



Journal of

Architectural and Environmental

Research



DOI: 10.30470/jaer.2026.2090971.1223

An Integrated Analysis of the Spatial Coherence of Traditional Iranian Schools: Combining Space Syntax and Sectional-Three-Dimensional Interpretation Using Visibility Graph Analysis (VGA) in Eight Historic Schools

Milad Olfat¹ * Mahnaz Rezaei

1. Assistant Professor, Department of Art Education, Farhangian University, Tehran, Iran. m.olfat@cfu.ac.ir

2. Assistant Professor, Department of Art and Architecture, Khatam University, Tehran, Iran.

ma.rezaei@khatam.ac.ir

Research / Review Article

Abstract

*Corresponding Author:

Milad Olfat
m.olfat@cfu.ac.ir

Received: 2026/01/07

Accepted: 2026/03/06

Keywords: Space Syntax, Traditional Iranian Schools, Connectivity, Visual Integration, Visual Control.

This study aims to elucidate the spatial coherence of traditional Iranian schools through the integration of two-dimensional space syntax analysis with the evaluation of sectional and three-dimensional spatial components. The research adopts an analytical-comparative approach, examining eight historical schools through Visibility Graph Analysis (VGA). In the first stage, the spatial syntax indicators, including visual connectivity, visual integration, control, mean depth, and intelligibility, were extracted using Depthmap software. In the second stage, physical -sectional and morphological-components, including courtyard enclosure ratio, vertical hierarchy, façade permeability, number of floors, spatial covering systems, and vertical visual axes, were measured or estimated based on plans, sections, elevations, and physical information of the selected cases. Subsequently, the results of the two analytical levels were compared and interpreted through an integrated matrix. The findings indicate that the central courtyard is the primary organizing element of visual and movement relationships in all examined cases, while two-dimensional analysis alone is insufficient to fully explain spatial experience. Among the studied samples, Khan School in Shiraz demonstrated the highest configurational coherence, with a mean visual integration value of 16.82 and an intelligibility coefficient of 0.97. The sectional and three-dimensional analysis further revealed that courtyard centrality is not solely dependent on horizontal plan relationships but is also associated with the height-to-width ratio of the courtyard, the hierarchy between chambers, arcades, iwans, and teaching spaces, the degree of façade openness, and the structural characteristics of major covered spaces. Khan School, with an approximate vertical hierarchy index of 1.82 and greater façade openness, showed the strongest convergence between horizontal plan centrality and the vertical emphasis created by its iwans. Conversely, in Aqa Bozorg School in Kashan, the approximate vertical hierarchy index of 2.43, together with the domed chamber, elevated iwan, and differences in courtyard levels, contributed to compensating for certain limitations in plan-based intelligibility. The results demonstrate that integrating space syntax analysis with the assessment of height, enclosure, openness, level differences, and roof structures provides a more comprehensive framework for understanding the spatial organization of traditional Iranian schools.

Cite this article: Olfat, M., & Rezaei, M. (2026). An Integrated Analysis of the Spatial Coherence of Traditional Iranian Schools: Combining Space Syntax and Sectional-Three-Dimensional Interpretation Using Visibility Graph Analysis (VGA) in Eight Historic Schools. *Journal of Architectural and Environmental Research*, 3 (5), 90-112. <https://doi.org/10.30470/jaer.2026.2090971.1223>



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

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

Authors

University of Zanjan



تحلیل تلفیقی انسجام فضایی مدارس سستی ایران: ترکیب نحو فضا و خوانش مقطعی - سهبعدی در هشت مدرسه تاریخی با استفاده از تحلیل گراف دید (VGA)

میلاذ الفت^{۱*}، مهناز رضائی^۲

۱. استادیار، گروه آموزش هنر، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران. رایانامه: m.olfat@cfu.ac.ir

۲. استادیار، گروه هنر و معماری، دانشگاه خاتم، تهران، ایران. رایانامه: ma.rezaei@khatam.ac.ir

مقاله پژوهشی

چکیده:

این پژوهش با هدف تبیین انسجام فضایی مدارس سستی ایران از طریق تلفیق تحلیل دوبعدی نحو فضا با ارزیابی مؤلفه‌های مقطعی و سهبعدی انجام شد. روش پژوهش، تحلیلی-تلفیقی است و در آن هشت مدرسه تاریخی با استفاده از تحلیل گراف دید (VGA) مورد بررسی قرار گرفتند. در مرحله نخست شاخص‌های اتصال بصری، یکپارچگی بصری، کنترل، عمق میانگین و خوانایی با استفاده از نرم‌افزار دپس‌مپ استخراج شدند. در مرحله دوم، مؤلفه‌های کالبدی شامل نسبت محصوریت حیاط، سلسله‌مراتب ارتفاعی، میزان گشودگی جداره‌ها، تعداد طبقات، نوع پوشش فضاها و محورهای دید عمودی بر اساس پلان‌ها، مقاطع، نماها و اطلاعات کالبدی اندازه‌گیری یا برآورد شدند. سپس نتایج دو سطح تحلیل در قالب یک ماتریس تلفیقی مقایسه و تفسیر گردیدند. یافته‌های پژوهش نشان داد که حیاط مرکزی در تمامی نمونه‌ها مهم‌ترین عنصر سازمان‌دهنده روابط دیداری و حرکتی است و تحلیل صرفاً دوبعدی برای تبیین کامل تجربه فضایی کافی نیست. در میان نمونه‌ها، مدرسه خان شیراز با میانگین یکپارچگی بصری ۱۶/۸۲ و ضریب خوانایی ۰/۹۷، بیشترین انسجام پیکربندی را نشان داد. تحلیل مقطعی و سهبعدی نیز مشخص کرد که مرکزیت حیاط تنها به روابط افقی پلان وابسته نیست، بلکه با نسبت ارتفاع به عرض حیاط، سلسله‌مراتب میان حجره رواق، ایوان و مدرس، میزان گشودگی جداره‌ها و ساختار پوشش فضاهای اصلی ارتباط دارد. مدرسه خان با شاخص تقریبی سلسله‌مراتب ارتفاعی ۱/۸۲ و گشودگی بیشتر جداره‌ها، بیشترین همگرایی میان مرکزیت افقی پلان و تأکید عمودی ایوان‌ها را نشان داد. در مقابل، در مدرسه آقا بزرگ کاشان، شاخص تقریبی سلسله‌مراتب ارتفاعی ۲/۴۳، گنبدخانه، ایوان مرتفع و اختلاف تراز صحن‌ها بخشی از محدودیت‌های خوانایی پلان را جبران کردند. نتایج نهایی بیانگر آن است که تلفیق تحلیل نحو فضا با ارزیابی ویژگی‌های ارتفاعی، محصوریت گشودگی، اختلاف تراز و ساختار سقف‌ها، چارچوب جامع‌تری برای درک سازمان فضایی مدارس سستی ایران فراهم می‌کند.

* نویسنده مسئول:

میلاذ الفت

ایمیل: m.olfat@cfu.ac.ir

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷

انتشار مقاله: ۱۴۰۴/۱۲/۱۵

واژگان کلیدی:

نحو فضایی، مدارس سستی ایران، اتصال‌پذیری، یکپارچگی بصری، کنترل بصری.



پدیدآورندگان



مقدمه

مدارس سستی ایران بازتاب سازمان فضایی منسجمی هستند که بر پایه تعامل اقلیم، فرهنگ و نظام‌های اجتماعی-آموزشی شکل گرفته‌اند و مفاهیمی مانند درون‌گرایی، حریم و سلسله‌مراتب فضایی در آن‌ها نقش اساسی دارند (Memarian, 1994). در این بناها، دسترسی مفهومی چندبعدی دارد و علاوه بر حرکت فیزیکی، ابعاد ادراکی، اجتماعی و بصری را نیز شامل می‌شود (Rapoport, 1969). با تغییر الگوهای آموزشی و کالبدی، بخشی از این کیفیت‌های فضایی در مدارس معاصر کاهش یافته و ضرورت بازنگری در اصول طراحی فضاهای آموزشی مطرح شده است. در نظریه نحو فضا^۱، دسترسی شامل ابعاد فیزیکی، بصری و شناختی است و از طریق شاخص‌هایی مانند اتصال^۲، یکپارچگی^۳، کنترل بصری^۴، آنتروپی^۵ و عمق میانگین^۶ قابل تحلیل است (Hillier & Hanson, 1984; Turner et al., 2001). توسعه ابزارهای دیجیتال، به‌ویژه دپس‌مپ، امکان سنجش این شاخص‌ها را در مقیاس معماری فراهم کرده است (Askarizad et al., 2024). در این میان، تحلیل گراف دید^۷ (VGA) با شبیه‌سازی میدان‌های دید، برای ارزیابی روابط بصری، خوانایی فضایی و کنترل دیداری مورد استفاده قرار می‌گیرد (Turner et al., 2001; Varoudis & Psarra, 2014). در این چارچوب، شاخص‌هایی مانند اتصال بصری، یکپارچگی بصری و آنتروپی فضایی؛ میزان عدم قطعیت یا تنوع در الگوی توزیع روابط دیداری فضا به‌عنوان معیارهایی برای سنجش تجربه شناختی کاربر از فضا معرفی شده‌اند (Koutsolampros et al., 2019; Peponis & Lu, 2014). مطالعات نشان می‌دهند افزایش اتصال بصری با خوانایی بیشتر فضا و کاهش آنتروپی با کنترل دیدی مؤثرتر همراه است (Zhang & Chiaradia, 2020). باین‌حال، استفاده صرف از نحو فضا در تحلیل معماری با محدودیت‌هایی همراه است؛ زیرا تبدیل فضا به شبکه روابط دیداری و دسترسی، برخی ویژگی‌های هندسی و ادراکی مانند ارتفاع، تناسب مقطع، شکل سقف، گشودگی جداره‌ها، محصوریت و جهت‌گیری عمودی دید را به‌طور کامل بازنمایی نمی‌کند. همدانی گلشن (۱۳۹۴)، راستجو و بمانیان (۱۳۹۸) و فرشیدی و همکاران (۱۴۰۱) نیز بر محدودیت بازنمایی توپولوژیک و ضرورت توجه به مؤلفه‌های هندسی و کیفی فضا تأکید کرده‌اند. با وجود گسترش کاربرد نحو فضا در مطالعات معماری و شهری (Yamu & van Nes, 2021)، پژوهش‌های کمی و تطبیقی درباره مدارس تاریخی ایران، به‌ویژه مطالعاتی که تحلیل گراف دید را با مؤلفه‌های مقطعی و سه‌بعدی تلفیق کنند، محدود است (Heidari & Kiaei, 2023). بیشتر مطالعات معماری سستی ایران بر خانه‌های حیاطدار، حریم و توالی دسترسی تمرکز داشته‌اند (Golshan, 2019; Zamani et al., 2020; Zolfagharkhani & Ostwald, 2021). در حالی که پژوهش‌های بین‌المللی بیشتر به فضاهای کاری، شهری و بافت‌های تاریخی پرداخته‌اند (Koutsolampros et al., 2019; Garau, 2023; Askarizad et al., 2024). در معماری مدارس سستی ایران، انسجام فضایی تنها حاصل سازمان افقی پلان نیست، بلکه تناسب ارتفاعی حیاط، سلسله‌مراتب میان حجره، رواق، ایوان و مدرس، گشودگی جداره‌ها، اختلاف تراز و ساختار پوشش فضاها نیز در تجربه فضایی نقش دارند. مطالعات تحلیل دید سه‌بعدی نیز نشان داده‌اند که تغییر ارتفاع عناصر می‌تواند روابط دیداری را حتی در شرایط مشابه پلان تغییر دهد. از این‌رو، پژوهش حاضر نحو فضا را به‌عنوان لایه نخست تحلیل در نظر گرفته و آن را با ارزیابی مؤلفه‌های مقطعی و سه‌بعدی هشت مدرسه تاریخی تلفیق می‌کند. نوآوری پژوهش در ارائه چارچوبی تطبیقی برای بررسی همگرایی، تکمیل یا واگرایی میان مرکزیت نحوی پلان و کیفیت‌های ارتفاعی و حجمی بناهاست.

