترش فناوری‌های نوین مانند انرژی‌های تجدیدپذیر، حمل‌ونقل پاک و ساختمان‌های سبز

– اصلاحات نهادی و قانونی: ایجاد قوانین و مقررات حمایتی از توسعه کم‌کربن و اصلاح ساختارهای حکمرانی

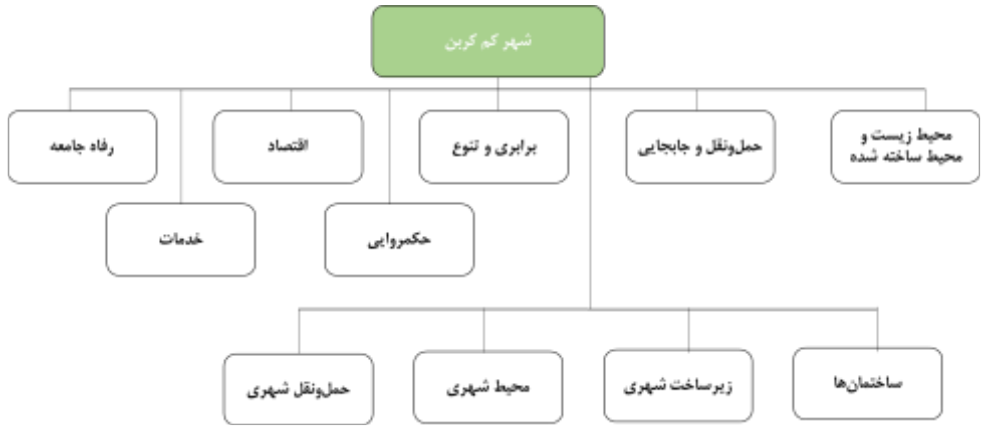
– تغییر رفتار شهروندان: افزایش آگاهی، آموزش و تشویق شهروندان به اتخاذ سبک زندگی کم‌کربن

– تحول بازار: ایجاد بازارهای جدید برای محصولات و خدمات کم‌کربن و حمایت از سرمایه‌گذاری در این حوزه (Olazabal & Pascual, 2015).

به‌طورکلی، طبق مدل مفهومی شهر کم‌کربن در شکل ۱، برای دستیابی به شهر کم‌کربن هفت مؤلفه اصلی شامل محیط

1. Mitigation
2. Adaptation
3.Shan et al.
4.Holtz et al.
5.Zhang et al.
6. Olazabal & Pascual

زیست، حمل‌ونقل، برابری، حکمروایی، اقتصاد، خدمات و رفاه جامعه شناسایی شده‌اند. در سطح محیط شهری، چهار مؤلفه اساسی ساختمان‌ها، زیرساخت شهری، محیط زیست شهری و حمل‌ونقل شهری نقش کلیدی در این راستا دارند. مدل مفهومی پژوهش، عناصر مذکور را به‌صورت نظام‌مند بررسی می‌کند و راهبردهایی برای ایجاد شهرهای کم‌کربن ارائه می‌دهد.



شکل ۱. مدل مفهومی شهر کم‌کربن

پیشینه پژوهش

فطرس و همکاران (۱۳۹۱)، در مطالعه‌ای با عنوان «بررسی تأثیر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر بر رشد اقتصادی کشورهای درحال توسعه»، با استفاده از تحلیل داده‌های دوره ۱۹۸۰-۲۰۰۹، نشان داده‌اند که مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر تأثیر بیش‌تری بر رشد اقتصادی نسبت به انرژی‌های تجدیدپذیر دارد. این مطالعه به کمبود سرمایه و نبود سیاست‌های حمایتی به‌عنوان موانع رشد انرژی‌های تجدیدپذیر اشاره کرده است.

تیموری و همکاران (۱۳۹۳)، در مطالعه‌ای با عنوان «رد پای اکولوژیکی گاز دی‌اکسید کربن سوخت‌های فسیلی در شهر شیراز»، میزان انتشار کربن را محاسبه کرده و نشان دادند که این میزان ۳/۹ برابر ظرفیت زیستی شهر است.

ملایی و همکاران (۱۳۹۵)، در مطالعه‌ای با عنوان «بررسی نیازمندی‌های طراحی شهر کم‌کربن با رویکرد پایداری»، به تحلیل عوامل مؤثر بر تولید کربن در فضای شهری و طراحی محیط‌های شهری باکیفیت بالا پرداختند. نتایج آن‌ها بر اهمیت ساختمان‌های کم‌کربن در کاهش انتشار کربن تأکید دارد.

قنبری و همکاران (۱۳۹۷)، در مطالعه‌ای با عنوان «تحلیلی بر وضعیت مصرف انرژی در چارچوب آینده‌پژوهی»، با روش دلفی و نرم‌افزار میک‌مک دریافتند که آینده مصرف انرژی در تبریز روندی نامطلوب خواهد داشت.

شبستری و میرزایی (۱۳۹۸)، در یک مطالعه امکان‌سنجی، اثرات طراحی نوآورانه مسکن و انتخاب مصالح بر کاهش انتشار کربن را تحلیل کردند و پتانسیل مسکن کم‌کربن را در تبریز نشان دادند.

غلامحسینی (۱۳۹۹)، در مطالعه خود با موضوع «آلودگی کربنی حاصل از بخش حمل‌ونقل در شهر تبریز» به بررسی تأثیر فرم شهری بر انتشار کربن پرداخته است. نتایج پژوهش او نشان می‌دهد که ۶۹ درصد رشد فیزیکی تبریز ناشی از رشد جمعیت و ۳۱ درصد آن به پراکنده رویی مرتبط است. همچنین فشردگی شهری و ترکیب کاربری‌ها از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر انتشار کربن هستند.

روستا و همکاران (۱۳۹۹)، در مطالعه «تدوین مدل محله کم‌کربن»، شاخص‌هایی همچون اجتماع محلی، فرهنگ‌سازی و مشارکت مردمی را به‌عنوان مؤلفه‌های کلیدی برای کاهش کربن معرفی کردند.

محمدی ده‌چشمه و همکاران (۱۳۹۹)، در تحقیقی با عنوان «امکان‌سنجی راهبرد زیست‌محیطی شهرکرد برای دستیابی به شهر کربن صفر»، دریافتند که خلاقیت زیست‌محیطی و طراحی منظر شهری، پایدارترین شاخص‌ها در این زمینه هستند.

خدادادی (۱۴۰۰)، در مطالعه خود با عنوان «ارائه راهکارها و سیاست‌های دستیابی به شهر کم‌کربن در شهر تبریز»، از روش مطالعه اسنادی و تحلیل تجارب کشورهای مختلف استفاده کرده است. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که مخلفه حمل‌ونقل کم‌کربن مهم‌ترین عامل در تحقق شهر کم‌کربن در تبریز است.

نوریان و همکاران (۱۴۰۰)، در پژوهشی با عنوان «تحلیل اثرات کاربری اراضی و شبکه حمل‌ونقل بر انتشار گازهای گلخانه‌ای»، با استفاده از نرم‌افزار CommunityViz نشان دادند که یکپارچه‌سازی حمل‌ونقل و تغییر فرم معابر می‌تواند انتشار گازها را تا ۴۴ درصد کاهش دهد.

ناکامورا و هایاشی[1] (۲۰۱۳)، در مطالعه‌ای با تمرکز بر سیاست‌های حمل‌ونقل، نشان دادند که توسعه شهری کم‌کربن به ترکیب توسعه زیرساخت‌ها و تغییر رفتار مصرف‌کنندگان وابسته است. این پژوهش با رویکرد تحلیلی، راهکارهایی برای کاهش انتشار کربن ارائه کرده است.

وو و همکاران[2] (۲۰۱۶)، با بهره‌گیری از روش U-Kaya، رابطه بین شهرنشینی و انتشار کربن را تحلیل کرده و نشان دادند که شهرنشینی سریع در کشورهای در حال توسعه علاوه بر تشدید نابرابری‌های اقتصادی، بر الگوهای انتشار کربن نیز تأثیرگذار است. یافته‌های این تحقیق بر ضرورت توجه به ابعاد فضایی و اجتماعی–اقتصادی در برنامه‌ریزی شهری تأکید دارد.

یانگ و لی[3] (۲۰۱۸)، در پژوهشی با عنوان «بررسی شهر کم‌کربن: مطالعه تجربی شانگهای»، مدلی برای ارزیابی سطح توسعه اقتصادی کم‌کربن شانگهای ارائه دادند. این مطالعه نشان داد که شانگهای به‌طور کلی در مسیر مثبتی از توسعه اقتصادی کم‌کربن قرار دارد، اما سرمایه‌گذاری در فناوری و ساخت‌وساز کم‌کربن در این شهر هنوز ناکافی است.

اوریا و د آل میدا[4] (۲۰۲۱)، با روش‌های آماری و کمی، پتانسیل کاهش کربن در تبریز را بررسی کرده و اهمیت مداخلات بخش‌محور در کاهش انتشار کربن را برجسته کردند.

درژدژ و همکاران[5] (۲۰۲۱)، در مطالعه‌ای با عنوان «چگونه شهرهای کم‌کربن در لهستان را تحقق بخشیم؟»، به شناسایی عوامل تعیین‌کننده فرآیند کربن‌زدایی در مناطق شهری و روستایی لهستان پرداختند. این پژوهش با روش گلوله برفی و پرسشنامه‌های آنلاین انجام شد و نشان داد که برخلاف کاهش استفاده از زغال‌سنگ در گرمایش خانگی، این سوخت همچنان منبع اصلی تولید برق باقی‌مانده و سیاست‌های کم‌کربن چالش‌های شهری را به‌خوبی پوشش نداده‌اند.

شی و همکاران[6] (۲۰۲۱) در پژوهشی با عنوان «عوامل کلیدی مؤثر بر کاهش شدت انتشار کربن در شهرهای کم‌کربن: مطالعه موردی فوژو، جیانگشی»، ۱۱ عامل مؤثر بر شدت انتشار کربن را با استفاده از مفهوم «اثر حاشیه‌ای شدت انتشار» تحلیل کردند. یافته‌ها نشان داد که سطح مصرف زغال‌سنگ، تولید ناخالص داخلی و صادرات برق به سایر شهرها از عوامل اصلی تأثیرگذار بر شدت انتشار کربن در فوژو هستند.

