نشریهٔ علمی باغ نظر، ۲۱(۱۳۵)، ۵۱-۶۲ / شهریور ۱۴۰۳
DOI: 10.22034/BAGH.2024.442928.5562

ترجمهٔ انگلیسی این مقاله نیز با عنوان:
Analysis of Fractal Geometry in the Maqeli Tiled Spandrel of the Northern Iwan in Hakim Mosque in Isfahan
در همین شمارهٔ مجله به‌چاپ رسیده است.

مقالهٔ پژوهشی

واکاوی هندسهٔ فرکتال در کاشی‌های منقش معقلی پشت‌بغل قوس ایوان شمالی مسجد حکیم*

کیهانه رئیسی[۱]، ایمان زکریایی کرمانی[۲]**، جلیل جوکار[۳]، صمد نجارپور[۴]

۱. دانشجوی کارشناسی‌ارشد نقاشی ایرانی، گروه کتابت و نگارگری، دانشکدهٔ صنایع دستی، دانشگاه هنر اصفهان، ایران.
۲. دانشیار، گروه فرش، دانشکدهٔ صنایع دستی، دانشگاه هنر اصفهان، ایران.
۳. مربی، گروه هنر اسلامی، دانشکدهٔ صنایع دستی، دانشگاه هنر اصفهان، ایران.
۴. استادیار، گروه کتابت و نگارگری، دانشکدهٔ صنایع دستی، دانشگاه هنر اصفهان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۰۱

چکیده

بیان مسئله: گره‌های هندسی از الگوهای پرکاربرد در طراحی نقوش معماری اسلامی است که دارای پیچیدگی، کثرت، آهنگ و توازن در ترسیم و فراتر از هندسهٔ اقلیدسی است. هندسهٔ فرکتال به‌عنوان بنیان شکل‌گیری جهان هستی و طبیعت، نااقلیدسی است. بخش عمده‌ای از هنرمندان علاوه‌بر داشتن دانش هندسه، طبیعت را الگوی کار خود قرار می‌دادند، لذا به‌صورت ناخودآگاه و شاید آگاهانه بر پایهٔ هندسهٔ فرکتال خلق اثر کرده‌اند. یکی از این نمودهای ماندگار، مسجد حکیم اصفهان است. ازآنجاکه در پس آثار زیبا قوانینی وجود دارد و برای رسیدن به امر زیبا دانستن این قوانین، شناخت ما را بالا می‌برد، مطالعهٔ دقیق در خصوص هندسهٔ فرکتال موجود در این آثار، زوایای پنهان و زیبایی آنها را آشکار می‌کند. این پژوهش در پی پاسخ به این پرسش است که چگونه می‌توان از هندسهٔ فرکتال جهت تحلیل ساختار هندسهٔ کاشی‌های منقش معقلی پشت‌بغل قوس ایوان شمالی مسجد حکیم استفاده کرد؟

هدف پژوهش: دستیابی به نظام هندسهٔ فرکتال در نقوش کاشی‌کاری‌های معقلی پشت‌بغل قوس ایوان شمالی مسجد حکیم از اهداف این پژوهش است.

روش پژوهش: این پژوهش از نظر هدف کاربردی است و روش داده‌اندوزی میدانی، کتابخانه‌ای و اینترنتی و از نظر روش توصیفی و تحلیلی است. لازم به ذکر است که تحلیل ابعاد گره‌ها با استفاده از نرم‌افزار انجام خواهد شد.

نتیجه‌گیری: با تجزیه و تحلیل نقوش معقلی موردنظر از دیدگاه فرکتال (خودمتشابهی و بُعد) نتیجهٔ پژوهش پس از محاسبهٔ بُعد با دو روش لگاریتمی (جعبه‌شمار) و با استفاده از نرم‌افزار براین‌اساس بود که این نقوش هندسی دارای بُعد کسری بوده و این ابعاد با اختلاف ناچیز در دو روش، با ابعاد فرکتالی کاملاً انطباق دارد. از سوی دیگر با خطی‌کردن نقوش با نرم‌افزار اتوکد و بررسی هندسهٔ پنهان، وجوه خودمتشابه و تکرارشوندگی در هندسهٔ پنهان نقش‌ها و همچنین در نقوش هندسی کاشی‌های معقلی متجلی شد.

واژگان کلیدی: *هندسهٔ فرکتال، نقوش هندسی، بُعد کسری، خود متشابهی، کاشیکاری معقلی، مسجد حکیم.*

مقدمه

در بیشتر موارد طبیعت با دارا بودن الگوهای ریاضی الهام‌بخش هنرمندان و مهندسان بوده است. معماری معنوی به‌عنوان یک رویکرد زیست‌تقلید[۱]، معماری مقدس طبیعی را تفسیر می‌کند. در معماری اسلامی از هندسهٔ نمادین انتزاعی استفاده شده، که از طبیعت استخراج شده است (Abdelsalam & Ibrahim, 2018, 27). ازآنجاکه هندسهٔ فرکتال اساس خلقت طبیعت است و هنرمندان برای تزیینات معماری الگوهای فرمی و محتوایی از طبیعت بهره گرفته‌اند و در معماری اسلامی با مشاهدهٔ هندسهٔ پنهان و پیدای تزیینات

*این مقاله برگرفته از پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد «کیهانه رئیسی» با عنوان «واکاوی نظام هندسهٔ فرکتال در کاشی‌های منقش معقلی مسجد حکیم اصفهان» است که به راهنمایی دکتر «ایمان زکریایی کرمانی» و «جلیل جوکار» و مشاورهٔ دکتر «صمد نجارپور» در دانشکدهٔ صنایع دستی دانشگاه هنر اصفهان در حال انجام است.

** نویسندهٔ مسئول: ۰۹۱۳۱۲۶۸۸۶۳، i.zakariaee@aui.ac.ir

می‌توان این الگوبرداری را به وضوح مشاهده کرد، لذا می‌توان در این آثار به‌دنبال ردپایی از هندسهٔ فرکتال بود.
در نقوش هندسی، مسائل قابل‌توجهی نهفته است که باید به آنها توجه کرد. از این رو طراحان، پژوهش‌های متعددی با تجزیه و تحلیل تقارن و برخی از الگوهای تناوبی یا شبه‌تناوبی برای افشای راز ساخت آن انجام داده‌اند (Khamjane & Benslimane, 2017, 5). ورای نقش و نگارهای هندسی هر یک از آثار هنری، روابط ریاضی نهفته است. برای مثال یک شکل کوچک با قواعدی که چندبار در یک زمینه تکرار می‌شود و نقش می‌آفرینند، باید تناسب و شکل خود را حفظ کند و این سلیقهٔ هنرمند را نشان می‌دهد. این الگو به‌طور فراوان درکاشیکاری‌های دورهٔ صفوی مشاهده می‌شود. مسجد حکیم از شاهکارهای باقیماندهٔ دورهٔ صفوی است که جای‌جایش از کاشی‌های معقلی پوشیده شده است و دربرگیرندهٔ زیبایی‌های شگرفی است که توانمندی هنرمندان ما را به رخ می‌کشد و می‌توان پی به نظم و ترتیب حاکم بر این آثار و ابعاد پنهان افکار این هنرمندان برد. مطالعهٔ دقیق در خصوص هندسهٔ فرکتال موجود در این آثار، زوایای پنهان، جاذبه و زیبایی آنها را آشکار می‌کند. از طرفی شناخت ساختارهای فراکتالی کاشیکاری این بنا می‌تواند در بازسازی و مرمت دقیق این آثار و خلق تزئینات معماری نوین مؤثر واقع شود. لذا این پژوهش بر آن است تا با مطالعهٔ هندسهٔ فرکتال در بخشی از کاشیکاری‌های معقلی ایوان شمالی مسجد حکیم، به‌بررسی تکرار طرح‌ها، پیداکردن ریتم نقوش و شباهت‌هایی که شکست فرکتالی با تکثیر در هندسهٔ نقوش اسلامی دارد و تحلیل آنها با قوانین هندسهٔ فرکتال (خودمانایی و بُعد کسری) دریابد که چگونه می‌توان از هندسهٔ فرکتال جهت تحلیل ساختار هندسهٔ کاشی‌های منقش معقلی پشت بغل قوس ایوان شمالی مسجد حکیم اصفهان استفاده کرد؟