پرسش‌های پژوهش

۱. مؤلفه‌های مقطعی و سه‌بعدی، شامل نسبت ارتفاع به عرض حیاط، میزان محصوریت، سلسله‌مراتب ارتفاعی، گشودگی جداره‌ها و ساختار سقف‌ها، در نمونه‌های مورد مطالعه چه تفاوت‌هایی دارند؟
۲. الگوی سازماندهی فضایی و دیداری هشت مدرسه تاریخی ایران بر اساس شاخص‌های اتصال بصری، یکپارچگی بصری، کنترل بصری، عمق میانگین و خوانایی چگونه است؟
۳. چه رابطه‌ای میان شاخص‌های دوبعدی نحو فضا و مؤلفه‌های مقطعی-سه‌بعدی مدارس وجود دارد و این رابطه چه ظرفیت‌هایی برای تبیین اصول فضایی قابل استفاده در طراحی مدارس معاصر ایران دارد؟

روش شناسی پژوهش

پژوهش حاضر با رویکرد تحلیلی-تلفیقی و چارچوب تلفیقی کمی-کیفی در سه مرحله شامل تحلیل دوبعدی پیکره‌بندی، تحلیل مقطعی-سه‌بعدی و تلفیق نتایج انجام شد. در مرحله نخست، پلان طبقه اصلی هشت مدرسه تاریخی پس از یکسان‌سازی مقیاس و اصلاح محدوده‌های مؤثر بر میدان دید، در نرم‌افزار دپس‌مپ تحلیل شد. انتخاب نمونه‌های مورد مطالعه بر اساس هدف پژوهش و با رویکرد نمونه‌گیری هدفمند انجام شد. معیارهای انتخاب شامل تعلق بناها به دوره معماری سنتی ایران، برخورداری از سازمان فضایی مدرسه-حیاط مرکزی، امکان دسترسی به نقشه‌ها، مقاطع، نماها و اطلاعات کالبدی معتبر، و قابلیت بازسازی مدل فضایی برای تحلیل گراف دید بود. با توجه به محدودیت دسترسی به مدارک معماری کامل برخی مدارس تاریخی، نمونه‌هایی انتخاب شدند که از اسناد و منابع معتبر معماری و مطالعات پیشین برخوردار بودند. بنابراین، یافته‌های پژوهش در چارچوب مدارس تاریخی منتخب قابل تفسیر بوده و تعمیم آن به سایر مدارس نیازمند بررسی نمونه‌های بیشتر و مطالعات تکمیلی است. لازم به ذکر است که تمامی نقشه‌های مورد استفاده برای تحلیل گراف دید بر اساس مقیاس واقعی بناها و با واحد متر در محیط نرم‌افزار دپس‌مپ تنظیم شدند. داده‌های هندسی شامل ابعاد پلان، فاصله‌ها و محدوده‌های فضایی با مقیاس واقعی وارد نرم‌افزار شده و سپس شاخص‌های نحوی استخراج شدند. شاخص‌های حاصل از تحلیل نحو فضا، مانند اتصال بصری، یکپارچگی بصری، کنترل، عمق میانگین و خوانایی، ماهیت نسبتی داشته و فاقد واحد مستقل هستند. نمونه‌های پژوهش با روش نمونه‌گیری هدفمند انتخاب شدند و نماینده آماری تمامی مدارس تاریخی ایران نیستند. معیارهای انتخاب شامل کاربری آموزشی تاریخی، حفظ الگوی اصلی سازمان فضایی، وجود حیاط مرکزی، تنوع جغرافیایی و کالبدی، سلامت نسبی پلان، محدود بودن مداخلات، و دسترسی به مدارک معتبر شامل پلان، مقطع، نما و اطلاعات ارتفاعی بود. همچنین امکان بازترسیم دقیق، تشخیص مرز فضاها و اجرای تحلیل همسان در دپس‌مپ از معیارهای انتخاب محسوب شد. نمونه‌هایی با مدارک ناقص، مقیاس نامعتبر، تخریب یا تغییرات گسترده، یا فقدان اطلاعات مقطعی و ارتفاعی کافی حذف شدند. بنابراین، نتایج پژوهش مستقیماً ناظر بر هشت نمونه منتخب است و تعمیم آن به سایر مدارس سنتی ایران نیازمند مطالعات تکمیلی است. فضاها یا تخریب‌شده، تغییر یافته یا غیرقابل دسترسی در زمان برداشت اطلاعات، به دلیل فقدان امکان بازسازی دقیق شرایط کالبدی اولیه، از مدل تحلیل کنار گذاشته شدند. با این حال، بررسی و تحلیل این بخش‌ها در صورت دسترسی به مدارک مستند تاریخی و امکان بازسازی مدل فضایی، می‌تواند در پژوهش‌های آتی با استفاده از ابزارهایی مانند دپس‌مپ و سایر روش‌های تحلیل فضایی مورد توجه قرار گیرد. تحلیل گراف دید با اندازه شبکه ثابت برابر با 2×2 برای تمام نمونه‌ها انجام گرفت. شاخص‌های اتصال بصری، یکپارچگی بصری، کنترل بصری و عمق میانگین از نرم‌افزار استخراج و خوانایی بر اساس رابطه میان اتصال محلی و یکپارچگی کلی محاسبه شد. برای حفظ قابلیت مقایسه، تنظیمات تحلیل، ارتفاع صفحه دید و وضوح شبکه در تمامی نمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شد. نقشه هشت مدرسه در مقیاس واقعی و واحد متر یکسان‌سازی، عناصر غیرضروری حذف و مرز فضاها، دیوارها، ستون‌ها و بازشوها به صورت پیوسته ترسیم شدند. فضاها یا تخریب‌شده، غیرقابل دسترسی، فاقد مستندات معتبر و فضای بیرونی از تحلیل حذف و فایل‌های DXF وارد نرم‌افزار دپس‌مپ شدند. تحلیل گراف دید برای همه نمونه‌ها با شبکه ثابت 2×2 متر، شعاع نامحدود و بر مبنای مرکز سلول‌های معتبر انجام گرفت. برای کاهش اثر تفاوت مساحت و تعداد سلول‌ها، اتصال با رابطه $C_n = C / (N - 1)$ و عمق با شاخص $RA = 2(MD - 1) / (N - 2)$ نرمال‌سازی شد؛ بنابراین، مقایسه مدارس بر پایه شاخص‌های نرمال‌شده و الگوی توزیع فضایی صورت گرفت و مقادیر خام فقط برای توصیف درون هر نمونه به کار رفت. در مرحله دوم، نقشه‌های مقطع، نما و اطلاعات ارتفاعی نمونه‌ها بر اساس مدارک ترسیمی ارائه‌شده در کتاب گنجنامه (حاجی‌قاسمی، ۱۳۹۴): فرهنگ آثار معماری اسلامی

ایران، دفتر پنجم: مدارس، ویراست دوم و منابع توصیفی و تحلیلی معماری ایران از جمله آثار پیرنیا استخراج، تطبیق و بازترسیم شد (پیرنیا و معماریان، ۱۳۹۵ و ۱۳۸۸). برای هر مدرسه، یک مقطع طولی و یک مقطع عرضی عبوری از حیاط مرکزی و فضای شاخص (مانند ایوان یا مدرس) انتخاب شد. سپس مؤلفه‌های مقطعی شامل نسبت محصوریت حیاط (ارتفاع متوسط جداره‌ها نسبت به عرض متوسط حیاط)، شاخص سلسله‌مراتب ارتفاعی (نسبت ارتفاع فضای شاخص به ارتفاع متوسط جدره‌ها و رواق‌ها)، نسبت گشودگی جداره‌ها (نسبت سطح بازشوهای رو به حیاط به سطح جداره)، تعداد طبقات، پیوستگی عمودی، نوع پوشش فضاهای اصلی (تخت، طاق، گنبد، کاربندی یا ترکیبی) و محورهای دید عمودی از حیاط به عناصر شاخص، در ماتریس مقطعی ثبت و تحلیل شدند. با توجه به وجود اختلاف تراز در برخی نمونه‌ها، به‌ویژه بناهای دارای چند سطح فضایی و گودال‌باغچه، مبنای اندازه‌گیری ارتفاع‌ها تراز کف فضای مرکزی مورد تحلیل (صحن اصلی حیاط) در نظر گرفته شد. تمامی ارتفاع جداره‌ها و عناصر شاخص نسبت به این تراز اندازه‌گیری شدند تا امکان مقایسه میان نمونه‌ها حفظ شود. در فضاهایی که دارای اختلاف تراز فرعی بودند، این تفاوت‌ها در تحلیل کیفی سازمان فضایی لحاظ شد و مبنای محاسبات ارتفاعی قرار نگرفت. در محاسبه مؤلفه‌های ارتفاعی، $\bar{H}$ و H_b به‌عنوان دو پارامتر مستقل در نظر گرفته شدند. $\bar{H}$ بیانگر ارتفاع متوسط جداره‌های مستقیم پیرامون حیاط مرکزی و H_b بیانگر ارتفاع متوسط بدنه‌های پیرامونی فضاهای معماری (جدره‌ها و رواق‌ها) است. در نمونه‌هایی که ارتفاع جداره‌های صحن و بدنه‌های پیرامونی دارای تداوم و یکنواختی کالبدی بوده‌اند، مقادیر این دو پارامتر برابر یا نزدیک به هم به‌دست آمده است. بنابراین، برابری مقادیر در برخی نمونه‌ها ناشی از ویژگی هندسی بنا بوده و به معنای یکسان در نظر گرفتن دو شاخص نیست. در تحلیل مؤلفه‌های مقطعی و سه‌بعدی، اندازه‌گیری‌های کالبدی شامل ارتفاع‌ها، طول‌ها و عرض‌ها بر حسب متر انجام شد. شاخص‌های ترکیبی حاصل از این اندازه‌گیری‌ها به‌صورت نسبت‌های بدون واحد ارائه شده‌اند. برای افزایش قابلیت مقایسه، نسبت محصوریت حیاط از رابطه زیر محاسبه شد:

$$ER = \bar{H} / \bar{W}$$

که در آن $\bar{H}$ ارتفاع متوسط جداره‌های حیاط و $\bar{W}$ میانگین طول و عرض حیاط است. شاخص سلسله‌مراتب ارتفاعی نیز از رابطه زیر به دست آمد:

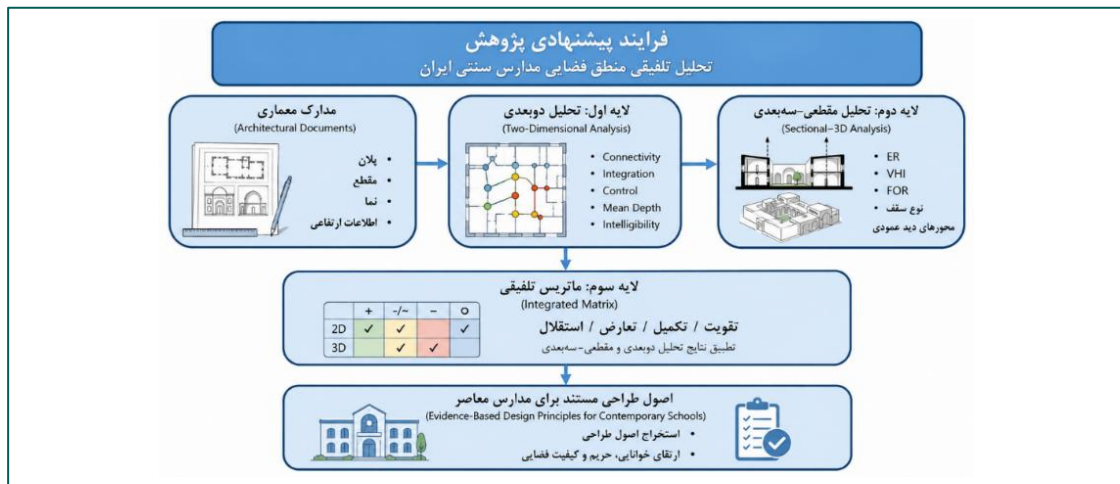
$$VHI = H_d / H_b$$

در محاسبه شاخص سلسله‌مراتب ارتفاعی، ارتفاع عنصر مسلط (H_d) به‌صورت یک مقدار منفرد و نماینده عنصر شاخص فضایی در نظر گرفته شده است و مجموع ارتفاع عناصر متعدد (Σ) در محاسبات وارد نشده است. در مواردی که بنا دارای بیش از یک عنصر مرتفع باشد، عنصر دارای بیشترین نقش ادراکی و سازمان‌دهنده در فضای اصلی به‌عنوان عنصر مسلط انتخاب شده است. لازم به ذکر است که شاخص سلسله‌مراتب ارتفاعی صرفاً برای سنجش تفاوت نسبی ارتفاع عناصر شاخص با بدنه پیرامونی به کار گرفته شده و به‌تنهایی بیانگر تمامی ابعاد ادراکی و حجمی فضا نیست. از این‌رو، برای تفسیر دقیق‌تر سازمان سه‌بعدی، این شاخص در کنار سایر مؤلفه‌های مقطعی شامل نسبت محصوریت حیاط، میزان گشودگی جداره‌ها، تعداد طبقات، نوع پوشش فضا و محورهای دید عمودی تحلیل شده است. بنابراین، نتایج حاصل از VHI به‌عنوان یک شاخص کمی مکمل و نه جایگزین تحلیل کامل هندسه سه‌بعدی فضا تفسیر می‌شود که H_d ارتفاع عنصر مسلط، مانند ایوان یا مدرس، و H_b ارتفاع متوسط بدنه‌های پیرامونی است. همچنین نسبت گشودگی جداره نیز از رابطه زیر محاسبه شد:

$$FOR = A_o / A_f$$

که A_o مساحت بازشوها و A_f مساحت کل جداره‌های رو به حیاط است. با توجه به محدودیت دسترسی به برداشت میدانی برخی بناها، داده‌های کالبدی استخراج‌شده از منابع معتبر با دامنه خطای مشخص ثبت شدند. از آنجا که تحلیل اسپیرمن بر مبنای رتبه‌بندی داده‌ها انجام می‌شود، اثر احتمالی خطاهای اندازه‌گیری در تغییر رتبه‌ها مورد توجه قرار گرفت و نتایج همبستگی به‌صورت اکتشافی و با احتیاط تفسیر شدند. در مرحله سوم، شاخص‌های نحوی و مقطعی پس از نرمال‌سازی در ماتریس تلفیقی ترکیب شدند. با توجه به هشت نمونه، تحلیل اسپیرمن به‌صورت اکتشافی انجام شد و نتایج به‌عنوان روابط غیر علی تفسیر شدند. با توجه

به ماهیت رتبه‌ای آزمون اسپیرمن و تمرکز آن بر ترتیب نسبی نمونه‌ها، اثر خطاهای جزئی اندازه‌گیری بر روابط کلی میان متغیرها محدودتر از تحلیل‌های مبتنی بر مقادیر مطلق است. در نهایت، رابطه دو سطح تحلیل در چهار وضعیت «تقویت»، «تکمیل»، «تعارض» و «استقلال نسبی» طبقه‌بندی شد (تصویر ۱).



