Journal of Urban Environmental Management

Journal homepage: https://jumee.kgut.ac.ir
Vol.3, No.1; 2025.pp: 56-73

Research paper

(Received June 6. 2025 Accepted July 29., 2025)

Structural Analysis of the Factors Influencing Smart Environmental Development in the City of Tabriz

Ali Zeynali Azim*[1], Aref Monadi[2], Farzad Zarbakhsh[3], MohammadAmin Monadi Sefidan[4]

[1] *Postdoctoral researcher in urban design, Faculty of Architecture and Urban Planning, Tarbiat Dabir Shahid Rajaei, University, Tehran, Iran.*
[2] *Department of Urban Planning, Faculty of Architecture and Urban Planning, Sooreh International University, Tehran, Iran.*
[3]*Department of Architecture, Ard, C, Islamic Azad University, Ardabil, Iran.*
[4] *Department of Biology, Mizan Non-Profit Higher Education Institute, Tabriz, Iran.*

Abstract

The rapid growth of urbanization and increasing environmental pressures in Iranian metropolises have made it imperative to move towards smart cities with a sustainable development approach. The city of Tabriz, as one of the country's industrial and economic hubs, has faced challenges in recent decades such as air pollution, resource management weaknesses, and inefficiencies in environmental governance structures. This study aimed to conduct a structural analysis of the factors influencing smart environmental development in Tabriz. The research employed a quantitative method based on structural equation modeling (SEM) using the partial least squares (Smart PLS) approach. The statistical population included experts in urban planning, environmental studies, technology, and urban management. Using Cochran's formula for an unlimited population, a sample size of 200 experts was selected. Data were collected through a researcher-designed questionnaire and analyzed using Smart PLS and SPSS software. The findings showed that the factors of "smart waste management" with a path coefficient (beta) of 0.34, "technological infrastructure" with 0.31, "smart urban services" with 0.30, and "smart economy" with 0.26 had the most significant direct impacts on smart environmental development. The final model's coefficient of determination (R^2) was 0.71, and the overall goodness of fit (GOF) was 0.50, indicating a highly desirable model fit. Additionally, the highest R^2 value was recorded for the "smart digital services" component at 0.76. The results of this study indicate that achieving smart environmental development in Tabriz depends on simultaneously enhancing technological capacities, improving environmental management systems, and promoting integrated data-driven urban governance.

Keywords: Smart environmental development, Smart city, Technology, City of Tabriz.

* Corresponding Author: Ali Zeynali Azim
Email*: al.zeynaly@gmail.com*
Phone: 989301285463

Doi: 10.48306/juem.2025.528698.1076

نشریه علمی مدیریت محیط زیست شهری

آدرس نشریه:https://jumee.kgut.ac.ir

سال سوم/شماره اول/بهار ۱۴۰۴/صفحه ۵۶-۷۳

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:۱۴۰۴/۳/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۵/۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱/۱

تحلیل ساختاری مؤلفه‌های تأثیرگذار بر توسعه زیست‌محیطی شهر هوشمند در شهر تبریز

علی زینالی عظیم*[۱]، عارف منادی[۲]، فرزاد زربخش[۳]، محمد امین منادی[۴]

[۱] پژوهشگر پسا دکترای طراحی شهری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی تهران، ایران.

[۲] گروه شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین المللی سوره، تهران، ایران.

[۳] گروه معماری، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران.

[۴] گروه زیست، موسسه آموزش عالی غیر انتفاعی میزان، تبریز، ایران.

چکیده

رشد سریع شهرنشینی و افزایش فشارهای زیست‌محیطی در کلان‌شهرهای ایران، ضرورت حرکت به‌سوی شهرهای هوشمند با رویکرد توسعه پایدار را دوچندان کرده است. کلان‌شهر تبریز به‌عنوان یکی از قطب‌های صنعتی و اقتصادی کشور، در دهه‌های اخیر با چالش‌هایی نظیر آلودگی هوا، ضعف در مدیریت منابع، و ناکارآمدی ساختارهای محیط‌زیستی مواجه بوده است. این پژوهش با هدف تحلیل ساختاری مؤلفه‌های تأثیرگذار بر توسعه زیست‌محیطی شهر هوشمند در تبریز انجام گرفت. روش تحقیق کمی و مبتنی بر مدل‌سازی معادلات ساختاری با رویکرد حداقل مربعات جزئی (Smart PLS) بود. جامعه آماری تحقیق شامل خبرگان حوزه شهرسازی، محیط‌زیست، فناوری و مدیریت شهری بود که با استفاده از فرمول کوکران، از جامعه نامحدود تعداد ۲۰۰ نفر به‌عنوان حجم نمونه انتخاب شدند. داده‌های پژوهش از طریق پرسش‌نامه محقق‌ساخته گردآوری شد و با استفاده از نرم‌افزارهای Smart PLS و SPSS تحلیل گردید. یافته‌ها نشان داد که مؤلفه‌های «مدیریت پسماند هوشمند» با ضریب مسیر بتا برابر با ۳۴ صدم، «زیرساخت فناورانه» با ۳۱ صدم، «خدمات دیجیتال شهری» با ۳۰ صدم و «اقتصاد هوشمند» با ۲۶ صدم بیشترین اثر مستقیم را بر توسعه زیست‌محیطی شهر هوشمند دارند. ضریب تعیین مدل نهایی برابر با ۷۱ صدم و شاخص برازش کلی GOF برابر با ۵۰ صدم به‌دست آمد که نشان‌دهنده برازش بسیار مطلوب مدل است. همچنین بیشترین ضریب تعیین برای مؤلفه «خدمات دیجیتال» با مقدار ۷۶ صدم ثبت شد. نتایج این تحقیق بیانگر آن است که تحقق توسعه زیست‌محیطی در تبریز وابسته به تقویت هم‌زمان ظرفیت‌های فناورانه، بهبود نظام مدیریت محیطی، و ارتقای یکپارچگی داده‌محور در سیستم مدیریت شهری است.

کلمات کلیدی: توسعه زیست‌محیطی، شهر هوشمند، فناوری، شهر تبریز

* نویسنده مسئول: علی زینالی عظیم

ایمیل:*al.zeynaly@gmail.com*

تلفن:۰۹۳۰۱۲۸۵۴۶۳

Doi: 10.48306/juem.2025.528698.1076

۱-مقدمه

افزایش بی‌رویه جمعیت شهری و گسترش روزافزون فعالیت‌های صنعتی، نظام‌های شهری را در دهه‌های اخیر با چالش‌های گسترده‌ای در زمینه پایداری زیست‌محیطی مواجه ساخته است[۱]. تخریب منابع طبیعی، افزایش آلاینده‌های هوا و آب، مدیریت ناکارآمد پسماند و مصرف غیرهدفمند انرژی، از جمله پیامدهای جدی توسعه شهری ناپایدار هستند که کیفیت زندگی شهروندان را به‌طور مستقیم تحت تأثیر قرار داده‌اند[۲]. در پاسخ به این چالش‌ها، مفهوم شهر هوشمند به‌عنوان الگویی نوین برای مدیریت بهینه منابع و ارتقای کارایی زیرساخت‌های شهری مطرح شده است[۳]. شهر هوشمند به‌طور کلی بر بهره‌گیری هدفمند از فناوری‌های نوین در جهت بهینه‌سازی عملکرد شهر و پاسخ‌گویی مؤثر به نیازهای روزافزون شهروندان تأکید دارد[۴، ۵، ۶، ۷، ۸]. اما در میان ابعاد مختلف شهر هوشمند، بُعد زیست‌محیطی دارای جایگاهی خاص و حیاتی است؛ چراکه بدون توجه به پایداری محیطی، سایر ابعاد هوشمندی نمی‌توانند به‌صورت پایدار ادامه یابند [۹]. از این‌رو، توسعه شهر هوشمند باید با رویکردی زیست‌محیطی همراه باشد که در آن شاخص‌هایی مانند مدیریت پسماند، بهینه‌سازی مصرف انرژی، حمل‌ونقل پاک، توسعه فضای سبز، مشارکت شهروندی و حکمرانی محیط‌زیستی نقش اساسی ایفا می‌کنند [۱۰، ۱۱]. با توجه به ماهیت پیچیده و چندبعدی این مؤلفه‌ها، بررسی روابط میان آن‌ها نیازمند به‌کارگیری رویکردهای ساختاری و مدل‌محور است[۱۲]. تحلیل این روابط، نه‌تنها امکان درک دقیق‌تر از تعاملات درونی میان عوامل کلیدی را فراهم می‌کند، بلکه می‌تواند مبنایی برای طراحی سیاست‌های کارآمد، برنامه‌ریزی شهری پایدار و تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر داده فراهم سازد [۱۳].

کلان‌شهر تبریز، به‌عنوان یکی از کهن‌ترین، صنعتی‌ترین و پیشروترین مراکز شهری ایران، در دهه‌های اخیر با فشارهای فزاینده‌ای در حوزه محیط‌زیست شهری مواجه بوده است. موقعیت راهبردی این شهر در شمال غرب کشور، تمرکز صنایع تولیدی و خدماتی، و نقش آن به‌عنوان محور حمل‌ونقل منطقه‌ای، موجب شده است که تبریز همواره در معرض چالش‌های زیست‌محیطی گسترده‌تری نسبت به سایر کلان‌شهرها قرار گیرد.

گسترش نامتوازن شهری، تمرکز فعالیت‌های تولیدی و حمل‌ونقل در هسته مرکزی، و کمبود زیرساخت‌های فناورانه در حوزه مدیریت محیط‌زیستی، از جمله مسائلی هستند که سبب کاهش تاب‌آوری زیستی و افزایش نارضایتی شهروندان شده‌اند. به‌ویژه در سال‌های اخیر، رشد جمعیت شهری و روند پرشتاب توسعه فیزیکی و کالبدی، فشار مضاعفی بر ظرفیت‌های زیست‌محیطی شهر وارد کرده است.

کاهش محسوس کیفیت هوا، کمبود فضای سبز در بافت‌های متراکم، مصرف بالای انرژی در بخش‌های عمومی و خانگی، و ناکارآمدی در تفکیک و بازیافت پسماند، از جلوه‌های ملموس بحران‌های زیست‌محیطی در این کلان‌شهر هستند که با روند توسعه آن، ابعاد گسترده‌تری به خود گرفته‌اند. در عین حال، حرکت به‌سوی هوشمندسازی شهری در تبریز تاکنون عمدتاً محدود به برخی زیرساخت‌های فناورانه و خدمات دیجیتال بوده و پیوند مؤثر آن با اهداف زیست‌محیطی هنوز به‌درستی شکل نگرفته است.

از سوی دیگر، تجربه شهرهای پیشرو در حوزه محیط زیست هوشمند نشان می‌دهد که ادغام موفق فناوری‌های هوشمند با راهبردهای زیست‌محیطی مستلزم یکپارچه‌سازی مؤلفه‌های مختلف همچون مدیریت داده‌محور، حکمرانی محیطی، مشارکت شهروندی و نوآوری فناورانه است. در شرایط کنونی تبریز، نبود یک مدل تحلیلی جامع برای تبیین و ارزیابی عوامل مؤثر بر این تعامل، موجب شده است که تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در این حوزه بیشتر حالت واکنشی، مقطعی و غیرمنسجم داشته باشند.

همچنین، سیاست‌گذاری‌های جاری به دلیل عدم شناسایی روابط علّی بین مؤلفه‌های کلیدی فاقد انسجام راهبردی و اولویت‌بندی هدفمند است. این در حالی است که بهره‌گیری از مدل‌سازی‌های ساختاری می‌تواند درک دقیقی از سازوکار تعامل بین شاخص‌هایی همچون حکمرانی زیست‌محیطی، مصرف انرژی، مشارکت شهروندی، حمل‌ونقل پایدار، کیفیت هوا و فضای سبز فراهم آورد.