پیشینهٔ پژوهش

هندسهٔ فرکتال در هنرهای تجسمی مانند معماری، شهرسازی، نقاشی و مجسمه‌سازی کاربرد دارد (مبینی و فتح‌الهی، ۱۳۹۳). ویژگی‌های مشترکی بین ساختار هندسی گره‌ها و هندسهٔ فرکتال وجود دارد (بلیلان اصل و همکاران، ۱۳۹۰؛ حیاتی و آقامحمدی، ۱۳۹۵؛ بیک‌زاده و فروزانفر،۱۳۹۴). وجوه مشابهت هندسهٔ فرکتال با نقوش اسلامی خودمتشابهی، تکرار یونیت‌سل‌ها و داشتن قانون تکاثر است (میریان، ۱۳۹۰). محققانی به‌بررسی اشکال فرکتالی درتزیینات معماری بناهای سنتی مانند مدرسهٔ السلطان حسن پرداخته‌اند (Ismail Ismail Attia, 2020؛ Abdelsalam & Ibrahim, 2018) برخی دیگر به کشف برخی از جنبه‌های زیبایی مربوط به خصوصیات ریاضی، مانند نسبت‌های طلایی و هندسهٔ فرکتال در هندسهٔ هنر اسلامی در مدرسهٔ عطارین پرداخته‌اند (Khamjane & Benslimane, 2017). تزیینات مدرسهٔ شیخ لطف‌الله اصفهان از قبیل مقرنس‌ها زیرگنبد، پلان، برش و نمای معماری دارای ویژگی‌های هندسهٔ فرکتال است (Rezazade, 2021). هنرمندانی به‌بررسی هندسهٔ فرکتال در الگوهای اسلامی و خلق آثار فرکتالی با استفاده از نقوش اسلامی با کمک تکرار نقش در مقیاس‌های مختلف و پرکردن فضاهای خالی با کمک اجزای همان نقش و یا آرایش N/2 ستاره بوده‌اند (Lin & Kaplan, 2023; Webster, 2013).
خطوط کوفی بنایی و نقوش معقلی مسجد حکیم از نظر ساختاری و هندسی، مفاهیم و مضامین موردمطالعه قرار گرفته‌اند (زمرشیدی، ۱۳۸۱؛ حضرت قلی‌زاده، ۱۳۹۴؛ کشاورزی میاندشتی و فیزابی، ۱۳۹۶؛ قراگوزلو، ۱۳۹۶؛ اولاد قباد، ۱۳۹۷). هندسهٔ نقوش کاشیکاری و آجر کاری پشت‌بغل ایوان‌های مسجد حکیم از نظر فنون بصری در غالب تعادل و نظم و همچنین رویکرد گشتالت تحلیل و بررسی شده‌است (سرتیپی و ولی‌بیگ، ۱۳۹۶ب).
با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده، مطالعات پیرامون هندسهٔ فرکتال در نقوش کاشیکاری دورهٔ صفوی کمرنگ بوده و بررسی‌ها حاکی از آن است که در این پژوهش‌ها محاسبهٔ بُعد فرکتال به‌صورت دقیق با نرم‌افزار انجام نشده و تمرکز روی ویژگی خودمانایی بوده است. همچنین در خصوص هندسهٔ فرکتال کاشیکاری‌های معقلی مسجد حکیم اصفهان پژوهشی یافت نشد. لذا این پژوهش به‌بررسی دقیق ویژگی‌های هندسهٔ فرکتال (خودمانایی و بُعد کسری) در کاشی‌های منقش معقلی پشت‌بغل قوس ایوان شمالی مسجد حکیم می‌پردازد.

مبانی نظری

• هندسهٔ فرکتال[۲]

فرکتال به ساختارهای پیچیده‌ای گفته می‌شود که مهم‌ترین ویژگی آنها خود متشابهی است. واژهٔ فرکتال از ریشهٔ لاتین فرکتوس[۳] به‌معنای سنگی که به‌طور نامنظم شکسته شده، است. به این معنی که اگر شما یک جزء کوچک از فرکتال را بشکنید، شبیه به کل آن است (Frantz & Crannell, 2011, 140). کلمهٔ فرکتال توسط مندلبروت[۴] در دهه‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ ابداع شد. پس از ابداع هندسهٔ فرکتال توسط مندلبروت این بی‌نظمی‌ها که در عین حال منظم هستند با استفاده از ویژگی‌های فرکتالی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. هندسهٔ فرکتال یک زبان جدید است که وقتی بتوانید با آن صحبت کنید، می‌توانید شکل ابر را به همان دقتی که یک معمار می‌تواند یک خانه را شرح دهد، توصیف کنید (Barnsley, 2012, 1). فرکتال‌ها اشکالی هستند که برخلاف اشکال هندسی اقلیدسی از نظم اقلیدسی پیروی نمی‌کنند و میزان بی‌نظمی آنها در تمام مقیاس‌ها یکسان است.

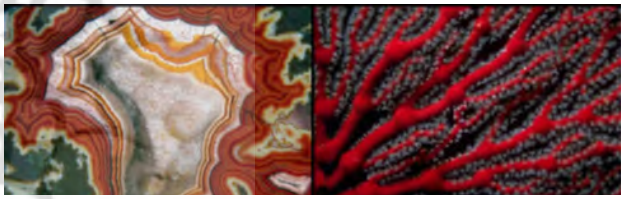
• خصوصیات اصلی فرکتال‌ها

- خودمتشابهی[۵]

هندسهٔ فرکتال عمدتاً مبتنی بر ایدهٔ اشکال خودمتشابه است. خودمتشابه یعنی اجزای فرمی یک شکل در مقیاس‌های

مختلف رفتار یکسانی دارند (Blanco et al., 2020, 171). برای اینکه یک شکل خود مشابه باشد، باید بتوان آن را به بخش‌هایی تقسیم کرد که کپی‌های کوچکتر کم‌وبیش شبیه به کل شکل باشند (Aswathy & Mathew, 2016, 102). فرم فراکتال به‌عنوان یک شکل هندسی تکه‌تکه شناخته می‌شود که می‌تواند به تعداد بی‌نهایت کپی با اندازهٔ کاهش‌یافته از کل فرم تقسیم شود. خودشباهت یکی از ویژگی‌های برجستهٔ فرم‌های فراکتال است (Ismail Ismail Attia, 2020, 1).

فرکتال‌ها بازنمود تصویری مفهوم بی‌نهایت و جهان‌های تودرتو هستند. آنها به‌وسیلهٔ خصیصه‌ای به‌وجود می‌آیند که دانشمندان آن را به‌عنوان حلقهٔ بازخورد می‌شناسند. فرایندهایی که فرکتال‌ها را تولید می‌کنند، فرایند بازخورد ساده‌ای هستند که عمل یکسانی را مکرراً اجرا می‌کنند (Peitgen & Richter, 1986). اگر به ساحل یک قاره نگاه کنید یک شکل ناهموار خواهید دید و اگر به یک جزء کوچک از ساحل خطی نگاه کنید ناهمواری مشابهی را همچنان می‌بینید. البته این یک شباهت تقریبی است ویژگی مقیاس‌پذیربودن طبیعت است که به هندسهٔ فرکتال امکان می‌دهد که برای مدل‌سازی بسیار کارآمد باشد (تصویر ۱).



تصویر ۱. خودمتشابهی در طبیعت. مأخذ: جوکار، ۱۳۸۴.

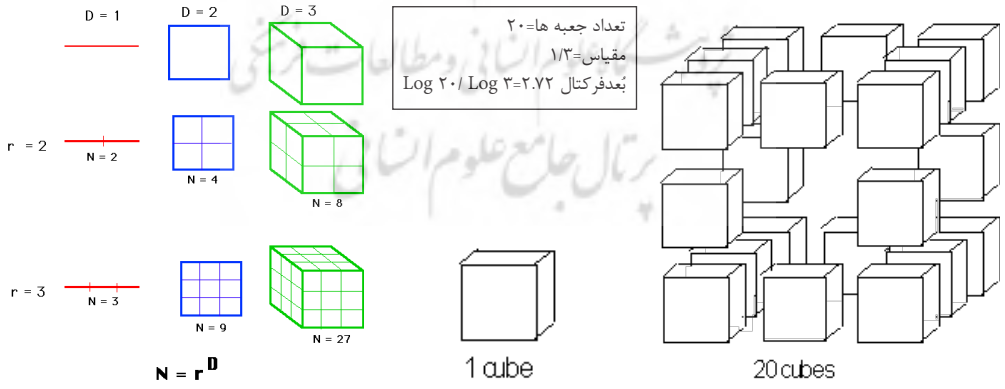
داشتن یک شکل مقیاس‌پذیر به این معنی است که الگوهای مشابهی در مقیاس‌های مختلف داخل محدودهٔ موردنظر وجود دارد. بزرگنمایی یک بخش کوچک شکلی را ارائه می‌کند که شبیه کل تصویر به‌نظر می‌آید و کوچک‌کردن کل تصویر چیزی شبیه یک قسمت کوچک را به دست می‌دهد (Eglash, 1999, 17).

- بُعدکسری

هندسهٔ فرکتال به مطالعهٔ مسائل هندسی پیچیده می‌پردازد و مفهوم بُعد یک اندازه‌گیری کمی از این پیچیدگی است. به عبارت دیگر بُعد در هندسهٔ فرکتال یک معیار ریاضی در تعیین درجهٔ پیچیدگی بافت در حال نمایش است (McClure et al., 2022, 42). معمولاً بُعد به‌صورت یک عدد صحیح درنظر گرفته می‌شود. برای مثال از نظر هندسهٔ اقلیدسی بُعد نقطه را صفر، بُعد خط یک و بُعد سطح را دو درنظر می‌گیریم. اما پدیده‌های فرکتالی دارای بُعد کسری هستند (تصویر ۲). همان‌طورکه در تصویر ملاحظه می‌شود توان D برابر با بُعد است که در اشکال اقلیدسی مثل مربع و مکعب عدد صحیح ولی در اشکال فرکتالی این توان کسری است. شکل فرکتالی خصوصیاتی چون بافت، پیچیدگی، شکستگی و ناهمواری دارد. هرچه میزان این پارامترها بالاتر باشد، بُعد فرکتال بیشتر است (Nayak & Mishra, 2017, 33) (جدول ۱).