تصویر ۱. گام‌های اصلی پژوهش در جهت نحو فضایی مدارس سستی ایران (منبع: نگارندگان)

پیشینه پژوهش

تحلیل پیکربندی فضایی با شکل‌گیری نظریه نحو فضا توسط هیلپر و هانسون (۱۹۸۴) به یکی از روش‌های اصلی تحلیل ساختارهای معماری و شهری تبدیل شد. هیلپر (۲۰۰۷) در کتاب - فضا یک ماشین است - نشان داد که فضاهای ساخته‌شده را می‌توان با شاخص‌های کمی مانند یکپارچگی و اتصال‌پذیری تحلیل و مقایسه کرد؛ شاخص‌هایی که با حرکت، دسترسی و تعامل اجتماعی ارتباط دارند همزمان، بندیکت (۱۹۷۹) با معرفی مفهوم ایزویست^۸ زمینه تحلیل دید در معماری را فراهم کرد و این رویکرد با توسعه ابزارهای دیجیتال، به‌ویژه دپس‌مپ، گسترش یافت (Benedikt, 1979; Turner, 2001; Varoudis & Penn, 2015). بر این اساس، تحلیل گراف دید به یکی از روش‌های مهم بررسی فضاهای داخلی و شهری تبدیل شده است. مطالعات نشان داده‌اند که شاخص‌های تحلیل گراف دید علاوه بر توصیف ساختار فضایی، قابلیت تبیین برخی رفتارهای اجتماعی را نیز دارند؛ به‌گونه‌ای که کوتسولامپروس و همکاران (۲۰۱۹) رابطه میان الگوهای دید مستقیم و تعاملات اجتماعی را نشان دادند (Koutsolampros et al., 2019). همچنین، پیونیس و لو (۲۰۱۴) ارتباط خوانایی فضایی با یکپارچگی بصری را مطرح کردند و نشان دادند که انسجام دیداری بیشتر، درک و ناوبری کاربران را تسهیل می‌کند (Peponis & Lu, 2014). پژوهش‌های جدید بر تلفیق نحو فضا با داده‌های محیطی و سایر منابع اطلاعاتی تأکید دارند (Yamu & van Nes, 2021). همچنین، مطالعات حوزه آنتروپی فضایی، آن را به‌عنوان معیاری برای سنجش تنوع دید و پیچیدگی تجربه بصری معرفی کرده‌اند (Li et al., 2024; Zhang & Chiaradia, 2020). مرورهای اخیر تحلیل گراف بصری نیز آنتروپی را از شاخص‌های نوین ارزیابی غنای تجربه بصری در فضاهای معماری دانسته‌اند. در کاربردهای تاریخی و شهری، تحلیل دسترسی بصری به‌عنوان ابزاری برای باززنده‌سازی فضاها مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش‌های عسکری‌زاد و همکاران (۲۰۲۴) و گارا (۲۰۲۳) نشان می‌دهند که تحلیل گراف دید می‌تواند در ارزیابی و ارتقای انسجام فضایی بافت‌های تاریخی مؤثر باشد (Askarizad et al., 2024; Garau, 2023). همچنین مطالعات منتشرشده در مجلات ساختمان^۹ (۲۰۲۳) و زمین^{۱۰} (۲۰۲۴) بر تلفیق شاخص‌های دیدی و معیارهای اجتماعی در تحلیل فضاهای عمومی تأکید دارند. در معماری ایران، حیدری و کیایی (۲۰۲۳) در مطالعاتی تطبیقی نشان دادند که مدارس سستی با بهره‌گیری از سلسله‌مراتب فضایی پیچیده، کنترل دیدی بالاتری نسبت به نمونه‌های معاصر دارند (Heidari & Kiaei, 2023). سایر پژوهش‌ها نیز نقش حیاط مرکزی را به‌عنوان عنصر سازمان‌دهنده روابط دیداری و حرکتی در معماری سستی ایران برجسته کرده‌اند (Shahbazi, 2020). در مجموع، ادبیات پژوهش (جلول ۱) نشان می‌دهد که تلفیق شاخص‌های نحوی و بصری مانند اتصال، یکپارچگی،

کنترل دیدی و آتروپی، چارچوبی چندبعدی برای تحلیل رفتار فضایی فراهم می‌کند و امکان مقایسه نظام‌مند ساختارهای سستی و معاصر را توسعه می‌دهد.

نقدها و توسعه‌های روش نحو فضا در تحلیل معماری

نظریه نحو فضا امکان تبدیل روابط فضایی به شاخص‌های کمی و مقایسه نظام‌مند نمونه‌ها را فراهم می‌کند؛ بااین حال، کاربرد آن به‌عنوان تنها ابزار تحلیل، می‌تواند به تقلیل کیفیت فضایی به روابط توپولوژیک منجر شود. معماریان (۱۳۸۱) از نخستین پژوهش‌هایی است که ظرفیت نحو فضا را برای تحلیل حریم، روابط عمومی و خصوصی و تعاملات اجتماعی در معماری ایران مطرح کرد. بااین حال، پژوهش‌های بعدی محدودیت‌های این رویکرد را بررسی کرده‌اند؛ همدانی گلشن (۱۳۹۴) کاهش برخی ویژگی‌های هندسی و متریک در انتزاع فضایی را مطرح می‌کند و راستجو و بمانیان (۱۳۹۸) بر اهمیت مؤلفه‌هایی مانند ارتفاع، ابعاد و شفافیت جداره‌ها تأکید دارند. فرشیدی و همکاران (۱۴۰۱) نیز ضرورت توجه به ویژگی‌های ادراکی و استفاده از مدل‌های پیچیده‌تر را مطرح کرده‌اند. در همین راستا، وارودیس و پسارا (۲۰۱۴) با معرفی تحلیل گراف دید سب‌بعدی نشان دادند که مؤلفه‌های عمودی و ارتفاعی می‌توانند نتایج تحلیل دوبعدی را تغییر دهند. بنابراین، پژوهش حاضر با حفظ ظرفیت‌های نحو فضا، آن را در چارچوبی تلفیقی با شاخص‌های مقطعی و حجمی به کار می‌گیرد.

جدول ۱. بیشینه پژوهش مرتبط با نحو فضا و قابلیت‌های دسترسی در مدارس سستی (تدوین: نگارندگان)

نکات قابل استفاده برای پژوهش	نتایج کلیدی	نوع دسترسی مورد بررسی	موضوع و تمرکز اصلی	روش تحقیق	عنوان پژوهش	نویسنده / سال	ردیف
مبانی نظری برای تحلیل دسترسی در خفیه‌های ایرانی با روش نحو فضا	معرفی شاخص‌های اصل و یکپارچگی و تحلیل خفیه‌های سنی و مدن	فیزیکي - بصری	پایه‌گذاری نظریه نحو فضا و ارتباطات ساخن فضایی با رفتار اجتماعی	نظری - تحلیلی	مطلق اجتماعی فضا ^۱	هیلر و هلسون (۱۹۸۹) ^۲	۱
تأکید بر تپلی فضایی و کنترل دید در خفیه‌های سنی	تشریح سلسله‌مراتب فضایی حریم و ویژگی غیر مستقیم	فیزیکي - بصری	سازمان فضایی خفیه‌های ایرانی و اصول حریم	توصیفی - تحلیلی	مقدمه‌ای بر معماری مسکنی ایرانی ^۳	معماریان (۱۹۹۱)	۲
راه‌های کمی برای تحلیل الگوهای حرکتی خفیه‌ها	کاربرد شاخص‌های اصل و یکپارچگی در سازمان شهری	فیزیکي - بصری	تحلیل مورفولوژی شهری با روش نحو فضا	کمی - تحلیلی	رویکرد پیکربندی محور به رخت‌شناسی شهری ^۴	کریبی (۲۰۱۱)	۳
تقویت مفهوم ارتباط دید و مسیر در سازمان فضایی خفیه‌های سنی	اثبات رابطه میان حریم فضایی و توزیع دید در پلان	فیزیکي - بصری	تحلیل نوعی خفیه‌های جیلاند ایران	کمی - تحلیلی	پیکربندی فضایی خفیه‌های جیلاند ایرانی ^۵	رضا زاده و حیدری (۲۰۱۷)	۴
راه‌های چارچوب روش‌شناسی برای تحلیل ساخن حرکتی بناها	تشریح روش محاسبه عمق و ارتباطات فضایی	فیزیکي	مرور مبانی و شاخص‌های نحو فضا	نظری - آمروشی	نحو فضا: مقدمه‌ای کمی ^۶	بقایا (۲۰۱۱) ^۷	۵
تأکید بر کنترل دید و شفافیت تدریجی در مسیرهای ورودی	رابطه معادل بین ساخن پلان و حریم بصری	بصری	تحلیل دید و حریم در خفیه‌های بومی ایران	کمی - تحلیلی	رویت‌پذیری و حریم خصوصی در خفیه‌های بومی ایران ^۸	زمانی و همکاران (۲۰۲۰)	۶
راه‌های مبانی تجربی برای تحلیل حریم و دید	رابطه میان ساخن فضایی و الگوهای رفتاری	بصری - فیزیکي	بررسی خصوصیت‌های خفیه‌های سنی و مدن همپان	کمی - تحلیلی	حریم خصوصی در خفیه‌های الگوهای رفتاری در پیکربندی فضایی خفیه‌های سنی و مدن شهر همپان بر اساس مفهوم نحو فضا ^۹	علی‌ناجر و نجومی (۲۰۱۶)	۷
تأیید اهمیت مسیرهای غیر مستقیم در کنترل دید	تحلیل نقش هندسه پلان در حفظ حریم	بصری	توسعه شاخص‌های دید در مسکن ایرانی	کمی - تحلیلی	پیکربندی فضایی مسکنی برای تأمین حریم خصوصی بصری در خفیه‌های ایرانی ^{۱۰}	خرانی‌زوری و همکاران (۲۰۲۲)	۸
تقویت تحلیل تطبیقی میان قلم و سازمان دید	توصیف الگوهای اصل و عمق فضایی در پیرامون جاما	فیزیکي - بصری	تحلیل ساخن فضایی خفیه‌های رودبار و نحو فضا	کمی - تحلیلی	ساخن فضایی خفیه‌های جاما در لندنتونگونی و لوستولد (۲۰۲۳) ^{۱۱}	فرهنگ‌زهی و لوستولد (۲۰۲۳) ^{۱۲}	۹
راه‌های روش‌های برای نظریه نحو فضا	تبیین رابطه ساخن فضایی و فرهنگ سکونت	فیزیکي - بصری	تحلیل خفیه‌های بورجی‌ها کلان با نحو فضا	توصیفی - تحلیلی	بررسی خفیه‌های سنی ایرانی با استفاده از نظریه نحو فضا ^{۱۳}	گلشن (۲۰۱۹)	۱۰
مبانی دید کلیت تحلیل دیمندی	توجه به دید تظلم هندسه و جزئیات ترکیب در تحلیل توپولوژیک	فیزیکي - بصری و توپولوژیک	بخش‌های نظری و شیمیاسازی دیس‌مپ	نظری - تحلیلی - بخش‌های لنگشتی نظریه نحو فضا و شیمیاسازی نمونه در نماززار دیس‌مپ	برای‌بیشی نظریه نحو فضا: راه‌هایی در معماری و طراحی شهری؛ مطالعه موردی: خفیه‌های بورجی‌ها کلان	همدانی گلشن، ۱۳۹۴	۱۱
ضرورت افزودن متغیر فضایی	ارتباط جزئیات جزیره و بعد رفتاری در روش معمول برای ارزیابی نمی‌شوند	فیزیکي - بصری - حریم و سلسله‌مراتب دسترسی	روش مکمل نحو فضا و مطالعه نمونه‌های ایرانی	توصیفی - تحلیلی - مطالعه نمونه‌های ایرانی و استفاده از روش نحو فضا در تحلیل کیفی ساخن کلیتی	گونه‌شناسی ساخن فضایی خفیه‌های حاضر ایرانی با تأکید بر محرمیت و سلسله‌مراتب	راستجو و بملیلان، ۱۳۹۸	۱۲
تأیید ضرورت مدل ترکیبی	افزودن مؤلفه‌های ذهنی (احاطی تلجیح با حرکت ذهنی) را به روش می‌دهد	حرکتی - رفتاری - شناختی و بصری	گراف وزن‌دار ای‌جی و مبتنی بر خط ^{۱۴}	کمی - تحلیلی - گراف وزن‌دار، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی ای‌جی و بی شیمیاسازی حرکت غلط محور مبتنی بر غلط	تأثیر مؤلفه‌های ذهنی بر تلجیح نحو فضا: راه‌پایه‌گیری از گراف وزن‌دار	فرشیدی و همکاران، ۱۴۰۱	۱۳
مبانی تحلیل ساهمندی و فضایی	ارتباط و فضاهای چند ارتباطی، روابط دیداری مغنونی از وی‌جی و مبتنی ایجاد می‌کند	بصری ساهمندی و عصبی	تحلیل گراف دید ساهمندی	کمی - تحلیلی و شیمیاسازی راه‌های توسعه تحلیل گراف دید ساهمندی و معایب آن با وی‌جی ای‌جی دیمندی	فراتر از دوبند معماری از دریچه تحلیل گراف دید ساهمندی ^{۱۵}	روندیس و پسران (۲۰۱۳) ^{۱۶}	۱۴

مفاهیم نظری پژوهش

این بخش به تحلیل کمی پیکربندی فضایی هشت مدرسه سستی ایران بر اساس نحو فضا و نرم‌افزار دپس‌مپ می‌پردازد. شاخص‌های اتصال بصری، یکپارچگی، کنترل بصری، آنتروپی و عمق میانگین برای بررسی انسجام فضایی، دسترسی‌پذیری و تجربه دیداری تحلیل شدند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد حیات مرکزی در تمامی نمونه‌ها به‌عنوان هسته دیداری و اجتماعی عمل کرده و سازمان فضایی مدارس سستی را شکل داده است. همچنین تفاوت میان نمونه‌ها، تأثیر شرایط کالبدی، عملکردی و زمینه‌ای را بر نحوه شکل‌گیری روابط فضایی آشکار می‌کند.

۱. تحلیل اتصال‌پذیری

تحلیل اتصال در دپس‌مپ یکی از روش‌های اصلی بررسی شبکه‌های فضایی در معماری و شهرسازی است که روابط ارتباطی، دسترسی‌پذیری و الگوهای حرکتی کاربران را ارزیابی می‌کند. استفاده از این تحلیل در بهینه‌سازی سازمان فضایی می‌تواند به بهبود جریان حرکت و تقویت روابط عملکردی محیط ساخته‌شده کمک کند (Rauof & Al-Qemaqchi, 2022; Permata et al., 2022; Muyasarah & Sarwadi, 2023). به‌منظور یکپارچگی نمایش داده‌ها، تمامی مقادیر عددی جداول با قالب یکسان، واحد متر برای ابعاد کالبدی و دقت اعشاری ثابت (دو رقم اعشار) بازتنظیم و نمایش داده شدند.

