

Evaluation of Key Factors Influencing the Realization of Sustainable Housing within the context of Circular Economy under Conditions of Uncertainty: A Future Study in the City of Yazd

Ali Naderi ¹, Mahsa Zarandi ², Mohsen Rafieian ^{3*}

1. M.S. Student, Department of Urban Planning & Design, Faculty of Art and Architecture, Yazd University, Yazd, Iran

2. M.S. Student, Department of Urban Planning & Design, Faculty of Art and Architecture, Yazd University, Yazd, Iran

3. Associate Professor, Department of Urbanism, Faculty of Art and Architecture, Yazd University, Yazd, Iran

Highlights:

Identifying Key Factors for Sustainable Housing: The rate of material recycling, waste management, green technologies, institutional coordination, and quality of life were identified as primary factors for achieving sustainable housing in Yazd within the framework of a circular economy approach.

Systemic Framework Considering Uncertainty: By integrating futures studies and systemic analysis, the research provides a local and adaptable framework for sustainable housing policy-making in Yazd, considers environmental and systemic dynamics under conditions of uncertainty.

ARTICLE INFO

EXTENDED ABSTRACT

UPK, 2026

VOL. 10, Issue 2, PP, 1-22

Received: 28 Apr 2025

Accepted: 05 Jun 2026

Article Type:

Research article

Keywords: Sustainable Housing, Circular Economy, Futures Studies, Urban Planning, Uncertainty

Cite this article:

Naderi, A., Zarandi, M., & Rafieian, M (2026). Analysis of Water's Role in the Evaluation of Key Factors Influencing the Realization of Sustainable Housing within the context of Circular Economy under Conditions of Uncertainty: A Future Study in the City of Yazd. Urban Plan Knowl, 10(2), 1-22.

DOI:

[10.22124/UPK.2026.30525.2026](https://doi.org/10.22124/UPK.2026.30525.2026)

Introduction: Urban population growth, resource scarcity, and environmental degradation necessitate innovative urban development models. Sustainable housing, a critical component of urban systems, mitigates environmental impacts, enhances resilience, and improves quality of life. Conventional linear housing planning faces challenges such as rising environmental costs and resource inefficiency. The circular economy, which emphasizes material recycling, waste reduction, and the integration of renewable energy sources (e.g., solar energy), offers a transformative framework for sustainable housing. Yazd, located in Iran's central plateau, faces rapid population growth, increasing housing demand, water scarcity, and spatial inequalities that threaten sustainability. Despite its rich cultural heritage and significant solar-energy potential, inefficiencies in material recycling and policy coordination hinder progress. Previous studies in Iran have focused primarily on the technical or social dimensions of housing while neglecting the integration of circular-economy principles and futures-oriented planning. This study identifies the key factors influencing sustainable housing in Yazd through a circular-economy lens, employing futures studies to forecast trends and develop policy scenarios under conditions of uncertainty. It provides a localized framework for Yazd that can be scaled to similar arid cities, thereby enriching the literature on urban planning and sustainability.

Methodology: Conducted in Yazd, a culturally significant city with unique climatic challenges, this study adopted a futures-studies approach using structural and cross-impact analysis through MICMAC software. The research process consisted of the following steps:

*Corresponding Author: mrafian@yazd.ac.ir



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. Literature Review: Criteria were extracted from scientific publications and strategic planning documents.
2. Expert Interviews: Semi-structured interviews with urban planning and environmental experts were conducted to identify key factors and uncertainties.
3. Delphi Technique: A panel of 12 experts scored a 20×20 cross-impact matrix (0 = no effect; 3 = strong effect) to assess interactions among factors.
4. MICMAC Analysis: The data were analyzed to classify factors as key, dependent, or regulatory variables.
5. Sensitivity Analysis: Perturbations of $\pm 5\%$ and $\pm 10\%$ were applied to 20 indicators (e.g., C02: material recycling, C04: waste management, and C20: solar energy) using MATLAB, and changes in rankings were visualized.

Results: MICMAC analysis revealed a complex system with a matrix fill rate of 71%, indicating dense interactions among factors (284 of 400 relationships were significant: 116 no effect, 99 weak, 90 moderate, and 95 strong). Total influence and dependence scores were balanced at 564. Key findings include:

- Influential Factors: Material recycling (C02), waste management (C04), and the housing–security–happiness linkage (C08) exhibited high levels of direct influence (Figures 3 and 4).
- Dependent Factors: Green technology adoption (C01), institutional coordination (C16), and solar-energy capacity (C20) were highly dependent variables.
- Dominant Dimensions: Environmental factors (e.g., recycling and climate change) and social factors (e.g., quality of life) were dominant, whereas technological and managerial factors were primarily dependent.
- Sensitivity Analysis: C02 and C04 were highly stable (0–3 ranking changes), C08 exhibited moderate stability (3–7 ranking changes), whereas C01, C18 (local resource utilization), and C20 were highly sensitive (16–18 ranking changes), reflecting systemic vulnerabilities.

Influence–dependence maps and graphical analyses identified C02, C04, and C08 as key drivers, while potential relationships highlighted the need for adaptive and dynamic planning strategies.

Discussion: The study maps a dynamic network for sustainable housing in Yazd that depends on environmental, social, technological, and institutional strategies:

- Resource Recycling: The prominence of C02 and C04 is consistent with studies identifying recycling and waste management as core pillars of the circular economy. Yazd's industrial waste streams (e.g., steel and tile waste) offer significant circularity potential, requiring investment in recycling infrastructure.
- Quality of Life: The role of C08 in promoting social sustainability, supported by studies on resident satisfaction, suggests that innovative approaches such as product–service systems (PSS) can enhance social acceptance.
- Green Technologies: The high sensitivity of C01 and C20 underscores Yazd's considerable solar-energy potential while highlighting barriers to adoption, thereby necessitating greater technological investment.
- Institutional Coordination: The instability of C16 reflects governance challenges that require stronger policy alignment and stakeholder collaboration.

Policy Implications: The proposed framework, which is scalable to other arid cities, integrates recycling, technology, and governance while emphasizing social acceptance. Policymakers should prioritize the development of recycled-material databases, investment in solar-energy infrastructure, community engagement initiatives, and enhanced institutional coordination.

Conclusion: This study provides the first structural and sensitivity-based futures analysis of sustainable housing within a circular-economy framework in a desert city of the Global South. The combination of MICMAC structural analysis and local sensitivity assessment revealed that the future of Yazd's housing system depends on a small set of highly influential yet differentially robust drivers. Three drivers proved highly stable and dominant across direct, indirect, potential, and perturbed conditions: the rate of building-material recycling (C02), the efficiency of construction-waste management (C04), and the relationship between housing and residents' sense of security and happiness (C08). These variables constitute the robust backbone of the system and should serve as the non-negotiable core of any effective policy package. In contrast, technology adoption (C01), local resource utilization (C18), solar-energy integration (C20), and inter-institutional coordination (C16) exhibited high sensitivity, with ranking shifts of up to 18 positions under $\pm 5\text{--}10\%$ perturbations.

ارزیابی پیشران‌های مؤثر بر تحقق مسکن پایدار در بستر اقتصاد چرخشی تحت شرایط عدم قطعیت: مطالعه‌ای آینده‌پژوهانه در شهر یزد

علی نادری^۱، مهسا زرنندی^۲، محسن رفیعیان^{۳*}

۱. دانشجوی کارشناس ارشد، گروه شهرسازی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲. دانشجوی کارشناس ارشد، گروه شهرسازی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۳. دانشیار، گروه شهرسازی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

نکات برجسته:

شناسایی پیشران‌های کلیدی مسکن پایدار: نرخ بازیافت مصالح، مدیریت پسماند، فناوری‌های سبز، هماهنگی نهادی و کیفیت زندگی به‌عنوان پیشران‌های اصلی برای تحقق مسکن پایدار در یزد با رویکرد اقتصاد چرخشی شناسایی شدند. چارچوب سیستمی با توجه به عدم قطعیت: پژوهش با تلفیق آینده‌پژوهی و تحلیل سیستمی، چارچوبی بومی و انطباق‌پذیر برای سیاست‌گذاری مسکن پایدار در یزد ارائه می‌دهد که پویایی‌های محیطی و سیستمی را در شرایط عدم قطعیت مدنظر قرار می‌دهد.

چکیده

اطلاعات مقاله

بیان مسئله: شهر یزد با رشد سریع جمعیت و محدودیت شدید منابع طبیعی، با چالش جدی تأمین مسکن پایدار مواجه است. برنامه‌ریزی کنونی مسکن عمدتاً بر الگوی خطی استوار است و پیوند مؤثری با اصول اقتصاد چرخشی (بازچرخانی مصالح، انرژی تجدیدپذیر و کاهش ضایعات) برقرار نکرده است. این شکاف موجب افزایش هزینه‌های زیست‌محیطی، هدررفت منابع و نابرابری دسترسی به مسکن گردیده است.

هدف: هدف این پژوهش، شناسایی پیشران‌های کلیدی مؤثر بر تحقق مسکن پایدار با رویکرد اقتصاد چرخشی است تا مبنایی برای بازطراحی سیاست‌های شهری در یزد فراهم کند و الگویی مقیاس‌پذیر برای سایر شهرهای کویری ارائه دهد.

روش: روش پژوهش مبتنی بر آینده‌پژوهی ساختاری، تکنیک دلفی، تحلیل تأثیرات متقابل با نرم افزار میک‌مک و تحلیل حساسیت با نرم افزار متلب است.

یافته‌ها: تحلیل ساختاری میک‌مک و تحلیل حساسیت محلی نشان داد که پیشران‌های پایدار و محرک اصلی نظام مسکن پایدار یزد عبارتند از: نرخ بازیافت مصالح ساختمانی (C02)، کارایی مدیریت پسماند ساختمانی (C04) و ارتباط مسکن با احساس امنیت و شادی (C08) که در همه سطوح مستقیم، غیرمستقیم و بالقوه دارای بالاترین تأثیرگذاری و پایداری رتبه‌ای بودند. در مقابل، پیشران‌های پذیرش فناوری‌های سبز در ساخت‌وساز (C01)، بهره‌برداری از منابع محلی (C18)، ظرفیت تولید انرژی خورشیدی (C20) و هماهنگی بین نهادهای شهری (C16) با وجود اثرپذیری بالا، حساسیت بسیار زیاد از خود نشان دادند و به‌عنوان پیشران‌های شکننده و بحرانی سیستم شناسایی شدند.

نتیجه‌گیری: موفقیت این گذار وابسته به تقویت همزمان سه اهرم پایدار (بازچرخانی مصالح، مدیریت چرخشی پسماند و ارتقای کیفیت زندگی اجتماعی) و پایدارسازی سریع پیشران‌های شکننده (پذیرش فناوری سبز، انرژی خورشیدی و هماهنگی نهادی) است. ماتریس سناریوهای ۲×۲ نشان می‌دهد تنها ترکیب «هماهنگی نهادی بالا + پذیرش فناوری سبز بالا» به «جهش سبز یزد» منجر می‌شود؛ در غیر این صورت، شهر با پیشرفت کند، نوآوری‌های پراکنده یا رکود چرخشی مواجه خواهد شد.

دانش شهرسازی، ۱۴۰۵

دوره ۱۰، شماره ۲، صفحات ۲۲-۱۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۵

نوع مقاله:

پژوهشی

کلیدواژه‌ها: مسکن پایدار، اقتصاد چرخشی، آینده‌پژوهی، برنامه‌ریزی شهری، عدم قطعیت

ارجاع به این مقاله:

نادری، علی، زرنندی، مهسا، رفیعیان، محسن. (۱۴۰۵). ارزیابی پیشران‌های مؤثر بر تحقق مسکن پایدار در بستر اقتصاد چرخشی تحت شرایط عدم قطعیت: مطالعه‌ای آینده‌پژوهانه در شهر یزد، دانش شهرسازی، ۱۰(۲)، ۱-۲۲.

DOI:

[10.22124/upk.2026.30525.2026](https://doi.org/10.22124/upk.2026.30525.2026)