- بُعد تشابهی[۶]

بُعد تشابهی ساده‌ترین بُعد فرکتالی است که با فرکتال‌های تولیدشده از سیستم‌های عملکردی تکرارشونده مرتبط است (Glass, 2011, 25). در همهٔ ساختارهای خودمتشابه بین عامل



تصویر ۲. مقایسهٔ بُعد صحیح با بُعد کسری. مأخذ: راست: https://www.wahl.org و چپ: https://www.vanderbilt.edu.

جدول ۱. مقایسهٔ بُعد فرکتال تصاویر بر مبنای بافت، پیچیدگی و ناهمواری. مأخذ: Nayak & Mishra, 2017.

عنوان تصویر	تصویر با ناهمواری بالا	تصویر دارای بافت	تصویر صاف	تصویر با ناهمواری کم
تصویر				
بُعد فرکتال	D=3.33	D=2.81	D=2	D=2.92

مقیاس و تعداد تقسیم‌شدهٔ کوچکتر که ساختار اصلی براساس آنها تقسیم شده است، رابطه وجود دارد.
اگر N تعداد قطعات و S تعداد قطعاتی که خط اولیه به آن تقسیم شده (مقیاس)، باشد بُعد فرکتال برابر است با (Falconer, 2014):

$$D = \frac{\text{Log } N}{\text{Log } S}$$ فرمول ۱.

باتوجه به فرمول ۱ بُعد تشابهی در چند نمونه ساختارهای فرکتالی معروف محاسبه شده است (تصویر ۳). در مجموعه کانتور[۷] (تصویر ۳-الف) بُعد تشابهی برابر است با: D=Log۲/Log۳=۰/۶۳ و در مثلث سرپینسکی[۸] (تصویر ۳-ب). بُعد برابر D= Log۳/ Log۲=۱/۵۸ است. برف دانهٔ کخ یا منحنی ونکچ[۹] (تصویر ۳-ج) دارای بُعدتشابهی برابر با D= Log۴/ Log۳=۱/۲۶ است.
متاسفانه بُعد تشابهی تنها برای یک کلاس کوچکی از مجموعه‌های خودمتشابه معنی‌دار است، به‌همین‌دلیل در عمل کاربرد زیادی ندارد (دلخوش، ۱۳۹۶، ۷).

• روش جعبه شمار(شمارش خانه)[۱۰]

روش جعبه شمار، یکی از روش‌های تعیین ابعاد بسیار مفید است. این روش یکی از پرکاربردترین روش‌های محاسبهٔ بُعد است. تعریف آن حداقل به دههٔ (۱۹۳۰ م) برمی‌گردد و بعضاً آنتروپی کولموگوروف، بُعد آنتروپی، بُعد ظرفیت، بُعدمتریک، بُعد اطلاعات و چگالی لگاریتمی نامیده شده است[۱۱] (Falconer, 2014, 41).
شبکه‌ای از خانه‌های مربع شکل روی تصویر خود قرار داده شده است، اندازه شبکه با عنوان S مشخص می‌شود و تعداد خانه‌هایی که بخشی از تصویر را در خود جای داده است، برابر با N(S) خواهد بود. تعداد مربعات پوشانندهٔ تصویر بیانگر میزان فضای مثبت و منفی نقش در واحد سطح است. به بیان دیگر فضای منفی خالی درنظر گرفته می‌شود و فضای مثبت شاکلهٔ اصلی نقش است و به‌همین‌دلیل مربع‌هایی که نقش را پوشش نمی‌دهند گسستی در سطح ایجاد می‌کنند که سبب دور شدن بُعد از عدد دو می‌شود و بُعد را به عددی بین یک و دو سوق می‌دهد. این روند را با تغییر S به شبکه‌های ریزتر و شمارش تعداد خانه‌های دربردارندهٔ تصویر یا N(S) تکرار کنید. ۱/s برابر تعداد خانه‌ها در امتداد پایین شبکه است (Bovill, 1996, 41-42) (تصویر ۴). بُعد فرکتال به‌صورت فرمول ۲ محاسبه می شود:

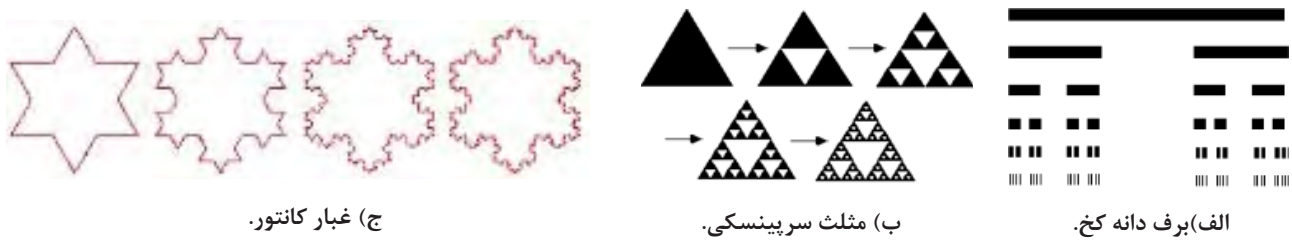
$$D_b=\frac{[\text{Log}(N(S_1))-\text{Log}(N(S_1))]}{[\text{Log}(\frac{1}{S_2})-\text{Log}(\frac{1}{S_1})]}$$ فرمول ۲.

• نقوش هندسی

نقوش هندسی نقوشی هستند که دارای زوایای مشخص بوده و از اتصال پاره‌خط‌های منحنی، راست و مورب در یک ترکیب‌بندی ریاضی‌گونه به‌وجود آمده‌اند. در این نوع ترکیب‌بندی همه فضاها به‌وسیلهٔ ساختار هندسی ترسیم‌شده پر می‌شود و زمینه و نقوش در اصل یکی است و فضایی اشباع از نقوش هندسی ایجاد شده که حتی به‌صورت بافت نیز قابل‌تحلیل است. اهل فن نقوش هندسی را گره می‌نامند که بافت‌های گوناگونی از شکل‌های منظم هندسی است (نوایی،۱۳۷۴، ۲۷۲). گره مجموعه‌ایی از اشکال مختلف هندسی است که به‌طور هماهنگ و مکمل در زمینه‌ای مشخص در کنارهم به‌کار رفته است (سامانیان، ۱۳۸۷، ۷). هر گره دارای زمینه یا قاب و آلت گره است. واحد کار در گره‌چینی و گره‌سازی را «آلت گره » گویند (امیر غیاثوند، ۱۳۸۲؛ صبا، ۱۳۸۳؛ بوگواران، ۱۳۶۲). آلت درواقع خط‌های مرزی اطراف لقاط هستند. «لقط»به شکل‌های گره گفته می‌شود که از خط‌های مستقیم و براساس قاعده‌های منظم به شکل‌های هندسی درآمده و در یک قاب یا زمینه محدود شده است. لقاط می‌توانند از چوب یا شیشه و یا هر جنس دیگر باشند (دهشتی و همکاران، ۱۳۹۸).

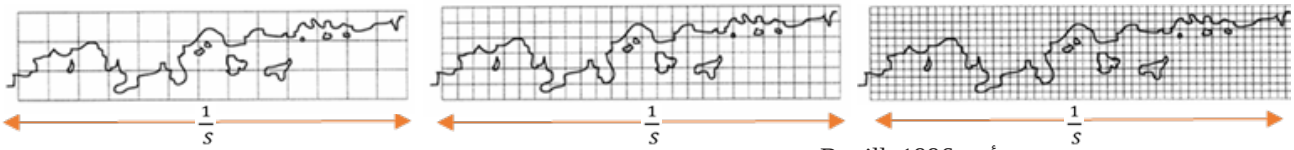
• کاشی معقلی

مَعقل بر وزن محفل به معنای برج بلند، دژ محکم، بنای ستبر، میلِ سر به فلک‌کشیده و کلمه‌ای است عربی. در مواردی، مَعقل از «گره‌زدن زانوی شتر» نیز آمده است. تشابه زانوی شتر با پیچش گره که در « خانه‌های شطرنج مربع» و «مربع مستطیل» ایجاد می‌شود سبب این نامگذاری در کاشیکاری شده است (زمرشیدی،



الف)برف دانه کخ. ب) مثلث سرپینسکی. ج) غبار کانتور.

تصویر ۳. چند نمونه ساختار فرکتالی معروف. مأخذ: الف و ج) جوکار ،۱۳۸۴، ب) https://math.bu.edu.



تصویر ۴. شبکه‌های شمارش جعبه. مأخذ: Bovill, 1996.