جدول ۲. تحلیل اتصال بصری در ۸ نمونه موردی مدارس سستی ایران خروجی از دپس‌مپ (تدوین: نگارندگان)

ردیف	تحلیل	تحلیل اتصال				تصویر	نوع
		کمیته	پیشینه	میانگین	انحراف معیار		
۱	آقا یزدی کاشان	۲	۱۳۴۵	۵۶۸۳۲	۴۴۰۵۰		معماری بافتی تهران
۲	فیلسوف الدوله تهران	۴	۱۹۱۴	۳۱۶۰۱۶	۲۲۲۰۹		چهاربلیخ خان قم
۳	حکیم‌آبادی تهران	۲	۱۸۹	۵۰۸۶۸	۳۱۵۰۱۱		جاده اصفهان
۴	مهر الدوله تهران	۴	۴۵	۱۵۳۰۶۵	۱۶۶۰۲۷		خان شیراز

جدول (۲) نتایج تحلیل اتصال بصری در هشت نمونه از مدارس سستی ایران را نشان می‌دهد که با استفاده از نرم‌افزار دپس‌مپ استخراج شده است. مقادیر بالاتر شاخص اتصال بصری در مدرسه خان شیراز نسبت به سایر نمونه‌ها، بیانگر تراکم بیشتر روابط دیداری میان سلول‌های فضایی و پیوستگی بیشتر شبکه دیداری در این بناست. این تفاوت می‌تواند ناشی از سازمان فضایی منسجم‌تر، ارتباط مستقیم‌تر فضاهای پیرامونی با

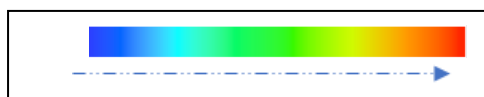
حیات مرکزی و کاهش گسستگی در مسیرهای دیداری باشد. با این حال، این شاخص به‌تنهایی بیانگر کیفیت ادراکی یا تجربه قطعی کاربران نیست، بلکه میزان ظرفیت بالقوه ارتباطات دیداری در ساختار فضایی را نشان می‌دهد. در تحلیل اتصال بصری، رنگ‌های گرم نشان‌دهنده نواحی با اتصال و دسترسی دیداری بیشتر و رنگ‌های سرد بیانگر اتصال کمتر هستند. در اغلب نمونه‌ها، به‌ویژه مدارس آقازنگ کاشان، فیلسوف‌الدوله و حکیم‌باشی تهران، حیات مرکزی بیشترین میزان اتصال را دارد و به‌عنوان عنصر سازمان‌دهنده روابط فضایی عمل می‌کند؛ در مقابل، جبهه‌ها و فضاهای پیرامونی از اتصال کمتری برخوردارند و ساختاری سلسله‌مراتبی از مرکز به پیرامون ایجاد می‌کنند. این الگو در نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد که سازمان فضایی مدارس سستی ایران بر محور ارتباط دیداری و حرکتی با حیات مرکزی شکل گرفته است. در مدارس شهری مانند فیلسوف‌الدوله و حکیم‌باشی، پیچیدگی شبکه فضایی بیشتر بوده و در مدارس حوزوی مانند جهانگیرخان قم و جلالیه اصفهان، صحن مرکزی نقش هسته فضایی را ایفا می‌کند. مدرسه خان شیراز نیز با سازمان فضایی بازتر و محورهای دید منظم‌تر، انسجام بیشتری پیرامون صحن ایجاد کرده است. همچنین، مقدار کمینه اتصال بصری برابر با ۱ در مدرسه خان نشان‌دهنده وجود سلول‌هایی با حداقل ارتباط مستقیم در شبکه فضایی است؛ این مقدار در کنار مقادیر بالای اتصال بصری، بیانگر هم‌زمانی نقاط با دسترسی دیداری گسترده و فضاهای با ارتباط محدودتر در ساختار فضایی بناست. با این حال، اثبات رابطه علی میان سازمان فضایی و عوامل اقلیمی نیازمند تحلیل مستقل داده‌های محیطی است. به‌طور کلی، در نمونه‌های بررسی‌شده، جایگاه مرکزی حیات با افزایش اتصال بصری همراه بوده و سازمان فضایی مدارس سستی ایران بر پایه هسته‌ای مرکزی شکل گرفته است؛ به‌گونه‌ای که فضاهای آموزشی، عبوری و اقامتی پیرامون آن سامان یافته و خوانایی فضایی مجموعه تقویت می‌شود.

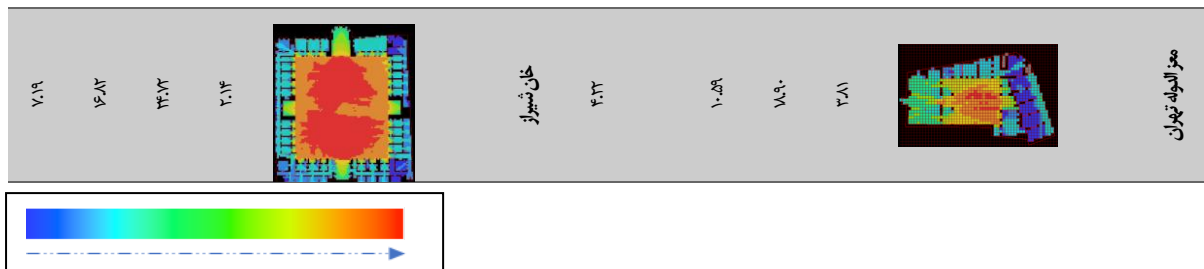
۲. تحلیل یکپارچگی بصری

یکپارچگی بصری میزان انسجام، خوانایی و ارتباط دیداری فضاها را نشان می‌دهد و بیانگر نحوه درک کاربران از ساختار فضایی است. این شاخص در تحلیل‌های فضایی برای ارزیابی روابط دیداری و الگوهای نوبری مورد استفاده قرار می‌گیرد (Wang et al., 2020; Carson et al., 2022). همچنین نحوه نمایش داده‌های بصری و انتخاب مناسب رنگ‌ها می‌تواند بر برداشت صحیح از نتایج تأثیرگذار باشد (Crameri & Hason, 2024). نتایج شاخص یکپارچگی بصری هشت مدرسه در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳. تحلیل یکپارچگی بصری در ۸ نمونه موردی مدارس سستی ایران خروجی از دپس مپ (تدوین: نگارندگان)

تحلیل یکپارچگی بصری									
معماری	معماری	معماری	معماری	معماری	معماری	معماری	معماری	معماری	معماری
آقازنگ کاشان	۱۵۳	۱۶۶	۱۶۰	۵۶	معماری بانی تهران	۲۰	۱۴۱	۱۶۲	۲۸
فیلسوف‌الدوله تهران	۱۶۱	۱۶۱	۱۱۹	۲۰۳	جهانگیرخان قم	۲۰	۱۹۰	۱۶۶	۱۹۱
حکیم‌باشی تهران	۱۶۱	۱۶۱	۱۲۱	۱۶۱	جلالیه اصفهان	۲۰	۱۶۱	۱۶۱	۱۶۱





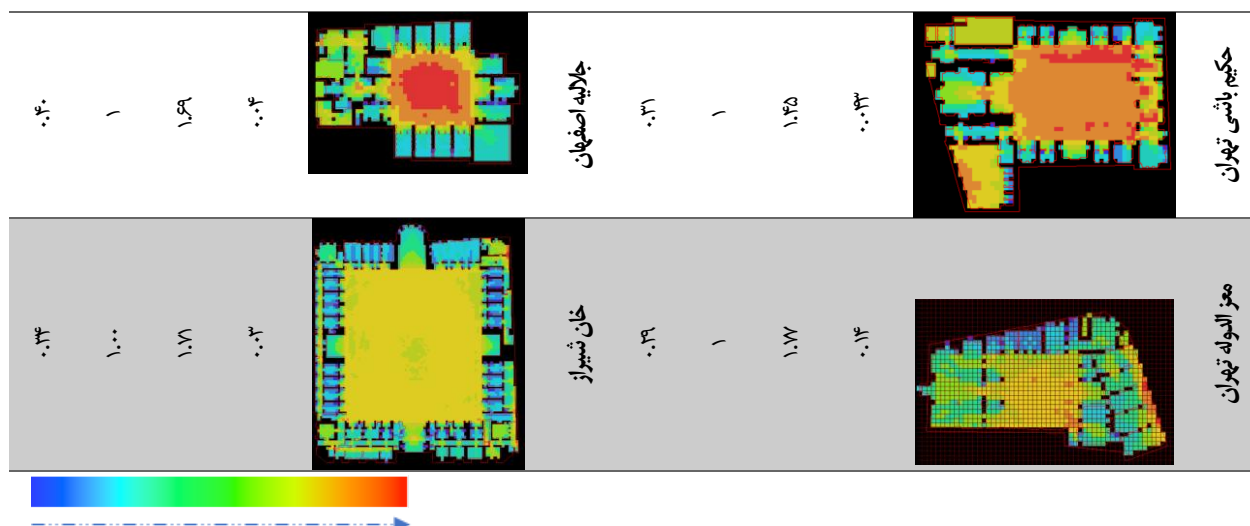
تحلیل شاخص یکپارچگی بصری در هشت مدرسه سستی ایران (جدول ۲) نشان می‌دهد که با وجود الگوی مشترک حیاط مرکزی، میزان انسجام دیداری نمونه‌ها متفاوت است. بر اساس خروجی دپس‌مپ، مدرسه خان شیراز با میانگین ۱۶۸۲ و بیشینه ۲۴۰۷۲ بالاترین یکپارچگی بصری را دارد که بیانگر پیوند قوی‌تر میان صحن، ایوان‌ها و حجره‌هاست. پس از آن، مدارس معزالدوله تهران و جهانگیرخان قم با میانگین‌های ۱۰۵۹ و ۹۷۰، ساختاری منسجم با محوریت صحن مرکزی نشان می‌دهند. مدارس فیلسوف‌الدوله تهران و جلالیه اصفهان در سطح میانی قرار دارند و آقابزرگ کاشان و حکیم‌باشی تهران مقادیر پایین‌تری از یکپارچگی بصری را نشان می‌دهند. به‌طور کلی، توزیع شاخص در نمونه‌ها نشان‌دهنده نقش محوری صحن در سازمان دیداری مدارس سستی ایران است؛ به‌گونه‌ای که ارتباط مستقیم‌تر میان صحن و فضاهای پیرامونی با افزایش یکپارچگی بصری همراه است.

۳. تحلیل کنترل بصری

شاخص کنترل بصری در تحلیل گراف دیده، میزان تأثیر نسبی هر گره در شبکه دیداری را نشان می‌دهد و مقادیر بالاتر بیانگر جایگاه مؤثرتر آن در ساختار محلی فضا است (Lu & De Maeseneer, 2025; Gil et al., 2015). این شاخص در کنار سایر معیارهای نحوی برای شناسایی نقاط مهم شبکه دیداری و بررسی پیوستگی فضایی به‌کار می‌رود (Lu & De Maeseneer, 2025). با این حال، کنترل بصری صرفاً یک شاخص پیکربندی است و به‌تنهایی نمی‌تواند ویژگی‌هایی مانند امنیت یا رفتار کاربران را اثبات کند؛ بنابراین در پژوهش حاضر تنها در ارتباط با جایگاه نسبی فضاها در شبکه دیداری تفسیر شده است. نتایج این شاخص در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴. تحلیل کنترل بصری در ۸ نمونه موردی مدارس سستی ایران خروجی از دپس‌مپ (تدوین: نگارندگان)

تحلیل کنترل بصری							
بنا	تحلیل	کیفیت	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	بنا	تحلیل
آقابزرگ کاشان		۰.۳	۱.۹	۱	۰.۶	معمار باشی تهران	
		۰.۳	۱.۹	۱	۰.۶		
		۰.۳	۱.۹	۱	۰.۶		
		۰.۳	۱.۹	۱	۰.۶		
فیلسوف‌الدوله تهران		۰.۶	۱.۶	۱	۰.۳	جهانگیر خان قم	
		۰.۶	۱.۶	۱	۰.۳		
		۰.۶	۱.۶	۱	۰.۳		
		۰.۶	۱.۶	۱	۰.۳		

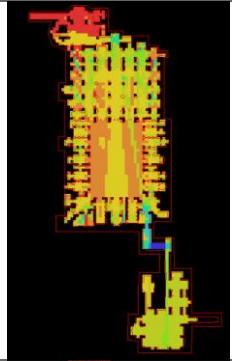
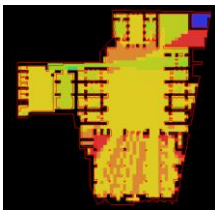
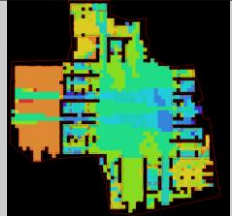
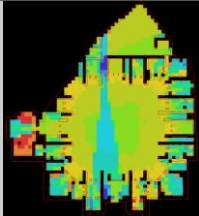
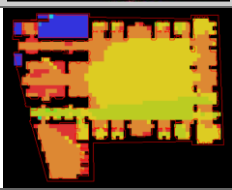
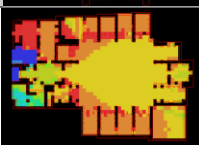
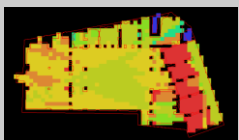
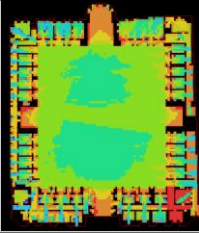


نتایج جدول کنترل بصری نشان می‌دهد که در مدارس سستی ایران، حیاط مرکزی معمولاً بیشترین نقش را در شبکه دیداری دارد و به‌عنوان هسته کنترل بصری فضاهای پیرامونی عمل می‌کند. مدارس حکیم‌باشی تهران، جهانگیرخان قم و جلایه اصفهان با میانگین کنترل بصری ۱.۰۰ و بیشینه‌های ۱.۴۵، ۱.۷۳ و ۱.۶۹، بالاترین ظرفیت کنترل دیداری را نشان می‌دهند. در مقابل، فضاهای جانبی مانند حجره‌ها و راهروها کنترل بصری کمتری دارند. همچنین در مدارس معمارباشی تهران (میانگین ۰.۹۹۷۳۴) و خان شیراز (میانگین ۱.۰۰)، کاهش تدریجی کنترل از مرکز به پیرامون، بیانگر سلسله‌مراتب فضایی است. این الگو در آقابزرگ کاشان و فیلسوف‌الدوله تهران نیز با میانگین ۱.۰۰ و تفاوت در پراکندگی مقادیر تأیید می‌شود.