نویسنده مسئول: mrafian@yazd.ac.ir



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

بیان مسئله

افزایش جمعیت شهری، محدودیت منابع طبیعی و تشدید پیامدهای زیست‌محیطی، لزوم بازنگری در الگوهای توسعه شهری را اجتناب‌ناپذیر ساخته است (Shehadeh et al, 2025; J. Zhang et al, 2025; X. Zhang et al, 2025). مسکن پایدار، به‌عنوان یکی از ارکان کلیدی توسعه شهری، نقش محوری در کاهش اثرات زیست‌محیطی، ارتقاء تاب‌آوری شهرها و بهبود کیفیت زندگی ایفا می‌کند (Alqahtani et al, 2024). با این حال، رویکردهای متداول برنامه‌ریزی مسکن، که عمدتاً بر بهره‌برداری خطی از منابع متکی هستند، با چالش‌هایی نظیر افزایش هزینه‌های زیست‌محیطی، ناکارآمدی در مدیریت منابع و عدم پاسخگویی به نیازهای رو به رشد شهرها مواجه شده‌اند (Gomide, 2024). اقتصاد چرخشی^۱، با تأکید بر بازچرخانی مصالح، کاهش ضایعات، بهینه‌سازی چرخه‌های تولید و مصرف و بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر، چارچوبی نوآورانه برای بازطراحی نظام‌های مسکن پایدار ارائه می‌دهد. این رویکرد با ادغام منابع انرژی پاک، مانند انرژی خورشیدی، در فرآیندهای ساخت‌وساز و بهره‌برداری از مسکن، به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و ارتقاء پایداری زیست‌محیطی کمک می‌کند (Corvellec, Stowell & Johansson, 2022). شهر یزد، واقع در فلات مرکزی ایران، با چالش‌های منحصر به فردی در تحقق مسکن پایدار مواجه است. رشد سریع جمعیت، افزایش تقاضا برای مسکن، محدودیت شدید منابع آب و فشار بر زیرساخت‌های شهری، همراه با نابرابری‌های فضایی در دسترسی به مسکن مناسب، پایداری این شهر را تهدید می‌کند (Beladi, 2021; Parivar, Quanrud, Sotoudeh & Abolhasani, 2022). اگرچه یزد از پتانسیل‌های فرهنگی، اقتصادی و اقلیمی نظیر ظرفیت بالای انرژی خورشیدی برخوردار است، ناکارآمدی در بازچرخانی مصالح ساختمانی، استفاده محدود از انرژی‌های تجدیدپذیر در بخش مسکن و فقدان سیاست‌های هماهنگ برای ادغام اقتصاد چرخشی، موانع جدی ایجاد کرده است. مطالعات پیشین در ایران، مانند (Bagheri & Shaykh-Baygloo, 2021; Isalou, Litman & Shahmoradi, 2014; Khorshidian & Fayazi, 2023; Sarvari, Mehrabi, Chan & Cristofaro, 2021; Shahmohammadian et al, 2025; Suleimany, 2023)، اغلب بر جنبه‌های فنی و اجتماعی مسکن یا مسکن‌های قابل استطاعت متمرکز بوده و کمتر به پیوند میان اقتصاد چرخشی، مسکن پایدار و برنامه‌ریزی آینده‌نگر در این حوزه پرداخته‌اند. این شکاف مطالعاتی، ضرورت رویکردی یکپارچه را برای هماهنگی سیاست‌ها، فناوری‌ها و منابع در راستای مسکن پایدار برجسته می‌سازد. این پژوهش با هدف شناسایی پیشران‌های کلیدی توسعه مسکن پایدار در یزد با رویکرد اقتصاد چرخشی انجام شده است. با بهره‌گیری از رویکرد آینده‌پژوهی چندروشه؛ شامل تحلیل ساختاری و تکنیک دلفی، این مطالعه روندهای آتی را پیش‌بینی کرده و سناریوهای سیاستی را تحت عوامل کلیدی و عدم قطعیت‌ها تدوین می‌کند. با تحلیل علل ریشه‌ای ناکارآمدی‌ها و ارائه راهبردهای مبتنی بر بازچرخانی منابع و بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر، این پژوهش چارچوبی بومی برای یزد ارائه داده و الگویی مقیاس‌پذیر برای سایر شهرهای با چالش‌های مشابه پیشنهاد می‌کند. از منظر نظری و عملی، این مطالعه به غنای ادبیات برنامه‌ریزی شهری، مسکن پایدار و اقتصاد چرخشی کمک کرده و زمینه‌ساز سیاست‌گذاری برای تاب‌آوری و پایداری شهری خواهد بود.

مبانی نظری

مفهوم مسکن پایدار

مسکن، به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های بنیادین کیفیت زندگی، نقش مهمی در تحقق توسعه پایدار ایفا می‌کند (Winston & Pareja, 2008; Eastaway, 2008). توسعه پایدار به‌طور فزاینده‌ای با مفاهیم کیفیت زندگی، بهزیستی و زیست‌پذیری پیوند خورده است (MICHALOS, 1997; Scott & Moore, 2017). مسکن به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی کیفیت زندگی و توسعه پایدار، نقش محوری در این حوزه‌ها ایفا می‌کند. مسکن پایدار به واحدهای مسکونی اطلاق می‌شود که با حداقل اثرات زیست‌محیطی، نیازهای ساکنان را تأمین کرده و تعادل میان ابعاد زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی را حفظ می‌کنند (Roufehaei, Abu Bakar & Tabassi, 2014; Winston, 2022). بنابر یافته‌های پژوهش‌های (Chan & Adabre, 2019; Seyfang, 2010)، مسکن پایدار باید ردپای کربن را کاهش دهد، کیفیت زندگی را ارتقا بخشد و در چرخه عمر خود مقرون به‌صرفه و قابل استطاعت باشد. ویژگی‌های کلیدی این مفهوم شامل کارایی انرژی، استفاده از مصالح قابل بازیافت، سازگاری با اقلیم محلی و تأمین دسترسی عادلانه به مسکن است (Carrasco & May, 2025; Edwards & Turrent, 2002; Tomi, 2025). تاکنون پژوهش‌های گوناگونی از دیدگاه‌های متفاوتی به موضوع مسکن پایدار پرداخته‌اند، در ادامه برخی از متاخرترین این پژوهش‌ها به عنوان پیشینه پژوهش به بحث گذاشته شده است. در پژوهش (Yangzom Choden & Bardhan, 2025)، رضایت

ساکنان دو محله مسکن مقرون‌به‌صرفه در بوتان را با مدل شادی ملی ناخالص (GNH) بررسی کرد. ویژگی‌های مسکن، خدمات مدیریتی و امکانات عمومی پیش‌بینی‌کننده‌های اصلی رضایت بودند که با شادی ساکنان مرتبط است و به پایداری مسکن از طریق بهبود کیفیت زندگی و سیاست‌گذاری مؤثر کمک می‌کند. در (Du, Hui, Park & Chen, 2025)، با استفاده از داده‌های نظرسنجی مسکن مهاجران گوانگژو، شاخص ناپایداری مسکن (HPI) را برای مهاجران اجاره‌نشین خصوصی در چین توسعه یافت. نتایج نشان داد که ناپایداری مسکن (شامل امنیت تصدی، مقرون‌به‌صرفه بودن، کیفیت مسکن، دسترسی به خدمات عمومی و رفت‌وآمد) با رضایت از زندگی رابطه منفی دارد و این ناپایداری، پایداری مسکن را با کاهش کیفیت زندگی مهاجران تضعیف می‌کند. در مطالعه‌ای ارجاع شده به (Liu, Shi, Shen & Man Hui, 2025)، تأثیر امکانات شهری بر انتخاب‌های مسکن مهاجران در ۲۸۶ شهر چین بررسی شد و شاخص سطح امکانات شهری (UAL) توسعه یافت. نتایج نشان داد که افزایش UAL به طور قابل‌توجهی هزینه‌های مسکن مهاجران را افزایش می‌دهد، که از طریق انتظار، دسترسی و اثرات یکپارچگی اجتماعی تقویت می‌شود، اما موانع دسترسی به مسکن، پایداری آن را با افزایش فشار مقرون‌به‌صرفه بودن تهدید می‌کند. مطالعه (Zhang, Yuan, Zhou & Jin, 2025a) پژوهش‌های مربوط به سیستم امنیت مسکن (HSS) چین را بررسی کرده و ویژگی‌ها و محدودیت‌های آن را شناسایی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که تحقیقات بر عرضه و تقاضا متمرکز است و پیشنهاد می‌دهد تحقیقات آینده بر یکپارچگی سیاست‌ها، تقاضای مسکن مناسب و تحلیل هوشمند تطابق فضایی تمرکز کند تا پایداری مسکن از طریق بهبود دسترسی به مسکن باکیفیت تقویت شود. پژوهش (Stacy et al, 2025) نشان داد که اصلاحات سخت‌گیرانه کنترل اجاره در آمریکا عرضه مسکن اجاره‌ای را ۱۰٪ کاهش می‌دهد، اما واحدهای مقرون‌به‌صرفه برای خانوارهای کم‌درآمد را ۵۲٪ افزایش و برای خانوارهای پردرآمد را ۴۶٪ کاهش می‌دهد، که پایداری مسکن را با تأثیرات متضاد تحت تأثیر قرار می‌دهد. مطالعه (Jang & Park, 2025) عدالت فضایی مسکن اجاره‌ای عمومی (PRH) را با مقایسه دسترسی به رفت‌وآمد ساکنان PRH و مسکن عمومی بررسی کرد. نتایج نشان داد که ساکنان PRH مسافت‌های طولانی‌تری برای رفت‌وآمد دارند، به‌جز گروه‌های با درآمد بسیار پایین و عدم تعادل شغل-مسکن باعث کاهش دسترسی عادلانه و پایداری مسکن برای آن‌ها می‌شود. در رابطه با مسکن پایدار و اقتصاد چرخشی، مطالعه (Keena et al, 2025) دانش‌نامه گذرنامه مسکن (HPKG) را به‌عنوان چارچوبی دیجیتال برای استانداردسازی داده‌های مسکن معرفی کرد که با استفاده از زیرساخت معنایی، اقتصاد چرخشی را در صنعت ساختمان‌سازی ترویج می‌کند. HPKG با استانداردسازی و پیوند حدود ۶۲ میلیون داده از ۱۰۲ میلیون ساختمان مسکونی در پنج شهر کانادا، ارزیابی یکپارچه مقرون‌به‌صرفه بودن، کارایی انرژی و اثرات زیست‌محیطی را امکان‌پذیر کرده و پایداری مسکن را از طریق بازیافت مواد و تصمیم‌گیری آگاهانه تقویت می‌کند. همچنین مطالعه (Ghafoor et al, 2024) با بررسی پنج مورد پیشرو، چارچوبی با ۱۴ اصل راهنما برای پیاده‌سازی سیستم محصول-خدمت (PSS) در اقتصاد چرخشی مسکن ارائه کرد. نتایج نشان داد که شبکه‌های همکاری واسطه‌محور، اجرای PSS و اقتصاد چرخشی را تسریع کرده و پایداری مسکن را از طریق کاهش منابع، ارزش‌آفرینی و تحویل ارزش تقویت می‌کنند. مطالعه (Ghafoor et al, 2023) نیز با مرور یکپارچه، رابطه سیستم محصول-خدمت (PSS) و اقتصاد چرخشی در مسکن را بررسی کرد و چارچوبی مفهومی برای ترویج کارایی، طول عمر و کفایت در استفاده از انرژی، مواد و فضا پیشنهاد داد. PSS با ایجاد ارزش اقتصادی و اجتماعی جدید، پایداری مسکن را تقویت کرده، اما نیاز به تحقیقات بیشتر در مدل‌های کسب‌وکار و سیاست‌گذاری دارد. بعلاوه مطالعه (Çetin, Gruis & Straub, 2022) با بررسی چندموردی سازمان‌های مسکن اجتماعی هلند، نشان داد که فناوری‌های دیجیتال مانند هوش مصنوعی، دوقلوهای دیجیتال و بازارهای دیجیتال، با حمایت از جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها و بازیافت مواد، استراتژی‌های اقتصاد چرخشی (نگهداری، کاهش و بسته‌بندی حلقه‌ها) را تسهیل می‌کنند. با این حال، چالش‌های فناوری، فرهنگی، بازاری و نظارتی، پذیرش گسترده این فناوری‌ها را محدود کرده و پایداری مسکن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نهایت، مسکن پایدار با کاهش اثرات زیست‌محیطی، ارتقای کیفیت زندگی و حفظ تعادل اقتصادی-اجتماعی، نقش کلیدی در توسعه پایدار ایفا می‌کند. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که عواملی مانند کارایی انرژی، مصالح قابل بازیافت، دسترسی عادلانه و سیاست‌گذاری مؤثر، پایداری مسکن را تقویت کرده و زمینه‌ساز پیوند با اقتصاد چرخشی می‌شوند. این مفاهیم در ادامه با تمرکز بر اقتصاد چرخشی و مسکن بررسی خواهند شد. در جدول ۱ معیارهای مستخرج از ادبیات طبقه‌بندی شده‌اند:

جدول ۱. معیارهای مستخرج از مطالعات اسنادی/ادبیات پژوهش

ابعاد	مولفه‌ها	معیارها	منابع
زیست‌محیطی	بهره‌وری انرژی	مصرف انرژی پایین، طراحی با بهره‌گیری از انرژی خورشیدی	Gil et al, 2021; Keena et al, 2025; Khatibi, Razi, Astaraei & Jahangir, 2023; Roufechaei et al, 2014
	کاهش ردپای کربن	میزان CO2 معادل تولیدی در چرخه عمر ساختمان	Gomide et al, 2024a, 2024b; Seyfang, 2010
	استفاده از مصالح بازیافتی	درصد مصالح بازیافتی در ساخت و ساز	Friedman, 2025; Olabi, 2019; Tomi, 2025
	طراحی اقلیم‌محور	تطابق طراحی با اقلیم گرم و خشک یزد	Roufechaei et al, 2014; Saffari darberazi, Ghadirian, Haqbin & Abdi, 2024
	مدیریت پسماند ساختمانی	میزان بازیافت نخاله‌های ساختمانی	Gomide et al, 2024a; Miatto et al, 2024
اجتماعی	کیفیت زندگی	رضایت از مسکن و محیط اطراف، خدمات عمومی در دسترس	Du et al, 2025; Scott & Moore, 2017; Winston & Pareja Eastaway, 2008; Yangzom et al, 2025
	دسترسی به خدمات	فاصله زمانی/مکانی تا خدمات عمومی (حمل‌ونقل، درمان، آموزش)	Edwards & Turrent, 2002; Jang & Park, 2025
	عدالت فضایی	توازن در توزیع مسکن و اشتغال، فاصله محل سکونت تا محل کار	Jang & Park, 2025; G. Zhang et al, 2025b
	مشارکت اجتماعی	میزان درگیر بودن ساکنان در تصمیم‌گیری مربوط به مسکن	Çetin et al, 2022; Marchesi & Tweed, 2021
	رفاه روانی	ارتباط مسکن با احساس امنیت و شادی	Du et al, 2025; Yangzom et al, 2025
اقتصادی	نوآوری اجتماعی	الگوهای جدید بهره‌برداری از مسکن، مشارکت در طراحی و مصرف اشتراکی	Ghafoor et al, 2024; Marchesi & Tweed, 2021
	هزینه نگهداری	هزینه‌های جاری نگهداری ساختمان در طول عمر	Ghafoor et al, 2023; Seyfang, 2010
	مدل‌های کسب‌وکار نوآورانه	استفاده از PSS یا خدمات به‌جای مالکیت مستقیم	Ghafoor et al, 2023, 2024; Khajuria et al, 2025; Ren, Shan, Jian & Zhu, 2025
	اشتغال‌زایی	فرصت‌های شغلی حاصل از پروژه‌های بازیافتی و پایدار	Gomide et al, 2024b; Lipp & Lederer, 2025
	مقرون‌به‌صرفه بودن	نسبت هزینه مسکن به درآمد خانوار	Keena et al, 2025; Seyfang, 2010; Stacy et al, 2025
فناوری	استفاده از فناوری‌های دیجیتال	کاربرد هوش مصنوعی ^۱ ، دوقلوهای دیجیتال ^۲ و مدلسازی اطلاعات ساختمان ^۳ در طراحی/مدیریت مسکن	Çetin et al, 2022; Parezanović et al, 2025
	سیستم اطلاعاتی ساختمانی	پایگاه داده از مصالح و ساختمان‌ها (HPKG, DGIS ^۳)	Keena et al, 2025; Parezanović et al, 2025
	ارزیابی پیش‌از تخریب	سیستم ممیزی مصالح پیش از تخریب برای بازیافت	Parezanović et al, 2025
سیاست-مدیریتی	سیاست‌های مشوق	مشوق‌های قانونی/مالی برای ساخت‌وساز پایدار	Kung et al, 2025; Stacy et al, 2025; G. Zhang et al, 2025c
	حمایت نهادی	نظام‌های مدیریتی، نهادسازی برای توسعه اقتصاد چرخشی	Çetin et al, 2022; Ghafoor et al, 2024; Lipp & Lederer, 2025
محیطی	بهره‌برداری از ظرفیت‌های بومی	استفاده از انرژی خورشیدی یزد و ضایعات صنایع محلی (فولاد، کاشی)	Khatibi et al, 2023; Saffari darberazi et al, 2024
	معماری بومی	استفاده از الگوهای معماری سنتی متناسب با اقلیم	Roufechaei et al, 2014; Saffari darberazi et al, 2024