۱۳۸۱، ۴۳). استفاده از این کلمه در بین استادان کاشیکار شاید به این دلیل است که اجرای نقش‌های آن بس مشکل و پیچیده است و به تفکر و تعقل زیاد نیاز دارد (ماهرالنقش، ۱۳۸۳، ۸). هنر معقلی ریشه در آثار قبل از اسلام داشته تا جایی که کاشی‌نگاره‌های به‌دست‌آمده از دوران هخامنشی حکایت از هنر کاشیگری و کاشی‌پزی روی قطعات نره به ابعاد ۱۵×۷ و عمق ۶ تا ۷ سانتی‌متر دارد (زمرشیدی، ۱۳۸۳، ۱۵). کاشیکاری معقلی یا بنایی با استفاده از ترسیم اشکال هندسی مانند مربع، لوزی، مستطیل، خطوط موازی و متقاطع حاصل می‌شود (همان، ۱۳۷۳، ۴).

• مسجد حکیم

- تاریخچهٔ مسجد حکیم

مسجد حکیم یکی از چهار مسجد جامع اصفهان مربوط به اواخر دورهٔ صفوی در منطقهٔ باب‌الدشت اصفهان است که توسط حکیم محمد داوود طبیب شاه عباس دوم صفوی بین سال‌های ۱۰۶۷ تا ۱۰۷۳ ه.ق در محل ویرانه‌های مسجد جامع جورجیر (قرن ۴ ه.ق) ساخته شد (تصویر ۵) (ماهرالنقش، ۱۳۷۶، ۱۶). حکیم داوود که از دسایس اطرافیان به هندوستان گریخته بود، در اثر ملازمت با اورنگ زیب[۱۲] و انجام خدمات برای او به تقرب خان شهرت یافت. او اموال زیادی برای خانواده‌اش فرستاد و دستور ساخت این مسجد را داد (همان، ۱۱).

- معماری مسجد حکیم

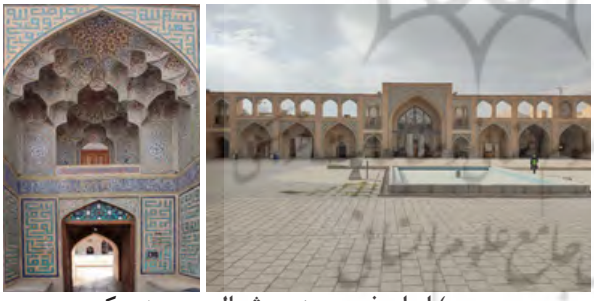
این مسجدکه حدود ۸۰۰۰ مترمربع وسعت دارد از نوع مساجد چهار ایوانی است و مانند دیگر بناهای دورهٔ صفوی نمای بنا از آجر ساخته شده است. این بنا دارای سه سردر شمالی، شرقی، غربی و سردر جورجیر (دیالمه) است (همان). نوع کاشیکاری این مسجد معقلی است و کتیبه‌ها شامل خطوط بنایی یک رگی، دورگی، سه رگی، مورب و متداخل است (میسمی، ۱۳۸۸، ۲۵).

معمار این بنا علی بیک بنّای اصفهانی است و از کاشی‌کاران این مسجد می‌توان از میرزا محمد کاشیپز نام برد. تمامی کتیبه‌ها که بیشتر آنها به خط ثلث است توسط محمدرضا امامی اصفهانی وکتیبه محراب شبستان غربی به‌قلم محمدباقر شیرازی نوشته شده است (هنرفر، ۱۳۵۰، ۶۱۸). این مسجد سرشار از نقوش و کتیبه‌های معقلی است که به‌عنوان یک نمونه از پرکارترین نقوش معقلی پشت‌بغل قوس ایوان شمالی (تصویر ۶) انتخاب شده است و مورد تجزیه و تحلیل از دیدگاه هندسهٔ فرکتال قرار خواهد گرفت.

روش انجام پژوهش

این پژوهش از نظر هدف کاربردی و از نظر روش توصیفی و تحلیلی است. برای گردآوری اطلاعات به‌صورت میدانی ازنوع مشاهده مستقیم و تصویربرداری و به‌منظور تکمیل مبانی نظری و معرفی ساختارهای فرکتالی و نقوش معقلی موردنظر از منابع اسنادی (کتابخانه‌ای) و اینترنتی استفاده شده است. برای تجزیه و تحلیل ابتدا توصیف ساختار و مبانی هندسهٔ فرکتال و ساختار نقوش کاشیکاری‌ها انجام شد. سپس تحلیل نقوش ذکرشده بر مبنای هندسهٔ فرکتال از طریق ترسیم نقوش و خطی‌کردن آنها با نرم‌افزار اتوکد و انطباق آن با مصادیق هندسهٔ فرکتال پرداخته

الف) سردر (دیالمه) به‌جای‌مانده از مسجد جورجیر



ب) ایوان غربی و درب شمالی مسجد حکیم

تصویر ۵. مسجد حکیم اصفهان. عکس: آرشیو نگارندگان.

تصویر ۶. ایوان شمالی مسجد حکیم. عکس: آرشیو نگارندگان.

و اطلاعات به‌دست‌آمده به صورت کیفی و کمی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. به این‌صورت که پس از ترسیم نقوش و گره‌ها به بررسی خودمانایی و سپس به محاسبهٔ بُعد از طریق فرمول لگاریتمی (جعبه‌شمار) و نرم‌افزار پرداخته خواهد شد.

تجزیه و تحلیل نمونهٔ منتخب از دیدگاه فرکتال

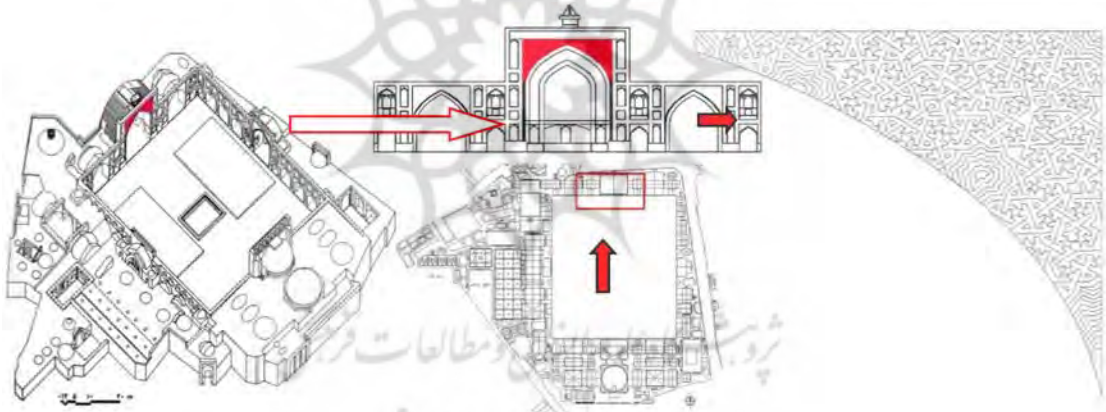
پشت‌بغل قوس ایوان شمالی مسجد حکیم که مکان دقیق آن در تصویر ۷ مشاهده می‌شود، دارای گره دوپنجی طبل‌دار است و آلت‌های کلید، ستاره ۵ و طبل در آن وجود دارد (تصویر ۸). ازآنجاکه خوانش تصویر براساس تضاد بین شکل و زمینه به‌دست می‌آید، در تصویر پشت‌بغل قوس ایوان شمالی زمینه را می‌توان آجر و نقش گره را شکل درنظر گرفت و تحلیل فرکتالی را بر روی نقوش انجام داد (سرتیپی و ولی‌بیگ، ۱۳۹۶الف، ۱۳۹۶ب). از طرفی کاشیکاری و آجرکاری براساس گره‌ها و نقوش انجام می‌شوند. همان‌طور که گفته شد اشکال فرکتالی در عین بی‌نظمی دارای نظم هستند و نظم خود عامل ایجاد تعادل است. لذا اشکال فرکتالی دارای تعادل در جهت حرکت، تراکم و توپربودن هستند (برای مثال مثلث سرپینسکی و یا غبار کانتور (تصویر ۳). در واقع در فرکتال‌ها قرارگیری اجزا در اندازه‌های مختلف و همچنین تکرار آنها سبب ایجاد نظم و تعادل می‌شود. در نقوش پشت‌بغل قوس ایوان شمالی مسجد حکیم نیز این ویژگی‌ها دیده می‌شود. عناصر بصری با اندازه‌های مختلف در دو طرف قاب (آلت‌های کلید) و همچنین عناصر توپر (ستاره) سبب ایجاد تعادل در طرح شده‌اند. همچنین اشکال مشابه تکرارشده در جهات مختلف باعث ایجاد نظم، ریتم و تعادل هستند (همان) (تصویر۹-ب). رعایت سلسله‌مراتب در هندسهٔ پنهان و پیدای نقوش نیز بیانگر نظم و همچنین خودمتشابهی است (تصاویر ۸ و ۹).

