



Mapping Traditional Architecture Features to Contemporary Sustainable Architecture Using Deep Learning: A Methodological Framework

Mohsen Ranjbar Zeinali¹ , Seyed Rahman Eghbali^{2*} , Yousef Gorji Mahlabani³

1. PhD student in Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran, m.ranjbarzeinali@edu.ikiu.ac.ir.

2. Associate Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran, s.r.eghbali@arc.ikiu.ac.ir.

3. Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran, gorji@arc.ikiu.ac.ir.

Research Article

Abstract

The growing application of deep learning in architectural design has created opportunities for developing computational and knowledge-driven approaches to sustainable design. However, many existing methods rely primarily on geometric or image-based representations and provide limited mechanisms for integrating climatic knowledge, spatial organization, and building performance requirements into intelligent design processes. Meanwhile, the bioclimatic knowledge embedded in Iranian traditional architecture, particularly in hot-arid climates, has largely remained within historical and qualitative studies and has rarely been translated into computational structures suitable for intelligent design systems. This study addresses this methodological gap by adopting the Design Science Research (DSR) methodology to develop a conceptual and methodological framework for mapping the bioclimatic knowledge of Iranian traditional architecture into contemporary sustainable architectural design. The proposed framework transforms architectural knowledge from qualitative descriptions into structured computational representations through a knowledge base, architectural feature matrices, mapping matrices, and graph-based representations. These components establish explicit relationships among traditional architectural features, climatic functions, design variables, performance indicators, and computational workflows. Within this framework, a conceptual Knowledge-Integrated Graph Generative Network (KIGGN) is proposed to represent spatial, topological-climatic, and functional relationships within knowledge-aware generative deep learning processes. In addition, a conceptual Building Information Semantic Visualization Pipeline (BISVP) is introduced to define the transition from graph-based computational representations to Building Information Modeling (BIM) and Building Energy Modeling (BEM) environments while preserving semantic, spatial, and environmental relationships. The framework also proposes a knowledge-guided loss function incorporating feature reconstruction, spatial coherence, topological validity-validity of structural relationships-, and environmental performance constraints as complementary objectives for future intelligent learning strategies. The primary contribution of the study is not the development or experimental validation of an artificial intelligence model, but the formulation of a structured research artifact that connects traditional architectural knowledge, sustainable design principles, and deep learning methodologies. The proposed framework provides a theoretical and methodological foundation for future computational implementation, empirical validation, and development of intelligent climate-responsive architectural design systems.

*Corresponding Author:

Seyed Rahman Eghbali
s.r.eghbali@arc.ikiu.ac.ir

Received: 2026/01/20

Accepted: 2026/02/20

Keywords: Architectural
Feature Mapping,
Traditional Iranian
Architecture,
Contemporary Sustainable
Architecture, Deep
Learning, Hot-Arid Climate.

Cite this article: Ranjbar Zeinali, M., Eghbali, S. R., & Gorji Mahlabani, Y. (2026). Mapping Traditional Architectural Features to Contemporary Sustainable Architecture Using Deep Learning: A Methodological Framework. *Journal of Architectural and Environmental Research*, 3(5), 53-70.

<https://doi.org/10.30470/jaer.2026.2095213.1231>



Print ISSN: 2588-6363
Online ISSN: 2981-247X

<https://jaer.znu.ac.ir/>

Authors



University of Zanjan



DOI: 10.30470/jaer.2026.2095213.1231

روشن‌های معماری و محیط

دوفصلنامه پژوهش‌های معماری و محیط

نگاشت ویژگی‌های معماری سنتی در معماری نوین و پایدار با استفاده از یادگیری عمیق: یک چارچوب روش‌شناختی

محسن رنجبر زینالی^۱، سید رحمان اقبالی^{۲*}، یوسف گرجی مهبلانی^۳

۱. دانشجوی دکتری معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. m.ranjbarzeinali@edu.ikiu.ac.ir

۲. دانشیار، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. s.reghbali@arc.ikiu.ac.ir

۳. استاد گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. gorji@arc.ikiu.ac.ir

مقاله پژوهشی

چکیده:

گسترش کاربرد یادگیری عمیق در طراحی معماری، ظرفیت‌های جدیدی برای توسعه روش‌های محاسباتی و دانش‌محور ایجاد کرده است. با این حال، بسیاری از رویکردهای موجود بر بازنمایی‌های هندسی و تصویری متکی هستند و سازوکاری نظام‌مند برای تلفیق دانش اقلیمی، سازمان‌دهی فضایی و الزامات عملکردی در فرآیندهای طراحی هوشمند ارائه نمی‌کنند. از سوی دیگر، بخش عمده دانش زیست‌اقلیمی نهفته در معماری سنتی ایران، به‌ویژه در اقلیم گرم و خشک، عمدتاً در قالب مطالعات تاریخی و تفسیرهای کیفی ارائه شده و کمتر به ساختارهای محاسباتی در محیط‌های طراحی هوشمند تبدیل شده است. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از رویکرد پژوهش علم طراحی، چارچوبی مفهومی و روش‌شناختی برای نگاشت دانش زیست‌اقلیمی معماری سنتی به فرآیند طراحی نوین و پایدار ارائه می‌کند. در این چارچوب، ویژگی‌های معماری در قالب پایگاه دانش، ماتریس‌های ویژگی، ماتریس‌های نگاشت و بازنمایی‌های گرافای سازمان‌دهی شده و روابط میان دانش معماری، متغیرهای طراحی، شاخص‌های عملکرد محیطی و مسیرهای محاسباتی به‌صورت نظام‌مند صورت‌بندی می‌شوند. همچنین، معماری مفهومی شبکه مولد گراف یکپارچه با دانش، با عنوان KIGGN، برای تبیین چگونگی به‌کارگیری روابط فضایی، اقلیمی و عملکردی در مدل‌های مولد دانش‌محور پیشنهاد شده است. در کنار آن، خط لوله مفهومی نمایش معنایی اطلاعات ساختمان، با عنوان BISVP، برای تشریح مسیر انتقال بازنمایی‌های محاسباتی به محیط‌های مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و مدل‌سازی انرژی ساختمان تعریف می‌شود؛ به‌گونه‌ای که روابط معنایی، فضایی و محیطی حفظ شوند. افزون بر این، چارچوب پیشنهادی مفهوم تابع زبان دانش‌محور را مطرح می‌کند که مؤلفه‌هایی همچون بازسازی ویژگی‌ها، انسجام فضایی، اعتبار روابط ساختاری و الزامات عملکرد محیطی را دربر می‌گیرد. دستاورد اصلی پژوهش، ارائه یک مصنوع پژوهشی در قالب چارچوبی مفهومی و روش‌شناختی است که ارتباط میان دانش معماری سنتی، طراحی پایدار و یادگیری عمیق را به‌صورت نظام‌مند تبیین می‌کند. این چارچوب، بدون ادعای توسعه آموزش یا اعتبارسنجی یک سامانه هوش مصنوعی، مبنایی نظری برای توسعه و آزمون سامانه‌های هوشمند طراحی اقلیم‌پاسخ فراهم می‌سازد.

* نویسنده مسئول:

سید رحمان اقبالی

s.reghbali@arc.ikiu.ac.ir

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱۰/۳۰

انتشار مقاله: ۱۴۰۴/۱۲/۰۱

واژگان کلیدی:

نگاشت ویژگی‌های معماری، معماری سنتی ایرانی، معماری نوین و پایدار، یادگیری عمیق، اقلیم گرم و خشک.



پدیدآورندگان

<https://jaer.znu.ac.ir/>

شاپا چلی: ۶۳۳-۲۵۸۸

شاپا الکترونیکی: ۳۳۷۸-۳۹۸۱



دانشگاه زنجان

مقدمه

در اقلیم‌های گرم و خشک، طراحی معماری معاصر با چالش همزمان پاسخ‌گویی به الزامات عملکردی، کاهش مصرف انرژی و ارتقای آسایش محیطی مواجه است. بخش قابل توجهی از راهکارهای رایج، یا بر سامانه‌های فعال کنترل محیط متکی هستند یا به بهره‌گیری محدود از برخی عناصر الهام‌گرفته از معماری سنتی بسنده می‌کنند؛ رویکردهایی که در بسیاری از موارد قادر به انتقال منطق عملکردی معماری سنتی به شرایط پیچیده طراحی معاصر نیستند. در مقابل، معماری سنتی این اقلیم‌ها حاصل شکل‌گیری تدریجی مجموعه‌ای از راهبردهای غیرفعال اقلیمی است که از طریق سازمان فضایی، هندسه کالبد، جرم حرارتی مصالح، تهویه طبیعی، سایه‌اندازی و ایجاد خرداقلیم، تعادل مناسبی میان شرایط محیطی و نیازهای بهره‌برداران برقرار می‌کند. از این منظر، مسئله اصلی در معماری اقلیم‌پاسخ معاصر نه صرفاً بهره‌گیری از عناصر سنتی، بلکه شناسایی، صورت‌بندی و انتقال منطق عملکردی این راهبردها به فرآیندهای طراحی امروز است (Abbasi Harofteh & Sadeghian, 2020; Salameh & Touqan, 2024; Yang, Duan, & Samadi, 2025).

بر این اساس، بازآفرینی دانش معماری سنتی را نمی‌توان معادل بازتولید کالبدی یا تقلید فرمال از الگوهای سنتی دانست. آنچه قابلیت انتقال به معماری معاصر را دارد، روابط عملکردی، قواعد فضایی و سازوکارهای زیست‌اقلیمی نهفته در این الگوهاست. تحقق چنین انتقالی مستلزم آن است که ویژگی‌های معماری سنتی از سطح توصیف‌های تاریخی و کیفی فراتر رفته و در قالب ساختارهایی سازمان‌دهی شوند که قابلیت ارتباط با متغیرهای طراحی، شاخص‌های عملکردی و محیط‌های محاسباتی را داشته باشند. در این پژوهش، این فرایند با مفهوم نگاشت ویژگی‌های معماری صورت‌بندی می‌شود؛ مفهومی که نگاشت را نه انتقال مستقیم فرم، بلکه ایجاد روابط نظام‌مند میان ویژگی‌های معماری، نقش‌های اقلیمی، متغیرهای طراحی و سازوکارهای محاسباتی تعریف می‌کند. بدین ترتیب، دانش ضمنی معماری سنتی می‌تواند به‌عنوان منبعی ساختار یافته برای توسعه رویکردهای طراحی مبتنی بر عملکرد مورد استفاده قرار گیرد (Duran et al., 2025; Eldemery, 2010; Mousa, 2016; Qtaishat, 2021).