کویتزو و رود[7] (۲۰۲۲)، در مطالعه‌ای با عنوان «تصور شهر هوشمند از طریق شبکه‌های هوشمند و آینده انرژی شهری بین آزمایش‌های تکنولوژیکی و شهر کم‌کربن»، آینده شبکه‌های هوشمند شهری در برلین آلمان را تحلیل کردند. این تحقیق با تمرکز بر سیاست‌گذاری در بخش انرژی نشان داد که رویکرد غالب به فناوری‌های هوشمند، فنی و خوش‌بینانه است، اما برای جایگزینی سیستم‌های انرژی کم‌کربن تغییرات اساسی لازم است.

تو و همکاران[8] (۲۰۲۲)، در پژوهشی با عنوان «تأثیر پروژه‌های آزمایشی کم‌کربن بر انتشار کربن در چین»، با استفاده از روش‌های اقتصادسنجی به تحلیل تأثیر این پروژه‌ها در سراسر چین پرداختند. یافته‌ها نشان داد که شهرهای آزمایشی کم‌کربن توانسته‌اند انتشار کربن را حدود ۲ درصد کاهش دهند و این تأثیر در شهرهای فقیرتر و غیر صنعتی بیش‌تر بوده است.

کانولی و همکاران[9] (۲۰۲۲)، در یک مطالعه میان‌کشوری که با تحلیل داده‌های ۹۰ کشور درحال توسعه انجام شد، تفاوت‌های بین مناطق شهری و روستایی در ردپای کربن را بررسی کردند. این پژوهش که از روش تحلیل آماری استفاده کرده است، نشان داد مناطق شهری به دلیل افزایش مصرف انرژی و تغییر الگوهای مصرف، ردپای کربن سرانه بالاتری دارند و بر لزوم اتخاذ مداخلات هدفمند تأکید کرد.

افصح‌حسینی (۲۰۲۴)، در پژوهشی، نقش میراث شهری ایران در پایداری و کاهش کربن را بررسی کرده و تأکید کرده است که اصول برنامه‌ریزی سنتی می‌توانند به‌عنوان پایه‌ای برای توسعه کم‌کربن در شهرهای تاریخی نظیر تبریز عمل کنند.

با توجه به پیشینه پژوهش، حاضر با هدف پر کردن این شکاف دانش، به بررسی آینده‌پژوهانه عوامل مؤثر بر تحقق‌پذیری توسعه شهری کم‌کربن در کلان‌شهر تبریز می‌پردازد. با استفاده از روش‌های آینده‌پژوهی، این پژوهش به دنبال شناسایی عوامل کلیدی، برای توسعه آینده تبریز و ارزیابی اثرات هر یک از این سناریوها بر انتشار گازهای گلخانه‌ای است. نوآوری این پژوهش در این است که به‌جای تمرکز بر وضعیت موجود، به آینده شهر تبریز می‌پردازد و با استفاده از روش‌های آینده‌پژوهی، سناریوهای مختلف برای توسعه شهری کم‌کربن را ترسیم می‌کند.

روش انجام پژوهش

این پژوهش از نظر هدف، یک مطالعه کاربردی است که برای شناسایی و تحلیل عوامل کلیدی مرتبط با توسعه شهرهای

1. Nakamura, K., & Hayashi
2. Wu et al.
3. Yang., & Li
4. Ouria, M., & de Almeida
5. Drożdż et al.
6. Xi et al.
7. L Quitzow, F Rohde
8. Tu et al
3. Connolly et al.

کم‌کربن طراحی شده است. از لحاظ روش‌شناسی، این تحقیق ترکیبی از روش‌های اسنادی و پیمایشی را در پیش گرفته و از رویکردهای نوین آینده‌پژوهی بهره می‌برد. با ماهیتی تحلیلی و اکتشافی، روش اصلی تحلیل اثرات متقابل انتخاب شده است که در آن روابط پیچیده میان عوامل کلیدی بررسی می‌شود.

جامعه آماری این پژوهش شامل کارشناسان و متخصصان حوزه‌های مرتبط با شهرسازی، برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای است. به دلیل عدم دسترسی به اطلاعات دقیق درباره حجم جامعه آماری، از روش نمونه‌گیری هدفمند استفاده شد. ۳۰ نفر از کارشناسان خبره که تجربه و دانش کافی در زمینه مورد مطالعه داشتند، به‌عنوان نمونه انتخاب شدند. این افراد شامل اساتید دانشگاهی، مدیران شهری و متخصصان در زمینه توسعه پایدار و مدیریت شهری بودند.

در مرحله اول، برای شناسایی عوامل کلیدی توسعه شهرهای کم‌کربن، مرور جامعی بر ادبیات علمی، شامل مقاله‌های معتبر و گزارش‌های بین‌المللی انجام شد. علاوه بر آن مصاحبه‌هایی نیمه ساختاریافته با ۳۰ نفر از خبرگان این حوزه انجام شد که منجر به استخراج ۲۸ عامل کلیدی گردید.

در گام دوم، عوامل شناسایی شده در قالب یک پرسش‌نامه میان خبرگان توزیع گردید. از آن‌ها خواسته شد تا میزان اهمیت هر عامل را در مقیاس لیکرت ۵ تایی (از ۱ = بی‌اهمیت تا ۵ = بسیار مهم) ارزیابی کنند. داده‌های گردآوری شده، پس از پالایش و تحلیل اولیه، برای شناسایی عوامل مؤثرتر به کار گرفته شدند.

برای بررسی تعاملات و وابستگی میان عوامل، از فن تحلیل اثرات متقابلاستفاده شد. این روش از طریق نرم‌افزار میک‌مک انجام گردید که ابزاری استاندارد در مطالعات آینده‌پژوهی است. در این مرحله ماتریسی شامل روابط میان عوامل کلیدی ایجاد شد. شرکت‌کنندگان، میزان تأثیر هر عامل بر سایر عوامل را در بازه ۰ تا ۳ مشخص کردند که به ترتیب نشان دهنده (نبود تأثیر، تأثیر کم، تأثیر متوسط، تأثیر زیاد) است.

سپس امتیازها در ماتریس متقاطع وارد شد تا در چارچوب نرم‌افزار آینده‌نگاری میک‌مک تأثیرگذاری و تأثیرپذیری (مستقیم و غیرمستقیم) هر کدام از عوامل و متغیرهای زیرمجموعه آن‌ها با دیگر عوامل سنجیده شود و با مشخص کردن نیروهای پیشران کلیدی، نمودارهای لازم به‌عنوان خروجی به‌دست آید. عوامل ذکر شده مؤثر بر تحقق شهر کم‌کربن در کلان‌شهر تبریز در پرسش‌نامه، در جدول شماره ۲، قابل مشاهده است. همچنین در جدول ۱، نمونه‌ای فرضی از ماتریس تحلیل آثار برای ۵ متغیر فرضی نشان داده شده است.

جدول ۱. نمونه‌ای فرضی از ماتریس تحلیل اثرات متقابل

تأثیر	متغیر ۱	متغیر ۲	متغیر ۳	متغیر ۴	متغیر ۵	مجموع تأثیرگذاری
متغیر ۱	۰	۲	۳	۲	۱	۸
متغیر ۲	۱	۰	۲	۳	۰	۶
متغیر ۳	۲	۳	۰	۰	۲	۷
متغیر ۴	۲	۱	۳	۰	۱	۷
متغیر ۵	۰	۲	۲	۰	۰	۴
مجموع تأثیرپذیری	۵	۸	۱۰	۵	۴	

این تحلیل شامل تقسیم‌بندی عوامل به چهار دسته اصلی بود:

- عوامل کلیدی[1]: عواملی با تأثیرگذاری بالا و تأثیرپذیری پایین.
- عوامل وابسته[2]: عواملی با تأثیرپذیری بالا و تأثیرگذاری پایین.
- عوامل مستقل[3]: عواملی با تأثیرگذاری و تأثیرپذیری پایین.
- عوامل دوسویه[4]: عواملی که هم تأثیرگذاری و هم تأثیرپذیری بالایی دارند.

خروجی‌های نرم‌افزار میک‌مک شامل نمودارهای پراکندگی عوامل و جدول‌های تحلیل اثرات متقابل بود که عوامل کلیدی توسعه شهرهای کم‌کربن را شناسایی و رتبه‌بندی کرد.

در خصوص پایایی پرسشنامه، نتایج تحلیل‌های آماری نشان داد که پرسشنامه از پایایی مطلوبی برخوردار است. ضریب آلفای کرونباخ برای کل پرسشنامه ۰/۸۹۲ به‌دست آمد که نشان‌دهنده همسانی درونی بالای سؤال‌ها است. همچنین پایایی به روش دونیمه کردن برابر با ۰/۸۷۸ محاسبه شد که تأییدکننده ثبات درونی پرسشنامه است. علاوه بر این، ضریب همبستگی درون‌طبقه‌ای (ICC) برابر با ۰/۸۵۶ به‌دست آمد که نشان‌دهنده توافق بالای بین ارزیاب‌ها می‌باشد.

در بررسی روایی محتوایی، نتایج نشان داد که میانگین نسبت روایی محتوایی (CVR) برابر با ۰/۷۲۵ است که بسیار بالاتر از

1. Key Drivers
2. Dependent Variables
3. Independent Variables
4. Linkage Variables

حدنصاب ۰/۳۳ می‌باشد. همچنین تمامی ۲۸ سؤال پرسشنامه دارای CVR بالاتر از حدنصاب بودند، به‌طوری‌که حداقل CVR برابر با ۰/۴۳۳ و حداکثر آن ۰/۸۸۹ به‌دست آمد. این نتایج نشان‌دهنده روایی محتوایی مطلوب پرسشنامه است.