ازاین‌رو، ضرورت انجام پژوهشی که بتواند با رویکردی کمی و تحلیلی، چارچوبی مفهمومی و کاربردی برای فهم تعامل این مؤلفه‌ها ارائه دهد، کاملاً محسوس است. انجام چنین مطالعه‌ای می‌تواند زمینه‌ساز تصمیم‌سازی‌های مؤثر، برنامه‌ریزی مبتنی بر شواهد و ارتقای عملکرد سیستم مدیریت شهری تبریز در مسیر توسعه هوشمند و پایدار زیست‌محیطی باشد و الگویی برای سایر کلان‌شهرهای در حال گذار ایران فراهم آورد. در رابطه با موضوع حاضر مطالعات متعددی در خارج از کشور و در داخل کشورهم تعدادی انجام شده است که در اینجا به تعدادی از این‌ها اشاره می شود.

در مقاله‌ای با عنوان «پایداری زیست‌محیطی در عصر دیجیتال»، ردی و همکاران (۲۰۲۵) نقش فناوری‌های هوشمند را در مواجهه با چالش‌های زیست‌محیطی جهانی مورد بررسی قرار داده‌اند. این پژوهش مروری نشان می‌دهد که فناوری‌های دیجیتال در سه حوزه کلیدی کشاورزی، توسعه شهری و مدیریت انرژی می‌توانند با بهینه‌سازی مدیریت منابع، کاهش اثرات زیست‌محیطی و ترویج شیوه‌های

پایدار، بستری مؤثر برای دستیابی به اهداف محیط زیست هوشمند فراهم کنند. در بخش کشاورزی، راهکارهایی مانند کشاورزی دقیق، پایش مبتنی بر اینترنت اشیاء و مدیریت پایدار منابع آبی موجب افزایش بهره‌وری و کاهش مصرف منابع شده‌اند. در توسعه شهری، استفاده از سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند، مدیریت هوشمند پسماند و طرح‌های شهر هوشمند به بهبود کارایی شهری و کاهش آلاینده‌ها کمک کرده است. همچنین در حوزه انرژی، به‌کارگیری شبکه‌های هوشمند، ادغام منابع تجدیدپذیر و سامانه‌های مدیریت انرژی در ساختمان‌ها، موجب تحول در الگوهای تولید و مصرف انرژی شده است. نویسندگان بر این باورند که همگرایی فناوری‌های هوشمند با اهداف پایداری، مسیر دستیابی به آینده‌ای تاب‌آور و پایدار را هموار می‌سازد [۱۴]. در کتابی با عنوان *مواد هوشمند برای کاربردهای پیشرفته زیست‌محیطی* که توسط وانگ (۲۰۲۵) ویراستاری شده، نقش فناوری‌های نوین مواد در بهبود پایداری زیست‌محیطی با تمرکز بر کاربردهای شهری بررسی شده است. در این مجموعه، بر پتانسیل مواد هوشمند مانند فتوکاتالیست‌ها، نانوحسگرها، و غشاهای فعال برای تصفیه هوا و آب، مدیریت آلاینده‌ها، و کنترل شرایط محیطی در مقیاس شهری تأکید شده است. محتوای این اثر نشان می‌دهد که مواد هوشمند می‌توانند به‌عنوان زیرساخت پنهان اما حیاتی در ارتقای محیط زیست هوشمند ایفای نقش کنند؛ به‌ویژه در شهرهای هوشمند که نیازمند پاسخ‌های فناورانه به مسائل آلودگی، مصرف انرژی و تاب‌آوری زیستی هستند[۱۵].

در پژوهشی که توسط ابورایش و دینچر (۲۰۲۵) انجام شده، یک مدل یکپارچه برای ارزیابی شهرهای هوشمند با رویکردی پایدار از نظر زیست‌محیطی و اقتصادی توسعه یافته است. این مدل با بهره‌گیری از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) به‌منظور کمی‌سازی نتایج و ارائه خروجی‌های قابل‌تجسم به‌کار رفته است. همچنین برای ارزیابی پایداری مدل، از طرح‌های وزن‌دهی هندسی استفاده شده است. این مدل بر روی ۲۰ شهر در سطح جهان پیاده‌سازی شده و برای هر شهر شاخص شهر هوشمند (Smart City Index) محاسبه شده است. این شاخص ترکیبی، شامل عوامل متعددی از جمله سلامت هوشمند به‌عنوان یکی از ابعاد حیاتی برای زیست انسانی است. نتایج نشان می‌دهد که بین شاخص‌های اجتماعی و اقتصادی همبستگی مثبت و نمایی قابل توجهی وجود دارد؛ به‌طوری‌که بهبود شاخص اجتماعی می‌تواند به رشد اقتصادی قابل ملاحظه‌ای برای شهرها منجر شود. این رابطه با درجه توافق بالا بین داده‌ها تأیید شده و بر اهمیت هم‌زمان توسعه انسانی و زیست‌محیطی در چارچوب شهرهای هوشمند تأکید دارد [۱۶]. در پژوهشی که توسط آردانا و همکاران در سال ۲۰۲۴ انجام شده است، مفاهیم «زندگی هوشمند» و «محیط هوشمند» به‌عنوان عناصر کلیدی در تحقق شهر هوشمند در شهر سولو مورد بررسی قرار گرفته‌اند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که درک عمومی و رسانه‌ای از شهر هوشمند در سولو، بیشتر بر مؤلفه‌هایی مانند توسعه زیرساخت‌ها، دسترسی به خدمات شهری، فضاهای سبز عمومی و به‌ویژه مدیریت پسماند از طریق نیروگاه زباله‌سوز (PLTSa) متمرکز بوده است. همچنین، تحلیل محتوای منابع نشان داده که شهر سولو در شاخص‌های زندگی هوشمند عملکرد بالایی داشته و در سال ۲۰۲۲ در فهرست شهرهای قابل‌سکونت اندونزی قرار گرفته است. این مطالعه نشان می‌دهد که تقویت هم‌زمان شاخص‌های محیط هوشمند و زندگی هوشمند می‌تواند نقش مؤثری در ارتقای کیفیت زیست شهری و حرکت به‌سوی تحقق کامل شهر هوشمند ایفا کند[۱۷].

در مطالعه‌ای که توسط ساری و همکاران (۲۰۲۴) انجام شده است، میزان انطباق شهر سمارانگ با شاخص‌های مفهوم محیط زیست هوشمند در چارچوب شهر هوشمند مورد بررسی قرار گرفت. این پژوهش با رویکرد کمی و با استفاده از تحلیل توصیفی-کمی انجام شده و یافته‌ها نشان داد که سطح انطباق شهر با این شاخص‌ها در حد متوسط و معادل ۵۱٫۲۹ درصد است. این نتیجه بیانگر آن است که اگرچه برخی زیرساخت‌ها و مؤلفه‌های محیط زیست هوشمند در شهر سمارانگ برقرار است، اما همچنان کاستی‌های قابل توجهی در عملکرد یکپارچه و اثربخش این مؤلفه‌ها وجود دارد. از این رو، محققان بر ضرورت تقویت و اصلاح هر یک از اجزای محیط زیست هوشمند تأکید کرده‌اند تا دستیابی به سطح مطلوب‌تری از توسعه پایدار شهری در قالب شهر هوشمند میسر شود[۱۸].

در مطالعه‌ای که توسط نیکولوف (۲۰۲۴) انجام شده، اثربخشی شهر هوشمند در دستیابی به پایداری زیست‌محیطی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مدیریت پایدار منابع و کاهش اثرات منفی بر تغییرات اقلیمی و محیط زیست، مستلزم بهینه‌سازی مصرف انرژی و منابع و افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر است. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که به‌کارگیری فناوری‌های هوشمند می‌تواند نقش مؤثری در کاهش گازهای گلخانه‌ای، بهبود کیفیت هوا و استفاده بهینه از منابع طبیعی ایفا کند. بر اساس یافته‌ها، پیاده‌سازی سیستم‌ها و اپلیکیشن‌های هوشمند می‌تواند در شرایط خاص هر شهر، به‌طور میانگین موجب کاهش ۲۰ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش ۳۰ درصدی مصرف آب، و کاهش ۱۵ تا ۲۰ درصدی پسماند غیرقابل بازیافت شود. این نتایج تأکید دارند که فناوری‌های هوشمند ابزاری مؤثر برای پیشبرد اهداف محیط زیست هوشمند در چارچوب شهرهای هوشمند هستند[۱۹]. آزلان و

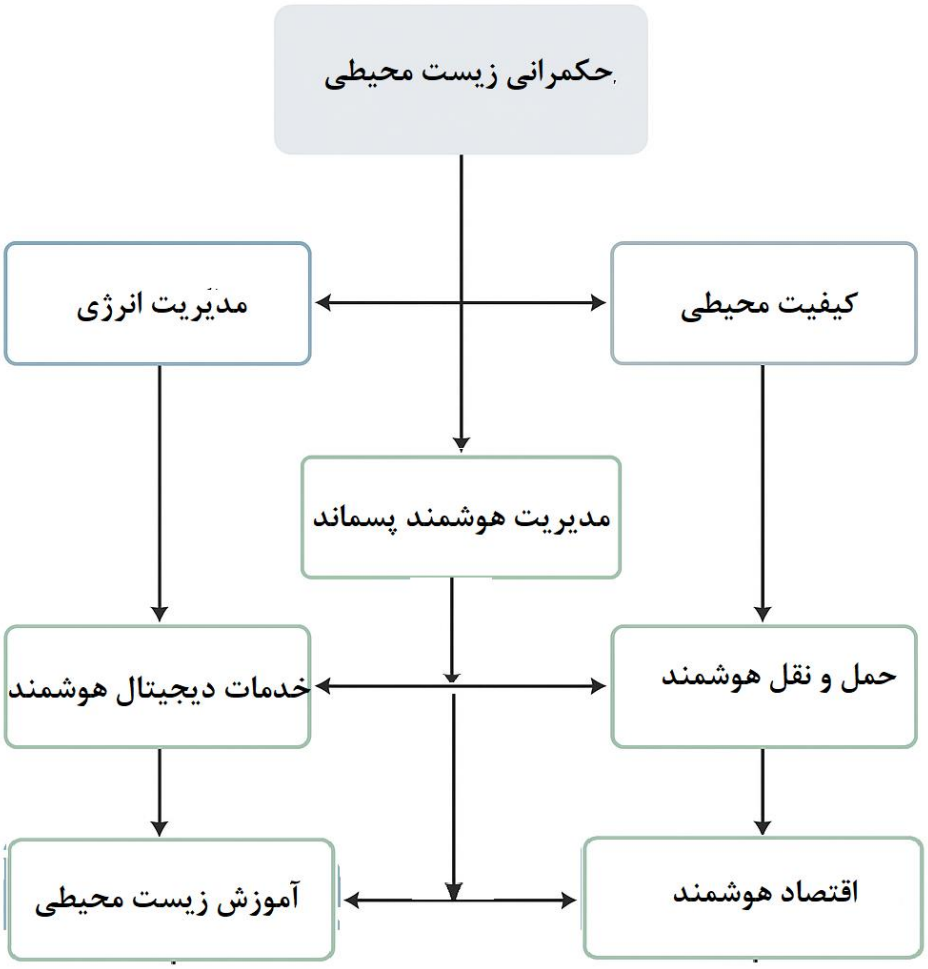
همکاران (۲۰۲۳) در مقاله‌ای با محوریت کشاورزی هوشمند، به بررسی نقش این رویکرد فناورانه در ارتقای پایداری اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی پرداخته‌اند. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که کشاورزی هوشمند، با بهره‌گیری از فناوری‌هایی مانند حسگرهای هوشمند، داده‌کاوی و سیستم‌های خودکار، می‌تواند به افزایش کارایی مصرف منابع طبیعی، کاهش آلاینده‌ها و بهبود مدیریت زمین‌های کشاورزی منجر شود. از منظر زیست‌محیطی، این فناوری‌ها نقش مؤثری در کاهش مصرف آب، جلوگیری از تخریب خاک، و به حداقل رساندن ضایعات کشاورزی دارند. مقاله مذکور بر این نکته تأکید دارد که کشاورزی هوشمند نه‌تنها ابزاری برای افزایش بهره‌وری است، بلکه بخشی از راه‌حل جامع برای دستیابی به اهداف محیط زیست هوشمند در قالب توسعه پایدار نیز به‌شمار می‌آید[۲۰].