در سال‌های اخیر، پیشرفت یادگیری عمیق و مدل‌های مولد فرصت‌های جدیدی برای توسعه ابزارهای محاسباتی در معماری فراهم کرده است. با وجود این، بخش عمده مطالعات موجود بر بازنمایی‌های تصویری یا هندسی متمرکز بوده و کمتر به نحوه تلفیق دانش معماری، روابط فضایی و منطق عملکردی ساختمان در ساختار این مدل‌ها پرداخته‌اند. در نتیجه، همچنان شکاف قابل توجهی میان دانش معماری سنتی، طراحی پایدار و روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی وجود دارد. این شکاف صرفاً یک مسئله الگوریتمی نیست، بلکه ناشی از فقدان یک چارچوب روش‌شناختی است که بتواند نحوه تبدیل دانش معماری به بازنمایی‌های محاسباتی و ارتباط آن با مدل‌های یادگیری عمیق را به‌صورت منسجم تبیین کند (Hu et al., 2024; Liu et al., 2020; Zhang et al., 2023).

پژوهش حاضر در پاسخ به این خلأ، با بهره‌گیری از رویکرد پژوهش علم طراحی^۱، چارچوبی روش‌شناختی برای نگاشت دانش زیست‌اقلیمی معماری سنتی ایران به حوزه طراحی معماری پایدار ارائه می‌کند. این چارچوب، فرایند انتقال دانش را از طریق استخراج و سازمان‌دهی ویژگی‌های معماری، صورت‌بندی روابط میان ویژگی‌ها و عملکردهای اقلیمی، تعریف ساختارهای بازنمایی داده، تبیین مسیرهای محاسباتی و پیشنهاد اجزای مفهومی لازم برای ارتباط با مدل‌های یادگیری عمیق تشریح می‌کند. در این راستا، شبکه مولد گراف آگاه از دانش^۲ و خط لوله بردارسازی معنایی یکپارچه با مدل‌سازی اطلاعات ساختمان^۳ به‌عنوان اجزای پیشنهادی چارچوب معرفی می‌شوند تا نحوه پیوند میان دانش معماری، بازنمایی‌های محاسباتی و محیط‌های طراحی دیجیتال تبیین گردد. تأکید این پژوهش بر توسعه یک ساختار مفهومی و روش‌شناختی است و نه پیاده‌سازی یا ارزیابی تجربی سامانه‌های پیشنهادی. بر این اساس، نوآوری اصلی پژوهش حاضر در ارائه چارچوبی یکپارچه برای برقراری ارتباط میان معماری سنتی، طراحی پایدار و یادگیری عمیق نهفته است. برخلاف مطالعاتی که یا صرفاً به تحلیل معماری سنتی می‌پردازند یا کاربردهای منفرد هوش مصنوعی در معماری را بررسی می‌کنند، این پژوهش تلاش می‌کند منطق انتقال دانش میان این حوزه‌ها را در قالب یک مصنوع پژوهشی^۴ مبتنی بر پژوهش علم طراحی صورت‌بندی کند. چارچوب پیشنهادی، مبنایی نظری برای توسعه مطالعات آینده در زمینه مدل‌های دانش‌محور،

طراحی اقلیم‌پاسخ و سامانه‌های هوشمند طراحی فراهم می‌آورد و زمینه لازم برای پیاده‌سازی و اعتبارسنجی تجربی این مفاهیم را در پژوهش‌های آتی مهیا می‌سازد.

۱. پیشینه پژوهش

پژوهش حاضر در تقاطع سه حوزه دانشی شامل معماری سنتی اقلیم گرم و خشک، معماری نوین و پایدار اقلیم گرم و خشک و یادگیری عمیق در معماری قرار می‌گیرد. هر یک از این حوزه‌ها طی سال‌های اخیر توسعه قابل توجهی یافته‌اند، اما پیوند نظام‌مند میان آن‌ها همچنان محدود است. مطالعات معماری سنتی عمدتاً به تحلیل ارزش‌های کالبدی، فضایی و اقلیمی بناهای سنتی پرداخته‌اند، در حالی که پژوهش‌های معماری پایدار بیشتر بر ارزیابی عملکرد انرژی و بهینه‌سازی ساختمان‌های معاصر تمرکز داشته‌اند. هم‌زمان، پیشرفت‌های یادگیری عمیق ظرفیت‌های تازه‌ای برای تحلیل، پیش‌بینی و تولید گزینه‌های طراحی فراهم کرده است، اما این فناوری‌ها غالباً بدون بهره‌گیری از دانش صریح معماری سنتی توسعه یافته‌اند. در نتیجه، اگرچه هر سه حوزه از نظر علمی به بلوغ رسیده‌اند، هنوز چارچوبی روش‌شناختی برای انتقال دانش اقلیمی معماری سنتی به فرآیندهای محاسباتی طراحی پایدار ارائه نشده است. از این رو، مرور ادبیات حاضر با هدف تبیین این شکاف، سه محور اصلی شامل ویژگی‌های معماری سنتی، رویکردهای معماری پایدار و ظرفیت‌های یادگیری عمیق را بررسی می‌کند.

۱.۱. ویژگی‌های معماری سنتی در اقلیم گرم و خشک

معماری سنتی ایران در اقلیم گرم و خشک حاصل انباشت تجربه‌ای چندصدساله در سازگاری با شرایط محیطی است و مجموعه‌ای از راهبردهای غیرفعال برای کنترل انرژی، تهویه طبیعی، تعدیل تابش خورشید و ایجاد آسایش حرارتی را در قالب سازمان فضایی و کالبدی بناها توسعه داده است. در این معماری، عناصر مختلف ساختمان به‌صورت مستقل عمل نمی‌کنند، بلکه در قالب یک سامانه یکپارچه اقلیمی با یکدیگر تعامل دارند؛ به‌گونه‌ای که عملکرد هر جزء وابسته به ارتباط آن با سایر اجزای کالبدی و فضایی است (قبادیان، ۱۳۹۳؛ Abbasi Harofteh, 2017; Heidari, Sahebzadeh, & Dalvand, 2017).

در مقیاس شهری، تراکم بافت، نسبت ارتفاع به عرض معابر، پیوستگی سایه و نحوه استقرار ساختمان‌ها موجب شکل‌گیری خرداقلیم‌هایی می‌شود که شدت تابش و تنش حرارتی را کاهش می‌دهند (Negev et al., 2020). در مقیاس ساختمان نیز حیاط مرکزی، ایوان، بادگیر، طارمه، سازمان فضایی فضاها و استفاده از مصالح با جرم حرارتی بالا، از طریق کنترل تابش، هدایت جریان هوا و افزایش ظرفیت ذخیره حرارت، شرایط آسایش حرارتی را بدون اتکا به سامانه‌های مکانیکی فراهم می‌کنند (احمدی، ۱۳۹۱؛ رئیسی و کشاورز، ۱۴۰۲؛ عالمی و همکاران، ۱۴۰۲؛ مهدوی‌نژاد و کیا، ۱۳۹۸؛ El Azhary et al., 2021; Sadeghi, Gorji Mahlabani, and Nazif, 2021; Bekleyen & Melikoğlu, 2021). با وجود غنای این مطالعات، بخش عمده ادبیات موجود همچنان بر توصیف عناصر کالبدی یا تحلیل‌های تاریخی متمرکز است. روابط میان سازمان فضایی، رفتار اقلیمی و عملکرد ساختمان کمتر به‌صورت ساختارمند مدل‌سازی شده و سازوکاری برای تبدیل این دانش به نمایش‌های داده‌محور، گراف‌های فضایی یا متغیرهای قابل استفاده در سامانه‌های هوشمند طراحی ارائه نشده است. بنابراین، مهم‌ترین محدودیت این حوزه نه کمبود دانش، بلکه فقدان چارچوبی برای بازنمایی محاسباتی این دانش محسوب می‌شود.

۱.۲. ویژگی‌های معماری نوین و پایدار در اقلیم گرم و خشک

در دو دهه اخیر، معماری پایدار با بهره‌گیری از ابزارهای شبیه‌سازی انرژی، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و تحلیل‌های محیطی، به سمت تصمیم‌گیری مبتنی بر عملکرد حرکت کرده است. توسعه مدل‌سازی انرژی ساختمان^۵، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان^۶ و روش‌های تحلیل دینامیکی، امکان ارزیابی کمی شاخص‌هایی نظیر شدت مصرف انرژی، بار سرمایشی، دمای عملیاتی، کیفیت آسایش حرارتی و نور روز را در مراحل مختلف طراحی فراهم ساخته است (Mohammed, 2025; Rabani et al., 2025). هم‌زمان، فناوری‌هایی نظیر نماهای هوشمند مصالح نوین، مواد تغییر فازدهنده و سامانه‌های کنترل هوشمند انرژی نیز به‌عنوان راهکارهایی برای بهبود عملکرد ساختمان و افزایش بهره‌وری انرژی مورد توجه قرار گرفته‌اند.

با وجود این پیشرفت‌ها، در بسیاری از فرآیندهای طراحی، ارزیابی عملکرد همچنان پس از تولید فرم انجام می‌شود؛ در نتیجه، تحلیل انرژی بیشتر نقش اصلاح‌کننده طرح‌های موجود را بر عهده دارد تا هدایت‌کننده فرآیند تولید طراحی (Watson & Labs, 1993; Salameh & Touqan, 2024). این رویکرد در اقلیم‌های گرم و خشک با محدودیت بیشتری مواجه است، زیرا رفتار حرارتی ساختمان حاصل روابط پیچیده میان سازمان فضایی، جرم حرارتی، هندسه سایه‌اندازی، جهت‌گیری و مسیرهای تهویه طبیعی است؛ روابطی که در صورت نادیده گرفتن آن‌ها در مراحل اولیه طراحی، با تجهیزات مکانیکی نیز به‌طور کامل قابل جبران نخواهند بود (Boukheikhal & Bourbia, 2025). از این رو، اگرچه معماری پایدار ابزارهای پیشرفته‌ای برای سنجش عملکرد فراهم کرده است، اما هنوز سازوکاری برای انتقال نظام‌مند دانش اقلیمی معماری سستی به مراحل تولید طراحی ارائه نمی‌کند. این خلأ، ضرورت توسعه چارچوب‌هایی را آشکار می‌سازد که بتوانند ویژگی‌های معماری سستی را به متغیرهای طراحی و قیود عملکردی قابل استفاده در محیط‌های محاسباتی تبدیل کنند.

