

مهتاب مبینی \*

نوشین فتح الهی \*\*

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۴/۱۴

## بررسی جایگاه هندسه فرکتال در هنر و چگونگی ظهور آن در هنرهای تجسمی

### چکیده

تاسدهی نوزده نظام اقلیدس را یگانه توصیف از جهان می پنداشتند. بعدها روشن شد که هندسهی اقلیدسی هیچ الگویی برای مسائلی چون پدیده‌های به ظاهر بی نظم درخت، ساحل دریا، اقتصاد، تاریخ و... ندارد. پس هندسه‌های نا اقلیدسی؛ مانند هندسهی فرکتالی ایجاد شدند. بنوا مندلیبروت ریاضیدان لهستانی، توانست یکی از نظریه‌های مطرح شدهی ریاضی از سال ۱۸۶۱ را به صورت هندسهی جدیدی ارائه دهد که به آن هندسهی بدون اندازه یا فرکتالی (برخالی) گویند. این هندسه حاصل نظریه‌ی آشوب و خوانش ترسیمی آن، و از شاخه‌های جدید ریاضیات با ارائه‌ی مفهوم جدیدی از بعد فیزیکی و مفاهیمی مانند «خودهماندی» و «خود تمایلی» است که در برابر تفسیر و شبیه‌سازی اشکال مختلف طبیعت انعطاف بی نظیری نشان داده‌است. نظریه‌ی آشوب و هندسه‌ی فرکتالی کاربردهای وسیعی در علوم انسانی، هنر، گرافیک رایانه‌ای، تحلیل هنری پیدا کرد. هندسه فرکتالی دانشی در اختیار هنرمند، برای آفرینش طرح‌هایی بس نوین و همسو با روان طبیعت گرای اوست. در این پژوهش به دنبال یافتن کاربردهای فرکتال در هنر هستیم با این پرسش اصلی که در کدام بخش از هنرها، رد پای هندسه‌ی فرکتالی را می‌توان دید. منابع اختصاصی درباره‌ی فرکتال و هنر، پراکنده و بیش تر به صورت مقاله است. برای گردآوری داده‌های مورد نیاز از روش کتابخانه‌ای، و برای تحلیل داده‌ها از روش توصیفی استفاده شد. دانش فرکتال امکانی در اختیار هنرمند است برای آفرینش طرح‌هایی بس نوین و باشکوه که با روان طبیعت گرای آدمی همسو است و فرکتال آفرینش همه گونه طرح غیر تکراری را برای هنرمند امکان پذیر می‌کند.

### کلید واژه:

آشوب  
هندسه‌ی فرکتالی  
بی نظمی  
شکل‌های فرکتالی  
طبیعت

استادیار گروه هنر، دانشگاه پیام نور، ایران \*

dr.m.mobini@gmail.com

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه پیام نور، ایران \*\*

nooshinfathollahi@gmail.com

## مقدمه

از منظر تاریخی مطالعه‌ی مباحث مربوط به هندسه فرکتالی به سده‌ی نوزدهم برمی‌گردد. کارل وایرستراس در سال ۱۸۶۱ وجود تابعی را نشان داد که در کلیه‌ی نقاط پیوسته هستند ولی در هیچ نقطه مشتق ندارد. ریاضی‌دانان آن زمان این تابع را به عنوان حالتی خاص و استثنایی تلقی نمودند، در سال ۱۸۹۰ پئانو، منحنی فضا پرکن خود را ارائه داد. ارائه‌ی این منحنی سبب تغییر نگرش نسبت به مفهوم بُعد گردید، چرا که تا پیش از آن، بُعد مجموعه را به عنوان تعداد متغیرهای مستقل مشخص کننده‌ی مجموعه تعریف می‌کردند. به عنوان نمونه مربع را جسم دو بعدی تصور می‌کردند، زیرا با دو متغیر طول و عرض مشخص می‌شود. ولی با توجه به منحنی پئانو، برای مشخص کردن مربع یک پارامتر نیز کافی است (شفیعی، ۱۳۷۴: ۶). در واقع تعداد ابعاد فضا در هندسه‌ی اقلیدسی همواره عددی صحیح (غیر اعشاری) است، اما در فضای فرکتالی می‌تواند عددی اعشاری هم باشد (فقیه، ۱۳۸۱: ۹۲). به همین ترتیب به مرور زمان مجموعه‌های دیگری مانند مجموعه‌ی کانتور، مثلث سرپینسکی و ... به دنیای ریاضیات ارائه شدند. گام دیگری که در این راستا برداشته شد، مطالعه‌ی تکرار توابع گویا در صفحه‌ی اعداد مختلط، توسط دو ریاضیدان فرانسوی به نام‌های ژولیا و فاتو در حدود سال ۱۹۱۸ می‌باشد. امروزه مجموعه‌های ژولیا از معروف‌ترین شکل‌های فرکتالی می‌باشند.

این مباحث، بیش‌تر به صورت موضوعات پراکنده و جدا از هم مطرح و بررسی می‌شدند. تا اینکه مندلبروت در سال ۱۹۷۹ مباحث بالا و بسیاری از موضوعات دیگر را تحت عنوان هندسه‌ی فرکتالی جمع بندی و به دنیای علم عرضه کرد و در سال ۱۹۸۲ با انتشار کتاب معروف هندسه‌ی فرکتالی طبیعت توسط مندلبروت دوران شکوفایی هندسه‌ی فرکتالی آغاز شد. از این زمان به بعد مطالعه راجع به فرکتال و کاربرد آن یکی از زمینه‌های تحقیقاتی فعال بوده است. از به لحاظ نظری مسائلی مانند بهترین تعریف برای بعد فرکتالی، روش‌های محاسبه‌ی تحلیلی و عددی بعد فرکتالی، خواص یک مجموعه با بعد فرکتالی معلوم و ... موضوع بسیاری از تحقیقات بوده و هستند. کاربرد فرکتال در مسائل مختلف نیز راهگشا و جالب توجه بوده است. فرکتال‌ها در مباحث مختلفی به کار برده شده‌اند: توصیف شکل اجسام طبیعی مانند ابرها، کوه‌ها و ...، توصیف رشد بلورها، به دست آوردن الگویی برای شکست اجسام و فشردن سازی تصویر رایانه‌ای از جمله مواردی هستند که هندسه‌ی فرکتالی در آن‌ها به کار بسته شده است (شفیعی، ۱۳۷۴: ۷). نظریه‌ی آشوب، نظریه‌ی ای جالب و بحث برانگیزی در میان دانشمندان است و پشتوانه‌ای است برای شکل‌گیری هندسه‌ی فرکتالی و مباحث پیرامون این شاخه‌ی جدید از علم، که تقریباً در تمامی دانش‌های امروزی کاربرد دارد. یکی از راه‌های اثبات درستی هندسه‌ی فرکتالی، استدلال بر پایه‌ی همین نظریه است.