پژوهش ساسان‌پور و همکاران (۲۰۲۵) با هدف سنجش مؤلفه‌های ارتقای محیط زیست هوشمند در نواحی منطقه ۱۲ تهران انجام شده است. نتایج نشان داد میان شاخص‌های بررسی‌شده تفاوت معناداری وجود دارد. شاخص آلاینده‌های زیست‌محیطی با میانگین رتبه‌ای ۱/۸۱ بالاترین و شاخص برنامه‌ریزی سبز با امتیاز ۰۶/۱ پایین‌ترین رتبه را کسب کرده‌اند. مقدار سطح معناداری آزمون فریدمن کمتر از ۰/۰۵ بود که اختلاف بین نواحی را در سطح اطمینان ۹۵ درصد تأیید می‌کند. همچنین مقدار شاخص برازش کلی (GOF) برابر با ۰/۰۵ به‌دست آمده که نشان‌دهنده برازش مناسب مدل است. تحلیل مارکوس نیز نشان داد ناحیه ۴ در مؤلفه‌هایی مانند حفاظت از محیط زیست و مدیریت منابع طبیعی وزن بالاتری دارد[۲۱]. در مطالعه‌ای که توسط سروستانی‌نژاد و ملکی (۲۰۲۵) در کلان‌شهر اهواز انجام شد، رابطه میان شاخص‌های شهر هوشمند و پایداری زیست‌محیطی شهری مورد ارزیابی قرار گرفت. شاخص‌های بررسی‌شده در دو بخش دسته‌بندی شدند: نخست، عوامل تأثیرگذار بر شهر هوشمند شامل شش مؤلفه (زیرساخت‌های هوشمند، حمل‌ونقل هوشمند، مدیریت انرژی هوشمند، مدیریت پسماند هوشمند، کیفیت هوای و آب هوشمند، خدمات شهری هوشمند و اقتصاد هوشمند) و دوم، عوامل مؤثر بر محیط زیست شهری شامل مدیریت پسماند، آب و فاضلاب، فضای سبز شهری، حمل‌ونقل عمومی، آموزش محیط‌زیستی و نوآوری در پایداری شهری. نتایج تحقیق نشان داد که میان شاخص‌های شهر هوشمند و پایداری زیست‌محیطی در اهواز، رابطه‌ای مثبت و معنادار وجود دارد. همچنین، بر اساس رتبه‌بندی تکنیک تاپسیس، مؤلفه‌های اقتصاد هوشمند و حمل‌ونقل هوشمند به‌عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر بر پایداری زیست‌محیطی شناسایی شدند[۲۲].

در پژوهشی که توسط علائی و همکاران (۲۰۲۲) در کلان‌شهر مشهد انجام شد، تعامل میان پیشران‌های محیط زیست هوشمند با روش تحلیل ساختاری بررسی شد. نتایج نشان داد شاخص پرشدگی داده‌ها پس از دو بار چرخش برابر با ۹۳/۶۳ درصد بود که بیانگر ارتباط بالای متغیرهاست. همچنین، دو شاخص بهره‌گیری از انرژی‌های نو و توسعه قوانین زیست‌محیطی هر یک با امتیاز ۳۸ بیشترین تأثیرگذاری را بر سایر شاخص‌ها داشتند. نقشه وابستگی شاخص‌ها نیز نشان داد که وضعیت مشهد از نظر مؤلفه‌های محیط زیست هوشمند ناپایدار است[۲۳]. پژوهش زینالی عظیم و همکاران (۲۰۲۱) با هدف سنجش پایداری محیطی شهر تبریز بر اساس شاخص‌های زیست‌محیطی رشد هوشمند شهری انجام شد. یافته‌ها نشان داد که در میان شاخص‌های مورد بررسی، شاخص‌های آلودگی هوا، فضای سبز و فضای باز به‌ترتیب با ضرایب ۰/۸۲۵، ۰/۷۹۹ و ۰/۷۸۱ بیشترین تأثیر را بر پایداری محیطی دارند، در حالی که تولید زباله با ضریب ۷۰۵/۰ کمترین میزان اثرگذاری را دارد. نتایج این تحقیق بر ضرورت توجه ویژه به شاخص‌های زیست‌محیطی رشد هوشمند برای دستیابی به پایداری محیطی در کلان‌شهر تبریز تأکید دارد[۲۴].

پیشینه پژوهش‌های مرتبط با موضوع محیط زیست هوشمند نشان می‌دهد که ادبیات موجود عمدتاً بر نقش فناوری‌های نوین در بهبود شاخص‌های زیست‌محیطی، ارتقای بهره‌وری منابع و بهینه‌سازی الگوهای شهری متمرکز بوده است. در ابعاد مختلف این مطالعات، مؤلفه‌هایی مانند کشاورزی هوشمند، انرژی‌های پاک، اینترنت اشیاء، شهر هوشمند، و مواد نوین فناورانه به‌عنوان ابزارهای کلیدی برای دستیابی به توسعه پایدار زیست‌محیطی بررسی شده‌اند. همچنین، یافته‌ها حاکی از آن است که در بسیاری از شهرهای جهان، شاخص‌هایی نظیر حمل‌ونقل هوشمند، مدیریت پسماند، کیفیت هوا و فضای سبز شهری نقشی تعیین‌کننده در پایداری محیطی ایفا می‌کنند. تحلیل مدل‌های آماری و تصمیم‌گیری چندمعیاره نیز اثبات می‌کند که رابطه مستقیمی میان توسعه شهر هوشمند و ارتقاء کیفیت محیط زیست شهری وجود دارد. با این حال، در مطالعات گذشته، اغلب تمرکز بر روی ارزیابی وضعیت موجود یا تحلیل توصیفی شاخص‌ها بوده و کمتر به تحلیل ساختاری مؤلفه‌های مؤثر و روابط میان آن‌ها پرداخته شده است. از سوی دیگر، نبود الگویی بومی‌شده برای تحلیل هم‌زمان ابعاد مختلف زیست‌محیطی شهر هوشمند، به‌ویژه در بافت کلان‌شهرهای ایران، یک خلأ مهم محسوب می‌شود. نوآوری تحقیق حاضر در بهره‌گیری از رویکرد کمی ساختاری برای تحلیل تعاملات درونی شاخص‌های کلیدی محیط زیست هوشمند است؛ رویکردی که می‌تواند تصویری دقیق‌تر از اولویت‌ها، وابستگی‌ها و نقاط گرهی برای تصمیم‌گیری سیاست‌گذاران شهری فراهم کند. این پژوهش تلاش می‌کند

با مدل‌سازی دقیق روابط میان مؤلفه‌ها، راهبردهایی کاربردی برای بهبود وضعیت زیست‌محیطی کلان‌شهرها ارائه دهد و زمینه‌ای برای تدوین سیاست‌های هوشمندانه و مبتنی بر داده فراهم سازد.



شکل ۱- مدل مفهومی تحقیق

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، به‌منظور بررسی روابط علّی میان مؤلفه‌های مؤثر بر توسعه زیست‌محیطی شهر هوشمند، از روش تحقیق کمی با رویکرد مدل‌سازی معادلات ساختاری مبتنی بر حداقل مربعات جزئی (PLS-SEM) استفاده شده است. پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت و روش، توصیفی–تحلیلی و علّی است؛ زیرا تلاش دارد تا از طریق تحلیل ساختار متغیرها، روابط میان آن‌ها را شناسایی و تبیین کند.جامعه آماری تحقیق را خبرگان، متخصصان و کارشناسان حوزه‌های برنامه‌ریزی شهری، محیط زیست شهری و فناوری اطلاعات در کلان‌شهر تبریز تشکیل می‌دهند. از آنجا که جامعه آماری در این‌گونه تحقیقات به‌صورت باز و نامحدود در نظر گرفته می‌شود، برای تعیین حجم نمونه، از فرمول کوکران برای جامعه نامحدود استفاده شد. با فرض سطح اطمینان ۹۵٪، نسبت موفقیت ۵۰٪ و میزان خطای مجاز ۷٪، حجم نمونه لازم حدود ۱۹۶ نفر محاسبه گردید. در نهایت، ۲۰۰ پرسشنامه در میان جامعه هدف توزیع و جمع‌آوری شد. برای گردآوری داده‌ها، از یک پرسشنامه بسته استفاده شد که مبتنی بر طیف پنج درجه‌ای لیکرت طراحی شده است. این پرسشنامه شامل ۸ مؤلفه اصلی و ۱۶ شاخص عملیاتی است که بر اساس ادبیات نظری پژوهش استخراج شده‌اند. متغیرهای تحقیق شامل مؤلفه‌هایی مانند زیرساخت هوشمند، حمل‌ونقل هوشمند، مدیریت انرژی هوشمند، مدیریت پسماند هوشمند، کیفیت هوای و آب هوشمند، خدمات شهری هوشمند، اقتصاد هوشمند و آموزش و آگاهی زیست‌محیطی است. از این میان، آموزش و آگاهی زیست‌محیطی

به‌عنوان متغیر میانجی در تأثیرگذاری سایر مؤلفه‌ها بر متغیر وابسته یعنی توسعه زیست‌محیطی شهر هوشمند در نظر گرفته شده است. برای سنجش روایی صوری و محتوایی پرسشنامه، از نظرات خبرگان بهره گرفته شد و برای بررسی پایایی، از ضریب آلفای کرونباخ و پایایی ترکیبی (CR) استفاده گردید. داده‌های حاصل از پرسشنامه با استفاده از نرم‌افزار Smart PLS تحلیل شدند. تحلیل شامل دو بخش بود: ابتدا مدل اندازه‌گیری (Measurement Model) از طریق بارهای عاملی، AVE و CR ارزیابی شد و سپس مدل ساختاری (Structural Model) با تحلیل ضرایب مسیر (Path Coefficients)، آماره t، ضریب تعیین (R^2)، و شاخص‌های برازش مانند GOF و SRMR مورد آزمون قرار گرفت. در نهایت، نقش میانجی‌گری آموزش و آگاهی زیست‌محیطی نیز از طریق آزمون بوت‌استراپ برای اثرات غیرمستقیم مورد تحلیل قرار گرفت تا مشخص شود که این متغیر چگونه رابطه میان سایر مؤلفه‌های شهر هوشمند و توسعه زیست‌محیطی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

