

Organized Visual Entanglement of the Ornamentation of the Dadoes and the Main Prayer Hall's Dome Underside in the Hakim Mosque, with an Emphasis on Non-Euclidean Geometry¹

Keyhane Raeisi *

Iman Zakariaee Kermani **

Jalil Jokar ***

Samad Najarpour Jabari ****

The criterion of entanglement in architectural ornamentation, particularly in geometric forms, enhances the richness of user experience and creates multiple semantic layers within a space by stimulating visual perception and improving the visual quality of the building. Entanglement helps ornamentation present valuable information more effectively to the audience. This criterion is examined in the Hakim Mosque of Isfahan, a Safavid masterpiece characterized by rich ornamentation and diverse dadoes. Accordingly, this research aims to analyze the visual entanglements of the ornamentation in the main dome's underside prayer hall (shabestan) and seeks to answer the primary question: What role does the visual entanglement of the ornamentation in the main dome's underside prayer hall of the Hakim Mosque play in the legibility of the architecture and spatial functionality? This research is applied in terms of objective and descriptive-analytical in terms of methodology. The data collection methods include library, internet, and field research. Data analysis is conducted using fractal geometry and software. After analyzing the entanglement of patterns in the dadoes of the main dome's underside prayer hall, it was concluded that these patterns exhibit a relatively high degree of entanglement compared to the dadoes of adjacent subsidiary prayer halls. Moreover, this degree of entanglement is consistent with the entanglement of the main dome's underside ornamentation. Consequently, this feature distinguishes the main prayer hall, adds to its grandeur, and attracts more audience attention than adjacent prayer halls. Additionally, due to their organized fractal characteristics (self-similarity) and informational quality, these patterns establish a connection between the audience and the forms and surfaces, thereby improving spatial functionality.

Keywords: Entanglement, Organized Structure, Fractal Dimension, Self-Similarity, Hakim Mosque.

1. This article is based on the master's thesis of "Keyhane Reisi" titled "Analysis of Fractal Geometry System in The Maqeli Patterned Tiles of Hakim Mosque in Isfahan" supervised by Dr. "Iman Zakariaee" and Dr. "Jalil Jokar" and advised by Dr. "Samad Najarpour" which was done at the faculty of Handicrafts, Isfahan University of Art.

* PhD Student in Art Research, Faculty of Advanced Art Research, Isfahan University of Art, Isfahan, Iran.

k.raeisi@au.ac.ir

<http://orcid.org/0009-0005-7485-4716>

** Corresponding Author: Associate Professor, Carpet Department, Faculty of Handicrafts, Isfahan University of Art, Isfahan, Iran.

i.zakariaee@au.ac.ir

<http://orcid.org/0000-0001-5337-7811>

*** Instructor, Faculty of Handicrafts, Isfahan University of Art, Isfahan, Iran.

j.jokar@au.ac.ir

<http://orcid.org/0009-0004-2995-1050>

**** Associate Professor, Department of Calligraphy and Painting, Faculty of Handicrafts, Isfahan University of Art, Isfahan, Iran.

s.najarpour@au.ac.ir

<http://orcid.org/0009-0001-6213-9580>

Introduction

Traditional architecture, by establishing a relationship between human and building, introduces ornamentation as an essential component of this relationship. The entanglement of ornamentation in historical buildings demonstrates the harmony between art, engineering, and the artisans' skill, thereby contributing to a better understanding of space. Fractal geometry (which traditional artists have subconsciously derived from nature) provides a quantitative tool for analyzing this entanglement. The case study for this research is the Hakim Mosque of Isfahan, specifically the dadoes of the southern iwan and the main dome's underside prayer hall. The primary objective is to analyze the role of visual entanglement of ornamentation in architectural legibility and spatial functionality. Research questions include "the exact type and degree of entanglement" and "its effects." The significance and necessity of this research lie in analyzing entanglement, visual richness, and the characteristics of geometric patterns in traditional Iranian architectural ornamentation from the perspective of non-Euclidean geometry to better understand these patterns, their perceptual effects on the audience, and to explore hidden semantic layers and the intellectual roots of traditional artists a fundamental issue in interdisciplinary studies of art and architecture. Studies of traditional examples within common approaches are often based on technical, semiotic, or aesthetic concepts, with less attention paid to methodologies related to hidden geometry, especially non-Euclidean geometries. Given that living in an entangled (complex and fractal-like) world requires possessing quantitative and structured tools for measuring this entanglement, applying fractal geometry as one of the quantitative analysis methods plays a significant role in understanding the visual systems governing traditional ornamentation. The methodology based on fractal geometry, while providing a theoretical and practical gateway for researchers in the field of art (especially in architectural studies), can also prove effective in contemporary modernist designs by maintaining continuity with authentic traditions, paving the way for integrated approaches between historical authenticity and innovation.

Research Methodology

This research is applied in terms of objective and descriptive-analytical in terms of methodology. Data collection methods include library, internet, and field research, and software was used for data analysis. The selected samples are initially analyzed to identify the type of entangled pattern using the principles of fractal geometry (self-similarity). Subsequently, their fractal dimension is calculated using the box-counting method via Fractalyse software to quantify the degree of entanglement. This involves linearizing the patterns using AutoCAD to examine their self-similarity. The patterns are then converted into shapefiles using ArcMap software and imported as vector files into Fractalyse, where the fractal dimension is computed using the box-counting method and logarithmic formula. Before calculating the dimension in the software settings, the maximum and minimum sizes must be entered, which depend on the image dimensions. The minimum size is typically set to 1, ensuring fine details are included in the analysis. The maximum value is approximately 1/3 to 1/4 of the longest side (length or width) of the input image. In this method, a grid of boxes is overlaid on the image, the number of boxes along the grid is counted ($1/s$), and the number of boxes covering the image ($N(s)$) is also counted. The fractal dimension (D_b) is calculated as follows (Bovill, 1996: 41-42):

$$D_b = (\log(N(S_2)) - \log(N(S_1))) / (\log(1/S_2) - \log(1/S_1))$$

In the next step, the box size is halved, doubling the number of boxes along the grid, and the boxes covering the image are counted again. The placement of the grid and the calculation of the dimension are performed automatically by the software. Sample calculations are provided in . Since fractal dimension calculation is

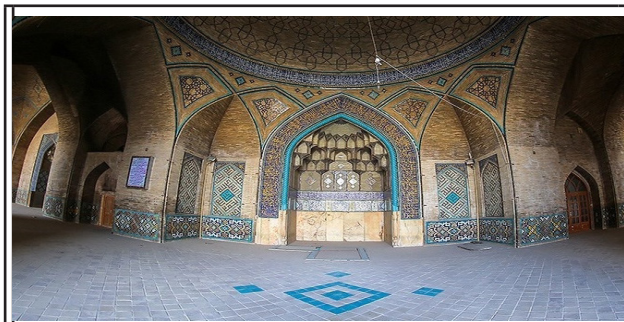


a gradual process, for greater accuracy, the box size must be progressively reduced to approximately fit the pattern. The software continues this process down to the smallest box size that fits the pattern. In this research, four stages of this process are illustrated. A scatter plot with coordinates $\text{Log}(N)$ and $\text{Log}(1/S)$ is generated, and a straight line is fitted to the points using the software. The slope of this line equals the exact fractal dimension. In the manual box-counting method using the formula over four stages, three different dimension values are obtained. Based on the $\text{Log}(1/S)$ versus $\text{Log}(N)$ plot generated by the software, the slope of the line between points that have the least deviation from linearity is calculated. This value will be the closest to the fractal dimension (manual calculation may involve minor errors due to rounding compared to software calculation). This method is called differential box-counting (Ansari & Pandey, 2020:1473). The dimension calculation for all samples is performed using this method. The fractal dimension is a number between 1 (a straight line) and 2 (a fully filled two-dimensional plane). A pattern with a dimension midway between a line and a surface, i.e., a fractal dimension of 1.5, is termed a (mid-range) fractal. The more complex the fractal, the closer its dimension approaches 2; the less complex, the closer it approaches 1 (Salingaros, 2022: 189).

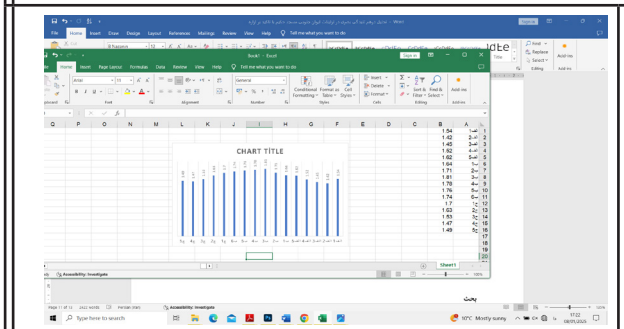
Discussion and Conclusion

Entangled ornamentation plays a significant role in the quality of architectural space, the most important of which is the enhancement of qualitative attributes. Moreover, it bestows identity upon the space. With the emergence of ornamentation, many qualitative attributes of space such as artistic quality, imagination, entanglement, and variety are elevated. Therefore, the degree and type of entanglement must be carefully examined. Entanglement introduces ambiguity into ornamentation; the greater this ambiguity, the higher the capacity for imagination and wonder evoked in the audience. The use of fractal patterns as organized entangled structures can create harmonious yet engaging spaces for the audience. Based on the analyses conducted on the dadoes of the main dome's underside prayer hall, the plotting of the entanglement diagram for the dadoes of the southeastern and southwestern prayer halls, and their comparison, the ornamentation of the dado and the dome underside of the main prayer hall possessing high entanglement attracts the audience and imparts grandeur and visual richness to that part of the building. On the other hand, due to the organized nature of the entanglement, this ornamentation neither confuses nor fatigues the audience and does not carry superfluous information. High organized entanglement endows the ornamentation with a distinct character. According to the figure, the degree of entanglement of the dadoes in the main dome's underside prayer hall is higher than that of adjacent prayer halls. Consequently, it possesses a greater capacity to attract the audience and induce pause within that space; the audience subconsciously spends time exploring these entanglements and acquiring information. Furthermore, this higher entanglement compared to adjacent spaces indicates the important and primary function of this space relative to other spaces within the building. In effect, the main prayer hall is distinguished from its surrounding areas. Since the fractal dimension calculation has been performed on the linear patterns of the images, image quality does not affect the dimension value (because fractal dimension is directly influenced by lines, fractures, and edges). Image scales are directly related to the maximum and minimum input thresholds of the software and thus influence the research results. Therefore, efforts have been made to account for this factor, ensuring that the sizes of images input into the software are approximately uniform. Of course, the increasing or decreasing trend of the dimension is of primary interest in this research. Among the research limitations are potential errors inherent in the box-counting method, the absence of perceptual data, and the limited generalizability from a single historical case study.





The main prayer hall (shabestan) and subsidiary prayer halls



**-Main Prayer Hall- Southwestern Prayer Hall
Southeastern Prayer Hall**

Based on the analyses conducted on the entanglement of the dado ornamentation in the main dome's underside prayer hall of the Hakim Mosque and the comparison of their degree of entanglement with adjacent prayer halls, it is concluded that the dados in this section possess a high degree of entanglement, and this degree is consistent with the entanglement of the ornamentation of the main dome's underside. This high entanglement, in addition to demonstrating the harmony between ornamentation and building function and enhancing its visual richness, attracts the audience to this area as the main space of the iwan. Furthermore, due to the structural information resulting from the entanglement, it retains the audience within that space. On the other hand, because of the harmony between the dado and dome underside ornamentation and the organized nature of the entanglement of these decorations, it creates a sense of harmony with the architecture in the audience; living forms such as the human body constitute an organized fractal form. The human brain, responsible for information processing, itself possesses an organized entangled structure. Therefore, it effectively communicates with information similar to its own structure.

