

ترجمه انگلیسی این مقاله نیز با عنوان:
Explanation of Fractal Geometry Laws in the Structural Form of Architecture,
Presentation of a Form-Based Architecture Model
در همین شماره مجله به چاپ رسیده است.

تبیین قوانین هندسه فراکتال در ساختار فرم معماری ارائه مدل پژوهشی معماری مبتنی بر فرم*

فرناز فرشید راد^۱، ایرج اعتصام^{۲*}، وحید قبادیان^۳

۱. دانشجوی دکتری تخصصی، گروه معماری، واحد امارات، دانشگاه آزاد اسلامی، دبی، امارات متحده عربی.
۲. استاد، گروه معماری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۳. استادیار، گروه معماری، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۲/۲۷ تاریخ اصلاح: ۹۸/۰۵/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۶/۱۴ تاریخ انتشار: ۹۹/۰۳/۰۱

چکیده

بیان مسئله: از منظر علوم نوین، علم فراکتال مطالعه در ساختارهای خودمتشابه و خودسازمان یافته است که معنا و مفهومی از هندسه طبیعت را بیان می کند. در دیدگاه ریاضیات، طبیعت در ایجاد صور مختلف از قوانین فراکتال تبعیت می کند که در این منطق، تعامل مستقیم بین معماری و فراکتال می تواند مطرح شود.

هدف پژوهش: این پژوهش، با طرح پرسش در مورد چگونگی کاربرد هندسه فراکتال، رویکردی در تبیین قوانین هندسه طبیعت در روند خودسازماندهی معماری مبتنی بر فرم دارد.

روش پژوهش: نوع پژوهش کاربردی است و با استفاده از روش همبستگی در کاربرد هندسه مطابق با خصوصیات فراکتال به صورت پدیدارشناسانه و کیفی انجام می شود. در این مطالعه، هفت مرحله در ساختار هندسه فراکتال به عنوان ساختار مبتنی بر فرم تبیین می گردد. این مراحل در فرم یابی، سلسله مراتب اتصالات و تصاعدهای هندسی روند معتبری را در کاربرد این هندسه در معماری فراهم می آورد. علاوه بر این، معماری که برگرفته از اصول هندسه طبیعت است، استوار بر سه قانون و کارکرد در ساختار است که در این پژوهش شرح داده می شوند: قانون خودمتشابهی، قانون خودسازماندهی و قانون وحدت. به منظور صحت این قوانین، سه بنا از دوره های گوتیک، آرت نوو و معماری سنتی ایران منطبق با خصوصیات فراکتال منتخب و قوانین هندسه طبیعت در ارزیابی آنها با استفاده از مدل تطبیقی-توصیفی مورد بررسی قرار می گیرد.

نتیجه گیری: بر اساس یافته های پژوهش می توان بیان کرد هندسه فراکتال در ساختار، ترکیب بندی عناصر و مفاهیم زیباشناسی هنر تزئینات در معماری این بناها به کار گرفته شده است. این عمارات با الهام گرفتن از هندسه طبیعت، قانون تناسب، ریتم و فرم های خودمتشابه گستره ای از الگوهای فراکتالی را ایجاد کرده اند که با دو بیان ساختار و فرم در معماری بین عناصر سازنده و صور معماری مناسبت های درونی و وحدت برونی ایجاد کرده اند.
واژگان کلیدی: خودمتشابهی، خودسازماندهی، کثرت در وحدت، ساختار فرم، هندسه فراکتال.

مقدمه و بیان مسئله

علم فراکتال دیدگاه نوینی در هندسه ساختارهای طبیعت است که توسط ریاضیدان فرانسوی بنوا مندلبرو، به عنوان هندسه واقعی

* این مقاله برگرفته از رساله دکتری فرناز فرشید راد با عنوان «تبیین کاربرد هندسه فراکتال در معماری» است که به راهنمایی دکتر ایرج اعتصام و مشاوره دکتر وحید قبادیان در تاریخ ۱۳۹۸/۱۰/۱۴ در دانشکده معماری دانشگاه آزاد اسلامی، واحد امارات ارائه شده است.

** نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۱۲۵۶۳۴۴، Irajettesam@yahoo.com

از طبیعت کشف و مطرح شد. مندلبرو در این نظریه عنوان کرد جهان هستی ابعادی فراکتالی دارد و ساختارهای طبیعی دارای خصوصیات فراکتال هستند (Mandelbrot, 1983). ایده او در دیدگاه ریاضیات بیان می کند که طبیعت برای ایجاد صور مختلف تابع هندسه غیرخطی و قوانین فراکتال می باشد. در مطابقت با خصوصیت خودمتشابهی و خودسازماندهی در فراکتال می توان مطرح کرد هندسه فراکتال پارادایم نوینی است که مهم ترین

نظریات پایه، آلبرت انیشتین در قوانین مربوط به جهان شناختی به انتظام حاکم بر جهان هستی معتقد بود و در راستای اعتقاد انیشتین، ریاضیدان فرانسوی آنری پوانکاره مسیر جدیدی را در نظم ریاضیات کیهان مطرح کرد که موجب پایه‌گذاری نظریه کیاس شد. به این ترتیب محققان علوم جهان‌شناختی علوم مرتبط با فلسفه هستی‌شناسی را در سیستم‌های کیاس مطرح کردند که نظم را در بی‌نظمی نشان می‌دهد. آنچه در نظریه کیاس مطرح شد نظام پویا و پیشرفته‌ای را مد نظر قرار داد که مرتبه بالایی از سازماندهی را در سیستم‌های طبیعت نشان می‌دهد. «توازن بین نظم و بی‌نظمی موجود در نظریه کیاس می‌تواند راه حل مناسبی برای پایداری فضاهای معماری باشد» (اشرفی، ۱۳۹۵).

در این سیستم‌ها، انتظام طبیعت از الگوهای هندسه فراکتال ناشی می‌شود که قوانین هندسه‌مداری را در ساختار پدیده‌های طبیعت نشان می‌دهد. در این راستا، مندلیبرو ماهیت فراکتال را با هندسه غیرخطی در فرم و ساختار انطباق می‌دهد که تشابه، تداوم، ریتم و هماهنگی مهم‌ترین شاخص‌های آن در نظر گرفته می‌شوند (Mandelbrot, 1983). به عبارتی الگوهای هندسی فراکتال رهیافتی نوین در ادراک نظام طبیعت در فلسفه هستی‌شناسی مدرن هستند. در راستای ادراک نظام طبیعت معمارانی چون راسکین (Ruskin, 1857)، آلبرتی (Alberti, 1987) و آنتونی گائودی در به‌کارگیری قانون تناسب، فرم‌های طبیعت و ساختارهای مشابه به خود پیشگام هستند که توأمان پایداری سازه‌ای، کارکرد و زیباشناسی برگرفته از ساختارهای طبیعت را در معماری ایجاد کرده‌اند. در پژوهش‌های دهه‌های اخیر پیرامون کاربرد هندسه فراکتال گروه دیگری از معماران و صاحب‌نظران چون بوویل (Bovill, 2000)، کرامپتون (Crompton, 2004)، سالا (Sala, 2006)، جوی (Joye, 2007)، حقانی (Haghani, 2009) و رمزی (Ramzy, 2015) ایده فراکتال را در ساختار، ترکیب‌بندی عناصر و هنر تزئینات در بناهای دوره گوتیک مورد مطالعه قرار داده‌اند. این گروه انشعابات فراکتالی را در سرستون‌ها، تداوم خودسازماندهی را در مراتب اتصالات، هندسه مشابه به خود را در هنر تزئینات و ایجاد ریتم را در ساختار فرم، ترکیبی از فرایند فراکتال در این بناها معرفی کرده‌اند. همچنین در نظریاتی همگرا با دو گروه اول، تعداد دیگری از معماران چون جنکز (Jencks, 1997; 2002; 2011)، موسوی (Moussavi, 2009) و (نقره‌کار، ۱۳۹۲) معماری سیستمی و سامانه‌ای را از منظر فراکتالی مورد مطالعه قرار داده‌اند. از نظر این گروه، معماری فراکتالی تفسیر هنری از واقعیت فیزیکی جهان هستی را ارائه می‌دهد که براساس سیستم‌های خلاق و خودسازمانده، ارتباط دقیقی بین الزامات فنی و مفاهیم زیباشناسی در معماری برقرار می‌کند. جنکز عنوان می‌کند «تصور انسان از ساختار جهان در معماری منعکس می‌شود» (رحمانی، اعتصام و مختاباد امرئی، ۱۳۹۶) و «فرم در معماری تابع جهان‌بینی است» (Jencks, 1997). در بیان فرم، موسوی به معماری فرارکار کردی براساس سیستم‌های طبیعت معتقد است. او فرم را تابعی خاص

پتانسیل آن خلق ساختارهای مبتنی بر فرم است که در این راستا رابطه‌ای مستقیم بین معماری و فراکتال می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. در حالی که معماران و اندیشمندان نظریه‌هایی را در بیان فراکتال‌ها و الگوهای آن عنوان کرده‌اند لیکن تبیین جامع از اصالت هندسه طبیعت و تدوین قوانین آن در معماری با نگرش بر ساختار و خصوصیات فراکتال مد نظر این پژوهش قرار گرفته است. در این مطالعه سؤالاتی مطرح می‌شود درمورد اینکه کاربرد هندسه طبیعت در روند سازماندهی ساختار فرم معماری چگونه می‌تواند باشد و کارکرد هندسه فراکتال در ترکیب‌بندی عناصر اصلی معماری، سلسله‌مراتب اتصالات و مفاهیم زیباشناسی هنر تزئینات در معماری چگونه تبیین می‌شود. اهداف اصلی این تحقیق عبارت است از:

۱. کشف و ارائه ایده ساختار در معماری با بررسی ساختار هندسی فراکتال؛
 ۲. توصیف چگونگی ترکیب‌بندی عناصر و سلسله‌مراتب اتصالات در آفرینش فضاهای معماری با مطالعه در کارکردهای فراکتال؛
 ۳. ارزیابی کیفیت فراکتالی هنر تزئینات در معماری بر مبنای الگوهای جامع فراکتال.
- به علاوه، این تحقیق اصول کاربردی را در سیستم‌های مهندسی طبیعت‌گرایانه توصیف می‌کند که می‌تواند روش علمی-کاربردی را در ارتقای کیفیت معماری ارائه دهد.