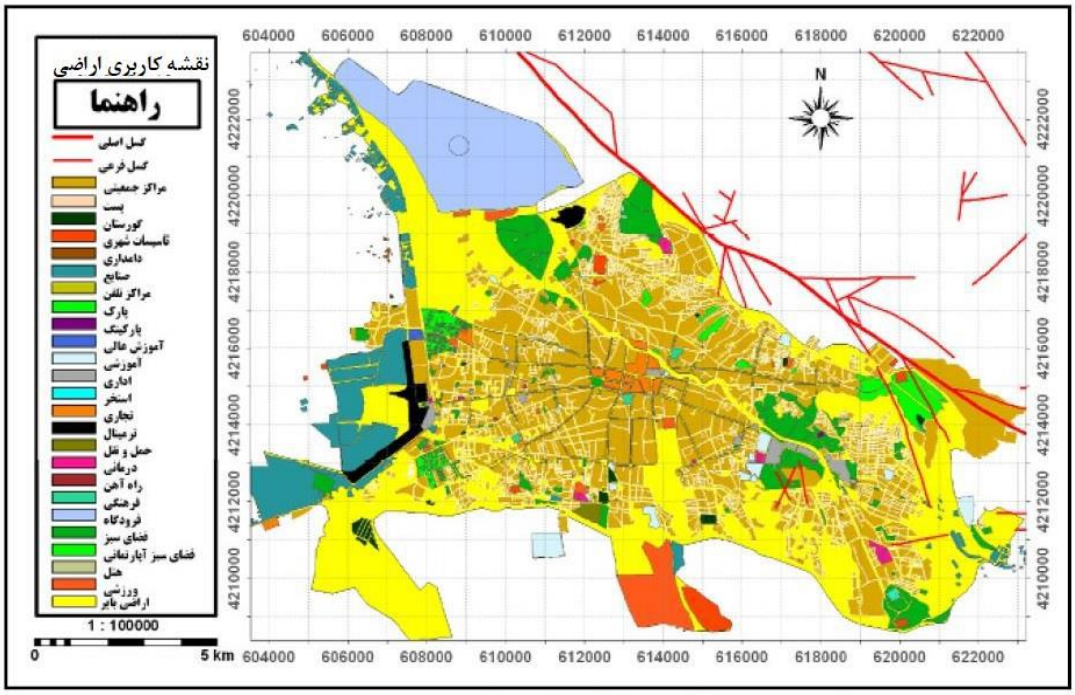
جدول۱- مؤلفه‌ها، شاخص‌ها و زیرشاخص‌های تحقیق

مؤلفه	شاخص	زیرشاخص
زیرساخت فناوری هوشمند	دسترسی به اینترنت	وای‌فای شهری
		حسگرهای محیطی
	سامانه‌های هوشمند	خدمات دیجیتال شهری
مدیریت پسماند هوشمند	تفکیک زباله	آموزش تفکیک در مبدا
		مخازن هوشمند
	بازیافت هوشمند	سیستم پایش و جمع‌آوری هوشمند
حمل‌ونقل پایدار	وسایل حمل‌ونقل پاک	اتوبوس برقی
		خودروهای کم‌مصرف و برقی
	سیستم حمل‌ونقل هوشمند	ردیابی وسایل نقلیه عمومی
		مدیریت هوشمند ترافیک
مصرف انرژی پایدار	انرژی تجدیدپذیر	پنل‌های خورشیدی
		انرژی بادی
	بهینه‌سازی مصرف انرژی	ساختمان‌های سبز
		سیستم‌های مدیریت انرژی
فضای سبز شهری	سرانه فضای سبز	توسعه پارک‌ها و فضاهای سبز عمومی
	آبیاری هوشمند	حسگر رطوبت خاک
		سیستم آبیاری هوشمند
مشارکت شهروندی	آگاهی زیست‌محیطی	آموزش و اطلاع‌رسانی عمومی
		برگزاری کمپین‌های محیط‌زیستی
	رفتارهای پایدار	کاهش مصرف منابع
		تفکیک زباله در خانه
حکمرانی زیست‌محیطی	سیاست‌گذاری زیست‌محیطی	قوانین و مقررات شهری
		انتشار داده‌های آلودگی
	شفافیت اطلاعات محیط‌زیستی	دسترسی آزاد به اطلاعات محیطی
پایش و کنترل آلودگی	سنجش کیفیت هوا و آب	ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا
		سیستم پایش کیفیت آب شهری
	مدیریت آلاینده‌ها	کنترل منابع آلاینده صنعتی
		اطلاع‌رسانی عمومی در شرایط بحران

([۱]، [۳]، [۵]، [۷]، [۱۵]، [۱۷]، [۱۸]، [۲۰])

۲-۱-محدوده مورد مطالعه

شهر تبریز، مرکز استان آذربایجان شرقی، در شمال‌غرب ایران واقع شده است. این شهر در مختصات جغرافیایی ۳۸°۴′۲۶ شمالی و ۴۶°۱۷′۴۶ شرقی قرار دارد و در ارتفاع متوسط ۱۳۶۶ متر از سطح دریا واقع شده است. تبریز از شمال به کوه‌های عینالی و از جنوب به دامنه‌های کوه سهند محدود می‌شود. رودخانه‌های قوری‌چای و تلخه‌رود از میان یا اطراف شهر عبور می‌کنند، که نقش مهمی در تأمین منابع آبی و اکوسیستم منطقه دارند. جمعیت شهر تبریز در سال ۱۴۰۱ بالغ بر ۱۶۴۳۹۶۰ نفر بوده است [۲۴]. این شهر به‌عنوان یکی از مراکز مهم صنعتی، اقتصادی و فرهنگی کشور شناخته می‌شود و دارای زیرساخت‌های متنوعی در حوزه‌های مختلف است. با توجه به موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های اقلیمی، تبریز با چالش‌هایی مانند آلودگی هوا، کاهش منابع آبی و توسعه نامتوازن شهری مواجه است، که نیازمند برنامه‌ریزی‌های هوشمندانه در حوزه محیط زیست شهری می‌باشد.



شکل ۲- نقشه شهر تبریز(منبع یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۴)

۳- بحث و نتایج

به‌منظور درک اولیه از وضعیت مؤلفه‌ها و شاخص‌های مرتبط با توسعه زیست‌محیطی شهر هوشمند در کلان‌شهر تبریز، در این بخش به تحلیل آمار توصیفی این متغیرها پرداخته می‌شود. بررسی آمار توصیفی شامل میانگین، انحراف معیار، کمینه و بیشینه شاخص‌ها، تصویری از سطح تحقق‌یافتگی و پراکندگی دیدگاه‌ها در میان مشارکت‌کنندگان ارائه می‌دهد. این اطلاعات می‌تواند به شناسایی نقاط قوت و ضعف موجود در ابعاد مختلف زیست‌محیطی شهر هوشمند کمک کند و مبنایی برای تحلیل‌های پیشرفته‌تر در مراحل بعدی پژوهش فراهم آورد.

جدول ۲- آمار توصیفی مؤلفه‌ها و شاخص‌های تحقیق

مؤلفه	شاخص	میانگین	انحراف معیار	کمینه	بیشینه
زیرساخت هوشمند	دسترسی به اینترنت	۴/۱۲	۰/۶۴	۳/۴۸	۴/۷۶
	پوشش فناوری اطلاعات	۳/۸۱	۰/۷۴	۳/۰۷	۴/۵۵
حمل‌ونقل هوشمند	سامانه حمل‌ونقل هوشمند	۴/۲۲	۰/۵۹	۳/۶۳	۴/۸۱

مؤلفه	شاخص	میانگین	انحراف معیار	کمینه	بیشینه
مدیریت انرژی هوشمند	کاهش آلایندگی حمل‌ونقل	۳/۵۳	۰/۸۸	۲/۶۵	۴/۴۱
	مصرف انرژی‌های نو	۴/۲۸	۰/۵۵	۳/۷۳	۴/۸۳
	بهینه‌سازی مصرف انرژی	۴/۰۱	۰/۶۱	۳/۴۰	۴/۶۲
مدیریت پسماند هوشمند	تفکیک زباله در مبدأ	۳/۶۷	۰/۷۰	۲/۹۷	۴/۳۷
	کاربرد فناوری در دفع پسماند	۳/۳۹	۰/۸۰	۲/۵۹	۴/۱۹
کیفیت هوا و آب هوشمند	میزان آلاینده‌های هوا	۴۵/۳	۰/۸۳	۶۲/۲	۴/۲۸
	کیفیت آب آشامیدنی	۷۶/۳	۰/۶۹	۳/۰۷	۴/۴۵
خدمات شهری هوشمند	خدمات دیجیتال شهری	۹۳/۳	۰/۶۶	۳/۲۷	۴/۵۹
	دسترسی آنلاین به خدمات	۰۷/۴	۰/۵۸	۳/۴۹	۴/۶۵
اقتصاد هوشمند	اشتغال فناورانه	۸۴/۳	۰/۷۲	۳/۱۲	۴/۵۶
	سرمایه‌گذاری زیرساختی	۶۸/۳	۰/۷۵	۲/۹۳	۴/۴۳
آموزش و آگاهی زیست‌محیطی	آموزش محیط‌زیستی	۵۹/۳	۰/۶۹	۲/۹۰	۴/۲۸
	آگاهی‌رسانی عمومی	۳/۷۴	۰/۶۴	۳/۱۰	۴/۳۸

(منبع یافته های تحقیق، ۱۴۰۴)

در بررسی آمار توصیفی شاخص‌های مرتبط با توسعه زیست‌محیطی شهر هوشمند، میانگین اغلب شاخص‌ها بین ۳/۵۰ تا ۴/۳۰ قرار دارد که بیانگر ارزیابی نسبتاً مطلوب مشارکت‌کنندگان نسبت به وضعیت این شاخص‌ها در کلان‌شهر مورد مطالعه است. مؤلفه‌هایی مانند مصرف انرژی‌های نو، دسترسی به اینترنت، خدمات دیجیتال شهری و سامانه حمل‌ونقل هوشمند، میانگین‌های بالای ۴ را نشان می‌دهند و با انحراف معیار پایین، از انسجام نسبی در دیدگاه‌ها برخوردارند. این امر نشان‌دهنده پذیرش و استفاده نسبتاً گسترده از زیرساخت‌های فناورانه و توجه به انرژی‌های پایدار در محیط شهری است. در مقابل، شاخص‌هایی مانند کاربرد فناوری در دفع پسماند، میزان آلاینده‌های هوا و کاهش آلایندگی حمل‌ونقل دارای میانگین‌های پایین‌تر و انحراف معیار بالاتر هستند که به وجود تفاوت دیدگاه‌ها و احتمالاً چالش‌های اجرایی در این حوزه‌ها اشاره دارد. این پراکندگی در ارزیابی‌ها می‌تواند نشانه‌ای از عدم اجرای یکنواخت سیاست‌های محیط زیست هوشمند و یا عدم درک یکپارچه از خدمات در سطح جامعه باشد. بر اساس این داده‌ها، اولویت مداخله برای بهبود عملکرد در حوزه‌های زیست‌محیطی، باید بر مؤلفه‌هایی متمرکز باشد که هم میانگین پایین‌تری دارند و هم از پراکندگی بیشتری برخوردارند، زیرا نشان‌دهنده نیاز به هماهنگی نهادی و افزایش آگاهی عمومی در آن حوزه‌ها است.

۳-۱- آزمون نرمال بودن و غیرنرمال بودن مولفه ها و شاخص ها

در ادامه، جدول ساده‌ای از نتایج آزمون نرمال بودن شاخص‌ها ارائه می‌شود. در این جدول، مقدار آماره K-S و سطح معناداری برای هر شاخص آورده شده است.