Thus, entanglement, particularly in the form of fractal geometry, holds significant potential for transforming architecture both in terms of visual appeal and in promoting sustainable, user-friendly environments. This characteristic is abundantly found in Safavid architecture. Consequently, traditional architects, with sufficient skill and through the execution of robust, rich, and calculated ornamentation, have facilitated audience interaction with architectural spaces and, through ornamentation and the creation of entanglement within them, have clearly delineated spatial functions. The results and findings of this research help contemporary architects understand how to consciously employ organized entanglement not merely as a decorative element but as a tool for directing audience behavior (attraction, pause, and movement), replacing taste-based and arbitrary ornamentation with identity-based decoration.

References



- Alexander, C. (2004) *The Nature of Order* (Center for Environmental Structure, Berkeley, California).
- Ansari, F.A & Pandey, Y. (2020) Calculating Fractal Dimension of Gray scale and Color image by using DBC and RCC, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 7(7), 1467-1673.
<https://doi.org/10.5815/IJIGSP.2017.03.04>.
- Ashraf Ganjavi, M. A., & Iranmanesh, M. (2023) Recognition of the Relationship between the Kushk and the Persian Garden from the Perspective of Fractal Geometry (Case Study: Kushks of Fathabad Garden in Kerman). *Manzar Magazine*, 16(67), 6-13.
<https://doi.org/10.22034/manzar.2024.425783.2265>.
- Aswathy, RK & Mathew, S. (2016) On different forms of self-similarity, *Journal of Chaos, Solitons & Fractals*, 87, 102-108.
DOI: 10.1016/j.chaos.2016.03.021.
- Bahrini, S. H., & Foroughifar, M. (2016) Physical Integration of the Central Area of Shiraz: Presenting Urban Design Strategies to Enhance Physical Cohesion Based on Complexity Theory. *Hoviate Shahr*, 28(10), 5-18.
Dor: 20.1001.1.17359562.1395.10.4.1.2.
- Bani Masoud, A. (2009) *Postmodernity and Architecture (A Study of Intellectual Currents in Contemporary Western Architecture 1960-2000)*. Isfahan: Khak Publications.
- Lesmoir-Gordon, N. (2010) *The Colors of Infinity, The Beauty and power of fractals*, Springer London Dordrecht Heidelberg New York.
DOI: 10.1007/978-1-84996-486-9.
- Losa G, Ristanović, D, Ristanović, D, Zaletel, I & Beltraminelli, S. (2016) From Fractal Geometry to Fractal Analysis, *Applied Mathematics*, 7(4), 346-354.
DOI: 10.4236/am.2016.74032.
- Salingaros, Nikos A. (2014) *Complexity in Architecture and Design*. *Oz Journal*, 36(1), 18-25.
DOI: 10.4148/2378-5853.1527.
- Salingaros, N. A. (2008) *A Theory of Architecture* (S. Zarrinmehr & Z. Motaki, Trans.). Tehran: Urban Planning and Architecture Studies and Research Center. (Original work published 2006).
- Salingaros, N. A. (2022) *The City from the Perspective of Fractal Geometry* (M. Babaei, Trans., 2nd ed.). Tehran: Samin Publications. (Original work published 2005).
- Sharifi, T., & Soleymani, B. (2021) The Role of Design Thinking Between Mind and Complexity. *Raypooye Visual Arts*, 4(4), 48-75.
<https://doi.org/10.22034/ra.2021.527575.1038>.
- Vahdat T., M., Yaran, A., & Mohammadi Khoshbin, H. (2020) Evaluation of Visual Preferences in Residential Facades (Case Study: Twelve Historical Houses in Tabriz). *Armanshahr Architecture & Urban Development*, 13(32), 175-187.
<https://doi.org/10.22034/aaud.2019.150473.1692>.



درهم‌تنیدگی سازمان یافته بصری تزئینات ازاره‌ها و زیرگنبد شبستان اصلی مسجد حکیم با تأکید بر هندسه ناقلیدسی

کیهان‌رئیس^{*}، ایمان زکریایی کرمانی^{**}، جلیل جوکار^{***}، صمد نجارپورجباری^{****}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۰

نوع مقاله: پژوهشی - ۲۵-۴۴

چکیده

معیار درهم‌تنیدگی در تزئینات بنا به‌ویژه در فرم‌های هندسی با تحریک حس بصری و ارتقای کیفیت دیداری بنا باعث ارتقای غنای تجربه کاربران و ایجاد لایه‌های معنایی مختلف در فضا می‌شود. درهم‌تنیدگی به تزئینات کمک می‌کند تا اطلاعات واجد ارزش را به مخاطب، بهتر ارائه دهند. این معیار در مسجد حکیم اصفهان به عنوان یکی از شاهکارهای صفوی که در بردارنده غنای تزئینات و ازاره‌های متنوع است، بررسی می‌شود. از این‌رو پژوهش با هدف تحلیل درهم‌تنیدگی‌های بصری تزئینات شبستان زیرگنبد اصلی مسجد، در پی پاسخ به این پرسش اصلی است که درهم‌تنیدگی بصری تزئینات شبستان زیرگنبد اصلی مسجد حکیم، چه نقشی در خوانایی معماری و عملکرد فضایی دارد؟ این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش، توصیفی-تحلیلی است. روش داده‌اندوزی، کتابخانه‌ای، اینترنتی و میدانی است. تحلیل داده‌ها با کمک هندسه فرکتال و نرم‌افزار انجام می‌شود. پس از تحلیل درهم‌تنیدگی نقوش ازاره‌های شبستان اصلی زیرگنبد، این نتیجه حاصل شد که این نقوش، نسبت به ازاره‌های شبستان فرعی مجاور، درهم‌تنیدگی نسبتاً بالایی دارد و این میزان درهم‌تنیدگی با درهم‌تنیدگی زیرگنبد اصلی نیز هماهنگ است. بنابراین این مورد باعث تمایز، شکوه و جذب مخاطب بیشتر این شبستان نسبت به شبستان‌های مجاور است. همچنین به دلیل داشتن ویژگی‌های فرکتالی (خودمانایی) از نوع سازمان یافته و دارای کیفیت اطلاعات، باعث برقراری ارتباط مخاطبان با فرم‌ها، سطوح و بهبود عملکرد فضایی می‌شوند.

کلمات کلیدی: درهم‌تنیدگی، ساختار سازمان یافته، بُعد فرکتال، خودمانایی و مسجد حکیم.

k.raeisi@au.ac.ir
http://orcid.org/0009-0005-7485-4716

i.zakariaee@au.ac.ir
http://orcid.org/0000-0001-5337-7811

j.jokar@au.ac.ir
http://orcid.org/0009-0004-2995-1050

s.najarpoor@au.ac.ir
http://orcid.org/0009-0001-6213-9580

* دانشجوی دکتری پژوهش هنر، دانشکده پژوهش‌های عالی هنر، دانشگاه هنر اصفهان. اصفهان، ایران

** نویسنده مسئول: دانشیار گروه فرش، دانشکده صنایع دستی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران

*** مربی دانشکده صنایع دستی دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران

**** دانشیار، گروه کتابت و نگارگری، دانشکده صنایع دستی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران.



مقدمه

معماری سنتی با وصل کردن مخاطب به بنا، باعث برقراری ارتباط میان انسان‌ها و اطلاعات محیطی می‌شود. تزئینات، یکی از بخش‌های ضروری این ارتباط است. درهم‌تیدگی تزئینات بناهای معماری به‌ویژه در آثار تاریخی، نشان‌دهنده هماهنگی بین عناصر هنری و مهندسی و مهارت هنرمندان است و به اطلاعات بنا ارزش می‌بخشد. تزئینات بنا، جزئیات را به صورت دقیق و ماهرانه سازماندهی می‌کند تا به یک فرم کلان معنا بخشیده، آن را قابل فهم‌تر کند (سالینگروس، ۱۳۸۷: ۱۷۳).

مطالعه درهم‌تیدگی در تزئینات معماری به عنوان یکی از ویژگی‌های کلیدی در ایجاد ارتباطات پیچیده و پویا میان جزئیات و فرم‌های تزئینی، تأثیرات آن بر تجربه بصری مخاطب و عملکرد فضایی را بررسی می‌کند. فرکتال به عنوان هندسه نوینی که هنرمندان سنتی حتی به صورت ناخودآگاه با الگوگیری از طبیعت در تزئینات بنا به کار برده‌اند، نقش مهمی را برای تحلیل درهم‌تیدگی تزئینات ایفا می‌کند. با محاسبه بُعد فرکتال نقوش می‌توان میزان دقیق درهم‌تیدگی را محاسبه و کمی‌سازی کرد.

مسجد حکیم اصفهان از شاهکارهای دوره صفوی و سرشار از تزئینات معقلی است. تکرار نقوش با حفظ تناسب و نحوه ترسیم نقوش معقلی بر اساس شبکه‌های شطرنجی، بیانگر وجود هندسه فرکتال در آنهاست. در این صورت می‌توان ویژگی‌های فرکتال‌ها را در نقوش از اهرهای مسجد حکیم جستجو و تبیین کرد. ازاره‌های ایوان جنوبی مسجد حکیم علاوه بر داشتن جنبه تزئینی، قطعاً حاوی اطلاعات دیگری نیز هستند. این پژوهش با هدف تحلیل درهم‌تیدگی‌های بصری تزئینات شبستان زیرگنبد اصلی با تمرکز بر ازاره‌ها در پی پاسخ به این پرسش

اصلی است که درهم‌تیدگی بصری تزئینات شبستان زیرگنبد اصلی مسجد حکیم، چه نقشی در خوانایی معماری و عملکرد فضایی دارد؟

در این راستا پرسش‌های فرعی نیز مطرح می‌شود:

- درهم‌تیدگی این تزئینات از چه نوع است؟

- میزان دقیق این درهم‌تیدگی چقدر است و چه تأثیراتی دارد؟

از اهمیت و ضرورت‌های پژوهش، تحلیل درهم‌تیدگی، غنای بصری و ویژگی‌های نقوش هندسی در تزئینات بناهای سنتی ایران از منظر هندسه ناقلیدسی به منظور شناخت بهتر این نقوش، تأثیرات ادراکی آنها بر مخاطب و همچنین واکاوی لایه‌های پنهان معنایی و ریشه‌های فکری هنرمندان سنتی، مسئله‌ای بنیادین در مطالعات میان‌رشته‌ای هنر و معماری به شمار می‌رود. بررسی نمونه‌های سنتی در رویکردهای رایج، اغلب بر پایه مفاهیم فن‌شناسانه، معناکاوانه یا زیباشناسانه صورت گرفته است و کمتر به روش‌شناسی‌های مرتبط با هندسه پنهان و به‌ویژه هندسه‌های ناقلیدسی توجه شده است. از آنجا که زیست در دنیای درهم‌تیده (پیچیده و فرکتال‌وار)، مستلزم برخورداری از ابزار کمی و ساختارمند برای سنجش این درهم‌تیدگی است، به‌کارگیری هندسه فرکتال به‌مثابه یکی از روش‌های تحلیل کمی، نقشی بسزا در شناخت نظام‌های بصری حاکم بر تزئینات سنتی ایفا می‌کند. روش‌شناسی مبتنی بر هندسه فرکتال، ضمن فراهم آوردن روزه‌ای نظری و عملی برای پژوهشگران حوزه هنر (به‌ویژه در مطالعات معماری)، می‌تواند در طراحی‌های نوگرای معاصر نیز با حفظ پیوستگی با سنت‌های اصیل، مؤثر واقع شود و زمینه‌ساز رویکردهایی تلفیقی میان اصالت تاریخی و نوآوری شود.

پیشینه پژوهش

پژوهش‌هایی با محوریت درهم‌تیدگی و پیچیدگی در علوم مختلف در زمینه‌های معماری و شهری انجام شده است.