فرضیه‌های پژوهش

فرضیه ۱: به منظور پاسخ به پرسش اول درمورد چگونگی کاربرد هندسه فراکتال در ساختار فرم معماری، این مهم با بررسی در ساختار نمونه پژوهش از نوع درختان همیشه سبز صورت می‌گیرد. در این بررسی که با مطالعه در مقاطع مختلف طولی و عرضی از نمونه انجام می‌گیرد، مراحل هندسه‌مدار در روند خودسازماندهی ساختار فراکتال اقتباس و کاربرد هندسه خطی و غیرخطی در ساختار نمونه تبیین می‌شود. استفاده از این روش می‌تواند خودسازماندهی ساختارهای طبیعت را توصیف و امکان به‌کارگیری فرم‌های فراکتال را در معماری فراهم آورد.

فرضیه ۲: در امتداد پاسخ به پرسش دوم، پژوهش عنوان می‌کند که کارکرد هندسه فراکتال در ترکیب‌بندی عناصر اصلی، سلسله‌مراتب اتصالات و مفاهیم زیباشناسی در مراتب مختلف ترکیب براساس قوانین هندسه فراکتال است. این قوانین برگرفته از روند خودسازماندهی ساختار فراکتال در فرضیه ۱ تدوین می‌شوند تا در کیفیت فراکتالی بناهای منتخب پژوهش ارزیابی شوند.

پیشینه پژوهش

در پدیدارشناسی هندسه طبیعت و فراکتال، دیدگاه مبتنی بر فلسفه هستی‌شناسی مطرح می‌شود که مؤلفه‌ها و متغیرهایی از علوم جهان‌شناختی نوین در آن اثر گذارده و نهایتاً جلوه‌های بصری و کاربردهای متنوعی را در معماری پدیدار می‌کند. در

پایداری می‌کند (نقره‌کار، ۱۳۹۲) بنابراین به‌جای خط مستقیم به انحنا می‌رود تا به‌صورتی سازمان‌یافته خود را در فرم و کارکرد هماهنگ کند. انشعاب‌ها و سازماندهی متعادل آنها در ایجاد اتصالات ساختار اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد. دو اصل «تداوم» و «انسجام» از ماهیت‌های اصلی سامانه کارکردی است که تعامل لازم را در برقراری سلسله‌مراتب اتصالات ایجاد می‌کند. در اصل تداوم، طبیعت با تولید عناصر شبیه به خود و ایجاد ریتم در فرایند تکامل به عالی‌ترین وجه پاسخگوی سیستم سازماندهی ساختار می‌شود. «الگوهای جدید نظم با فرایندهای نوزای تحولی و خودسازمان‌یافتگی سازگار است» (تقوایی، ۱۳۹۱). در اصل انسجام طبیعت از کارکردهای هندسه غیرخطی سهمی‌ها و هذلولی‌ها در ایجاد پیوستگی‌های ساختاری استفاده می‌کند.

- سامانه کالبدی

سامانه کالبدی قانون تناسب و مطابقت اجزا در وحدت و نظام آن است. سامانه‌های طبیعی دارای خصوصیت وحدت در کثرت هستند، بدین معنی که کثیری از عناصر در یک هماهنگی و وحدت را حفظ می‌کنند (نقره‌کار، ۱۳۹۲). اصل «هماهنگی و یگانگی» ماهیت مهم در سامانه کالبدی است به طریقی که در یک هماهنگی، ساختارهای طبیعت به سمت یگانگی رفتن و دوباره از آن منشعب‌شدن را نمایش می‌دهند. مندلبرو در بررسی الگوهای هندسه طبیعت به اصل مهم تکرار همگون از جزء تا کل اشاره می‌کند، به‌گونه‌ای که کل با جزء بسیار همانند است و هر مجموعه از ترکیب اجزا هماهنگ با کل ساخته می‌شود (Mandelbrot, 1983).

• خصوصیات ساختار هندسه طبیعت و فراکتال

- عناصر خودمتمشابه

به لحاظ تاریخی می‌توان بیان کرد که نظریه‌های معماری در آثار پیشینیان عمدتاً برگرفته از الهام در طبیعت است. جان راسکین، فیلسوف و متفکر زیباشناسی، اولین کسی است که ساختارهای مشابه به خود را مصور و توصیف کرد (تصویر ۱-الف). راسکین از فرم‌های طبیعت قدردانی و معماران را تشویق می‌کرد تا قوانین آن را در کار خود به‌کار گیرند. در نظر او تداوم در طبیعت نتیجه توالی اشکال مشابه است و بیان می‌کند «روش مهم و خوشایند بیان یگانگی ایجاد مراتب در شماری از عناصری است که کمتر یا بیشتر مشابه هستند. این توالی زمانی که آنها با برخی از تغییرات تدریجی در ماهیت عناصر همراه می‌شوند جالب‌تر به‌نظر می‌آید» (Ruskin, 1857, 259).

مندلبرو عنوان می‌کند پدیده‌های طبیعی دارای خصوصیات و الگوهای فراکتالی هستند. یک فراکتال به لحاظ هندسی فرمی ترکیبی و مشابه به خود است که در آن انتظام واحدی وجود دارد. به‌عنوان نمونه درخت فراکتال مندلبرو (تصویر ۱-ب) ساختاری است متشکل از اجزایی که با بزرگ کردن هر جزء به نسبت معین همان ساختار اولیه به‌دست می‌آید. به‌عبارتی دیگر، فراکتال ساختاری است که هر جزء از آن با کل همانند و خودمتمشابه است (Mandelbrot, 1983).

در نظر می‌گیرد که متغیرهای متفاوتی از انتظام طبیعت، ریاضیات و هماهنگی در آن اثر می‌گذارد و کارکردهای نوینی را در معماری روایت می‌کند (Moussavi, 2009). اگرچه این نظریه‌پردازان و معماران جنبه‌های مختلف از به‌کارگیری هندسه طبیعت و الگوهای فراکتال را در معماری مطرح کرده‌اند، لیکن چگونگی کاربرد استفاده از هندسه فراکتال را در معماری ارائه نداده‌اند. این پژوهش مراحل هندسه‌مدار ساختار فراکتال را تبیین و قوانین جامع و کاربردی این سیستم پایدار را در ساختار و فرم معماری تدوین کرده است.

مبانی نظری پژوهش

• ادراک نظام طبیعت و هندسه فراکتال

یکی از کامل‌ترین نگرش‌ها در کاربرد هندسه طبیعت و فراکتال در معماری روش سیستمی و سامانه‌ای است. در این منطق، خصوصیات هندسه فراکتال با رویکردی در فرایند رشد، تکامل و اصول حاکم بر آن از منظر سامانه‌ای و همبستگی بررسی می‌شود. هدف اصلی این نگرش شناخت قوانین طبیعت و بهره‌گیری از راهبردهای هندسه فراکتال در ساختار و فرم معماری است. در این راستا، خصوصیات فراکتال در سه زیرسامانه بنیادی مورد بررسی قرار می‌گیرند:

۱. سامانه ساختاری با تأکید بر جنبه‌های پایداری؛

۲. سامانه کارکردی با تأکید بر جنبه‌های سازه‌ای؛

۳. سامانه کالبدی با تأکید بر جنبه‌های وحدت‌دهنده اجزا.

- سامانه ساختاری

سامانه ساختاری کنش‌های استحکامی در ساختار طبیعت است که با تبدلات هندسی در عناصر اصلی صورت می‌پذیرد تا به‌عنوان واسطه مهمی در چگونگی رابطه فرم و کارکرد قرار گیرد. این سطح از هماهنگی بین ساختار و فرم جهت انطباق آن برای اهداف پایداری ایجاد می‌شود (نقره‌کار، ۱۳۹۲). دو اصل «اتصال» و «انشعاب» از ماهیت‌های مهم سامانه ساختاری هستند. در اصل اتصال، طبیعت از یک عنصر واسطه جهت ایجاد اتصالات استفاده می‌کند تا به بهترین نحو پاسخگوی نظام ساختاری در مرحله بعد شود. در اصل انشعاب یا جهش، ظهور متعالی‌تری از هوشمندی و هدفمندی در یک حرکت تکاملی به‌وجود می‌آید (همان). جهان زاینده و متحول است «که همواره در حال خلق هدف‌های متغیر و در معرض نوعی کیفیت متمایز آنی قرار دارد» (تقوایی، ۱۳۹۱). جنکز عنوان می‌کند نظم‌های جهش‌پذیر، آنی و غیرخطی روایت جدیدی را در معماری بر مبنای فرم‌های فراکتالی با نظام غیرخطی مطرح می‌کنند که با خودهماندی در ساختار همراه هستند (Jencks, 2011).