۴. تحلیل انتروپی

آنتروپی به‌عنوان شاخص سنجش پیچیدگی و عدم قطعیت داده‌های فضایی، در این پژوهش مستقیماً از دپس مپ استخراج نشد، بلکه بر اساس داده‌های حاصل از تحلیل گراف دید محاسبه شد. داده‌های عددی خروجی نرم‌افزار استخراج و در محیط پردازشی مستقل با استفاده از بسته‌های اوردپای و آنتروپی هاب برای تحلیل الگوهای فضایی پردازش شدند (Pessa & Ribeiro, 2021; Flood & Grimm, 2021). آنتروپی جایگشتی دوبعدی بر اساس ماتریس عمق میانگین، شبکه ثابت ۲×۲ متر، حذف سلول‌های غیرقابل دسترسی و الگوهای ترتیبی ۲×۲ با تأخیر یک سلولی محاسبه شد (Pessa & Ribeiro, 2021). این شاخص به‌عنوان مکمل شاخص‌های اتصال، یکپارچگی، کنترل و عمق تفسیر شده و بیانگر تنوع در توزیع مقادیر عمق در شبکه تحلیل است (Fastowicz et al., 2019). احتمال وقوع هر الگوی ترتیبی با p_i مشخص و مقدار آنتروپی از رابطه $H = -\sum p_i \ln p_i$ به دست آمد. برای امکان مقایسه میان بناهایی با وسعت متفاوت، مقدار آنتروپی با استفاده از $H_n = H / \ln(24)$ نرمال‌سازی و در بازه صفر تا یک گزارش شد. مقدار بالاتر این شاخص صرفاً نشان‌دهنده تنوع و پیش‌بینی‌ناپذیری بیشتر در توزیع فضایی مقادیر عمق در مقیاس شبکه انتخاب‌شده است و نباید به‌تنهایی معادل پیچیدگی معماری یا ادراکی بنا تلقی شود (Fastowicz et al., 2019). نتایج تحلیل آنتروپی هشت مدرسه مورد مطالعه در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵. مقادیر کمینه، میانگین و بیشینه شاخص اتروپی در هشت مدرسه تاریخی (تدوین: گارندگان)

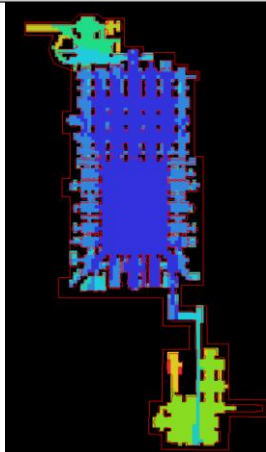
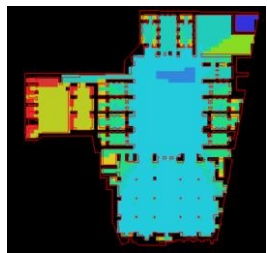
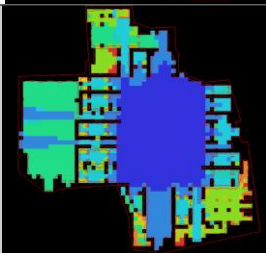
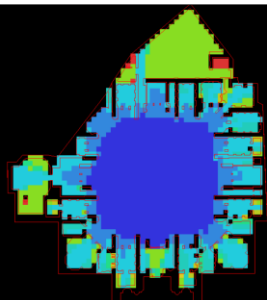
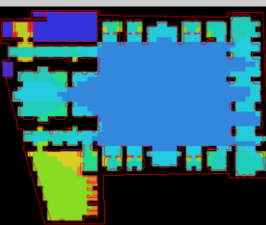
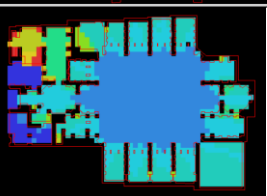
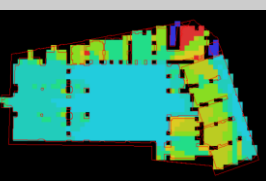
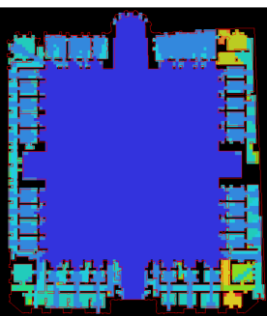
تحلیل اتروپی							
بنای	تحلیل	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	بنای	تحلیل
آقا بزرگ کاشان		۱.۶۹	۲.۱۵	۱.۹۱	۱.۱۰	معمار باشی تهران	
فیلسوف الدوله تهران		۱.۱۸	۲.۰۱	۱.۶۲	۰.۱۶	جهانگیر خان قم	
حکیم باشی تهران		۰	۱.۱۶	۱.۳۱	۰.۳۶	جلالیه اصفهان	
معر الدوله تهران		۰	۱.۵۷	۱.۱۵	۰.۳۱	خان شیرواز	
		۰.۸۷	۱.۹۶	۱.۳۲	۰.۱۱		

نتایج جدول (۵) تفاوت الگوی توزیع مقادیر عمق در نمونه‌ها را نشان می‌دهد. اتروپی بالاتر بیانگر تنوع و پیش‌بینی‌پذیری کمتر در توزیع مقادیر عمق و اتروپی پایین‌تر نشان‌دهنده الگوی منظم‌تر است. با این حال، این شاخص به‌تنهایی معیار پیچیدگی یا کیفیت ادراکی فضا نیست و در کنار شاخص‌های عمق، یکپارچگی، اتصال، خوانایی و ویژگی‌های کالبدی تفسیر شده است.

۵. تحلیل میانگین عمق

میانگین عمق یکی از شاخص‌های اصلی تحلیل نحو فضا در دپس‌مپ است که تعداد گام‌های لازم برای دسترسی میان فضاها را در شبکه فضایی اندازه‌گیری می‌کند (Hillier & Hanson, 1984). مقدار پایین آن بیانگر دسترسی و مرکزیت بیشتر فضا و مقدار بالا نشان‌دهنده عمق و انزوای نسبی است. این شاخص برای ارزیابی جریان حرکت، سلسله‌مراتب فضایی و دسترسی کاربران در معماری و شهرسازی به‌کار می‌رود (Hillier et al., 1993; Penn et al., 1998). نتایج تحلیل میانگین عمق هشت مدرسه در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۶. مقادیر کمینه، میانگین و بیشینه شاخص عمق بصری در هشت مدرسه تاریخی، بر اساس خروجی نرم‌افزار دپس مپ (تدوین: نگارندگان)

تحلیل میانگین عمق بصری					
بنا	تحلیل	کمینه	پیشینه	میانگین	انحراف معیار
آقا بزرگ کاشان		۲.۱۲	۶.۵۹	۲.۹۵	۰.۹۰
		معمار بانی تهران			
					
		۱	۴.۰۱	۲.۰۹۳	۰.۵۳
فیلسوف الدوله تهران		۱.۶۱	۴.۳۰	۲.۳۹	۰.۵۳
		جهانگیر خان قم			
					
		۱.۳۲	۳.۸۱	۲.۰۰	۰.۴۶
حکیم بانی تهران		۱	۴.۱۲	۱.۸۱	۰.۵۳
		جلالیه اصفهان			
					
		۱	۴.۱۹	۱.۸۳	۰.۵۰
معز الدوله تهران		۱	۲.۸۴	۱.۳۲	۰.۳۰
		خان شیراز			
					
		۱.۴۱	۵.۷۸	۱.۸۴	۰.۶۲



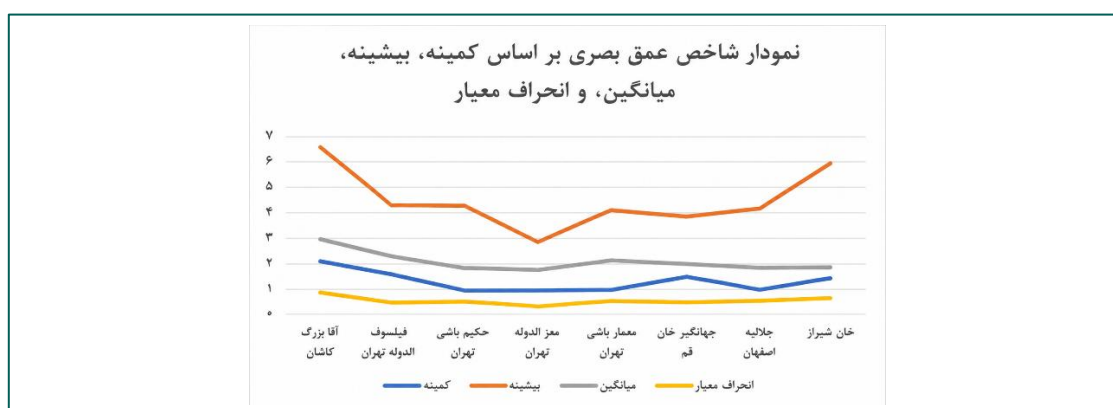


نتایج جدول میانگین عمق، تفاوت در سلسله‌مراتب و دسترسی‌پذیری فضایی مدارس سستی ایران را نشان می‌دهد. مدرسه آق‌بزرگ کاشان با میانگین عمق ۲.۹۵ و بیشینه ۶.۵۹ عمیق‌ترین ساختار فضایی را دارد و بیانگر نیاز به گام‌های بیشتر برای دسترسی میان فضاهاست. در مقابل، مدرسه خان شیراز با میانگین عمق ۱.۸۴ و مدرسه معزالدوله تهران با ۱.۳۲، کمترین عمق و دسترسی‌پذیری بیشتری دارند. مدارس فیلسوف‌الدوله

تهران (۲۰۲۹) و جهانگیرخان قم (۲۰۰۰) نیز الگوی میانه‌ای را نشان می‌دهند. به‌طور کلی، دامنه مقادیر عمق نشان می‌دهد که مدارس سستی ایران با وجود تفاوت در پیچیدگی فضایی، بر تعادل میان سلسله‌مراتب و دسترسی استوار بوده‌اند و حیاط مرکزی در تمامی نمونه‌ها نقش مهمی در کاهش عمق و تسهیل ارتباطات فضایی دارد.

۷. نمودار شاخص عمق بصری بر اساس مقادیر کمینه، میانگین و بیشینه

بر اساس داده‌های دپس‌مپ، میانگین عمق در مدارس سستی ایران تفاوت‌هایی در میزان پیچیدگی فضایی نشان می‌دهد. مدرسه آقابزرگ کاشان با میانگین عمق ۲.۹۵ و مدرسه فیلسوف‌الدوله تهران با میانگین ۲.۲۹ ساختارهای عمیق‌تری دارند، در حالی که مدارس حکیم‌پاشی تهران (۱.۸۱) و معزالدوله تهران (۱.۷۲) از پلان بازتر و عمق کمتر برخوردارند. به‌طور کلی، مقادیر کمتر از ۳ در تمامی نمونه‌ها نشان می‌دهد که معماری مدارس سستی ایران، علی‌رغم تفاوت‌های کالبدی، بر تعادل میان پیچیدگی فضایی و دسترسی پذیری استوار است.



تصویر ۲. نمودار شاخص عمق بصری بر اساس کمینه، بیشینه، میانگین، و انحراف معیار (تدوین: نگارندگان)

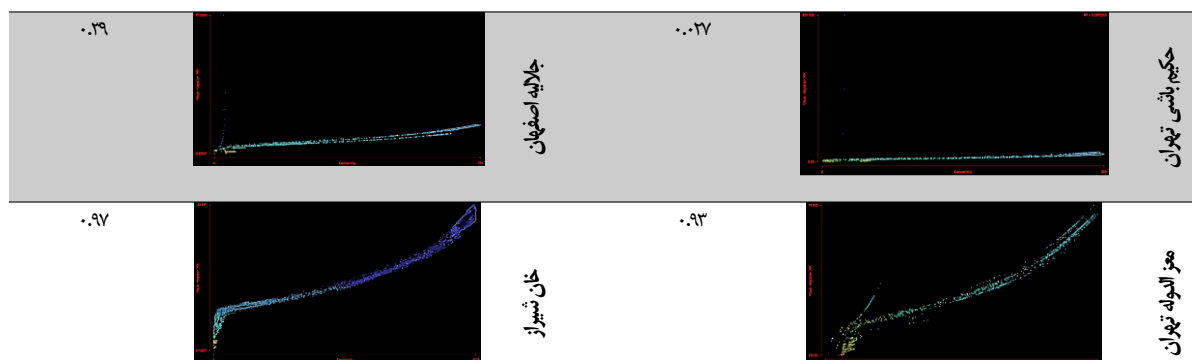
تصویر (۲) رابطه میان شاخص اتصال و یکپارچگی بصری را نشان می‌دهد. نزدیکی نمودار به الگوی خطی و مقدار بالاتر R^2 ، بیانگر ارتباط قوی‌تر میان این دو شاخص و خوانایی بیشتر ساختار فضایی است. مقادیر این شاخص‌ها در نمودارهای مقایسه‌ای استخراج‌شده از دپس‌مپ ارائه شده است.