کاربرد فرکتال در هنر، گرافیک رایانه‌ای و تحلیل هنری نیز قابل بررسی است. در این پژوهش به دنبال یافتن کاربردهای فرکتال در هنر هستیم با این پرسش اصلی که در کدام بخش از هنرها، ردپای هندسه‌ی فرکتالی را می‌توان دید. به طور کلی منابع اختصاصی (فارسی) درباره‌ی فرکتال و هنر، پراکنده است. برای گردآوری داده‌های مورد نیاز روش کتابخانه‌ای به کار رفته و برای تحلیل داده‌ها از روش توصیفی استفاده شده است.

## آشوب و نظریه‌ی آشوب

واژه‌ی آشوب ما را به یاد بی‌نظمی می‌اندازد. پدیده‌هایی که در ظاهر هیچ نظمی ندارند و به هیچ وجه قابل کنترل نیستند؛ مانند کوه، درخت، انقلاب‌های مردمی، اقتصاد و ... اما آشوب از مفهوم عمیق‌تر و علمی‌تری برخوردار است. هرچند در ظاهر، آشوب پدیده‌ای آشفته و بی‌نظم است، ولی در واقع طبیعتی معین و شناخته شده دارد؛ بنابراین می‌توان آشوب را با روش‌های علمی به کنترل درآورد. همین ویژگی پدیده‌های آشوبناک بود که منجر به طرح نظریه‌ی آشوب از جانب ادوارد لورنز در سال ۱۹۶۳ گردید. مهم‌ترین مطلبی که در ورود به این بحث باید دانست این است که پدیده‌ی آشوب را نباید با پدیده‌های تصادفی و نامعلوم اشتباه گرفت. بسیاری از پدیده‌های تصادفی و نامعلوم پیش از رسیدن به این حالت، تناوبی و معلوم می‌باشند (افکاری، ۱۳۸۳: ۲).

آشوب یک پدیده‌ی تصادفی با یک دوره تناوب است که با یک تغییر، وارد یک تناوب دیگری می‌شود و در نتیجه سیستم آشوب، سیستمی با رفتار غیرتناوبی خواهد شد. نظریه‌ی سیستم‌های آشوب شاخه‌ای مهم از دانش سیستم‌های پویای غیرخطی است. سیستم‌هایی که رفتارهای آینده‌ی آن‌ها دیگر قابل پیش‌بینی نمی‌باشد، یعنی نسبت به وضعیت اولیه‌ی خود بسیار حساس هستند و تغییر اندک در اوضاع ابتدایی آن‌ها منجر به تغییرات بسیار زیاد در آینده می‌شود (گروسی، ۱۳۸۷: ۳۱). بهترین نمونه برای آن‌ها اثر پروانه‌ای، جریان‌های هوایی و دوره‌ی اقتصادی است. غیرخطی بودن سیستم آشوب باعث نامنظمی نمودار آن و پیچیدگی رفتار سیستم می‌شود. در واقع فصل تمایز آشوب و سایر پدیده‌های تصادفی، وابستگی شدید آن به تغییرات اولیه است.

در پدیده‌های آشوبناک نباید نظم را تنها در یک مقیاس جستجو کرد؛ پدیده‌ای که در مقیاس محلی، به طور کامل تصادفی و غیرقابل پیش‌بینی به نظر می‌رسد، در مقیاس بزرگ‌تر شاید به طور کامل پایا<sup>۲</sup> و قابل پیش‌بینی باشد (فتح‌اللهی، ۱۳۸۶: ۹). آدامز آشفتگی را این‌گونه تعریف می‌کند: از آشفتگی زندگی زائیده می‌شود در حالی که از نظم عادت به وجود می‌آید (حاجی کریمی، ۱۳۸۹: ۳۴).

این نظریه که در ابتدا تنها یک نظریه بود، گسترش خود را بیشتر مدیون کارهای هانری پوانکاره، ادوارد لورنتس، بنوا مندلبروت و مایکل فایگن‌باوم است (پوانکاره اولین کسی بود که اثبات کرد، مساله‌ی سه جرم مانند، خورشید، زمین، ماه مساله‌ای آشوبی و غیر قابل حل است). مطالعه‌های بعدی آن را به یک نظریه تبدیل کرد و سپس به حد علم نیز رسید؛ به طوری که امروزه آشوب در معماری و عمران نیز به کار می‌رود. یکی از اصولی که این علم بیان می‌کند این است که هیچ چیز قابل پیش‌بینی نیست چون زندگی برای بقا راه خود را خواهد یافت. (فتح‌اللهی، ۱۳۸۶: ۱۰). نظریه‌ی آشوب، با ارائه‌ی نظریه‌ی فرکتال‌ها و ارائه‌ی مفهوم جدیدی از بعد فیزیکی و مفاهیمی مانند ((خود تشابهی)) و ((خود تمایلی))، دروازه‌ی جدیدی در کشف نظم در پدیده‌ها گشود که در جای خود می‌تواند به طور جدی، در علوم انسانی و هنر به کار رود.

## هندسه فرکتال، توصیفگر جهان طبیعت

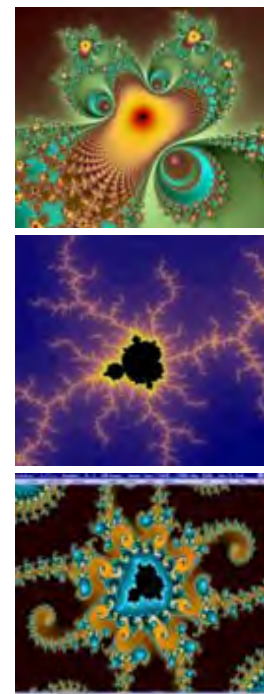
واژه فرکتال که از ریشه‌ی یونانی فرکتوس به معنای ((تکه تکه شده)) و ((شکسته شده))

آمده است و به نحوی تعریف ریاضی اش را در خود دارد، در اصطلاح به معنای سنگی است که به شکل نامنظم شکسته شده باشد. معادل فارسی برای فرکتال، برخال است. واژه‌ی برخال از دو پاره‌ی «(برخ)» و «(ال)» ساخته شده است. برخ واژه‌ی فارسی برای کسر به معنی شکست (Fraction) است و پسوند ال پسوندی به معنای «(مرتبط با)»، «(نسبت و شباهت)» است (مانند چنگال: مرتبط یا همشکل با چنگ، کشال یا کشاله‌ی ران: مرتبط با کشیده شدن، پوشال: مربوط به پوشاندن، سنگال و جز این‌ها). واژه‌ی آشنای «(برخی)» به معنی پاره‌ای، از ریشه‌ی برخ گرفته شده است.