- سامانه کارکردی

سامانه کارکردی کنش‌های طبیعت در ایجاد مراتب اتصالات، شیوه بارگذاری و رفتار به‌هنگام سازه‌ای در ساختار است. هر درخت فرم بدنه و شاخه‌ها را در مقاومت نسبت به نیروهای محیطی پیدا می‌کند و در برابر نیروهای فشاری و کششی

معماری تولید استعاره‌های وحدت‌دهنده اجزاست» (مرجویی، شاهدی، پیراوی ونک و قاسمی سیچانی، ۱۳۹۷).

کاربرد خصوصیات فراکتال از منظر معماری مبتنی بر فرم

• عناصر اصلی و سازه‌ای

اصلی‌ترین خصوصیت فراکتال ایجاد عناصر خودمتشابه و انشعاب‌ها در روند فرم‌بخشی به ساختار است که کاربرد آن در معماری با عناصر اصلی داخلی و سازه‌ای بنا مطابقت دارد (Ramzy, 2015). در این راستا، معماران دوره گوتیک با به‌کارگیری انواع «عناصر پشتیبان» و «قوس‌های متقاطع» ساختار بنا را ایجاد می‌کردند. آنها با تأکید هندسی در استفاده از انشعابات (تصاویر ۲-الف و ۲-ب) جهت افزایش ارتفاع، وزن ساختمان را بر این‌گونه حائل‌ها انتقال می‌دادند و دیوارها را مصور با شیشه‌های رنگی در بیان روایت‌های دینی استفاده می‌کردند. به این ترتیب روشنایی و رنگ همراه با عناصر عمودی بلند تصویری از بهشت و جهان دیگر را نمایانده است (Haghani, 2009). در معماری آرت‌نوو گونه‌های دیگر از به‌کارگیری انشعابات اجرا شده است. به‌عنوان نمونه در ساختمان ماسیا فرکسا انشعابات طبیعت‌گرایانه در ساختار ستون‌ها (تصویر ۲-ج) جهت انتقال مناسب نیروهای سازه‌ای در بنا ایجاد شده است. اگرچه معماری فرکتالی سبک نوینی به‌نظر می‌رسد، شیوه‌های طبیعت‌گرایانه در آثار اصیل معماری ایران بیانگر استفاده از هندسه ساختارهای طبیعت در معماری است. در تناظر عناصر معماری عمارت عالی قاپو با ساختار فراکتال (تصاویر ۲-د و ۲-ه) خصوصیت خودمتمشابهی در ساختار سرستون‌ها و مراتب اتصالات ایجاد شده است. انشعابات طبیعت‌گرایانه به‌صورت حائل‌های داخلی جهت انتقال نیروهای سازه‌ای در این عمارت در نظر گرفته شده است. بوییل عنوان می‌کند طبیعت دارای ساختار سازمان‌یافته است و دانش هندسه فراکتال دیدگاه فراتری را برای بیان ساختارهای طبیعت در معماری فراهم می‌آورد (Bovill, 2000).

• ترکیب‌بندی عناصر و کاربرد هنر تزئینات

سلسله‌مراتب اتصالات و تصاعدهای هندسی عامل بنیادی در سازماندهی ساختار فراکتال هستند. تداوم در برقراری مراتب اتصالات و استفاده از هنر تزئینات مهم‌ترین کاربرد را در ایجاد فضای معماری دارد. معماری سازماندهی فضا است و ساختار طبیعت به‌عنوان ایده‌ای کارآمد در ترکیب‌بندی، انتظام حرکت نیروهای سازه‌ای و مفاهیم زیباشناسی در معماری در نظر گرفته می‌شود. در این راستا، رمزی (Ramzy, 2015) ترکیب‌بندی و گسترش هندسی هنر تزئینات را در ساختار کلیسای ژرونیوموس (تصویر ۳-الف) با هندسه فراکتال مورد مطالعه قرار داده است. او عنوان می‌کند برای معماران گوتیک، ایده نظم در به‌کارگیری هندسه طبیعت به‌عنوان نخستین قانون بهشت در ایجاد فضای کلیسا مطرح بوده است. در مطابقت هندسه فراکتال با فضای هایپربولیک (تصویر ۳-ب) کرامپتون بیان می‌کند فضای

(1983). در تناظر با خصوصیت خودمتمشابهی در فراکتال با شیوه به‌کارگیری هندسه ایرانی در ساختار یزدی‌بندی (تصویر ۱-ج) می‌توان بیان کرد خودمتمشابهی در تناسبات و در مقیاس‌های مختلف در این نوع ساختار ایجاد شده است. الگوهای هندسه ایرانی از اصل تبادل هندسی استفاده می‌کنند که در آن عناصر خودمتمشابه به اجزای متناسبی از خود تبدیل می‌شوند تا سلسله‌مراتب هندسی را از اتصالات و انشعابات در ساختار ایجاد کنند.

- مراتب اتصالات

آنتونی گائودی، معمار اسپانیایی، پیشگام در استفاده از فرم‌های طبیعی و به‌کارگیری مراتب اتصالات در معماری است. در نظر گائودی خط مستقیم در طبیعت وجود ندارد، بنابراین او از هندسه غیرخطی به‌عنوان مرجع اصلی هندسه مرتبط با معماری در کار خود استفاده می‌کند و بیان می‌کند طبیعت ساختارهای فوق‌العاده‌ای را تولید می‌کند که نیاز به درک و فهم آن ساختار برای یک طراح وجود دارد. گائودی با مطالعه در اشکال طبیعی کارکرد سهمی‌ها و هذلولی‌ها را به طراحی وارد می‌کند و از تداوم سلسله‌مراتب اتصالات (تصویر ۱-د) در ترکیب‌بندی و ایجاد ساختارهای منحنی بهره می‌گیرد (Pantano, 2013). فراکتال‌ها متداوم هستند و در درجات مختلف تکرار می‌شوند تا سلسله‌مراتب منطقی‌ای را در صورت و ساختار ایجاد کنند. در الگوهای فراکتال مندلیبرو ترتیبات سلسله‌مراتب (تصویر ۱-ه) در خودسازماندهی مهم‌ترین خصوصیت آنها به‌شمار می‌آید، به‌گونه‌ای که خود را منطبق، هماهنگ و متکامل می‌کنند (Mandelbrot, 1983, 189). در این دیدگاه در معماری سنتی ایران، سلسله‌مراتب به بالاترین درجه کمال برقرار است به نحوی که عناصر معماری، در یک هماهنگی هدفمند، پیوستگی‌های ساختاری ایجاد می‌کنند (تصویر ۱-و) انتظام مراتب اتصالات در معماری ایران را نشان می‌دهد.

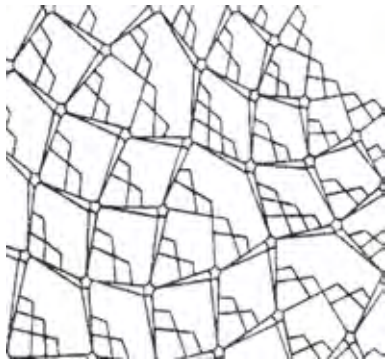
- کثرت در وحدت

لئون باتیستا آلبرتی، فیلسوف ایتالیایی، معتقد است زیبایی مطابقت اجزای تشکیل‌دهنده با قانون طبیعت و الگوهای آن است. وحدت در ترکیباتی استنباط می‌شود که خودسازمانده و متکامل هستند و تناسبات به بهترین نحو در آنها وجود دارد (Alberti, 1987). در نظر آلبرتی ترکیب‌بندی قانون تناسبات و مطابقت اجزا در وحدت و نظام آن است (تصویر ۱-ز) اصول ترکیب‌بندی او را در معماری باسیلیکا سنت ماریانو لا نشان می‌دهد. فراکتال‌ها را می‌توان با یک کالبد نهایی تعریف کرد که در آن تکثر، تداوم و ریتم عناصر هماهنگ با کالبد به وحدت می‌رسند. بنابراین وحدت در مجموعه مندلیبرو (تصویر ۱-ح) عامل اصلی هماهنگی سلسله‌مراتب اتصالات در الگوهای فراکتالی است. تصویر ۱-ط سازماندهی آرایه‌های مسجد نصیرالملک را در تناظر با وحدت در مجموعه مندلیبرو نشان می‌دهد. در این مسجد مفهوم وحدت در ترکیبی هماهنگ از انواع آرایه‌ها ایجاد شده است. بنابراین می‌توان عنوان کرد «یکی از مهم‌ترین قابلیت‌های

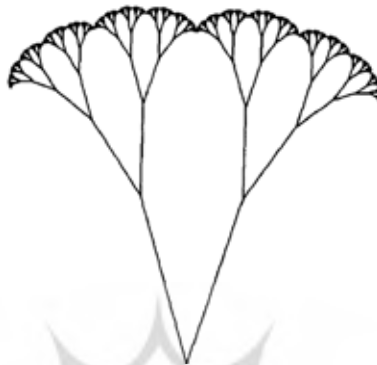
پیشرفت‌های شگرفی در ریاضیات و هندسه داشته‌اند» (محمدیان منصور و فرامرزی، ۱۳۹۱). با بررسی هندسه آرایه داخلی خانه بروجردی‌ها در کاشان می‌توان عنوان کرد که معمار ایرانی همواره یکی از مهم‌ترین منابع الهام خویش را طبیعت قرار داده و در مراتب اتصالات از هندسه انتزاعی طبیعت استفاده کرده است. تصویر ۳-ج تناظر آرایه داخلی خانه بروجردی‌ها را با ویژگی هندسه طبیعت در تولید گسترش هندسی متمرکز به مرکز نشان می‌دهد.