جدول ۳- آزمون نرمال و غیر نرمال بودن داده ها

ردیف	مؤلفه / شاخص	آمارهK-S	سطح معناداری(Sig.)
۱	دسترسی به اینترنت	۰/۰۷۵	۰/۱۷۷
۲	پوشش فناوری اطلاعات	۰/۱۳۴	۰/۱۳۵
۳	سامانه حمل‌ونقل هوشمند	۰/۱۰۵	۰/۰۸۸
۴	کاهش آلایندگی حمل‌ونقل	۰/۱۴۵	۰/۱۱۰
۵	مصرف انرژی‌های نو	۰/۱۳۷	۰/۱۴۱
۶	بهینه‌سازی مصرف انرژی	۰/۰۸۱	۰/۱۶۶
۷	تفکیک زباله در مبدأ	۰/۰۹۳	۰/۱۷۹
۸	کاربرد فناوری در دفع پسماند	۰/۱۳۲	۰/۱۲۲

ردیف	مؤلفه / شاخص	آماره K-S	سطح معناداری (Sig.)
۹	میزان آلاینده‌های هوا	۰/۰۸۴	۰/۱۷۳
۱۰	کیفیت آب آشامیدنی	۰/۰۹۸	۰/۱۵۵
۱۱	خدمات دیجیتال شهری	۰/۱۰۹	۰/۱۴۴
۱۲	دسترسی آنلاین به خدمات	۰/۰۷۸	۰/۱۷۱
۱۳	اشتغال فناورانه	۰/۱۳۹	۰/۱۱۰
۱۴	سرمایه‌گذاری زیرساختی	۰/۰۷۸	۰/۱۵۸
۱۵	آموزش محیط‌زیستی	۰/۱۲۵	۰/۱۳۲
۱۶	آگاهی‌رسانی عمومی	۰/۰۹۱	۰/۱۶۹

(منبع یافته های تحقیق، ۱۴۰۴)

تمامی مقادیر Sig بزرگ‌تر از ۰/۰۵ هستند که نشان‌دهنده نرمال بودن توزیع داده‌ها برای تمامی شاخص‌ها است. باتوجه به نتایج آزمون نرمال بودن که در جدول ۳ ارائه شده است، توزیع تمامی شاخص‌های مرتبط با مؤلفه‌های توسعه زیست‌محیطی شهر هوشمند از نظر آماری نرمال ارزیابی شده است. سطح معناداری (Sig) تمامی متغیرها بیش از ۰/۰۵ بوده و این امر نشان می‌دهد که داده‌ها دارای توزیع طبیعی هستند و استفاده از تحلیل‌های آماری پارامتریک در مراحل بعدی تحقیق معتبر خواهد بود. نرمال بودن شاخص‌ها نشان‌دهنده برداشت همگون و یکنواخت مشارکت‌کنندگان نسبت به موضوعات مختلف محیط‌زیست هوشمند از جمله زیرساخت فناورانه، حمل‌ونقل پاک، انرژی‌های نو، کیفیت خدمات شهری و آگاهی زیست‌محیطی است. این انسجام در دیدگاه‌ها می‌تواند حاکی از آن باشد که سیاست‌ها و برنامه‌ریزی‌های شهری در تبریز، به‌ویژه در حوزه‌های فناوری‌محور، به سطحی از اثربخشی و فراگیری رسیده‌اند که توانسته‌اند درک مشترکی در میان ذی‌نفعان ایجاد کنند. از سوی دیگر، این یافته نشان می‌دهد که اجرای سیاست‌های نوین در حوزه محیط زیست هوشمند، در بستری آمادگی اجتماعی و فرهنگی قرار دارد که از منظر برنامه‌ریزی شهری بسیار حائز اهمیت است. به‌طور خاص، این وضعیت می‌تواند زمینه‌ساز همگرایی بهتر میان دستگاه‌های مدیریتی، فناوری‌های نوین، و مشارکت مردمی برای تحقق اهداف پایداری محیطی در کلان‌شهر تبریز باشد. در چنین فضایی، توسعه مبتنی بر داده‌های تحلیلی و هوشمند، نه‌تنها امکان‌پذیر بلکه مؤثرتر خواهد بود.

۳-۲- ارزیابی مدل اندازه‌گیری

در ادامه به ارزیابی مدل اندازه‌گیری مولفۀها و شاخص‌های تحقیق پرداخته می‌شود که در جدول ۴ بررسی شده است.

جدول ۴- ارزیابی مدل اندازه‌گیری مؤلفه‌ها و شاخص‌ها

مؤلفه	شاخص	بار عاملی	آلفای کرونباخ	CR	AVE	روایی همگرا
زیرساخت فناورانه	دسترسی به اینترنت	۰/۹۰	۰/۸۳	۰/۸۸	۰/۶۷	تأیید شد
	پوشش فناوری اطلاعات	۰/۸۶				
حمل‌ونقل هوشمند	سامانه حمل‌ونقل هوشمند	۰/۸۱	۰/۷۹	۰/۸۴	۰/۶۰	تأیید شد
	کاهش آلایندگی حمل‌ونقل	۰/۸۴				
مدیریت انرژی	مصرف انرژی‌های نو	۰/۷۷	۰/۷۸	۰/۸۲	۰/۵۸	تأیید شد
	بهینه‌سازی مصرف انرژی	۰/۸۲				
مدیریت پسماند	تفکیک زباله در مبدأ	۰/۸۵	۰/۸۰	۰/۸۵	۰/۶۱	تأیید شد
	فناوری در دفع پسماند	۰/۸۲				
کیفیت محیطی	آلودگی هوا	۰/۷۹	۰/۷۶	۰/۸۱	۰/۵۹	تأیید شد
	کیفیت آب آشامیدنی	۰/۸۱				

مؤلفه	شاخص	بار عاملی	آلفای کرونباخ	CR	AVE	روایی همگرا
خدمات شهری دیجیتال	خدمات دیجیتال شهری	۰/۸۷	۰/۸۴	۰/۸۸	۰/۶۵	تأیید شد
	دسترسی آنلاین به خدمات	۰/۸۴				
اقتصاد هوشمند	اشتغال فناورانه	۰/۸۰	۰/۷۷	۰/۸۳	۰/۵۹	تأیید شد
	سرمایه‌گذاری زیرساختی	۰/۸۳				
آموزش محیط‌زیستی	آموزش محیط‌زیستی	۰/۸۶	۰/۷۸	۰/۸۵	۰/۶۰	تأیید شد
	آگاهی‌رسانی عمومی	۰/۸۰				

(منبع یافته های تحقیق، ۱۴۰۴)

مقادیر آلفای کرونباخ، CR و AVE برای هر مؤلفه بر مبنای دو شاخص زیرمجموعه محاسبه شده و فقط در ردیف اول هر مؤلفه درج شده‌اند. بر اساس جدول ارزیابی مدل اندازه‌گیری شاخص «دسترسی به اینترنت» با بار عاملی ۰/۹۰ و شاخص «خدمات دیجیتال شهری» با ۰/۸۷ در مؤلفه‌های «زیرساخت فناورانه» و «خدمات شهری دیجیتال» بالاترین همبستگی را با سازه‌های خود دارند و نشان می‌دهند که کارایی شهر هوشمند به‌شدت وابسته به بسترهای فناورانه و خدمات دیجیتال قابل‌دسترس است. در مقابل شاخص «مصرف انرژی‌های نو» با بار عاملی ۰/۷۷ و «آلودگی هوا» با ۰/۷۹ کمترین بار عاملی را به‌خود اختصاص داده‌اند که نشان می‌دهد همچنان در حوزه انرژی پاک و کنترل کیفیت هوا شهر با چالش‌هایی در پیاده‌سازی مؤلفه‌های زیست‌محیطی هوشمند روبه‌روست. مؤلفه‌هایی مانند «مدیریت پسماند» و «حمل‌ونقل هوشمند» نیز با بارهای عاملی نسبتاً بالا و پایایی ترکیبی قوی جایگاه مهمی در ساختار شهر هوشمند دارند و از آنجا که شاخص‌هایی مانند «تفکیک زباله در مبدأ» و «کاهش آلایندگی حمل‌ونقل» به‌خوبی عمل کرده‌اند نشان‌دهنده ظرفیت بالای شهر برای مدیریت منابع و ارتقای کیفیت زندگی شهری‌اند. تحلیل مقادیر AVE و CR نیز تأکید می‌کند که شاخص‌ها به‌درستی از سوی پاسخ‌دهندگان درک شده‌اند و انسجام مفهومی در سطح بالایی میان مؤلفه‌ها برقرار است بنابراین در برنامه‌ریزی شهری باید تمرکز اصلی روی تقویت شاخص‌هایی باشد که بار عاملی پایین‌تری دارند تا تعادل میان ابعاد مختلف زیست‌محیطی در چارچوب شهر هوشمند حفظ شود. این داده‌ها مبنای دقیق و کاربردی برای تنظیم سیاست‌ها تخصیص منابع و اولویت‌بندی اقدامات در راستای تحقق توسعه زیست‌محیطی شهر هوشمند فراهم می‌کنند.

جدول ۵- بررسی واگرایی سازه‌ها با استفاده از معیار فورنل-لارکر

	زیرساخت فناورانه	حمل‌ونقل هوشمند	مدیریت انرژی	مدیریت پسماند	کیفیت محیطی	خدمات دیجیتال	اقتصاد هوشمند	آموزش محیط‌زیستی
زیرساخت فناورانه	۰/۷۵	۰/۵۱	۰/۴۶	۰/۴۹	۰/۴۳	۰/۵۲	۰/۴۷	۰/۴۵
حمل‌ونقل هوشمند	۰/۵۱	۰/۷۲	۰/۵۰	۰/۴۸	۰/۴۲	۰/۵۳	۰/۴۴	۰/۴۱
مدیریت انرژی	۰/۴۶	۰/۵۰	۰/۷۲	۰/۴۷	۰/۴۰	۰/۴۵	۰/۴۱	۰/۳۹
مدیریت پسماند	۰/۴۹	۰/۴۸	۰/۴۷	۰/۷۸	۰/۴۴	۰/۵۱	۰/۴۳	۰/۴۲
کیفیت محیطی	۰/۴۳	۰/۴۲	۰/۴۰	۰/۴۴	۰/۷۰	۰/۴۶	۰/۳۹	۰/۳۷
خدمات دیجیتال شهری	۰/۵۲	۰/۵۳	۰/۴۵	۰/۵۱	۰/۴۶	۰/۷۶	۰/۴۸	۰/۴۴
اقتصاد هوشمند	۰/۴۷	۰/۴۴	۰/۴۱	۰/۴۳	۰/۳۹	۰/۴۸	۰/۷۴	۰/۴۰
آموزش محیط‌زیستی	۰/۴۵	۰/۴۱	۰/۳۹	۰/۴۲	۰/۳۷	۰/۴۴	۰/۴۰	۰/۷۱

(منبع یافته های تحقیق، ۱۴۰۴)

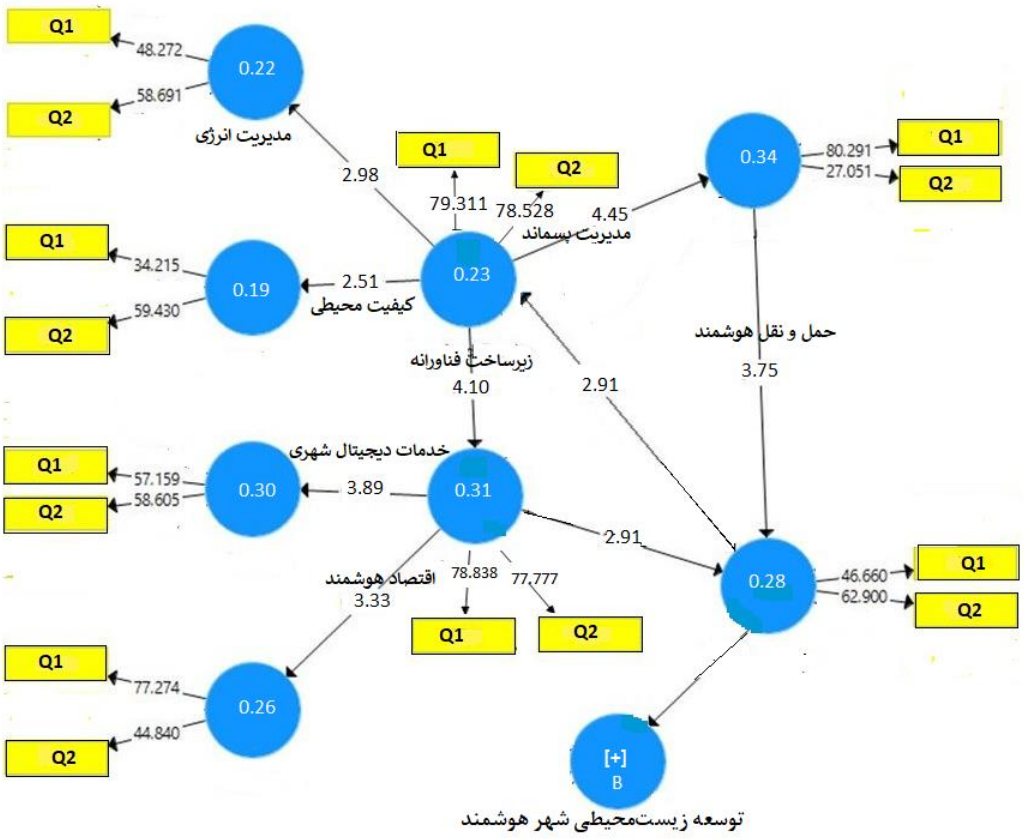
نتایج تحلیل واگرایی با استفاده از معیار فورنل-لارکر در جدول ۵ نشان می‌دهد که هر سازه به‌طور معناداری از دیگر سازه‌ها متمایز است و از نظر مفهومی فقط بُعد خاصی از توسعهٔ زیست‌محیطی شهر هوشمند را می‌سنجد. برای مثال، مقدار ریشه دوم AVE برای مؤلفه «مدیریت پسماند» برابر با ۰/۷۸ است، در حالی که بیشترین همبستگی آن با سایر مؤلفه‌ها از جمله «خدمات دیجیتال شهری» با مقدار ۰,۵۱به‌مراتب پایین‌تر است. این اختلاف حدود ۰/۲۷ واحد نشان می‌دهد که این سازه به‌خوبی از سازه‌های دیگر تفکیک شده و نشانگر واگرایی قابل قبول است. همچنین «زیرساخت فناورانه» با مقدار AVE برابر ۰/۷۵، در برابر بیشترین همبستگی با «خدمات