۸. تحلیل همبستگی میان اتصال بصری و یکپارچگی بصری (شاخص خوانایی)

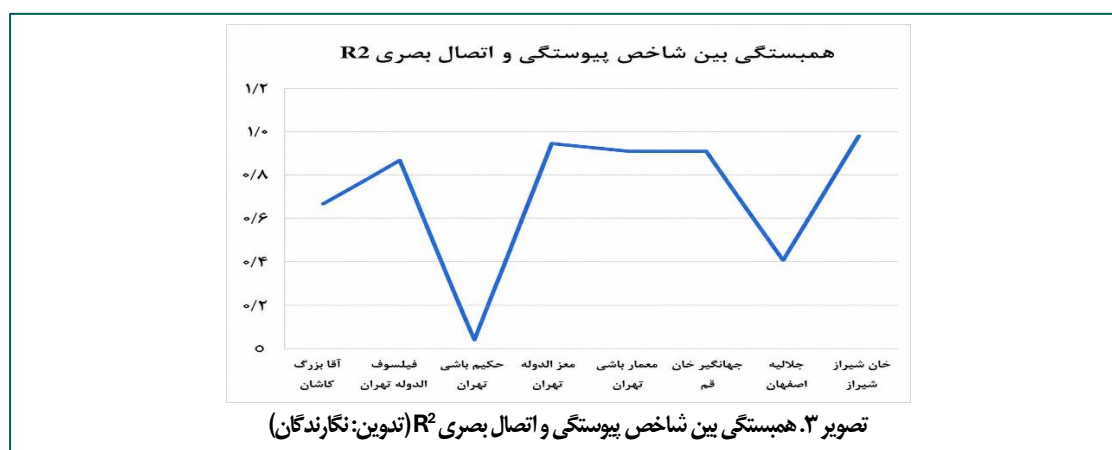
جدول (۷) نشان می‌دهد که رابطه میان اتصال و یکپارچگی بصری در مدارس مورد مطالعه متفاوت است. مدرسه خان شیراز با R^2 نزدیک به ۱، بیشترین هماهنگی میان پیوستگی فضایی و ارتباطات بصری را دارد. مدرسه جهانگیرخان قم نیز با $R^2=0.90$ رابطه‌ای قوی میان این دو شاخص نشان می‌دهد. در مقابل، فیلسوف‌الدوله تهران و آقابزرگ کاشان با همبستگی پایین‌تر، الگوی متفاوتی از سازمان فضایی را ارائه می‌کنند. این تفاوت‌ها بیانگر تنوع شیوه‌های تلفیق ساختار کالبدی و روابط بصری در مدارس سستی ایران است (تصویر ۳).

جدول ۷. نمودار همبستگی اتصال بصری و یکپارچگی بصری در مدارس مورد مطالعه (تدوین: نگارندگان)

بنا	تحلیل	R^2	بنا	تحلیل	R^2
آقا بزرگ کاشان		۰.۶۳	معمار پاشی تهران		۰.۹۰
فیلسوف الدوله		۰.۸۴	جهانگیر خان قم		۰.۹۰



نتایج تحلیل همبستگی میان اتصال و یکپارچگی بصری در هشت مدرسه (جدول ۷) نشان دهنده تفاوت میزان هماهنگی میان شبکه دیداری و سازمان فضایی نمونه‌هاست. مدرسه خان شیراز با $R^2 = 0/97$ بیشترین همبستگی را دارد که بیانگر ارتباط قوی میان ساختار فضایی و روابط دیداری است. پس از آن، معزالدوله تهران (۰/۹۳)، معمارباشی تهران (۰/۹۰) و جهانگیرخان قم (۰/۹۰) نیز همبستگی بالایی نشان می‌دهند. در مقابل، جلالیه اصفهان (۰/۳۹) و حکیم‌باشی تهران (۰/۰۳) مقادیر پایین‌تری دارند، در حالی که فیلسوف‌الدوله تهران (۰/۸۴) و آقابزرگ کاشان (۰/۶۳) در سطح میانی قرار می‌گیرند. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده تنوع الگوهای سازمان فضایی و نحوه ارتباط میان پیوستگی فضایی و ساختار دیداری در مدارس سنتی ایران است.



پژوهش حاضر با بهره‌گیری از نحو فضا، ساختار فضایی هشت مدرسه تاریخی ایران را بررسی کرد (Hillier & Hanson, 1984; Hillier, 1996). نتایج نشان داد حیات مرکزی در تمامی نمونه‌ها هسته سازمان فضایی و مرکز تمرکز اتصال، یکپارچگی و کنترل بصری است (Turner, 2014; Bada & Farhi, 2003; و فضاهای پیرامونی به‌صورت سلسله‌مراتبی پیرامون آن سازمان یافته‌اند (Jiang et al., 2000; Almamoori, 2015). رابطه اتصال و یکپارچگی نیز هماهنگی میان ساختار محلی و کلی فضا و نقش آن در خوانایی دیداری را تأیید می‌کند (Sharmin, 2018). این الگو در معماری آموزشی اسلامی و مدارس تاریخی ایران نیز مشاهده شده و بر تعادل میان نظم، انعطاف، حریم و دسترسی استوار است (Al-Moqaram & Al-Amara, 2020; Al-Harithy, 2001; Karahmadi et al., 2020; Esmaeeli & Hosseini, 2021; Kashef, 2025; Simalullah et al., 2024). تفاوت میان نمونه‌ها تنها می‌تواند به‌عنوان ارتباط احتمالی با عوامل کارکردی، تاریخی و حتی اقلیمی مطرح شود؛ زیرا محدودیت تعداد نمونه‌ها و نبود آزمون مقایسه‌ای، امکان تعمیم یا اثبات علیّ این روابط را محدود می‌کند. یافته‌های پژوهش ناظر بر هشت نمونه بررسی شده است و تأیید الگوهای کلی نیازمند مطالعه نمونه‌های بیشتر، پوشش دوره‌ها و مناطق متنوع‌تر و استفاده از آزمون‌های آماری مناسب خواهد بود.

۹. تحلیل مقطعی و سه بعدی مدارس

به منظور تکمیل تحلیل گراف دید، ساختار مقطعی و سه بعدی هشت مدرسه بر اساس نسبت محصوریت حیاط، سلسله مراتب ارتفاعی، گشودگی جداره، تعداد طبقات، نوع پوشش و محورهای دید عمودی بررسی شد. این مرحله به ارزیابی مؤلفه‌هایی اختصاص دارد که در تحلیل دوبعدی دپس‌مپ به‌طور مستقیم قابل مشاهده نیستند (جلول ۸).

جدول ۸. برآورد شاخص‌های مقطعی و سه بعدی مدارس مورد مطالعه (تدوین: نگارندگان)

مدرسه	ارتفاع متوسط جداره، متر	بعد متوسط حیاط، متر	محصوریت	ارتفاع عنصر مسلط، متر	ارتفاع بدنه، متر	سلسله مراتب ارتفاعی	گشودگی جداره	تعداد طبقات/تراز	اعتبار برآورد
آقازرگ کاشان	۷.۵۰	۲۴.۰۰	۰.۳۱	۱۷.۰۰	۷.۰۰	۲.۴۳	۰.۳۸	دو طبقه اصلی و چند تراز فضایی	متوسط
معماریاشی تهران	۶.۸۰	۱۸.۰۰	۰.۳۸	۸.۵۰	۶.۸۰	۱.۲۵	۰.۴۲	دو طبقه	متوسط رو به زیاد
فیلسوف‌الدوله تهران	۴.۸۰	۲۲.۰۰	۰.۲۲	۷.۴	۴.۸۰	۱.۵۴	۰.۴۴	یک طبقه اصلی	متوسط
جهانگیرخل قم	۴.۳۰	۱۴.۵۰	۰.۳۰	۵.۲۰	۴.۳۰	۱.۲۱	۰.۴۰	یک طبقه	متوسط رو به زیاد
حکیم‌پاشی تهران	۵.۴۰	۱۸.۰۰	۰.۳۰	۹.۰۰	۵.۴۰	۱.۶۷	۰.۳۶	یک طبقه اصلی با عنصر مرتفع عبادی	پایین تا متوسط
جلالیه اصفهان	۴.۶۰	۱۷.۰	۰.۲۷	۶.۸۰	۴.۶۰	۱.۴۸	۰.۳۹	یک طبقه	متوسط
میرالدوله تهران	۵.۳۰	۱۹.۰۰	۰.۲۸	۸.۶۰	۵.۳۰	۱.۶۲	۰.۳۷	یک طبقه اصلی با فضای عبادی مرتفع	پایین تا متوسط
خان شیراز	۸.۵۰	۴۸.۰۰	۰.۱۸	۱۵.۵۰	۸.۵۰	۱.۸۲	۰.۵۰	دو طبقه	زیاد برای ابعاد حیاط؛ متوسط برای ارتفاع‌ها

اعداد دارای علامت « $\approx$ » برآوردهای هندسی مبتنی بر پلان‌ها، تصاویر، اطلاعات منتشرشده و ارتفاع‌های متعارف طبقات هستند و صرفاً برای مقایسه تطبیقی استفاده شده‌اند؛ بنابراین جایگزین اندازه‌گیری مستقیم یا برداشت میدانی نیستند. دامنه خطای احتمالی برای ابعاد افقی ۱۰ تا ۱۵ درصد، ارتفاع‌ها ۱۵ تا ۲۰ درصد و نسبت گشودگی جداره حدود ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است. با توجه به محدودیت دسترسی مستقیم به برخی نمونه‌ها و استفاده از اسناد معماری موجود، اندازه‌گیری برخی مؤلفه‌های کالبدی با دامنه‌ای از خطای احتمالی همراه بوده است. این خطاها عمدتاً در مرحله برداشت ابعاد هندسی رخ داده و در محاسبه شاخص‌های نسبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از آنجا که هدف پژوهش مقایسه تطبیقی میان نمونه‌ها و بررسی روابط میان شاخص‌ها بوده است، نه تعیین مقادیر مطلق ابعادی، این میزان خطا در چارچوب تحلیل مقایسه‌ای قابل کنترل در نظر گرفته شد. همچنین برای کاهش اثر خطای اندازه‌گیری، تمامی داده‌ها با یک روش واحد استخراج و محاسبه شده‌اند. بررسی دقیق‌تر و کاهش دامنه خطاهای برداشت، می‌تواند در مطالعات آتی با دسترسی به برداشت‌های میدانی دقیق‌تر انجام شود.

$\bar{H}$: ارتفاع متوسط جداره‌های پیرامون حیاط

$\bar{W}$: میانگین طول و عرض مؤثر حیاط

$ER = \bar{H} / \bar{W}$: نسبت محصوریت حیاط

Hd : ارتفاع عنصر مسلط مانند ایوان، گنبدخانه یا مدرس

Hb : ارتفاع متوسط بدنه پیرامونی

شاخص سلسله‌مراتب ارتفاعی: $VHI = Hd / Hb$

نسبت تقریبی سطح بازشوها و دهانه‌ها به سطح جداره حیاط: $FOR = Ao / Af$

نتایج ارزیابی مقطعی نشان می‌دهد که کیفیت فضایی حیاط مرکزی در نمونه‌ها متفاوت است. در مدرسه خان شیراز، ایوان‌های مرتفع و جداره‌های دوطبقه، مرکزیت فضایی را در بعد عمودی تقویت می‌کنند. در مدرسه آقابزرگ کاشان، اختلاف ترازها، گنبدخانه، سرداب و بادگیرها ساختاری چندسطحی ایجاد کرده‌اند که در تحلیل دوبعدی به‌طور کامل آشکار نمی‌شود. در مقابل، نمونه‌هایی مانند جلالیه و جهانگیرخان با ساختار یک‌طبقه، از طریق هندسه صحن و محورهای ایوانی، درجات متفاوتی از محصوریت ایجاد می‌کنند. بنابراین، نقش مشترک حیاط مرکزی در نحو فضا، الزاماً به معنای کیفیت حجمی و ارتفاعی یکسان در مدارس نیست.

۱۰. تحلیل تلفیقی رابطه میان پیکره‌بندی دوبعدی و کیفیت‌های مقطعی-سه‌بعدی

به‌منظور ارزیابی کفایت تحلیل دوبعدی نحو فضا، شاخص‌های یکپارچگی بصری، خوانایی، عمق میانگین و آنتروپی با مؤلفه‌های مقطعی-سه‌بعدی شامل نسبت محصوریت حیاط، سلسله‌مراتب ارتفاعی و گشودگی جداره‌ها مقایسه شدند. شاخص ER از نسبت ارتفاع متوسط جداره‌ها به ابعاد مؤثر حیاط، VHI از نسبت ارتفاع عنصر مسلط به ارتفاع بدنه پیرامونی و FOR از نسبت سطح بازشوها به سطح جداره حیاط محاسبه شد. داده‌های دوبعدی از خروجی دپس‌مپ و جداول پیشین استخراج شده و مقادیر دارای علامت « $\sim$ » برآوردهای هندسی مبتنی بر مدارک کالبدی موجود هستند (جدول ۹). مقادیر ارائه‌شده در جدول ۳، مقادیر خام خروجی نرم‌افزار دپس‌مپ هستند که به دلیل مقیاس محاسباتی شبکه دید در برخی نمونه‌ها در دامنه بزرگ‌تری نمایش داده شده‌اند. در مقابل، مقادیر جدول ۹ بر اساس شاخص‌های نرمال‌شده و قابل مقایسه میان نمونه‌ها ارائه شده‌اند؛ بنابراین اختلاف مقیاس میان دو جدول ناشی از تفاوت نوع گزارش داده‌ها (خام و نرمال‌شده) است و بیانگر اختلاف در نتایج تحلیل نیست.