هایپربولیک در ابعاد هندسه فراکتال به وجود می‌آید و نوعی از محیط‌های متکامل و بهشت‌گونه‌ای را در هندسه و ساختار ایجاد می‌کند (Crompton, 2004).

در این دیدگاه، کاربردی برجسته‌ترین نوع استفاده از تصاویر هندسی در معماری ایران است. «مطالعاتی که سال‌های اخیر روی رابطه میان ریاضیات و هندسه و هنر ایرانی صورت گرفته است حاکی از آن است که هنرمندان ایرانی در قرون میانی



ج) ساختار یزدی‌بندی.
مأخذ: رئیس‌زاده و مفید، ۱۳۹۳: ۴۵.



ب) درخت فراکتال.
مأخذ: Mandelbrot, 1983: 155.



الف) ساختار مشابه به خود.
مأخذ: Ruskin, 1857: 124.



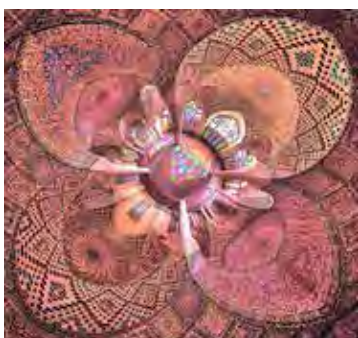
و) مراتب اتصالات در معماری ایران.
مأخذ: رئیس‌زاده و مفید، ۱۳۹۳، ۲۲۵.



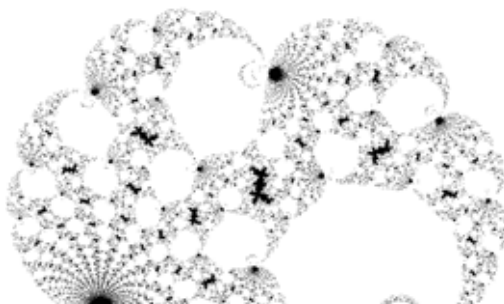
ه) سلسله‌مراتب در الگوی فراکتال.
مأخذ: Mandelbrot, 1983, 189.



د) مراتب اتصالات در معماری گائودی.
مأخذ: <https://sagradafamilia.org>



ط) سازماندهی در آرایه‌های مسجد نصیرالملک.
مأخذ: www.kindiran.com



ح) وحدت در مجموعه مندلبرو.
مأخذ: Mandelbrot, 1983, 190.



ز) اصول ترکیب‌بندی در معماری آلبرتی.
مأخذ: www.archdaily.com

تصویر ۱. خصوصیات ساختار و فرم فراکتال.

• ساختار فرم

پیشرفت مراحل خودمتمشابهی، ایجاد ریتم در مراتب اتصالات و ترکیب الگوی جامع در ساختار و فرم می‌تواند یک فرایند فراکتالی در معماری باشد. در این سازماندهی عناصر در ایجاد ریتم و پویایی رابطه منطقی با فرم اصلی دارند به گونه‌ای که ساختار در ماهیت دارای کارکردهای فراکتال است (Jencks, 2002). در این راستا، سالا معماری گوتیک را با نمونه فراکتالی مطابقت می‌دهد. تصویر ۴-الف تکرار هندسه متشابه در برج‌های کلیسا، قوس‌ها و پنجره‌ها فرایند فراکتالی را در ساختار و فرم معماری گوتیک نشان می‌دهد، به‌ویژه هنگامی که با ریتم و کارکرد عناصر پشتیبان ترکیب شده است (Sala, 2006). ساختمان‌های گوتیک دیدگاه فراکتالی را در ساختار و فرم خود ایجاد کرده‌اند، به‌نحوی که با تکثیر و تنوع در هندسه خودمتمشابه، در آنها جزئیات ایجاد می‌شود. الگوی جامع در عناصر داخلی

و ساختار فرم خارجی ترکیب می‌شود و ریتم‌ها برگرفته از این الگو در پنجره‌ها امتداد می‌یابد (Joye, 2007, 177). در عناصر معماری و آرایه‌های کلیسای جامع لینکلن و کلیسای جامع کلن (تصویر ۴-ب) قوس‌ها در تناسبات گسترش می‌یابد تا در بالای پنجره‌ها و در سلسله مراتب اتصالات در ساختار خارجی به کار گرفته شوند. در این بررسی لورنز عنوان می‌کند در ساختار کلیسا در ترکیب بندی عناصر، مفهوم فراکتال وجود دارد. نظام پایه گذاری شده در ایجاد انشعاب‌ها در بسط عناصر عمودی چه به فرم «شکل Y» و یا «قوس‌های متقاطع» در تمام مقیاس‌ها در ستون‌ها، طاق‌ها و برج‌های کلیسا در عناصر داخلی و فرم خارجی بنا غالب است (Haghani, 2009).

در معماری آرت‌نوو (تصویر ۴-ج) تکرار برج‌ها و عناصر معماری مراحل خودمتمشابهی را در ساختار کلیسای مونت‌فری ایجاد کرده است. استفاده از سهمی‌ها و هذلولی‌های متشابه علاوه بر ایجاد



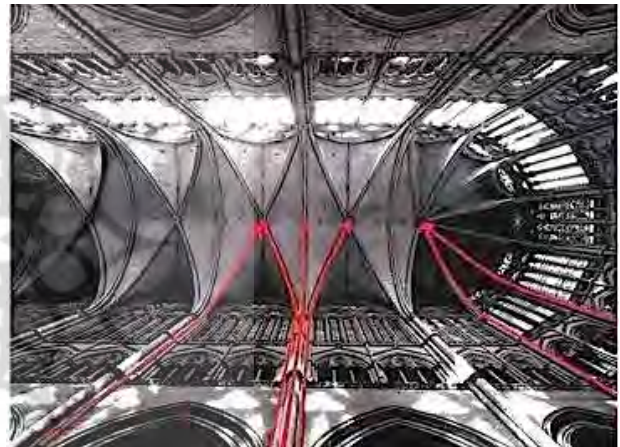
ج) انشعابات طبیعت‌گرایانه در ساختار ستون‌ها، ماسیا فرکسا. مأخذ: www.catalunya.com



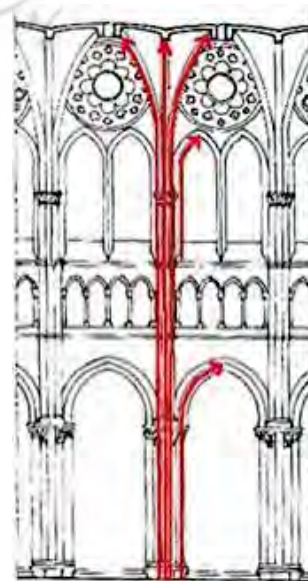
د) عناصر معماری عمارت عالی قاپو در تناظر با ساختار فراکتال. مأخذ: نگارندگان.



ه) ساختار فراکتال. مأخذ: Ramzy, 2015.



الف) استفاده از انشعابات، کلیسای شارتر. مأخذ: Haghani, 2009, 30.



ب) کلیسای آمیان. مأخذ: Haghani, 2009, 30. تصویر ۲. عناصر اصلی و سازه‌ای.

معماری و مفاهیم زیباشناسی هنر تزئینات به کار گرفته شده است. بناها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند تا تنوع و کیفیت لازم را جهت نتایج تعمیم‌پذیر در معماری فراهم آورد.

مفاهیم پژوهش

این مطالعه خصوصیات فراکتال را به عنوان مفاهیم پژوهش توصیف و مبنای تحقیق قرار می‌دهد. پس از تبدیل خصوصیات به مفاهیم و شاخص‌ها (جدول ۱) روش همبستگی در کاربردهای هندسه خطی و غیرخطی می‌تواند سلسله‌مراتب منطقی‌ای را در ایجاد ساختارهای مبتنی بر فرم تبیین کند.