یکی از نتایج نظریه‌ی آشوب، پیدایش شاخه‌ای جدید در ریاضیات است به نام هندسه‌ی فرکتال. هندسه‌ی فرکتال خوانش ترسیمی نظریه‌ی آشوب است. تا سده‌ی نوزده می‌پنداشتند که نظام اقلیدس یگانه نظام امکان‌پذیر و تنها توصیف از جهان است (روح‌الامین، ۱۳۹۲: ۵). در سال ۱۹۷۹، طلسم یکی از نظریه‌های ریاضی که از سال ۱۸۶۱، عنوان شده بود، شکسته شد و مندلبروت ریاضیدان لهستانی، پایه‌گذار هندسه‌ی جدیدی شد که به آن هندسه‌ی بدون اندازه یا هندسه‌ی فرکتالی (برخال) گویند. با به‌کارگیری هندسه فرکتالی، افق روشنی پیش روی ریاضیدانان و محققان در زمینه بازگو کردن رفتار توابع و مجموعه‌های به ظاهر ناهموار و پراشوب قرار گرفت. بنیاد هندسه «برخال» بر این فرض استوار است که شکل‌های طبیعی خود همانند هستند و از تکرار قانونمند یک بلوک آغازین ایجاد گردیده‌اند. سیستم‌های فرکتالی سیستم‌های غیرخطی هستند و سیستم‌های خطی تنها حالت خاصی از آن‌ها محسوب می‌شوند؛ هندسه‌ی اقلیدسی نیز انتزاعی از دنیای واقعی است. درک پیچیدگی موجود در طبیعت موجب شک و تردیدی شد مبنی بر این که این پیچیدگی‌ها تصادفی و اتفاقی نیست. مندلبروت ادعا نمود که چنین شکل‌های عجیب و این پیچیدگی‌های طبیعی دارای معنی و مفهوم هستند (محمودی نژاد، ۱۳۸۸: ۲۱۷).

در این هندسه شکل‌هایی مورد بررسی قرار می‌گیرند که ساختارشان تا آخرین حد مقیاس‌های بی‌نهایت کوچک پیش می‌رود و بسیار بی‌نظم به نظر می‌رسند، اما در واقع دارای نظم هستند (تصویر ۱) (سرورزاده و همکاران، ۱۳۹۰: ۵۱).

یعنی اگر با دقت به تصویر نگاه کنیم متوجه می‌شویم که تکه‌های کوچک آن کما بیش شبیه به کل شکل هستند. به عبارتی جزء در این شکل‌ها، نماینده‌ای از کل است. به چنین شکل‌هایی «خودهمانند» نیز می‌گویند. در واقع جسم فرکتالی از دور و از نزدیک یکسان دیده می‌شود، یعنی اگر به یک شکل فرکتالی نزدیک شویم می‌بینیم که قسمت‌های کوچک‌تر آن به صورت شکلی کما بیش مشابه با شکل بزرگ‌تر می‌باشد. این شکل‌ها برعکس شکل‌های اقلیدسی نامنظم هستند. البته میزان بی‌نظمی آن‌ها در همه مقیاس‌ها یکسان است، یعنی به نوعی دیگر منظم‌اند. شکل‌های فرکتال با فرآیندهای پویا تولید می‌شوند. فرآیندهای پویا فرآیندهایی هستند که دارای حافظه می‌باشند و رفتار آن‌ها به گذشته بستگی دارد. الگوی فرکتال می‌تواند فضای ایجاد شده توسط ساختار متفاوت فرکتال را اشغال نماید و الگوی پیچیده‌تری را حاصل کند. چنین نمونه‌ای در طبیعت متداول‌تر است و کمک بسیار زیادی در توضیح تنوع‌ها و زیبایی‌های موجود در محیط طبیعی می‌کند (بلیلان اصل و همکاران، ۱۳۹۰: ۸۳).



تصویر ۱: چند نمونه فرکتال  
(فتح‌اللهی، ۱۳۸۶: ۲۴)

در واقع شکل‌های فرکتالی، شکل‌هایی هستند که بُعد صحیح ندارند و دارای این خاصیتند که تا بی‌نهایت قابل بزرگنمایی می‌باشند. شکل‌های فرکتالی با زندگی روزمره‌ی ما گره خورده‌اند. با کمی دقت به اطراف خود، می‌توانیم بسیاری از این شکل‌ها را بیابیم. از گل فرش و قالی و گل کلم گرفته تا شکل کوه‌ها، ابرها، دانه‌ی برف و باران، شکل ریشه، تنه و برگ درختان و شکل سرخس‌ها، سیاهرگ و شش و... همه‌ی این‌ها نمونه‌هایی از شکل‌های فرکتالی‌اند. در تشکیل سنگ‌های آذرین، پس از هر باران فوران آتشفشان از انجماد و شکل‌گیری گدازه‌ها بلورهایی حاصل می‌شود که همگی شبیه هم هستند و پس از شکل‌گیری، سنگ‌های آذرین را به وجود می‌آورند (مستغنی، و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۱۰). شکل‌های موجود در طبیعت یا نظم خاصی دارند مانند شکل یک گل آفتابگردان و یا بی‌نظم به نظر می‌رسند مانند گل کلم (نظریه‌ی آشوب).

هندسه مندلبروت توانایی توصیف جزئیات فرم‌های طبیعی را دارد. ارتباط میان طبیعت و فرکتال از طریق مثال طول ساحلی قابل بیان است. یک ساحل صخره‌ای مانند منحنی فرکتال کخ هست با این تفاوت که پیچ و خم‌های آن تصادفی است. نه تنها شکل فیزیکی طبیعت فرکتال است، که شیوه‌ی دگرگونی طبیعت در طول زمان نیز فرکتال است (بویل، ۱۳۹۲: ۱۸).

این هندسه ویژگی‌های منحصر به فردی دارد که می‌تواند توجیه‌گر بسیاری از رویدادهای جهان اطراف ما باشد. با این توضیحات می‌توان بیان کرد هر اندازه که هندسه اقلیدسی در توصیف ساخته‌های دست بشر قدرتمند و برای توصیف ساخته‌های دست طبیعت ناتوان است، هندسه فرکتال در توصیف ساخته‌های دست بشر ناتوان و در توصیف ساخته‌های دست طبیعت توانمند می‌باشد. فرکتال در پی تحلیل و شبیه‌سازی بی‌نظمی و آشوب است. این روزها از فرکتال‌ها به عنوان یکی از ابزارهای مهم در گرافیک رایانه‌ای نام می‌برند (فتح‌اللهی، ۱۳۸۶: ۱۶). برای شکل‌های فرکتالی ویژگی‌های زیر را می‌توان برشمرد:

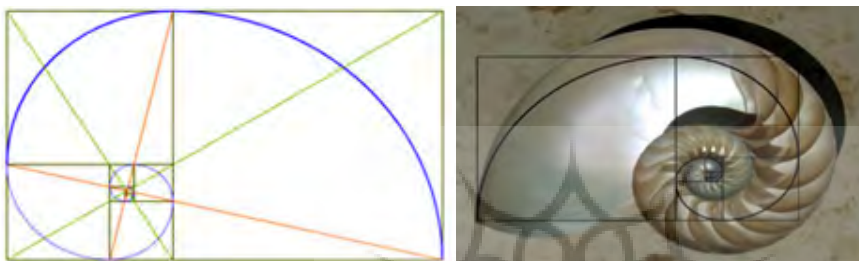
۱. بی‌نظمی یا گونه‌ای از آشوب ساختاری.
۲. تشابه در جلوه بصری در هر مقیاس.
۳. خرد مقیاسی: یکسانی و همگونی عدم یکپارچگی آن در هر مقیاسی. فرکتال‌ها در هر مقیاسی یکسان به نظر می‌رسند.
۴. ایجاب خودهماندی که هر زیر سیستمی از فرکتال معادل کل سیستم باشد و این همان خودمتشابهی<sup>۳</sup> است. خودمتشابهی از نظر هندسی یعنی یکسانی شکل‌ها در عین متفاوت بودن اندازه‌ها. به بیان ساده، اگر بتوان با بزرگ یا کوچک کردن دو تصویر آن‌ها را همانند کرد، آن دو شکل متشابه هستند. یک نمونه برای این دسته از فرکتال‌ها مثلث سرپینسکی است. با داشتن این ویژگی، اگر یکی از قطعه‌های کوچک تشکیل‌دهنده را به مقیاس شکل اصلی رسانیم، همان شکل اصلی به دست می‌آید نسبت‌های طلایی به عنوان مثالی از مقیاس خودمتشابه، از دیرباز مطلوب معماران بوده است و فرم یک شکل مارپیچ [مارپیچ فیبوناچی] گونه از مستطیل خود متشابه را می‌آفریند (تصویر ۲). (محمودی نژاد، ۱۳۸۸: ۲۰۵) حواس ما که از جریان خودمتشابه طبیعت به تدریج تکامل یافته است، خودمتشابهی را در اشیاء طراحی شده می‌پذیرد (بویل، ۱۳۹۲: ۱۶).
۵. عدم تعیین طولی در هر مقیاس.



### ۶. بعد اعشاری.

۷. تشکیل از راه تکرار: اجزاء و عناصر فرکتال در مقیاس‌های مختلف تکرار می‌شوند. فرکتال‌ها ماهیت تکرار دارند. یعنی در ساختار آن‌ها می‌توان نظمی از تکرار یک پارامتر خاص را یافت (نظریه‌ی آشوب). در این فرآیند، هر تکرار از نتیجه‌ی قبلی‌اش ساخته شده‌است. این ریتم تکرار شونده در شکل‌های فرکتالی آن‌ها را به سمت تعادل سوق می‌دهد.

۸. در شکل‌های فرکتالی هیچ خط مستقیمی وجود ندارد. لبه‌ها و وجه‌های داخلی آن‌ها صاف و هموار نیست بلکه منفذدار یا تاب خورده‌است (مستغنی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۰۹).

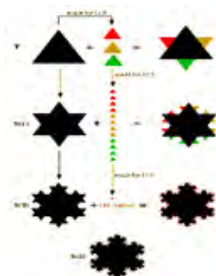


تصویر ۲: ماریچ مستطیل طلایی (محمودی نژاد، ۱۳۸۸: ۲۴۵)

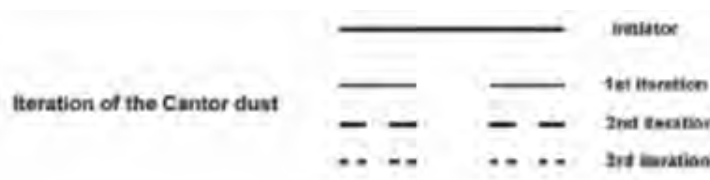
### دو گروه کلی‌تر فراکتال‌ها را می‌توان نام برد:

• **IFS (Iterated Function System):** آن‌ها که توسط الگوهای تکرار شونده به وجود می‌آیند و به سیستم‌های توابع تکرار شونده معروف هستند. فرکتال‌هایی که با آغاز از یک شکل ساده، از راه تکرار آن الگو یا نقشه‌ی ساده به اشکال پیچیده‌تری می‌رسند. فرکتال‌های پایه یا کلاسیک از این گروهند. نمونه‌هایی از این گونه فرکتال‌ها مانند: مجموعه‌ی کانتور<sup>۴</sup> (تصویر ۳)، برف دانه‌ی کخ<sup>۵</sup> (تصویر ۴)، مثلث سرپینسکی<sup>۶</sup> (تصویر ۵)، درخت فیثاغورث (فرکتالی)<sup>۷</sup> (تصویر ۶). این فراکتال‌ها از طریق الگوریتم تکرار تصادفی توسط رایانه نیز رسم می‌شوند. الگوریتم ماشین فتوکپی<sup>۸</sup> (تصویر ۷) یک راه برای رسم آن‌ها از طریق رایانه است. نمونه‌های دیگر: منحنی مینکوسکی، منحنی پئانو، منحنی‌های فضا پرکن.

• **Complex Number:** فرکتال‌هایی که توسط دنباله‌های اعداد مختلط پدید می‌آیند. فرکتال‌های غیر کلاسیک از این دسته‌اند. مانند مجموعه‌های جولیا<sup>۸</sup> (تصویر ۸)، فرکتال مندلبروت<sup>۹</sup> (تصویر ۹)، ال سیستم‌ها<sup>۱۱</sup> (سیستم‌های لیندنمایر) یا بازنوشت موازی. برای ساخت آن‌ها از الگوریتم زمان فرار استفاده می‌شود.



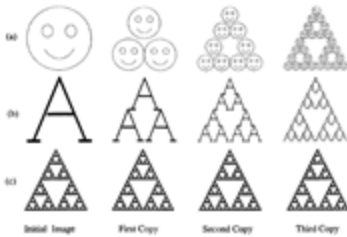
تصویر ۳: مجموعه‌ی کانتور (بویل، ۱۳۹۲: ۲۶)



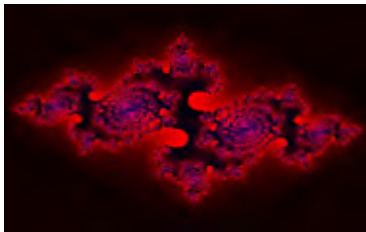
تصویر ۴: مراحل ایجاد برف دانه کخ (فتح‌اللهی، ۱۳۸۶: ۲۷)



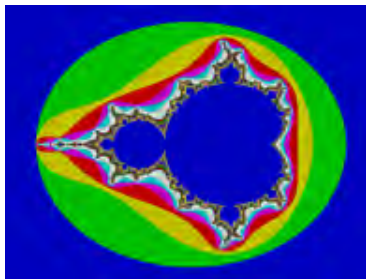
تصویر ۵: مراحل ایجاد مثلث سرپینسکی  
 (فتح‌اللهی، ۱۳۸۶: ۲۸)



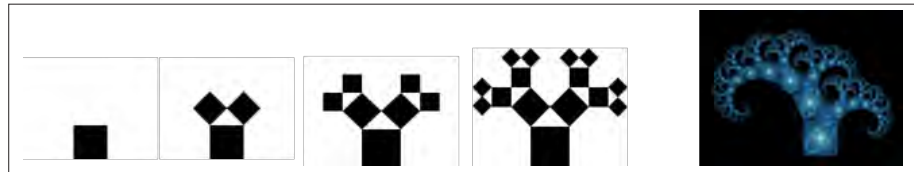
تصویر ۷: الگوریتم ماشین فتوکپی  
 (فتح‌اللهی، ۱۳۸۶: ۳۰)