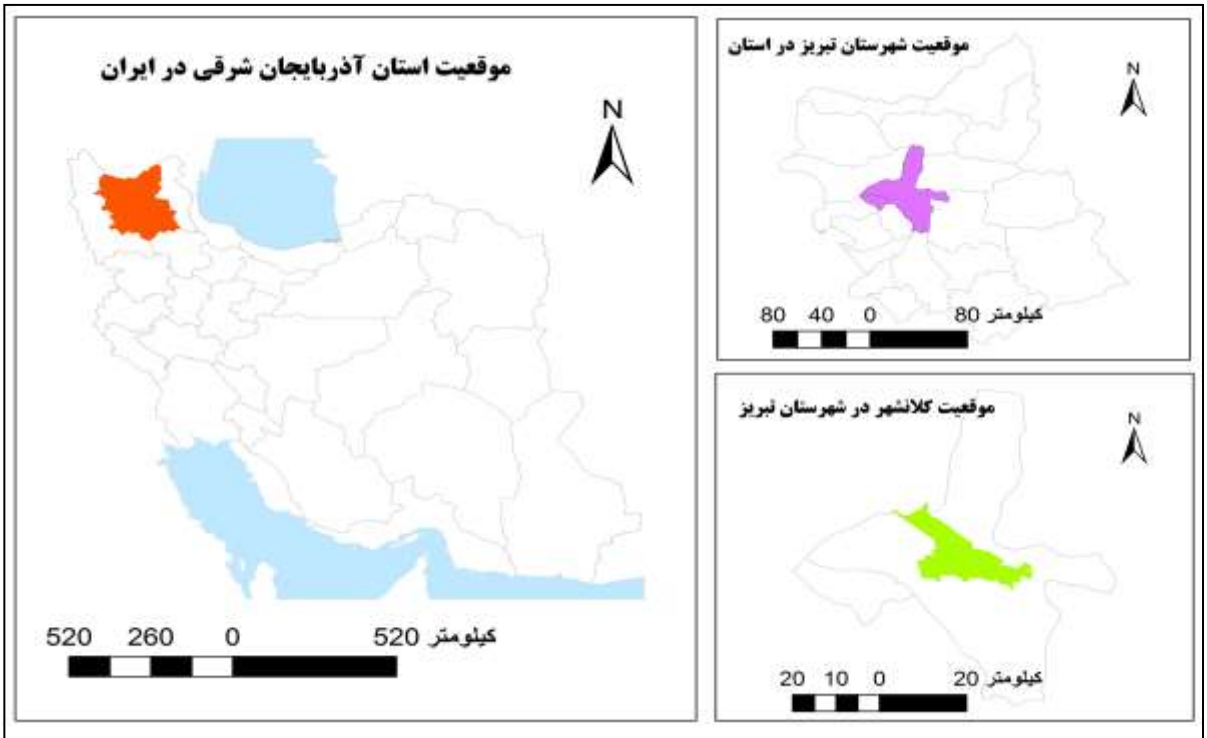
محدوده موردمطالعه

تبریز، واقع در شمال غربی ایران، یکی از کلان‌شهرهای مهم کشور و مرکز استان آذربایجان شرقی است (شکل ۲). به‌عنوان یک مرکز شهری تاریخی، این شهر در دهه‌های اخیر شاهد رشد و توسعه قابل توجهی بوده است که هم چالش‌ها و هم فرصت‌هایی را برای توسعه پایدار ایجاد کرده است (Ouria & de Almeida, 2021). موقعیت جغرافیایی و ساختار شهری تبریز، آن را به یک مطالعه موردی حیاتی برای اجرای ابتکارهای کم‌کربن در کشورهای در حال توسعه تبدیل می‌کند.

تبریز با ارتفاع تقریبی ۱۳۵۰ متر از سطح دریا واقع شده است و بافت شهری آن ترکیبی از میراث تاریخی و توسعه مدرن را نشان می‌دهد. ساختار شهری فعلی شهر تحت تأثیر شهرنشینی سریع شکل گرفته است که منجر به افزایش مصرف انرژی و چالش‌های زیست‌محیطی شده است (خدادادی و همکاران، ۱۴۰۲). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که الگوهای توسعه شهری تبریز تأثیر قابل توجهی بر ردپای کربن آن دارد و بخش حمل‌ونقل و مصرف انرژی ساختمان‌ها سهم عمده‌ای در انتشار گازهای گلخانه‌ای شهر دارند.

آب‌وهوای شهر با زمستان‌های سرد و تابستان‌های گرم مشخص می‌شود که به‌طور مستقیم بر الگوهای مصرف انرژی و ملاحظات برنامه‌ریزی شهری تأثیر می‌گذارد. این شرایط آب و هوایی چالش‌ها و فرصت‌های منحصربه‌فردی را برای اجرای استراتژی‌های کم‌کربن، به‌ویژه در بخش ساختمان، ایجاد می‌کند (Shabestari & Mirzaii, 2019). منطقه شهری تبریز در دهه‌های اخیر گسترش قابل توجهی داشته است که منجر به افزایش فشار بر منابع محیطی و نیاز به رویکردهای برنامه‌ریزی شهری پایدار شده است.

ارزیابی‌های زیست‌محیطی اخیر نشان داده‌اند که تبریز در گذار به سمت یک شهر کم‌کربن با چالش‌های متعددی مواجه است، از جمله نیاز به بهبود سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی، ساختمان‌های کم‌مصرف و افزایش فضاهای سبز شهری. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که درختان و پوشش گیاهی شهری نقش متوسط اما مهمی در کاهش تغییرات اقلیمی دارند، اگرچه پتانسیل قابل توجهی برای گسترش این خدمات وجود دارد (Amini Parsa et al., 2019).



شکل ۲. محدوده موردمطالعه، کلان‌شهر تبریز

یافته‌ها

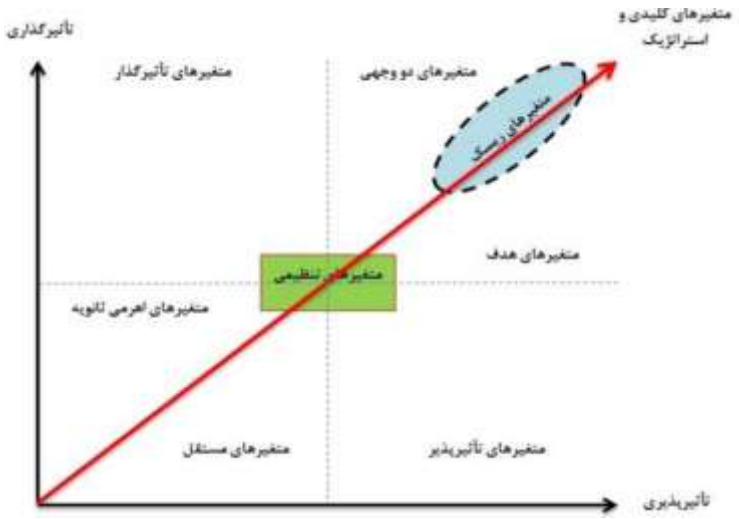
برای تحلیل آینده‌پژوهی عوامل مؤثر بر تحقق توسعه شهری کم‌کربن ابتدا از طریق روش مرور پیشینه تحقیق ۲۸ عامل کلیدی استخراج گردید. سپس این عوامل به‌صورت پرسشنامه برای تعیین میزان اهمیت هرکدام از عوامل در میان خبرگان توزیع گردید. جدول ۲، عوامل مؤثر بر توسعه شهری کم‌کربن را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل از پرسشنامه‌ها در جدول ۲، در بعد زیست‌محیطی، عامل استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، در بعد حمل‌ونقل، عامل استفاده از سوخت‌های پاک و تجدیدپذیر، در بعد جامعه کم‌کربن، عامل شیوه زندگی هماهنگ با محیط زیست، در بعد اقتصاد کم‌کربن، عامل بکارگیری انرژی نو در تأمین انرژی و در بعد برنامه‌ریزی کم‌کربن، عامل تقویت قوانین کارا و مناسب، از اهمیت بالایی نسبت به سایر عوامل برخوردار بودند.

جدول ۲. عوامل مؤثر بر شهر کم‌کربن

کد	بعد	عامل	میانگین امتیاز از ۵	منبع
۱	محیط زیست کم‌کربن	هم‌زیستی با طبیعت	۳/۹۸	مرادی و چاره‌جو، ۱۴۰۰
۲		حفاظت و توسعه منابع طبیعی	۳/۸۷	جمعه پور و معتدل، ۱۴۰۱
۳		حفاظت از اکوسیستم	۴/۱۵	Tan, 2015
۴		مصرف کم‌تر منابع انرژی	۳/۹۲	مرادی و چاره‌جو، ۱۴۰۰
۵		استفاده از انرژی تجدیدپذیر	۴/۲۱	Wei,2011، جبار پور مهرآباد و عابدینی، ۱۴۰۲
۶	حمل‌ونقل کم‌کربن	استفاده از سیستم هوشمند شهری	۳/۷۶	مرادی و چاره‌جو، ۱۴۰۰
۷		استفاده و توسعه دستگاه‌های نوین و کم‌کربن حمل‌ونقلی	۳/۸۴	Jamaluddin, 2023
۸		ارائه گزینه‌های حمل‌ونقل مختلف	۳/۶۹	جبار پور مهرآباد و عابدینی، ۱۴۰۲
۹		مدیریت ترافیک	۳/۷۸	Wei,2011
۱۰		استفاده از سوخت‌های تجدیدپذیر و پاک	۴/۰۲	Jamaluddin, 2023
۱۱		مصرف کم‌تر سوخت‌های فسیلی و تجدید ناپذیر	۳/۹۵	مرادی و چاره‌جو، ۱۴۰۰
۱۲		بالا بودن میزان سفرهای پیاده و میزان پیاده‌روی	۳/۸۲	جبار پور مهرآباد و عابدینی، ۱۴۰۲
۱۳		بالا بودن میزان دوچرخه‌سواری	۳/۶۷	جمعه پور و معتدل، ۱۴۰۱
۱۴	جامعه کم‌کربن	هویت و حس تعلق بالای شهروندان	۳/۷۳	مرادی و چاره‌جو، ۱۴۰۰؛ عظمایی، ۱۳۹۹
۱۵		حمایت از حس مکان	۳/۶۴	Jamaluddin, 2023
۱۶		وجود شیوه زندگی هماهنگ با طبیعت	۳/۸۹	مرادی و چاره‌جو، ۱۴۰۰
۱۷		آموزش و تبلیغات شیوه زندگی کم‌کربن	۳/۷۱	جبار پور مهرآباد و عابدینی، ۱۴۰۲
۱۸	اقتصاد کم‌کربن	پایین بودن مصرف منابع طبیعی	۳/۸۵	Jamaluddin, 2023
۱۹		به‌کارگیری انرژی نو در تأمین انرژی	۳/۹۳	جمعه پور و معتدل، ۱۴۰۱
۲۰		تولید کم‌کربن	۳/۷۹	Wei,2011
۲۱		استفاده از منابع و فناوری‌های نوین	۳/۸۸	جمعه پور و معتدل، ۱۴۰۱
۲۲	برنامه‌ریزی کم‌کربن	تمرکززدایی و اختلاط کاربری	۳/۶۶	Wei,2011
۲۳		عدم به‌کارگیری الگوی توسعه پراکنده	۳/۷۲	مرادی و چاره‌جو، ۱۴۰۰
۲۴		ساختار شهری خرد مقیاس	۳/۶۸	Tan, *2015*
۲۵		تجهیز ساختار شهر برای عابرین و دوچرخه‌ها	۳/۸۳	مرادی و چاره‌جو، ۱۴۰۰
۲۶		تقویت مشارکت	۳/۹۱	Wei,2011، جبار پور مهرآباد و عابدینی، ۱۴۰۲
۲۷		تقویت قوانین کارا و مناسب	۴/۰۸	مرادی و چاره‌جو، ۱۴۰۰
۲۸		حمایت مالی و مشوق‌های برای پروژه	۳/۸۱	جبار پور مهرآباد و عابدینی، ۱۴۰۲

پس از مشخص شدن فهرست عوامل مؤثر برای شناسایی و رتبه‌بندی آن‌ها، متغیرها وارد ماتریس تحلیل تأثیر متقابل شده و با تدوین پرسشنامه استاندارد تحلیل تأثیر متقابل در اختیار خبرگان قرار گرفتند. سپس میانگین پاسخ‌ها جمع‌آوری شده برای ورود به نرم‌افزار میک‌مک صورت گرفته است. پس از اینکه داده‌ها وارد نرم‌افزار شد، تأثیرات عوامل مؤثر بر تحقق توسعه شهری کم‌کربن کلان‌شهر تبریز به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم محاسبه شده است.