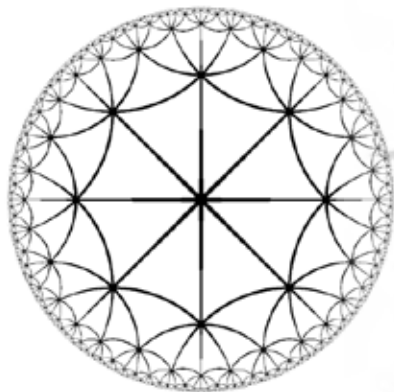
نمونه پژوهش

گستره‌ای از پدیده‌ها در طبیعت مانند ابرها، کوه‌ها، رودها، درختان همیشه سبز و مانند آنها ساختارهای مشابه به خود و فرم‌های فراکتالی را ایجاد کرده‌اند که تشابه، تداوم، ریتم و هماهنگی مهم‌ترین شاخص‌های آنها است. نمونه پژوهش برگرفته از این

ریتم مناسب در ساختار فرم این کلیسا کارکرد انتقال نیروهای سازه‌ای را همانند «عناصر پشتیبان» دوره گوتیک بر عهده دارند.

روش انجام پژوهش

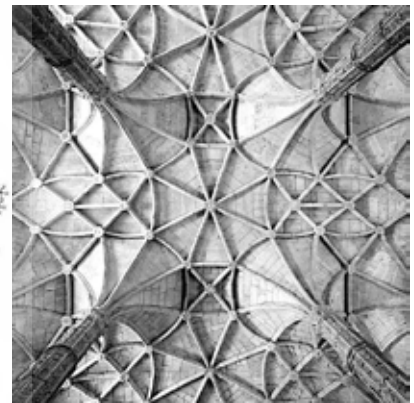
این پژوهش که به صورت تطبیقی-توصیفی است رویکردی در تبیین قوانین هندسه فراکتال در روند سازماندهی ساختارهای مبتنی بر فرم در معماری را دارد. فرایند بررسی در این مطالعه اقتباس و استنتاج ارکان و قوانین جامع در ساختار فراکتال است که با بررسی ساختار نمونه و کاربردهای هندسه خطی و غیرخطی مورد پژوهش قرار گرفته است. روش تحقیق به دلیل نمایش میزان ارتباط منطقی میان مفاهیم پژوهش در بررسی نمونه همبستگی است. در راستای دستیابی به نتایج تحقیق مطالعات موردی در ارزیابی کیفیت فراکتالی معماری مد نظر قرار گرفته است. جامعه مورد بررسی بناهایی منتخب از دوره‌های گوتیک، آرت‌نوو و معماری سنتی ایران را شامل می‌شود که در آن هندسه طبیعت به عنوان ایده‌های کارآمد در ساختار، ترکیب‌بندی عناصر



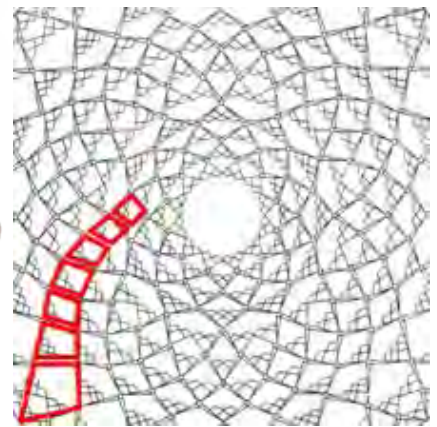
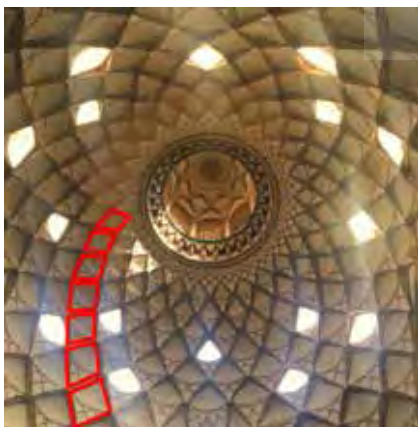
(ب)



(الف)

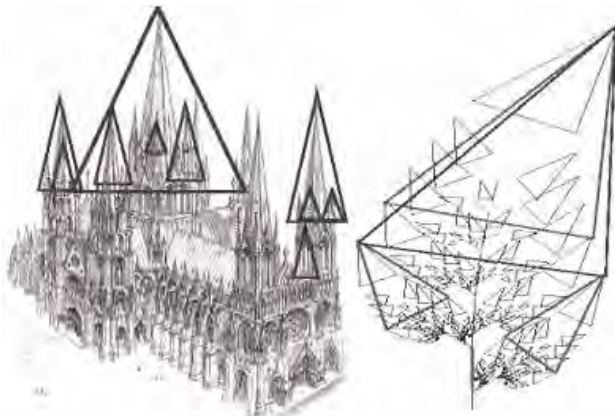


الف) ساختار هندسی کلیسای ژرونیموس در مطابقت با هندسه فراکتال. مأخذ: Ramzy, 2015.
 ب) هندسه فضای هایپربولیک. مأخذ: https://en.wikipedia.org/wiki/Order-8_triangular_tiling



(ج)

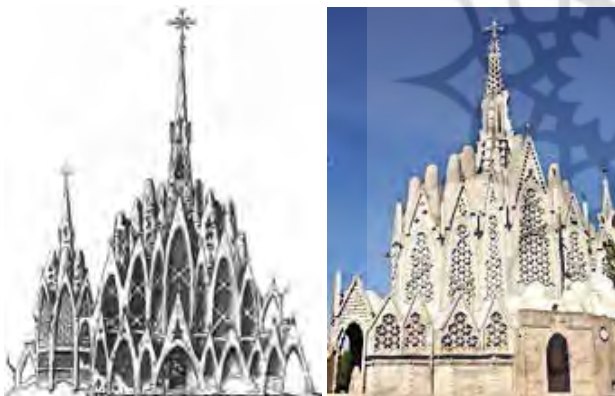
ج) آرایه داخلی خانه بروجردی‌ها در تناظر با گسترش هندسی متمرکز به مرکز. مأخذ: نگارندگان.
 تصویر ۳. ترکیب‌بندی عناصر و به کارگیری هنر تزئینات.



الف) مطابقت معماری گوتیک با نمونه فراکتالی. مأخذ: Sala, 2006.



ب) آرایه‌های کلیسای جامع لینکلن (a و b) و کلیسای جامع کلن (c و d). مأخذ: Haghani, 2009, 140.

ج) تکرار برج‌ها و عناصر معماری کلیسای مونت‌فری. مأخذ: Flores, 1999. <https://commons.wikimedia.org>

تصویر ۴. ساختار فرم.

ایجاد یک روند تبدیل مقاطع از چندضلعی تا ستاره که به صورت دوار در بالا تبدیل به یک دایره می‌شود انجام گرفته است، قطر و روند تبدیل مقاطع با توجه به میزان بار بر ستون‌ها در نظر گرفته شده است. سپس اتصال یابی با سرستون‌های بیضوی، جایی که ستون‌ها به انشعابات تقسیم می‌شوند، ایجاد شده است. انشعاب‌ها برای ایجاد سلسله‌مراتب اتصالات در درجات مختلف انتظام یافته‌اند. در این شیوه بارگذاری گائودی پیشگام در به کارگیری از فرم‌های طبیعت است. یارنال (Yarnall, 2010) عناصر اصلی معماری گائودی را ترسیم و با ساختارهای طبیعت در سازه و فرم مطابقت می‌دهد. با توجه به این مطابقت، می‌توان بیان کرد گائودی با تغییر سیستم انتقال بارهای ساختمان و تغییر وضعیت «عناصر پشتیبان» دوره گوتیک به «سرستون‌های انشعابی»

گستره از نوع درختان همیشه‌سبز^۱ انتخاب شده تا کیفیت لازم را جهت دستیابی به نتایج تعمیم‌پذیر در بررسی مطالعات موردی تحقیق فراهم آورد. در این بررسی با مطالعه در مقاطع مختلف طولی و عرضی از نمونه، هفت مرحله در روند خودسازماندهی ساختار فراکتال اقتباس و کاربرد هندسه خطی و غیر خطی در ساختار نمونه تبیین می‌شود (جدول ۲).

یافته‌های پژوهش

بر مبنای مطالعه نمونه منتخب پژوهش (جدول ۲) می‌توان بیان کرد که فراکتال‌ها از قوانین ریاضی و هندسی تبعیت می‌کنند تا در شکل‌گیری، سلسله‌مراتب اتصالات و گسترش‌های هندسی ساختار خود را سازماندهی کنند. این مطالعه روش همبستگی هفت مرحله‌ای، شامل دوران، تبدیل، اتصال، انشعاب، سلسله‌مراتب اتصالات، تصاعدهای هندسی و وحدت، را در ایجاد ساختار مبتنی بر فرم فراکتال تبیین می‌کند. شکل‌گیری فراکتال‌ها عمدتاً با بروز سه قانون اصلی خودمتمشابهی، خودسازماندهی و وحدت در ساختار همراه است. قوانین فراکتال فرایند معماری مبتنی بر فرم را تبیین می‌کند که در ادامه مدل پژوهشی^۲ آن ارائه و در ارزیابی کیفیت فراکتالی بناهای منتخب استفاده می‌شود (تصویر ۵).

بحث

به منظور صحت کاربرد قوانین فراکتال در معماری، کلیسای سنت باربارا، باسیلیکا ساگرادا فامیلیا و مسجد نصیرالملک مورد بررسی قرار می‌گیرند. قوانین موجود در هندسه فراکتال، یک روش علمی-کاربردی را در ارزیابی بناهای منتخب فراهم می‌آورد.