۱.۳. یادگیری عمیق در معماری

پیشرفت سریع یادگیری عمیق طی سال‌های اخیر، زمینه استفاده از روش‌های دادمحور را در تحلیل، ارزیابی و تولید طرح‌های معماری فراهم کرده است. برخلاف روش‌های مبتنی بر قواعد صریح یا مدل‌سازی پارامتریک، شبکه‌های عصبی عمیق قادرند الگوهای پیچیده موجود در داده‌های معماری را شناسایی کرده و روابط غیرخطی میان ویژگی‌های کالبدی، فضایی و عملکردی را استخراج کنند. این قابلیت موجب شده است که یادگیری عمیق به یکی از محورهای اصلی پژوهش در طراحی محاسباتی و معماری هوشمند تبدیل شود (Wu & Ng, 2021). مطالعات این حوزه را می‌توان در سه دسته اصلی طبقه‌بندی کرد: نخست، پژوهش‌هایی که بر استخراج ویژگی‌های معماری تمرکز دارند و از شبکه‌های عصبی کانولوشنی، تبدیل‌گرها و مدل‌های بخش‌بندی معنایی برای شناسایی اجزای پلان، نما و عناصر ساختمانی استفاده می‌کنند. این مطالعات نشان داده‌اند که اطلاعات هندسی و فضایی ساختمان‌ها را می‌توان به نمایش‌های ساختاریافته و قابل پردازش تبدیل کرد (Schönfelder et al., 2024; Xu et al., 2024; Lu et al., 2023; Wang et al., 2024). که با استفاده از شبکه‌های عصبی، شاخص‌هایی مانند مصرف انرژی، بار سرمایشی و شرایط آسایش حرارتی را بدون نیاز به شبیه‌سازی‌های زمان‌بر برآورد می‌کنند (Chen et al., 2025; Shojaei & Mokhtar, 2024; Yang, Duan, & Samadi, 2025). دسته سوم نیز به طراحی مولد اختصاص دارد که در آن مدل‌هایی نظیر شبکه مولد تخصصی^۷، خودرمزگذار تغییرپذیر^۸، مدل‌های انتشار و شبکه‌های مولد مبتنی بر گراف برای تولید پلان‌ها و پیکربندی‌های فضایی جدید به کار گرفته می‌شوند (Hu et al., 2024; Li et al., 2025). با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، بیشتر این پژوهش‌ها بر یادگیری الگوهای آماری یا بازتولید شباهت‌های هندسی تمرکز دارند و سازوکاری برای ادغام دانش صریح معماری، روابط اقلیمی و منطق عملکردی در فرآیند یادگیری ارائه نمی‌کنند. در نتیجه، بسیاری از خروجی‌های تولیدشده اگرچه از نظر هندسی معتبر هستند، اما الزاماً با اصول معماری اقلیم‌پاسخ یا الزامات طراحی پایدار انطباق ندارند. از این منظر، مسئله اصلی نه توسعه مدل‌های عمیق جدید، بلکه ایجاد چارچوبی است که بتواند دانش معماری سستی را به نمایش‌های محاسباتی مناسب تبدیل کرده و آن را در فرآیند تحلیل، تولید و ارزیابی طراحی به کار گیرد.

۱.۴. جمع‌بندی شکاف پژوهش

مرور ادبیات نشان می‌دهد که سه حوزه معماری سستی، معماری نوین و پایدار و یادگیری عمیق، هر یک به‌صورت مستقل پیشرفت‌های ارزشمندی داشته‌اند، اما هنوز در قالب یک چارچوب روش‌شناختی واحد به یکدیگر متصل نشده‌اند. معماری سستی دانش غنی از راهبردهای اقلیم‌پاسخ را در اختیار قرار می‌دهد، اما این دانش عمدتاً در قالب توصیف‌های کیفی باقی مانده و به ساختارهای دادمحور قابل استفاده در محیط‌های محاسباتی تبدیل نشده است. معماری پایدار نیز ابزارهای پیشرفته‌ای برای ارزیابی عملکرد ارائه کرده، اما این ابزارها بیشتر پس از تولید طرح به کار گرفته می‌شوند و نقش محدودی در هدایت فرآیند تولید طراحی دارند. از سوی دیگر، مدل‌های یادگیری عمیق توانایی بالایی در تحلیل و تولید داده‌های معماری نشان داده‌اند، اما معمولاً فاقد سازوکارهایی برای بهره‌گیری از دانش اقلیمی و قواعد طراحی سستی هستند.

بر این اساس، شکاف اصلی ادبیات را می‌توان در سه سطح خلاصه کرد: نخست، نبود روشی برای بازنمایی محاسباتی دانش معماری سنتی؛ دوم، فقدان پیوند میان این دانش و شاخص‌های عملکردی معماری پایدار؛ و سوم، نبود چارچوبی که بتواند این دو حوزه را در فرایندهای مبتنی بر یادگیری عمیق به صورت یکپارچه به کار گیرد. پژوهش حاضر با اتخاذ رویکرد پژوهش علم طراحی، در پی توسعه چنین چارچوبی است. هدف این پژوهش، طراحی یک مصنوع پژوهشی است که مسیر انتقال دانش زیست‌اقلیمی معماری سنتی به محیط‌های طراحی محاسباتی را تبیین کند در این چارچوب، شبکه مولد گراف آگاه از دانش و خط لوله بردارسازی معنایی یکپارچه با مدل‌سازی اطلاعات ساختمان نه به عنوان مدل‌های پیاده‌سازی شده، بلکه به عنوان اجزای مفهومی چارچوب پیشنهادی معرفی می‌شوند تا زمینه اتصال دانش معماری، طراحی پایدار و فناوری‌های نوین هوش مصنوعی را برای پژوهش‌های آینده فراهم سازند.

۲. روش‌شناسی پژوهش

با توجه به ماهیت مسئله پژوهش و هدف آن در توسعه یک چارچوب مفهومی برای نگاشت دانش معماری سنتی به طراحی نوین و پایدار مبتنی بر یادگیری عمیق، فرایند تحقیق در قالب مجموعه‌ای از مراحل به هم پیوسته سازمان‌دهی شد. این مراحل از استخراج و ساختاردهی دانش معماری آغاز شده و پس از تحلیل زیست‌بوم محاسباتی، تدوین منطق نگاشت و سترز یافته‌ها، به توسعه چارچوب نهایی منتهی می‌شوند. هر مرحله بر خروجی مرحله پیشین استوار بوده و در تعامل با سایر مراحل، زمینه شکل‌گیری مصنوع پژوهشی را فراهم می‌کند. نمای کلی این فرایند و ارتباط میان مراحل مختلف در شکل ۱ ارائه شده است.

۲.۱. طراحی پژوهش

این پژوهش از نوع پژوهش روش‌شناختی بوده و بر اساس رویکرد پژوهش علم طراحی انجام شده است. انتخاب این رویکرد از ماهیت مسئله پژوهش ناشی می‌شود؛ زیرا هدف پژوهش حاضر ارزیابی یک سامانه موجود، آزمون تجربی یک فرضیه یا توسعه یک مدل پیش‌بینی‌کننده نیست، بلکه طراحی و صورت‌بندی یک چارچوب مفهومی برای برقراری ارتباط نظام‌مند میان دو قلمرو دانشی مستقل، یعنی معماری اقلیم‌پاسخ و یادگیری عمیق، است. در چنین شرایطی، رویکرد پژوهش علم طراحی بستری مناسب برای توسعه یک مصنوع پژوهشی فراهم می‌آورد؛ مصنوعی که بتواند دانش پراکنده موجود را در قالب ساختاری منسجم سازمان‌دهی کرده و زمینه استفاده از آن را در پژوهش‌های بعدی مهیا سازد.

در منطق رویکرد پژوهش علم طراحی، ارزش علمی پژوهش بیش از آنکه در تولید داده‌های جدید یا اعتبارسنجی تجربی یک مدل نهفته باشد، در طراحی راه‌حلی روش‌شناختی برای پاسخ به یک مسئله دانشی است. مسئله محوری این پژوهش نیز نبود چارچوبی روشن برای تبیین نحوه انتقال دانش معماری سنتی ایران در اقلیم گرم و خشک به فرایندهای طراحی پایدار مبتنی بر یادگیری عمیق است. بر همین اساس، فرایند پژوهش در قالب مجموعه‌ای از مراحل به هم پیوسته سازمان‌دهی شد؛ به گونه‌ای که خروجی هر مرحله، مبنای اجرای مرحله بعد قرار گیرد و در نهایت چارچوبی روش‌شناختی برای نگاشت ویژگی‌های معماری به قابلیت‌های محاسباتی مدل‌های یادگیری عمیق شکل گیرد.

۲.۲. ایجاد پایگاه دانش از طریق مرور نظام‌مند ادبیات

توسعه چارچوب نگاشت پیشنهادی مستلزم ایجاد پایگاه دانشی ساختاریافته بود که بتواند به‌طور هم‌زمان سه حوزه اصلی پژوهش، یعنی معماری سنتی، معماری نوین و پایدار و یادگیری عمیق را پوشش دهد. از این رو، مرور ادبیات صرفاً با هدف گردآوری اطلاعات انجام نگرفت، بلکه مبنایی برای استخراج مفاهیم، ویژگی‌ها و روابط موردنیاز جهت توسعه چارچوب مفهومی پژوهش به شمار آمد.

فرایند جست‌وجوی منابع در پایگاه‌های معتبر داخلی شامل پایگاه مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی^۱، نورمگز، مگیران، سیویلیکا و موتور جستجوی گوگل اسکالر^۲ برای مطالعات مرتبط با معماری سنتی، و در پایگاه‌های علمی اسکوپوس، وب آو ساینس^۳، ساینس دایرکت^۴، اسپرینگرلینک^۵ و آی‌تریپل‌ئی اکسپلور^۶ برای مطالعات مرتبط با معماری پایدار و یادگیری عمیق انجام شد. پس از بازبینی منابع، معیارهای ورود و خروج با هدف انتخاب مطالعات دارای ارتباط مستقیم با اقلیم گرم و خشک، طراحی اقلیم‌پاسخ و کاربرد روش‌های داده‌محور اعمال شد و مطالعات صرفاً نظری یا فاقد ارتباط با اهداف پژوهش کنار گذاشته شدند. در ادامه، منابع منتخب به منظور شناسایی مفاهیم کلیدی، ویژگی‌های

مشترک و ظرفیت‌های محاسباتی موجود در ادبیات تحلیل شدند. برای سازمان‌دهی داده‌های استخراج‌شده و ایجاد ساختاری منسجم، از محیط برنامه‌نویسی پایتون و کتابخانه‌های پانداس^{۱۵} و نامپای^{۱۶} استفاده شد تا پایگاه دانشی شکل گیرد که مبنای استخراج ویژگی‌های معماری و توسعه مراحل بعدی چارچوب نگاشت باشد.