جدول ۹. مقایسه تلفیقی و تطبیقی شاخص‌های دوبعدی و مقطعی-سه‌بعدی مدارس مورد مطالعه (تدوین: نگارندگان)

ردیف	مدرسه	میانگین یکپارچگی بصری	ضریب خوانایی R^2	میانگین عمق آنتروپی	میانگین محصوریت حیاط ^۱	سلسله‌مراتب ارتفاعی ^۱	گشودگی جداره ^۱	نتیجه تحلیل تلفیقی
۱	آقابزرگ کاشان	۱.۱۱	۰.۶۳	۲۹.۵	۰.۲۶	۲.۳۳	۰.۲۸	تکمیل و جبران سه‌بعدی
۲	معمرباشی تهران	۸.۶۲	۰.۹۱	۲۰.۹	۰.۲۸	۱.۲۵	۰.۳۲	تقویت از طریق محصوریت
۳	فلسوفالوله تهران	۹.۱۲	۰.۸۵	۲۳.۰	۰.۲۲	۱.۵۴	۰.۳۴	همگرایی نسبی
۴	جهانگیرخان قم	۹.۷۰	۰.۹۱	۲۰.۰	۰.۳۰	۱.۲۱	۰.۴۰	تقویت هندسی-تلفیقی
۵	حکیم‌باشی تهران	۱۲.۵۲	۰.۰۳	۱۸.۱	۰.۲۳	۱.۶۷	۰.۳۶	تعارض میل مرکزیت نحوی و حجمی
۶	جلالیه اصفهان	۱۰.۲۴	۰.۳۹	۱۸.۴	۰.۲۷	۱.۴۸	۰.۲۹	استقلال نسبی دو لایه
۷	معزالوله تهران	۱۰.۵۹	۰.۹۴	۱۲.۳	۰.۲۸	۱.۶۲	۰.۲۷	تقویت مطلق
۸	خان شیراز	۱۶.۸۳	۰.۹۷	۱۸.۵	۰.۱۸	۱.۸۲	۰.۵۰	تقویت کامل دوبعدی-سه‌بعدی

نتایج جدول ۹ نشان می‌دهد که رابطه میان ساختار دوبعدی پلان و کیفیت مقطعی مدارس در همه نمونه‌ها یکسان نیست. در برخی بناها، مؤلفه‌های سه‌بعدی نتایج نحو فضا را تقویت می‌کنند؛ در برخی دیگر، ساختار ارتفاعی بخشی از محدودیت‌های پلان را جبران می‌کند و گاهی نیز میان مرکزیت نحوی و حجمی واگرایی دیده می‌شود. بنابراین، یکپارچگی یا خوانایی بالای پلان الزاماً به معنای محصوریت یا تأکید حجمی مشابه نیست. مدرسه خان شیراز با میانگین یکپارچگی ۱۶.۸۳ و $R^2=0.97$ ، بالاترین انسجام پیکره‌بندی را دارد. با وجود نسبت محصوریت پایین‌تر (۰.۱۸)، شاخص سلسله‌مراتب ارتفاعی ۱.۸۲ و گشودگی جداره ۰.۵۰ نشان می‌دهد که ایوان‌های مرتفع و دهانه‌های پیرامونی، مرکزیت حیاط را در بعد عمودی تقویت کرده‌اند؛ بنابراین در این نمونه، سازمان دوبعدی و سه‌بعدی در تقویت یکدیگر عمل می‌کنند. مدرسه معزالوله تهران با خوانایی ۰.۹۴، عمق ۱.۷۳ و آنتروپی ۱.۱۵، ساختاری منظم و قابل پیش‌بینی دارد. شاخص ارتفاعی ۱.۶۲ نشان می‌دهد که عنصر مسلط بنا، تأکید عمودی لازم را ایجاد کرده و ساختار مقطعی، خوانایی پلان را تکمیل می‌کند. مدرسه معمرباشی با محصوریت ۰.۳۸، بیشترین مقدار

ER را دارد. این ویژگی در کنار خوانایی ۰.۹۱ نشان می‌دهد که مرکزیت فضایی آن بیشتر حاصل پیوستگی جداره‌ها و تراکم فضایی است، نه حضور یک عنصر مرتفع؛ زیرا مقدار VHI برابر ۱.۲۵ است. مدرسه فیلسوف‌الدوله با خوانایی ۰.۸۵، گشودگی ۰.۴۴ و VHI برابر ۱.۵۴، نمونه‌ای از همگرایی نسبی میان ساختار پلان و ویژگی‌های مقطعی است؛ به گونه‌ای که ایوان‌ها و عناصر مرتفع، کاهش محصوریت ناشی از ارتفاع کمتر جداره‌ها را جبران می‌کنند. مدرسه جهانگیرخان با خوانایی ۰.۹۱ و عمق ۲، سازمان فضایی قابل درکی دارد. با وجود VHI پایین‌تر (۱.۲۱)، محصوریت ۰.۳۰ و گشودگی ۰.۴۰ نشان می‌دهد که مرکزیت این بنا بیشتر از طریق هندسه صحن، تلوم حجره‌ها و روابط افقی شکل گرفته است. مدرسه حکیم‌باشی تهران نمونه‌ای از واگرایی میان دو سطح تحلیل است. با وجود یکپارچگی ۱.۲۵۲، مقدار خوانایی بسیار پایین (۰.۰۳) نشان می‌دهد که مرکزیت دیداری و روابط کلی شبکه کاملاً منطبق نیستند. در این نمونه، عنصر حجمی مسلط با VHI برابر ۱.۶۷ لزوماً با سازمان دیداری پلان هماهنگ نشده است. مدرسه آقابرگ کاشان با یکپارچگی ۱.۱۱، عمق ۲.۹۵ و آنتروپی ۱.۹۲، پیچیده‌ترین ساختار پلان را دارد. در مقابل، VHI برابر ۲.۴۳ بالاترین مقدار را نشان می‌دهد که بیانگر نقش برجسته گنبدخانه، ایوان و اختلاف ترازهاست. بنابراین، تحلیل سه‌بعدی در این نمونه نقش تکمیل‌کننده داشته و بخشی از محدودیت‌های تحلیل دوبعدی را جبران می‌کند. در مدرسه جلالیه اصفهان، میانگین یکپارچگی ۱۰/۷۴ و عمق ۱/۸۴ نسبتاً مطلوب است، اما ضریب خوانایی ۰/۳۹ نشان می‌دهد که همبستگی میان وضعیت دسترسی و پیوستگی فضایی در مقیاس‌های موضعی و کلی، نسبت به مدارس مانند خان، معزالدوله و جهانگیرخان محدودتر است. مقادیر متوسط VHI و FOR نشان می‌دهد که در این نمونه‌ها نه عنصر مقطعی غالبی وجود دارد و نه حیاط به‌شدت محصور است؛ بنابراین، رابطه میان سازمان دوبعدی و سه‌بعدی در قالب استقلال نسبی قابل تفسیر است. بر اساس نتایج، مدارس مورد مطالعه در چهار گروه دسته‌بندی شدند:

۱. تقویت متقابل دوبعدی و سه‌بعدی: خان شیراز، معزالدوله تهران و تاحدی فیلسوف‌الدوله؛

۲. تقویت از طریق محصوریت یا هندسه افقی: معمارباشی تهران و جهانگیرخان قم؛

۳. تکمیل یا جبران محدودیت تحلیل پلان به‌وسیله مقطع: آقابرگ کاشان؛

۴. تعارض یا استقلال نسبی میان دو لایه: حکیم‌باشی تهران و جلالیه اصفهان.

این یافته‌ها نشان می‌دهد که نقش حیاط مرکزی تنها با شاخص‌های دوبعدی مانند اتصال و یکپارچگی بصری قابل تبیین نیست. مدرسه خان با وجود محصوریت کمتر، به‌واسطه ارتفاع و گشودگی ایوان‌ها خوانایی بالایی دارد، در حالی که مدرسه آقابرگ با وجود سلسله‌مراتب ارتفاعی قوی، دارای پلان عمیق و پیچیده است. بنابراین، انسجام فضایی مدارس سستی حاصل تعامل هم‌زمان سازمان پلان، ارتفاع جداره‌ها، محصوریت حیاط، گشودگی و عناصر حجمی مسلط است و ضرورت استفاده از مدل ترکیبی دوبعدی-سه‌بعدی در کنار تحلیل‌های پلان‌محور دپس‌مپ را تأیید می‌کند.

نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش، تبیین انسجام فضایی مدارس سستی ایران با استفاده از تحلیل‌های کمی و نحو فضا بود. در پاسخ به پرسش نخست، بررسی مؤلفه‌های مقطعی و سه‌بعدی نشان داد که تفاوت در محصوریت، سلسله‌مراتب ارتفاعی، گشودگی جداره‌ها و ویژگی‌های حجمی، موجب شکل‌گیری کیفیت‌های فضایی متفاوت شده است. در پاسخ به پرسش دوم، نتایج نشان داد حیاط مرکزی در بیشتر نمونه‌ها هسته اصلی سازمان فضایی و دیداری است و بیشترین نقش را در اتصال، یکپارچگی و کنترل بصری دارد، هرچند میزان خوانایی میان مدارس متفاوت است. در پاسخ به پرسش سوم، مقایسه دو سطح تحلیل نشان داد که مؤلفه‌های سه‌بعدی می‌توانند نتایج تحلیل دوبعدی نحو فضا را تقویت، تکمیل یا در برخی موارد تعدیل کنند. چارچوب پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان مبنایی مقدماتی برای بازاندیشی در کیفیت‌های فضایی مدارس معاصر مورد توجه قرار گیرد؛ با این حال، تدوین اصول طراحی کاربردی و ارزیابی عملکرد آنها نیازمند پژوهش مستقل و گسترده‌تر است. با توجه به ماهیت هدفمند نمونه‌گیری، نتایج این پژوهش بیش از آنکه به معنای تعمیم آماری به تمامی مدارس سستی ایران باشد، چارچوبی تحلیلی برای شناخت روابط میان سازمان فضایی، شاخص‌های نحوی و مؤلفه‌های کالبدی ارائه می‌کند. نتایج تحلیل نحو فضا در هشت مدرسه تاریخی نشان داد که حیاط مرکزی در بیشتر نمونه‌ها از نظر اتصال، یکپارچگی و کنترل بصری، عنصر اصلی پیونددهنده فضاهای پیرامونی است. تفاوت در مقادیر عمق،

اتصال، یکپارچگی و خوانایی نیز بیانگر تنوع در نحوه سازمان‌دهی شبکه فضایی مدارس است. با این حال، این نتایج صرفاً ویژگی‌های پیکره‌بندی و روابط دیداری را نشان می‌دهند و به‌تنهایی قادر به اثبات کیفیت‌های رفتاری، اجتماعی یا قصد طراحی معمار نیستند؛ بنابراین، تعمیم آن‌ها نیازمند بررسی نمونه‌های بیشتر و روش‌های مکمل است. تحلیل مقطعی سہ‌بعدی نشان داد که کیفیت مرکزیت حیاط تنها به سازمان افقی پلان وابسته نیست، بلکه با نسبت ارتفاع جداره‌ها به ابعاد حیاط، سلسله‌مراتب ارتفاعی، گشودگی جداره‌ها، اختلاف ترازها و ساختار پوشش فضاهای اصلی نیز ارتباط دارد. مدرسه خان شیراز با میانگین یکپارچگی بصری ۱۶۸۲ و $R^2 = 0.97$ ، بالاترین انسجام میان ساختار محلی و کلی پلان را نشان می‌دهد. همچنین شاخص تقریبی سلسله‌مراتب ارتفاعی ۱۸۲ و گشودگی مناسب جداره‌ها نشان می‌دهد که ایوان‌های مرتفع، مرکزیت حیاط را در بعد عمودی تقویت کرده‌اند؛ از این رو این نمونه بیانگر همگرایی میان تحلیل دوبعدی و سہ‌بعدی است. در مقابل، مدرسه آقابزرگ کاشان با میانگین یکپارچگی حدود ۱۰۱۴ و ضریب خوانایی ۰.۶۳، ساختاری عمیق‌تر و کم‌یکپارچه‌تر در پلان دارد؛ اما شاخص سلسله‌مراتب ارتفاعی تقریبی ۲۰۴۳، اختلاف ترازها، گنبدخانه و عناصر حجمی مسلط، بخشی از محدودیت‌های تحلیل دوبعدی را جبران می‌کند. بنابراین، در این نمونه مرکزیت فضایی بیشتر از طریق سازمان عمودی و عناصر حجمی شکل می‌گیرد. مقایسه این دو نمونه نشان می‌دهد که مقادیر نحوی مشابه یا متفاوت الزاماً به کیفیت فضایی یکسان منجر نمی‌شوند و مؤلفه‌های سہ‌بعدی می‌توانند نتایج تحلیل پلان را تقویت، تکمیل یا تعدیل کنند. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد ماتریس تلفیقی پیشنهادی، امکان ارزیابی همزمان کیفیت‌های افقی و عمودی سازمان فضایی را فراهم می‌کند و صرفاً به سنجش میزان یکپارچگی بصری محدود نیست. به‌گونه‌ای که در مدرسه خان شیراز، هم‌خوانی میان ساختار پیکره‌بندی، یکپارچگی بصری بالا و شاخص‌های فضایی تعریف‌شده، بیانگر انسجام بیشتر شبکه فضایی است؛ در مقابل، در مدرسه آقابزرگ کاشان، با وجود یکپارچگی بصری پایین‌تر، ویژگی‌هایی مانند عمق فضایی بیشتر، سلسله‌مراتب ارتفاعی و سازمان سہ‌بعدی بنا نقش مهمی در شکل‌گیری کیفیت فضایی ایفا می‌کنند. بنابراین، چارچوب پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان ابزاری تحلیلی برای تصمیم‌سازی در زمینه ارتقای کیفیت فضایی و بازاندیشی در طراحی و نوسازی مدارس معاصر ایران مورد استفاده قرار گیرد. نوآوری پژوهش حاضر ارائه چارچوبی تلفیقی است که نحو فضا را به‌عنوان لایه نخست تحلیل، در کنار شاخص‌های ارتفاعی، مقطعی و حجمی به‌کار می‌گیرد. یافته‌ها نشان دادند که انسجام فضایی مدارس سستی ایران حاصل تعامل میان سازمان افقی پلان، محصوریت، سلسله‌مراتب عمودی، گشودگی جداره‌ها، جهت‌گیری دید و ویژگی‌های حجمی است؛ بنابراین تحلیل صرف پلان برای تبیین کامل کیفیت فضایی کافی نیست و نیازمند تکمیل با تحلیل مقطع و حجم بناست. بر این اساس، در طراحی مدارس معاصر، حیاط مرکزی نباید صرفاً به‌عنوان یک فضای باز مرکزی بازتولید شود، بلکه ابعاد حیاط، ارتفاع و پیوستگی جداره‌ها، میزان گشودگی، موقعیت عناصر شاخص و رابطه فضاهای باز، نیمه‌باز و بسته باید به‌صورت همزمان در نظر گرفته شوند. الگوی قابل انتقال این پژوهش، هماهنگی میان سازمان افقی، محصوریت، گشودگی و سلسله‌مراتب ارتفاعی است، نه صرفاً فرم ظاهری حیاط. پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی نیز همراه است. داده‌های سہ‌بعدی بر اساس مدارک معماری موجود و اندازه‌های در دسترس تهیه شده‌اند و در برخی نمونه‌ها برداشت میدانی یکسان امکان‌پذیر نبوده است. همچنین تحلیل‌ها بر ویژگی‌های هندسی ثابت متمرکز بوده و عواملی مانند نور روز، عملکرد حرارتی، جریان هوا و رفتار واقعی کاربران را شامل نمی‌شود. علاوه بر این، محدود بودن نمونه‌ها به هشت مدرسه سبب می‌شود نتایج به‌صورت اکتشافی تفسیر شوند و تعمیم آن‌ها نیازمند بررسی نمونه‌های بیشتر و تحلیل‌های آماری گسترده‌تر است. با وجود نتایج حاصل از تحلیل‌های کمی و مقطعی، اعتبارسنجی رفتاری یافته‌ها از طریق مشاهدات میدانی، ردیابی حرکت کاربران و مصاحبه با استفاده‌کنندگان، همچنین بررسی دقیق‌تر مؤلفه‌های اقلیمی و شاخص‌های محلی، می‌تواند در پژوهش‌های آینده به‌عنوان مسیر تکمیلی توسعه این چارچوب مورد توجه قرار گیرد. بر این اساس، ماتریس تلفیقی پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان ابزاری تحلیلی برای تصمیم‌سازی و ارتقای کیفیت فضایی در طراحی مدارس معاصر ایران مورد استفاده قرار گیرد.