• قانون خودمتمشابهی

قانون خودمتمشابهی در فراکتال «دوران» پویایی را ایجاد می‌کند که با «تبدیل» در ماهیت هندسی عناصر اصلی همراه است و عناصر در حالی که تغییر فرم و ابعاد می‌دهند استحکام می‌یابند. این تبدیلات تابع قوانین ریاضی موجود، در هندسه طبیعت، «اتصال» و «انشعاب» را ایجاد می‌کنند تا ساختار مشابه به خود را تولید کنند. طبق قانون خودمتمشابهی، فراکتال ساختاری شبیه به خود را در درجات مختلف به وجود می‌آورد تا سلسله‌مراتب اتصالات را در مرحله بعد انتظام بخشد. تصویر ۶ روند شکل‌گیری ستون‌های پایدار را مطابق با قانون خودمتمشابهی در کلیسای سنت باربارا، باسیلیکا ساگرادا فامیلیا و مسجد نصیرالملک نشان می‌دهد.

در کلیسای سنت باربارا (تصویر ۶-الف) ستون‌ها با مقطعی چندوجهی در نظر گرفته شده‌اند تا سرستون‌هایی مرتبط با سلسله‌مراتب اتصالات را در مرحله بعد تشکیل دهند. در این کلیسا استفاده از هندسه انتزاعی طبیعت و تناسبات طلایی این الگوی هندسی قوس‌های متقاطع و انشعابی را در ساختار سرستون‌ها ایجاد کرده است.

در باسیلیکا ساگرادا فامیلیا (تصویر ۶-ب) فرم‌بخشی به ستون‌ها با

در ساختار فراکتال ایجاد می‌شوند. **تصویر ۷** نشان می‌دهد چگونه سلسله‌مراتب اتصالات و گسترش‌های هندسی هنر تزئینات مطابق با قانون خودسازماندهی در کلیسای سنت باربارا، باسیلیکا ساگرادا فامیلیا و مسجد نصیرالملک اجرا شده است.

در کلیسای سنت باربارا (**تصویر ۷-الف**) گسترش‌های هندسی در سرستون‌ها ایجاد شده است به نحوی که با به‌کارگیری هندسه انتزاعی طبیعت^۱ به سمت طاق‌ها وسعت می‌یابد و مراتب اتصالات را تشکیل داده است. در این بنا سازماندهی اتصالات و ایجاد جزئیات مطابق با الگوی هندسه طبیعت برای بیان مفاهیم هستی‌شناسی و زیباشناسی از طریق هنر تزئینات اجرا شده است.

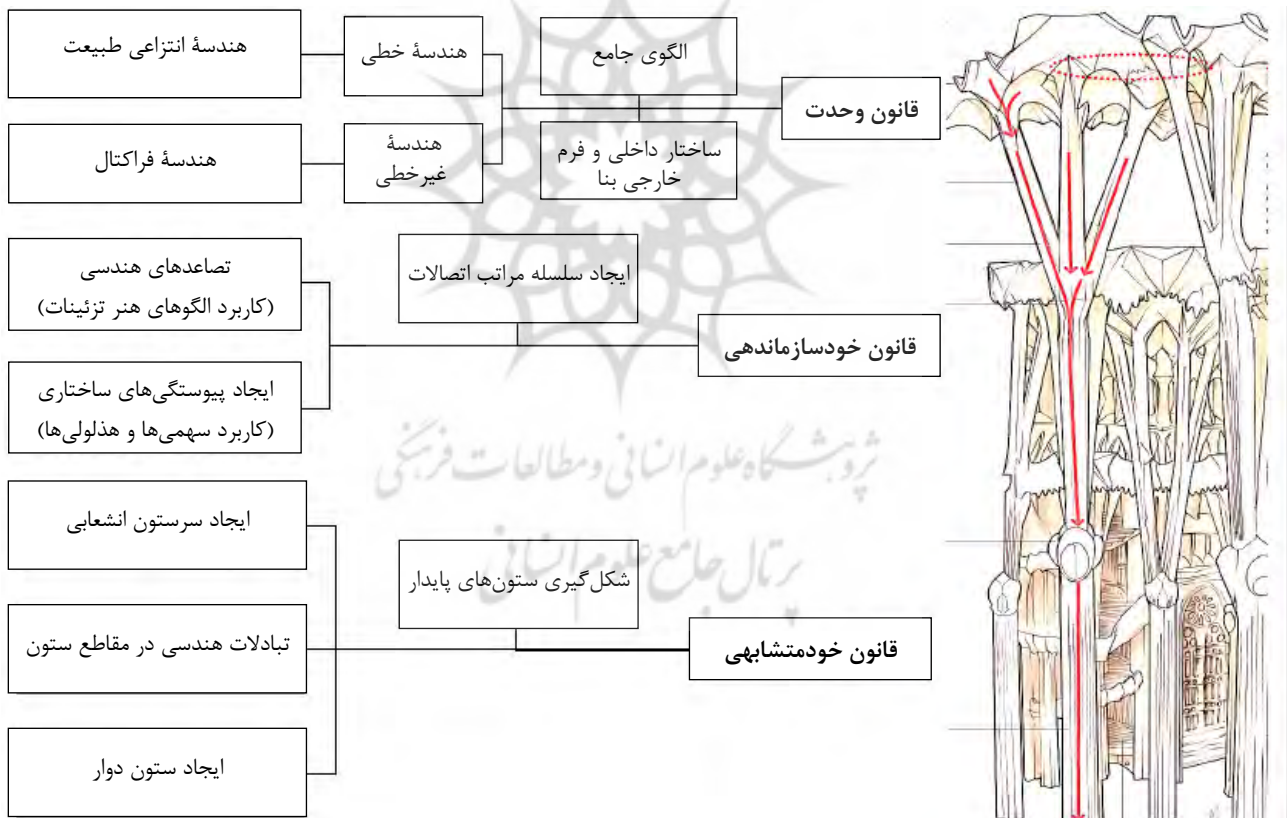
در باسیلیکا ساگرادا فامیلیا (**تصویر ۷-ب**) کاربرد هندسه سهمی‌ها و هذلولی‌ها بین «سرستون‌های انشعابی» و طاق‌ها پیوستگی‌های ساختاری را ایجاد کرده است که علاوه بر ایجاد سلسله‌مراتب اتصالات، کارکرد هدایت نور و هوا را به داخل بنا دارند. در مرحله پس از آن، گسترش‌های هندسی الگوهای متنوعی از هنر تزئینات را در ساختار داخلی بنا فراهم آورده است که

به‌عنوان حائل‌های داخلی، مجموعه‌ای غنی از ساختارهای فراکتالی را در باسیلیکا ساگرادا فامیلیا اجرا کرده است.

در مسجد نصیرالملک (**تصویر ۶-ج**) ستون‌ها از نوع طبیعت‌گرایانه و دوار در نظر گرفته شده است. در دوره زند معماران ستون‌ها را، به دلیل شکل پایدار آن در انتقال نیرو، دوار اجرا می‌کردند. این نوع ستون‌ها علاوه بر زیبایی دارای خاصیت ارتجاعی درونی برگرفته از فرم‌های طبیعت هستند. پس از آن اتصال‌یابی با ایجاد سرستون‌های چندوجهی برای ستون‌های اصلی، جایی که ستون‌ها به انشعابات تقسیم می‌شوند، ایجاد شده است. انشعاب‌ها برای برقراری سلسله‌مراتب اتصالات در طاق‌ها انتظام یافته‌اند.

• قانون خودسازماندهی

قانون خودسازماندهی در فراکتال «سلسله‌مراتب اتصالات» را توسط خواص هندسه غیرخطی سهمی‌ها و هذلولی‌ها ایجاد می‌کند و ساختار در «تصادف‌های هندسی» تکامل پیدا می‌کند و دارای جزئیات می‌شود. در قانون خودسازماندهی، تداوم، انسجام و ریتم ماهیت‌های مهم در مراتب اتصالات هستند که




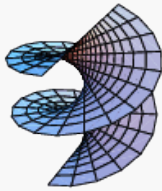

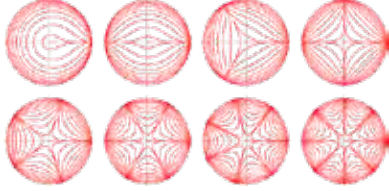

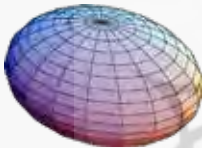

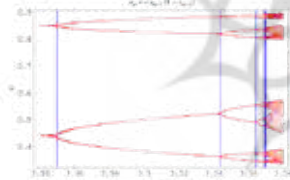



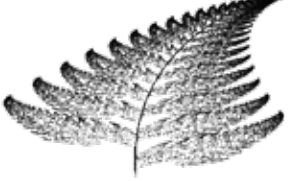


تصویر ۵. مدل پژوهشی، معیار و ابعاد به‌کارگیری قوانین فراکتال در ساختار فرم معماری. مأخذ تصویر: Camañas, Márquez & Malet, 2010; مأخذ نمودار: نگارندگان.

جدول ۱. خصوصیات فراکتال و روند تبدیل متغیرها به شاخص‌ها. مأخذ: نگارندگان.