۲.۳. صورت‌بندی مفهومی دانش معماری

پس از تشکیل پایگاه دانش، مرحله بعد به صورت‌بندی مفهومی دانش معماری اختصاص یافت. ضرورت این مرحله از آنجا ناشی می‌شود که بخش عمده ادبیات معماری مبتنی بر مفاهیم کیفی، توصیف‌های فضایی و تحلیل‌های کالبدی است، در حالی که مدل‌های یادگیری عمیق بر پایه ساختارهای داده‌ای و نمایش‌های محاسباتی عمل می‌کنند. از این رو، لازم بود دانش استخراج‌شده از ادبیات به شکلی سازمان‌دهی شود که قابلیت استفاده در مراحل بعدی چارچوب پیشنهادی را داشته باشد. بررسی مطالعات نشان داد که ویژگی‌های معماری را می‌توان در سه دسته اصلی طبقه‌بندی کرد: دسته نخست، ویژگی‌های فرمی و پیکره‌ای شامل هندسه، فرم و ویژگی‌های پوسته ساختمان است که ماهیتی هندسی و ریخت‌شناختی دارند. دسته دوم، ویژگی‌های مرتبط با سازمان‌دهی فضایی شامل مجاورت، ارتباط میان فضاها و سلسله‌مراتب فضایی است که در قالب روابط توپولوژیک و شبکه‌ای قابل توصیف هستند. دسته سوم نیز ویژگی‌های عملکرد اقلیمی نظیر تهویه طبیعی، سایه‌اندازی و آسایش حرارتی را در بر می‌گیرد که ماهیتی محیطی و عملکردی دارند. این طبقه‌بندی نشان داد که انواع مختلف دانش معماری از ساختارهای متفاوتی برخوردارند و بنابراین نمی‌توان همه آن‌ها را با یک شیوه محاسباتی واحد مدل‌سازی کرد. خروجی این مرحله، یک بازنمایی مفهومی سازمان‌یافته از ویژگی‌های معماری بود که مبنای تحلیل تطابق میان ماهیت داده‌ها و قابلیت‌های مدل‌های یادگیری عمیق قرار گرفت.

۲.۴. تحلیل زیست‌بوم محاسباتی و استخراج قابلیت‌های پیاده‌سازی

در گام بعد، زیست‌بوم محاسباتی موردنیاز برای پشتیبانی از چارچوب پیشنهادی بررسی شد تا مشخص شود هر دسته از مدل‌های یادگیری عمیق به چه نوع داده، زیرساخت محاسباتی و ابزارهای نرم‌افزاری نیاز دارد. بررسی نظام‌مند مطالعات نشان داد که کاربرد یادگیری عمیق در معماری معمولاً در قالب یک زنجیره چندلایه از پیش‌پردازش داده، مدل‌سازی، آموزش و ارزیابی انجام می‌شود. در این زنجیره، لایه نخست شامل گردآوری، پاک‌سازی، استانداردسازی و سازمان‌دهی داده‌هاست که عمدتاً با استفاده از کتابخانه‌های پانداس، نامپای و سایکیت‌لرن^{۱۷} انجام می‌شود. لایه دوم به توسعه و آموزش مدل‌های یادگیری عمیق اختصاص دارد و از چارچوب‌هایی نظیر تفسورفلو^{۱۸}، کراس^{۱۹} و پای‌تورچ^{۲۰} بهره می‌گیرد. در مواردی که روابط فضایی و توپولوژیک میان فضاها، معماری اهمیت دارد، ابزارهایی مانند پای‌تورچ ژئومتریک^{۲۱} و تئورک‌ایکس^{۲۲} نیز برای مدل‌سازی ساختارهای گرافی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در لایه سوم، ابزارهای تحلیل تصویری و ارزیابی عملکرد ساختمان، از جمله اپن‌سی‌وی^{۲۳}، انرژ‌ی‌پلاس، دیزاین‌بیلدر و محیط‌های مدل‌سازی پارامتریک نظیر راینو/گرس‌هاپر، امکان تحلیل هندسه، شبیه‌سازی انرژی و بررسی رفتار محیطی طرح‌ها را فراهم می‌کنند. تحلیل این زیست‌بوم نشان داد که انتخاب مدل یادگیری عمیق تنها به نوع الگوریتم وابسته نیست، بلکه باید با ساختار داده، هدف تحلیلی و محیط پیاده‌سازی نیز هماهنگ باشد؛ موضوعی که در طراحی چارچوب پیشنهادی به عنوان یکی از اصول بنیادین مورد توجه قرار گرفت.

۲.۵. توسعه منطق نگاشت میان ویژگی‌های معماری و مدل‌های یادگیری عمیق

مرحله پنجم، هسته استدلال روش‌شناختی پژوهش را تشکیل می‌دهد و به تدوین منطق نگاشت میان ویژگی‌های معماری و خانواده‌های مختلف مدل‌های یادگیری عمیق اختصاص دارد. این نگاشت بر پایه اصل «تناسب میان ماهیت داده و ظرفیت یادگیری مدل» انجام شد؛ بدین معنا که انتخاب هر مدل نه بر اساس رواج آن در مطالعات پیشین، بلکه بر مبنای سازگاری آن با نوع بازنمایی داده و مسئله موردنظر صورت گرفت. بر این اساس، ویژگی‌های فرمی و پیکره‌ای که عمدتاً در قالب تصاویر، نقشه‌ها یا هندسه دوبعدی و سه‌بعدی بیان می‌شوند، بیشترین انطباق را با شبکه‌های عصبی پیچشی^{۲۴}، تبدیل‌گرهای بینایی^{۲۵} و خودرمزگذارها^{۲۶} دارند.

در مقابل، سازمان‌دهی فضایی ساختمان که بر روابط مجاورت، اتصال و سلسله‌مراتب میان فضاها استوار است، ماهیتی گراف‌محور دارد و استفاده از مدل‌هایی نظیر شبکه‌های عصبی گرافی^{۲۷}، خودرمزگذارهای گرافی^{۲۸} و تبدیل‌گرهای گرافی^{۲۹} برای آن مناسب‌تر است. همچنین، داده‌های مربوط به عملکرد اقلیمی و انرژی که معمولاً به صورت داده‌های عددی یا سری‌های زمانی بیان می‌شوند، با مدل‌های پیش‌بینی‌کننده‌ای مانند شبکه‌های عصبی عمیق^{۳۰}، شبکه‌های حافظه طولانی کوتاه‌مدت^{۳۱} و تبدیل‌گرها^{۳۲} سازگاری بیشتری دارند. در نهایت، برای تولید گزینه‌های طراحی و کاوش در فضای راه‌حل‌ها، مدل‌های مولدی همچون شبکه‌های مولد تخصصی، خودرمزگذارهای تغییرپذیر و مدل‌های انتشار^{۳۳} به عنوان مناسب‌ترین گزینه‌ها شناسایی شدند. نتیجه این مرحله، تدوین یک منطق تحلیلی برای انتخاب مدل‌های یادگیری عمیق بود که می‌تواند به عنوان مبنایی برای توسعه چارچوب‌های مشابه در پژوهش‌های آینده نیز مورد استفاده قرار گیرد.

۲.۶. سنتز و توسعه چارچوب نهایی نگاشت

در مرحله پایانی، یافته‌های حاصل از مراحل پیشین با یکدیگر تلفیق شدند تا چارچوب نهایی نگاشت دانش معماری تدوین شود. این سنتز با این فرض انجام گرفت که انتقال دانش از معماری سنتی به طراحی پایدار مبتنی بر هوش مصنوعی، مستلزم برقراری ارتباطی منسجم میان دانش معماری، ساختار داده، مدل‌های یادگیری عمیق و محیط‌های محاسباتی است. بر همین اساس، چارچوب پیشنهادی در قالب یک ساختار چندلایه سازمان‌دهی شد که در آن هر ویژگی معماری ابتدا به یک نوع بازنمایی داده تبدیل می‌شود، سپس مسئله محاسباتی متناظر با آن تعیین شده و در ادامه، مدل یادگیری عمیق مناسب و بستر محاسباتی مورد نیاز برای پیاده‌سازی انتخاب می‌شود. تحلیل روابط میان این لایه‌ها نشان داد که فرآیند انتقال دانش را می‌توان در چهار مسیر اصلی شامل تحلیل فرم، تحلیل ساختار فضایی، تحلیل عملکرد اقلیمی و طراحی مولد سازمان‌دهی کرد. شکل ۱ چارچوب روش شناسی پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۱. چارچوب روش شناسی پژوهش. تدوین: نگارندگان

در چارچوب رویکرد پژوهش علم طراحی، خروجی این پژوهش یک مصنوع پژوهشی مفهومی است که با هدف تبیین روابط میان دانش معماری سنتی، اصول طراحی پایدار و ظرفیت‌های یادگیری عمیق توسعه یافته است. این چارچوب نه یک مدل پیاده‌سازی شده و نه یک الگوریتم اجرایی، بلکه بستری روش‌شناختی برای سازمان‌دهی دانش و هدایت پژوهش‌های آینده در حوزه طراحی محاسباتی اقلیم‌پاسخ محسوب می‌شود.

۳. چارچوب نگاشت پیشنهادی

بر پایه مراحل روش‌شناسی پژوهش و با تکیه بر رویکرد پژوهش علم طراحی، در این بخش چارچوب مفهومی نگاشت توسعه داده می‌شود. این چارچوب، مصنوع پژوهشی اصلی مطالعه محسوب شده و با هدف تبدیل دانش زیست‌اقليمی معماری سنتی ایران به ساختارهای قابل استفاده در محیط‌های طراحی محاسباتی و سامانه‌های مبتنی بر یادگیری عمیق طراحی شده است. فرآیند توسعه این چارچوب در پنج گام متوالی سازمان‌دهی شده که خروجی هر گام، ورودی گام بعدی را تشکیل می‌دهد و در نهایت به شکل‌گیری چارچوب نهایی نگاشت دانش منجر می‌شود.