• ویژگی خودمتشابهی

ابتدا نقوش را با استفاده از نرم‌افزار اتوکد خطی کرده و سپس به تجزیه و تحلیل آنها برای یافتن ویژگی خودمتشابهی می‌پردازیم. به‌دلیل اینکه نقش قوس از تکرار گره دوپنجی تشکیل شده است به بررسی خودمتشابهی در آن گره نیز پرداخته شده است. همچنین به‌دلیل اینکه نقوش لچکی چپ و راست متقارن هستند تحلیل و بررسی هندسهٔ فرکتال دریکی از آنها کفایت می‌کند.

- ویژگی خودمتشابهی بر مبنای ستاره

بر مبنای یکی از ستاره‌های موجود در نقش می‌توان ستاره‌هایی با ابعاد مختلف یافت که مشابه با آن ستاره تکرار شده‌اند. این تکرار هم در نقش قوس و هم در گره دوپنجی طبل‌دار که نقش براساس



تصویر ۷. موقعیت مکانی پشت‌بغل قوس ایوان شمالی در مسجد حکیم. مأخذ: نگارندگان بر گرفته ازحاجی قاسمی،۱۳۷۵.

تصویر ۸. پشت‌بغل قوس ایوان شمالی مسجد حکیم. مأخذ: نگارندگان.

آن شکل گرفته است، دیده می‌شود و این عمل را می‌توان برای هر یک از ستاره‌های موجود در نقش تکرار کرد (تصویر ۹-الف).

- ویژگی خودمتشابهی برمبنای آلت گره کلید

امتداد بعضی از خطوط موجود در نقوش کاشی، نقش کلیدی را می‌آفرینند که در بردارندهٔ آلت گره کلیدهای مختلف در اندازه‌های متفاوت اسن که این خود گویای ویژگی خود متشابهی است (تصویر ۹-ب).

- ویژگی خودمتشابهی براساس دایره

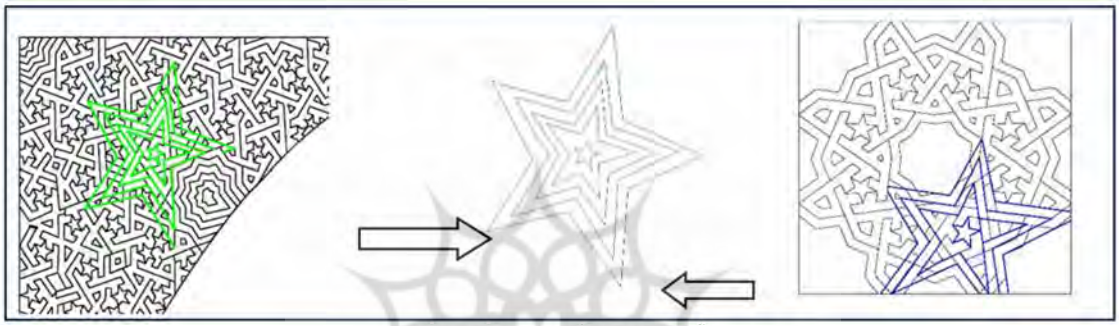
دایره‌های محیط و محاط بر چند ضلعی‌های موجود در نقش و همچنین دایره‌های محیط و محاط بر ستاره‌ها در اندازه‌های مختلف دایره‌ای را می‌سازد که شامل دایره‌های متحدالمرکز و همچنین دایره‌هایی با اندازه‌های متفاوت در درون خود است که گویای ویژگی خودمانایی در هندسهٔ پنهان طرح است (تصویر ۹-ج).

- ویژگی خودمتشابهی برمبنای پنج‌ضلعی ستاره

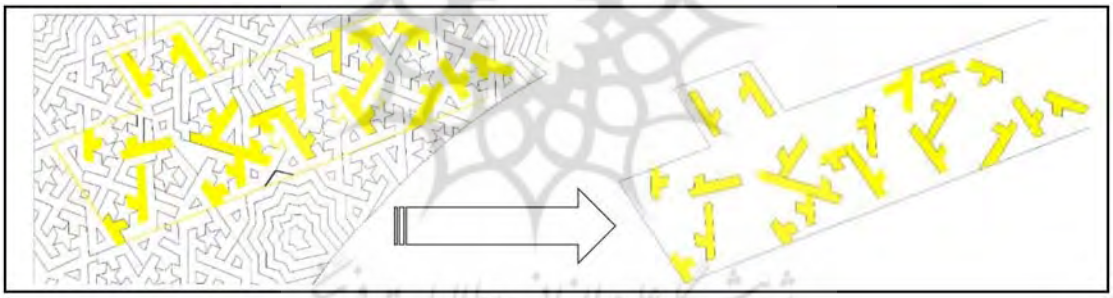
در صورتی که پنج‌ضلعی محاط و محیط بر ستارهٔ پنج‌پر موجود در نقش ترسیم شود می‌توان منطبق بر خطوط موجود در نقش، پنج‌ضلعی‌های متشابه با آنها در ابعاد مختلف ترسیم کرد. این عمل می‌تواند برای تمامی ستاره‌های موجود تکرار شود (تصویر ۹-د).

- ویژگی خودمتشابهی بر مبنای هشت‌ضلعی

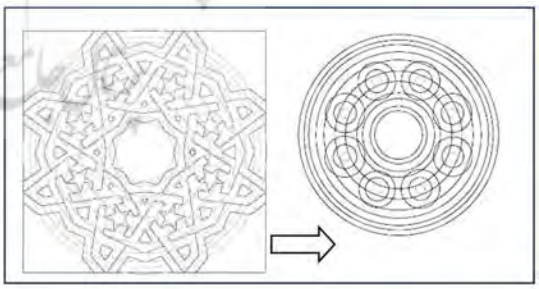
هشت‌ضلعی محیط و محاط بر ستارهٔ هشت‌پر و همچنین هشت‌ضلعی‌های منطبق بر خطوط نقش، هشت‌ضلعی‌های متحدالمرکزی را می‌سازد که دارای ویژگی خودمتشابهی است



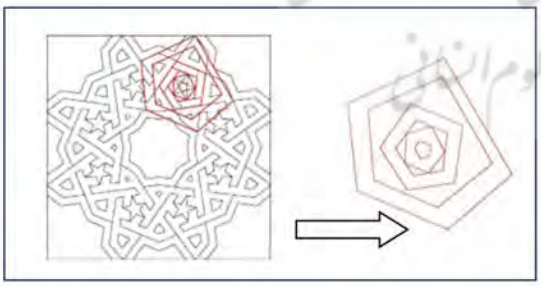
الف) خودمتشابهی برمبنای ستاره



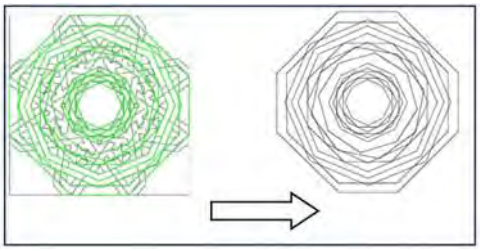
ب) خودمتشابهی برمبنای آلت گره کلید



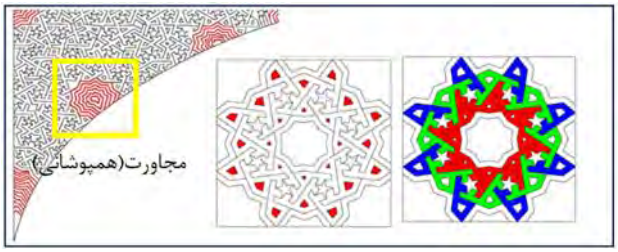
ج) خودمتشابهی براساس دایره



د) خودمتشابهی براساس پنج‌ضلعی ستاره



ه) خودمتشابهی بر مبنای هشت ضلعی



و) خودمتشابهی در اجزای مختلف نقش

تصویر ۹. بررسی خودمتشابهی در نقش. مأخذ: نگارندگان.

و این نیز گویای نمود فرکتال در هندسهٔ پنهان طرح است (تصویر ۹-ه).

- ویژگی خودمتشابهی در اجزای مختلف نقش

در قسمت‌های مختلف طرح و همچنین در گره، تکرار نقش‌ها در اندازه‌های مختلف دیده می‌شود که با رنگ‌های متفاوت نمایش داده شده است. طرح‌ها و نقش‌های موجود در تزیینات ضمن حفظ هویت خود با یکدیگر مجاورت و هم‌پوشانی نیز دارند، ازطرفی چشم چیزهای متشابه را در یک دسته جای می‌دهد حتی اگر اندکی متفاوت باشند (تصویر ۹-و). این خود مصداق خودمتشابهی است. تکرار این طرح‌ها در پشت‌بغل قابل‌مشاهده است. در این نقوش قانون تداوم نیز به‌چشم می‌خورد، عناصر بصری (آلت‌های کلید) به‌دنبال هم تکرار شده‌اند و چشم تمایل دارد روی طرح حرکت کند، همچنین نقوش از اصل فراپوشانندگی هم پیروی می‌کنند به این‌صورت که نقوش کوچکتر تمایل به قرارگیری درون نقوش بزرگتر را دارند (همان) (تصویر ۹). این ویژگی‌ها که بیانگر تکرارشوندگی و خُردمقیاسی هستند در اشکال فرکتالی نیز به‌چشم می‌خورند و معرف ویژگی خودمانایی هستند.