ناصحی و همکاران (۱۴۰۳) در مقاله «مطالعه تطبیقی ترجیحات بصری مخاطبان عام در سبک‌های معماری و هنر از منظر زیبایی‌شناسی» به تحلیل قضاوت‌ها و ترجیحات مخاطبان نسبت به سبک‌های مختلف پرداخته‌اند. این مقاله به پیچیدگی در معماری نیز اشاراتی داشته است.

اشرف گنجوی و ایران‌منش (۱۴۰۳) در مقاله «بازشناسی ارتباط کوشک با باغ ایرانی از منظر هندسه فرکتال (مطالعه موردی: کوشک‌های باغ فتح‌آباد کرمان)» به ارتباط کوشک و باغ با استفاده از هندسه فرکتال و پیچیدگی‌های معماری پرداخته‌اند.

میراحمدی و همکاران (۱۴۰۱) در مقاله‌ای با عنوان «تبیین نقش الگوهای پیچیدگی نظم در هندسه معماری معاصر» به بررسی انواع الگوهای پیچیده پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که الگوی پیچیده سازمان‌یافته به علت امکان پیش‌بینی در تحلیل روابط، برنامه‌ریزی و تعاملات سازمانی، قابلیت استفاده بیشتری دارد.

وحدت‌طلب و همکاران (۱۳۹۹) در مقاله «ارزیابی ترجیحات بصری در نماهای مسکونی (مورد مطالعاتی: دوازده خانه تاریخی تبریز)» با بررسی نظرهای مخاطبان نسبت به نمای خانه‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که نماهای معماری، به همراه پیچیدگی (غنا بصری) و استفاده از خطوط منحنی، تأثیر بیشتری نسبت به سایر کیفیت‌ها و مؤلفه‌های بصری نماهای معماری دارند.

دوزوزانی (۱۳۹۶) در مقاله «بررسی جنبه پیچیدگی بصری (عوامل بصری و زیبایی‌شناسی) در طراحی میادین اجتماع‌پذیر شهری»، پیچیدگی‌های بصری را به عنوان عاملی موثر در حس رضایت و خشنودی شهروندان در فضای شهری بررسی کرده و به این نتیجه

رسیده که عوامل بصری و زیبایی‌شناسی از لحاظ فیزیکی در مرکز و کناره میدان شامل مؤلفه‌های مهمی نظیر نشیمن‌ها، چشم‌انداز، عناصر مستقر در فضا (عناصر طبیعی، مبلمان شهری و عناصر یادمانی)، نقش مهمی در رضایت‌مندی شهروندان دارد.

بحرینی و فروغی‌فر (۱۳۹۵) در مقاله «انسجام‌بخشی کالبدی به محدوده مرکزی شهر شیراز؛ ارائه راهکارهای طراحی شهری به منظور افزایش انسجام کالبدی بر اساس نظریه پیچیدگی»، پیچیدگی و انسجام کالبدی در بافت سنتی را با بافت‌های معاصر مقایسه کرده و به این نتیجه رسیده‌اند که بافت سنتی دارای انسجام بیشتری است.

مدنی و همکاران (۱۳۹۳) در مقاله «ارزیابی جداره‌های خیابان چهارباغ اصفهان و ارائه الگو برای آن با به‌کارگیری هندسه فرکتال» به محاسبه بُعد فرکتال یکی از بدنه‌های اصلی اصفهان و استفاده از آن عدد بُعد در ساماندهی خیابان‌های تاریخی اصفهان پرداخته‌اند.

کریوچنکو و پادانوا (۲۰۲۰) در مقاله «مدل پیچیده ساختمان‌های معماری فرکتال» به مطالعه ساختارهای هندسه فرکتال برای ایجاد پیچیدگی در معماری می‌پردازد و از برنامه‌های نوآورانه برای مدل‌سازی و طراحی ساختارهای پیچیده فرکتالی استفاده می‌کند. مسجد حکیم نیز در پژوهش‌هایی از نظر ساختاری و هندسی، مفاهیم و مضامین و فنون بصری بررسی شده است (ر.ک: رئیسی و دیگران، ۱۴۰۳؛ اولاد قباد، ۱۳۹۷؛ کشاورزی میان‌دشتی و فیزابی، ۱۳۹۶؛ قراگوزلو، ۱۳۹۶؛ سرتیپی و ولییگ، ۱۳۹۶ الف و ب؛ حضرت قلی‌زاده، ۱۳۹۴؛ زمرشیدی، ۱۳۹۰).

با بررسی پژوهش‌های انجام‌شده، شکاف‌های پژوهشی زیر شناسایی شد:

عدم محاسبه دقیق پیچیدگی در اغلب پژوهش‌های ایرانی (به استثنای مدنی و دیگران، ۱۳۹۳)؛ تمرکز بر کل بنا یا جداره، نه بر تزیینات به عنوان لایه بصری مستقل و دارای درهم‌تنیدگی؛ عدم تفکیک مفهومی بین «پیچیدگی ساده» و «درهم‌تنیدگی سازمان‌یافته و سازمان‌نیافته»، در حالی که درهم‌تنیدگی می‌تواند شاخصی از پیچیدگی ساختاری با الگوی تکرار شونده و گره‌خورده باشد. علی‌رغم پژوهش‌های متعدد درباره مسجد حکیم اصفهان، هیچ‌کدام به درهم‌تنیدگی بصری تزیینات ایوان جنوبی نپرداخته‌اند. بیشتر پژوهش‌های پیشین روی مسجد حکیم عمدتاً معطوف به ساختار کلی، مفاهیم عرفانی یا فنون بصری عام بوده‌اند. بنابراین نوآوری این پژوهش می‌تواند پرداختن به درهم‌تنیدگی بصری به عنوان نوع مشخصی از پیچیدگی، با محاسبه ابعاد فرکتال و شاخص‌های ساختاری-تکراری در تزیینات ایوان جنوبی مسجد حکیم برای بررسی ارتباط پیچیدگی با عملکرد فضایی و تأثیرات آن بر مخاطب باشد.

روش پژوهش

این پژوهش از نظر هدف کاربردی و از نظر روش، توصیفی-تحلیلی است. برای داده‌اندوزی از روش کتابخانه‌ای، اینترنتی و میدانی و برای تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار استفاده شده است. نمونه‌های مورد نظر برای دستیابی به نوع الگوی درهم‌تنیده، ابتدا با کمک اصول هندسه فرکتال (خودمانایی) تحلیل می‌شوند. سپس بُعد فرکتال آنها برای کمی‌سازی میزان درهم‌تنیدگی به روش جعبه‌شمار^۱ با کمک نرم‌افزار فرکتالیز^۲ انجام می‌گیرد؛ به این صورت که پس از خطی کردن نقوش با نرم‌افزار اتوکد^۳ به بررسی

خودمتشابهی در آن پرداخته می‌شود. سپس آن نقوش از طریق نرم‌افزار آرک مپ^۴، تبدیل به فایل با پسوند شیپ^(۱) و به صورت فایل وکتور^(۵) (برداری) وارد نرم‌افزار فرکتالیز شده، بُعد فرکتال آن به روش جعبه‌شمار و فرمول لگاریتمی محاسبه می‌شود. پیش از محاسبه بُعد در جدول تنظیمات نرم‌افزار، اندازه ماکزیمم و مینیمم باید وارد شود که بستگی به ابعاد تصویر دارد. اندازه مینیمم معمولاً ۱ در نظر گرفته می‌شود. این کار تضمین می‌کند که ریزه‌کاری‌ها هم در تحلیل لحاظ میشوند. مقدار ماکزیمم حدود ۱/۳ تا ۱/۴، طولانی‌ترین ضلع (طول یا عرض) تصویر ورودی است (جدول ۳). در این روش، شبکه‌ای از مربع‌ها روی تصویر مورد نظر قرار داده شده و تعداد مربع‌ها در طول شبکه شمارش می‌شود (1/s). تعداد مربعهای پوشاننده تصویر نیز شمارش می‌شود N(s). بُعد فرکتال به صورت زیر محاسبه می‌شود (Bovill, 1996: 41-42):

$$D_b = \frac{[\log(N(S_2)) - \log(N(S_1))]}{[\log(\frac{1}{S_2}) - \log(\frac{1}{S_1})]}$$

در مرحله بُعد با نصف کردن اندازه مربع‌ها، تعداد مربع‌ها در طول شبکه دو برابر شده، مربع‌های پوشاننده تصویر نیز شمارش می‌شود. قرار دادن شبکه مربع‌ها و محاسبه بُعد با نرم‌افزار به طور خودکار انجام می‌گیرد. نمونه محاسبات در جدول (۳) قرار داده شده است. به این دلیل که محاسبه بُعد فرکتال، فرآیندی تدریجی است، برای محاسبه با دقت بیشتر باید اندازه مربع‌ها به تدریج کوچک شود تا به طور تقریبی روی نقش بنشینند. بنابراین نرم‌افزار این مراحل را تا کوچکترین سایز مربع‌ها و قرارگیری روی نقش ادامه می‌دهد. در

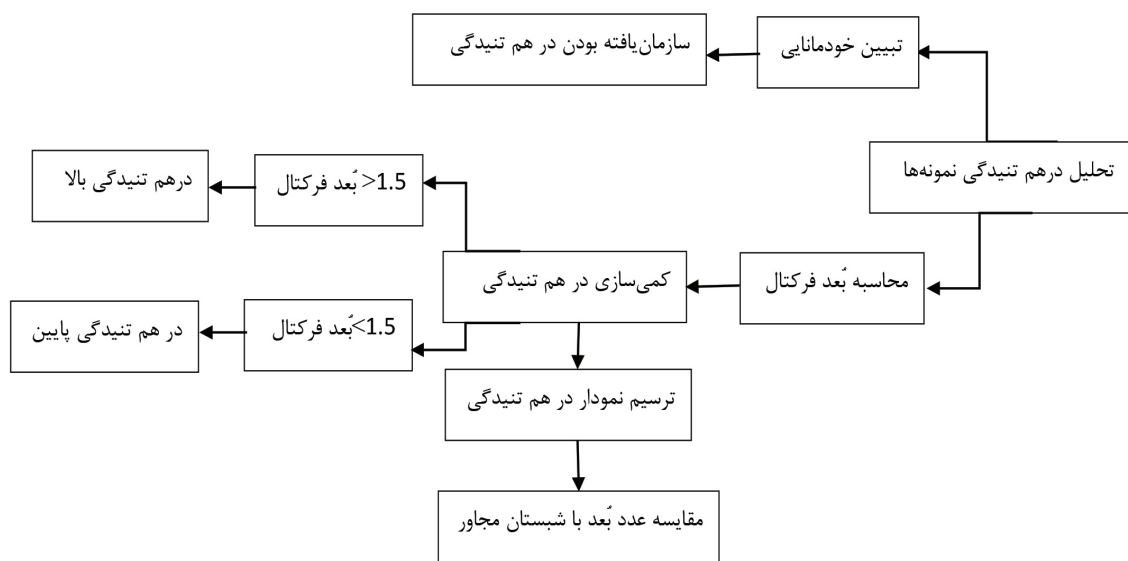
1. Boxcounting Method
2. Fractalys-3.0-0.9.1
3. AutoCAD

4. Arc Map 10.8.2
5. vector

این پژوهش، چهار مرحله از مراحل نشان داده شده است. نمودار نقاط با مختصات $\text{Log}(1/S)$ و $\text{Log}(N)$ ترسیم شده و یک خط راست به ازای نقاط در نمودار به کمک نرم افزار قرار داده می شود. شیب این خط برابر بعد دقیق فرکتال است. در روش محاسبه جعبه شمار با فرمول به طور دستی در چهار مرحله، سه عدد متفاوت برای بعد به دست می آید. با توجه به نمودار $\text{Log}(1/S)$ و $\text{Log}(N)$ که با نرم افزار ترسیم می شود، شیب خط بین نقاطی که کمترین فاصله را نسبت به نمودار خطی دارند، محاسبه می شود. این مقدار، نزدیک ترین عدد به بعد فرکتال خواهد بود (در روش محاسبه با دست در مقایسه با نرم افزار، امکان خطای اندک به دلیل گرد کردن اعداد وجود دارد). این روش محاسبه بعد جعبه شمار دیفرانسیل نامیده می شود (Ansari & Pandey, 2020:1473). محاسبه بعد تمامی نمونه ها با این روش انجام می گیرد. بعد فرکتال، عددی است بین ۱ (خط صاف) و ۲ (صفحه دو بعدی پر). در این میان ترسیمی که بعدی میانه بین یک خط و یک سطح دارد، یعنی بعد فرکتال آن $1/5$ است، یک فرکتال (میان دامنه) نامیده می شود. هرچه فرکتال پیچیده تر باشد، به ۲ نزدیک تر و هرچه دارای پیچیدگی کمتر باشد، به ۱ نزدیک می شود (سالینگروس، ۱۴۰۱: ۱۸۹). در نهایت بر اساس داده های به دست آمده، درهم تنیدگی نمونه ها با توجه به محل قرارگیری آنها تحلیل می شود (شکل ۱).