۳.۱. گام نخست: احصاء ویژگی‌های معماری و ساختاردهی داده‌ها

نقطه آغاز توسعه چارچوب نگاشت، شناسایی و ساختاردهی دانش معماری برگرفته از معماری سنتی ایران و راهبردهای معماری نوین و پایدار است. ضرورت این مرحله از آنجا ناشی می‌شود که مدل‌های یادگیری عمیق تنها زمانی قادر به پردازش دانش معماری خواهند بود که این دانش از قالب توصیف‌های کیفی و تفسیری رایج در ادبیات، به ساختارهای داده‌ای صریح و قابل پردازش تبدیل شود. از این‌رو، نتایج حاصل از مرور نظام‌مند ادبیات که در بخش روش‌شناسی ارائه شد، مبنای استخراج و سازمان‌دهی مجموعه‌ای از ویژگی‌های اثرگذار بر عملکرد محیطی ساختمان قرار گرفت.

در این مرحله، ویژگی‌های استخراج‌شده در سه حوزه اصلی شامل ویژگی‌های فرمی و پیکرهای، سازمان‌دهی فضایی و عملکرد اقلیمی طبقه‌بندی شدند تا امکان مقایسه، تحلیل و یکپارچه‌سازی آن‌ها فراهم شود. در این ساختار، هر ویژگی صرفاً به‌عنوان یک عنصر کالبدی در نظر گرفته نمی‌شود، بلکه به‌عنوان یک مؤلفه دانشی با نقش اقلیمی مشخص، مانند کنترل تابش، هدایت جریان هوا، افزایش جرم حرارتی یا بهبود آسایش حرارتی، تعریف و ثبت می‌شود. چنین رویکردی سبب می‌شود که روابط میان عناصر مختلف معماری نیز در کنار ویژگی‌های مستقل آن‌ها حفظ شود. به‌منظور ایجاد یک بازنمایی محاسباتی، ارتباط میان ویژگی‌های معماری، عملکردهای اقلیمی، متغیرهای طراحی و شاخص‌های ارزیابی عملکرد در قالب ماتریس نگاشت صورت‌بندی شد. این ماتریس امکان ردیابی مسیر انتقال دانش از سطح ویژگی‌های کالبدی به شاخص‌های عملکردی قابل اندازه‌گیری را فراهم می‌کند و بستری برای استفاده از این اطلاعات در مراحل بعدی ایجاد می‌نماید.

در ادامه، برای حفظ روابط فضایی و توپولوژیک معماری، یک گراف معماری تولید شد که در آن عناصر معماری و فضاهای مختلف به‌عنوان گره‌ها و ارتباطات فضایی، مسیرهای جریان هوا، روابط حرارتی و الگوهای سایه‌اندازی به‌عنوان یال‌ها تعریف شدند. استفاده از این ساختار گرافی موجب می‌شود منطق سازمان فضایی معماری سنتی در فرآیندهای محاسباتی حفظ شده و زمینه لازم برای توسعه مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی گرافی فراهم گردد. خروجی این مرحله شامل مجموعه‌ای از ماتریس‌های ویژگی، ماتریس‌های نگاشت و نمایش‌های گرافی ساختار یافته است که نخستین بازنمایی محاسباتی دانش معماری را تشکیل می‌دهند. این ساختار داده‌ای، ورودی اصلی مراحل بعدی پژوهش بوده و مبنای توسعه مدل‌های یادگیری عمیق، تحلیل عملکرد و ارزیابی گزینه‌های طراحی قرار می‌گیرد. در چارچوب پژوهش علم طراحی، این مرحله وظیفه تبدیل دانش استخراج‌شده از ادبیات به یک دارایی دانشی ساختاریافته را بر عهده دارد که قابلیت استفاده در چرخه طراحی دیجیتال را داراست.

۳.۲. گام دوم: مدل‌سازی دیجیتال و شبیه‌سازی خط پایه

پس از ساختاردهی دانش معماری، مرحله دوم به تبدیل این دانش به یک مدل دیجیتال و تعریف وضعیت مرجع برای ارزیابی عملکرد اختصاص یافت. هدف این مرحله ایجاد بستری است که بتواند ویژگی‌های کیفی معماری را به پارامترهای کمی قابل تحلیل تبدیل کند. در این پژوهش، مدل خط پایه صرفاً یک مدل هندسی نیست، بلکه بازنمایی دیجیتال دانش اقلیمی معماری محسوب می‌شود که ویژگی‌های استخراج‌شده را به متغیرهای طراحی قابل اندازه‌گیری تبدیل می‌کند.

در این فرایند ویژگی‌هایی نظیر نسبت حیاط مرکزی، میزان فشردگی کالبدی، جهت‌گیری ساختمان، الگوی بازشوها و ویژگی‌های پوسته از سطح توصیف‌های کیفی خارج شده و به پارامترهای قابل استفاده در محیط‌های مدل‌سازی پارامتریک تبدیل می‌شوند. این تبدیل امکان انجام تحلیل‌های عملکردی و مقایسه سناریوهای مختلف طراحی را فراهم می‌سازد.

فرایند مدل‌سازی با استفاده از ماتریس ویژگی‌ها^{۳۴}، ماتریس نگاشت^{۳۵} و گراف معماری^{۳۶} آغاز می‌شود. در این مرحله، گره‌های گراف که معرف فضاها یا عناصر معماری هستند، به زون‌های حرارتی تبدیل شده و یال‌ها نیز روابط حرارتی، توپولوژیک و عملکردی میان این زون‌ها را مشخص می‌کنند. این رویکرد موجب می‌شود سازمان‌دهی فضایی معماری سستی در فرایند مدل‌سازی فیزیکی ساختمان حفظ شده و روابط میان فضاها در تحلیل‌های انرژی نیز منعکس گردد.

برای تکمیل مدل، مشخصات فیزیکی ساختمان شامل ضرایب انتقال حرارت، جرم حرارتی مصالح، راهبردهای تهویه طبیعی و فیل‌های آب و هوایی انرژی پلاس^{۳۷} به مدل افزوده می‌شوند تا رفتار حرارتی ساختمان تحت شرایط واقعی اقلیم گرم و خشک شبیه‌سازی شود. خروجی این مرحله مجموعه‌ای از شاخص‌های مرجع شامل شدت مصرف انرژی^{۳۸}، اوج بار سرمایشی^{۳۹}، شاخص میانگین آرای پیش‌بینی شده (آسایش حرارتی)^{۴۰}، دمای عملیاتی^{۴۱} و ساعات عدم آسایش است. این شاخص‌ها حلقه اتصال میان دانش معماری و تحلیل‌های محاسباتی بوده و مبنای مقایسه و ارزیابی در مراحل بعدی چارچوب پیشنهادی را تشکیل می‌دهند. علاوه بر این، تمامی اطلاعات مربوط به مدل پایه، شامل هندسه، سازمان فضایی، مشخصات پوسته و نتایج شبیه‌سازی، در یک ساختار یکپارچه ذخیره می‌شوند تا در مراحل بعدی به‌عنوان مرجع ارزیابی عملکرد مدل‌های هوشمند مورد استفاده قرار گیرند.

۳.۳. گام سوم: ایجاد خط لوله یادگیری عمیق

گام سوم بر انتقال دانش ساختاریافته‌ی حاصل از مراحل پیشین به یک بستر محاسباتی مبتنی بر یادگیری عمیق تمرکز دارد تا ارتباط میان ویژگی‌های فرمی و پیکره‌ای، سازمان‌دهی فضایی و عملکرد اقلیمی در قالب یک ساختار یادگیری دانش‌محور بازنمایی شود. در این مرحله، هدف، توسعه یا آموزش یک مدل اجرایی مشخص نیست، بلکه ارائه یک سازوکار مفهومی برای تبیین نحوه ارتباط میان دانش معماری و ظرفیت‌های یادگیری عمیق است. مبنای این گام بر این فرض استوار است که دانش معماری سستی مجموعه‌ای از روابط فضایی، توپولوژیکی، اقلیمی و عملکردی است که مناسب‌ترین شیوه بازنمایی آن، ساختارهای گرافی هستند. بر این اساس، گره‌های گراف معرف فضاها، عناصر کالبدی یا زون‌های حرارتی و یال‌ها بیانگر روابط فضایی، مسیرهای جریان هوا، ارتباطات عملکردی و تعاملات حرارتی میان این عناصر در نظر گرفته می‌شوند. حاصل این فرایند، تشکیل یک نمایش چندلایه از دانش معماری است که اطلاعات هندسی، معنایی و اقلیمی را در قالب ساختاری واحد ادغام کرده و تانسورهای^{۴۲} ویژگی‌موردنیاز برای مدل‌های یادگیری عمیق را فراهم می‌سازد.

برای عملیاتی‌سازی این مسیر محاسباتی، پژوهش حاضر ساختار مفهومی شبکه مولد گراف آگاه از دانش را پیشنهاد می‌کند. وجه تمایز این شبکه نسبت به مدل‌های متداول مولد در آن است که فرایند تولید گزینه‌های طراحی صرفاً بر پایه شباهت‌های آماری داده‌های آموزشی انجام نمی‌شود، بلکه دانش اقلیمی، قواعد سازمان فضایی و محدودیت‌های عملکردی نیز در منطق یادگیری مدل نقش دارند. به بیان دیگر، در این چارچوب تولید فرم تابعی از روابط دانشی استخراج‌شده از معماری سستی است. این هدف از طریق تعریف یک تابع زبان دانش‌محور محقق می‌شود که کیفیت خروجی را بر اساس چهار مؤلفه مکمل ارزیابی می‌کند: مؤلفه بازسازی برای حفظ ویژگی‌های اصلی داده‌ها، مؤلفه تقارن و انسجام فضایی برای حفظ منطق سازمان فضایی، مؤلفه اعتبار توپولوژیک برای کنترل پیوستگی ساختاری شبکه فضایی، و مؤلفه عملکرد حرارتی برای همسوسازی خروجی‌ها با شاخص‌های عملکردی استخراج‌شده از مدل خط پایه.

از منظر روش‌شناختی، این مرحله لایه محاسباتی مصنوع پژوهشی را در چارچوب پژوهش علم طراحی تشکیل می‌دهد. در این لایه، دانش استخراج‌شده از ادبیات، ساختارهای گرافی و شاخص‌های عملکردی در قالب یک منطق محاسباتی منسجم با یکدیگر تلفیق می‌شوند. در نتیجه، شبکه مولد گراف آگاه از دانش به‌عنوان واسطی میان دانش معماری و فرایندهای هوشمند طراحی عمل کرده و بستر لازم را برای تولید، تحلیل و بهینه‌سازی گزینه‌های طراحی فراهم می‌سازد. بنابراین، خروجی این گام یک مدل آموزش‌دیده یا سامانه اجرایی نیست، بلکه معماری مفهومی

یک خط لوله یادگیری عمیق است که نحوه نگاشت ویژگی‌های معماری سنتی به فناوری‌های هوش مصنوعی را تبیین کرده و پیش‌نیازهای لازم برای توسعه و اعتبارسنجی تجربی این چارچوب در پژوهش‌های آینده را فراهم می‌آورد.