• محاسبهٔ بُعد

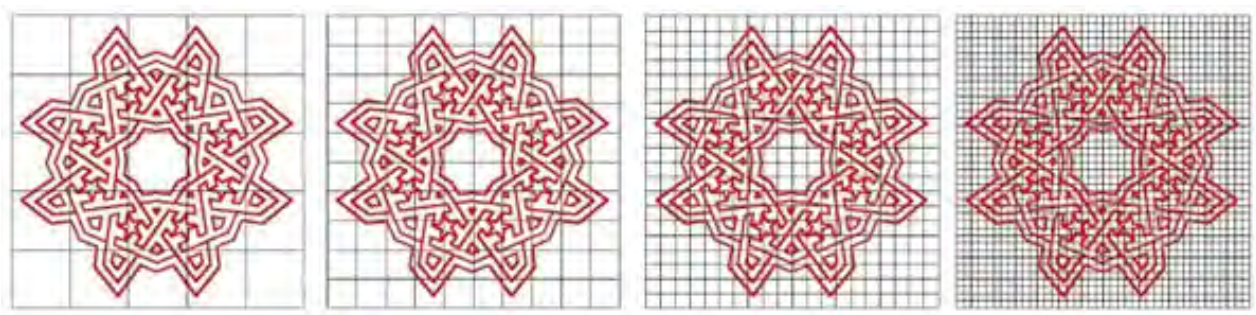
- محاسبهٔ بُعد به روش جعبه‌شمار به کمک فرمول لگاریتمی

برای محاسبهٔ بُعد، شبکه‌ای از مربع‌ها را روی گره موردنظر قرار داده و سپس تعداد مربع‌های پوشانندهٔ گره شمارش می‌شود. در مرحلهٔ بعد اندازه مربع‌ها کوچکتر می‌شود و این روند ادامه می‌یابد.

تصویر ۱۰. شبکه‌های پوشانندهٔ تصویر. مأخذ: نگارندگان.

جدول ۲. تحلیل جعبه‌شمار. مأخذ: نگارندگان.

مرحله	اندازهٔ شبکه	تعداد مربعات پوشانندهٔ تصویر N(s)	تعداد مربعات پایین شبکه	LogN(s)	Log ($\frac{1}{s}$)	Log(s)
۱	۴۰	۹	۵	۰/۹۵	۰/۶۹	۱/۶۰
۲	۲۰	۲۶	۱۰	۱/۴۱	۱/۰۰	۱/۳۰
۳	۱۰	۸۶	۲۰	۱/۹۳	۱/۳۰	۱/۰۰
۴	۵	۳۱۸	۴۰	۲/۵۰	۱/۶۰	۰/۶۹



تصویر ۱۱. شبکه‌های پوشانندهٔ تصویر. مأخذ: نگارندگان.

بَعدی برابر ۲۰ و ۱۰ و آخرین اندازه برابر ۵ سانتی‌متر درنظر گرفته شده است (تصویر ۱۰) (جدول ۲).

روند محاسبهٔ بُعد جعبه‌شمار طولانی است و اندازهٔ واحد شبکه‌ها باید به صفر میل کند که در مجال محاسبهٔ لگاریتمی بادستی نمی‌گنجد و با نرم‌افزار دقت بیشتری خواهد داشت که به آن نیز پرداخته می‌شود. با استفاده از فرمول ۲ بُعد محاسبه می‌شود.

$$D(۴۰-۲۰)=\frac{[Log(۲۶)-Log(۹)]}{[Log(۱۰)-Log(۵)]}=\frac{۱/۴۱-۰/۹۵}{۱/۰۰-۰/۶۹}=۱/۹۰$$

$$D(۲۰-۱۰)=\frac{[Log(۸۶)-Log(۲۶)]}{[Log(۲۰)-Log(۱۰)]}=\frac{۲/۵۰-۱/۹۳}{۱/۶۰-۱/۳۰}=۱/۹۰$$

$$D(۱۰-۵)=\frac{[Log(۳۱۸)-Log(۸۶)]}{[Log(۴۰)-Log(۲۰)]}=\frac{۲/۵۰-۱/۹۳}{۱/۶۰-۱/۳۰}=۱/۹۰$$

در ادامه به محاسبهٔ بُعد گره دوپنجی طبل‌دار که مبنای ترسیم نقوش قوس است، پرداخته می‌شود. همانند روند قبل اندازهٔ بزرگترین واحد شبکه برابر ۴۰ سانتی‌متر، اندازهٔ واحد شبکهٔ بَعدی برابر ۲۰ و ۱۰ آخرین اندازه برابر ۵ است (تصویر ۱۱) (جدول ۳).

$$D(۴۰-۲۰)=\frac{[Log(۷۶)-Log(۲۱)]}{[Log(۱۰)-Log(۵)]}=\frac{۱/۸۸-۱/۳۲}{۱/۰۰-۰/۶۹}=۱/۸۰$$

$$D(۲۰-۱۰)=\frac{[Log(۲۴۴)-Log(۷۶)]}{[Log(۲۰)-Log(۱۰)]}=\frac{۲/۳۸-۱/۸۸}{۱/۳۰-۱/۰۰}=۱/۶۶$$

$$D(۱۰-۵)=\frac{[Log(۳۱۸)-Log(۸۶)]}{[Log(۴۰)-Log(۲۰)]}=\frac{۲/۸۴-۲/۳۸}{۱/۶۰-۱/۳۰}=۱/۵۳$$

- محاسبهٔ بُعد به روش جعبه‌شمار با استفاده از نرم‌افزار

با استفاده از نرم‌افزار بُعد هر دو نمونه گره محاسبه شد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

نرم‌افزار با روش جعبه‌شمار و با درنظرگرفتن ۱۰ اندازهٔ متفاوت برای شبکه‌ها محاسبهٔ بُعد را انجام داده که در (جدول ۴) چند نمونهٔ انتخابی از آن قرار داده شده است. برای گره قوس(تصویر ۱۰) نیز به همین‌ترتیب به کمک نرم‌افزار عدد D=۱/۶۹ به‌دست آمد.

بحث

درگذشته معماران برای خلق نقوش کاشیکاری بناهای سنتی از طبیعت الهام می‌گرفتند. لذا می‌توان در این نقوش به‌دنبال ردپایی از هندسهٔ فرکتال (هندسهٔ طبیعت) بود. به‌منظور بررسی قوانین فرکتال در تزئینات معماری، قسمتی از کاشیکاری‌های معقلی مسجد حکیم اصفهان انتخاب شده است. به این دلیل که نقش موردنظر از تکرار گره دوپنجی تشکیل شده است، به‌طور جداگانه نیز ویژگی‌های هندسهٔ فرکتال روی آن گره بررسی شد. در نمونهٔ انتخابی دو ویژگی مهم فرکتال (خودمتشابهی و بُعد) تحلیل شد. ویژگی خودمانایی (شامل تکرار نقش‌ها در مقیاس‌های مختلف) در نقوش و در هندسهٔ پنهان آنها به‌دلیل مجاورت، تداوم، هم‌پوشانی و فراهم‌پوشانی متجلی بود (جدول ۵). همچنین این نقوش همانند اشکال فرکتالی دارای نظم در عین بی‌نظمی (عناصر ناهمگون در طرح هم دارای نظم هستند) و تعادل هستند. بُعد فرکتال با دو روش لگاریتمی (جعبه‌شمار) و نرم‌افزار محاسبه شد. بُعدها کاملاً منطبق بر بُعد فرکتال یعنی اعشاری بودند. براساس اعداد محاسبه‌شده مطابق جداول ۱ و ۲ در نمودار ترسیم‌شده محور x، Log(1/s) و محور y، Log(1/s) را نشان می‌دهد (تصویر ۱۲). همان‌طور که مشاهده می‌شود معادلات خط، شیب خطوط تقریباً یکسان، سازگار و هماهنگی گره‌ها را نشان می‌دهند. در نهایت این پژوهش به ویژگی‌های مهم هندسهٔ فرکتال در نقوش کاشیکاری دست یافت. ازآنجاکه بیشتر نقوش و گره‌ها در تزیینات دارای ویژگی‌های مشابه با موارد ذکرشده است و همچنین گره‌ها به‌دلیل داشتن فضای خالی و شکست‌ها دارای بُعد اعشاری هستند، از این پژوهش می‌توان جهت بررسی ویژگی‌های هندسه فرکتال در سایر تزیینات معماری استفاده کرد. پژوهش‌های انجام شده در این راستا نیز به‌دنبال یافتن ویژگی‌های هندسه فرکتال در نقوش هندسی و گره‌ها بوده است. اما پژوهش پیرامون هندسهٔ فرکتال در نقوش کاشیکاری دورهٔ صفوی کمرنگ بوده و درخصوص کاشیکاری معقلی در مسجد حکیم اصفهان و یا کاشی‌های معقلی در بناهای دیگر پژوهشی یافت نشد. همچنین در این پژوهش به محاسبهٔ بُعد فرکتال به دو روش پرداخته شد که در پژوهش‌های پیشین این مورد دیده نشد.