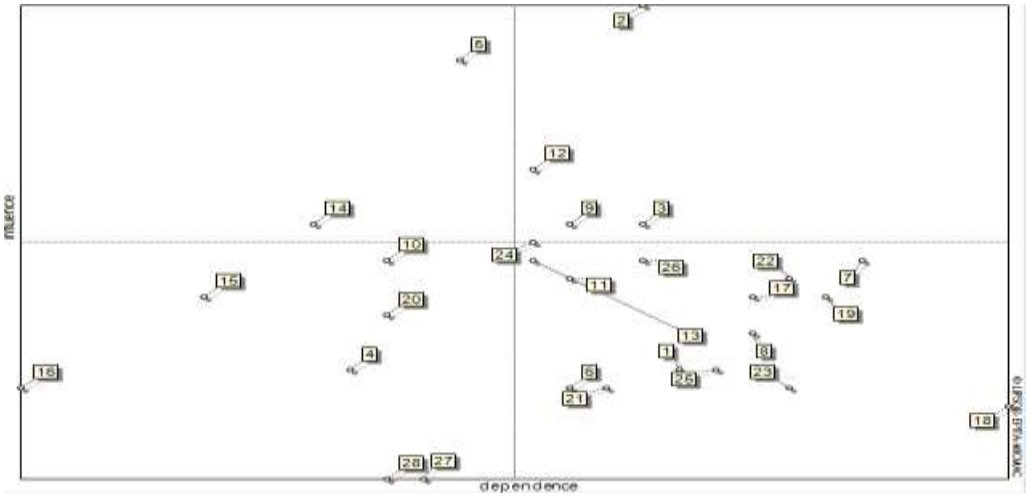
در نمودار ۱، جایگاه متغیرهای تأثیرگذار و تأثیرپذیر به‌صورت دوبعدی نشان داده شده است. متغیرهای استراتژیک، متغیرهایی هستند که هم قابل دست‌کاری و کنترل باشند و هم بر پویایی و تغییر سیستم تأثیرگذار باشند. متغیرهای ناحیه ۱ متغیرهای استراتژیک هستند، زیرا هم قابلیت کنترل توسط سیستم مدیریتی را دارند و هم بر سیستم، تأثیرگذاری قابل قبولی دارند.



شکل ۳. نمودار تأثیرگذاری- تأثیرپذیری

مأخذ: Godet,1994

بر اساس نقشه اثرات نرم‌افزار میک‌مک در شکل ۴، عوامل مؤثر بر شهر کم‌کربن را می‌توان به چهار دسته تقسیم کرد. دسته نخست به علت تأثیرگذاری و تأثیرپذیری بالا (ناحیه شمال شرق شکل ۴) با عنوان عوامل ریسک شناخته می‌شوند که شامل عوامل حفاظت و توسعه منابع طبیعی، حفاظت از اکوسیستم، مدیریت ترافیک و بالا بودن میزان سفرهای پیاده و میزان پیاده‌روی می‌باشند. دسته دوم به علت تأثیرگذاری بالا و تأثیرپذیری کم (ناحیه شمال غرب شکل ۴) به‌عنوان عوامل اثرگذار شناخته می‌شوند که شامل عوامل استفاده از انرژی تجدیدپذیر و هویت و حس تعلق بالای شهروندان هستند. دسته سوم به علت تأثیرپذیری و تأثیرگذاری کم (ناحیه جنوب غرب شکل ۴) به‌عنوان عوامل مستقل شناخته می‌شوند و شامل عوامل استفاده از سوخت‌های تجدیدپذیر و پاک، تولید کم‌کربن، حمایت از حس مکان، مصرف کم‌تر منابع انرژی، وجود شیوه زندگی هماهنگ با طبیعت، تقویت قوانین کارا و مناسب و حمایت مالی و مشوق‌ها برای پروژه هستند. دسته آخر نیز به علت تأثیرگذاری پایین و تأثیرپذیری بالا (ناحیه جنوب شرق شکل ۴) به‌عنوان عوامل تأثیرپذیر شناخته شده و شامل عوامل پایین بودن مصرف منابع طبیعی، استفاده از منابع و فناوری‌های نوین، تجهیز ساختار شهر برای عابرین و دوچرخه‌ها، عدم به‌کارگیری الگوی توسعه پراکنده، ارائه گزینه‌های حمل‌ونقل مختلف، همزیستی با طبیعت، بالا بودن میزان دوچرخه‌سواری، استفاده از سیستم هوشمند شهری، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، استفاده و توسعه دستگاه‌های نوین و کم‌کربن حمل‌ونقلی، آموزش و تبلیغات شیوه زندگی کم‌کربن، تمرکززدایی و اختلاط کاربری، تقویت مشارکت، مصرف کم‌تر سوخت‌های فسیلی و تجدیدناپذیر و ساختار شهری خرد مقیاس بوده‌اند.



شکل ۴. نقشه اثرات عوامل

با توجه به اطلاعات جدول ۳، تجزیه‌وتحلیل پیشران‌های کلیدی مؤثر بر تحقق شهر کم‌کربن در کلان‌شهر تبریز، با استفاده از نرم‌افزار میک‌مک و روش تحلیل اثرات متقاطع، بیانگر درجه پرشدگی ۲/۸۹ درصد بوده که بیانگر تأثیرگذاری بالای عوامل در بسیاری از موارد بر یکدیگر بوده است. تحلیل اولیه داده‌های ماتریس و تأثیرات متقاطع نشان‌دهنده آن است که با توجه به ابعاد ماتریس، در مجموع ۷۰۰ گزینه برای ماتریس وجود دارد که از مجموع ۷۸۴ رابطه ماتریسی قابل ارزیابی، ۳۹۹ رابطه، دارای اثرات متقاطع ۳ بوده است؛ یعنی شاخص‌ها از هم تأثیر پذیرفته‌اند و بر همدیگر تأثیرگذار بوده‌اند. ۲۵۶ رابطه دارای اثرات متقاطع ۲ بوده است؛ یعنی نقش تقویت‌کننده داشته‌اند. ۴۵ رابطه دارای اثرات متقاطع ۱ بوده است؛ یعنی بر روی دیگر شاخص‌ها تأثیر بیش‌تری گذاشته‌اند. ۸۴ رابطه نیز از مجموع اثرات متقاطع، نه از هم تأثیر پذیرفته‌اند و نه بر روی هم تأثیر گذاشته‌اند.

جدول ۳. تحلیل ماتریس اثرات متقابل

ابعاد ماتریس	بدون تأثیر (۰)	تأثیر ضعیف (۱)	تأثیر میانه (۲)	تأثیر قوی (۳)	جمع کل	جمع مؤثر	درجه پرشدگی
۲۸×۲۸	۸۴	۴۵	۲۵۶	۳۹۹	۷۸۴	۷۰۰	۸۹/۲ درصد

نتایج حاصل از نرم‌افزار میک‌مک (در جدول ۴) در بخش تأثیر مستقیم، عواملی که بیش‌ترین میزان اثرگذاری را دارند، شامل حفاظت و توسعه منابع طبیعی، استفاده از انرژی تجدیدپذیر، حفاظت از اکوسیستم، مدیریت ترافیک، هویت و حس تعلق بالای شهروندان و ساختار شهری خرد مقیاس بوده است. همچنین عواملی که بیش‌ترین اثرپذیری را در این بخش داشته‌اند، شامل پایین بودن مصرف منابع طبیعی، استفاده و توسعه دستگاه‌های نوین و کم‌کربن حمل‌ونقلی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، تمرکز و اختلاط کاربری و عدم به‌کارگیری الگوی توسعه پراکنده بوده است. در بخش اثر غیرمستقیم، عوامل حفاظت و توسعه منابع طبیعی، استفاده از انرژی تجدیدپذیر، بالا بودن میزان سفرهای پیاده و میزان پیاده‌روی، مدیریت ترافیک و هویت و حس تعلق بالای شهروندان بیش‌ترین میزان اثرگذاری و عوامل پایین بودن مصرف منابع طبیعی، استفاده و توسعه دستگاه‌های نوین و کم‌کربن حمل‌ونقلی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، تمرکز و اختلاط کاربری و عدم به‌کارگیری الگوی توسعه پراکنده بیش‌ترین میزان اثرپذیری را داشته‌اند.