1. Artificial Intelligence (AI)

2. Digital Twin

3. Building Information Modeling (BIM)

اقتصاد چرخشی و چگونگی ارتباط آن با مسکن

بنابر تعریف (Khajuria et al, 2025)، اقتصاد چرخشی مدلی است که بر استفاده مداوم از منابع از طریق بازیافت، استفاده مجدد و بازتولید تأکید دارد، در مقابل اقتصاد خطی که مبتنی بر اصل «استخراج، تولید، دفع» است. این مدل با هدف طراحی بدون تولید زباله و آلودگی، منابع را به‌طور مداوم در چرخه اقتصادی نگه می‌دارد. بعلاوه در (Khajuria et al, 2025; Ren et al, 2025) ویژگی‌های کلیدی آن شامل طراحی محصول با دوام، قابلیت تعمیر و بازیافت، استفاده از سیستم‌های زنجیره تأمین بسته ۱ برای کاهش نیاز به منابع بکر و مدل‌های کسب‌وکار مانند محصول به‌عنوان خدمت ۲ و مصرف اشتراکی است که طول عمر محصولات را افزایش داده و تقاضای منابع را کاهش می‌دهد. در مقاله (Lipp & Lederer, 2025) اقتصاد چرخشی به‌عنوان رویکردی معرفی می‌شود که هدف آن کاهش ضایعات و افزایش کارایی استفاده از منابع از طریق بازیافت، استفاده مجدد و بازتولید مواد است. در بخش مسکن، اقتصاد چرخشی از طریق بازیافت مصالح ساختمانی، طراحی ساختمان‌های مدولار و بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی پیاده‌سازی می‌شود (Friedman, 2025; Gil et al, 2021; Marchesi, Tweed & Gerber, 2020; Olabi, 2019). برای مثال، در پژوهش (Gomide et al, 2024a) با مرور نظام‌مند منابع، تأکید شده است که بخش ساخت‌وساز به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان سیمان، فولاد و پلاستیک، مسئول ۵۵٪ از انتشار کربن صنعتی است و اصول اقتصاد چرخشی می‌توانند مدلی پایدار برای بازسازی مسکن و تدوین سیاست‌های عمومی مؤثر فراهم کنند. مطالعه (Gomide et al, 2024b) نیز با مرور نظام‌مند منابع، نقش اقتصاد چرخشی را در کاهش ضایعات، کاهش انتشار کربن، حفظ منابع، ایجاد اشتغال و رشد اقتصادی در کنار توسعه مسکن اجتماعی برجسته ساخته است. در مطالعه‌ای دیگر، با تحلیل جریان مواد در کل اقتصاد استرالیا (Miatto et al, 2024)، نشان داده شد که این کشور به‌عنوان تأمین‌کننده منابع طبیعی، به ویژه فلزات و سوخت‌های فسیلی، نقش برجسته‌ای دارد و نرخ چرخش مواد در اقتصاد آن تنها ۵.۱٪ است. نتایج همچنین حاکی از آن است که بخش‌های حمل‌ونقل و مسکن بیشترین مصرف مواد را به خود اختصاص داده‌اند و فرصت‌هایی برای تقویت اقتصاد چرخشی فراهم می‌کنند. در مطالعه (Kung et al, 2025) با بهره‌گیری از رویکرد QFD-TOPSIS، یک مدل پشتیبان تصمیم‌گیری برای ارزیابی و اولویت‌بندی راهبردهای اقتصاد چرخشی در پروژه‌های ساختمانی توسعه یافته است. نتایج نشان می‌دهد که تمرکز بر راهبردهایی با پتانسیل بالای چرخش‌پذیری، هزینه کم و دشواری فنی پایین، نقش کلیدی در تحقق موفقیت‌آمیز اصول اقتصاد چرخشی در صنعت ساخت‌وساز ایفا می‌کند. پژوهش (Parezanović et al, 2025) با ترکیب مدل‌های برآورد موجود و فناوری‌های سنجش از دور، BIM و DGIS، روشی نوآورانه برای ارزیابی دقیق موجودی ساختمان‌ها در مقیاس شهری ارائه شده است. این روش که در منطقه‌ای از بلگراد آزمایش شد، دقت بالاتری در برآورد موجودی ساختمان، عناصر و مواد نشان داد و می‌تواند مبنایی مؤثر برای ممیزی‌های پیش از تخریب و تدوین راهبردهای اقتصاد چرخشی و کربن‌زدایی فراهم کند. نتایج مقاله (Marchesi & Tweed, 2021) نشان می‌دهد که نوآوری‌های اجتماعی می‌توانند با ترویج الگوهای جایگزین تولید و مصرف، نقش مکملی در ارتقای کارایی منابع و تسهیل پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی در شهرها و مسکن‌های اجتماعی ایفا کنند. در یزد، پتانسیل بالای انرژی خورشیدی (Khatibi et al, 2023) و پسماندهای صنعتی (نظیر ضایعات صنایع فولاد و کاشی) (Saffari darberazi et al, 2024) فرصت‌هایی برای تولید مصالح دایره‌ای و تأمین انرژی پاک در بخش مسکن فراهم می‌آورد. در مجموع، بر اساس ادبیات مرور شده، اقتصاد چرخشی با تکیه بر اصول بازچرخانی منابع، طراحی پایدار و به‌کارگیری فناوری‌های نوین، افقی نوین برای توسعه مسکن پایدار می‌گشاید. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که تلفیق راهبردهای اقتصاد چرخشی با سیاست‌های کارآمد و نوآوری‌های اجتماعی می‌تواند به کاهش ضایعات، حفظ منابع طبیعی و افزایش کارایی زیست‌محیطی بخش مسکن منجر شود. از سوی دیگر، بهره‌برداری از پتانسیل‌های بومی نظیر انرژی خورشیدی و بازیافت ضایعات صنعتی در مناطقی چون یزد، فرصت‌هایی ارزشمند برای تحقق این اهداف فراهم می‌کند. با این حال، استمرار چالش‌هایی چون ضعف زیرساخت‌های فناورانه، فقدان سیاست‌های مشوق و محدودیت‌های اجتماعی، ضرورت برنامه‌ریزی چندبعدی و سیاست‌گذاری هوشمندانه را برجسته می‌سازد. در نهایت، پیوند میان اقتصاد چرخشی و بخش مسکن می‌تواند به مثابه الگویی جامع برای ارتقای تاب‌آوری، پایداری و کیفیت زندگی در سکونتگاه‌های انسانی ایفای نقش کند.

فاکتورهای کلیدی و عدم قطعیت‌ها

شناسایی فاکتورهای کلیدی و عدم قطعیت‌ها در پژوهش آینده‌پژوهانه مسکن پایدار با رویکرد اقتصاد چرخشی در شهر یزد، گامی اساسی برای درک پویایی‌های سیستم و تدوین سناریوهای سیاستی است. عوامل کلیدی، متغیرهایی با تأثیرگذاری و تأثیرپذیری بالا هستند که مسیر

توسعه مسکن پایدار را شکل می‌دهند، در حالی که عدم قطعیت‌ها به عواملی اشاره دارند که آینده آن‌ها نامشخص بوده و می‌توانند سناریوهای متفاوتی را رقم بزنند. این عوامل از مرور نظام‌مند ادبیات، معیارهای استخراج‌شده در جدول ۱ و تحلیل محتوای پژوهش استخراج شده‌اند و در دسته‌بندی‌های محیط‌زیست، اجتماع، اقتصاد، فناوری، سیاست-مدیریت، و بومی-منطقه‌ای طبقه‌بندی شده‌اند. جدول زیر، این عوامل را به همراه منابع مربوطه ارائه می‌دهد تا مبنایی برای تحلیل اثرات متقابل و سناریونویسی در مراحل بعدی پژوهش فراهم آورد.

جدول ۲. عوامل کلیدی و عدم قطعیت‌ها

ابعاد	عدم قطعیت	عوامل کلیدی	کد
محیط‌زیست	میزان پذیرش فناوری‌های سبز در ساخت‌وساز	استفاده از انرژی خورشیدی در طراحی و بهره‌برداری	C01
	نرخ بازیافت مصالح ساختمانی	درصد مصالح بازیافتی در ساخت‌وساز	C02
	شدت اثرات تغییرات اقلیمی بر منابع	تطابق طراحی با اقلیم گرم و خشک یزد	C03
	کارایی مدیریت پسماند ساختمانی	میزان بازیافت نخاله‌های ساختمانی	C04
اجتماع	سطح مشارکت اجتماعی در پروژه‌های مسکن	میزان درگیر بودن ساکنان در تصمیم‌گیری	C05
	تغییرات در الگوهای مهاجرت شهری	توازن در توزیع مسکن و اشتغال	C06
	میزان دسترسی به خدمات عمومی	فاصله زمانی/مکانی تا خدمات عمومی	C07
	ارتباط مسکن با احساس امنیت و شادی	تأثیر مسکن بر سلامت روانی	C08
اقتصاد	پایداری مالی مدل‌های کسب‌وکار دایره‌ای	استفاده از سیستم محصول-خدمت (PSS)	C09
	نوسانات هزینه‌های ساخت‌وساز	نسبت هزینه مسکن به درآمد خانوار	C10
	نرخ اشتغال‌زایی پروژه‌های پایدار	فرصت‌های شغلی حاصل از پروژه‌های بازیافتی	C11
	سرعت پذیرش فناوری‌های دیجیتال	کاربرد هوش مصنوعی و دوقلوهای دیجیتال	C12
فناوری	دسترسی به زیرساخت‌های اطلاعاتی	پایگاه داده مصالح و ساختمان‌ها (DGIS ^۳ , HPKG)	C13
	کارایی سیستم‌های ممیزی پیش‌از تخریب	سیستم ممیزی مصالح پیش از تخریب	C14
سیاست-مدیریت	ثبات سیاست‌های تشویقی پایداری	مشوق‌های قانونی/مالی برای ساخت‌وساز پایدار	C15
	هماهنگی بین نهادهای شهری	نظام‌های مدیریتی و نهادسازی اقتصاد چرخشی	C16
	سطح سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های سبز	حمایت نهادی از توسعه اقتصاد چرخشی	C17
	میزان بهره‌برداری از منابع محلی	استفاده از ضایعات صنایع محلی (فولاد، کاشی)	C18
بومی-منطقه‌ای	تداوم استفاده از معماری بومی	استفاده از الگوهای معماری سنتی یزد	C19
	ظرفیت تولید انرژی خورشیدی	بهره‌گیری از پتانسیل انرژی خورشیدی یزد	C20

ارتباط عوامل ذکر شده در جدول ۲ با اقتصاد چرخشی در تأکید آن‌ها بر بازچرخانی منابع، کاهش ضایعات و بهینه‌سازی مصرف انرژی نهفته است. برای مثال، عواملی مانند استفاده از ضایعات صنایع محلی (فولاد و کاشی) و پایگاه داده مصالح، مستقیماً به اصول اقتصاد چرخشی، یعنی طراحی بدون زباله و استفاده مداوم از منابع، مرتبط هستند. همچنین، عوامل بومی-منطقه‌ای، مانند بهره‌گیری از معماری سنتی یزد و پتانسیل انرژی خورشیدی، با اقلیم کویری و ظرفیت‌های محلی شهر هم‌خوانی دارند و چارچوبی بومی برای پیاده‌سازی مسکن پایدار ارائه می‌دهند. از منظر اجتماعی، عواملی مانند مشارکت ساکنان و توازن مسکن-اشتغال، عدالت فضایی و کیفیت زندگی را تقویت کرده و پایداری اجتماعی را تضمین می‌کنند.

مطالعات پیشین در حوزه مسکن پایدار طی دهه‌های اخیر عمدتاً به‌صورت تک‌بعدی و متمرکز بر یکی از جنبه‌های فنی، اجتماعی یا اقتصادی صورت گرفته‌اند. این مطالعات غالباً با نگاهی خطی و ایستا به جریان منابع، صرفاً در پی بهینه‌سازی موضعی فرآیندهای ساخت، مصرف یا مدیریت بوده‌اند، بدون آن‌که پویایی‌های زمانی، پیچیدگی‌های سیستم‌های شهری و عدم قطعیت‌های مؤثر بر آینده را در نظر گیرند. در مقابل، پژوهش حاضر با ادغام سه‌گانه‌ی مفاهیم «مسکن پایدار»، «اقتصاد چرخشی» و «آینده‌پژوهی»، رویکردی نوین، نظام‌مند و نادر در ادبیات داخلی و بین‌المللی اتخاذ کرده است که قابلیت پاسخ‌گویی به چالش‌های میان‌رشته‌ای و بلندمدت را داراست. نوآوری اصلی این پژوهش در بازاندیشی مفهومی و روش‌شناختی نسبت به مسکن پایدار در بافت اقلیمی خاص شهر یزد نهفته است؛ شهری که از یک‌سو با ظرفیت‌های غنی در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر مواجه است و از سوی دیگر، با چالش‌های ساختاری در عدالت فضایی، تاب‌آوری شهری و بهره‌برداری پایدار از منابع روبروست. پژوهش حاضر با تلفیق اصول بنیادین اقتصاد چرخشی نظیر بازچرخانی مصالح، کاهش ضایعات ساختمانی، و بهره‌گیری از انرژی‌های پاک با رهیافت آینده‌نگر، کوشیده است تا از چارچوب‌های تحلیل ایستا فراتر رود و به شناسایی

پیشران‌های کلیدی و طراحی سناریوهایی بپردازد که قابلیت انطباق‌پذیری در شرایط عدم قطعیت را دارا هستند. مرور ادبیات موجود نشان می‌دهد که شکاف‌هایی اساسی در سه سطح مفهومی، روش‌شناختی و سیاست‌گذاری در این زمینه وجود دارد:

- سطح مفهومی: فقدان چارچوب‌های نظری جامع برای پیوند نظام‌مند میان اقتصاد چرخشی و مسکن پایدار، به‌ویژه در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک.