دیجیتال شهری» ۰/۵۲ فاصله‌ای معنادار دارد که حاکی از روایی واگرای بالا برای این مؤلفه است. مؤلفه «کیفیت محیطی» نیز با AVE برابر ۰,۷۰ و بیشترین همبستگی ۰/۴۶ «با خدمات دیجیتال شهری» حتی در شرایطی که همپوشانی عملکردی میان سازه‌ها محتمل به نظر می‌رسد، باز هم به‌خوبی توانسته تمایز مفهومی خود را حفظ کند. چنین وضعیتی برای مؤلفه «آموزش محیط‌زیستی» نیز صادق است، چرا که با AVE برابر ۰/۷۱ و همبستگی حداکثر ۰/۴۵ «با زیرساخت فناورانه» نشان می‌دهد که آموزش و توانمندسازی شهروندان یک بُعد کاملاً مستقل و بنیادین در مدل توسعه زیست‌محیطی هوشمند محسوب می‌شود. از منظر کاربردی، وجود فاصله حداقل ۰/۲۵ واحد بین AVE هر سازه با بالاترین همبستگی آن با دیگر سازه‌ها، معیارهای علمی اعتبار واگرایی را به‌صورت کامل تأیید می‌کند. این موضوع در شهرسازی هوشمند اهمیت حیاتی دارد، چراکه نشان می‌دهد امکان طراحی سیاست‌های تخصصی و بدون همپوشانی میان حوزه‌هایی نظیر حمل‌ونقل، انرژی، پسماند و آموزش وجود دارد. به‌بیان دیگر، می‌توان برای مؤلفه‌هایی که بار عاملی بالا دارند ولی همبستگی ضعیف‌تری با سایر مؤلفه‌ها نشان می‌دهند، اولویت‌های اجرایی مشخصی در نظر گرفت که بهره‌وری طرح‌های توسعه پایدار شهری را به‌صورت هدفمند افزایش دهد. این تحلیل از لحاظ نظری و عملی اثبات می‌کند که مدل توسعه زیست‌محیطی شهر هوشمند نه‌تنها اعتبار سنجشی دارد، بلکه ظرفیت بالایی برای تجزیه‌وتحلیل، تصمیم‌سازی و اجرای تفکیک‌پذیر در بستر مدیریت شهری فراهم می‌آورد.

جدول ۶- ارزیابی مدل ساختاری توسعه زیست‌محیطی شهر هوشمند

مسیر علی	ضریب تعیین(R^2)	ضریب مسیر(β)	آماره t	معناداری
زیرساخت فناورانه ← توسعه زیست‌محیطی	۰/۵۹	۰/۳۱	۴/۱۰	۰/۰۰۱
حمل‌ونقل هوشمند ← توسعه زیست‌محیطی	۰/۶۰	۰/۲۸	۳/۷۵	۰/۰۰۱
مدیریت انرژی ← توسعه زیست‌محیطی	۰/۵۶	۰/۲۲	۲/۹۸	۰/۰۰۱
مدیریت پسماند ← توسعه زیست‌محیطی	۰/۶۲	۰/۳۴	۴/۴۵	۰/۰۰۱
کیفیت محیطی ← توسعه زیست‌محیطی	۰/۵۴	۰/۱۹	۲/۵۱	۰/۰۰۱
خدمات دیجیتال شهری ← توسعه زیست‌محیطی	۰/۵۸	۰/۳۰	۳/۸۹	۰/۰۰۱
اقتصاد هوشمند ← توسعه زیست‌محیطی	۰/۵۵	۰/۲۶	۳/۳۳	۰/۰۰۱
آموزش محیط‌زیستی ← توسعه زیست‌محیطی	۰/۵۳	۰/۲۳	۲/۹۱	۰/۰۰۱
کل مدل (توسعه زیست‌محیطی شهر هوشمند)	**۰/۷۱**			

مدل ساختاری توسعه زیست‌محیطی شهر هوشمند با توجه به نتایج حاصل از تحلیل معادلات ساختاری حداقل مربعات جزئی، از انسجام نظری و تجربی بالایی برخوردار است. ضریب تعیین کل مدل برابر با ۰/۷۱ به‌وضوح نشان می‌دهد که مؤلفه‌های انتخاب‌شده قادر به تبیین بخش قابل‌توجهی از تغییرات در توسعه زیست‌محیطی هستند. در میان مسیرهای علّی، مدیریت پسماند با ضریب مسیر ۰/۳۴ بیشترین اثر مستقیم را بر توسعه زیست‌محیطی ایفا می‌کند که این امر نه تنها اهمیت مدیریت بهینه زباله و فناوری‌های بازیافت را در فرآیند هوشمندسازی شهری برجسته می‌سازد، بلکه بیانگر آن است که مداخله در این حوزه دارای بیشترین بازده در ارتقاء کیفیت زیست‌محیطی شهرها خواهد بود. زیرساخت فناورانه و خدمات دیجیتال شهری نیز با ضرایب ۰/۳۱ و ۰/۳۰ تأثیر بالایی دارند و نشان می‌دهند که ایجاد شبکه‌های هوشمند، سنسورهای محیطی، پلتفرم‌های مشارکتی و سیستم‌های داده‌محور نه‌تنها نقش زیربنایی در پیاده‌سازی مؤلفه‌های محیط زیست هوشمند دارند بلکه موجب تسهیل در مدیریت دیگر مؤلفه‌ها همچون انرژی، حمل‌ونقل و آموزش می‌شوند. ضریب تأثیر اقتصاد هوشمند نیز در جایگاه مهمی قرار دارد، زیرا رابطه آن با توسعه زیست‌محیطی با یک منطق هم‌افزایانه و پایداری شهری پیوند خورده است؛ رشد اقتصادی زمانی در یک بستر هوشمند مفید تلقی می‌شود که با بهره‌وری منابع و کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی همراه باشد. از سوی دیگر، پایین‌ترین ضریب مسیر مربوط به کیفیت محیطی است که با وجود اهمیت بنیادین آن، اثرگذاری مستقیمش در این مدل نسبتاً ضعیف‌تر ثبت شده و این خود می‌تواند بازتابی از تأثیرات غیرمستقیم یا ضعف زیرساخت‌های داده‌برداری در این حوزه باشد. در مجموع، تحلیل ساختاری مدل نشان می‌دهد که توسعه زیست‌محیطی در بستر شهر هوشمند، نه‌تنها یک فرآیند چندبُعدی وابسته به فناوری و زیرساخت است بلکه نیازمند پیوند دقیق بین مؤلفه‌های اقتصادی، اجتماعی، آموزشی و زیست‌محیطی در یک معماری هوشمند و یکپارچه است. این یافته‌ها از منظر برنامه‌ریزی شهری، ضرورت بازطراحی نظام‌های مدیریت شهری را بر اساس داده‌محوری، چابکی نهادی و توان‌افزایی شهروندی در مسیر زیست‌پذیری هوشمند به‌خوبی برجسته می‌سازند.



شکل ۳- ارزیابی مدل توسعه زیست محیطی شهر هوشمند تبریز(منبع یافته های تحقیق، ۱۴۰۴)

جدول ۷- ضرایب تعیین **(R^2)** مؤلفه‌های مدل ساختاری نهایی

مؤلفه	ضریب تعیین(R^2)
زیرساخت هوشمند	۰/۷۲
حمل‌ونقل هوشمند	۰/۶۷
مدیریت پسماند هوشمند	۰/۶۶
کیفیت هوا و آب	۰/۶۱
اقتصاد هوشمند	۰/۷۲
آموزش زیست‌محیطی	۰/۵۹
خدمات دیجیتال هوشمند	۰/۷۶
پایداری زیست‌محیطی شهری	۰/۶۵

(منبع یافته های تحقیق، ۱۴۰۴)

مقایسه ضرایب تعیین در جدول ۷ نشان می‌دهد که بیشترین مقدار R^2 به «خدمات دیجیتال هوشمند» با ضریب ۰/۷۶ تعلق دارد که نشان‌دهنده تبیین بالا و قدرت بالای مؤلفه‌های مدل در توضیح تغییرات این شاخص است. پس از آن، «زیرساخت هوشمند» با مقدار ۰/۷۲ و «اقتصاد هوشمند» نیز با مقدار ۰/۷۲ در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند، که حاکی از اهمیت این مؤلفه‌ها در ساختار هوشمندسازی زیست‌محیطی شهر است. چنین مقادیری مؤید آن‌اند که برنامه‌ریزی شهری برای توسعه هوشمند باید به تقویت خدمات دیجیتال و ارتقاء زیرساخت‌های فناورمحور توجه ویژه‌ای داشته باشد. در نقطه مقابل، پایین‌ترین مقدار ضریب تعیین به «آموزش زیست‌محیطی» با R^2

معادل ۰/۵۹ اختصاص دارد. این مقدار گرچه همچنان در محدوده قابل‌قبول برازش قرار دارد، اما نشان‌دهنده آن است که مدل در تبیین تغییرات این سازه با محدودیت بیشتری مواجه است و شاید این مؤلفه نیاز به بازنگری در شاخص‌ها، مسیرهای علّی، یا حتی ارتقاء جایگاه آن در مدل نهایی داشته باشد. مؤلفه‌های «مدیریت پسماند هوشمند»، «حمل‌ونقل هوشمند» و «کیفیت هوا و آب» نیز به‌ترتیب با ضرایب ۰/۶۶، ۰/۶۷ و ۰/۶۱ در محدوده قابل‌قبول ارزیابی قرار می‌گیرند و نقش مهمی در ساختار کلان توسعه محیط زیست هوشمند ایفا می‌کنند. در نهایت، مؤلفه «پایداری زیست‌محیطی شهری» با مقدار R^2 برابر با ۰/۶۵ نشان می‌دهد که مدل به‌طور مؤثری توانسته است اثرگذاری مؤلفه‌های هوشمند را بر پایداری تبیین کند، و این موضوع، انسجام مدل مفهومی و هم‌راستایی سازه‌های آن را از منظر شهرسازی و توسعه پایدار تأیید می‌نماید. این نتایج تأکید دارند که در سیاست‌گذاری‌های شهری، توجه به خدمات دیجیتال و زیرساخت‌های هوشمند باید در اولویت قرار گیرد و تقویت ظرفیت‌های آموزشی و اجتماعی به‌عنوان حلقه‌های ضعیف‌تر، می‌تواند بازده کل مدل را به‌طور معناداری ارتقاء دهد.