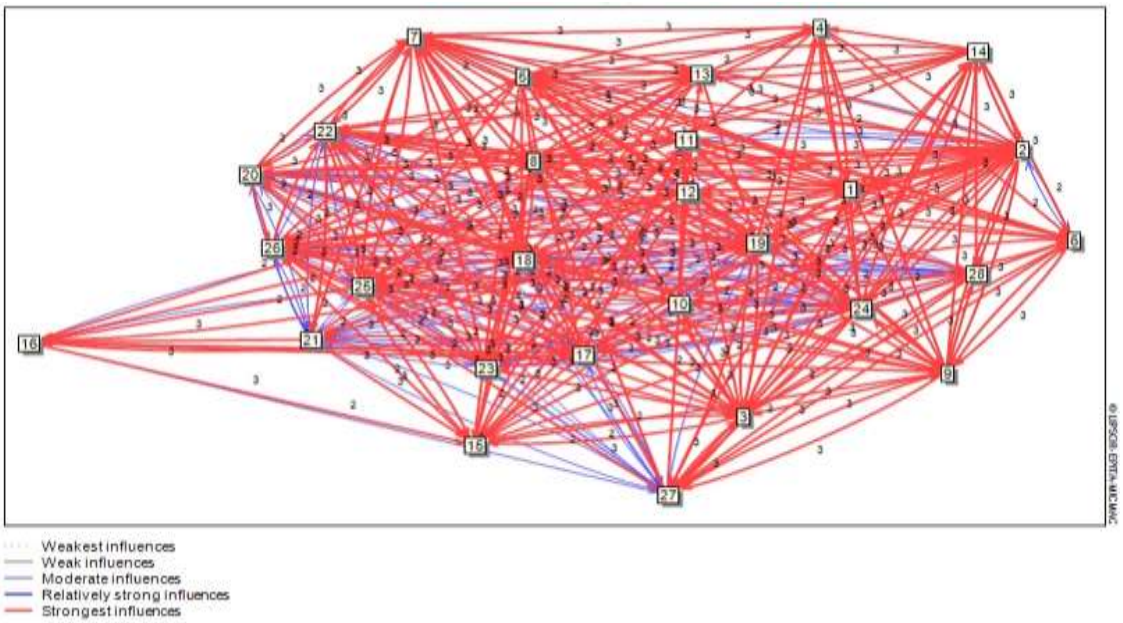
جدول ۴. تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم عوامل

کد	مؤلفه‌ها	تأثیر مستقیم		اثر غیرمستقیم	
		میزان اثرگذاری	میزان اثرپذیری	میزان اثرگذاری	میزان اثرپذیری
۱	هم‌زیستی با طبیعت	۵۴	۶۱	۱۸۴۵۴۱	۲۰۶۵۳۲
۲	حفاظت و توسعه منابع طبیعی	۷۴	۶۰	۲۴۶۲۰۸	۲۰۴۰۰۹
۳	حفاظت از اکوسیستم	۶۲	۶۰	۲۰۶۴۰۲	۲۰۲۱۱۲
۴	مصرف کم‌تر منابع انرژی	۵۴	۵۲	۱۸۴۵۴۱	۱۷۵۶۹۲
۵	استفاده از انرژی تجدیدپذیر	۷۱	۵۵	۲۳۹۰۷۲	۱۸۲۸۴۴
۶	استفاده از سیستم هوشمند شهری	۵۳	۵۸	۱۸۹۱۶۹	۱۹۲۱۲۶
۷	استفاده و توسعه سیستم‌های نوین و کم‌کربن حمل‌ونقلی	۶۰	۶۶	۲۰۱۴۹۷	۲۲۲۶۹۵
۸	ارائه گزینه‌های حمل‌ونقل مختلف	۵۶	۶۳	۱۸۹۱۶۹	۲۱۲۶۸۲
۹	مدیریت ترافیک	۶۲	۵۸	۲۰۹۱۰۴	۱۹۲۶۸۰
۱۰	استفاده از سوخت‌های تجدیدپذیر و پاک	۶۰	۵۳	۲۰۳۹۲۳	۱۷۶۴۵۶
۱۱	مصرف کم‌تر سوخت‌های فسیلی و تجدید ناپذیر	۵۹	۵۸	۱۹۸۴۸۹	۱۹۱۸۴۸
۱۲	بالا بودن میزان سفرهای پیاده و میزان پیاده‌روی	۵۶	۵۷	۲۱۷۸۹۷	۱۸۹۶۸۷
۱۳	بالا بودن میزان دوچرخه‌سواری	۶۰	۵۷	۲۰۱۴۰۷	۱۹۱۴۲۴
۱۴	هویت و حس تعلق بالای شهروندان	۶۲	۵۴	۲۰۸۸۲۶	۱۷۱۳۳۶
۱۵	حمایت از حس مکان	۵۸	۴۸	۱۹۴۱۴۷	۱۶۲۱۵۳
۱۶	وجود شیوه زندگی هماهنگ با طبیعت	۵۳	۴۳	۱۷۹۱۷۱	۱۴۵۳۳۱

کد	مؤلفه‌ها	تأثیر مستقیم		اثر غیرمستقیم	
		میزان اثرگذاری	میزان اثرپذیری	میزان اثرگذاری	میزان اثرپذیری
۱۷	آموزش و تبلیغات شیوه زندگی کم‌کربن	۵۸	۶۳	۱۹۴۷۰۸	۲۱۰۶۷۳
۱۸	پایین بودن مصرف منابع طبیعی	۵۲	۷۰	۱۷۳۳۰۵	۲۳۴۷۷۴
۱۹	استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر	۵۸	۶۵	۱۹۵۷۰۱	۲۲۰۵۴۳
۲۰	تولید کم‌کربن	۵۷	۵۳	۱۸۹۷۲۱	۱۷۸۵۷۳
۲۱	استفاده از منابع و فناوری‌های نوین	۵۳	۵۹	۱۷۷۶۶۰	۱۹۹۵۵۸
۲۲	تمرکززدایی و اختلاط کاربری	۵۹	۶۴	۱۹۸۳۱۵	۲۱۶۹۲۷
۲۳	عدم به‌کارگیری الگوی توسعه پراکنده	۵۳	۶۴	۱۷۷۵۴۴	۲۱۶۹۲۷
۲۴	ساختار شهری خرد مقیاس	۶۱	۵۷	۲۰۶۷۳۰	۱۹۴۳۲۵
۲۵	تجهیز ساختار شهر برای عابرین و دوچرخه‌ها	۵۴	۶۲	۱۷۹۱۷۲	۲۰۹۰۶۲
۲۶	تقویت مشارکت	۶۰	۶۰	۲۰۳۹۷۸	۲۰۱۴۶۱
۲۷	تقویت قوانین کارا و مناسب	۴۸	۵۴	۱۶۲۹۶۳	۱۸۳۳۷۲
۲۸	حمایت مالی و مشوق‌های برای پروژه	۴۸	۵۳	۱۶۰۴۸۴	۱۷۹۶۴۸

شکل ۵، مربوط به گراف اثرات مستقیم است. بر اساس این گراف، در تحلیل تأثیرات مستقیم، بیش‌ترین میزان اثرگذاری مربوط به عامل «حفاظت و توسعه منابع طبیعی» و «استفاده از انرژی تجدیدپذیر» است. این نشان می‌دهد که این دو عامل نقش کلیدی در تحقق شهر کم‌کربن دارند. از سوی دیگر، کم‌ترین میزان اثرگذاری مستقیم مربوط به «تقویت قوانین کارا و مناسب» و «حمایت مالی و مشوق‌ها برای پروژه» است.

در بررسی اثرپذیری مستقیم، «پایین بودن مصرف منابع طبیعی» بیش‌ترین تأثیرپذیری را دارد و پس از آن «استفاده و توسعه سیستم‌های نوین و کم‌کربن حمل‌ونقلی» قرار دارد. کم‌ترین میزان اثرپذیری مستقیم مربوط به «وجود شیوه زندگی هماهنگ با طبیعت» است.



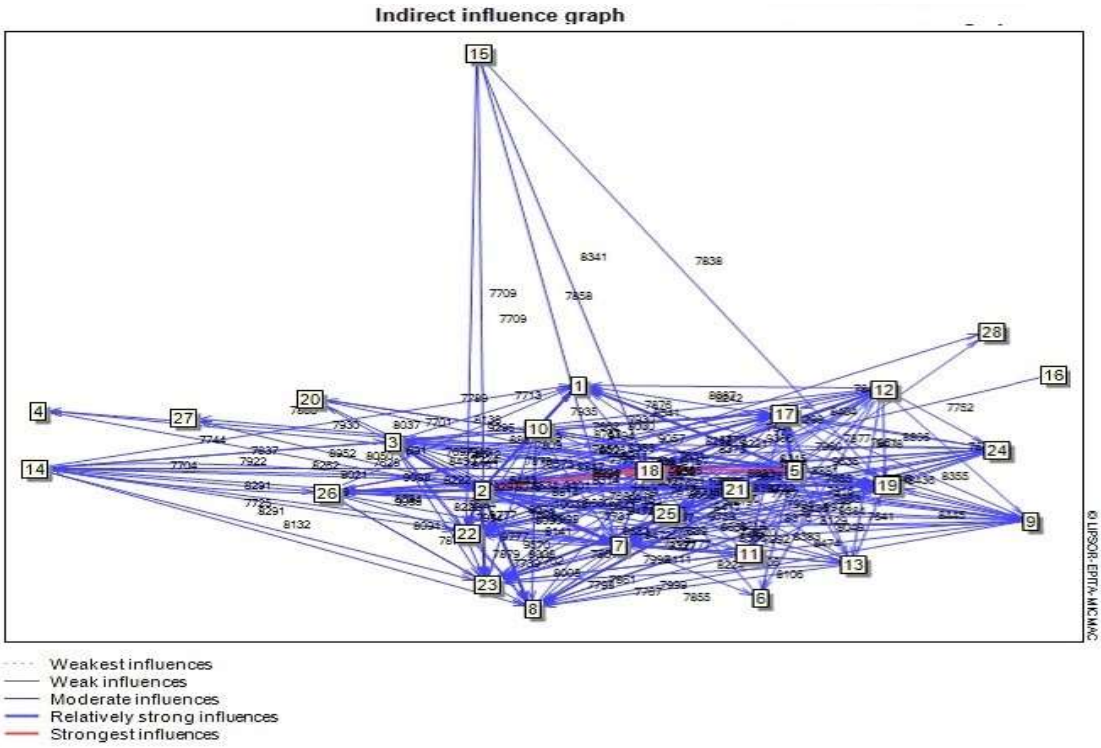
شکل ۵. گراف تأثیرات مستقیم

شکل ۶، تأثیرات غیرمستقیم عوامل را نشان می‌دهد که بر این اساس، میزان اثرپذیری‌ها و عوامل بررسی شده است. در تحلیل تأثیرات غیرمستقیم، الگوی مشابهی با تأثیرات مستقیم مشاهده می‌شود. «حفاظت و توسعه منابع طبیعی» بیش‌ترین اثرگذاری غیرمستقیم را دارد. همچنین «استفاده از انرژی تجدیدپذیر» در رتبه دوم قرار دارد. در مقابل، کم‌ترین اثرگذاری غیرمستقیم

مربوط به «حمایت مالی و مشوق‌ها برای پروژه» است.