تصویر ۸: مجموعه‌ی جولیا  
 (فتح‌اللهی، ۱۳۸۶: ۳۱)



تصویر ۹: مجموعه‌ی مندلبرات  
 (فتح‌اللهی، ۱۳۸۶: ۳۳)



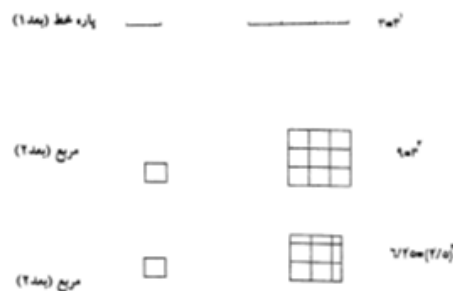
تصویر ۶: درخت فرکتالی و تشکیل آن از به روش الگوهای تکرار شونده

### چهار راه برای ساخت فرکتال

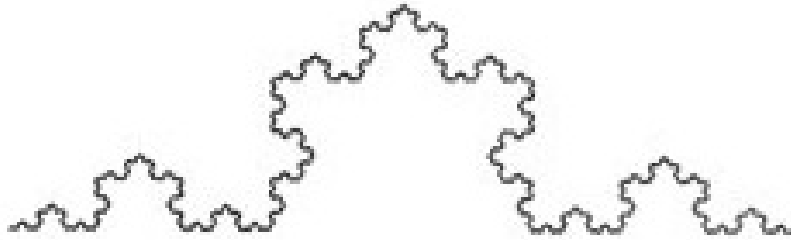
۱. الگوهای تکاملی برای فرکتال‌های گسترش‌یافته: افزودن ساختارهای فرعی تر به ساختار اصلی در هر مقیاس: این روش ایجادکننده‌ی یک جسم چین خورده، پیچ و خم‌دار و بافت‌دار است که هیچ بخشی از آن هموار نیست. این ناهمواری در همه‌ی لبه‌های فرکتال رخ می‌دهد. نمونه: درختان و گیاهان
۲. الگوهای فرسایشی برای فرکتال‌های تحلیل‌رونده: برداشتن زیرساختارها از ساختار اصلی. نمونه: کوه‌ها
۳. ایجاد روزنه‌هایی که مقیاسشان به تدریج کوچک و کوچک‌تر شده و یک دیواره‌ی سوراخ‌دار را به وجود می‌آورند (سرورزاده و همکاران، ۱۳۹۰: ۵۱).
۴. تصادف و اتفاق با سکه انداختن، طاس یا اعداد اتفاقی معرفی می‌شود که در روند تولید فرکتال‌ها می‌تواند استفاده گردد. نمونه، منحنی کخ؛ در هر مرحله یک مثلث در مرکز از هر پاره خط افزوده می‌شود. با هر بار انداختن سکه می‌توان به شیوه‌ی تصادفی تعیین کرد که افزوده شدن منحنی بایستی در بالا یا پایین باشد (بوئل، ۱۳۹۲: ۹۳).

### بعد فرکتال

بعد فرکتال یک معیار ریاضی در تعیین درجه‌ی پیچیدگی بافت در حال نمایش است. ویژگی اصلی بعد فرکتال، اعشاری بودن آن است و همین باعث تمایز شکل فرکتالی از شکل اقلیدسی است که بعد آن عدد صحیح می‌باشد (تصویر ۱۰). نظریه‌ی فرکتال [با داشتن بعد فرکتالی] برای توصیف پیچیدگی در شکل‌ها به کار می‌رود (بلیلان اصل و همکاران، ۱۳۹۰: ۹۱). بعد فرکتال هرچه بیشتر شود (تصویر ۱۱) میزان شگفتی ترکیب شده با نظم زیر بنایی و بیشتر است (مستغنی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۰۹).



تصویر ۱۰: مرحله‌ی نخست با بعد توپولوژیک هندسه‌ی اقلیدسی: پاره خطی به اندازه‌ی یک واحد، مرحله‌ی دوم مربع اقلیدسی، مرحله‌ی سوم بعد فرکتالی است (فتح‌اللهی، ۱۳۸۶: ۳۹)



تصویر ۱۱: منحنی کخ (فتح‌اللهی، ۱۳۸۶: ۳۸)

طول منحنی فرکتال در هر مرحله از فرایند تولید افزایش می‌یابد. در نتیجه منحنی فرکتال که در تعداد مراحل بی‌شماری تولید می‌شود طول نامتناهی خواهد داشت. البته طول منحنی‌های فرکتال در هر مرحله‌ی تولید به یک اندازه افزایش نمی‌یابد. میزان رشد طول منحنی فرکتال خصوصیت متمایز کننده‌ی آن است. سه نوع بعد در رابطه با فرکتال تعریف می‌شود که در این‌جا فقط به نام آن‌ها اشاره و از تعریف ریاضی آن‌ها صرف نظر می‌شود: بعد خودهمانندی  $DS$ ، بعد اندازه‌گیری شده  $d$ ، بعد شمارش خانه  $Db$  (بویل، ۱۳۹۲: ۴۱).

### پیوند هنر و فرکتال

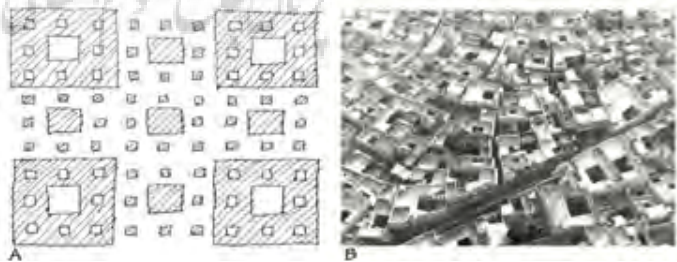
تا این‌جا تعریف تئوری فرکتال به صورت بسیار فشرده و با حذف بحث‌های ریاضی آن بیان شد و البته برای درک مفهوم فرکتال و چگونگی پیوند آن با هنر، لازم بود. اکنون به کاربرد فرکتال در هنر بپردازیم. آشکارترین و بیش‌ترین کاربرد فرکتال در هنر، مربوط به معماری و طراحی شهری و نیز تصاویر هنری رایانه‌ای است. بخش بعدی که از نظر خواهد گذشت شامل بررسی فرکتال در بخش‌هایی از دستاوردهای بشری است که مستقیم یا غیرمستقیم با هنر در ارتباط‌اند.