۳.۴. گام چهارم: ارزیابی و بهینه‌سازی طراحی‌ها

در گام چهارم، خروجی‌های حاصل از لایه یادگیری عمیق به محیط‌های طراحی و ارزیابی عملکرد منتقل می‌شوند تا امکان تحلیل و مقایسه گزینه‌های پیشنهادی فراهم شود. هدف این مرحله، توسعه یک مدل اجرایی یا ارائه نتایج تجربی نیست، بلکه تبیین سازوکار انتقال خروجی‌های محاسباتی به محیط‌های متداول طراحی و ارزیابی ساختمان است. در این راستا، پژوهش حاضر خط لوله مفهومی بردارسازی معنایی اطلاعات ساختمان را به‌عنوان واسطه میان بازنمایی‌های گراف و مدل‌های قابل استفاده در محیط‌های مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و مدل‌سازی انرژی ساختمان پیشنهاد می‌کند.

در این چارچوب، گراف تولیدشده در مرحله قبل، به‌عنوان ورودی خط لوله در نظر گرفته می‌شود. گره‌های گراف بیانگر عناصر معماری یا زون‌های فضایی و یال‌ها بیانگر روابط فضایی، عملکردی و اقلیمی میان آن‌ها هستند. نخست، با استفاده از قواعد استخراج‌شده در ماتریس نگاشت، ویژگی‌های معنایی هر گره و یال شناسایی و به پارامترهای هندسی و عملکردی متناظر تبدیل می‌شوند. این فرایند موجب می‌شود که اطلاعات اقلیمی و معنایی موجود در ساختار گراف، در زمان تبدیل به مدل‌های هندسی از بین نرود و ارتباط میان دانش معماری و مدل دیجیتال حفظ شود.

پس از ایجاد مدل دیجیتال، مجموعه‌ای از کنترل‌های هندسی و توپولوژیکی بر روی آن اعمال می‌شود تا سازگاری روابط فضایی، پیوستگی اجزای معماری و اعتبار ساختار مدل بررسی گردد. در صورت تأیید این کنترل‌ها، مدل به قالب‌های استاندارد تبادل داده نظیر آی‌اف‌سی^{۳۳}، جی‌بی‌اکس‌ام‌ال^{۳۴} و آی‌دی‌اف^{۳۵} تبدیل شده و قابلیت ورود به محیط‌های تحلیل عملکرد را پیدا می‌کند. این مرحله، نقش واسطه میان بازنمایی‌های محاسباتی و ابزارهای متداول طراحی و شبیه‌سازی را ایفا می‌کند.

در ادامه، مدل‌های تولیدشده از طریق شبیه‌سازی عملکرد ساختمان مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و شاخص‌هایی نظیر شدت مصرف انرژی، بار سرمایشی، شاخص میانگین آرای پیش‌بینی‌شده (آسایش حرارتی) و ساعات عدم آسایش استخراج می‌شوند. این شاخص‌ها با مقادیر مرجع به‌دست‌آمده از مدل خط پایه مقایسه شده و میزان بهبود هر گزینه طراحی مشخص می‌شود. در نهایت، گزینه‌ها بر اساس مجموعه‌ای از معیارهای عملکردی، اقلیمی و سازگاری هندسی رتبه‌بندی می‌شوند.

از دیدگاه رویکرد پژوهش علم طراحی، این مرحله نخستین سطح ارزیابی مصنوع پژوهشی محسوب می‌شود. هدف، اعتبارسنجی تجربی یک سامانه نرم‌افزاری نیست، بلکه نشان دادن آن است که چگونه چارچوب پیشنهادی می‌تواند مسیر انتقال دانش معماری سنتی را تا مرحله ارزیابی عملکردی به‌صورت منسجم سازمان‌دهی کند و زمینه را برای توسعه و آزمون‌های تجربی در پژوهش‌های آینده فراهم آورد.

۳.۵. ترکیب یافته‌ها و توسعه چارچوب مفهومی

گام پنجم به سنتز یافته‌های حاصل از مراحل پیشین و توسعه چارچوب مفهومی نهایی اختصاص دارد. در این مرحله، نتایج حاصل از استخراج دانش معماری، مدل‌سازی دیجیتال، نگاشت به ساختارهای یادگیری عمیق و ارزیابی عملکردی در قالب یک نظام منسجم، یکپارچه می‌شوند تا چارچوب نهایی نگاشت شکل گیرد. هدف این بخش، ارائه یک مدل اجرایی یا الگوریتم جدید نیست، بلکه صورت‌بندی یک ساختار روش‌شناختی است که بتواند مسیر انتقال دانش از معماری سنتی به طراحی محاسباتی را به‌صورت نظام‌مند تبیین کند.

منطق حاکم بر این سنتز بر آن است که ارزش دانش معماری سنتی صرفاً در ویژگی‌های کالبدی عناصر آن خلاصه نمی‌شود، بلکه در روابط عملکردی و اقلیمی میان این عناصر نهفته است. از این‌رو، چارچوب پیشنهادی تلاش می‌کند میان سه لایه اصلی ارتباط برقرار کند: دانش معماری، شاخص‌های عملکردی و مسیرهای محاسباتی. در این ساختار، هر ویژگی معماری ابتدا به یک نقش اقلیمی مشخص مرتبط می‌شود،

سپس به متغیرهای طراحی قابل کنترل و در نهایت به شاخص‌های کمی ارزیابی عملکرد نگاشت می‌شود. این زنجیره، امکان ردیابی مسیر انتقال دانش را از مرحله ساخت ویژگی‌های معماری تا مرحله تحلیل و ارزیابی عملکرد فراهم می‌کند.

فرایند سنتز با بازتحلیل ماتریس نگاشت انجام می‌شود. در این مرحله، ویژگی‌های معماری بر اساس نقش اقلیمی غالب آن‌ها، مانند کنترل تابش، بهبود تهویه طبیعی، افزایش جرم حرارتی یا تعدیل دمای محیط، بازسازمان‌دهی می‌شوند. سپس این ویژگی‌ها به متغیرهای طراحی متناظر، نظیر نسبت حیاط مرکزی، جهت‌گیری ساختمان، عمق سایه‌اندازها، ویژگی‌های پوسته و سازمان فضایی مرتبط شده و ارتباط آن‌ها با شاخص‌های عملکردی نظیر شدت مصرف انرژی، شاخص میانگین آرای پیش‌بینی‌شده (آسایش حرارتی)، بار سرمایشی و ساعات عدم آسایش مشخص می‌شود.

در ادامه، برای هر مسیر ارتباطی، مناسب‌ترین بستر محاسباتی نیز تعیین می‌شود؛ به گونه‌ای که مشخص باشد هر بخش از دانش معماری از طریق کدام ابزار یا روش، اعم از تحلیل گراف، شبیه‌سازی انرژی، شبکه مولد گراف آگاه از دانش یا خط لوله بردارسازی معنایی اطلاعات ساختمان، قابلیت تحلیل و بهره‌برداری دارد.

خروجی این مرحله، چارچوب مفهومی نگاشت دانش معماری سنتی به طراحی پایدار است (شکل ۲)، که به عنوان مصنوع پژوهشی این مطالعه معرفی می‌شود. این چارچوب یک مدل محاسباتی یا نرم‌افزار اجرایی نیست، بلکه ساختاری مفهومی است که روابط میان ویژگی‌های معماری، عملکرد اقلیمی، متغیرهای طراحی، شاخص‌های ارزیابی و فناوری‌های محاسباتی را در قالب یک نظام یکپارچه سازمان‌دهی می‌کند. از دیدگاه رویکرد پژوهش علم طراحی، نوآوری پژوهش حاضر نیز دقیقاً در همین نقطه قرار دارد؛ زیرا به جای توسعه یک الگوریتم جدید، چارچوبی ارائه می‌کند که می‌تواند به عنوان زبان مشترک میان معماری سنتی، طراحی پایدار و هوش مصنوعی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۲. نمودار جریان نگاشت: تدوین: نگارندگان.

در نتیجه، چارچوب پیشنهادی نشان می‌دهد که انتقال دانش معماری سنتی به محیط‌های طراحی هوشمند، یک فرایند خطی و تک‌مرحله‌ای نیست، بلکه زنجیره‌ای از تبدیل‌های دانشی است که از استخراج ویژگی‌های معماری آغاز شده و پس از عبور از بازنمایی داده‌ای، تحلیل عملکردی و مدل‌سازی هوشمند، در نهایت به ارزیابی طراحی منتهی می‌شود. این چارچوب، زیربنای نظری بخش‌های بعدی پژوهش را تشکیل داده و زمینه لازم را برای توسعه، پیاده‌سازی و اعتبارسنجی تجربی مدل‌های پیشنهادی در مطالعات آینده فراهم می‌آورد.

۴. بحث و تحلیل چارچوب

یکی از چالش‌های بنیادین در گفتمان معماری پایدار معاصر، باقی ماندن بخش عمده‌ای از مطالعات معماری سنتی در سطح توصیف‌های تاریخی، تحلیل‌های کیفی و گونه‌شناسی‌های فرمی است. تحلیل چارچوب توسعه‌یافته در این پژوهش نشان می‌دهد که می‌توان این شکاف را از طریق رویکرد پژوهش علم طراحی کاهش داد. در چارچوب پیشنهادی، منطق عملکردی عناصر سنتی مانند حیاط مرکزی، بادگیر و

پوسته‌های جرمی از سطح توصیف‌های کیفی به ساختارهای محاسباتی صریح منتقل می‌شود. این رویکرد سبب می‌شود تمرکز پژوهش از بازنمایی صرف کالبد عناصر تاریخی، به استخراج منطق عملکردی آن‌ها معطوف گردد. بر همین اساس، ارزش علمی چارچوب پیشنهادی در ایجاد زنجیره‌ای منسجم میان ویژگی‌های معماری، نقش‌های اقلیمی، متغیرهای طراحی، شاخص‌های عملکردی و مسیرهای محاسباتی نهفته است؛ زنجیره‌ای که امکان ردیابی تصمیمات طراحی را از منشأ دانش معماری سستی تا مرحله ارزیابی عملکرد فراهم می‌سازد و دانش ضمنی معماری سستی را به مجموعه‌ای از روابط ساختار یافته با قابلیت استفاده در محیط‌های طراحی دیجیتال و سامانه‌های هوشمند تبدیل می‌کند.