خصوصیات فراکتال	مفاهیم	شاخص‌ها	روش همبستگی
عناصر تکرار شونده	خودمتشابهی	انحنا - تبادل - تشابه	کاربرد هندسه خطی
مراتب اتصالات	خودسازماندهی	تداوم - انسجام - ریتم	هندسه غیرخطی
کثرت در وحدت	وحدت	اصول - هماهنگی - یگانگی	

جدول ۲. مطالعه نمونه منتخب پژوهش. مأخذ: نگارندگان.

روند هفت مرحله‌ای در ساختار و فرم فراکتال

مفاهیم	شاخص‌ها	روش همبستگی در تبیین کاربرد هندسه خطی و غیرخطی در ساختار نمونه	نمونه فراکتالی
خودمتمایبی	انحنا تبادل تشابه	۱. دوران ^۳ مأخذ: https://mathworld.wolfram.com/Helicoid.html	 
		۲. تبدیل ^۴ مأخذ: http://mathworld.wolfram.com/Superellipse.html	 
		۳. اتصال ^۵ مأخذ: http://mathworld.wolfram.com/Ellipsoid.html	 
		۴. انشعاب ^۶ مأخذ: http://mathworld.wolfram.com/Bifurcation.html	 
خودسازماندهی	تداوم انسجام ریتم	۵. سلسله مراتب اتصالات ^۷ مأخذ: http://mathworld.wolfram.com/Parabola.html – Hyperbola.html	 
		۶. تصاعدهای هندسی ^۸ مأخذ: http://mathworld.wolfram.com/Fractal.html	 
کثرت در وحدت	اصول هماهنگی یگانگی	۷. اتحاد و تکثر ^۹ مأخذ: http://mathworld.wolfram.com/Rose.html	 

به صورت منشعب شدن سلسله مراتب اتصالات از یگانگی است که تسلسل باشکوه کثرت و وحدت عناصر را در ساختار داخلی مسجد فراهم می آورد. سیستم مهندسی این بنا با به کارگیری



الف) کلیسای سنت باربارا. مأخذ: www.khfarmost.cz



ب) باسیلیکا ساگرادا فامیلیا. مأخذ: <https://sagradafamilia.org>



ج) مسجد نصیرالملک. مأخذ: www.kindiran.com

تصویر ۶. روند شکل گیری ستون های پایدار.

مطابق با خصوصیات فراکتال دارای جزئیات می شوند و کیفیت زیباشناسی فضاها را ارتقا می بخشند.

در مسجد نصیرالملک (تصویر ۷-ج) انشعابات در سرستون های اصلی ایجاد شده است و نحوه انشعابها مراتب اتصالات را انتظام بخشیده است. به کارگیری گسترش های هندسی فراکتالی در انواع آرایه های هنر ایرانی سازماندهی فراکتالی را در ساختار داخلی معماری این مسجد نشان می دهد.

• قانون وحدت

قانون وحدت عناصر اصلی ساختار فراکتال را در الگوی جامع ترکیب و سلسله مراتب اتصالات انتظام می بخشد، به نحوی که مراتب مختلف عناصر را در وحدت مستحیل می کند. براساس قانون وحدت ساختارهای فراکتال به سمت یگانگی رفتن و دوباره از آن منشعب شدن را به نمایش می گذارند. الگوی جامع از نسبت های ریاضی مدار هندسه طبیعت از واژه لاتین «Pattern» ریشه «Father» گرفته شده که در حقیقت منشعب شدن از یگانگی را نشان می دهند. طبیعت در ایجاد ساختار از الگوی هندسی جامع پیروی می کند تا پیوستگی خود را با کلیت ساختار حفظ کند، بدین ترتیب یک هویت واحد را تعریف می کند (نقره کار، ۱۳۹۲). تصویر ۸ چگونگی مرحله کثرت در وحدت را در ساختار فرم کلیسای سنت باربارا، باسیلیکا ساگرادا فامیلیا و در مسجد نصیرالملک نشان می دهند.

در کلیسای سنت باربارا (تصویر ۸-الف) از هندسه انتزاعی طبیعت در سرستون ها استفاده شده و در ساختار داخلی توسعه یافته و با فرم خارجی بنا ترکیب شده است. در معماری گوتیک ساختمان ها دارای دو بیان هستند بیان الگوهای انتزاعی از طبیعت و بیان فرم. کلیسای سنت باربارا، در ترکیب بندی عناصر داخلی دارای بیان هندسه انتزاعی طبیعت و در ترکیب با الگوی جامع دارای بیان فرم خارجی است. سیستم مهندسی ویژه این بنا جهت انتقال بار از نوع «عناصر پشتیبان» است که در خارج بنا طراحی شده اند. این عناصر امکان ایجاد ارتفاع بلند و به کارگیری بیشتر از نور و هنر تزئینات را در بدنه اصلی بنا فراهم آورده اند.

در باسیلیکا ساگرادا فامیلیا (تصویر ۸-ب) به کارگیری سرستون های انشعابی عناصر اصلی را با عناصر وابسته در مراتب مختلف هماهنگ کرده است. در این عمارت، عناصر سازنده داخلی و ساختار فرم خارجی، هماهنگ با وحدت در به کارگیری از الگوهای جامع فراکتالی، درجات بالاتری از خودسازماندهی را نسبت به دوره گوتیک در ساختار و فرم نمایش می دهند. سیستم مهندسی این بنا از نوع ستون های دوار و سرستون های انشعابی با قابلیت بارگذاری منحصر به فرد است که به عنوان حائل های داخلی امکان ایجاد ارتفاع بلند را در بنا فراهم آورده است.

در مسجد نصیرالملک (تصویر ۸-ج) مفهوم وحدت، با به کارگیری از الگوهای جامع هنر تزئینات، ترکیبی از انواع آرایه ها را در مراتب اتصالات ایجاد کرده است. در معماری این مسجد وحدت در کثرت



الف) کلیسای سنت باربارا. مأخذ: www.khfarnost.cz



الف) کلیسای سنت باربارا. مأخذ: www.khfarnost.cz



ب) باسیلیکا ساگرادا فامیلیا. مأخذ: <https://sagradafamilia.org>



ب) باسیلیکا ساگرادا فامیلیا. مأخذ: <https://sagradafamilia.org>



ج) مسجد نصیرالملک. مأخذ: www.kindiran.com
تصویر ۸. کثرت در وحدت در ساختار و فرم.



ج) مسجد نصیرالملک. مأخذ: www.kindiran.com
تصویر ۷. سلسله مراتب اتصالات و تصاعدهای هندسی.

ستون‌های طبیعت‌گرایانه دوار، به دلیل فرم پایدار آن و انشعابات در سرستون‌ها، برای توزیع نیروهای سازه‌ای و مقابله با رانش قوس‌ها در نظر گرفته شده است.

نتیجه‌گیری

فرایند کاربرد هندسه فراکتال در معماری عمدتاً با به‌کارگیری قوانین اصلی خودمتشابهی، خودسازماندهی و وحدت همراه است که با کارکردهای آن می‌توان کیفیت‌های فراکتالی را در معماری به‌وجود آورد. در راستای پاسخ به پرسش اول در مورد چگونگی کاربرد هندسه فراکتال در ساختار فرم معماری، این پژوهش ضمن نگرش به کاربردهای هندسه خطی و غیرخطی در ساختار نمونه، روند هفت‌مرحله‌ای را در سازماندهی ساختارهای مبتنی بر فرم در معماری تبیین می‌کند که عبارت است از ۱. دوران، ۲. تبدیل، ۳. اتصال، ۴. انشعاب در قانون خودمتشابهی،

ساختار و فرم در معماری، بین عناصر سازنده و صور معماری، مناسبت‌های درونی و وحدت برونی ایجاد می‌کند. با در نظر گرفتن روند هفت‌مرحله‌ای در ایجاد ساختار و فرم فراکتال (بنگرید به جدول ۲) و مدل پژوهشی (بنگرید به تصویر ۵) می‌توان بیان کرد که در شکل‌گیری ستون‌ها، ترکیب‌بندی عناصر، سلسله‌مراتب اتصالات و به‌کارگیری گسترش‌های هندسی، کاربرد هفت‌مرحله‌ای هندسه فراکتال وجود دارد تا فرم بنا دارای کیفیت فراکتالی باشند (بنگرید به جدول ۳). به علاوه این مدل پژوهشی اصولی را در ارائه سیستم‌های مهندسی طبیعت‌گرایانه توصیف می‌کند که روش علمی-کاربردی را در ارتقای کیفیت معماری ارائه می‌دهد.

۵. سلسله‌مراتب اتصالات، ۶. تصاعدهای هندسی در قانون خودسازماندهی و ۷. اتحاد و تکثر در قانون وحدت. در راستای پاسخ به پرسش دوم، پژوهش بیان می‌کند که کارکردهای هندسه فراکتال در ترکیب‌بندی عناصر، سلسله‌مراتب اتصالات و به‌کارگیری هنر تزئینات تابع قوانین هندسه فراکتال است. قانون خودمتشابهی عناصر اصلی و سازه‌های معماری را ایجاد می‌کند و قانون خودسازماندهی سلسله‌مراتب اتصالات را انتظام می‌دهد و قانون وحدت ساختار فرم معماری را انسجام می‌بخشد. علاوه بر این، معماری مبتنی بر فرم فراکتال نسبت دقیقی میان ترکیب‌بندی عناصر، الزامات سازه‌ای و مفاهیم زیباشناسی هنر تزئینات برقرار می‌کند، به نحوی که با دو بیان

جدول ۳. ارزیابی کیفیت فراکتالی بناهای منتخب پژوهش. مأخذ: نگارندگان.