### در شهرسازی و طراحی شهری

اگرچه معماری فرکتال سبکی جدید به نظر می‌آید، اما شیوه‌ای است برگرفته از طبیعت که از دوره‌های کهن بر جای مانده‌است. از جمله جاهایی که دارای نمونه‌های متعددی از فرکتال هستند: معماری آفریقا، سکونت‌گاه‌های باایلا در جنوب زامبیا، شهر لوگون در کامرون، معابد هند (محمودی نژاد، ۱۳۸۸: ۲۱۷). شهرهای قدیمی و پیش از مدرن، ساختار فرکتالی داشتند و در کلیه‌ی مقیاس‌ها پاسخ‌گوی عملکردهای شهری بودند (تصویر ۱۲). فرم شهرهای سنتی از شبکه‌ی حمل و نقل پیاده تبعیت می‌کند. مدل ذهن سازندگان این شهرها ساختار فرکتالی داشت (سرورزاده و همکاران، ۱۳۹۰: ۲۰). واقعیت این است که ساختار حافظه، فرکتال است. واژه‌ی ((قایق بادبانی)) به تصویر انتزاعی از یک قایق و بادبان اشاره ندارد، بلکه به مجموعه‌ی پیچیده‌ای از ارتباطات درونی ذهن برمی‌گردد که محدود کردن آن‌ها کار دشواری است. ارتباط درونی و مرز پیرامون آن‌ها شبیه مجموعه‌ی جولیا، بی‌نهایت پیچیده است. مجموعه‌ی فرکتال من برای این واژه متفاوت از فرد دیگر است، زیرا مجموعه‌های فرکتالی که واژه‌ها در حافظه‌های آن‌ها جلوه‌گر



می‌شود کمی متفاوت است (بوئل، ۱۳۹۲: ۱۹۳). یک مفهوم کلی در زمینه ویژگی فرکتالی شهرها وجود ساختار به هم پیوسته سلسله مراتبی در مقیاس‌های مختلف می‌باشد. سرزندگی یک شهر به طور مستقیم به شبکه ارتباطی و زیرساخت‌های آن وابسته است، چرا که ساختارهای هندسی شهر مهم‌ترین عامل در تشویق کردن یا دلسرد نمودن مردم در ایجاد تعامل‌های درونی و جابه‌جایی‌ها می‌باشد. شهرهای زنده در نفس خود دارای ویژگی فرکتالی هستند و این ویژگی در کلیه سیستم‌های زنده مشترک است. شهر فرکتالی دارای اجزای منفصل است (سرورزاده و همکاران، ۱۳۹۰: ۲۰). چنانچه شهر موفق را از بالا نگاه کنیم، نقشه‌ی آن آشکارا تصویری از فرکتال خواهد بود. در مقابل، نقشه‌ی یک شهر مصنوعی و غیر کارآمد بسیار منظم است و ساختارهای خرد مقیاس در [طرح] آن وجود ندارد (همان: ۷۹). لزوم تطابق شهر با خودرو و رشد روزافزون جمعیت در سده‌ی بیستم، شهرسازان را به استفاده از هندسه‌ی غیرفرکتال ترغیب کرد. در نتیجه‌ی این امر، مشخصه‌های فرکتالی شهر سنتی از میان رفت و پیامدهای غمباری گریبان‌گیر بافت شهری شد. مهم‌ترین اهمالی که در شهرهای معاصر اتفاق افتاده، وجود نقص در محیط واسط میان خودرو و عابر پیاده است. شهر ایده‌آل لوکوربوزیه با وجود آن که تفکری بزرگ مقیاسانه دارد، اما غیرفرکتالی است. معیار فرکتالی را می‌توان به عنوان شرط اصلی در سنجش موفقیت ساختار هندسی شهرها به کار گرفت. برای داشتن شهر پویا و زنده، بازگشت به شهر فرکتالی الزامی است و برای رسیدن به این هدف، استفاده از طراحی ساختار مویزگی که یک ساختار فرکتالی با داشتن شبکه‌های متعدد ارتباطی است، راهگشا می‌باشد. نکته‌ی دیگر رعایت طراحی شبکه‌ی خرد مقیاس شهری است؛ شبکه‌ای که کانون‌های آن از طریق رابطه‌های دراز و کوتاه به هم مرتبطند. یک شهر پویا [فرکتالی] به دست کم یک فضای سبز گسترده، چند فضای سبز متوسط و تعداد بسیار فضای سبز کوچک‌تر نیاز دارد (همان، ۱۷). شهرهای امروز همانند مثلث سرپینسکی رشد و نمو می‌یابند. برخی قسمت‌های شهری دارای بی‌نظمی‌هایی هستند که نشان می‌دهد شهرها از هندسه‌ی فرکتال متمایزی بهره می‌برند و کارکردهای آن‌ها در درجات و مقیاس‌های متفاوت خود همانند است (محمودی نژاد، ۱۳۸۸: ۲۲۶). یعنی شهرها به صورت لایه‌ای و سلسله‌مراتبی، خودهمانند هستند.



تصویر ۱۲: شمای کلی و پلان یک شهر فرکتالی (سرورزاده و همکاران: ۲۲)

## در طراحی معماری

امروزه شاخه‌ای جدید در علوم به نام بیومتریک ایجاد شده است که به مطالعه‌ی آن چه را که می‌توان از ساختارهای طبیعی استخراج نمود می‌پردازد. روش‌های تبدیل فرآیندهای مختلف موجود در طبیعت، صنعت، جامعه و غیره به الگوریتم‌های رایانه‌ای می‌تواند موضوعات مهمی برای

پژوهش و کاربرد در معماری باشد. این که فرکتال‌ها چه گونه به الگوریتم تبدیل می‌شوند یا این که مفاهیم پیچیدگی، نظریه‌ی سیستم‌ها چه گونه به چرخه‌های الگوریتمیک وارد می‌شوند می‌تواند کارکردهای طراحی معماری بیابد. اعمال پارامترهای مختلف مؤثر بر طرح در الگوریتم‌های طراحی و به صورت چرخه‌ی تکرارشونده تا تولید نتیجه‌ی مطلوب، به عنوان مهم‌ترین ویژگی معماری الگوریتمیک بیان می‌شود. هندسه فرکتال امروزه یکی از اصول مهم طراحی در معماری پارامتریک است. در روش طراحی پارامتریک، برای فرآیند طراحی از الگوریتم استفاده می‌شود. بدین ترتیب که به جای روش‌های معمولی طراحی اشیاء، اطلاعات را فراهم می‌کنیم و این اطلاعات توسط الگوریتم‌ها پردازش می‌شود و در نتیجه هندسه مورد نظر تولید می‌شود. معماری پارامتریک مورد استفاده‌ی معمارانی چون فرانک گه‌ری، زها حدید، و دیگران می‌باشد (مستغنی، و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۰۴). در آثار این معماران پست مدرن و ساختارشنکان کاربست مفهیمی همچون روابط غیرخطی پیچیدگی و فرآیندهای تکرار و تداوم که از کارکردهای هندسه‌ی فرکتال است دیده می‌شود؛ مانند ساختمان اپرای کاردیف اثر زها حدید و موزه‌ی بیلپائو از فرانک گه‌ری (محمودی نژاد، ۱۳۸۸: ۲۰۷). ساختارشنکان ترکیباتی را آفرینند که مقیاس را در همه‌ی محدوده‌ها در برمی‌گیرد. سیمای اصلی فرکتال دامنه‌ی وسیعی از مقیاس است. واسازگرایان ایده‌های کلاسیک مربوط به تعادل و ترکیب سلسله مراتبی را مورد پرسش قرار دادند و در عوض به سوی بهره‌گیری از تصادف در طراحی حرکت کردند. ساخت شکنی به تفسیر ارتباط دارد و برداشتی انتخابی از روی هم قرار دادن شبکه، خطوط و منحنی‌ها خواهد بود. برنارد چومی پیشرو جنبش واسازگرایان بود و پارک دل‌ویت در پاریس نمونه‌ای از طراحی‌های او است (بویل، ۱۳۹۲: ۲۰۸).