جدول ۸- ارزیابی نهایی برازش کلی مدل ساختاری**PLS**

شاخص برازش	مقدار به‌دست‌آمده	مقدار معیار استاندارد	وضعیت برازش مدل
(R^2) ضریب تعیین	۰/۷۱	بالاتر از ۰/۳۵ = قوی	مطلوب
(برازش کلی) GOF	۰/۵۰	کم: ۰/۱۰، متوسط: ۰/۲۵، بالا: ۰/۳۶	بسیار مطلوب
(Q^2 (پیش‌بینی‌پذیری	۰/۳۸	بالاتر از صفر	قابل قبول
(باقیمانده استاندارد) SRMR	۰/۰۶	کمتر از ۰/۰۸	تأیید شده
(شاخص برازش نرم) NFI	۰/۹۱	بالاتر از ۰/۹۰	مناسب

(منبع یافته های تحقیق، ۱۴۰۴)

نتایج مدل ساختاری در جدول ۸ نشان می‌دهد که مدل مفهومی پژوهش، از تمامی جنبه‌های فنی و آماری، برخوردار از پایداری، دقت، و انسجام نظری است. ضریب تعیین (R^2) با مقدار ۰/۷۱، نشان‌دهنده تبیین قوی و قابل اتکای متغیر وابسته توسعه زیست‌محیطی توسط مؤلفه‌های مدل است و این میزان از تبیین، حاکی از قدرت بالای سازه‌های مدل در ایجاد اثرات واقعی در محیط شهری است. شاخص GOF در مقدار ۰/۵۰ قرار گرفته که بالاتر از حد آستانه ۰/۳۶ است و براساس معیار چِن این مقدار در طبقه "بسیار مطلوب" قرار می‌گیرد. این شاخص تأیید می‌کند که مدل، هم از نظر اندازه‌گیری و هم ساختاری، هماهنگی بالایی با داده‌های واقعی دارد. شاخص Q^2با مقدار ۰/۳۸ نیز بیانگر آن است که مدل از توانایی نسبتاً قوی در پیش‌بینی بیرونی متغیرها برخوردار است؛ که این، یکی از ارکان پایداری و سودمندی مدل در مطالعات سیاست‌گذاری شهری است. همچنین مقدار SRMR برابر با ۰/۰۶ بوده که پایین‌تر از سطح بحرانی ۰/۰۸ است و نشان می‌دهد خطاهای باقیمانده مدل بسیار اندک و در محدوده استاندارد هستند. مقدار NFI که به‌صورت نرم‌شده توان بازسازی ماتریس همبستگی را می‌سنجد، در سطح ۰/۹۱ قرار دارد؛ این مقدار نشان‌دهنده همخوانی قوی مدل با داده‌هاست. درمجموع، با توجه به این شاخص‌ها، مدل از اعتبار علمی بالا و قابلیت کاربردی فوق‌العاده برخوردار است. این برازش، نه‌تنها مبنای تئوریک پژوهش را تأیید می‌کند، بلکه نشان می‌دهد که می‌توان از این مدل در طراحی سیاست‌های زیست‌محیطی شهرهای هوشمند استفاده کرد؛ به‌ویژه در موقعیت‌هایی که نیاز به مداخلات اولویت‌دار، تخصیص هدفمند منابع، و مدیریت جامع‌نگر در زیرساخت‌ها و خدمات شهری وجود دارد.

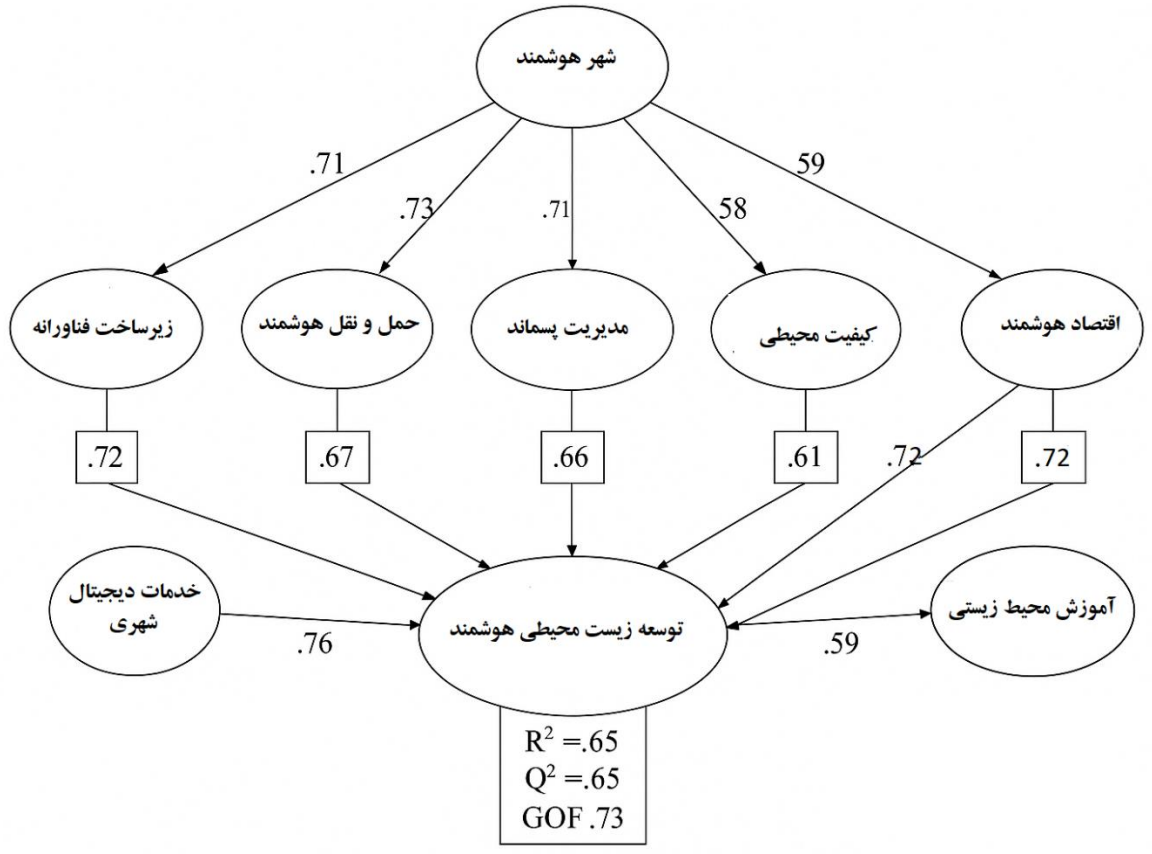
در ادامه تحلیل مدل ساختاری، به‌منظور بررسی نقش میانجی‌گری «آموزش و آگاهی زیست‌محیطی» در رابطه میان سایر مؤلفه‌های شهر هوشمند و توسعه زیست‌محیطی شهری، از آزمون بوت‌استراپ برای ارزیابی اثرات غیرمستقیم استفاده شد. این تحلیل به شناسایی میزان و معناداری اثرات غیرمستقیم مؤلفه‌ها بر متغیر وابسته از طریق متغیر میانجی کمک می‌کند و درک عمیق‌تری از سازوکارهای علّی درون مدل فراهم می‌سازد. نتایج مربوط به آزمون بوت‌استراپ برای اثرات غیرمستقیم در جدول ۹ ارائه شده است.

جدول ۹- اثرات غیرمستقیم مؤلفه‌ها بر توسعه زیست‌محیطی با میانجی آموزش و آگاهی زیست‌محیطی (آزمون بوت‌استراپ)

مسیر غیرمستقیم	ضریب مسیر غیرمستقیم(β)	آماره t	سطح معناداری (Sig)
زیرساخت فناورانه ← آموزش و آگاهی زیست‌محیطی ← توسعه زیست‌محیطی	۰/۰۹	۳/۴۵	۰/۰۰۱
خدمات دیجیتال ← آموزش و آگاهی زیست‌محیطی ← توسعه زیست‌محیطی	۰/۰۸	۳/۲۱	۰/۰۰۱
اقتصاد هوشمند ← آموزش و آگاهی زیست‌محیطی ← توسعه زیست‌محیطی	۰/۰۶	۲/۹۸	۰/۰۰۳
مدیریت پسماند ← آموزش و آگاهی زیست‌محیطی ← توسعه زیست‌محیطی	۰/۰۵	۲/۷۵	۰/۰۰۶
حمل‌ونقل هوشمند ← آموزش و آگاهی زیست‌محیطی ← توسعه زیست‌محیطی	۰/۰۴	۲/۴۳	۰/۰۱۵

(منبع یافته های تحقیق، ۱۴۰۴)

همان‌گونه که نتایج جدول ۹ نشان می‌دهد، متغیر «آموزش و آگاهی زیست‌محیطی» در مسیرهای غیرمستقیم بین مؤلفه‌های زیرساخت فناورانه، خدمات دیجیتال، اقتصاد هوشمند، مدیریت پسماند و حمل‌ونقل هوشمند با توسعهٔ زیست‌محیطی، نقش میانجی‌گری معناداری ایفا می‌کند. معناداری اثرات غیرمستقیم در تمامی مسیرها، با سطح معناداری کمتر از ۰/۰۵ و مقادیر آماره t مناسب، حاکی از آن است که این متغیر به‌طور مؤثر می‌تواند به‌عنوان پل ارتباطی میان سیاست‌های فناورانه شهر هوشمند و تحقق توسعه پایدار زیست‌محیطی در کلان‌شهر تبریز عمل کند. به‌بیان دیگر، تأثیر سیاست‌های فناورانه و مدیریتی بر توسعه زیست‌محیطی تا حد زیادی به کیفیت آموزش و میزان آگاهی زیست‌محیطی شهروندان وابسته است؛ بنابراین در برنامه‌ریزی‌های آینده باید به تقویت این مؤلفه به‌عنوان یک عامل تسهیل‌گر کلیدی توجه ویژه‌ای معطوف گردد.



شکل ۴- مدل نهایی مؤلفه‌های تأثیرگذار بر توسعهٔ زیست‌محیطی شهر هوشمند در کلان‌شهر تبریز(منبع یافته های تحقیق، ۱۴۰۴)