این پژوهش، چهار مرحله از مراحل نشان داده شده است. نمودار نقاط با مختصات $\text{Log}(1/S)$ و $\text{Log}(N)$ ترسیم شده و یک خط راست به ازای نقاط در نمودار به کمک نرم افزار قرار داده می شود. شیب این خط برابر بعد دقیق فرکتال است.

در روش محاسبه جعبه شمار با فرمول به طور دستی در چهار مرحله، سه عدد متفاوت برای بعد به دست می آید. با توجه به نمودار $\text{Log}(1/S)$ و $\text{Log}(N)$ که با نرم افزار ترسیم می شود، شیب خط بین نقاطی که کمترین فاصله را نسبت به نمودار خطی دارند، محاسبه می شود. این مقدار، نزدیک ترین عدد به بعد فرکتال خواهد بود (در روش محاسبه با دست در مقایسه با نرم افزار، امکان خطای اندک به دلیل گرد



شکل ۱- روش پژوهش

مفاهیم نظری فرکتال

هندسه فرکتال، شاخص های از ریاضیات است که قوانین آن بر اساس هندسه ناقلیدسی است. آنها توابع، شکل ها و مفاهیم هندسی نامنظمی هستند که در عین بی نظمی دارای نظم و خواص مشخص هستند. از این رو برخلاف اشکال هندسی اقلیدسی از

نظم اقلیدسی پیروی نمی کنند و میزان بی-نظمی آنها در تمام مقیاس ها، یکسان است. به عبارتی در مقیاس های مختلف، رفتار یکسانی دارند (Blanco & Isvoran, 2020: 171). این هندسه به الگوهای نامنظم ساخته شده از قطعاتی که به نوعی شبیه به کل هستند، مربوط می شود. برخلاف هندسه معمولی که با اشکال منظم و ابعاد کامل

سروکار دارد، هندسه فرکتال با اشکالی سروکار دارد که دارای ابعاد غیر صحیح یا فرکتالی هستند. این هندسه، ابزار مفیدی در تجزیه و تحلیل پدیده‌های مختلف است (Losa et al, 2016: 346-347).

خودمتشابهی (خودمانایی)

هندسه فرکتال عمدتاً مبتنی بر ایده اشکال خودمتشابه است. خودمانایی یعنی در مقیاس‌های مختلف، رفتار یکسانی دارد (Blanco & Isvoran, 2020: 171). برای اینکه یک شکل خودمشابه باشد، باید بتوان آن را به بخش‌هایی تقسیم کرد که کپی‌های کوچکتر، کم و بیش شبیه به کل شکل باشند (Aswathy & Mathew, 2016: 102). این شکل‌های خودمتشابه می‌تواند با تکرار (ویژگی تکرار شونده) و در مقیاس‌های متفاوت (ویژگی خرد مقیاسی) انجام شود. شکل جدید با دگرگونی در اندازه‌های قبلی ممکن است کوچکتر، بزرگتر و یا چرخانده شود، اما مشابه شکل اول باقی خواهد ماند (Bovil, 1996: 15) (شکل ۲).



شکل ۲- خودمتشابهی (Lesmoir-Gordon, 2010)

بُعد فرکتال

هندسه فرکتال با اشکال درهم‌تنیده‌ای سروکار دارد که دارای ابعاد غیر صحیح یا فرکتالی هستند و می‌تواند ابزار مفیدی در تجزیه و تحلیل پدیده‌های مختلف باشند (Losa et al, 2016: 346-347). در ریاضیات، اشکال هندسی پیچیده‌ای وجود دارد که دارای بُعد کسری‌اند؛ مفهومی که اولین بار ریاضیدان فلیکس هاسدورف در سال ۱۹۱۸م/۱۲۹۶ه.ش معرفی کرد (McClure, 2022: 42). هندسه فرکتال برای توصیف

اشکال پیچیده کارآمد است، در صورتی که هندسه اقلیدسی نمی‌تواند موفق به انجام این کار شود. بُعد فرکتال، معیاری برای سنجش درهم‌تنیدگی در اشکال فرکتالی و حتی غیر فرکتالی است. هر چقدر میزان درهم‌تنیدگی بیشتر باشد، بُعد فرکتال نیز بیشتر خواهد شد (Sandau, 1997: 164).

هندسه ناقلیدسی که حاصل از گسترش اصل توازی در هندسه اقلیدسی است، بستر شکل‌گیری مجموعه‌ای از هندسه‌های جدید در دل هندسه قدیم شده است. به دلیل نقضی که هندسه اقلیدسی در شناخت پدیده‌های طبیعی مانند کوه‌ها، ابرها و توپولوژی زمین داشت، از قرن نوزدهم، هندسه ناقلیدسی، مبنای شناخت بسیاری از پدیده‌ها قرار گرفته است. هندسه اقلیدسی به عنوان تعریف انتزاعی از جهان واقعی تا قبل از سده نوزدهم، تنها توصیفی از جهان به نظر می‌رسید. ولی به مرور گسترش یافت. هندسه اقلیدسی در دو بُعد را هندسه مسطحه و در سه بُعد را هندسه فضایی می‌نامند. در این هندسه تعداد ابعاد فضا، همواره عددی صحیح است (مصطفایی، ۱۴۰۱: ۷۹).

درهم‌تنیدگی و پیچیدگی

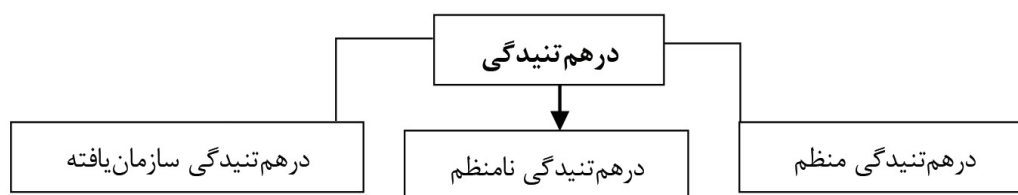
درهم‌تنیدگی و پیچیدگی در بسیاری از متون به جای هم استفاده می‌شوند، اما تفاوت معناداری با هم دارند. درهم‌تنیدگی^۱ در لغت به معنای آنچه با هم بافته می‌شود یا هم‌بافت است. ساختار درهم‌تنیده دارای بخش‌ها یا جنبه‌های به هم پیوسته زیاد است (شریفی و سلیمانی، ۱۴۰۰: ۷۷). نحوه ارتباط، گره‌خوردگی و وابستگی متقابل عناصر به گونه‌ای است که جدا کردن آنها بدون تغییر ماهیت کل ممکن نباشد (Barad, 2007: 3). در تفکر چین باستان به‌ویژه دائویسم، درهم‌تنیدگی جایگاه خاصی دارد.

1. Entanglement- Intertwining

که بناها صرفاً سازه‌های فیزیکی نیستند، بلکه ساختارهای اجتماعی نیز هستند، این معیار بر عملکرد و سازگاری بنا با مخاطب تأثیرگذار است (ر.ک: Kornberger & Clegg, 2003). درهم تنیدگی می‌تواند منظم، نامنظم و سازمان یافته باشد (شکل ۳). پیچیدگی به معنای کیفیت یا حالتی دشوار از نظر فهمیدن، انجام دادن و یا ساختن است. این سیستم، اجزای زیادی دارد و پیش بینی رفتارشان، سخت است. در این سامانه، میزان تنوع، تعدد و پیش بینی ناپذیری عناصر، قابل توجه است (Näger, 2016: 1128). بنا به تعاریف نظری یادشده، تعریف عملیاتی درهم تنیدگی در این پژوهش، وضعیتی از تزیینات است که در آن، عناصر تزیینی به هم وابسته و گره خورده‌اند و الگوهای تکراری در مقیاس‌های مختلف به گونه‌ای عمل می‌کنند که حذف یک مقیاس، کل نظام بصری را مختل می‌کند. خوانش چشم بیننده به طور مداوم بین جزء و کل در نوسان است و نمی‌تواند اولویت قطعی با جزء یا کل دهد.

آنها جهان را گسترده و بی شکل و در حال تغییر و تحول می‌دانستند که هرگز نمی‌توان درباره آن به قطعیت رسید (بانی مسعود، ۱۳۸۸: ۶۵).

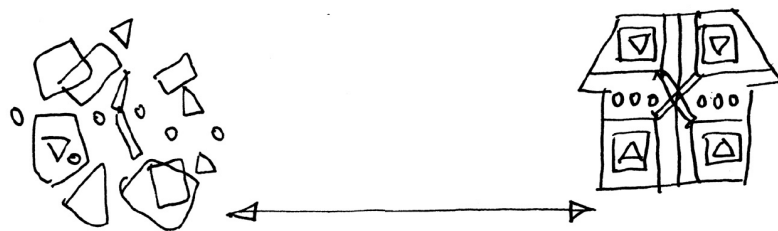
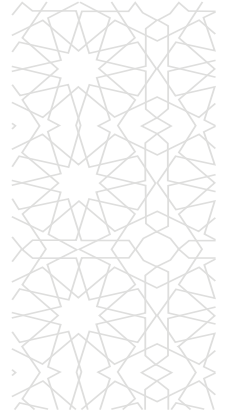
درهم تنیدگی شامل تعاملات پویا و رفتارهای نوظهور در معماری، اغلب با الگوهای هندسی گره خورده، حس پویایی را در فضا تقویت می‌کند (Pantazis & Gerber, 2019: 6). همچنین به عنوان یک ابزار برای برقراری ارتباط بصری، احساسی و درونی با کاربر عمل می‌کند (Salingaros, 2014: 18). این ابزار در تزیینات سبب جلب نظر مخاطب می‌شود و در معماری، شاخص سنجش معکوسی برای میزان خسته‌کنندگی یک بناست. معیار درهم تنیدگی باعث تحرک حس بصری و ارتقای کیفیت و خلاقیت می‌شود (دوزدوزانی، ۱۳۹۶: ۱). درهم تنیدگی بالا باعث هیجان و احساس علاقه مخاطب به بنا می‌شود. با وجود این درهم تنیدگی بسیار زیاد از قابلیت سازش یافتن یک بنا با انسان می‌کاهد و از سطح هیجان گذشته، حس اضطراب را ایجاد می‌کند (سالینگروس، ۱۳۸۷: ۱۸۳). از آنجا



شکل ۳- انواع درهم تنیدگی (سالینگروس، ۱۳۸۷؛ تنظیم نمودار: نویسندگان).

الگوهای درهم تنیده نامنظم یا سازمان نیافته، شلوغ و درهم ریخته هستند (شکل ۴). در این ساختارها، درهم تنیدگی در مقابل نظم و در مرز بی نظمی قرار دارد. پدیده‌های آشوبناک از این دسته هستند.