اصطلاح دیگری که در زمینه معماری و فرکتال به کار می‌رود، واژه ارگانیک است. این واژه بر اصطلاحی معمارانه دلالت دارد و در برگیرنده ذات است و معنی آن در معماری ارتباط کل و جزء می‌باشد. نماینده معماری ارگانیک، فرانک لوید است (محمودی نژاد، ۱۳۸۸: ۲۰۷). از طرفی، زیبایی‌شناسی جدیدی در حال پدیدار شدن است که برگرفته از روح پیچان و غلطان و موج مانند طبیعت، تپش مولکول‌ها و هندسه ژن‌ها است. بازتاب آن در معماری، جایگزین شدن شکل‌های جدید و جابه‌جایی شکل‌های ایستای جهان کلاسیک است که در آن همه چیز از جمله معماری همچون ماشین بود (مستغنی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۰۴).

### لورنز ولفگانگ در بررسی رابطه میان معماری و فرکتال، ساختمان‌ها را به سه دسته تقسیم می‌نماید:

- ساختمان‌هایی که فاقد هر گونه عمق بصری بوده و از دید او غیر جذاب و کسل کننده هستند
- ساختمان‌هایی بی‌هویت که جزئیات غیرمرتبط به یکدیگر در ابعاد و مقیاس‌های گوناگون ارائه می‌دهند که از نظر وی منجر به اغتشاش خواهد شد.
- ساختمان‌هایی با خاصیت خودمتشابهی که جزئیات آن در هر مرحله و مقیاسی با سایر قسمت‌ها هم‌خوانی دارد؛ یعنی متشکل از تعداد زیادی از اجزای بسیار کوچک که به گونه‌ای با یکدیگر ترکیب شده‌اند که تعداد کم‌تری از اجزای کمی بزرگ‌تر را شکل می‌دهند و این ترتیب، به صورت سلسله مراتبی در کل آن تکرار می‌شود. این یعنی هندسه‌ی فرکتال بیان ساختمان‌های

پیچیده را امکان پذیر می نماید (همان: ۱۱۰).

سینگاروس معتقد است که در فرمهای طبیعی و معماریهای سنتی - بومی، خاصیتی به نام سلسله مراتب مقیاس بندی طبیعی وجود دارد. بدین معنا که میان اجزاء این فرمها، نسبت ثابتی میان گروههای پشت سرهم از نظر اندازه وجود دارد. یک شیء دارای پیوستگی مقیاس بندی، مقیاسهای قابل تمایزی دارد که از بزرگترین تا کوچکترین اندازهی قابل درک بر اساس آن مقیاس مرتب می شود. ساختمانهایی که بر اساس هندسه ی فرکتال و الگوهای آن ساخته شده باشند، بسیار نزدیک به ساختمان های ساخته شده توسط معماران شهودی هستند. مقرنسهای آفریده شده توسط معماران شهودی ایرانی مثال اعلا ی فرکتالها هستند که در جهت ایجاد حس وحدت در کثرت شکل گرفته است (محمودی نژاد، ۱۳۸۸: ۲۱۱).

ریتمهای پیچیده که در سکونت گاههای سنتی وجود دارند با هندسه ی فرکتال دوباره تولید می شوند. طراح، طرح بومی خاص را کپی نمی کند، بلکه ساختار ریتمیک پایه ای را استفاده می کند که سکونت مطلوب و خوشایند می سازد. همان ساختار ریتمیکی که طبیعت را خوشایند جلوه می دهد (بویل، ۱۳۹۲: ۱۹۲).

سولیوان برای نخستین بار قیاسهای زیست شناسانه ی معماری را مطرح کرد. بدین ترتیب سولیوان اساس کارهایش را بر مبنای هندسه ی آزاد همراه با دیگر دیدگاههای زیست شناسانه استوار کرد که بعدها رایت آنها را در کارهایش به اوج رساند. رایت و سولیوان به عنوان معماران فرکتالیست زمان خود شناخته می شوند. البته در آن دوران هنوز علم آشوب و فرکتال بروز نیافته بود. (محمودی نژاد، ۱۳۸۸: ۲۲۰).

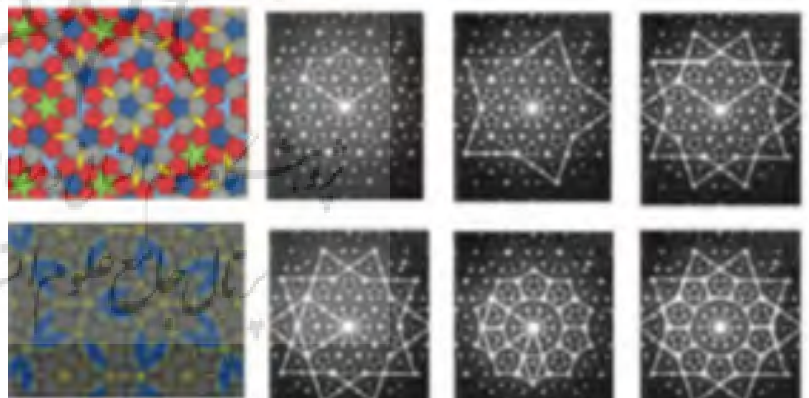
هنگامی که شخص به یک ساختمان نزدیک و سپس به آن وارد می شود، همیشه باید مقیاس کوچک تر دیگری همراه جزئیات جذاب وجود داشته باشد که معنای کلی ترکیب را بیان می کند و این یک ایده ی فرکتال است. هندسه ی فرکتال مطالعه ی شکلی این تکامل جزئیات خودمتشابه از مقیاسهای بزرگ به کوچک است. توزیع فرکتال می تواند در ایجاد ریتمهای پیچیده در طراحی مورد استفاده قرار گیرد. به عنوان نمونه بعد فرکتال کوههای واقع در منظره ی پشت سر یک پروژه معماری می تواند اندازه گیری شود و به عنوان یک راهنما در ریتم فرکتالی طرح پروژه به کار رود. در نتیجه پروژه و منظره ی پس زمینه ی سایت دارای خصوصیات ریتمیک همانند خواهند بود. هم در طراحی و هم در نقد طراحی، هندسه ی فرکتال یک ابزار قابل سنجش را برای ترکیب نظم فراهم می کند. خانه های فرانک لوید رایت یک مثال خوب از تکامل جزئیات از بزرگ تا کوچک است و او اغلب به یک ایده ی مرکزی یا اصلی رجوع می کند که تطبیق این ایده ی مرکزی و طراحی از طبیعت الهام گرفته است (بویل، ۱۳۹۲: ۲۰).