از منظر علوم داده و محاسبات، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که بسیاری از رویکردهای رایج یادگیری عمیق در معماری، اگرچه در استخراج الگوهای آماری و تولید گزینه‌های طراحی موفق بوده‌اند، اما معمولاً سازوکاری صریح برای بازنمایی روابط عملکردی و منطق اقلیمی معماری ارائه نمی‌کنند. در مدل‌های مولدی نظیر شبکه‌های مولد تخصصی، خودرگردهای تغییرپذیر و مدل‌های انتشار، یادگیری عمدتاً بر پایه شباهت‌های آماری میان داده‌های آموزشی انجام می‌شود و بنابراین خروجی‌ها لزوماً تضمین‌کننده اعتبار اقلیمی یا انسجام توپولوژیک نیستند. چارچوب پیشنهادی با اتخاذ رویکرد هوش مصنوعی دانش محور و ساختار آگاه تلاش می‌کند این محدودیت را کاهش دهد. در این رویکرد ساختمان نه صرفاً مجموعه‌ای از اشکال هندسی، بلکه شبکه‌ای از روابط فضایی، عملکردی و اقلیمی است که در قالب گراف‌های معماری بازنمایی می‌شود. از این رو، ساختار مفهومی شبکه مولد گراف آگاه از دانش با هدف حفظ منطق فضایی و عملکردی معماری در فرایند یادگیری پیشنهاد شده است، نه صرفاً برای تولید فرم‌های جدید.

یکی از نوآوری‌های مفهومی چارچوب پیشنهادی، استفاده از دانش معماری در تعریف تابع زیان مدل است. در این چارچوب، معیار بهینه‌سازی تنها کاهش خطای بازسازی داده‌ها نیست، بلکه مؤلفه‌هایی مانند حفظ ویژگی‌های اولیه، کنترل تقارن و انسجام فضایی، اعتبار توپولوژیک و انطباق با شاخص‌های عملکرد حرارتی نیز در فرایند یادگیری لحاظ می‌شوند. بدین ترتیب، فضای نهفته مدل تنها بر اساس تشابه هندسی شکل نمی‌گیرد، بلکه دانش اقلیمی و روابط فضایی نیز در فرایند یادگیری نقش فعال دارند. این رویکرد، مفهوم تولید خودکار فرم را به سمت طراحی عملکردمحور مبتنی بر دانش سوق می‌دهد و می‌تواند مبنایی برای توسعه سامانه‌های هوشمند طراحی اقلیم‌پاسخ در پژوهش‌های آینده باشد. چالش مهم دیگر، فاصله میان خروجی‌های انتزاعی مدل‌های یادگیری عمیق و محیط‌های حرفه‌ای طراحی و تحلیل ساختمان است. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که خط لوله مفهومی بردارسازی معنایی اطلاعات ساختمان می‌تواند این فاصله را به‌عنوان یک لایه واسط کاهش دهد. در این چارچوب، گراف‌های تولیدشده توسط شبکه مولد گراف آگاه از دانش، با حفظ اطلاعات معنایی، روابط فضایی و نقش‌های اقلیمی، به مدل‌های هندسی و پارامتریک قابل استفاده در محیط‌های مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و مدل‌سازی انرژی ساختمان تبدیل می‌شوند. سپس این مدل‌ها وارد محیط‌های شبیه‌سازی شده و شاخص‌هایی مانند شدت مصرف انرژی، بار سرمایشی و شاخص‌های آسایش حرارتی محاسبه می‌شوند. این فرایند، امکان ارزیابی گزینه‌های طراحی را بر مبنای شاخص‌های کمی و تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد عملکردی فراهم می‌آورد. از دیگر جنبه‌های مهم چارچوب پیشنهادی، قابلیت تعمیم آن است. این چارچوب بر انتقال مستقیم عناصر تاریخی یا بازتولید فرم‌های سستی استوار نیست، بلکه منطق عملکردی آن‌ها را استخراج و به روابط و قیود قابل استفاده در محیط‌های محاسباتی تبدیل می‌کند. برای مثال، عملکرد اقلیمی حیاط مرکزی یا نقش بادگیر در هدایت جریان هوا، به‌جای آنکه به‌عنوان الگوهای کالبدی ثابت در نظر گرفته شوند، در قالب متغیرهای طراحی و روابط عملکردی بازنمایی می‌شوند. این رویکرد امکان بهره‌گیری از دانش معماری سستی را در پروژه‌های معاصر، بدون وابستگی به بازتولید شکلی عناصر تاریخی، فراهم می‌کند.

در عین حال، چارچوب پیشنهادی با محدودیت‌هایی نیز همراه است. مهم‌ترین محدودیت، وابستگی آن به کیفیت استخراج و صورت‌بندی دانش معماری است؛ زیرا هرگونه ساده‌سازی در روابط پیچیده میان ویژگی‌های کالبدی، رفتارهای اقلیمی و عملکرد ساختمان می‌تواند بر دقت نگاشت‌های بعدی اثر بگذارد. همچنین، مؤلفه‌های پیشنهادی (شبکه مولد گراف و خط لوله بردارسازی معنایی) در این پژوهش صرفاً به‌عنوان ساختارهای مفهومی معرفی شده‌اند و ارزیابی تجربی آن‌ها نیازمند توسعه نرم‌افزاری، آموزش با مجموعه داده‌های گسترده و آزمون در پروژه‌های واقعی است. با وجود این، تحلیل‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که چارچوب نگاشت پیشنهادی می‌تواند ارتباطی نظام‌مند میان دانش معماری

ستتی، طراحی پایدار و فناوری‌های هوش مصنوعی برقرار کرده و دانش معماری ستتی را از سطح توصیف‌های تاریخی به ساختارهایی قابل استفاده در محیط‌های طراحی دیجیتال و مدل‌های یادگیری عمیق ارتقا دهد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

پژوهش حاضر با هدف ارائه یک چارچوب مفهومی و روش‌شناختی برای انتقال دانش زیست‌اقليمی معماری ستتی ایران به فرایند طراحی معماری نوین و پایدار انجام شد. با بهره‌گیری از رویکرد پژوهش علم طراحی، چارچوبی چندلایه توسعه یافت که مسیر نگاشت ویژگی‌های معماری ستتی به متغیرهای طراحی، شاخص‌های عملکردی و ساختارهای محاسباتی را به‌صورت منسجم تبیین می‌کند. نوآوری اصلی پژوهش در ارائه یک مصنوع پژوهشی است که میان دانش معماری ستتی، اصول طراحی پایدار و ظرفیت‌های یادگیری عمیق ارتباطی نظام‌مند برقرار می‌سازد، بدون آنکه ادعایی درباره توسعه یا اعتبارسنجی یک سامانه اجرایی داشته باشد.

چارچوب پیشنهادی نشان می‌دهد که عناصر معماری ستتی را می‌توان فراتر از الگوهای کالبدی، به‌عنوان مجموعه‌ای از قواعد عملکردی و اقلیمی در نظر گرفت که قابلیت بازنمایی داده‌ای و استفاده در محیط‌های طراحی محاسباتی را دارند. در این راستا، ساختار مفهومی شبکه مولد گراف آگاه از دانش برای نگاشت روابط فضایی، توپولوژیک و اقلیمی به مدل‌های یادگیری عمیق، و خط لوله بردارسازی معنایی اطلاعات ساختمان برای برقراری ارتباط میان بازنمایی‌های محاسباتی و محیط‌های مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و مدل‌سازی انرژی ساختمان معرفی شدند تا زنجیره انتقال دانش از معماری ستتی به طراحی هوشمند به‌صورت یکپارچه تبیین شود.

با وجود این، چارچوب ارائه‌شده در سطح مفهومی باقی مانده و اعتبارسنجی عملی آن مستلزم توسعه نرم‌افزاری، ایجاد پایگاه‌های داده استاندارد و اجرای مطالعات تجربی در پروژه‌های واقعی است. همچنین، تمرکز پژوهش بر معماری اقلیم گرم و خشک ایران، تعمیم چارچوب به سایر اقلیم‌ها را نیازمند استخراج دانش بومی متناسب با همان شرایط می‌سازد. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، پایگاه‌های داده جامع از گونه‌های مختلف معماری ستتی ایران توسعه یافته و مؤلفه‌های یادشده در قالب نمونه‌های نرم‌افزاری پیاده‌سازی شده و در ارتباط با محیط‌هایی مانند مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، انرژی‌پلاس و دی‌زاین‌بیلدر ارزیابی شوند. همچنین، تلفیق این چارچوب با روش‌هایی نظیر بهینه‌سازی چندهدفه، یادگیری تقویتی، همزادهای دیجیتال^{۴۶} و تحلیل چرخه عمر ساختمان می‌تواند زمینه توسعه نسل جدید سامانه‌های هوشمند طراحی اقلیم‌پاسخ را فراهم سازد.

۶. دستاورد پژوهش

این پژوهش با بهره‌گیری از رویکرد پژوهش علم طراحی، یک چارچوب روش‌شناختی برای نگاشت دانش زیست‌اقليمی معماری ستتی ایران به فرایند طراحی معماری نوین و پایدار مبتنی بر یادگیری عمیق ارائه می‌کند. نوآوری اصلی پژوهش، سازمان‌دهی نظام‌مند ارتباط میان ویژگی‌های معماری، متغیرهای طراحی، شاخص‌های عملکردی و ساختارهای محاسباتی در قالب یک چارچوب مفهومی یکپارچه است. این چارچوب با معرفی مفاهیم شبکه مولد گراف آگاه از دانش و خط لوله بردارسازی معنایی اطلاعات ساختمان، بستری نظری برای توسعه سامانه‌های هوشمند طراحی، مدل‌های دانش‌محور و طراحی اقلیم‌پاسخ فراهم می‌سازد. همچنین، نتایج پژوهش می‌تواند مبنایی برای توسعه، پیاده‌سازی و اعتبارسنجی تجربی این چارچوب در مطالعات آینده و گسترش کاربرد هوش مصنوعی در معماری پایدار باشد.