در درهم تنیدگی منظم، درهم تنیدگی از مراتب نظم است و با کاهش ارتباط بین اجزا، میزان درهم تنیدگی در آنها بالا می‌رود. در این ساختارها، نظم از سادگی تا درهم تنیدگی پیش می‌رود.



شکل ۴- درهم‌تنیدگی سازمان‌یافته و سازمان‌نیافته (سالینگروس، ۱۳۸۷: ۲۴۶)

درهم‌تنیدگی سازمان‌یافته

درهم‌تنیدگی سازمان‌یافته دارای نظم و در عین حال دارای بی‌نظمی است. نظم و بی‌نظمی در این ساختارها با یکدیگر در تعامل هستند. فرم‌های زیستی از جمله فرکتال‌ها دارای

درهم‌تنیدگی و سازمان‌یافتگی حیرت‌انگیزی هستند (میراحمدی و دیگران، ۱۴۰۱: ۱۴۲-۱۴۶). در جدول (۱)، انواع درهم‌تنیدگی از جهات مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

جدول ۱- مقایسه انواع درهم‌تنیدگی

مورد مقایسه	درهم‌تنیدگی منظم	درهم‌تنیدگی نامنظم	درهم‌تنیدگی سازمان‌یافته
ارجعیت نظم و بی‌نظمی	نظم	بی‌نظمی	نظم در بی‌نظمی و بی‌نظمی در نظم
ارتباط درهم‌تنیدگی و نظم	درهم‌تنیدگی از مراتب نظم	درهم‌تنیدگی در مقابل نظم	درهم‌تنیدگی در لبه بی‌نظمی
هندسه	هندسه اقلیدسی	هندسه ناقلیدسی	هندسه ناقلیدسی
تعادل و تقارن	متعادل- متقارن	نامتعادل- نامتقارن	متعادل و نامتقارن
فرم و شکل	فرم و شکل منظم	فرم و شکل آزاد	ساختار و الگو

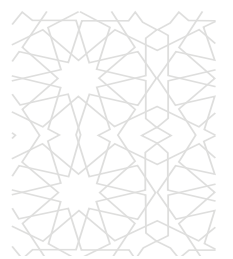
(منبع: میراحمدی و دیگران، ۱۴۰۱: ۱۴۷)

از طریق سطوح و هندسه‌ای که ارائه می‌دهد، اطلاعات را با انسان مبادله می‌کند و این تعامل بر احساسات و حالت زیستی تأثیرگذار است. در صورتی که اطلاعات نامنظم باشد، بار اضافی اطلاعاتی باعث ایجاد آشفتگی می‌شود. از این-رو سازمان‌یافته بودن اطلاعات برای نظم‌دهی بصری، ضروری است. تزئینات موفق به یک توانایی برای تجزیه و تحلیل تصاویر در سطوح مختلف نیاز دارند. ریتم، دوران و تکرار یک ساختار هندسی در مقیاس‌های خرد که الگوهای فرکتالی را می‌سازد، انسان را در برقراری ارتباط با بنا توانمند می‌کند (Alexander, 2004; Bloomer, 2000). بنابراین الگوهای درهم‌تنیده سازمان‌یافته برای مخاطبان دارای ترجیح بصری هستند.

الگوهای درهم‌تنیده سازمان‌یافته دارای مزیت‌هایی برای معماری و تزئینات آن است:

۱. امکان برنامه‌ریزی در سیستم‌های درهم‌تنیده (سازمان‌یافته) با توجه به عوامل گوناگون و الگوهای مختلف رفتاری
۲. ایجاد جذابیت و دلپذیری در اثر معماری با ایجاد سطحی از درهم‌تنیدگی
۳. ایجاد آزادی‌های فرمی در ترکیب احجام پیچیده
۴. هماهنگی با طبیعت و بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته
۵. افزایش غنای بصری و ظرافت‌های طرح معماری (سالینگروس، ۱۳۸۷: ۱۴۶)

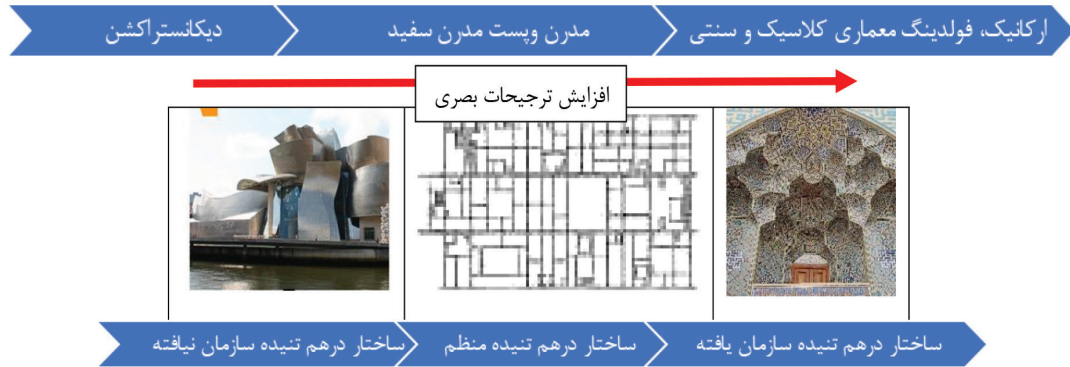
وقتی در یک بنا، اطلاعات معنادار وجود داشته باشد، انسان با آن ساختار، ارتباط ذهنی برقرار می‌کند. ساختار بصری تزئینات



سازمان نیافته است، کمترین ترجیحات بصری را دارد (ناصرحی و دیگران، ۱۴۰۳: ۴۷) (شکل ۵).

برای انسجام بصری یک فرم درهم تنیده

برای مثال معماری‌های ارگانیک، فولدینگ و معماری سنتی که ویژگی فرکتالی دارند، دارای بیشترین ترجیحات بصری هستند. معماری دیکانستراکشن که نمونه الگوی درهم تنیده



شکل ۵- ترتیب ترجیحات بصری ساختارهای درهم تنیده

است (میزان پراکندگی رنگ و چگونگی این پراکندگی با نظم، ارتباط مستقیم دارد) (سالینگروس، ۱۳۸۷: ۱۴۶).

غنای بصری

غنا ناظر بر میزان «ارزش اطلاعاتی» و «پرمایگی» تجربه بصری است که اغلب از طریق به کارگیری آرایه‌های تزئینی متنوع، بافت‌های لایه لایه و ارجاعات نمادین حاصل می‌شود. غنای بصری تمایل دارد پاسخ عاطفی مثبت و ماندگاری حافظه بصری را تقویت کند؛ زیرا درگیر شدن با یک تصویر غنی، خوشایند و لذت بخش است و شکل‌گیری باورهای خاص را در مخاطب ارتقا می‌بخشد (Phillips & McQuarrie, 2004: 129). درهم تنیدگی می‌تواند باعث برانگیختگی و تجربه خوشایند و در نتیجه باعث بالا بردن غنای بصری شود (ر.ک: Berlyne, 1971).

خوانایی معماری

خوانایی معماری به این معناست که کاربر بتواند به راحتی در آن مسیریابی کند، نشانه‌ها را تشخیص دهد و تصویر ذهنی

لازم است که در تمامی مقیاس‌ها، خرده ساختار منظم وجود داشته باشد. اگر یک فرم ساخته بشر در یک یا چند مقیاس فاقد یک ساختار منظم باشد، انسان از لحاظ بصری، آن را نامنظم درک خواهد کرد و آن فرم نامانوس خواهد بود. از این رو یک فرم درهم تنیده سازمان یافته باید دارای نظم ساختاری باشد. نظم ساختاری را می‌توان از هشت قانون زیر به دست آورد.

۱. وجود ناحیه‌ای که دارای تضاد، جزئیات یا انحنای باشد، ضروری است.
۲. مرکز یا حاشیه باید به خوبی تعریف شده باشد.
۳. توجه معطوف به عناصر تزئینی مقارن می‌شود.
۴. تداوم خطی به اطلاعات بصری نظم می‌دهد.
۵. الگوها، اطلاعات را سازماندهی می‌کنند.
۶. مرتبط نمودن مقیاس‌های مختلف موجب شکل‌گیری انسجام می‌شود.
۷. ما با یک محیط منسجم، ارتباط قوی برقرار می‌کنیم.
۸. وجود رنگ برای آسایش ما ضروری

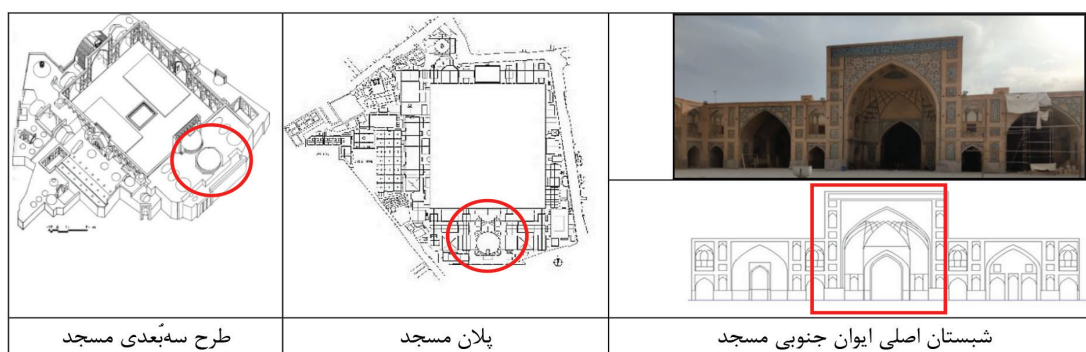
شفافی از فضا برای خود بسازد (Lynch, 1960: 2-3). لینچ این مفهوم را معادل «تصویرپذیری» می‌داند؛ به این معنا که فرم کالبدی باید چنان ویژگی‌هایی داشته باشد که تصویر قوی و خوش‌ساختار در ناظر ایجاد کند (Lynch, 1960: 9).

معرفی پیکره مطالعاتی مسجد حکیم

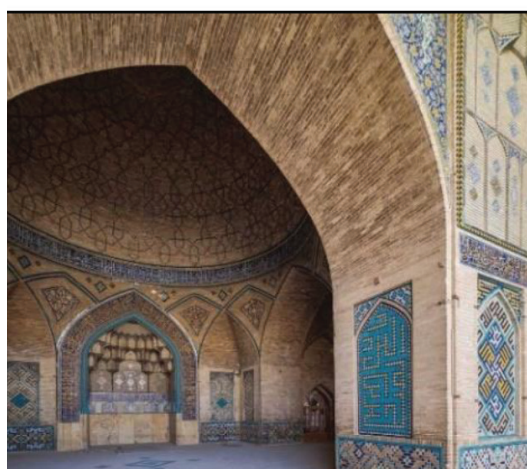
مسجد حکیم اصفهان از مساجد چهار ایوانی و شاهکار معماری اواخر دوره صفوی در منطقه باب‌الدشت اصفهان است. این مسجد را حکیم داوود در محل ویرانه‌های مسجد جوگیر مربوط به قرن ۴ ه. ق ساخت. از این‌رو به مسجد جوگیر نیز شناخته می‌شود (سرتیپی و دیگران، ۱۳۹۶ الف:

۲۸۴). مسجد حکیم که مانند دیگر بناهای دوره صفوی از آجر ساخته شده است، دارای کاشی‌های هفت‌رنگ، معرق و معقلی است. بیشتر تزئینات بنا، معقلی است (میسمی، ۱۳۸۸: ۲۵). این بنا دارای چهار شبستان است که سه شبستان در ایوان جنوبی و شبستان زمستانی در ضلع غربی آن واقع شده است (ماهر النقش، ۱۳۷۶: ۷۶). ایوان جنوبی مسجد دارای شبستان زیرگنبد اصلی، شبستان جنوب شرقی و شبستان جنوب غربی است. تمامی ازاره‌های مسجد به غیر از یک مورد که در ایوان شمالی است، در ایوان جنوبی آن قرار دارد (شکل ۶ و ۷). در این پژوهش، تمرکز بر تحلیل درهم‌تنیدگی ازاره‌های شبستان زیرگنبد ایوان جنوبی است.