در بخش اثرپذیری غیرمستقیم، «پایین بودن مصرف منابع طبیعی» بیش‌ترین میزان را دارد و «استفاده و توسعه سیستم‌های نوین و کم‌کربن حمل‌ونقلی» در رتبه دوم قرار دارد. کم‌ترین میزان اثرپذیری غیرمستقیم مربوط به «وجود شیوه زندگی هماهنگ با طبیعت» است.

این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که عوامل مرتبط با منابع طبیعی و انرژی‌های تجدیدپذیر بیش‌ترین تأثیرگذاری را در تحقق شهر کم‌کربن دارند، در حالی‌که عوامل مربوط به مصرف منابع و سیستم‌های حمل‌ونقل بیش‌ترین تأثیرپذیری را نشان می‌دهند.



شکل ۶. گراف تأثیرات غیرمستقیم

بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف تعیین و شناسایی عوامل پیشران در تحقق شهر کم‌کربن در کلان‌شهر تبریز، با رویکرد آینده‌پژوهی صورت گرفته است. مطالعات جامع و عمیق در مورد شهر تبریز، با توجه به چالش‌های متعدد زیست‌محیطی و الگوی توسعه شهری نامناسب آن، از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. این کلان‌شهر با تمرکز جمعیت، افزایش تردد وسایل نقلیه موتوری، مصرف سوخت‌های فسیلی و فعالیت‌های صنعتی، به یکی از کانون‌های انتشار گازهای گلخانه‌ای تبدیل شده است که این امر منجر به آلودگی هوا، تغییرات اقلیمی و تأثیرات منفی بر سلامت شهروندان و پایداری محیط زیست شده است. علاوه بر این شرایط آب و هوایی خاص تبریز با زمستان‌های سرد و تابستان‌های گرم، الگوهای مصرف انرژی را تحت تأثیر قرار داده و چالش‌ها و فرصت‌های منحصربه‌فردی را برای اجرای راهبردهای کاهش کربن ایجاد کرده است.

برای شناسایی پیشران‌های شهر کم‌کربن باید تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم مورد بررسی قرار گیرند. به‌طور خلاصه عواملی که بیش‌ترین میزان اثرگذاری و کم‌ترین میزان اثرپذیری را دارند، به‌عنوان عوامل پیشران شناسایی می‌شوند. با بررسی این موضوع پنج شاخص پیشران شناسایی گردیدند که شامل حفاظت و توسعه منابع طبیعی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، بالا بودن میزان سفرهای پیاده و میزان پیاده‌روی، ساختار شهری خرد مقیاس و حفاظت از اکوسیستم هستند.

تحلیل ماتریس اثرات متقابل نشان می‌دهد که در میان پیشران‌های شناسایی شده، حفاظت و توسعه منابع طبیعی، مهم‌ترین عامل است که با یافته‌های اوریا و آلمیدا (۲۰۲۱)، در مطالعه خود مبنی بر نقش کلیدی مدیریت پایدار منابع طبیعی در کاهش انتشار کربن در شهرهای در حال توسعه، همخوانی دارد. با توجه به وضعیت فعلی کلان‌شهر تبریز، مساحت فضای سبز شهری در حال حاضر ۲۸۵۰ هکتار است که سرانه ۷/۲ مترمربع به ازای هر نفر را نشان می‌دهد. این میزان با استاندارد جهانی (۲۰–۲۵ مترمربع) فاصله قابل توجهی دارد. قابل ذکر است، منابع آبی

شهر شامل رودخانه‌های مهرانه‌رود و آجی‌چای هستند که نقش مهمی در تعدیل اقلیم محلی ایفاء می‌کنند. فرسایش خاک در ارتفاعات شمالی و تهدید پایداری اکوسیستم، فشار توسعه شهری بر اراضی طبیعی پیرامون شهر و آلودگی منابع آب سطحی به دلیل فعالیت‌های صنعتی، از چالش‌های موجود در این زمینه هستند.

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، دومین پیشران مهم در گذار تبریز به شهر کم‌کربن است. این موضوع در پژوهش شبستری و میرزایی (۲۰۱۹) نیز مورد تأکید قرار گرفته است. انرژی‌های تجدیدپذیر با توجه به پتانسیل بالای تبریز در بهره‌برداری از انرژی خورشیدی (میانگین ۲۹۰۰ ساعت آفتابی سالانه) و انرژی باد، می‌تواند نقش مهمی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفاء کند.

مطالعات شبستری و میرزایی (۲۰۱۹) نشان داد که تبریز از طریق توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، پتانسیل کاهش ۴۰ درصدی مصرف انرژی‌های فسیلی را دارد. تحلیل وضعیت این پیشران نشان داد که میانگین تابش خورشیدی سالانه در تبریز ۴/۸ کیلووات ساعت بر مترمربع در روز است که پتانسیل قابل توجهی برای توسعه انرژی خورشیدی ایجاد می‌کند. موقعیت توپوگرافی تبریز و وجود کریدورهای باد، پتانسیل نصب توربین‌های بادی را در ارتفاعات شمالی فراهم می‌کند. وجود زیرساخت‌های صنعتی می‌تواند به توسعه تولید تجهیزات انرژی‌های تجدیدپذیر کمک کند. با این‌وجود، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در سبد انرژی شهر تبریز کم‌تر از ۵ درصد است. نصب پنل‌های خورشیدی در ساختمان‌های اداری شهر از سال ۱۴۰۰ آغاز شده و تاکنون ۱۵ ساختمان به این سیستم مجهز شده‌اند. پروژه پایلوت مزرعه خورشیدی ۱۰ مگاواتی نیز در منطقه خاوران در حال اجرا است.

تحلیل روابط متقابل دو پیشران اول و دوم نشان می‌دهد که آن‌ها دارای هم‌افزایی قوی هستند. برای مثال، توسعه فضای سبز می‌تواند به کاهش مصرف انرژی از طریق تعدیل دمای محیط کمک کند. همچنین استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند فشار بر منابع طبیعی را کاهش دهد. این ارتباط دوسویه در ماتریس اثرات متقاطع با ضریب همبستگی ۰/۸۲ نشان داده شده است.

افزایش سفرهای پیاده و پیاده‌روی به‌عنوان سومین پیشران کلیدی، با مطالعات خدادادی و همکاران (۲۰۲۳) مطابقت دارد که نشان دادند، توسعه زیرساخت‌های پیاده‌محور می‌تواند تا ۳۰ درصد انتشار گازهای گلخانه‌ای را در بخش حمل‌ونقل شهری کاهش دهد. افزایش سهم سفرهای پیاده با توجه به بافت تاریخی و متراکم مرکز شهر تبریز، فرصت منحصربه‌فردی برای کاهش انتشار کربن ایجاد می‌کند. خدادادی و همکاران (۲۰۲۳)، نشان داده‌اند که توسعه محورهای پیاده در بافت تاریخی تبریز می‌تواند علاوه بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، به احیای هویت تاریخی شهر نیز کمک کند. این پیشران، نقش مهمی در کاهش انتشار کربن شهر تبریز دارد. تحلیل وضعیت موجود نشان می‌دهد که بافت متراکم و تاریخی مرکز شهر با محوریت بازار تاریخی تبریز که روزانه پذیرای حدود ۱۰۰۰۰۰ عابر پیاده است، وجود محورهای تجاری–تاریخی مانند تربیت و خیابان امام که قابلیت تبدیل به پیاده‌راه را دارند و تراکم بالای جمعیتی در مناطق مرکزی (۳۵۰ نفر در هکتار) که پتانسیل سفرهای پیاده را افزایش می‌دهد. از پتانسیل‌های موجود در تبریز هستند. با این وجود، تنها ۱۵٪ سفرهای درون‌شهری تبریز به‌صورت پیاده انجام می‌شود که از میانگین جهانی ۲۵٪ پایین‌تر است. کمبود زیرساخت‌های مناسب پیاده‌روی در مناطق جدید شهر و عدم پیوستگی مسیرهای پیاده در سطح شهر از چالش‌های موجود در این زمینه هستند.

ساختار شهری خرد مقیاس به‌عنوان چهارمین پیشران شناسایی شده است که با پژوهش افصح‌حسینی (۲۰۲۴) در زمینه اهمیت این عوامل در توسعه پایدار شهری همخوانی دارد. این پیشران، نقش مهمی در شکل‌گیری الگوی توسعه کم‌کربن ایفاء می‌کند. در وضعیت کنونی تبریز، شهر دارای ۱۰ منطقه شهری و ۳۸ محله اصلی است که پتانسیل توسعه محله‌محور را دارند. ۴۵٪ محله‌های تبریز دارای مراکز محله‌ای تاریخی هستند که می‌توانند به‌عنوان هسته‌های توسعه خرد مقیاس عمل کنند.

الگوی توسعه فشرده در بافت مرکزی شهر با اصول توسعه کم‌کربن همخوانی دارد. در روندهای در حال ظهور، طرح بازآفرینی ۱۲ محله تاریخی با رویکرد توسعه درون‌زا، ایجاد مراکز محله جدید در مناطق توسعه‌یافته با هدف کاهش سفرهای موتوری و توسعه کاربری‌های مختلط در سطح محلات قابل مشاهده است.

حفاظت از اکوسیستم به‌عنوان پنجمین پیشران شناسایی شده است که با پژوهش افصح‌حسینی (۲۰۲۴) در زمینه اهمیت این عوامل در توسعه پایدار شهری همخوانی دارد. این پیشران، پنجمین عامل کلیدی در توسعه کم‌کربن تبریز به شمار می‌رود. در وضعیت اکوسیستم‌های تبریز، چهار اکوسیستم اصلی شامل کوهستانی، رودخانه‌ای، دشتی و شهری وجود دارد. پارک طبیعی عینالی با مساحت ۵۰۰۰ هکتار سالانه ۱۸۰۰۰ تن کربن جذب می‌کند. همچنین ۱۲۰۰ هکتار باغات سنتی در حاشیه شهر وجود دارد که در معرض تهدید توسعه شهری هستند. از چالش‌های اکوسیستمی موجود می‌توان به تخریب ۳۰٪ از باغات شهر طی دو دهه اخیر، آلودگی اکوسیستم رودخانه‌ای مهرانه‌رود و آجی‌چای و فرسایش خاک در دامنه‌های شمالی شهر اشاره کرد.