- سطح روش‌شناختی: کم‌توجهی به بهره‌گیری از روش‌های آینده‌پژوهانه و ابزارهای تحلیل سیستمی تأثیرات متقابل، برای شناسایی عوامل کلیدی و هم‌افزا در تحقق پایداری مسکن.

- سطح سیاست‌گذاری: نبود مدل‌های بومی و داده‌محور برای سیاست‌گذاری در راستای استفاده بهینه از ظرفیت‌های محلی و فناوریانه، با تأکید بر تاب‌آوری، مشارکت ذی‌نفعان و عدالت فضایی.

در راستای پاسخ‌گویی به این خلأها، پژوهش حاضر با به‌کارگیری ترکیبی از روش دلفی، تحلیل ساختاری در نرم‌افزار میک‌مک و تحلیل حساسیت یافته‌ها با درنظر گرفتن پویایی‌های محیطی و سیستمی در نرم‌افزار متلب، به شناسایی و تحلیل پیشران‌هایی می‌پردازد که نه تنها دارای بیشترین قدرت تأثیرگذاری بر آینده مسکن پایدار در شهر یزد هستند، بلکه از قابلیت مداخله‌پذیری بالا در سطوح مختلف سیاست‌گذاری شهری و منطقه‌ای برخوردارند. این رویکرد تحلیلی، ضمن در نظر گرفتن پیچیدگی‌های سیستمی و شرایط عدم قطعیت، امکان استخراج راهبردهایی چندبعدی و منعطف را فراهم می‌آورد که در قالب سناریوهای گوناگون آینده قابلیت اجرا دارند. در نهایت، این پژوهش با ارائه مدلی بومی‌سازی شده برای شهر یزد و پیشنهاد سازوکارهای سیاست‌گذاری مشارکتی و مبتنی بر شواهد، سهمی مؤثر در توسعه نظری ادبیات بین‌رشته‌ای «مسکن پایدار-اقتصاد چرخشی-آینده‌پژوهی» ایفا می‌کند و می‌تواند مبنایی برای الگوبرداری در سایر شهرهای دارای شرایط مشابه در ایران و کشورهای در حال توسعه باشد.

پیشینه پژوهش

شهر یزد، مرکز استان یزد، واقع در فلات مرکزی ایران با مختصات جغرافیایی ۴۶ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۱۵ درجه و ۳۲ دقیقه عرض شمالی و ۱۵ درجه و ۵۳ دقیقه تا ۴۰ درجه و ۵۴ دقیقه طول شرقی، به‌عنوان محدوده مورد مطالعه این پژوهش انتخاب شده است. این شهر دارای بافت تاریخی ثبت جهانی یونسکو (BELADI, 2022)، اقلیم کویری و پتانسیل بسیار بالای انرژی خورشیدی است (Dehghan, 2011; Sadeghi, Larimian & Molabashi, 2012). انتخاب یزد به سه دلیل اصلی صورت گرفت:

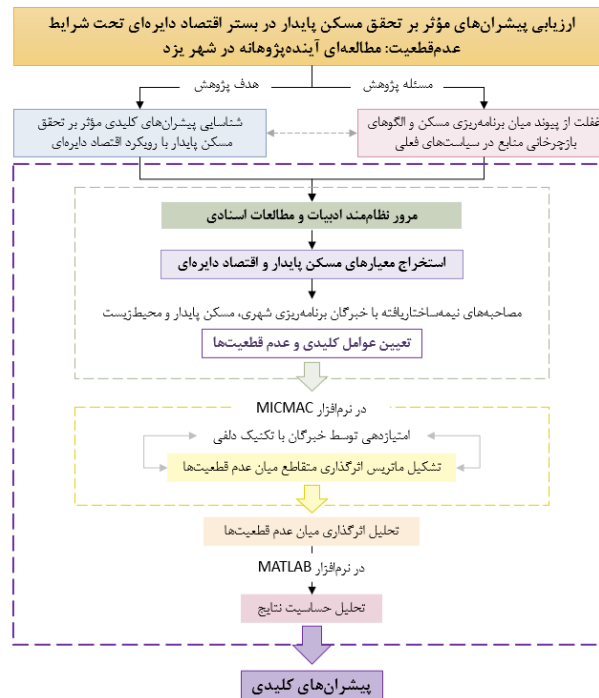
- رشد سریع جمعیت شهری ناشی از توسعه صنایع فولاد، کاشی و نساجی و در نتیجه فشار شدید بر منابع محدود آب و مصالح ساختمانی (Najarzadeh & Shahidi, 2015).

- محدودیت‌های شدید اقلیم کویری که بهره‌گیری از انرژی خورشیدی و رویکردهای ساخت‌وساز چرخشی را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد (Dehghan, 2011; Sadeghi et al, 2012).

- وجود نابرابری‌های فضایی در دسترسی به مسکن مناسب، فرسودگی بافت شهری، ناکارآمدی در بازچرخانی مصالح و وابستگی به روش‌های سنتی ساخت‌وساز.

این ویژگی‌ها در کنار ظرفیت‌های صنعتی، دانشگاهی و انرژی خورشیدی، یزد را به بستری ایده‌آل و آزمایشگاهی طبیعی برای مطالعه و پیاده‌سازی مسکن پایدار با رویکرد اقتصاد چرخشی تبدیل کرده است.

این پژوهش با هدف شناسایی و تحلیل پیشران‌های کلیدی مؤثر بر توسعه مسکن پایدار با رویکرد اقتصاد چرخشی در شهر یزد انجام شده است. برای پاسخگویی به سوال اصلی تحقیق، از رویکرد آینده‌پژوهی بهره گرفته شده است؛ رویکردی که یکی از ابزارهای کارآمد در مواجهه با پیچیدگی‌ها، تحولات غیرخطی و عدم قطعیت‌های محیطی در فرآیندهای برنامه‌ریزی شهری به شمار می‌آید. در راستای تحقق اهداف پژوهش، روش تحلیل ساختاری-تأثیر متقابل به عنوان چارچوب اصلی تحلیل انتخاب شده است. این روش با استفاده از نرم‌افزار میک‌مک^۱، امکان بررسی و تحلیل روابط علی و معلولی میان متغیرهای مؤثر را فراهم می‌آورد و ساختار نظام مورد مطالعه را شفاف می‌سازد. فرآیند انجام پژوهش در ادامه آورده شده است.



شکل ۱. فلوچارت فرآیند پژوهش

با توجه به شکل ۱ این پژوهش برای شناسایی پیشران‌های کلیدی مسکن پایدار با رویکرد اقتصاد چرخشی در یزد از روش آینده‌پژوهی و تحلیل ساختاری-تأثیر متقابل با نرم‌افزار میک‌مک استفاده کرد. ابتدا، معیارهای مرتبط از طریق مرور نظام‌مند منابع علمی و اسناد راهبردی استخراج شد. سپس، با مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با خبرگان برنامه‌ریزی شهری، مسکن پایدار و محیط‌زیست، عوامل کلیدی و عدم قطعیت‌ها شناسایی شدند. در ادامه، با تکنیک دلفی، ماتریس اثرگذاری متقاطع تشکیل شد و خبرگان اثرگذاری مستقیم هر زوج معیار را (۰: بدون اثر تا ۳: قوی) امتیازدهی کردند. داده‌ها در میک‌مک تحلیل شده و پیشران‌های کلیدی، مستقل، وابسته و تنظیم‌کننده از طریق ماتریس‌های تأثیر-تأثر و نقشه‌های اثرگذاری طبقه‌بندی شدند. برای ارزیابی پایداری پیشران‌ها تحت عدم قطعیت، تحلیل حساسیت ۱ انجام شد. در این پژوهش از روش تحلیل حساسیت محلی (Local Sensitivity Analysis یا One-at-a-Time) استفاده شده است. به این معنا که برای هر یک از ۲۰ شاخص به صورت جداگانه و مستقل، چهار متغیر زیر همزمان $\pm 5\%$ و $\pm 10\%$ اختلال داده شد:

- تأثیرگذاری مستقیم^۲
- تأثیرپذیری مستقیم^۳
- تأثیرگذاری غیرمستقیم^۴
- تأثیرپذیری غیرمستقیم^۵

بنابراین در مجموع ۱۶ سناریوی اختلال ($\pm 5\%$ و ۸ سناریو برای $\pm 10\%$) برای هر شاخص اجرا گردید. در هر سناریو، تنها مقدار مربوط به همان شاخص خاص تغییر داده شد و مقادیر سایر ۱۹ شاخص ثابت باقی ماند. سپس رتبه‌بندی جدید شاخص‌ها در هر یک از این سناریوها محاسبه و با رتبه‌بندی اولیه مقایسه شد. میزان تغییر رتبه هر شاخص (Rank Change) به عنوان معیار حساسیت آن در نظر گرفته شد. این روش امکان شناسایی شاخص‌هایی را فراهم می‌آورد که حتی با تغییرات جزئی در ورودی‌های میک‌مک، رتبه آن‌ها به شدت جابه‌جا می‌شود (شاخص‌های حساس) یا تقریباً ثابت می‌ماند (شاخص‌های پایدار). تغییرات رتبه‌بندی با نرم افزار متلب محاسبه و در جداول و نمودارهای میله‌ای (شکل ۶) ارائه شد، که شاخص‌های پایدار (تغییرات ۰-۳) و حساس (تغییرات > 10) را مشخص کرد. این فرایند، چارچوبی برای تدوین سناریوهای سیاستی انطباق‌پذیر در یزد فراهم آورد. جامعه آماری پژوهش را خبرگان حوزه‌های برنامه‌ریزی شهری، مسکن پایدار،

1. Sensitivity analysis
2. Direct Influence
3. Direct Dependence
4. Indirect Influence
5. Indirect Dependence

اقتصاد چرخشی و آینده‌پژوهی شهری تشکیل می‌دهند. با استفاده از روش نمونه‌گیری هدفمند، ۱۵ نفر بر اساس معیارهای روبه رو انتخاب شدند: داشتن مدرک کارشناسی ارشد یا دکتری در رشته‌های مرتبط، سابقه پژوهشی یا اجرایی معتبر در زمینه مسکن پایدار، اقتصاد چرخشی یا آینده‌پژوهی، آشنایی با تحلیل ساختاری و برنامه‌ریزی راهبردی و تمایل به همکاری. پس از اخذ رضایت‌نامه کتبی، نهایتاً ۱۲ نفر مطابق جدول ۳ در تکمیل ماتریس تأثیرات متقابل مشارکت فعال داشتند. ترکیب پنل شامل اساتید دانشگاه، مدیران اجرایی شهری و مشاوران پروژه‌های پایدار بود تا از تنوع دیدگاه و کاهش سوگیری اطمینان حاصل شود. همچنین پیش از توزیع نهایی، ماتریس در یک مرحله آزمون اولیه با حضور سه نفر از خبرگان بازبینی و اصلاح گردید. داده‌های نهایی حاصل از ماتریس تکمیل شده توسط این ۱۲ خبره، مبنای تحلیل ساختاری با نرم‌افزار MICMAC قرار گرفت.

جدول ۳. مشخصات تخصصی و سوابق خبرگان مشارکت‌کننده در پژوهش

کد خبره	حوزه تخصصی	سابقه کاری / علمی	نقش در پژوهش
۱خ	برنامه‌ریزی شهری	۱۵ سال تجربه اجرایی و پژوهشی در حوزه برنامه‌ریزی	تکمیل ماتریس اثرگذاری و ارزیابی ارتباطات متقاطع
۲خ	آینده‌پژوهی شهری	۱۰ سال فعالیت پژوهشی و تدریس	تحلیل روابط میان پیشران‌ها
۳خ	اقتصاد	۱۲ سال سابقه علمی و مشاوره‌ای	ارزیابی شاخص‌های مرتبط با اقتصاد چرخشی
۴خ	برنامه‌ریزی شهری- مسکن	۲۰ سال سابقه پژوهشی و تدریس	تکمیل فرم‌های ارزیابی و بازبینی شاخص‌ها
۵خ	مدیریت شهری	۱۶ سال سابقه مدیریتی	بررسی انطباق نتایج با سیاست‌های شهری
۶خ	برنامه‌ریزی منطقه‌ای مرتبط با توسعه پایدار	۱۰ سال سابقه پژوهشی	مشارکت در تحلیل اثرگذاری-اثرپذیری
۷خ	مشاوره پروژه‌های شهری مرتبط با مسکن و پایداری	بیش از ۱۰ سال سابقه اجرایی	مشارکت فعال در تکمیل ماتریس و پیشنهاد اصلاحات
۸خ	محیط‌زیست و توسعه پایدار	۱۴ سال سابقه پژوهشی	تحلیل مؤلفه‌های زیست‌محیطی در ماتریس
۹خ	شهرسازی	۱۰ سال تجربه علمی و اجرایی در پروژه‌های حوزه شهری	تحلیل روابط میان پیشران‌ها
۱۰خ	نماینده ساکنین و جامعه محلی شهر یزد	فعال اجتماعی و معتمد یکی از محلات یزد با سابقه مشارکت در طرح‌های توسعه محلی	ارائه دیدگاه‌های مبتنی بر تجربه زیسته، ارزیابی واقع‌گرایانه شاخص‌ها و تأیید کاربردپذیری نتایج در بافت شهری یزد
۱۱خ	برنامه‌ریزی منطقه‌ای	۱۴ سال سابقه اجرایی و پژوهشی	تکمیل فرم و پایش ارتباطات متقاطع
۱۲خ	شهرسازی	۷ سال سابقه آموزشی/پژوهشی	اعتبارسنجی ساختار ماتریس و امتیازدهی