تحلیل درهم‌تنیدگی تزئینات شبستان



جدول ۲- بررسی خودمانایی و عدد بُعد ازاره‌های شبستان زیرگنبد اصلی




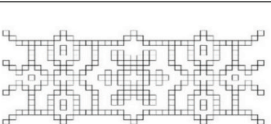
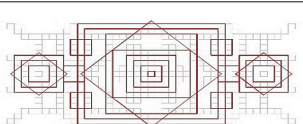
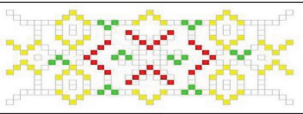
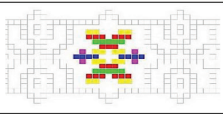

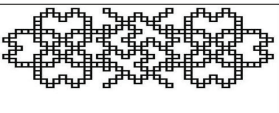
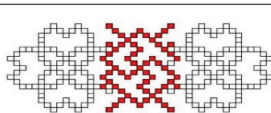
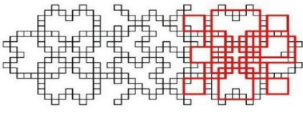


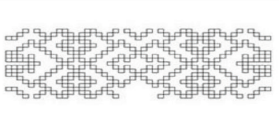
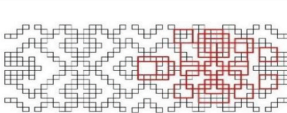
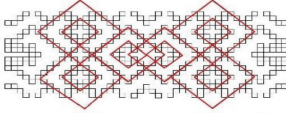
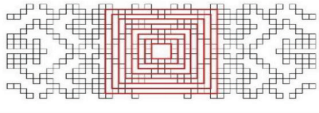

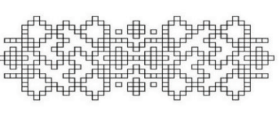
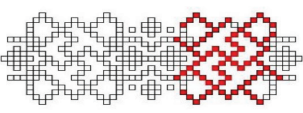
شکل ۷- شبستان زیرگنبد اصلی (URL۲)

اصلي

برای تحلیل درهم‌تیدگی تزئینات ابتدا نوع درهم‌تیدگی‌ها در ازاره‌ها و زیرگنبد شبستان اصلی بررسی می‌شود. به این منظور تزئینات از دیدگاه هندسه فرکتال (خودمانایی) تحلیل می‌شوند. ازاره‌های غیر تکراری زیرگنبد اصلی شش نمونه است. در جدول (۲)، خودمانایی ازاره‌ها از جهات مختلف بررسی شده است. با در نظر گرفتن نمونه خطی شده این نقوش و تحلیل آن می‌توان شاهد تکرار مربع‌های کوچک بود. از طرفی به دلیل اینکه نقوش و گره‌های معقلی روی صفحه شطرنجی ایجاد می‌شود، این مربع‌های کوچک درون مربع‌های بزرگ‌تر قرار می‌گیرند. در هندسه پنهان طرح می‌توان

مربع‌لوزی‌هایی در اندازه‌های مختلف در نظر گرفت که با یکدیگر هم‌پوشانی دارند. از طرف دیگر در راستای اضلاع مربع‌های سازنده نقش و با توجه به هندسه پنهان آن می‌توان مربع‌های متحد‌المركز و یا متداخل در نظر گرفت که دارای ویژگی خودمانایی هستند (نمونه‌های ب ۳ و ب ۶). در هندسه آشکار نمونه‌ها برای مثال نمونه‌های ب ۲ و ب ۴، اجزایی از طرح متشکل از مربع‌های کوچک در مقیاس‌های مختلف تکرار و دچار چرخش و شکست می‌شوند و در کل طرح گسترش می‌یابند و این از ویژگی فرکتال‌هاست. در نمونه‌های متقارن تحلیل در یک قسمت آن انجام شده است (جدول ۲). موارد یادشده، دلایلی بر تبیین ویژگی

جدول ۲- بررسی خودمانایی و عدد بُعد ازاره‌های شبستان زیرگنبد اصلی

تصویر نمونه با بُعد فرکتال: ۱.۶۴	نمونه خطی شده	خودمانایی بر اساس مربع
		
ب ۱	خودمانایی در اجزای طرح	خودمانایی در اجزای طرح
		
تصویر نمونه با بُعد فرکتال: ۱.۷۱	نمونه خطی شده	خودمانایی بر اساس اجزا
		
ب ۲	خودمانایی بر اساس مربع	خودمانایی بر اساس اجزای طرح
		
تصویر نمونه با بُعد فرکتال: ۱.۸۱	نمونه خطی شده	خودمانایی بر اساس مربع
		
ب ۳	خودمانایی بر اساس مربع لوزی	خودمانایی بر اساس مربع‌های متحد‌المركز
		
تصویر نمونه با بُعد فرکتال: ۱.۷۸	نمونه خطی شده	تکرار و شکست اجزای طرح
		
ب ۴	خودمانایی بر اساس مربع	خودمانایی بر اساس مربع لوزی محاط بر طرح

		تکرار و شکست اجزای طرح	نمونه خطی شده	تصویر نمونه با بُعد فرکتال: ۱.۷۶	ب ۵
		خودمانایی بر مبنای لوزی	خودمانایی بر اساس مربع		
		خودمانایی بر اساس مربع	نمونه خطی شده	تصویر نمونه با بُعد فرکتال: ۱.۷۴	ب ۶
		خودمانایی بر اساس مربع‌های متحد‌المركز	خودمانایی بر اساس اجزای طرح	خودمانایی بر اساس اجزای طرح	

است. برای نمونه یکی از ابزارها (نمونه ب ۶) که در چهار گوشه زیرگنبد اصلی کار شده است، با قوانین هشت‌گانه سالینگروس آنالیز و ارزیابی می‌شود. مابقی تصاویر نیز دارای همین ویژگی هستند که از تکرار آنها صرف‌نظر می‌شود (جدول ۳).

برای تحلیل درهم‌تیدگی و کمی‌سازی آن

خودم‌تشابهی در این نمونه‌هاست. با توجه به خودمانایی و تکرار اجزای طرح در مقیاس‌های مختلف در هندسه پنهان و آشکار آن، این نتیجه حاصل می‌شود که نقوش ابزارها دارای درهم‌تیدگی سازمان‌یافته است. همچنین هشت قانون ضروری برای نظم‌ساختاری نیز در آنها رعایت شده

جدول ۳- بررسی قوانین نظم‌ساختاری در ابزاره

	<ul style="list-style-type: none"> ● تعریف مرکز-حاشیه ● وجود تقارن و عناصر متقارن در طرح ● وجود رنگ ● دارای جزئیات و تضاد
	تداوم خطی و الگوها (تکرار در مقیاس‌های مختلف) کل منسجم

بهدست‌آمده در ابزارها بیانگر درهم‌تیدگی نسبتاً بالای آنهاست (۱/۶۴ تا ۱/۸۱). در ساختمان‌های شکوهمند گذشته همچون کلیساهای جامع قرون وسطی و مساجد در معماری‌های بومی، میزان بالای درهم‌تیدگی

در ابزارها، محاسبه بُعد فرکتال آنها با کمک نرم‌افزار انجام می‌شود. برای یکی از ابزارها، محاسبه بُعد به طور کامل انجام شده است (جدول ۴). بُعد نمونه‌های دیگر نیز به همین روش محاسبه می‌شود. اعداد بُعد

می بخشد. چشم بر قسمت هایی از تصویر که بیشترین جزئیات و درهم تنیدگی را دارد، متمرکز می شود، چون این نواحی دارای بیشترین اطلاعات هستند. از این رو در یک تصویر بصری، نقاطی که چشم به آنها خیره می شود، یک مسیر پویشی ایجاد می کند و یک سوم از زمان خود را در آن و بقیه را به صورت تصادفی در قسمت های با اطلاعات کمتر سپری می کند. بنابراین چشم، انرژی خود را برای پوشش محتوای اطلاعاتی تصاویر دارای درهم تنیدگی صرف می کند و مابقی تزئینات به سادگی بازسازی می شوند (همان: ۱۴۹).

با توجه به محاسبات انجام شده در شبستان زیرگنبد اصلی، اعداد بعد از ازارها و طرح زیرگنبد نزدیک به هم و هماهنگ هستند. همچنین میانگین درهم تنیدگی ازارها تقریباً برابر درهم تنیدگی زیرگنبد اصلی است (جدول ۴ و ۵). تمامی اعداد تقریباً بالا و نشان دهنده درهم تنیدگی بالای تزئینات است.

با توجه به جدول (۷)، اعداد بعد فرکتال

سازمان یافته (درهم تنیدگی بصری و ساختاری) یافت می شود و حس شکوه و عظمت بنا را ارتقا داده، مخاطب در مقابل این عظمت، احساس خاکساری و حقارت می نماید. این وجه از درهم تنیدگی، مخالف میزان بالای درهم تنیدگی سازمان یافته است که ساختارهای فرامردن و واسازی گرا دارند. این سبک ها، بسیار شلوغ و درهم ریخته هستند. معماری سنتی به دلیل داشتن درهم تنیدگی سازمان یافته با نیازها و فعالیت های انسانی و احساسی بشر سازش دارند. آستانه بالای درهم تنیدگی بصری سازمان یافته در معماری سنتی که در همه فرهنگ ها تکوین یافته، به واسطه تأثیری که در ابقا و حمایت از سازش دهی در معماری دارند، نقش کلیدی ایفا می کنند (سالینگروس، ۱۳۸۷: ۳۷۹ و ۴۱۳).

آنها برای برقراری یک ارتباط مثبت با انسان ها از اطلاعات سازمان یافته بهره می برند. سازمان یافته بودن درهم تنیدگی های نقوش ازارها برای داشتن یک محیط دلپذیر، ضروری است و جذابیت آن را ارتقا

جدول ۴- محاسبه بعد فرکتال نمونه ۶

Step1	Step2	Step3	Step4
step	Grid size (1/s)	Number of boxes (N)	Log (1/s)
۱	۵	۱۵	۰.۷۰
۲	۱۰	۵۲	۱.۰۰
۳	۲۰	۱۴۵	۱.۳۰
۴	۴۰	۵۰۸	۱.۶۰
$D(10-5) = \frac{\log 52 - \log 15}{\log 10 - \log 5} = 1.79$		Software dimension: 1.74	
$D(20-10) = \frac{\log 145 - \log 52}{\log 20 - \log 10} = 1.48$		Dimension: 1.81	
$D(40-20) = \frac{\log 508 - \log 145}{\log 40 - \log 20} = 1.81$		اختلاف بعد: ۰.۰۷	
Differential Box Counting: D = 1.81			



جدول ۵- بُعد فرکتال زیرگنبد

بُعد فرکتال: ۱.۷۵	طرح خطی زیرگنبد	تصویر زیرگنبد اصلی

جدول ۶- تحلیل درهم‌تیدگی ازاره‌ها و زیرگنبد شبستان اصلی

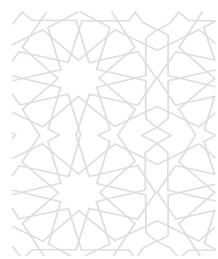
بُعد فرکتال	نمونه	تصویر ازاره‌ها و زیرگنبد شبستان اصلی
۱.۶۴	ب ۱	
۱.۷۱	ب ۲	
۱.۸۱	ب ۳	
۱.۷۸	ب ۴	
۱.۷۶	ب ۵	
۱.۷۴	ب ۶	
۱.۷۵	زیرگنبد اصلی	میانگین نمونه‌ها = ۱.۷۴

و از این‌رو برای هماهنگی با درهم‌تیدگی ازاره‌های این مکان دارای عدد بُعد بالاتر هستند. این موضوع نشان‌دهنده بالاتر بودن درهم‌تیدگی تزئینات ازاره و زیرگنبد شبستان اصلی نسبت به شبستان جنوب شرقی و غربی و هماهنگی روند رشد درهم‌تیدگی‌های آنهاست.