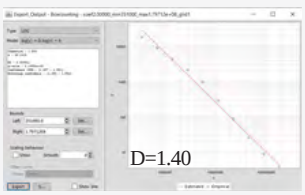
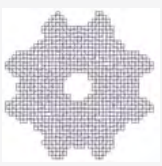
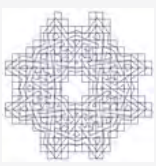
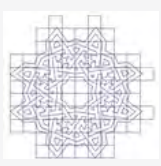
نتیجه‌گیری

در این پژوهش به توصیف، تجزیه و تحلیل کاشیکاری معقلی پشت‌بغل قوس ایوان شمالی مسجد حکیم براساس ویژگی‌های هندسهٔ فرکتال پرداخته شد و این نتیجه به‌دست آمد که نقوش هندسی کاشیکاری‌ها دارای ویژگی‌های فرکتال از جمله خودمتشابهی هستند. سپس بُعد آن به روش (جعبه‌شمار) فرمول لگاریتمی و نرم‌افزار محاسبه شد. بُعدها به‌صورت کسری بودند که کاملاً منطبق بر ابعاد فرکتال است. در نهایت این پژوهش دریافت که هنرمند طراح ایرانی در گذشته از راه حس سلیم تربیت‌یافتهٔ خویش، هندسهٔ فرکتال(هندسهٔ طبیعت) را دریافته و به‌صورتی کاملاً تجریدیافته در آثار خود به تجلی گذاشته است و این فرایند به‌احتمال نزدیک به یقین به‌صورت ناخودآگاه توسط هنرمند طراح انجام شده است که می‌تواند الهام‌بخش معماران برای طراحی‌های مدرن و زیبای امروزی که همسو با روح طبیعت‌گرای انسانی است، باشد. به‌دلیل داشتن ویژگی‌های مشابه بیشتر نقوش و گره‌ها در تزیینات با موارد بررسی‌شده در این پژوهش و همچنین

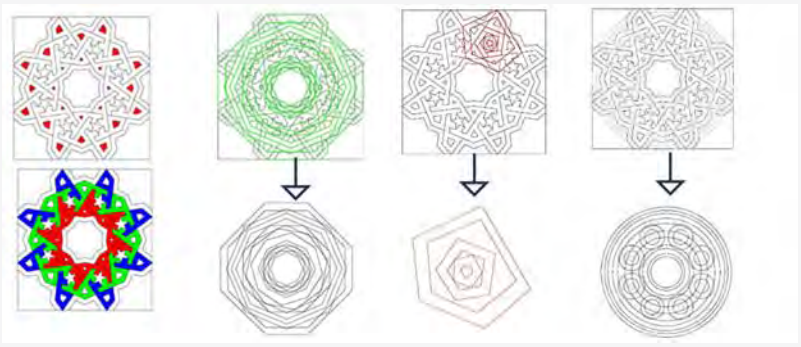
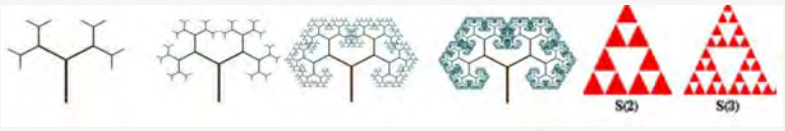
جدول ۳.تحلیل جعبه شمار. مأخذ:نگارندگان.

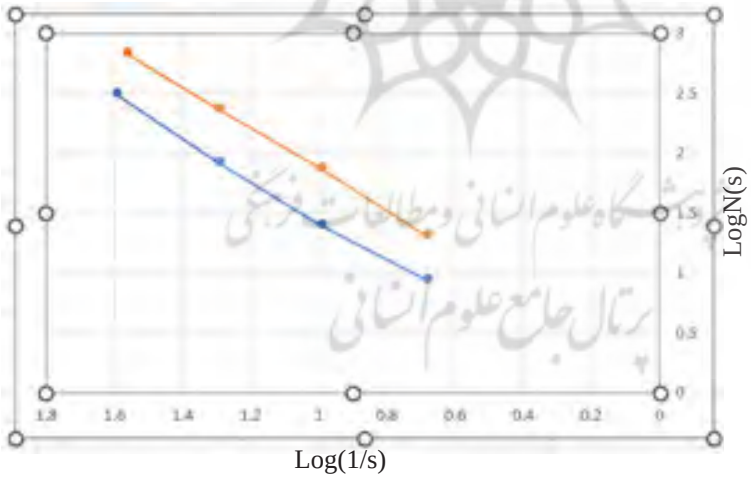
مرحله	اندازهٔ شبکه	تعداد مربعات پوشانندهٔ تصویر N(s)	تعداد مربعات پایین شبکه	LogN(s)	Log ( )	Log(s)
۱	۴۰	۲۱	۵	۱/۳۲	۰/۶۹	۱/۶۰
۲	۲۰	۷۶	۱۰	۱/۸۸	۱/۰۰	۱/۳۰
۳	۱۰	۲۴۴	۲۰	۲/۳۸	۱/۳۰	۱/۰۰
۴	۵	۷۰۷	۴۰	۲/۸۴	۱/۶۰	۰/۶۹

جدول ۴.تحلیل جعبه‌شمار توسط نرم‌افزار. مأخذ:نگارندگان.

محاسبهٔ بُعد فرکتال	مرحلهٔ چهارم	مرحلهٔ سوم	مرحلهٔ دوم	مرحلهٔ اول
				

جدول ۴. تحلیل جعبه‌شمار توسط نرم‌افزار. مأخذ: نگارندگان.

ویژگی‌های هندسهٔ فرکتال	گره دوپنجی
خودمتشابهی (تکرارشوندگی، خرد مقیاسی)	 نمونهٔ فرکتال 
محاسبهٔ بُعد با نرم‌افزار به روش جعبه شمار	
عدد بُعد	D=۱/۴۰ D=۱/۲۶ D=۱/۵۸



تصویر ۳. چند نمونه ساختار فرکتالی معروف. مأخذ: الف و ج) جوکار ،۱۳۸۴، ب) https://math.bu.edu.

گره‌ها به‌دلیل داشتن فضای خالی و شکست‌ها دارای بُعد اعشاری هستند، این پژوهش می‌تواند به‌صورت ساختار مقایسه‌ای در سایر تزیینات معماری به‌کار رود اما جهت احتیاط علمی، به‌نظر می‌رسد لازم است هر مورد به‌طور مستقل مطالعه و بررسی شود.

پی‌نوشت‌ها

۱. Biomimic

۲. Fractal geometry

۳. Fractus-Fractum

۴. Benoit B. Mandelbrot (زادهٔ ۲۰ نوامبر ۱۹۲۴ - درگذشت ۱۴ اکتبر ۲۰۱۰) ریاضی‌دان فرانسوی‌تبار آمریکایی بود که به پدر هندسهٔ فراکتالی شهرت یافته است.

۵. Self-similarity

۶. Similarity Dimension

۷. Cantor set

۸. Sierpiński triangle

۹. Van koch

۱۰. The box counting method

۱۱. Kolmogorov Entropy Entropy Dimension-- Capacity Dimension Metric Dimension- Logarithmic density

۱۲. اورنگ‌زیب عالمگیر یا عالمگیر اعظم، عنوان و لقب محی‌الدین محمد، ششمین امپراتور گورکانی هند بود که بین سال‌های ۱۰۶۷ تا ۱۱۱۸ هق/ ۱۶۵۸ تا ۱۷۰۷م حکومت کرد. اورنگ‌زیب به معنای زیبندهٔ اورنگ (تخت پادشاهی) است.

فهرست منابع

• امیر غیاثوند، محبوبه.(۱۳۸۲). *هنر گره چینی در معماری*. تکوک زرین.

• اولاد قباد، منظر بانو. (۱۳۹۷). *طراحی و ساخت حجم محیطی بر اساس خط کوفی معقلی مسجد حکیم اصفهان* [پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد]. دانشگاه هنر اسلامی تبریز، دانشکدهٔ هنرهای صناعی اسلامی.

• بلیلان اصل، لیلا؛ ستارزاده، داریوش؛ خورشیدیان، ساناز و نوری، مریم. (۱۳۹۰). بررسی ویژگی‌های هندسی گره ها در تزیین‌های اسلامی از دیدگاه هندسهٔ فرکتال. *مطالعات شهر ایرانی اسلامی*، ۲ (۶)،۸۳-۸۷.

• بوگواران، ژول. (۱۳۶۲). *طرح‌های اسلامی هنر گره سازی* (ترجمهٔ جلالدین سلطان کاشفی). کارگاه هنر.

• بیک‌زاده، شهرزاد و فروزانفر، فرید. (۱۳۹۴). تحلیل گره‌های هندسی در معماری اسلامی براساس محاسبهٔ عدد فرکتال. *همایش ملی معماری و شهرسازی ایرانی - اسلامی،دانشگاه پیام نور استان گیلان، رشت*.