پژوهش‌های متعددی، از جمله پژوهش قربانی و همکاران (۱۴۰۲)، بر ارتباط فرم شهری تک‌هسته‌ای تبریز با افزایش استفاده از خودروهای شخصی و انتشار کربن تأکید کرده‌اند. این پژوهش نیز نشان می‌دهد که ساختار شهری خرد مقیاس و ترکیب کاربری‌های مختلط از عوامل کلیدی کاهش سفرهای موتوری هستند. در حالی‌که مطالعات پیشین عمدتاً بر تحلیل مکانی-آماری (مانند رگرسیون وزنی جغرافیایی) متمرکز بودند، این پژوهش با استفاده از روش میک‌مک، اثرات غیرمستقیم عواملی مانند «مدیریت ترافیک» و «دسترسی به مراکز تجاری» را نیز بررسی کرده است.

پژوهش خدادادی و همکاران (۲۰۲۳)، نشان داد که افزایش فضای سبز و استفاده از انرژی خورشیدی می‌تواند تا ۴۰٪ از مصرف سوخت‌های فسیلی در تبریز بکاهد. این یافته با شناسایی «استفاده از انرژی تجدیدپذیر» به‌عنوان دومین پیشران کلیدی در پژوهش حاضر همسو است. پژوهش حاضر علاوه بر این، بر لزوم «حمایت مالی از پروژه‌های انرژی پاک» و «هوشمندسازی ساختمان‌ها» به‌عنوان راهکارهای مکمل تأکید کرده است، در حالی‌که پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر محاسبات کمی انتشار کربن متمرکز بودند.

پژوهش‌هایی مانند ارزیابی شاخص‌های برنامه‌ریزی شهرهای کم‌کربن (۱۴۰۲) از روش‌های کیفی مانند دلفی و ANP استفاده کرده‌اند که مشابه رویکرد مشارکتی این پژوهش در جمع‌آوری داده‌ها از خبرگان است. این پژوهش با بهره‌گیری از روش میک‌مک، علاوه بر شناسایی عوامل، روابط علّی و سلسله‌مراتبی بین آن‌ها را تحلیل کرده است. برای مثال، نشان داده است که «حفاظت از منابع طبیعی» نه‌تنها اثر مستقیم، بلکه اثر غیرمستقیم قابل توجهی بر کاهش کربن دارد.

پژوهش‌هایی مانند افصح حسینی (۲۰۲۴)، بر نقش مشارکت شهروندان و طراحی مبتنی بر میراث شهری در کاهش کربن تأکید کرده‌اند. این پژوهش نیز «هویت و حس تعلق شهروندان» و «آموزش سبک زندگی کم‌کربن» را به‌عنوان عوامل مؤثر شناسایی کرده است. در حالی‌که برخی پژوهش‌های پیشین بیش‌تر بر جنبه‌های فنی و محیطی متمرکز بودند، این پژوهش به‌طور ویژه‌بر «تقویت قوانین کارا» و «حکمرانی چند سطحی» به‌عنوان پیشران‌های نهادی تأکید کرده است.

پژوهش ملایی و همکاران (۱۳۹۵) و قنبری و همکاران (۱۳۹۷)، بر اهمیت ساختمان‌های کم‌کربن و مصرف انرژی تأکید کرده‌اند که با یافته‌های این پژوهش در مورد «مصرف کم‌تر منابع انرژی» همسو است.

در حالت کلی، نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین در زمینه تأکید بر انرژی‌های تجدیدپذیر، فرم شهری و مشارکت اجتماعی همسو است، اما در سه جنبه متمایز می‌شود: نخست، در روش‌شناسی، از روش میک‌مک، برای تحلیل اثرات مستقیم و غیرمستقیم عوامل بهره برده شده است. دوم، به ابعاد نهادی توجه شده و قوانین و حکمرانی به‌عنوان پیشران‌های کلیدی شناسایی شده‌اند. سوم، اولویت‌بندی عوامل به‌گونه‌ای نوین صورت گرفته و بر ساختارهای خرد مقیاس به‌جای زیرساخت‌های حمل‌ونقل سنگین تأکید شده است. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که پژوهش حاضر نه‌تنها یافته‌های پیشین را تأیید می‌کند، بلکه با ارائه چارچوبی نظام‌مند، راهکارهای عملیاتی‌تری برای سیاستگذاران شهری ارائه می‌دهد.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که گذار به شهر کم‌کربن در کلان‌شهر تبریز نیازمند توجه به عوامل کلیدی شناسایی شده و تدوین سیاست‌های جامع و یکپارچه است. سیاست‌هایی که بتوانند از طریق حفاظت از منابع طبیعی، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و ایجاد زیرساخت‌های پایدار، زمینه را برای کاهش انتشار کربن و بهبود کیفیت زندگی شهروندان فراهم کنند. این پژوهش همچنین نشان داد که هم‌افزایی میان عوامل مختلف می‌تواند تأثیرات مثبتی در توسعه پایدار شهر تبریز داشته باشد. پیشنهاد می‌شود که پژوهش‌های آینده به بررسی دقیق‌تر تأثیرات اقتصادی و اجتماعی اجرای این سیاست‌ها بپردازند تا بتوان استراتژی‌های بهینه‌تری برای تحقق شهر کم‌کربن تدوین کرد.

راهکارها

با توجه به یافته‌های پژوهش و تمرکز بر پیشران‌های کلیدی شناسایی شده و همچنین ادغام فناوری‌های نوین، راهکارهای زیر به‌عنوان چارچوب عملیاتی برای تبدیل تبریز به الگوی شهر کم‌کربن در منطقه پیشنهاد می‌گردد:

- ✓ افزایش فضای سبز و بهبود پوشش گیاهی: توسعه پارک‌های عمومی، احیای باغات سنتی و ایجاد فضای سبز؛

✓ حفاظت از رودخانه‌های مهرانه‌رود و آجی‌چای، کاهش فرسایش خاک و ایجاد سازوکارهای نظارتی جهت مدیریت اکوسیستم‌های طبیعی به‌منظور تعدیل اقلیم محلی؛

✓ بهره‌برداری از پتانسیل خورشیدی و بادی: نصب پنل‌های خورشیدی در ساختمان‌های اداری و مسکونی و بهره‌گیری از انرژی بادی جهت افزایش سهم انرژیهای تجدیدپذیر؛

✓ تشویق نوآوری‌های فناورانه: حمایت از پروژه‌های پایلوت و صنعتی در حوزه تولید تجهیزات انرژی‌های پاک از طریق ارائه مشوق‌های مالی و تسهیلات بانکی؛

✓ بهبود زیرساخت‌های پیاده‌روی: طراحی و اجرای مسیرهای پیاده‌رو متصل، بخصوص در بافت‌های تاریخی و متراکم شهر؛

✓ ترویج حمل‌ونقل پایدار: ایجاد خطوط حمل‌ونقل عمومی با استفاده از وسایل نقلیه برقی و هیدروژنی، همراه با تشویق شهروندان به استفاده از این خدمات؛

✓ توسعه محله‌های متراکم و کاربری مختلط: ترویج توسعه محله‌محور با حفظ هویت محلی و ترکیب کاربری‌های مختلف جهت کاهش نیاز به سفرهای طولانی و مصرف انرژی؛

✓ بازآفرینی مناطق تاریخی: احیای محلات تاریخی به‌عنوان هسته‌های توسعه کم‌کربن، با بهبود زیرساخت‌های شهری و ایجاد فضاهای عمومی؛

✓ تصویب و اجرای مقررات کاهش انتشار کربن: تدوین سیاست‌ها و قوانین منسجم باهدف کاهش مصرف انرژی‌های فسیلی و افزایش بهره‌وری انرژی، به همراه نظارت مستمر؛

✓ حمایت مالی و تشویق‌های اقتصادی: ارائه مشوق‌های مالی، یارانه‌ها و تسهیلات برای پروژه‌های انرژی پاک و طرح‌های بهبود زیرساخت‌های شهری جهت افزایش انگیزه مشارکت بخش خصوصی و عمومی در اجرای طرح‌های کم‌کربن؛

✓ ترویج آگاهی و سبک زندگی کم‌کربن: برگزاری دوره‌های آموزشی، کارگاه‌ها و کمپین‌های فرهنگی برای ارتقای دانش شهروندان درباره اثرات زیست‌محیطی و اهمیت کاهش کربن؛

✓ تقویت مشارکت عمومی: ایجاد بسترهای مشارکتی بین دولت، نهادهای مدنی و بخش خصوصی جهت تبادل‌نظر و اجرای پروژه‌های مشترک جهت افزایش حس تعلق و مسئولیت‌پذیری شهروندان در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای.

References

Afsahhosseini, F. (2024). The impact of Iran’s urban heritage on sustainability, climate change and carbon zero. Environment, *Development and Sustainability*, 1-41**.** https://DOI:10.1007/s10668-023-04434-z

Amini Parsa, V., Salehi, E., Yavari, A. R., & van Bodegom, P. M. (2019). Evaluating the potential contribution of urban ecosystem service to climate change mitigation. *Urban Ecosystems*, 22, 989–1006**.** https://DOI:10.1007/s11252-019-00870-w

Bagheri, S. (2022). Analysis of the carbon dioxide emission function in Iran. *Interdisciplinary Environment and Development*, 7(76), 61–73. (In Persian) https://doi.org/10.22034/envj.2022.159308

Connolly, M., Shan, Y., Bruckner, B., Li, R., & Hubacek, K. (2022). Urban and rural carbon footprints in developing countries. *Environmental Research Letters*, 17(8), 084005**.** https://DOI:10.1088/1748-9326/ac7c2a

Cheshmehzangi, A., Xie, L., & Tan-Mullins, M. (2018). The role of international actors in low-carbon transitions of Shenzhen's International Low Carbon City in China. *Cities*, 74, 64–74**.** https://doi.org/10.1016/j.cities.2017.11.004

Dai Qing, Z., & Matsouka, Y. (2013). Low carbon society scenario towards 2030 Guangzhou: A win-win strategy for climate change and sustainable development of the regional economy. *Energy Strategy Research Center*, 1–22**.**

Drożdż, W., Kinelski, G., Czarnecka, M., Wójcik-Jurkiewicz, M., Maroušková, A., & Zych, G. (2021). Determinants of decarbonization—how to realize sustainable and low carbon cities?. *Energies*, 14(9), 2640**.** https://DOI:10.3390/en14092640

Duan, H., & Wang, S. (2019). China's challenge: Strategic adjustment of global temperature control target from 2°C to 1.5°C. *Management World*, 10, 50–63**.** https://doi.org/10.19744/j.cnki.11-1235/f.2019.0131