ازاره‌ها و زیرگنبد شبستان اصلی، بالاتر از اعداد بُعد ازاره‌ها و زیرگنبد شبستان‌های جنوب شرقی و غربی است. در ازاره‌های جنوب شرقی و غربی، بُعد فرکتال نزدیک به ۱/۵ است. از این‌رو دارای درهم‌تیدگی بالا نیست. ازاره‌های الف ۵ و ج ۱ و ج ۲ در مجاورت شبستان زیرگنبد اصلی قرار دارند

جدول ۷- عدد بُعد ازاره‌های شبستان جنوب شرقی و غربی

زیرگنبد و بُعد فرکتال	بُعد	ازاره‌های شبستان جنوب شرقی	بُعد	ازاره‌های شبستان جنوب غربی
	۱.۷۰		ج ۱ ۱.۵۴	الف ۱
	۱.۶۳		ج ۲ ۱.۴۲	الف ۲
	۱.۵۳		ج ۳ ۱.۴۵	الف ۳
	۱.۴۷		ج ۴ ۱.۵۲	الف ۴
	۱.۴۹		ج ۵ ۱.۶۲	الف ۵
۱.۴۵				

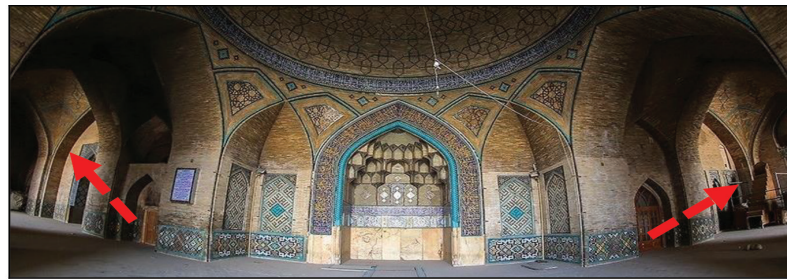


بحث اصلی

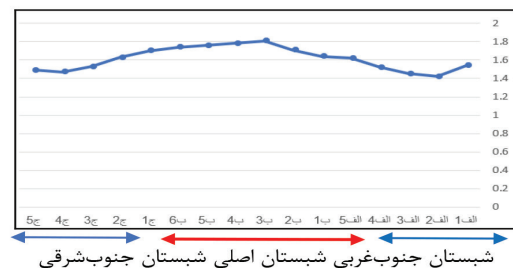
تزئینات درهم‌تنیده در کیفیت فضای معماری، نقش مهمی دارد که مهمترین آن، بالا بردن صفات کیفی فضا است. علاوه بر آن به فضا نیز هویت می‌بخشد. با ظهور تزئینات، بسیاری از صفات کیفی فضا مانند هنری بودن، تخیل، درهم‌تنیدگی و تنوع، ارتقا می‌یابد (مهدوی‌پور و دیگران، ۱۳۹۶: ۱۴۷). از این‌رو بررسی میزان درهم‌تنیدگی و نوع آن باید مورد توجه قرار گیرد. درهم‌تنیدگی به تزئینات ابهام می‌دهد و هرچه این ابهام بیشتر باشد، بار تخیل و شگفتی برای مخاطب بالا می‌رود. به دلیل اینکه ذهن ما به طور ذاتی ساختار فرکتال دارد و برای پذیرش اطلاعات فرکتالی آماده است، کشف ریتم و تکرار شونده‌گی‌ها برای مخاطب اغناکننده است. بنابراین داشتن این ویژگی در طراحی تزئینات، بسیار مهم

است (سالینگروس، ۱۴۰۱: ۱۸۱؛ پورافضل و دیگران، ۱۴۰۲: ۱۰). استفاده از الگوهای فرکتالی به عنوان ساختارهای درهم‌تنیده سازمان‌یافته می‌تواند فضاهایی هماهنگ همراه با جذابیت برای مخاطب ایجاد کند (ر.ک: sala, 2004).

با توجه به تحلیل‌های انجام‌شده در ازاره‌های شبستان زیرگنبد اصلی، ترسیم نمودار درهم‌تنیدگی ازاره‌های شبستان جنوب شرقی و جنوب غربی (شکل ۸) و مقایسه آنها، تزئینات ازاره و زیرگنبد شبستان اصلی با داشتن درهم‌تنیدگی بالا، باعث جذب مخاطب می‌شود و به آن قسمت از بنا، شکوه و غنای بصری می‌بخشد. از طرفی به دلیل سازمان‌یافته بودن درهم‌تنیدگی، این تزئینات باعث سردرگمی و خستگی مخاطب نمی‌شود و حاوی بار اطلاعات اضافی نیست. درهم‌تنیدگی سازمان‌یافته بالا در تزئینات به آنها شخصیت ویژه‌ای می‌دهد.



شکل ۸- شبستان اصلی و شبستان‌های فرعی (۳ URL)



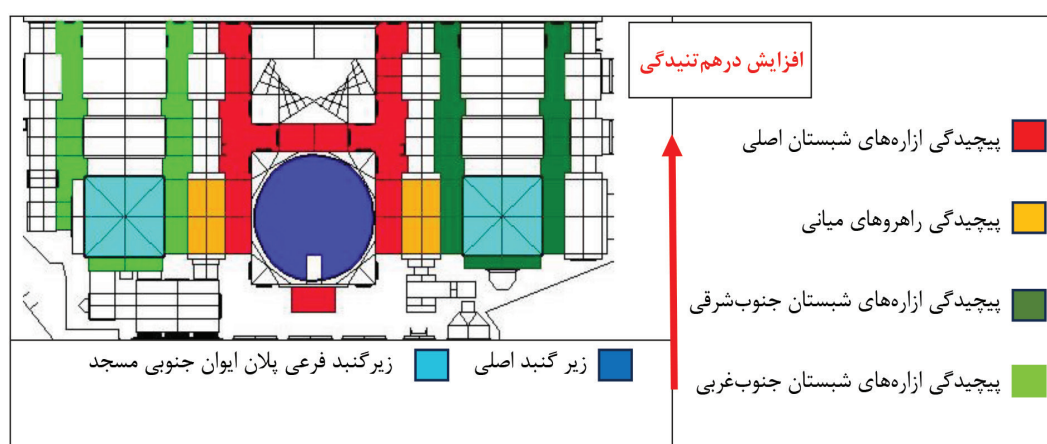
شکل ۹- درهم‌تنیدگی ازاره‌های ایوان جنوبی مسجد

توانایی جذب و ایجاد مکث بیشتر برای مخاطب را در آن فضا دارد و مخاطب ناخودآگاه برای جستجو در این درهم‌تنیدگی‌ها و کسب اطلاعات، زمان می‌گذارد (سالینگروس،

با توجه به شکل (۹)، میزان درهم‌تنیدگی ازاره‌ها در شبستان اصلی زیرگنبد نسبت به شبستان‌های مجاور، بیشتر است. بنابراین

۱۳۸۷: ۱۴۹). همچنین این درهم‌تنیدگی بیشتر نسبت به فضاهای مجاور، نشان از عملکرد مهم و اصلی این فضا نسبت به فضاهای دیگر این بناست. در واقع شبستان اصلی نسبت به قسمت‌های مجاور، شاخص شده است (شکل ۱۰). به دلیل اینکه محاسبه بُعد فرکتال روی طرح‌های خطی تصاویر انجام شده است، کیفیت تصاویر، تأثیری در میزان بُعد ندارد (چون بُعد فرکتال، تأثیرپذیری مستقیم از خطوط، شکست‌ها و لبه‌ها دارد).

مقیاس‌های تصویر نیز ارتباط مستقیم با آستانه ماکزیمم و مینیمم ورودی نرم‌افزار دارد و در نتایج پژوهش، تأثیرگذار است. از این رو سعی شده این مورد در پژوهش مورد توجه قرار گیرد و اندازه تصاویر ورودی به نرم‌افزار، تقریباً هم‌اندازه باشد. البته در پژوهش، روند کاهش و افزایشی بُعد مدنظر است. از جمله محدودیت‌های پژوهش، خطاهای احتمالی در روش جعبه‌شمار، نبود داده‌های ادراکی، محدودیت تعمیم از یک نمونه تاریخی است.



شکل ۱۰- مقایسه درهم‌تنیدگی ازاره‌ها در ایوان جنوبی مسجد حکیم

نتیجه‌گیری

با توجه به تحلیل‌های انجام‌شده درباره درهم‌تنیدگی‌های تزئینات ازاره شبستان زیرگنبد اصلی مسجد حکیم و مقایسه میزان درهم‌تنیدگی آنها با شبستان‌های مجاور این نتیجه حاصل شد که ازاره‌های این قسمت از میزان بالای درهم‌تنیدگی برخوردارند و این میزان با درهم‌تنیدگی تزئینات زیرگنبد اصلی نیز هماهنگ است. این درهم‌تنیدگی بالا علاوه بر نشان دادن هماهنگی تزئینات با عملکرد بنا و بالا بردن غنای بصری آن باعث جذب مخاطب به این قسمت به عنوان فضای اصلی ایوان شده و به دلیل داشتن اطلاعات ساختاری ناشی از درهم‌تنیدگی، مخاطب را در آن فضا نگه می‌دارد. از طرفی به دلیل هماهنگ بودن تزئینات ازاره و زیرگنبد

و همچنین سازمان‌یافته بودن درهم‌تنیدگی این تزئینات، حس سازش با معماری را در مخاطب ایجاد می‌کند؛ زیرا فرم‌های زیستی مانند بدن انسان، یک فرم فرکتالی سازمان‌یافته است. مغز انسان که وظیفه پردازش اطلاعات را دارد، خود ساختار درهم‌تنیده سازمان‌یافته دارد. از این رو با اطلاعاتی مشابه ساختار خود به خوبی ارتباط برقرار می‌کند. بنابراین درهم‌تنیدگی به‌ویژه در قالب هندسه فرکتال، پتانسیل زیادی برای تحول در معماری از نظر جذابیت بصری و هم در راستای ارتقای محیط‌های پایدار و سازگار با مخاطب دارد. این مشخصه به وفور در معماری دوره صفوی یافت می‌شود. بنابراین معماران سنتی با مهارت کافی با انجام تزئینات قوی، غنی و حساب‌شده باعث تعامل مخاطبان با فضاهای معماری شده‌اند و به کمک تزئینات

و معماری (بررسی جریان‌های فکری معماری معاصر غرب ۱۹۶۰-۲۰۰۰)، اصفهان، خاک.

بحرینی، سید حسن و مهران فروغی فر (۱۳۹۵) «انسجام بخشی کالبدی به محدوده مرکزی شهر شیراز، ارائه راهکارهای طراحی شهری به منظور افزایش انسجام کالبدی بر اساس نظریه پیچیدگی»، هویت شهر، سال بیست و هشتم، شماره ۱، صص ۵-۱۸.

Dor: 20.1001.1.17359562.1395.10.4.1.2.

پورفضل، الهام و هادی ربیعی و ایرج داداشی (۱۴۰۲) «بررسی سیر تحول کارکردهای تزیین در رویکردهای مطالعاتی هنر اسلامی»، هنرهای صناعی ایران، سال ششم، شماره ۱، صص ۱۱۱-۱۳۲.

Doi: 10.22052/his/2023.253369.1138.