یافته‌ها و بحث

تحلیل اثرات متقابل با میک‌مک

با توجه به ماهیت آینده‌نگرانه این پژوهش و تمرکز آن بر شرایط عدم قطعیت، تحلیل ساختاری صرفاً معطوف به شاخص‌هایی بوده است که در زمره مؤلفه‌های نامطمئن قرار می‌گیرند. در این راستا، از روش تحلیل اثرات متقابل با استفاده از نرم‌افزار MICMAC برای ترسیم شبکه ارتباطات و تعاملات میان متغیرهای کلیدی در نظام مسکن پایدار مبتنی بر اقتصاد چرخشی بهره گرفته شد. بر اساس شاخص‌های منتخب، ماتریسی با ابعاد ۲۰×۲۰ طراحی گردید که در آن کلیه روابط دوسویه بین شاخص‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. این ارزیابی با نظر خبرگان حوزه‌های مسکن، برنامه‌ریزی شهری، محیط‌زیست و اقتصاد چرخشی انجام شده و شدت اثرگذاری شاخص‌ها بر اساس طیف چهاردرجه‌ای (صفر: فاقد اثر، یک: اثر ضعیف، دو: اثر متوسط و سه: اثر قوی) تعیین شد. در مجموع، از میان ۴۰۰ رابطه ممکن، تعداد ۲۸۴ رابطه دارای نوعی اثر بوده‌اند؛ به‌گونه‌ای که ۱۱۶ رابطه فاقد اثر مستقیم، ۹۹ رابطه با اثر ضعیف، ۹۰ رابطه با اثر متوسط و ۹۵ رابطه با اثر قوی شناسایی شد. بر این اساس، درجه پرشدگی ماتریس برابر با ۷۱ درصد محاسبه گردید که نشان‌دهنده تراکم بالا و پیچیدگی قابل‌توجه روابط میان

شاخص‌های منتخب است. این امر بیانگر آن است که اغلب متغیرهای نامطمئن، به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر یکدیگر اثرگذارند و تحلیل تصمیم‌گیری در مورد آن‌ها نیازمند بررسی چندسطحی است.

در ادامه، نقشه‌های اثرگذاری-اثرپذیری (شکل ۲) نشان دادند که شاخص‌ها در چهار ناحیه مختلف قرار می‌گیرند که در این پژوهش برای افزایش خوانایی، هر ناحیه با رنگ مشخص شده است:

• **ناحیه محرک/مستقل (نارنجی):** شاخص‌هایی با قدرت نفوذ بالا و وابستگی اندک. در این ناحیه، شاخص‌هایی چون (C02)، (C04) و (C08) قرار می‌گیرند که نقش هدایت‌کننده داشته و تغییر در آن‌ها سایر متغیرها را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد.

• **ناحیه وابسته (آبی):** شاخص‌هایی با قدرت نفوذ کم و وابستگی بالا. شاخص‌هایی مانند (C01)، (C16) و (C20) در این ناحیه جای دارند و عمدتاً پیامد تغییرات سایر عوامل هستند.

• **ناحیه پیوندی (قرمز):** شاخص‌هایی که دارای نفوذ و وابستگی هم‌زمان بالا هستند و از حساسیت استراتژیک برخوردارند. این ناحیه معمولاً متغیرهایی را شامل می‌شود که کوچک‌ترین تغییر در آن‌ها می‌تواند کل سیستم را دگرگون سازد.

• **ناحیه خودگردان (سبز):** شاخص‌هایی با نفوذ و وابستگی پایین که نقش حاشیه‌ای‌تری در ساختار کلان سیستم دارند.

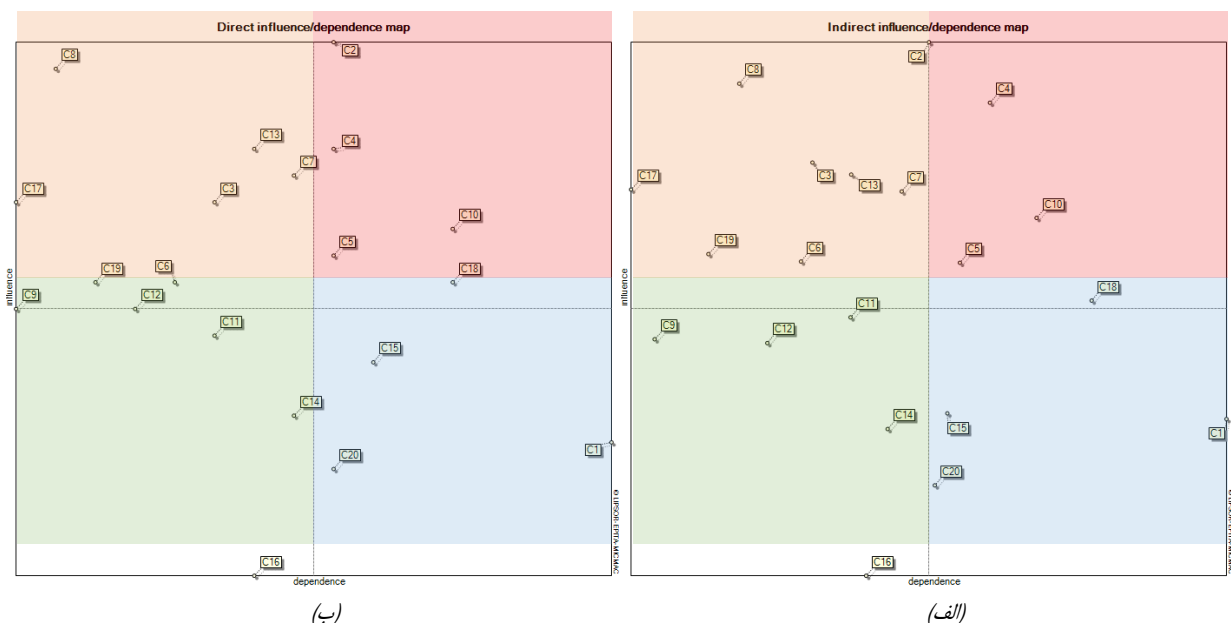
در بُعد اثرگذاری مستقیم، شاخص‌هایی همچون (C02)، (C04) و (C08) بیشترین نقش را در هدایت سایر متغیرها دارند. در مقابل، شاخص‌هایی مانند (C01)، (C16) و (C20)، بیشترین میزان اثرپذیری را داشته‌اند؛ به‌طوری‌که تغییر در سایر شاخص‌ها به‌طور مستقیم و غیرمستقیم آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در سطح ابعاد، شاخص‌های محیط‌زیستی و اجتماعی بیشترین تمرکز را در میان متغیرهای کلیدی داشته‌اند. شاخص‌هایی نظیر پسماند، بازیافت، تغییرات اقلیمی و احساس امنیت، در زمره عناصر استراتژیک شناسایی شده‌اند، در حالی‌که شاخص‌های حوزه‌های مدیریتی و فناوری عمدتاً در جایگاه متغیرهای اثرپذیر قرار گرفته‌اند. در مجموع، با توجه به توازن عددی میان میزان کل اثرگذاری و اثرپذیری (هر یک معادل ۵۶۴ امتیاز)، می‌توان ساختار سیستم را از نظر آماری متعادل ارزیابی کرد (جدول ۴): با این حال، شدت تعاملات میان شاخص‌ها نشان‌دهنده یک سیستم به‌شدت درهم‌تنیده و پیچیده است که طراحی سناریوهای آینده‌محور را ضروری می‌سازد. این مرحله از تحلیل، مبنای تعیین متغیرهای کلیدی و تدوین سناریوهای راهبردی برای ارتقاء تاب‌آوری نظام مسکن پایدار در شهر یزد خواهد بود.

جدول ۴. میزان اثرگذاری و اثرپذیری مستقیم و غیرمستقیم شاخص‌ها

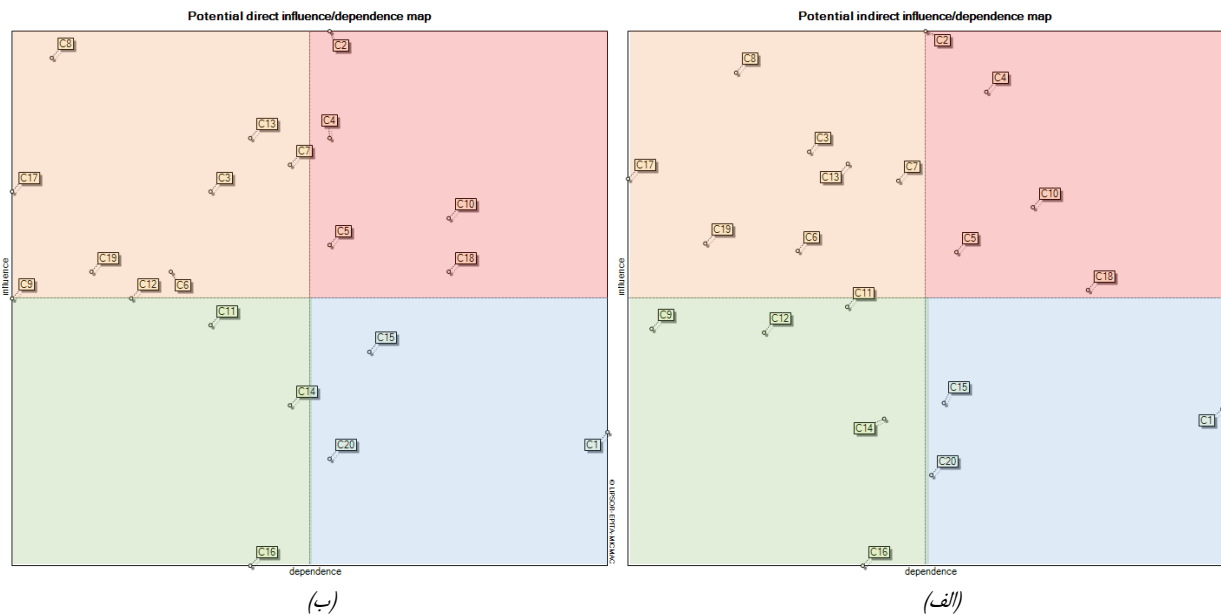
ابعاد	کد	معیارهای عدم قطعیت	تأثیرات مستقیم		تأثیرات غیرمستقیم	
			تأثیرگذاری	تأثیرپذیری	تأثیرگذاری	تأثیرپذیری
محیط‌زیست	C01	میزان پذیرش فناوری‌های سبز در ساخت‌وساز	۲۲	۳۷	۱۸۵۰۷	۲۹۲۷۴
	C02	نرخ بازیافت مصالح ساختمانی	۳۷	۳۰	۲۸۳۷۸	۲۳۲۰۷
	C03	شدت اثرات تغییرات اقلیمی بر منابع	۳۱	۲۷	۲۵۲۲۵	۲۰۸۲۹
	C04	کارایی مدیریت پسماند ساختمانی	۳۳	۳۰	۲۶۷۹۲	۲۴۴۴۹
	C05	سطح مشارکت اجتماعی در پروژه‌های مسکن	۲۹	۳۰	۲۲۶۰۱	۲۳۸۳۷
اجتماع	C06	تغییرات در الگوهای مهاجرت شهری	۲۸	۲۶	۲۲۶۳۳	۲۰۵۹۶
	C07	میزان دسترسی به خدمات عمومی	۳۲	۲۹	۲۴۴۶۸	۲۲۶۵۰
	C08	ارتباط مسکن با احساس امنیت و شادی	۳۶	۲۳	۲۷۲۹۲	۱۹۳۳۷
اقتصاد	C09	پایداری مالی مدل‌های کسب‌وکار دایره‌ای	۲۷	۲۲	۲۰۵۹۷	۱۷۶۱۱
	C10	نوسانات هزینه‌های ساخت‌وساز	۳۰	۳۳	۲۳۷۷۵	۲۵۴۰۰
	C11	نرخ اشتغال‌زایی پروژه‌های پایدار	۲۶	۲۷	۲۱۱۷۱	۲۱۶۰۶
	C12	سرعت پذیرش فناوری‌های دیجیتال	۲۷	۲۵	۲۰۴۹۷	۱۹۹۰۹
فناوری	C13	دسترسی به زیرساخت‌های اطلاعاتی	۳۳	۲۸	۲۴۹۱۱	۲۱۶۲۰
	C14	کارایی سیستم‌های ممیزی پیش‌ازتخریب	۲۳	۲۹	۱۸۲۴۶	۲۲۳۶۳
سیاست-مدیریت	C15	ثبات سیاست‌های تشویقی پایداری	۲۵	۳۱	۱۸۶۵۷	۲۳۵۸۱
	C16	هماهنگی بین نهادهای شهری	۱۷	۲۸	۱۴۴۰۳	۲۱۹۲۵
	C17	سطح سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های سبز	۳۱	۲۲	۲۴۵۱۹	۱۷۱۳۰

ابعاد	کد	معیارهای عدم قطعیت	تأثیرات مستقیم		تأثیرات غیرمستقیم	
			تأثیرگذاری	تأثیرپذیری	تأثیرگذاری	تأثیرپذیری
بومی-منطقه‌ای	C ₁₈	میزان بهره‌برداری از منابع محلی	۲۸	۳۳	۲۱۶۱۰	۲۶۵۲۴
	C ₁₉	تداوم استفاده از معماری بومی	۲۸	۲۴	۲۲۸۲۸	۱۸۷۰۷
	C ₂₀	ظرفیت تولید انرژی خورشیدی	۲۱	۳۰	۱۶۷۷۰	۲۳۳۲۵
مجموع			۵۶۴	۵۶۴	۵۶۴	۵۶۴

با توجه به شکل ۲ و ۳ در راستای تحلیل ساختاری شاخص‌های منتخب تحت شرایط عدم قطعیت، نقشه‌های اثرگذاری-اثرپذیری مستقیم، غیرمستقیم و بالقوه با بهره‌گیری از نرم‌افزار میک‌مک استخراج و تفسیر شدند. نقشه اثرگذاری-اثرپذیری مستقیم نشان داد که شاخص‌هایی نظیر (C₀₂)، (C₀₄) و (C₀₈) دارای بالاترین میزان اثرگذاری مستقیم هستند و در ناحیه فعال نقشه قرار دارند. این شاخص‌ها به‌عنوان عناصر کلیدی و اثرگذار در ساختار سیستم شناخته می‌شوند که می‌توانند بر سایر متغیرها تأثیرگذار باشند. در مقابل، متغیرهایی نظیر (C₀₁)، (C₁₆) و (C₂₀) در ناحیه‌ای با اثرپذیری بالا و اثرگذاری پایین قرار گرفته‌اند. این موقعیت بیانگر آن است که این شاخص‌ها به‌شدت تحت تأثیر سایر متغیرهای سیستم هستند و نقش کش‌پذیر در ساختار دارند. نقشه غیرمستقیم نیز بر پایداری موقعیت متغیرهای کلیدی تأکید دارد؛ به‌گونه‌ای که شاخص‌های C₀₂، C₀₄ و C₀₈ نه تنها در بعد مستقیم، بلکه در روابط غیرمستقیم نیز موقعیتی تأثیرگذار دارند. این وضعیت نشان‌دهنده نفوذ ساختاری این متغیرها در شبکه تعاملات سیستم است. در دو نقشه بالقوه (مربوط به اثرگذاری مستقیم و غیرمستقیم)، میزان پراکندگی شاخص‌ها افزایش یافته است که خود مؤید پیچیدگی ذاتی سیستم و پویایی آن در مواجهه با آینده‌های محتمل است. در این نمودارها، علاوه بر شاخص‌های پیش‌گفته، برخی دیگر از متغیرها نظیر (C₀₅) و (C₁₀) نیز به‌تدریج به ناحیه میانی نقشه نزدیک شده‌اند که می‌تواند از نقش آفرینی احتمالی آن‌ها در سناریوهای آینده حکایت داشته باشد.