ملاحظات اخلاقی و اطلاعات تکمیلی

برگرفته از پایان نامه/رساله: نویسندگان اعلام می‌دارند که این مقاله حاصل پژوهش مستقل بوده و مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد یا رساله دکتری نیست.

حمایت مالی: «این پژوهش هیچ بودجه خارجی دریافت نکرده است»

تعارض منافع: «نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه 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 هوش مصنوعی ChatGPT صرفاً جهت جمع‌آوری داده‌ها، ویرایش زبانی و بهبود روانی متن استفاده کرده‌اند. تمامی نویسندگان مسئولیت نهایی محتوای تولید شده و صحت مطالب علمی ارائه‌شده در این مقاله را بر عهده دارند و تأیید می‌کنند که استفاده از این ابزارها با اصول اخلاق پژوهشی و سیاست‌های این نشریه همخوانی دارد»

پی‌نوشت

1. Space Syntax
2. Connectivity
3. Integration
4. Visual Control
5. Entropy
6. Mean Depth
7. Visibility Graph Analysis
8. Isovist
9. Buildings
10. Land
11. Hillier & Hanson (1984)
12. The Social Logic of Space
13. Introduction to Persian Residential Architecture
14. A Configurational Approach to Urban Morphology
15. Spatial Configuration of Iranian Courtyard Houses
16. Bafna (2013)
17. Space Syntax: A Brief Introduction
18. Visibility and Privacy in Iranian Vernacular Houses
19. Privacy at home: Analysis of behavioral patterns in the spatial configuration of traditional and modern houses in the city of Hamedan based on the notion of space syntax
20. Residential Spatial Configuration for Visual Privacy in Iranian Dwellings
21. Zolfagharkhani & Ostwald (2021)
22. The Spatial Structure of Yazd Courtyard Houses
23. Exploring Traditional Iranian Houses Using Space Syntax Theory
24. AHP
25. Agent-based
26. Varoudis & Psarra, 2014
27. Beyond Two Dimensions: Architecture through Three-Dimensional Visibility Graph Analysis

منابع

- پیرنیا، محمد کریم و معاریان، غلامحسین. (۱۳۹۵). *معماری ایرانی*. تهران: سروش دانش.
- پیرنیا، محمد کریم و معاریان، غلامحسین. (۱۳۸۸). *آشنایی با معماری اسلامی ایران*. تهران: سروش دانش.
- حاجی قاسمی، کامییز (گردآورنده). (۱۳۹۴). *گنجنامه: فرهنگ آثار معماری اسلامی ایران، دفتر پنجم: مدارس (ویراست دوم)*، تهران: مرکز اسناد و تحقیقات دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی.
- معاریان، غلامحسین. (۱۳۸۱). *نحو فضای معماری*. صفه، ۱۲ (۲).
- همدانی گلشن، حامد. (۱۳۹۴). بازاندیشی نظریه نحو فضا، رهیافتی در معماری و طراحی شهری؛ مطالعه موردی: خانه بروجردی‌ها، کاشان. *نشریه هنرهای زیبا: معماری و شهرسازی*، ۲۰ (۲)، ۸۵-۹۲.
- راستجو، سیده سولماز و بمانیان، محمدرضا. (۱۳۹۸). گونه‌شناسی ساختار فضایی خانه معاصر ایرانی با تکیه بر محرمت و سلسله‌مراتب. *نشریه هنرهای زیبا: معماری و شهرسازی*، ۲۴ (۲)، ۴۹-۵۸.
- فرشیدی، محمد، منصوری، سید امیر و میرشاهزاده، شروین. (۱۴۰۱). تأثیر مؤلفه‌های ذهنی بر آنالیز نحو فضا با بهره‌گیری از گراف وزن دار. *باغ نظر*، ۱۹ (۱۱۳)، ۱۰۵-۱۲۲.
- Al-Harithy, H. (2001). The concept of space in Mamluk architecture. *Muqarnas*, 18, 73-93.
- Alitajer, S., & Nojourni, G. M. (2016). Privacy at home: Analysis of behavioral patterns in the spatial configuration of traditional and modern houses in the city of Hamedan based on the notion of space syntax. *Frontiers of Architectural Research*, 5(3), 341-352. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2016.02.003>
- Almamoori, H. S. (2015). Courtyard is basic pattern in traditional Islamic architecture: As prototype. *International Scientific Conference: Standardization, Prototypes and Quality*.
- Al-Moqaram, A. M. H., & Al-Amara, R. R. F. (2020). Compatibility of spaces organization of Islamic schools with the characteristics of the contemporary learning environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 745, Article 012136. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/745/1/012136>
- Askarizad, R., Lamíquiz Daudén, P. J., & Gálvez-Pérez, D. (2024). The application of space syntax to enhance sociability in public urban spaces: A systematic review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(7), Article 227. <https://doi.org/10.3390/ijgi13070227>
- Bada, Y., & Farhi, A. (2014). Experiencing urban spaces: Isovists properties and spatial use of plazas. *Courrier du Savoir Scientifique et Technique*, 18, 49-58.
- Bafna, S. (2013). Space syntax: A brief introduction. *Environment and Behavior*, 45(1), 70-91. <https://doi.org/10.1177/0013916512463175>
- Benedikt, M. L. (1979). To take hold of space: Isovists and isovist fields. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 6(1), 47-65. <https://doi.org/10.1068/b060047>
- Carson, H., Ford, J., & Milford, M. (2022). Predicting to improve: Integrity measures for assessing visual localization performance. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7, 9627-9634. <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3191205>
- Crameri, F., & Hason, S. (2024). Navigating color integrity in data visualization. *Patterns*, 5, Article 100972. <https://doi.org/10.1016/j.patter.2024.100972>
- Esmaeeli, B., & Hosseini, A. (2021). Analysis of how to shape the mosques and schools of Iran in Safavid and Qajar era. *Journal of Architecture in Hot and Dry Climates*, 9(12), 55-72.
- Fastowicz, J., Grudziński, M., Teclaw, M., & Okarma, K. (2019). Objective 3D printed surface quality assessment based on entropy of depth maps. *Entropy*, 21, Article 97. <https://doi.org/10.3390/e21010097>

- Flood, M., & Grimm, B. (2021). EntropyHub: An open-source toolkit for entropic time series analysis. *PLOS ONE*, 16, Article e0259448. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259448>
- Garau, C. (2023). Socio-spatial experience in space syntax research: A PRISMA review. *Buildings*, 13(3), Article 644. <https://doi.org/10.3390/buildings13030644>
- Gil, J., Varoudis, T., Karimi, K., & Penn, A. (2015). The space syntax toolkit: Integrating depthmapX and exploratory spatial analysis workflows in QGIS. *Conference: 10th International Space Syntax Symposium*, University College London, London, UK.
- Golshan, H. H. (2019). Exploring traditional Iranian house and culture using Space Syntax theory and methods. *Creative City Design*, 2(2), 9-14.
- Heidari, A. A., & Kiaei, M. (2023). Comparative analysis of visual and physical accessibility in spatial syntax of Iranian houses. *AAUD*, 16(42), 47-62.
- Hillier, B., & Hanson, J. (1984). *The social logic of space*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Hillier, B., Hanson, J., & Graham, H. (1993). Ideas are in things: An application of the space syntax method to discovering house genotypes. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 20(1), 23-47.
- Koutsolampros, P., Sailer, K., Varoudis, T., & Haslem, R. (2019). *Dissecting visibility graph analysis: The metrics and their role in understanding workplace human behavior*. 12th Space Syntax Symposium.
- Li, S., Zhang, Q., & Chiaradia, A. (2024). *Multiscale permutation entropy in architectural visibility networks*. *Computers, Environment and Urban Systems*, 110, 102018.
- Lu, W., & De Maeseneer, M. (2025). Evaluation of and Reconnection to Open Space: The Chicago Strip. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su17062457>
- Lu, Y., & Peponis, J. (2014). Exhibition visitors are sensitive to patterns of display covisibility. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 41(1), 53-68. <https://doi.org/10.1068/b39058>
- Memarian, G. H. (1994). *Ashnaei ba Memari-ye Iran: Guneh-shenasi-ye Borun-gara* (Introduction to Iranian Architecture: Extroverted Typology). Tehran: Iran University of Science and Technology.
- Muyasarah, M., & Sarwadi, A. (2023). Konektivitas Pada Area Rumah Susun Harapan Jaya di Kota Pontianak. *ARSITEKTURA*. <https://doi.org/10.20961/arst.v21i1.64530>.
- Penn, A., Hillier, B., Banister, D., & Xu, J. (1998). Configurational modeling of urban movement networks. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 25(1), 59-84.
- Permata, D., Al-Fitriani, E., Andriana, F., & Kumiawan, A. (2022). Connectivity dan Integrity dalam Space Syntax pada Bangunan Sekolah Al-Biruni Cerdas Mulia Bandung. *Review of Urbanism and Architectural Studies(RUAS)*, 20(1). <https://doi.org/10.21776/ub.ruas.2022.020.01.6>.
- Pessa, A., & Ribeiro, H. (2021). ordpy: A Python package for data analysis with permutation entropy and ordinal network methods.. *Chaos*, 31 6, 063110. <https://doi.org/10.1063/5.0049901>
- Rapoport, A. (1969). *House Form and Culture*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Rauof, T., & Al-Qemaqchi, N. (2022). Using Space Syntax Technique to Enhance Visual Connectivity in Hospitals. *Revista Amazonia Investiga*. <https://doi.org/10.34069/ai/2022.51.03.9>.
- Turner, A. (2003). Analysing the visual dynamics of spatial morphology. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 30(5), 657-676. <https://doi.org/10.1068/b12962>

- Turner, A. (2004). *Depthmap 4: A researcher's handbook*. Bartlett School of Graduate Studies, University College London.
- Turner, A., Doxa, M., & Penn, A. (2001). From isovist to visibility graphs: A methodology for the analysis of architectural space. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28(1), 103-121. <https://doi.org/10.1068/b26814>
- Varoudis, T., & Penn, A. (2015). Visibility, accessibility and beyond: Next generation visibility graph analysis. *Proceedings of the 10th International Space Syntax Symposium*. London, UK.
- Varoudis, T., & Psarra, S. (2014). Beyond two dimensions: Architecture through three-dimensional visibility graph analysis. *The Journal of Space Syntax*, 5(1), 91-108.
- Yamu, C., & van Nes, A. (2021). Understanding urban form: Space syntax and spatial analysis. *SPRINGER NATURE Linke*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-59194-6>
- Wang, P., Li, W., Gao, Z., Tang, C., & Ogunbona, P. (2018). Depth Pooling Based Large-Scale 3-D Action Recognition With Convolutional Neural Networks. *IEEE Transactions on Multimedia*, 20, 1051-1061. <https://doi.org/10.1109/TMM.2018.2818329>.
- Zamani, A., Ranjbar, M., & Karimi, K. (2020). Visibility and privacy in Iranian vernacular houses. *Buildings*, 10(9), Article 166. <https://doi.org/10.3390/buildings10090166>
- Zhang, L., & Chiaradia, A. (2020). Urban volumetrics: Extending space syntax to three-dimensional space. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 47(8), 1501-1520. <https://doi.org/10.1177/2399808320901816>
- Zolfagharkhani, M., & Ostwald, M. J. (2021). The spatial structure of Yazd courtyard houses: A space syntax analysis of the topological characteristics of the courtyard. *Buildings*, 11(6), Article 262. <https://doi.org/10.3390/buildings11060262>