حضرت قلی زاده، سکینه (۱۳۹۴) «تحلیل و بررسی نقوش و خطوط کاشی کاری مسجد حکیم اصفهان»، کنفرانس بین‌المللی انسان، معماری، عمران و شهر، تبریز.

دوزدوزانی، یاسمین (۱۳۹۶) «بررسی جنبه پیچیدگی بصری (عوامل بصری و زیبایی‌شناسی) در طراحی میدین اجتماع پذیر شهری»، اولین همایش ملی پژوهش‌های عملی و نظری در معماری و شهرسازی.

رئیسی، کیهانه و ایمان زکریایی کرمانی و جلیل جوکار و صمد نجار پور (۱۴۰۳) «واکاوی هندسه فرکتال در کاشی‌های منقش معقلی پشت‌بغل قوس ایوان شمالی مسجد حکیم»، باغ نظر، سال بیست و یکم، شماره ۱۳۵، صص ۵۱-۶۲.

و ایجاد درهم‌تنیدگی در آنها، عملکردهای فضایی را نیز به خوبی مشخص کرده‌اند.

نتایج و یافته‌های این پژوهش به معمار امروزی کمک می‌کند تا بداند چگونه آگاهانه درهم‌تنیدگی سازمان یافته را نه به عنوان یک عنصر تزئینی صرف، بلکه به عنوان ابزاری برای هدایت رفتار مخاطب (جذب، توقف و حرکت) به کار گیرد و تزئینات هویت‌مند را جایگزین تزئینات سلیقه‌ای و تصادفی کند.

پی‌نوشت

۱. شیپ فایل (Shapefile)، فرمتی ساده و غیر توپولوژیکی برای ذخیره موقعیت هندسی و اطلاعات مربوط به خصوصیات یک عارضه جغرافیایی است. عوارض جغرافیایی موجود درون یک شیپ فایل می‌تواند از طریق نقطه، خط یا سطوح چندضلعی، نمایش داده شود.

منابع

اشرف گنجوی، محمدعلی و محمد ایران‌منش (۱۴۰۲) «بازشناسی ارتباط کوشک با باغ ایرانی از منظر هندسه فرکتال (مطالعه موردی: کوشک‌های باغ فتح‌آباد کرمان)»، مجله منظر، سال شانزدهم، شماره ۶۷، صص ۶-۱۳.

<https://doi.org/10.22034/manzar.2024.425783.2265>.

اولادقباد، منظر بانو (۱۳۹۷) «طراحی و ساخت حجم محیطی بر اساس خط کوفی معقلی مسجد حکیم اصفهان»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد هنر اسلامی، استاد راهنما ابوالفضل عبدالهی فرد و مهدی کاظم پور، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، دانشکده هنرهای صناعی اسلامی.

بانی مسعود، امیر (۱۳۸۸) پست‌مدرنیته

<https://doi.org/10.22034/bagh.2024.442928.5562>

زمرشیدی، حسین (۱۳۹۰) «تحول خط بنایی در معماری صفویه با تأکید بر تزئینات کتیبه‌های مسجد حکیم اصفهان»، مطالعات هنر اسلامی، سال هفتم، شماره ۱۴، صص ۱۰۱-۱۱۸.

سالینگروس، نیکوس (۱۳۸۷) یک نظریه معماری، ترجمه سعید زرین مهر و زهیر متکی، تهران، مرکز مطالعاتی و تحقیقاتی شهرسازی و معماری.

----- (۱۴۰۱) شهر از منظر هندسه فرکتال، ترجمه مرجان بابایی، چاپ دوم، تهران، ثمین.

سرتیپی، بهناز و نیما ولیبیگ (۱۳۹۶ الف) «تحلیل هندسه نقوش آجرکاری پشت‌بغل ایوان‌های مسجد حکیم بر پیدایش فنون بصری»، مدیریت شهری، دوره شانزدهم، شماره ۴۹، صص ۲۴۵-۲۶۲.

----- (۱۳۹۶ ب) «تحلیل ادراک بصری بر پایه هندسه نقوش آجرکاری پشت‌بغل ایوان‌های مسجد حکیم با رویکرد گشتالت»، مدیریت شهری، دوره شانزدهم، شماره ۴۸، صص ۱۶۹-۱۷۸.

شریفی، طوفان و بهزاد سلیمانی (۱۴۰۰) «نقش تفکر طراحی بین ذهن و پیچیدگی»، رهپویه هنرهای تجسمی، سال چهارم، شماره ۴، صص ۴۸-۷۵.

Doi: 10.22034/ra.2021.527575.1038.

قراگوزلو، شقایق (۱۳۹۶) «تحلیل هندسی و نقوش آجرکاری و کاشی‌کاری دوره صفوی (نمونه موردی: مسجد حکیم اصفهان)»، سومین کنگره بین‌المللی معماری

و شهرسازی معاصر خاورمیانه، تهران.

<https://civilica.com/doc/410228>.

کشاورزی میان‌دشتی، حمیدرضا و بهمن فیزابی (۱۳۹۶) «گونه‌شناسی خط بنایی (معقلی)، بر اساس شیوه طراحی و روش‌های اجرایی»، هنرهای صناعی ایران، دوره یکم، شماره ۱، صص ۴۷-۶۱.

Doi:10.22052/HSI.2017.111644.

ماهرالنقش، محمود (۱۳۷۶) معماری مسجد حکیم، تهران، سروش.

مدنی، فروغ و آرمین بهرامیان و محمود قلعه‌نویی و مجتبی روشن (۱۳۹۳) «ارزیابی جداره‌های خیابان چهارباغ اصفهان و ارائه الگو برای آن با به‌کارگیری هندسه فراکتال»، معماری و شهرسازی آرمانشهر، دوره دهم، شماره ۱۹، صص ۱۵۳-۱۶۴.

مصطفایی، مهدیه (۱۴۰۱) «هندسه در هندسه؛ بررسی وجود بُعد فرکتال در ورودی مسجد شیخ لطف‌الله و اثر آن بر بازتعریف معنای مکان»، فصلنامه رهپویه معماری و شهرسازی، دوره یکم، شماره ۲، صص ۷۷-۹۱.

doi:10.22034/rau.2022.562599.

1012.

مهدوی‌پور، حسین و علی اکبر شریفی مهرجردی و مریم اسلامی نصرت‌آبادی (۱۳۹۶) «بررسی نقش تزئینات در ارتقای کیفیت فضایی خانه‌های سنتی یزد بر اساس مطالعه موردی خانه شفیع‌پور یزد»، مسکن و روستا، دوره سی‌وششم، شماره ۱۶۰، صص ۱۳۳-۱۴۹.

URL: <http://jhre.ir/article-1-504-fa.html>.

- using DBC and RCC, International Research Journal of Engineering and Technology, 7(7), 1467-1673.
<https://doi.org/10.5815/IJGSP.2017.03.04>.
- Aswathy, RK & Mathew, S. (2016) On different forms of self-similarity, Journal of Chaos, Solitons & Fractals, 87, 102-108.
 Doi: 10.1016/j.chaos.2016.03.021.
- Barad, K. (2007) Meeting the universe halfway: Quantum physics and the entanglement of matter and meaning. Duke University Press.
<https://doi.org/10.1215/9780822388128>.
- Berlyne, D. E. (1971) Aesthetics and psychobiology. Appleton-Century-Crofts.
<https://doi.org/10.2307/3331808>.
- Blanco, p, Maduraga, S & Isvoran, A. (2020) Fractal Dimension, Department of Material Science and Physical Chemistry, Apple Academic Press, (1st ed).
 Doi: 10.1201/9780429022937-16.
- Bloomer, K. (2000) The Nature of Ornament (W.W.Norton, New York).
- Bovill, C. (1996) Fractal Geometry in Architecture and Design, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, University of
- میراحمدی، احمد و محمد تقی پیربابایی و لیلا مدقالچی (۱۴۰۱) «تبیین نقش الگوهای پیچیدگی نظم در هندسه معماری معاصر»، مطالعات میان رشته‌ای معماری ایران، دوره یکم، شماره ۱، صص ۱۳۳-۱۵۰.
- <http://doi.org/10.22133/ISIA.2022.352148.1021>.
- میسیمی، حسین (۱۳۸۸) مسجد حکیم گوهر اعصار اسلامی، چاپ دوم، تهران، سازمان عمران.
- ناصرحی، علیرضا و مهناز محمودی زرنندی و حسین ذبیحی (۱۴۰۳) «مطالعه تطبیقی ترجیحات بصری مخاطبان عام در سبک‌های معماری و هنر از منظر زیبایی‌شناسی»، معماری و شهرسازی آرمان‌شهر، دوره هفدهم، شماره ۴۶، صص ۳۹-۴۸.
- Doi: 10.22034/aaud.2024.298544.2525.
- وحدت‌طلب، مسعود و علی یاران و حامد محمدی خوش بین (۱۳۹۹) «ارزیابی ترجیحات بصری در نماهای مسکونی (مورد مطالعاتی: دوازده خانه تاریخی تبریز)»، معماری و شهرسازی آرمان‌شهر، دوره سیزدهم، شماره ۳۲، صص ۱۷۵-۱۸۷.
- Doi:10.22034/aaud.2019.150473.1692.
- Alexander, C. (2004) The Nature of Order (Center for Environmental Structure, Berkeley, California).
- Ansari, F.A & Pandey, Y. (2020) Calculating Fractal Dimension of Gray scale and Color image by

- Doi:10.1007/s11229-015-0668-6.
- Pantazis,E, Gerber,D.(2019) Beyond geometric complexity: a critical review of complexity theory and how it relates to architecture engineering and construction, *Architectural Science Review*, 1-16.
- Doi: .1080/00038628.2019.1659750.
- Phillips, B. J., & McQuarrie, E. F. (2004) Beyond visual metaphor: A new typology of visual rhetoric in advertising. *Marketing Theory*, 4(1-2), 113-136.
- Doi:10.1177/1470593104044089.
- Sala,N.(2004) Complexity in Architecture: a Small Scale Analysis, *International Journal of Design and Nature*.
- Doi: 10.2495/DN040041.
- Salingaros, Nikos A. (2014) Complexity in Architecture and Design. *Oz Journal*, 36(1), 18-25.
- Doi: 10.4148/2378-5853.1527.
- Sandau, k. kurz.h (1997) Measuring fractal dimension and complexity, An alternative approach with an application, *journal of Microscopy*, 164-176.
- <https://doi.org/10.1046/j.1365-2818.1997.1270685.x>.
- <https://sazecad.com/product/plan-hakim-mosque-in-isfahan>. URL1: URL2:<https%3A%2F%2Ffreiseniran>. Maryland. Doi:10.1007/978-1-4612-0843-3
- Kornberger,M &Clegg, S.(2003) The Architecture of Complexity, Culture and Organization, 9 (2), 75-91 Doi:10.1080/14759550302804.
- Kravchenko, M. G., & Pudanova, L. I. (2020) Complex Model of Fractal Architecture Building. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 913, No. 2, p. 022066). IOP Publishing.
- Doi: 10.1088/1757-899X/913/2/022066.
- Lesmoir-Gordon, N. (2010) *The Colors of Infinity, The Beauty and power of fractals*, Springer London Dordrecht Heidelberg New York.
- Doi: 10.1007/978-1-84996-486-9.
- Lynch, K. (1960). *The image of the city*. M.I.T. Press.
- Losa G, Ristanović, D, Ristanović, D, Zaletel, I& Beltraminelli, S. (2016). From Fractal Geometry to Fractal Analysis, *Applied Mathematics*, 7(4),346-354.
- Doi: 10.4236/am.2016.74032.
- McClure, M. (2022) *Fractal Geometry*, University of North Carolina, Yale University.
- Näger, P. M. (2016) The causal problem of entanglement. *Synthese*, 193(4), 1127-1155.