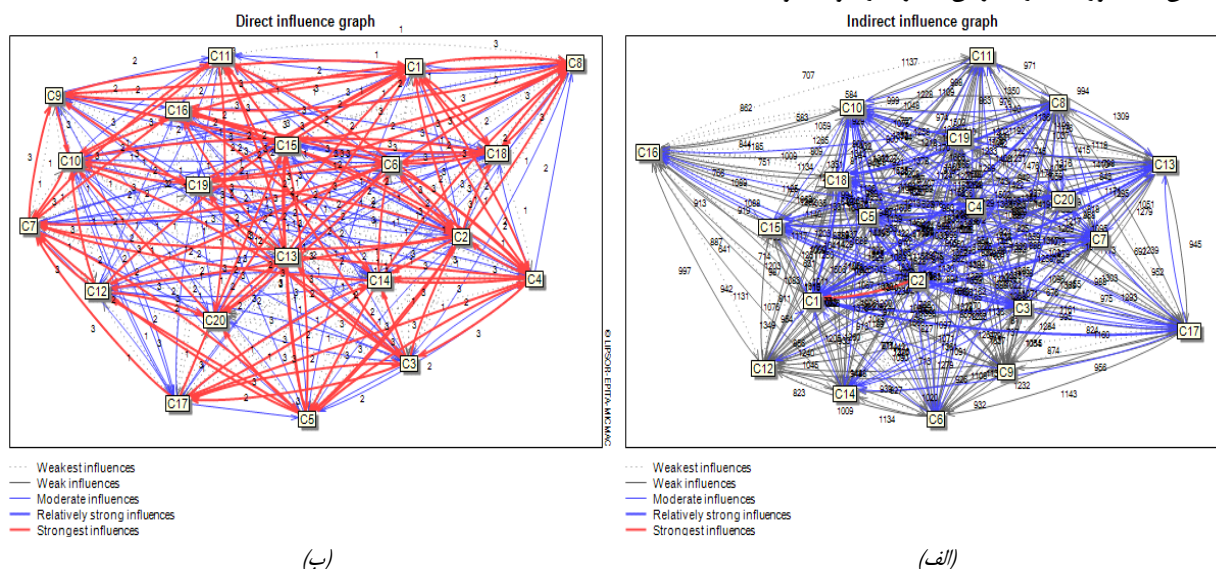


شکل ۲. نقشه‌های اثرگذاری/اثرپذیری بالفعل (الف) اثرگذاری/اثرپذیری غیرمستقیم. (ب) اثرگذاری/اثرپذیری مستقیم.

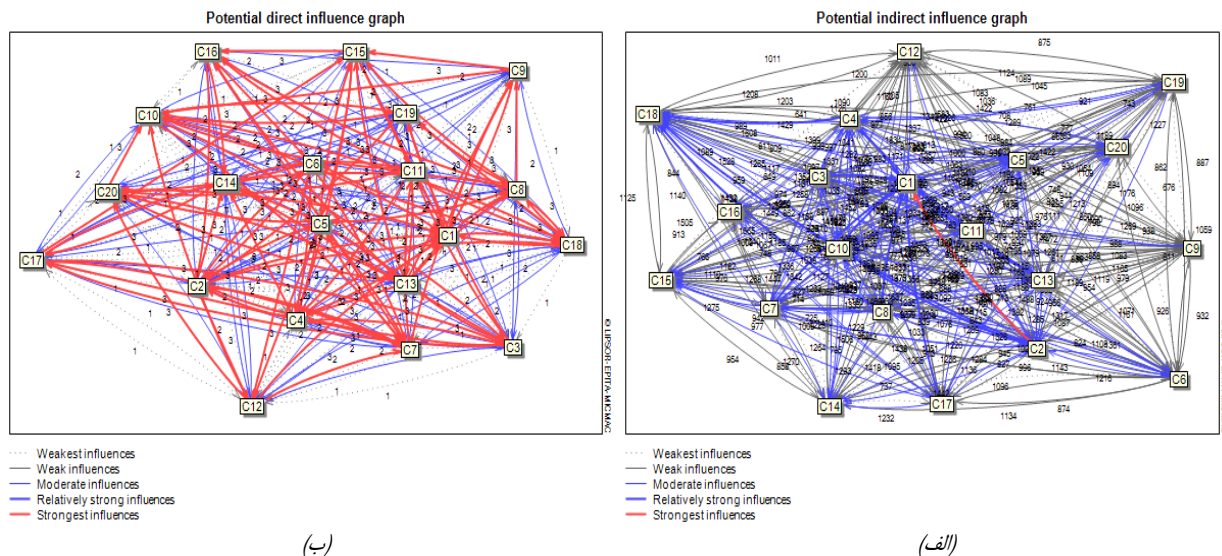


شکل ۳. نقشه‌های اثرگذاری/اثرپذیری بالقوه (الف) اثرگذاری/اثرپذیری غیر مستقیم. (ب) اثرگذاری/اثرپذیری مستقیم.

برای تکمیل تحلیل ساختاری و درک عمیق‌تر از تعاملات میان شاخص‌های کلیدی در نظام مسکن پایدار مبتنی بر اقتصاد چرخشی، چهار گراف اصلی (شکل ۴ و ۵) بر اساس خروجی نرم‌افزار میک‌مک ترسیم و مورد بررسی قرار گرفت. این گراف‌ها شامل روابط مستقیم، غیرمستقیم، بالقوه مستقیم و بالقوه غیرمستقیم میان شاخص‌ها هستند و هریک، تصویری از پویایی و پیچیدگی درون سیستمی را ارائه می‌دهند. گراف اثرگذاری مستقیم نشان‌دهنده روابط علی صریح میان شاخص‌هاست و تراکم بالای خطوط قرمز در این گراف، بیانگر وجود تعداد زیادی از اثرگذاری‌های قوی میان متغیرهاست. تمرکز عمده این روابط در ناحیه مرکزی گراف، حکایت از وجود متغیرهای پیشران دارد که نقش هدایت‌گر در سیستم ایفا می‌کنند. در این میان، شاخص‌هایی نظیر (C02)، (C04) و (C08) به‌عنوان اثرگذارترین متغیرهای مستقیم شناسایی شده‌اند. در گراف اثرگذاری غیرمستقیم، روابط پیچیده‌تری میان شاخص‌ها آشکار شده که بعضاً از طریق زنجیره‌ای از متغیرهای میانی منتقل می‌شود. غالب بودن خطوط آبی‌رنگ، بیانگر شدت بالای تأثیرات غیرمستقیم در سیستم است. شاخص‌هایی چون پذیرش فناوری‌های سبز (C01)، هماهنگی نهادی (C16) و ظرفیت انرژی خورشیدی (C20) بیشترین اثرپذیری را در این بخش دارا هستند؛ به‌طوری‌که تغییر در سایر شاخص‌ها به‌طور معناداری بر آن‌ها اثرگذار خواهد بود.



شکل ۴. گراف‌های اثرگذاری/اثرپذیری بالفعل (الف) اثرگذاری/اثرپذیری غیر مستقیم. (ب) اثرگذاری/اثرپذیری مستقیم.

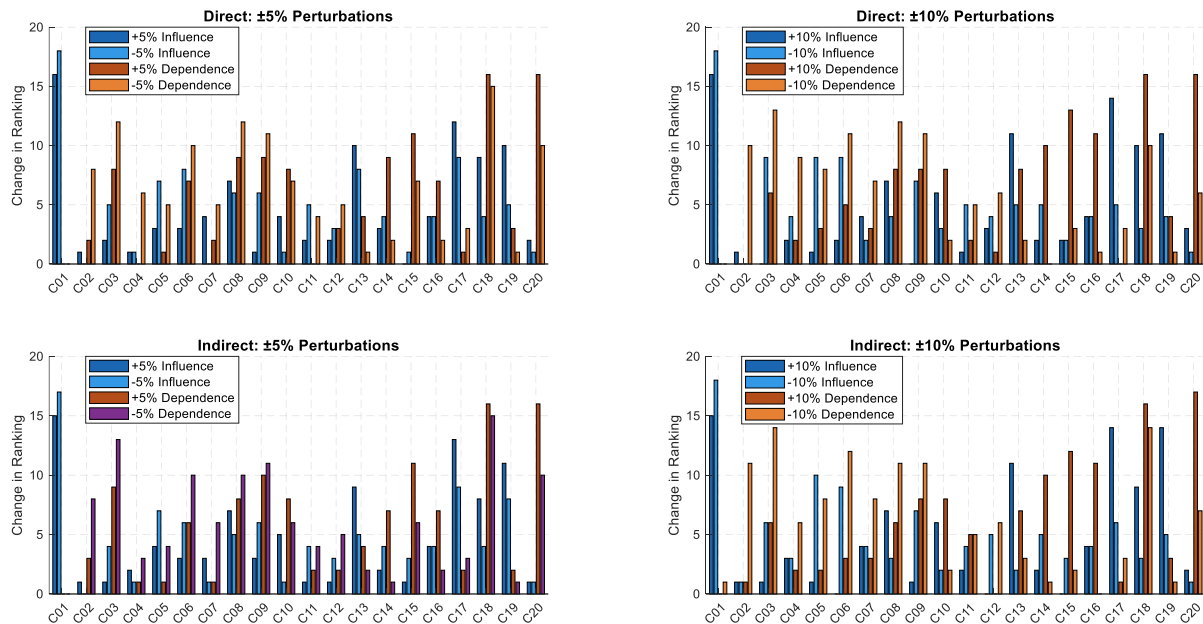


شکل ۵. گراف‌های اثرگذاری/اثرپذیری بالقوه (الف) اثرگذاری/اثرپذیری غیر مستقیم. (ب) اثرگذاری/اثرپذیری مستقیم.

تحلیل گراف اثرگذاری بالقوه مستقیم نیز ساختاری مشابه با گراف مستقیم دارد، با این تفاوت که در اینجا روابطی مدنظر قرار گرفته که در حال حاضر ممکن است غیرفعال باشند اما در آینده نزدیک فعال شده و بر سیستم اثرگذار شوند. این گراف نشان می‌دهد که تعداد قابل توجهی از روابط پنهان در سیستم وجود دارد که می‌توانند در مواجهه با تغییر شرایط فعال گردند. از این رو، برنامه‌ریزی برای آینده نیازمند توجه به این پویایی درونی است. در نهایت، گراف اثرگذاری بالقوه غیرمستقیم، پیچیده‌ترین نمودار میان چهار گراف محسوب می‌شود. در این گراف، شبکه‌ای وسیع از اثرات غیرمستقیم احتمالی مشاهده می‌شود که با خطوط خاکستری و آبی پررنگ نمایش داده شده‌اند. این گراف بیانگر آن است که در سطح پنهان‌تر، وابستگی متقابل بسیار زیادی میان متغیرها وجود دارد و کوچک‌ترین تغییر در برخی شاخص‌ها می‌تواند به صورت زنجیروار کل سیستم را دستخوش دگرگونی کند. این وضعیت نشان‌دهنده ماهیت بشدت سیستم‌مند و غیرخطی نظام مسکن در بستر اقتصاد چرخشی است. در مجموع، تحلیل این گراف‌ها مؤید آن است که ساختار حاکم بر روابط شاخص‌ها، ساختاری پیچیده، پویا و متراکم است. شاخص‌های محیط‌زیستی و اجتماعی همچون بازیافت، پسماند، تغییرات اقلیمی و کیفیت زندگی، در زمره متغیرهای پیشران و مؤثر در سیستم قرار دارند، در حالی که شاخص‌های فناوری و مدیریتی بیشتر در معرض اثرپذیری هستند. بنابراین، تحلیل‌های آینده‌پژوهانه و سناریونویسی برای تاب‌آوری و پایداری مسکن در شهر یزد باید با در نظر گرفتن این سطح از پیچیدگی و عدم قطعیت انجام پذیرد.