Fotros, A., Aghazadeh, J., Jebreili, & Soda. (2012). The impact of renewable and non-renewable energy consumption on the economic growth of selected developing countries (including Iran), 1980–2009. *Energy Economics Studies*, 32(9), 51–72. (In Persian)

Gao, Z., Zhou, P., & Wen, W. (2025). What drives urban low-carbon transition? Findings from China. Environmental Impact *Assessment Review*, 110, 1076–79**.** https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107679

Ghanbari, S., & Mansouri Daneshvar, M. R. (2021). Urban and rural contribution to the GHG emissions in

the MECA countries. *Environment, Development and Sustainability*, *23*(4), 6418-6452. https://DOI:10.1007/s10668-020-00879-8

Hashemi, M., Lahijanian, A., Moeinaddini, M., Ebadi-Nia, F., Rahnama, M., Azhashkouhi, K., & Kharazmi, O. (2016). Evaluation of low-carbon transportation scenarios in Mashhad city using the ecological footprint approach. *Geography and Environmental Hazards*, 19(5), 115–130. (In Persian) https://doi.org/10.30473/grup.2023.47322.2394

Holtz, G., Brugnach, M., & Pahl-Wostl, C. (2008). Analyzing complex socio-technical transitions: A dynamic systems perspective. *Global Environmental Change*, 23(3), 487–498**.** https://doi.org/10.1016/j.techfore.2007.02.010

Jiang, N., Jiang, W., & Chen, H. (2023). Innovative urban design for low-carbon sustainable development: Evidence from China's innovative city pilots. *Sustainable Development*, 31(2), 698–715**.** https://doi.org/10.1002/sd.2413

Khodadadi, E., Teimouri, I., & Asghari Zamani, A. (2023). Carbon footprint controlling and monitoring as a step toward sustainable urban development (Case Study: Tabriz City - Iran). *Journal of Environmental Sustainability*, 15(2), 45–62. onhn(In Persian)**.** https://doi.org/10.22126/ges.2022.8094.2562

Khosravi, B. (2011). *Designing carbon-free urban spaces (nodes); Case study: Tajrish Square, Tehran*. Master's thesis, Tarbiat Modares University, Faculty of Art and Architecture, Tehran, Iran. (In Persian)

Krishnan, R., Sanjay, J., Gnanaseelan, C., Mujumdar, M., Kulkarni, A., & Chakraborty, S. (2020). *Assessment of climate change over the Indian region: A report of the Ministry of Earth Sciences (MOES), Government of India*. Springer Nature**.** https://doi.org/10.1007/978-981-15-4327-2

Lee, C.M., & Erickson, P. (2017). How does local economic development in cities affect global GHG emissions? *Sustainable Cities and Society*, 35, 626–636**.** https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.08.027

Li, Q., Yang, M., Xu, F., Yang, F., & Xiang, X. (2021). Evaluating the CO2 abatement effects of low-carbon city policy in China: A quasi-natural experiment. *Energy Informatics*, 4, 1–19**.**https://doi.org/10.1186/s42162-021-00167-3

Malekpour Asl, B., & Pariman, P. (2022). Collaborative planning to achieve a low-carbon city in the metropolis of Tehran. *Journal of Geography and Planning*, 26(81), 226-209. (In Persian) https://doi.org/10.22034/gp.2021.46529.2856

Mirsaeedi, M. , Ahmadi, F. , Seyed Alhossaini, M. and Shabani, A. (2024). The Analysis of the Metropolises Spatial Organization Role in the Low Carbon Transportation, Case Study: Mashhad City. *Journal of Urban Ecology Researches*, *14*(Vol 4 (Series 33)), 1-14. https://doi.org/10.30473/grup.2020.47173.2389

mohammadi, M. , Ghaedi, S. and peyvand, N. (2020). The Feasibility of the Environmental Strategy of Zero Carbon City in Shahrekord. *Geography and Environmental Planning*, *31*(3), 41-60. (In Persian)https://doi.org/10.22108/gep.2020.122584.1291

Moloney, S., & Horne, R. (2015). Low carbon urban transitioning: From local experimentation to urban transformation. *Global Environmental Change*, 25, 52–62**.** https://doi.org/10.3390/su7032437

Moradi, A., & Charehjou, F. (2021). Strategic planning for sustainable urban development with a special focus on low-carbon cities (Case study: Sanandaj city). *Journal of Urban Planning and Research*, 12(46), 111-129. (In Persian) https://doi.org/10.30495/jupm.2021.4063

Motadel, M., & Jameh Pour, M. (2022). Developing indigenous indicators and criteria affecting low-carbon city planning (Case study: Sari city). *Studies on the Built Environment*, 1(2), 222-243. (In Persian) https://doi.org/10.30487/hmes.2023.1975475.1025

Mousavi Sarvine Baghi, E. S. and Ranjbar, E. (2020). Towards Low Carbon Urban Design based on Integrated Analysis of Carbon Generating Resources, Case Study: Semnan City. *Environmental Researches*, *11*(21), 143-156. (In Persian) https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089597.1399.11.21.13.2

Nazlabadi, E., Maknoon, R., Moghaddam, M. R. A., & Daigger, G. T. (2023). A novel MICMAC approach for cross impact analysis with application to urban water/wastewater management. *Expert Systems with Applications*, 230, 120667**.** https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120667

Nakamura, K., & Hayashi, Y. (2013). Strategies and instruments for low-carbon urban transport: An international review on trends and effects. *Transport Policy*, 29, 264–274**.** https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.07.003

Norian, F., Fateh Jalali, A., & Savojbolaghi, T. (2021). Analysis of the effects of land use and transport networks on greenhouse gas emissions with a low-carbon city approach. *Armanshahr Architecture and*

Urban Planning, 14(35), 311–330. (In Persian) https://doi.org/10.22034/aaud.2021.142938.1638

Olazabal, M., & Pascual, U. (2015). Urban low-carbon transitions: Understanding the dynamics of climate change governance in cities. *Cities*, 41, S101–S111**.** https://DOI:10.6092/1970-9870/3649

Ouria, M., & de Almeida, A. T. (2021). How to decarbonize developing cities by 2050: A case from Tabriz-Iran. *Renewable Energy*, 178, 1–15**.** https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.004

Quitzow, L., & Rohde, F. (2022). Imagining the smart city through smart grids? Urban energy futures between technological experimentation and the imagined low-carbon city. *Urban Studies*, *59*(2), 341-359. https://doi.org/10.1177/00420980211005946

Roosta, M. , Javadpoor, M. and Ebadi, M. (2020). Developing a "Low-Carbon Neighborhood Model" in Order to Implement It in the Urban Planning & Design. *Urban Planning Knowledge*, *4*(1), 33-48. https://doi.org/10.22124/upk.2020.15513.1383

Sedaghati, A. and Pirbabaei, M. T. (2021). Application of Hedonic Model in Identifying the Concept of "Value" in Housing Planning from the Perspective of Residents' Preferences (Case Study: Tabriz City). *Geography and Territorial Spatial Arrangement*, *11*(39), 253-292. (In Persian) https://doi.org/10.22111/gaij.2021.6399

Shabestari, S. H., & Mirzaii, H. (2019). *Feasibility study of a low-carbon house in Tabriz*, Iran. Green Mediterranean Conference Proceedings**.** https://doi.org/10.1007/978-3-030-30841-4_28

Shan, Y., Guan, D., Hubacek, K., Zheng, B., Davis, S. J., Jia, L., & Mi, Z. (2018). City-level climate change mitigation in China. *Science Advances*, 4(6), 380–390**.** https://doi.org/10.1126/sciadv.aaq0390

Sheikhi, S., Habib, F., & Habib, F. (2022/1401). [Development of Conceptual and Evaluative Model of Low Carbon Cities]. *Journal of Environmental Science and Technology*, 24(8 (Issue 123)), 61-75. **(**In Persian**)**https://doi.org/10.30495/jest.2023.68388.5713

Tan, S., Yang, J., & Yan, J. (2015). Development of the low-carbon city indicator (LCCI) framework. *Energy Procedia*, 75, 2516–2522**.** https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.253

Tu, Z., Cao, Y., & Kong, J. (2022). The impacts of low-carbon city pilot projects on carbon emissions in China. *Atmosphere*, 13(8), 1269**.** https://doi.org/10.3390/atmos13081269

Valizade, R. , Farajzade, M. , Babaie aqdam, F. , Panahi, A. and Azar, A. (2023). Investigation of Indigenous Components Affecting the Quality Improvement of Spatial Structures of Modern and Traditional Urban Sidewalk in Tabriz Metropolis. *Journal of Urban Ecology Researches*, *13*(Vol 4 , Series 29), 1-16. https://doi.org/10.30473/grup.2023.53817.2531

Wang, H., Gu, K., Dong, F., & Sun, H. (2024). Does the low-carbon city pilot policy achieve the synergistic effect of pollution and carbon reduction? *Energy & Environment*, 35(2), 569–596**.** https://doi.org/10.1177/0958305X221127018

Wang, J., Liu, W., Du, X., & Zhang, W. (2024). Low-carbon-oriented commercial district urban form optimization and impact assessment analysis. *Building and Environment*, 111377**.** https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111377

Wei, T. (2011). *Building low-carbon cities through local land use planning: Towards an appropriate urban development model for sustainability*. University of Nebraska – Lincoln**.**

Wentong, Z., & Yidong, H. (2010). *Planning strategy and practice of low-carbon city construction*. Development in Wuhan, China. 46th ISOCARP Congress**.**

Wu, Y., Shen, J., Zhang, X., Skitmore, M., & Lu, W. (2016). The impact of urbanization on carbon emissions in developing countries: a Chinese study based on the U-Kaya method. *Journal of Cleaner Production*, 135, 589-603. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.121

Xi, X., Han, F., Xie, Y., Yang, L., Yan, H., Luo, C., & Sun, L. (2021, May). The Key Factors Influencing the Decline of Carbon Emission Intensity in Low-Carbon Cities and Countermeasure Research—A Case of Fuzhou, Jiangxi. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 769, No. 2, p. 022040). *IOP Publishing***.** https://doi.org/10.1088/1755-1315/769/2/022040

Yang, X., & Li, R. (2018). Investigating low-carbon city: Empirical study of Shanghai. *Sustainability*, 10(4), 1054**.** https://doi.org/10.3390/su10041054

Zhang, M.S.Y. (2016). *Low-carbon indicator system–sino: Evaluating low-carbon city development level in China*. Doctoral dissertation, University of Duisburg-Essen**.**