قوانین هندسه فراکتال	عناصر معماری	مدل مبتنی بر فرم فراکتال	هندسه خطی: هندسه انتزاعی از طبیعت. هندسه غیر خطی: هندسه ساختارهای طبیعت.	کلیسای سنت باربارا	باسیلیکا ساگرادا فامیلیا	مسجد نصیرالملک
خودمتمشابهی	روند شکل‌گیری ستون‌ها	۱. دوران	ایجاد ستون‌های چندوجهی و یا دوار	√	√	√
		۲. تبدیل	تبادلات هندسی در مقاطع ستون‌ها	√	√	√
		۳. اتصال	اتصال‌یابی با ایجاد مقاطع گرد، بیضوی و چند ضلعی	√	√	√
		۴. انشعاب	ایجاد سرستون‌های انشعابی و طبیعت‌گرایانه	√	√	√
خودسازماندهی	ترکیب‌بندی عناصر و به‌کارگیری هنر تزئینات	۵. سلسله‌مراتب اتصالات	به‌کارگیری سهمی‌ها و هذلولی‌ها در ایجاد پیوستگی‌های ساختاری	√	√	√
		۶. گسترش الگوریتمی	استفاده از تصاعدهای هندسی فراکتالی در ایجاد الگوهای هنر تزئینات	√	√	√
وحدت	ساختار فرم	۷. وحدت و کثرت	ترکیب الگوی جامع در بنا، ایجاد مناسبت‌های درونی و وحدت بیرونی بین عناصر سازنده و صور معماری	√	√	√

پی‌نوشت‌ها

۱. evergreen tree fractal.
 ۲. fractal-based architecture model / FBAM: مدل پژوهشی معماری مبتنی بر فرم، مستخرج در این پژوهش.
 ۳. helicoid: یک منحنی که بین دو نقطه دوران می‌کند.
 ۴. super ellipse: بیضوی‌های کنج‌دار با معادله دکارتی را نمایش می‌دهد.
 ۵. ellipsoid: یک بیضوی درجه دوم در مختصات دکارتی ایجاد می‌کند.
 ۶. bifurcation: یک تقسیم‌بندی دوره‌ای را اجرا می‌کند.
 ۷. parabola and hyperbola: انواع منحنی‌ها را توسط تقاطعات با مخروط ایجاد می‌کند.
 ۸. geometric progressions: تصاعدهای هندسی را نمایش می‌دهد.
 ۹. rose progression: دایره‌ها با تقارن شش‌برابر قرار می‌گیرند، الگویی از دایره‌ها را در تکثر و وحدت به‌اجرا می‌گذارند.
 ۱۰. flower of life.
- هویت‌شهر، ۱۱۶(۱)، ۳۹-۵۲.
- رئیس‌زاده، مهناز و مفید، حسین. (۱۳۹۳). *احیای هنرهای زیاده‌رفته: مبانی معماری سنتی در ایران به روایت استاد حسین لرزاده*. تهران: مولی.
 - رحمانی، الهه؛ اعتصام، ایرج و مختاباد امرئی، مصطفی. (۱۳۹۶). تحلیلی بر چگونگی نقد و ارزیابی آثار معماری آوانگارد. *باغ نظر*، ۱۴(۵۰)، ۵-۲۰.
 - محمدیان منصور، صاحب و فرامرزی، سینا. (۱۳۹۱). مقایسه نظم شبه‌تناوبی شاه‌گره با ساختار شبه‌بلوری سیلیکون. *هنرهای زیبا-هنرهای تجسمی*، ۵۰(۵)، ۶۹-۸۰.
 - مرجوعی، علی؛ شاهدی، بهرام؛ پیروای ونک، مرضیه و قاسمی سیچانی، مریم. (۱۳۹۷). معماری به‌مثابه ذهن بسیط. *باغ نظر*، ۱۵(۶۴)، ۲۹-۴۰.
 - نقره‌کار، عبدالحمید. (۱۳۹۲). *رابطه انسان با طبیعت و معماری*. تهران: انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

- Alberti, L. B. (1987). *The Ten Books of Architecture*. New York, US: Dover.
- *Basilica of Santa Maria Novella*. Retrieved May 8, 2020, from: <https://www.archdaily.com>.
- *Bifurcation*. Retrieved May 8, 2020, from: <http://mathworld.wolfram.com/Bifurcation.html>.

فهرست منابع

- اشرافی، نسیم. (۱۳۹۵). بازشناسی شهرسازی و معماری اسلامی ایران با رویکرد تئوری آشوب و قانون فازی. *باغ نظر*، ۱۳(۴۳)، ۷۷-۹۰.
- تقوایی، ویدا. (۱۳۹۱). از نظم تا بی‌نظمی در طبیعت و معماری.

- Bovill, C. (2000). Fractal Geometry as Design Aid. *Journal for Geometry and Graphics*, 4(1), 71-78.
- Camañas, R. & Márquez, R. & Malet, O. (2010). *Un Símbolo De Barcelona*. Barcelona, Spain: La Vanguardia.
- Crompton, A. (2004). *The Fractal Nature of Everyday Space*. University of Manchester, UK: School of Environment and Development.
- *Ellipsoid*. Retrieved May 8, 2020, from: <http://mathworld.wolfram.com/Ellipsoid.html>.
- Flores, C. (1999). *Josep María Jujol*. Madrid, Spain: Revista Arquitectura, COAM.
- *Fractal*. Retrieved May 8, 2020, from: <http://mathworld.wolfram.com/Fractal.html>.
- Haghani, T. (2009). *Fractal Geometry, Complexity, and the Nature of Urban Morphological Evolution*. Ph.D. Dissertation. School of Architecture, Birmingham City University, UK.
- *Helicoid*. Retrieved May 8, 2020, from: <https://mathworld.wolfram.com/Helicoid.html>.
- Jencks, C. (1997). *The Architecture of Jumping Universe*. Sussex, UK: Academy Editions, Wiley.
- Jencks, C. (2002). *The New Paradigm in Architecture: The language of postmodernism*. Connecticut, US: Yale University Press.
- Jencks, C. (2011). *The Story of Post-Modernism: Five Decades of the Ironic, Iconic and Critical in Architecture*. Sussex, UK: Wiley.
- Joye, Y. (2007). *A Tentative Argument for the Inclusion of Nature-Based Forms in Architecture*. Ph.D. Dissertation. Faculty of Arts and Philosophy. Universiteit Gent, Belgium.
- Mandelbrot, B. (1983). *The Fractal Geometry of Nature*. New York, US: W.H. Freeman.
- *Masia-Freixa*. Retrieved May 8, 2020, from: <http://www.catalunya.com/masia-freixa>.
- *Montferri Church*. Retrieved May 8, 2020, from: https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Mare_de_Déu_de_Montserrat_de_Montferri.
- Moussavi, F. (2009). *The Function of Form*. Harvard Graduate School of Design: ACTAR.
- *Nasir-al-Mulk Mosque*. Retrieved May 8, 2020, from: <http://www.kindiran.com/en/Gallery/The-Nasir-al-Mulk-Mosque>.
- *Order-8 triangular tiling*. Retrieved May 8, 2020, from: https://en.wikipedia.org/wiki/Order-8_triangular_tiling.
- Pantano, M. (2013). *Reading Gaudi's Great Book of Nature: Reconsidering the Peripheral Reception of Proto-Environmental Architecture*. US: University of Pennsylvania.
- *Parabola- Hyperbola*. Retrieved May 8, 2020, from: <http://mathworld.wolfram.com/Parabola.html-Hyperbola.html>.
- Ramzy, N. S. (2015). *The Dual Language of Geometry in Gothic Architecture: The Symbolic Message of Euclidian Geometry versus the Visual Dialogue of Fractal Geometry*. Sinai University, Egypt.
- *Rose*. Retrieved May 8, 2020, from: <http://mathworld.wolfram.com/Rose.html>.
- Ruskin, J. (1857). *The Elements of Drawing*. London, UK: Spottiswoode & Co.
- *Sagrada Familia Basilica*. Retrieved May 8, 2020, from: <https://sagradafamilia.org/en/photo-gallery>.
- Sala, N. (2006). *Fractal Geometry and Architecture: Some Interesting Connections*. Mendrisio, Switzerland: Università Della Svizzera Italiana.
- *Santa Barbara Cathedral*. Retrieved May 8, 2020, from: <http://www.khfarnost.cz/st-barbaras-cathedral>.
- *Superellipse*. Retrieved May 8, 2020, from: <http://mathworld.wolfram.com/Superellipse.html>.
- Yarnall, K.M. (2010). *Barcelona's Natural Wonder*. USA: National Geographic Society.

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/>).



نحوه ارجاع به این مقاله

فرشید راد، فرناز؛ اعتصام، ایرج و قبادیان، وحید. (۱۳۹۹). تبیین قوانین هندسه فراکتال در ساختار فرم معماری، ارائه مدل پژوهشی معماری مبتنی بر فرم، باغ نظر، ۱۷(۸۴)، ۵-۱۸.

DOI: 10.22034/bagh.2019.125370.3509

URL: http://www.bagh-sj.com/article_99230.html