۴- نتیجه‌گیری

تحلیل مدل ساختاری توسعه زیست‌محیطی شهر هوشمند در کلان‌شهر تبریز نشان داد که رویکردهای فناورانه به‌تنهایی نمی‌توانند ضامن پایداری زیست‌محیطی باشند، مگر آن‌که با عناصر فرهنگی، نهادی و اجتماعی به‌درستی پیوند یابند. یافته‌های پژوهش نشان داد که مؤلفه‌هایی مانند مدیریت پسماند، خدمات دیجیتال شهری، زیرساخت هوشمند و اقتصاد دانش‌بنیان نقش محوری در شکل‌دهی به الگوی زیست‌محیطی تبریز ایفا می‌کنند. با این حال، مؤلفه‌هایی نظیر آموزش زیست‌محیطی، آگاهی عمومی و شفافیت اطلاعات محیطی هنوز جایگاه تقویت‌شده‌ای در فرآیند هوشمندسازی زیست‌محیطی این شهر نیافته‌اند و از این‌رو نیازمند طراحی و اجرای سیاست‌های هوشمندانه‌تری هستند. برای مثال، نقش برجسته خدمات دیجیتال شهری در تحلیل مدل ساختاری بیانگر آن است که زیرساخت‌های فناورانه تبریز در بخش‌هایی مانند داده‌های شهری، سنجش کیفیت محیط و دسترسی آنلاین به خدمات، ظرفیت بالایی برای توسعه دارند؛ اما این پتانسیل تنها زمانی به اثربخشی منجر می‌شود که در کنار آن، شهروندان از سطح آگاهی و مشارکت لازم برخوردار باشند. تحلیل اثرات غیرمستقیم مؤلفه‌ها نیز نشان داد که آموزش و آگاهی زیست‌محیطی به‌عنوان یک متغیر میانجی نقش کلیدی در انتقال اثرات زیرساخت فناورانه، خدمات دیجیتال، اقتصاد هوشمند و مدیریت پسماند بر توسعهٔ زیست‌محیطی ایفا می‌کند. این یافته بیانگر آن است که بدون ارتقای دانش و نگرش‌های محیط‌زیستی شهروندان، ظرفیت‌های فناورانه و اقتصادی به‌تنهایی قادر به ایجاد تغییرات پایدار نخواهند بود و باید با برنامه‌های هدفمند آموزشی و آگاهی‌رسانی تکمیل شوند. از سوی دیگر، یافته‌ها نشان داد که شاخص‌های مربوط به سنجش کیفیت آب و هوا، کنترل منابع آلاینده و اطلاع‌رسانی بحران‌ها با چالش‌هایی در اجرا مواجه‌اند. این وضعیت، لزوم توسعه ایستگاه‌های پایش هوشمند، تقویت سیستم‌های نظارت بر آلاینده‌ها و بازنگری در نظام انتشار داده‌های محیطی را برجسته می‌سازد. در همین راستا، شهرداری تبریز می‌تواند با ایجاد پلتفرم‌های مشارکتی و سامانه‌های گزارش مردمی، ارتباطی فعال‌تر میان مردم، سیاست‌گذاران و داده‌های محیطی برقرار کند تا اعتماد عمومی و شفافیت در حکمرانی محیط‌زیست تقویت شود. هم‌چنین، بخش بزرگی از توسعه پایدار در تبریز وابسته به کارایی سیاست‌های اقتصادی در حوزه فناوری‌های سبز و بازیافت هوشمند است. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود که مکانیزم‌های تشویقی برای سرمایه‌گذاری بخش خصوصی در حوزه اقتصاد سبز و پسماند شهری طراحی شده و از طریق مشوق‌های مالیاتی، تسهیلات بانکی یا واگذاری زمین، شرکت‌های فعال در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر، حمل‌ونقل پاک، و استارت‌آپ‌های محیط زیستی حمایت شوند. از منظر شهرسازی، مؤلفه‌های با ضریب تبیین پایین‌تر مانند آموزش و آگاهی زیست‌محیطی، نشانه‌هایی از شکاف‌های نهادی و ضعف پیوند اجتماعی در توسعه هوشمند را آشکار کردند. بنابراین، توصیه می‌شود که در تدوین طرح‌های جامع و تفصیلی شهری، بُعد فرهنگی ـ اجتماعی محیط زیست هوشمند، هم‌سطح با مؤلفه‌های کالبدی و فنی، لحاظ گردد. به‌ویژه در تبریز، که با تنوع اجتماعی، توسعه نامتوازن و چالش‌های آلودگی هوا مواجه است، ایجاد هماهنگی میان فناوری، رفتار شهروندی و نهادهای محلی از اهمیت دوچندان برخوردار است. در این میان، یافته‌های این پژوهش با نتایج برخی مطالعات پیشین نیز همسو است. به‌طور خاص، ردی و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند که همگرایی فناوری‌های هوشمند با راهبردهای پایداری زیست‌محیطی برای تحقق آینده‌ای تاب‌آور و پایدار ضروری است، که این نتیجه با تأکید پژوهش حاضر بر ضرورت پیوند فناوری با آموزش و مشارکت اجتماعی همخوانی دارد. همچنین، سروستانی‌نژاد و ملکی (۱۴۰۴) در بررسی شهر اهواز به رابطه مثبت و معنادار بین مؤلفه‌های شهر هوشمند و پایداری زیست‌محیطی اشاره کردند؛ یافته‌ای که در این تحقیق نیز از طریق اثرات غیرمستقیم زیرساخت‌های هوشمند و اقتصاد دانش‌بنیان بر پایداری زیست‌محیطی تأیید شد. در نهایت، علائی و همکاران (۱۴۰۱) بر اهمیت شاخص‌های آموزشی و ضعف پیوند نهادی در توسعه محیط زیست هوشمند تأکید کردند، که این نیز با نتایج پژوهش حاضر در خصوص جایگاه ضعیف مؤلفه‌های آموزش زیست‌محیطی و نیاز به تقویت بُعد فرهنگی ـ اجتماعی در توسعه هوشمند تبریز کاملاً همسو است. در جمع‌بندی، مدل نهایی پژوهش نشان داد که شهر هوشمند زیست‌پذیر تنها در سایه یک معماری نظام‌مند متشکل از زیرساخت‌های هوشمند، توانمندسازی اجتماعی، حکمرانی شفاف، و داده‌محوری پایدار قابل تحقق است. تبریز به‌عنوان یکی از شهرهای پیشرو در شمال‌غرب ایران، در مسیر توسعه هوشمند گام‌های مثبتی برداشته است، اما برای نیل به اهداف بلندمدت پایداری محیطی، باید سیاست‌گذاری یکپارچه، تخصیص هدفمند منابع، و بازطراحی نظام برنامه‌ریزی شهری با نگاه کل‌نگر و آینده‌نگرانه در دستور کار مدیران شهری و نهادهای برنامه‌ریز قرار گیرد.

۵- منابع و مراجع

1- Alaee R, Rahnama M, Ajzashokouhi M, Forghani A. The Smart Environment Scenarios of Mashhad Metropolis, Iran. GeoRes 2023; 38 (2) :133-141. http://dx.doi.org/10.58209/geores.38.2.133.

2- Alavipoor, F. S., Ehsani, A. H., Salesi, M., Chehrazar, F. Impact of ICT on environmental sustainable development. *Journals of Environmental Education and Sustainable Development*, 2013; 2(5): 53-72. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223057.1392.2.5.6.8.

3- Salman MY, Hasar H. Review on environmental aspects in smart city concept: water, waste, air pollution and transportation smart applications using IoT techniques. *Sustain Cities Soc*. 2023; 94: 104567. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104567.

4- Zeynali Azim, A., Fadaei Haghi, M., Alizadeh, A., Jodeiri Abbasi, M., Fathipour, R., Sharifi, M. Measuring the Effective Factors in the Non-Development of the Sustainable Smart City of Tabriz. *Environmental Sciences*, 2024; 22(3): 427-446. https://doi.org/10.48308/envs.2024.1337.

5- Zeynali Azim, A., Babazadeh Oskouei, S. Analyzing of Creating a Livable Smart City in the City of Tabriz. Urban Economics and Planning, 2022; 3(4): 24-37. https://doi.org/10.22034/uep.2022.365191.1286.

6- Hoseinian Rad, A., Amiri, H., Niknami, N., Beyranvandzadeh, M. Explaining Urban Sustainability with the Approach of Implementing Smart City Components Case Study: Khorramabad City. *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 2025; 6(3): 78-93. https://www.srds.ir/article_216662_en.html?lang=fa.

7- Hardi R, Nurmandi A, Purwaningsih T, Manaf HA. Smart city governance and interoperability: enhancing human security in Yogyakarta and Makassar, Indonesia. *Front Polit Sci*. 2025; 7: 1553177. https://doi.org/10.3389/fpos.2025.1553177.

8- Ramos, B, Smart cities beyond technology. *Nat Cities*. 2025; 2:106. https://doi.org/10.1038/s44284-025-00206-0.

9- Sukarno M, Putri SAG. Smart environment planning for smart city based on regional medium-term development plan Surabaya City 2021–2026. IOP Conf Ser Earth Environ Sci. 2022;1105(1):012023. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1105/1/012023.

10- Sham R, Lim EWL, Othman R, Rasi RZ, Mohamad NMN. Smart City Initiatives For Sustainable Environmental Planning. In: Ahmad Z, editor. *Progressing Beyond and Better: Leading Businesses for a Sustainable Future*. Vol. 88. European Proceedings of Social and Behavioural Sciences. European Publisher; 2020. p. 992-1002. Available from: https://doi.org/10.15405/epsbs.2020.10.92

11- Lata M, Sharma V. Smart city environment management: challenges and opportunities. In: Proceedings of the Grenze International Journal of Engineering and Technology Conference; 2024; USA. https://www.mdpi.com/2624-6511/6/2.

12- Wang S, Lai Y. Can smart city construction reduce environmental pollution? Evidence from smart city pilot policy in China. SSRN Electron J. 2024. https://doi.org/10.2139/ssrn.4785841. https://ssrn.com/abstract=4785841.

13- Nikolov N. Smart cities as a tool for environmental sustainability: opportunities and challenges. In: Proceedings of the 15th International Scientific and Practical Conference “Environment. Technology.

Resources"; 2024; Rezekne, Latvia. Vol. 1. Rezekne Academy of Technologies. 261–266. https://doi.org/10.17770/etr2024vol1.7948.

14- Reddy GS, Reddy M, Chaitanya K, Joshi A. Environmental sustainability in the digital age: the role of smart technologies in agriculture, urban development, and energy management. *Int J Environ Climate Change*. 2025;15(1):12–24. https://doi.org/10.9734/ijecc/2025/v15i14669.

15- Wang P, *Smart materials for advanced environmental applications*. Cambridge (UK): Royal Society of Chemistry; 2025. www.rsc.org.

16- Abu-Rayash A, Dincer I. Development of an integrated model for environmentally and economically sustainable and smart cities. *Sustain Energy Technol Assess*. 2025 Jan;73:104096. https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104096.

17- Ardana, S. D. M., Nurmandi, A., Fridayani, H. D., & Chiang, L. C. (2024). *Smart Living and Smart Environment Concepts as Elements to Create a Solo Smart City*. In SHS Web of Conferences, Vol. 202, Article 01002. The 1st International Conference on Environment and Smart Education (ICEnSE 2024). https://doi.org/10.1051/shsconf/202420201002

18- Sari DAH, Rahayu MJ, Pujantiyo BS. Study on the suitability of the application of the Smart Environment concept as part of a Smart City (Case Study: Semarang City). *J Reg Urban Settlement Plan (Desa-Kota)*. 2024;6(1):154–170. https://doi.org/10.24843/JRS.2020.v07.i01.p08.

19- Nikolov N. Smart cities as a tool for environmental sustainability: opportunities and challenges. *Environ Technol Resour Proc Int Sci Pract Conf*. 2024; 1: 261–266. https://doi.org/10.17770/etr2024vol1.7948.

20- Azlan ZHZ, Junaini SN, Bolhassan NA, Wahi R, Arip MA. Harvesting a sustainable future: an overview of smart agriculture's role in social, economic, and environmental sustainability. *J Clean Prod*. 2023;140338. https://doi.org10.1016/j.jclepro.2023.140338.

21- Sasanpour F, Saeidi O, Razavi SM, Saeidi M. Measuring the components of smart environment promotion in the 12th District of Tehran. Geography and Development. 2025;23(79):73–102. https://doi.org/10.22111/GDIJ.2024.46951.3587.

22- Sarostani Nejad, Z., Maleki, S. Evaluation and feasibility of the role of the smart city in the sustainability of urban livability, (case study: Ahvaz metropolis). *Geography and Human Relationships*, 2025; 7(4): 208-227. https://doi.org/10.22034/gahr.2025.499410.2363.

23- Alaee, R., rahnama, M. R., Ajza shokouhi, M., Forghani, A. Identification and structural analysis of mutual influence of smart environment drivers in Mashhad metropolis. *Journal of Geography and Regional Development*, 2023; (3): 15-32 https://doi.org/10.22067/jgrd.2023.79970.1219.

24- Zeynali Azim A, Hatami Golzari E, Karami I, Babazadeh Oskoui S. Measuring the environmental sustainability of Tabriz city based on environmental indicators of smart urban growth. Sustainability, Development & Environment. 2021;2(3):41–59. Available from: http://sanad.iau.ir/fa/Article/846581.