• جوکار، جلیل. (۱۳۸۴). *فراکتال و فراکتال گرایی در هنر*. کلهر.

• حاجی قاسمی،کامبیز. (۱۳۷۵).*گنجنامهٔ فرهنگ آثار معماری اسلامی ایران: دفتر دوم، مساجد اصفهان*. دانشگاه شهید بهشتی.

• حضرت قلی‌زاده، سکینه. (۱۳۹۴). *تحلیل و بررسی نقوش و خطوط کاشیکاری مسجد حکیم اصفهان*. کنفرانس بین‌المللی انسان، معماری، عمران و شهر، تبریز.

• حیاتی، حامد و آقامحمدی، حسین. (۱۳۹۵). بررسی ویژگی‌های هندسی گره در معماری اسلامی. *مطالعات علوم کاربردی در مهندسی*، ۱(۲)، ۱۳-۲۸.

• دلخوش، مهدی. (۱۳۹۶). معرفی فرکتال ها و بُعدهای کسری. *ریاضی و جامعه*، ۲ (۱)،۱-۲۳. https://doi.org/10.22108/msci.2017.12328

• دهشتی، مجید؛ خوش‌نژاد، مهدی و رئیسی، محمد منان. (۱۳۹۸). روشی نو در ترسیم نقش‌مایه‌های گره ده تند و کند. *نگره*، ۱۴ (۵۱)، ۵۳-۶۳. https://doi.org/10.22070/negareh.2019.3481.1947

• زمرشیدی، حسین. (۱۳۷۳). *طاق و قوس در معماری ایران*. کیهان.

• زمرشیدی، حسین. (۱۳۸۱). خطوط معقلی و بنایی در معماری ایران. *رشد آموزش هنر*، (۱)، ۴۳-۴۷.

• زمرشیدی، حسین. (۱۳۸۳). *کاشیکاری ایران،گره معقلی*. پیک.

• سامانیان، صمد. (۱۳۸۷). *هندسهٔ نقوش اسلامی: ترم سوم*. شقایق روستا.

• سرتیپی، بهناز و ولی بیگ، نیما. (۱۳۹۶الف). تحلیل ادراک بصری برپایهٔ هندسهٔ نقوش آجرکاری پشت‌بغل ایوان‌های مسجد حکیم با رویکرد گشتالت. *مدیریت شهری*، (۴۸)، ۱۶۹-۱۷۸.

• سرتیپی، بهناز و ولی بیگ، نیما. (۱۳۹۶ب). تحلیل هندسهٔ نقوش آجرکاری پشت‌بغل ایوان‌های مسجد حکیم بر پیدایش فنون بصری. *مدیریت شهری*، ۱۶ (۴۹)، ۲۴۵-۲۶۲.

• صبا، منتخب. (۱۳۸۳). *جلوه‌گری نقوش هندسی در آثار هنر های سنتی ایران*. نورحکمت.

• قراگوزلو، شقایق. (۱۳۹۶). تحلیل هندسی و نقوش آجری‌کاری و کاشی‌کاری دورهٔ صفوی (نمونه موردی: مسجد حکیم اصفهان). *سومین کنگره بین‌المللی معماری و شهرسازی معاصر خاورمیانه، تهران*.

• کشاورزی میاندشتی، حمیدرضا و فیزابی، بهمن. (۱۳۹۶). گونه‌شناسی خط بنایی (معقلی)، براساس شیوهٔ طراحی و روش‌های اجرایی. *هنرهای صناعی ایران*، ۱ (۱)، ۴۷-۶۱. https://doi.org/10.22052/hsi.2017.111644

• ماهرالنقش، محمود. (۱۳۷۶). *معماری مسجد حکیم*. سروش.

• ماهرالنقش، محمود. (۱۳۸۳). *طرح و اجرای نقش در کاشیکاری ایران، دورهٔ اسلامی، معقلی*.سروش.

• مبینی، مهتاب و فتح‌الهی، نوشین. (۱۳۹۳). بررسی جایگاه هندسهٔ فرکتال در هنر و چگونگی ظهور آن در هنرهای تجسمی. پیکره، ۳(۶)، ۱۷-۲۳. https://doi.org/10.22055/pyk.2015.13204

• میریان، میثم. (۱۳۹۰). نقش فراکتال‌ها در ریاضیات و ارتباط آن با نقوش اسلامی در ابنیه‌ها و مساجد ایران. *کتاب ماه هنر*، (۱۵۹)، ۸۶-۹۲.

• میسمی، حسین. (۱۳۸۸). *مسجد حکیم گوهر اعصار اسلامی*. سازمان عمران.

• نوایی، کامبیز.(۱۳۷۴).نکاتی پیرامون نقوش اسلامی. *صفه*، ۲ (۵)، ۴۴-۵۳. https://soffeh.sbu.ac.ir/article_100298.html

• هنرفر، لطف‌الله.(۱۳۵۰).*گنجینهٔ آثار تاریخی اصفهان*. دانشگاه اصفهان.

• Abdelsalam, M. & Ibrahim, M. (2018). Fractal Dimension of Islamic Architecture: The case of the Mameluke, Madrasas: Al-Sultan Hassan Madrasa. *Journal of Science, 32*(1), 27-37. https://dergipark.org.tr/en/pub/gujs/issue/43586/414947

• Aswathy, R.K. & Mathew, S. (2016). On different forms of self-similarity. *Journal of Chaos, Solitons & Fractals, 87,* 102-108. https://doi.org/10.1016/j.chaos.2016.03.021

• Barnsley, M. F. (2012). *Fractals Everywhere*. Dover Publications. https://books.google.com/books/about/Fractals_Everywhere.html?id=9nwoOLOMhRAC

• Blanco, P., Maduraga, S. & Isvoran, A. (2020). Fractal Dimension. In M. Putz (Ed.), *New Frontiers in Nanochemistry: Concepts, Theories, and Trends* (pp. 171-186). Apple Academic Press.

• Bovill, C. (1996). *Fractal Geometry in Architecture and Design (Design Science Collection)*. Birkhäuser.

• Eglash, R. (1999). *African Fractals Modern Computing and Indigenous Design*. Rutgers University Press.

• Falconer, K. (2014). Fractal *Geometry. Mathematical Foundations and Applications*. Wiley. https://books.google.com/books/about/Fractal_Geometry.html?id=XJN7AgAAQBAJ

• Frantz, M. & Crannell, A. (2011). *Viewpoints: Mathematical Perspective and Fractal Geometry in Art*. Princeton University Press. https://books.google.com/books?id= H85WUaD9f5cC& printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false

• Glass, M. (2011). *Dimension Of Self-Similar Fractals* [Unpublished master's thesis in Arts]. Graduate School of Arts and Sciences, Wake Forest University, Winston-Salem, North Carolina.

• Ismail Ismail Attia, D. (2020). The Fractal shapes in Islamic design & its effects on the occupiers of the interior environment (case study: El Sultan Hassan mosque in Cairo). *Journal of Architecture, Arts and Humanistic Sciences, 5*(1), 123-144. https://doi.org/10.21608/mjaf.2020.34245.1689

• Khamjane, A. & Benslimane, R. (2017). Golden Mean, Fractals and Islamic Geometric Patterns. *Frontiers in Science and Engineering International Journal, 7*(1), 5-15.

• Lin, R. & Kaplan, C. S. (2023). *Freeform Islamic Geometric Patterns*. Retrieved from arXiv:2301.01471v1,1-20.

• McClure, M., Frame, M., Mandelbrot, B. & Nial, N. (2022). *Fractal Geometry*. University of North Carolina, Yale University.

• Nayak, S. R. & Mishra, J. (2017). On Calculation of Fractal Dimension of Color Images. *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing, 9*(3), 33-40. http://dx.doi.org/10.5815/ijigsp.2017.03.04

• Peitgen, H. O. & Richter, H. (1986). *The beauty of fractals, Images of Complex Dynamical Systems.* Springer. https://books.google.com/books?id =xb20psn4KbUC&printsec= copyright#v=onepage&q&f=false

• Rezazade, H.(2020).Visual and Structural Analysis of Fractal Geometry in the Sheikh Lotfollah Mosque Ornaments (Isfahan- Iran). *International Journal of Architecture and Urban Development, 11*(39), 74-82. https://doi.org/10.30495/ijaud.2021.16769

• Webster, P. (2013). Fractal Islamic Geometric Patterns Based on Arrangements of {n/2} Stars. *The 5th Bridges Conference, Mathematics, Music, Art, Architecture, Culture, Enschede.*

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

COPYRIGHTS
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the Bagh-e Nazar Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

نحوهٔ ارجاع به این مقاله:

رئیسی، کیهانه؛ زکریایی کرمانی، ایمان؛ جوکار، جلیل و نجارپور، صمد. (۱۴۰۳). واکاوی هندسهٔ فرکتال در کاشی‌های منقش معقلی پشت‌بغل قوس ایوان شمالی مسجد حکیم. *باغ نظر*، ۲۱(۱۳۵)، ۵۱-۶۲.

DOI: 10.22034/BAGH.2024.442928.5562
URL: https://www.bagh-sj.com/article_201537.html