تحلیل حساسیت عدم قطعیت‌ها

در چارچوب مطالعه آینده‌پژوهانه حاضر که به شناسایی و تحلیل پیشران‌های مؤثر بر تحقق مسکن پایدار در یزد با رویکرد اقتصاد چرخشی می‌پردازد، تحلیل حساسیت به عنوان ابزاری کلیدی برای ارزیابی پایداری پیشران‌های شناسایی شده تحت شرایط عدم قطعیت مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به پیچیدگی سیستم و نرخ پرشدگی بالای ماتریس تأثیرات متقاطع (۷۱٪) که در تحلیل ساختاری با نرم‌افزار میک‌مک به دست آمد، این تحلیل برای درک تأثیر تغییرات کوچک بر رتبه‌بندی شاخص‌ها و ارائه توصیه‌های سیاستی دقیق ضروری بود. هدف این بخش، بررسی پایداری و حساسیت پیشران‌های کلیدی و ارائه بینش‌هایی برای سیاست‌گذاری مؤثر در راستای پایداری شهری است. تحلیل حساسیت با اعمال اختلالات کوچک ($\pm 5\%$ و $\pm 10\%$) به مقادیر تأثیرگذاری و تأثیرپذیری مستقیم و غیرمستقیم ۲۰ شاخص انجام شد. این شاخص‌ها که از تحلیل میک‌مک استخراج شده بودند، شامل عواملی نظیر نرخ بازیافت مصالح ساختمانی (C02)، کارایی مدیریت پسماند ساختمان (C04) و ظرفیت تولید انرژی خورشیدی (C20) بودند. تغییرات رتبه‌بندی ناشی از این اختلالات با استفاده از کد متلب محاسبه و در قالب جدول و نمودارهای میله‌ای شکل ۶ ارائه شد. این روش امکان شناسایی شاخص‌های پایدار و حساس را فراهم آورد و به درک بهتر پویایی‌های سیستم کمک کرد. با توجه به شکل ۶، نتایج تحلیل حساسیت، پایداری و حساسیت شاخص‌ها به شرح است.



شکل ۶. تجزیه و تحلیل حساسیت: تغییرات میزان اثرگذاری/اثرپذیری برای شاخص های میک مک

شاخص های پایدار: شاخص هایی نظیر نرخ بازافت مصالح ساختمانی (C02) و کارایی مدیریت پسماند ساختمانی (C04) پایداری بالایی را از خود نشان دادند. این شاخص ها با تغییرات رتبه بندی اندک (۰ تا ۳ در اکثر موارد) در برابر اختلالات مقاوم بودند که با تأثیرگذاری اولیه بالای آن ها (۳۷ و ۳۳ در تأثیرگذاری مستقیم، ۲۸۳۷۸ و ۲۶۷۹۲ در تأثیرگذاری غیرمستقیم) همخوانی دارد. همچنین، ارتباط مسکن با احساس امنیت و شادی (C08) با تغییرات رتبه بندی ۳ تا ۷، پایداری نسبی را نشان داد که با تأثیرگذاری اولیه بالای آن (۳۶ در تأثیرگذاری مستقیم و ۲۷۲۹۲ در تأثیرگذاری غیرمستقیم) سازگار است. این پایداری، نقش محوری این شاخص ها را به عنوان پیشران های کلیدی در تحقق اصول اقتصاد چرخشی (بازچرخانی منابع و کاهش ضایعات) و پایداری اجتماعی تأیید می کند.

شاخص های حساس: میزان پذیرش فناوری های سبز در ساخت و ساز (C01) بالاترین حساسیت را با تغییرات رتبه بندی ۱۶ تا ۱۸ در تأثیرگذاری مستقیم و غیرمستقیم ($\pm 5\%$ و $\pm 10\%$) نشان داد. این حساسیت با تأثیرپذیری اولیه بالای آن (۳۷ در تأثیرپذیری مستقیم و ۲۹۲۷۴ در تأثیرپذیری غیرمستقیم) همخوانی دارد و نشان دهنده وابستگی زیاد این شاخص به تغییرات سیستمی است. به طور مشابه، میزان بهره برداری از منابع محلی (C18) با تغییرات رتبه بندی ۱۶ در تأثیرپذیری مستقیم و غیرمستقیم، حساسیت قابل توجهی را نشان داد که با تأثیرپذیری اولیه بالای آن (۳۳ در تأثیرپذیری مستقیم و ۲۶۵۲۴ در تأثیرپذیری غیرمستقیم) سازگار است. همچنین، ظرفیت تولید انرژی خورشیدی (C20) در تأثیرپذیری غیرمستقیم ($\pm 10\%$) تغییر رتبه ۱۷ را تجربه کرد، که با پتانسیل بالای انرژی خورشیدی در یزد و چالش های ادغام آن در بخش مسکن همخوانی دارد.

شاخص های با حساسیت متوسط: شدت اثرات تغییرات اقلیمی بر منابع (C03) و هماهنگی بین نهادهای شهری (C16) تغییرات رتبه بندی متوسطی (۶ تا ۱۴) را نشان دادند. شاخص C03 در تأثیرپذیری غیرمستقیم ($\pm 10\%$) تغییر رتبه ۱۴ داشت، که آسیب پذیری منابع یزد در برابر تغییرات اقلیمی را برجسته می کند. C16 نیز با تغییرات رتبه ۷ تا ۱۱، حساسیت به هماهنگی نهادی را نشان داد که با چالش های حکمرانی شناسایی شده در مطالعه همخوانی دارد.

نتایج تحلیل حساسیت با یافته های اصلی مطالعه همخوانی دارد و بینش های جدیدی را برای سیاست گذاری ارائه می دهد. پایداری شاخص هایی مانند C02 و C04 نشان دهنده نقش محوری بازچرخانی مصالح و مدیریت پسماند در کاهش اثرات زیست محیطی و تقویت تاب آوری شهری است، که با تأکید مطالعه بر اصول اقتصاد چرخشی سازگار است. این شاخص ها می توانند به عنوان پایه های اصلی برای توسعه سیاست های پایداری در یزد عمل کنند. از سوی دیگر، حساسیت بالای C01 و C18 چالش های مرتبط با پذیرش فناوری های سبز و بهره برداری از منابع محلی (مانند پسماندهای صنعتی فولاد و کاشی) را برجسته می کند، که با موانع شناسایی شده در مطالعه (ناکارآمدی در بازچرخانی مصالح و استفاده محدود از انرژی های تجدیدپذیر) همخوانی دارد. حساسیت C20 نیز بر اهمیت سرمایه گذاری پایدار در زیرساخت های انرژی خورشیدی تأکید می کند، که با پتانسیل بالای یزد در این زمینه و نیاز به ادغام آن در بخش مسکن هم راستاست.

بحث

یافته‌های این پژوهش تصویری سیستمی از پیشران‌های کلیدی مؤثر بر تحقق مسکن پایدار در چارچوب اقتصاد چرخشی در شهر یزد ارائه می‌دهد. تحلیل میک‌مک و حساسیت نشان داد که پایداری مسکن در این شهر بر تعامل هم‌زمان چهار حوزه وابسته است: بازچرخانی منابع، کیفیت زندگی، فناوری‌های سبز و هماهنگی نهادی. این تعاملات، برخلاف رویکردهای تک‌بعدی موجود در ادبیات، ماهیتی شبکه‌ای دارند و نتایج این پژوهش را در موقعیتی متمایز قرار می‌دهند. در حوزه بازچرخانی، شاخص‌های «نرخ بازیافت مصالح» و «کارایی مدیریت پسماند ساختمانی» بیشترین تأثیرگذاری را نشان دادند؛ یافته‌ای هم‌راستا با مطالعات (Gomide et al, 2024a; Gomide et al, 2024b) که بازیافت مصالح و طراحی مدولار را محور اقتصاد چرخشی معرفی می‌کنند. ظرفیت‌های صنایع محلی یزد، به‌ویژه در فولاد و کاشی، فرصت قابل توجهی برای بومی‌سازی حلقه‌های بازچرخانی ایجاد می‌کند. در بعد اجتماعی، شاخص «احساس امنیت و شادی مرتبط با مسکن» مطابق پژوهش‌های (Yangzom et al, 2025; Du et al, 2025) نشان داد که کیفیت زندگی نقش مستقیمی در پذیرش و موفقیت سیاست‌های چرخشی دارد. توسعه الگوهای نوآورانه مانند PSS و سکونت اشتراکی (Ghafoor et al, 2024; Ghafoor et al, 2023) می‌تواند این پیشران را تقویت کرده و مشارکت شهروندان را افزایش دهد. شاخص‌های فناوری شامل «پذیرش فناوری‌های سبز» و «ظرفیت انرژی خورشیدی» در تحلیل حساسیت به‌عنوان پیشران‌های بحرانی ظاهر شدند. این موضوع با یافته‌های (Keena et al, 2025; Parezanović et al, 2025) همسوست که نقش فناوری‌های دیجیتال، گذرنامه مسکن (HPKG) و BIM را برای تقویت چرخه مواد برجسته می‌کنند. با توجه به پتانسیل انرژی خورشیدی یزد (Khatibi et al, 2023)، رشد این فناوری‌ها می‌تواند مبنای کربن‌زدایی بخش مسکن باشد. در بعد نهادی نیز شاخص «هماهنگی بین نهادهای شهری» ناپایداری معناداری نشان داد؛ چالشی که پژوهش (Çetin et al, 2022) نیز به آن اشاره می‌کند. ضعف هماهنگی نهادی نه تنها سرعت اجرای سیاست‌های چرخشی را کاهش می‌دهد، بلکه ارتباط بین سایر پیشران‌ها را نیز تضعیف می‌کند. ایجاد سازوکارهای همکاری بین‌بخشی، نظام داده‌محور مشترک و مشوق‌های منسجم از جمله الزامات عملیاتی برای رفع این چالش است.

به‌طور کلی، نتایج پژوهش چارچوبی بومی و سازگار با شرایط اقلیمی و نهادی یزد ارائه می‌دهد که می‌تواند به سایر شهرهای کویری نیز تعمیم یابد. پیشران‌های شناسایی شده نشان می‌دهند که بازچرخانی مصالح (C02 و C04)، فناوری‌های سبز (C01 و C20)، هماهنگی نهادی (C16) و کیفیت زندگی (C08) به‌صورت سیستمی یکدیگر را تقویت یا محدود می‌کنند. رویکرد ترکیبی تحلیل ساختاری و حساسیت محلی امکان شناسایی این روابط را فراهم کرده و پایه‌ای برای طراحی سناریوها و سیاست‌های انطباق‌پذیر فراهم می‌کند. تمرکز بر توسعه زیرساخت‌های بازچرخانی، استفاده حداکثری از انرژی خورشیدی، ارتقای مشارکت اجتماعی و ایجاد چارچوب‌های همکاری نهادی می‌تواند مسیر دستیابی به پایداری و تاب‌آوری مسکن در یزد را هموار کند.

نتیجه‌گیری

تحلیل ساختاری میک‌مک و تحلیل حساسیت محلی در شهر یزد نشان داد که تحقق مسکن پایدار مبتنی بر اقتصاد چرخشی به چند پیشران محدود اما بسیار قدرتمند وابسته است که در برابر عدم قطعیت رفتار متفاوتی از خود بروز می‌دهند. شاخص‌های نرخ بازیافت مصالح ساختمانی (C02)، کارایی مدیریت پسماند ساختمانی (C04) و ارتباط مسکن با احساس امنیت و شادی (C08) در هر چهار سطح مستقیم، غیرمستقیم، بالفعل و بالقوه بالاترین تأثیرگذاری را داشته و حتی با اختلالات $\pm 10\%$ در ورودی‌ها جایگاه خود را تقریباً حفظ کردند؛ بنابراین به‌عنوان اهرم‌های پایدار و محرک اصلی سیستم عمل می‌کنند و هر سیاست مؤثری در یزد ناگزیر از قرار دادن بازچرخانی مصالح، مدیریت چرخشی پسماند ساختمانی و ارتقای کیفیت زندگی اجتماعی-روانی ساکنان در مرکز توجه خود است. در مقابل، شاخص‌های پذیرش فناوری‌های سبز در ساخت‌وساز (C01)، میزان بهره‌برداری از منابع محلی (C18) و ظرفیت تولید انرژی خورشیدی (C20) با وجود اثرپذیری بالا، در برابر تغییرات کوچک دچار جابه‌جایی شدید رتبه (تا ۱۸ پله) شدند. این حساسیت بالا حاکی از شکنندگی این پیشران‌هاست؛ به‌گونه‌ای که با وجود پتانسیل عظیم انرژی خورشیدی و پسماندهای صنعتی یزد، ضعف هماهنگی نهادی و پایین بودن سطح پذیرش اجتماعی می‌تواند به‌سرعت دستاوردهای بالقوه را خنثی کند و سیستم را به سمت سناریوهای ناپایدار هدایت نماید. شاخص هماهنگی بین نهادهای شهری (C16) نیز حساسیت متوسط تا بالا و اثرپذیری قابل توجهی از خود نشان داد و تأیید کرد که حتی برخورداری از پیشران‌های فنی و محیط‌زیستی قوی بدون وجود هماهنگی بین‌بخشی کارآمد، چرخه اقتصاد چرخشی مسکن را مختل خواهد ساخت. در نتیجه، مسیر اصلی گذار یزد به مسکن پایدار چرخشی نه در گسترش پراکنده فناوری‌ها، بلکه در تقویت هم‌زمان حلقه‌های بسته و بومی بازچرخانی مصالح و پسماند (با تکیه

بر صنایع فولاد و کاشی)، سرمایه‌گذاری متمرکز و هماهنگ‌شده برای ادغام انرژی خورشیدی در چرخه ساخت و بهره‌برداری مسکن و ارتقای حس تعلق، امنیت و شادی شهروندان از طریق طراحی مسکن چرخشی و مشارکت‌محور نهفته است. این سه حوزه هنگامی که به صورت هم‌افزا تقویت شوند، یکدیگر را تقویت کرده و کل سیستم را به سمت سناریوهای مطلوب هدایت می‌کنند؛ در غیر این صورت، حساسیت بالای پیشران‌های فناورانه و نهادی شهر را در برابر شوک‌های اقلیمی و اقتصادی به‌شدت آسیب‌پذیر خواهد ساخت. پژوهش حاضر برای نخستین بار با ترکیب تحلیل ساختاری میک‌مک و تحلیل حساسیت محلی، پیشران‌های پایدار و شکننده نظام مسکن چرخشی را در یک شهر کویری ایران تفکیک کرد و نشان داد که سیاست‌گذاری موفق در یزد باید از تمرکز صرف بر فناوری به سمت پایدارسازی پیشران‌های شکننده و تقویت پیشران‌های پایدار موجود تغییر جهت دهد. این چارچوب برای سایر شهرهای خشک و نیمه‌خشک دارای پتانسیل بالای خورشیدی و صنایع پسماندزا نیز قابل تعمیم است. در ادامه با توجه به جدول ۵ بر اساس دو پیشران حساس شناسایی شده (پذیرش فناوری‌های سبز و هماهنگی نهادی)، چهار سناریوی آینده برای مسکن پایدار یزد شکل می‌گیرد:

جدول ۵. ماتریس سناریوهای ۲×۲ آینده مسکن پایدار یزد

پذیرش فناوری‌های سبز بالا		پذیرش فناوری‌های سبز پایین
سناریو ۱ - جهش سبز یزد (خوشبینانه)	سناریو ۲ - هماهنگ اما کم‌شتاب (میان)	هماهنگی نهادی بالا
سناریو ۳ - نوآوری‌های پراکنده (نیمه‌بحرانی)	سناریو ۴ - رکود چرخشی (بدبینانه)	
هماهنگی نهادی پایین		

با توجه به جدول ۵، آینده مسکن پایدار یزد در تقاطع همین دو پیشران حساس رقم می‌خورد؛ اگر سیاست‌گذاران بتوانند هماهنگی نهادی را به سطح بالا برسانند و همزمان پذیرش اجتماعی و اقتصادی فناوری‌های سبز را تقویت کنند، «جهش سبز یزد» به واقعیت تبدیل خواهد شد؛ در غیر این صورت، شهر در بهترین حالت با پیشرفتی کند و ناتمام (سناریو کم‌شتاب) و در بدترین حالت با رکود چرخشی و تشدید آسیب‌پذیری منابع و کیفیت زندگی مواجه می‌شود. بنابراین، تقویت پیشران‌های پایدار موجود (بازچرخانی مصالح، مدیریت پسماند و کیفیت زندگی) و پایدارسازی سریع پیشران‌های شکننده (فناوری سبز، انرژی خورشیدی و هماهنگی نهادی) تنها مسیری است که یزد را از یک شهر کویری آسیب‌پذیر به الگویی پیشرو در مسکن پایدار چرخشی در منطقه تبدیل خواهد کرد.

References

- Alqahtani, F. K., Al-Jadhai, S., Alromihy, H., Alsaud, M., Sherif, M., & Mohamed, A. G. (2024). Appraising critical success factors in sustainable housing projects: A comparative study of PPP modalities in Saudi Arabia. *Heliyon*, 10(12), e32854. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32854>
- Bagheri, B., & Shaykh-Baygloo, R. (2021). Spatial analysis of urban smart growth and its effects on housing price: The case of Isfahan, Iran. *Sustainable Cities and Society*, 68, 102769. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102769>
- BELADÍ, K. (2022). Evaluating Sustainability Aspects of Housing in UNESCO world heritage city of Yazd Case Study: Lariha House. *AURUM Journal of Engineering Systems and Architecture*. <https://doi.org/10.53600/ajesa.1139073>
- Carrasco, F. A., & May, J. F. (2025). Material Sustainability of Low-Energy Housing Electric Components: A Systematic Literature Review and Outlook. *Sustainability*, 17(3), 852. <https://doi.org/10.3390/su17030852>
- Çetin, S., Gruis, V., & Straub, A. (2022). Digitalization for a circular economy in the building industry: Multiple-case study of Dutch social housing organizations. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 15, 200110. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200110>

- Chan, A. P. C., & Adabre, M. A. (2019). Bridging the gap between sustainable housing and affordable housing: The required critical success criteria (CSC). *Building and Environment*, 151, 112–125. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.029>
- Corvellec, H., Stowell, A. F., & Johansson, N. (2022). Critiques of the circular economy. *Journal of Industrial Ecology*, 26(2), 421–432. <https://doi.org/10.1111/jiec.13187>
- Dehghan, A. A. (2011). Status and potentials of renewable energies in Yazd Province-Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1491–1496. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.002>
- Du, H., Hui, E. C., Park, G.-R., & Chen, L. (2025). Measuring the housing precarity of migrant private tenants and assessing its impact on their life satisfaction - evidence from Guangzhou, China. *Applied Geography*, 179, 103616. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2025.103616>
- Edwards, B., & Turrent, D. (2002). *Sustainable housing: Principles and practice*. Taylor & Francis.
- Friedman, A. (2025). Housing Design for Circular Economy and Sustainability. *Sustainability*, 17(7), 2921. <https://doi.org/10.3390/su17072921>
- Ghafoor, S., Hosseini, M. R., Kocaturk, T., Weiss, M., & Barnett, M. (2023). The product-service system approach for housing in a circular economy: An integrative literature review. *Journal of Cleaner Production*, 403, 136845. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136845>
- Ghafoor, S., Kocaturk, T., Hosseini, M. R., Weiss, M., & Barnett, M. (2024). How to deploy the PSS towards a circular economy in housing? A multiple-case study. *Journal of Cleaner Production*, 477, 143821. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143821>
- Gil, G. O., Chowdhury, J. I., Balta-Ozkan, N., Hu, Y., Varga, L., & Hart, P. (2021). Optimising renewable energy integration in new housing developments with low carbon technologies. *Renewable Energy*, 169, 527–540. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.059>
- Gomide, F. P. de B., Bragança, L., & Casagrande Junior, E. F. (2024a). How Can the Circular Economy Contribute to Resolving Social Housing Challenges? *Applied System Innovation*, 7(2), 21. <https://doi.org/10.3390/asi7020021>
- Gomide, F. P. de B., Bragança, L., & Casagrande Junior, E. F. (2024c). The Synergy of Community, Government, and Circular Economy in Shaping Social Housing Policies. *Buildings*, 14(7), 1897. <https://doi.org/10.3390/buildings14071897>
- Isalou, A. A., Litman, T., & Shahmoradi, B. (2014). Testing the housing and transportation affordability index in a developing world context: A sustainability comparison of central and suburban districts in Qom, Iran. *Transport Policy*, 33, 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.02.006>
- Jang, S., & Park, H. (2025). Spatial equity in public rental housing based on commuting accessibility. *Regional Science Policy & Practice*, 100196. <https://doi.org/10.1016/j.rsp.2025.100196>
- Keena, N., Friedman, A., Parsaee, M., Mussio, M., Klein, A., Pomasonco-Alvis, M., & Pinheiro, P. (2025). Housing Passport knowledge graph: Promoting a circular economy in urban residential buildings. *Sustainable Cities and Society*, 119, 106050. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.106050>
- Khajuria, A., Verma, P., Vella, A., Zanini-Freitag, D., Xin, H., Murthy, I. K., Arora, J. K., Sylva, K., Menon, L., Pardeshi, S., Kral, U., & Liu, X. (2025). The SDG accelerator: circular economy solutions through efficient sustainable consumption. *Circular Economy*, 100140. <https://doi.org/10.1016/j.cec.2025.100140>

- Khatibi, A., Razi Astaracai, F., & Jahangir, M. H. (2023). Using cluster analysis and genetic algorithm for multi-objective optimisation of hybrid electricity supply systems: the case of a photovoltaic/wind/ battery grid-connected system in Yazd, Iran. *International Journal of Ambient Energy*, 44(1), 474–482. <https://doi.org/10.1080/01430750.2022.2128418>
- Khorshidian, A., & Fayazi, M. (2023). Critical factors to succeed in post-earthquake housing reconstruction in Iran. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 94, 103786. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103786>
- Kung, H.-Y., Juan, Y.-K., & Castro-Lacouture, D. (2025). Decision support model for evaluating circular economy strategies in private residential construction. *Developments in the Built Environment*, 21, 100602. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2025.100602>
- Lipp, A.-M., & Lederer, J. (2025). The circular economy of packaging waste in Austria: An evaluation based on statistical entropy and material flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 217, 108193. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108193>
- Liu, M., Shi, J., Shen, J., & Man Hui, E. C. (2025). Are migrants willing to pay more for better housing? The amenity effect in China's urban housing markets. *Socio-Economic Planning Sciences*, 102224. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2025.102224>
- Marchesi, M., & Tweed, C. (2021). Social innovation for a circular economy in social housing. *Sustainable Cities and Society*, 71, 102925. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102925>
- Marchesi, M., Tweed, C., & Gerber, D. (2020). Applying Circular Economy Principles to Urban Housing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 588(5), 052065. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/588/5/052065>
- Miatto, A., Emami, N., Goodwin, K., West, J., Taskhiri, M. S., Wiedmann, T., & Schandl, H. (2024). Australia's circular economy metrics and indicators. *Journal of Industrial Ecology*, 28(2), 216–231. <https://doi.org/10.1111/jiec.13458>
- MICHALOS, A. C. (1997). COMBINING SOCIAL, ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL INDICATORS TO MEASURE SUSTAINABLE HUMAN WELL-BEING. *Social Indicators Research*, 40(1/2), 221–258. <https://doi.org/10.1023/A:1006815729503>
- Najarzadeh, R., & Shahidi, A. (2015). Modeling Housing Demand for New Residential Buildings in Urban Areas. *Iranian Economic Review*, 19(2), 165–176. <https://doi.org/10.22059/ier.2015.56077>
- Olabi, A. G. (2019). Circular economy and renewable energy. *Energy*, 181, 450–454. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.196>
- Parezanović, A., Nadaždi, A., Isailović, D., Višnjevac, N., & Petojević, Z. (2025). Mapping the urban building stock for a circular economy by integrating GIS and BIM. A case study from Belgrade, Serbia. *Resources, Conservation and Recycling*, 215, 108075. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108075>
- Parivar, P., Quanrud, D., Sotoudeh, A., & Abolhasani, M. (2021). Evaluation of urban ecological sustainability in arid lands (case study: Yazd-Iran). *Environment, Development and Sustainability*, 23(2), 2797–2826. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00637-w>
- Ren, Z., Shan, Y., Jian, Z., & Zhu, D. (2025). Evaluating the forward-looking perspectives of environmental policy enforcement and institutional framework in the pursuit of a circular economy: A moments-quantile

- approach. *Journal of Environmental Management*, 382, 125442. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125442>
- Roufehaei, K. M., Hassan Abu Bakar, A., & Tabassi, A. A. (2014). Energy-efficient design for sustainable housing development. *Journal of Cleaner Production*, 65, 380–388. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.015>
- Sadeghi, A., Larimian, T., & Molabashi, A. (2012). Evaluation of Renewable Energy Sources for Generating Electricity in Province of Yazd: A Fuzzy Mcdm Approach. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 62, 1095–1099. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.187>
- Saffari darberazi, ali, Ghadirian, A. M., Haqbin, A., & Abdi, M. (2024). Structural Analysis of Green Identity and Consumer Loyalty in Tile and Ceramic Industry of Yazd Province Using Structural Equation Modeling. *Commercial Surveys*. <https://doi.org/10.22034/bs.2024.2033803.2984>
- Sarvari, H., Mehrabi, A., Chan, D. W. M., & Cristofaro, M. (2021). Evaluating urban housing development patterns in developing countries: Case study of Worn-out Urban Fabrics in Iran. *Sustainable Cities and Society*, 70, 102941. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102941>
- Scott, M., & Moore, N. (2017). *Renewing Urban Communities* (N. Moore & M. Scott, Eds.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315244518>
- Seyfang, G. (2010). Community action for sustainable housing: Building a low-carbon future. *Energy Policy*, 38(12), 7624–7633. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.10.027>
- Shahmohammadian, A., Ghafory-Ashtiany, M., Mansouri, B., Motamed, H., & Nasserasadi, K. (2025). FiCat-EQ: An integrated system-based tool for assessing financial vulnerability and economic impact of seismic risk, case study: Housing sector of Iran. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 123, 105474. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2025.105474>
- Shehadeh, A., Alshboul, O., Taamneh, M. M., Jaradat, A. Q., Alomari, A. H., & Arar, M. (2025). Advanced integration of BIM and VR in the built environment: Enhancing sustainability and resilience in urban development. *Heliyon*, 11(4), e42558. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42558>
- Stacy, C., Hodge, T. R., Komarek, T. M., Davis, C., Stern, A., Noble, O., Morales-Burnett, J., & Rogin, A. (2025). Rent control and the supply of affordable housing. *Journal of Housing Economics*, 68, 102063. <https://doi.org/10.1016/j.jhe.2025.102063>
- Suleimany, M. (2023). Urban climate justice in hot-arid regions: Vulnerability assessment and spatial analysis of socio-economic and housing inequality in Isfahan, Iran. *Urban Climate*, 51, 101612. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101612>
- Tomi. (2025). A Transition to Sustainable Housing: progress and Prospects for a Low Carbon Housing Future. *International Journal of Housing Policy*, 25(1), 203–206. <https://doi.org/10.1080/19491247.2024.2432696>
- Winston, N. (2022). Sustainable community development: Integrating social and environmental sustainability for sustainable housing and communities. *Sustainable Development*, 30(1), 191–202. <https://doi.org/10.1002/sd.2238>
- Winston, N., & Pareja Eastaway, M. (2008). Sustainable Housing in the Urban Context: International Sustainable Development Indicator Sets and Housing. *Social Indicators Research*, 87(2), 211–221. <https://doi.org/10.1007/s11205-007-9165-8>

- Yangzom, P., Choden, S., & Bardhan, R. (2025). Residential satisfaction in a country that prioritises happiness: Empirical evidences from affordable housing in Bhutan. *Cities*, 162, 105887. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2025.105887>
- Zhang, G., Yuan, X., Zhou, C., & Jin, W. (2025). From “access to housing” to “access to decent housing”: A systematic literature review of China’s housing security system. *Cities*, 162, 105921. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2025.105921>
- Zhang, J., Liu, Z., Guan, Z., Wang, L., Zhang, J., & Han, Z. (2025). Balancing future urban development and carbon sequestration: A multi-scenario InVEST model analysis of China’s urban clusters. *Journal of Environmental Management*, 380, 125003. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125003>
- Zhang, X., Liu, Z., Walker, T. R., Wilson, J., Tao, X., Dong, H., & Zhao, W. (2025). Impact of political incentives on urban green development: An analysis of 284 cities in China. *Cities*, 161, 105891. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2025.105891>