ملاحظات اخلاقی و اطلاعات تکمیلی

برگرفته از رساله: این مقاله برگرفته از رساله دکتری معماری محسن رنجبر زینالی با عنوان: «بازآفرینی معماری پایدار در اقلیم گرم و خشک ایران: به هنگام سازی راهبردهای معماری سستی ایرانی با استفاده از یادگیری عمیق» است که با راهنمایی دکتر سید رحمان قیابی و مشاوری دکتر یوسف گرچی مهلبانی در دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) در حال انجام می باشد.

حمایت مالی: این پژوهش هیچ بودجه خارجی دریافت نکرده است.

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می دارند که هیچ گونه تعارض منافع شخصی، مالی یا حرفه‌ای در رابطه با پژوهش حاضر و انتشار این مقاله ندارند.

استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی: نویسندگان در این پژوهش از ابزار چت‌جی‌پی‌تی^{۴۷} صرفاً برای ویرایش زبانی متن استفاده کرده‌اند. تمامی نویسندگان مسئولیت نهایی محتوای تولید شده و صحت مطالب علمی ارائه شده در این مقاله را بر عهده دارند و تأیید می کنند که استفاده از این ابزار با اصول اخلاقی پژوهشی و سیاست‌های این نشریه همخوانی دارد.

پی‌نوشت

1. Design Science Research (DSR)
2. Knowledge-Informed Graph Generative Network (KIGGN)
3. Building Information Semantic Vectorization Pipeline (BISVP)
4. Research Artifact
5. Building Energy Modeling (BEM)
6. Building Information Modeling (BIM)
7. Generative Adversarial Network (GAN)
8. Variational Autoencoder (VAE)
9. Scientific Information Database (SID)
10. Google Scholar
11. Web of Science
12. ScienceDirect
13. SpringerLink
14. IEEE Xplore
15. Pandas
16. NumPy
17. Scikit-learn
18. TensorFlow
19. Keras
20. PyTorch
21. PyTorch Geometric
22. NetworkX
23. OpenCV
24. Convolutional Neural Networks (CNN)
25. Vision Transformer
26. Autoencoder
27. Graph Neural Network (GNN)
28. Graph Autoencoder
29. Graph Transformer
30. Deep Neural Network (DNN)
31. Long Short-Term Memory (LSTM)
32. Transformer
33. Diffusion Models
34. Architectural Feature Matrix (X_{feat})
35. Mapping Matrix (M_{map})
36. Architectural Graph (G_{arch})
37. EnergyPlus Weather File (EPW)
38. Energy Use Intensity (EU_{base})
39. Cooling Load Peak (CL_{peak})
40. Predicted Mean Vote (PMV_{base})
41. Operative Temperature (T_{op})
42. Tensor
43. Industry Foundation Classes (IFC)
44. Green Building XML (gbXML)
45. Input Data File (IDF)
46. Digital Twins
47. ChatGPT

منابع

- احمدی، زهرا. (۱۳۹۱). بازخوانی نقش گمشده حیاط مرکزی در دستیابی به معماری پایدار. *نشریه شهر و معماری بومی*، ۲، ۴۹-۶۲.
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26453711.1391.2.2.2.4>
- رئیس، عاطفه، و کشاورز، محسن. (۱۴۰۲). بررسی تأثیر تناسب پلان معماری بر سرعت و دمای جریان باد در تهویه طبیعی بادگیرها؛ مطالعه موردی: شهر کرمان. *مسکن و محیط روستا*، ۴۲ (۱۸۳)، ۳۳-۴۶.
<https://doi.org/10.22034/42.183.47>
- عالمی، بابک، ممتحن، مهدی، و نادری قمی، مرضیه. (۱۴۰۲). بررسی نقش مصالح بومی در بناهای سنتی شهر کاشان از منظر پایداری زیست‌محیطی. *مطالعات معماری ایران*، ۱۲ (۲۴)، ۱۹۳-۲۱۳.
<https://doi.org/10.22052/jias.2024.252656.1185>
- قبادیان، وحید. (۱۳۹۳). *بررسی اقلیمی/بنیه سنتی ایران*. انتشارات دانشگاه تهران.
- مهدوی‌نژاد، محمد جواد، و کیا، آنوشا. (۱۳۹۸). معاصر سازی پوسته‌های سنتی شبک معماری ایرانی، جهت بهینه‌سازی دریافت نور و انرژی؛ نمونه مطالعاتی: بناهای اداری تهران. *نشریه معماری اقلیم گرم و خشک*، ۷ (۹)، ۵۶-۷۲.
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26453711.1398.7.9.4.3>
- Abbasi Harofteh, M., & Sadeghian, A. (2020). Spatial patterns of neighborhoods in the historic city of Yazd: Determinants, architectural solutions and principles of neighborhood architecture. *Bagh-e Nazar*, 16(80), 5-16. <https://doi.org/10.22034/bagh.2020.133330.3592>
- Bekleyen, A., & Melikoğlu, Y. (2021). An investigation on the thermal effects of windcatchers. *Journal of Building Engineering*, 34, 101942. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101942>
- Boukheikh, I., Boudjadja, R., Bensid, I., & Makhoulfi, A. W. (2023). Numerical simulation of traditional bioclimatic strategies for enhanced thermal comfort in hot and arid climate. *IJTPE Journal*, ISSN 2077-3528.
- Chen, Y., Gong, W., Obrecht, C., & Kuznik, F. (2025). A review of machine learning techniques for building electrical energy consumption prediction. *Energy and AI*, 21, 100518. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2025.100518>
- Duran, A., Waibel, C., Piccioni, V., Bickel, B., & Schlueter, A. (2025). A review on artificial intelligence applications for facades. *Building and Environment*, 269, 112310. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112310>
- El Azhary, K., Ouakarrouch, M., Laaroussi, N., & Garoum, M. (2021). Energy efficiency of a vernacular building design and materials in hot arid climate: Experimental and numerical approach. *International Journal of Renewable Energy Development*, 10(3), 481-494. <https://doi.org/10.14710/ijred.2021.35310>
- Eldemery, I. M. (2010). Sustainable architectural design: Reviving traditional design and adapting modern solutions. *International Journal of Architectural Research: Archnet-IJAR*, 4(1), 99-110. <https://doi.org/10.26687/archnet-ijar.v4i1.65>
- Heidari, A., Sahebzadeh, S., & Dalvand, Z. (2017). Natural ventilation in vernacular architecture of Sistan, Iran; Classification and CFD study of compound rooms. *Sustainability*, 9(6), 1048. <https://doi.org/10.3390/su9061048>
- Hu, S., Wu, W., Wang, Y., Xu, B., & Zheng, L. (2024). GSDiff: Synthesizing vector floorplans via geometry-enhanced structural graph generation. *arXiv preprint arXiv:2408.16258v2*. <https://doi.org/10.1609/aaai.v39i16.33904>
- Li, P., Yin, J., Zhong, J., Luo, R., Zeng, P., & Zhang, M. (2025). Segment any architectural facades (SAAF): An automatic segmentation model for building facades, walls and windows based on multimodal semantics guidance. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.09071>

- Liu, H., Xu, Y., Zhang, J., Zhu, J., Li, Y., & Hoi, S. C. H. (2020). DeepFacade: A deep learning approach to facade parsing with symmetric loss. *IEEE Transactions on Multimedia*, 22(12), 3153–3165. <https://doi.org/10.1109/TMM.2020.2971431>
- Lu, Y., Wei, W., Li, P., Zhong, T., Nong, Y., & Shi, X. (2023). A deep learning method for building façade parsing utilizing improved SOLOv2 instance segmentation. *Energy & Buildings*, 295, 113275. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113275>
- Mohammed, A. B. (2025). Integrating environmental treatments into building design processes in the dry hot Egyptian climate. *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*, 20(74), 315–337. <https://doi.org/10.21608/aej.2025.333821.1728>
- Mousa, W. A. Y. (2016). *Potential of vernacular architecture for an integrated model for passive design in hot-arid climate* [Doctoral dissertation, Technische Universität München].
- Negev, M., Khreis, H., Rogers, B. C., Shaheen, M., & Erell, E. (2020). Healthy dry cities: City design for health and resilience in hot and dry climates. *BMJ*, 371, m3000. <https://doi.org/10.1136/bmj.m3000>
- Qtaishat, Y. (2021). *Integrated eco-cultural architecture framework for sustainable housing design in Jordan* [PhD thesis, University of Bath].
- Rabani, M., Alafzadeh, M., & Rabani, M. (2025). Performance evaluation of ceiling cooling with PCM in the hot-dry climate of Yazd, Iran: An experimental analysis of energy, environmental, and economic impacts. *Buildings*, 15(2), 198. <https://doi.org/10.3390/buildings15020198>
- Sadeghi, N., Gorji Mahlabani, Y., & Nazif, H. R. (2021). Numerical investigation on thermal performance of a wind catcher for natural ventilation in hot and dry climate. *Journal of Renewable and New Energy*, 8(1), 33–40. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24234931.1400.8.1.4.8>
- Salameh, M., & Touqan, B. (2024). Designing climate-adaptive buildings: Impact of courtyard geometry on microclimates in hot, dry environments. *Civil Engineering Journal*, 10(8). <https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-08-017>
- Schönfelder, P., Stebel, F., Andreou, N., & König, M. (2024). Deep learning-based text detection and recognition on architectural floor plans. *Automation in Construction*, 157, 105156. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105156>
- Shojaei, T., & Mokhtar, A. (2024). Forecasting energy consumption with a novel ensemble deep learning framework. *Journal of Building Engineering*, 96, 110452. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2024.110452>
- Wang, B., Zhang, J., Zhang, R., Li, Y., Li, L., & Nakashima, Y. (2024). Improving facade parsing with vision transformers and line integration. *Advanced Engineering Informatics*, 60, 102463. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102463>
- Watson, D., & Labs, K. (1983). *Climatic design: Energy-efficient building principles and practices*. McGraw-Hill.
- Wu, T., & Ng, E. (2021). Artificial intelligence for sustainable architectural design. *Frontiers of Architectural Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ynxs.2025.100100>
- Xu, Z., Jha, N., Mehadi, S., & Mandal, M. (2024). Multiscale object detection on complex architectural floor plans. *Automation in Construction*, 165, 105486. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105486>
- Yang, Y., Duan, Q., & Samadi, F. (2025). A systematic review of building energy performance forecasting approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 223, 116061. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116061>

Zhang, M., Du, Y., Hu, Z., Liu, Q., & Wang, Y. (2023). BISVP: Building footprint extraction via bidirectional serialized vertex prediction. In *ICASSP 2023-2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.00300>