### در هنر و معماری ایرانی - اسلامی

استفاده از نگرشی هم خوان با نگرش فرکتالی چندین سده پیش از مطرح شدن دانش هندسه ی فرکتال در نقوش اسلامی قابل ردیابی است. شباهتهایی که تکثیر فرکتالی با تکثیر در هندسه ی نقشهای اسلامی (به دلیل واگیره پذیر بودن این نقشها) دارد و نیز فرمهای حلزونی (اسپیرال) که در معادلات فرکتالی به دست می آید و شالوده ی اصلی نقوش گردان اسلامی را تشکیل می دهد و از طرفی زیر الگوهای ثابتی که در هنرهای ترسیمی اسلامی دیده

می‌شود و رابطه‌ی فلسفی آن با نظریات آشوب و هندسه‌ی فرکتال که آن را علمی قابل انطباق با نظریه‌ی وحدت در عین کثرت و کثرت در عین وحدت می‌دانند از جمله‌ی این هم خوانشی‌ها است (روح‌الامین، ۱۳۹۲: ۱). هندسه‌ی هنرهای تزئینی کشورهای مسلمان فراتر از هندسه‌ی اقلیدسی است و فقط شامل شکل‌های اقلیدسی نمی‌شود. یکی از پرکاربردترین نقش‌ها در هنر این سرزمین‌ها گره تزئینی است. گره‌ها همان خط‌های تزئینی و نقش‌های هندسی و انتزاعی هستند و به نحو بارزی وحدت در کثرت و کثرت در وحدت را نمایش می‌دهند (تصویر ۱۳). گره خاصیت زایش دارد و از هر گره، گره‌های دیگری به وجود می‌آید. این خاصیت باعث تنوع در انواع گره می‌شود. گره‌ها دارای ویژگی‌های تنوع، کثرت، پیچیدگی، آهنگ، نظم، توازن و استفاده از انواع شکل‌های هندسی می‌باشند و هنرمندان اسلامی علاوه بر برخورداری از دانش ریاضی، همواره از طبیعت به عنوان منبع اصلی الهام بهره گرفته‌اند (بلیلان اصل وهمکاران، ۱۳۹۰: ۸۳). خودهمانندی که از اصول شکل فرکتالی است آشکارا در این هنر دیده می‌شود. همچنین گفتیم که شکل فرکتالی شکلی است که در طبیعت دیده می‌شود و در قالب شکل اقلیدسی نمی‌گنجد. بنابراین ریشه داشتن در طبیعت در گره و فرکتال مشترک است. هنری معتقد است: ((الگوی تزئین‌های هندسی ایران از یک اصل جایگزین استفاده می‌کند که در آن شکل‌های خودهمانند به صورت بازگشتی به کپی‌های کوچک‌تر متناسبی از خود تجزیه می‌شوند. این طرح‌ها که به نام الگوهای گره شناخته می‌شوند، نشان‌دهنده‌ی تناسب موزونی میان عالم صغیر و کبیر و دارای قدرت تفکر فراوانی هستند)) (همان، ۸۸).

معماران سنتی ایرانی همواره یکی از مهم‌ترین منابع الهام خویش را طبیعت قرار می‌داده‌اند. آثار اصیل این معماری حکایت از آن دارد که آنان به خوبی از هندسه‌ای پیچیده و قومی که در ساختار عناصر طبیعی به کار می‌رفته‌است، آگاه بوده‌اند. برداشت معماران ایرانی برداشتی به طور صرف، ظاهری از پدیده‌های طبیعی نبوده‌است، بلکه رجوع و وقوف معماران سنتی به قدر و هندسه و اصولی است که مبنای شکل‌گیری مخلوقات عالم نیز هست. با بررسی هندسه‌ی آرایه‌ی داخلی گنبد مسجد شیخ لطف‌الله می‌توان نشان داد که این آرایه هم از هندسه‌ی فرکتال موجود در



تصویر ۱۳: کاشی کاری نامتناوب با استفاده از الگوی موضعی (بلیلان اصل وهمکاران، ۱۳۹۰: ۸۷)

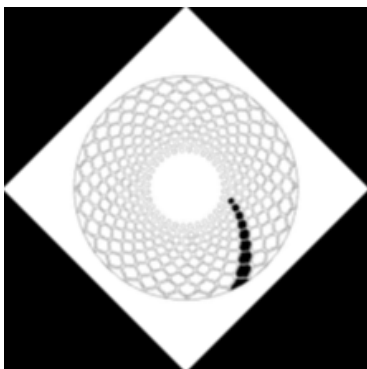
عناصر طبیعی استفاده نموده‌است (مستغنی، و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۰۵). بسیاری از ویژگی‌های فرکتالی در طراحی این مسجد دیده می‌شود: شهود و الهام از طبیعت، نقش‌های هندسی لیمویی و ترنج‌کنگری و ترنج درهم و اسلیمی و شمسه و شاخه‌ها و برگ‌ها. معماران سنتی معماری را در هماهنگی و مکمل طبیعت می‌دانستند. معمار مسجد شیخ لطف‌الله در طراحی آرایه‌ی داخلی گنبد، با الهام از الگوهای طبیعی و هندسه‌ی فرکتال به چنین طرح اعجاب‌آوری رسیده‌است. از جمله عناصر طبیعی که از آن‌ها الهام گرفته شده گل زردک و گل آفتابگردان است (تصویر ۱۴). در هر دو، اجزا از هندسه‌ی فرکتال تشکیل شده‌اند و هدف طراح القای

حس عرفانی گذر از کثرت و رسیدن به حس وحدت بوده است (همان: ۱۱۲). پویایی معماری فرکتال از آن رو است که تغییر موقعیت ناظر و تغییر موقعیت معماری را با هم خواهیم دید. در هندسه‌ی گنبد این مسجد نیز شاهد خواهیم بود که با تغییر موقعیت ناظر نسبت به گنبد، در بیش‌تر موارد شاهد تغییر موقعیت معماری، در عین ثابت بودن ابژه و سوق دادن چشم به مرکزیت گنبد خواهیم بود.

### فرکتال آرت

این شاخه، عرصه‌ی نوینی از کامپیوتر آرت و هنرهای الگوریتمی زائیده‌ی کامپیوتر است که دنیای نوین تصویرسازی‌های هنرمندانه و ریاضی را آفریده است. مهارت در آن، هم نیازمند زیبایی‌شناسی هنرمندانه و هم مستلزم بهره‌مندی از مقادیر فراوانی ریاضیات و هندسه‌ی مدرن فرکتالی است. هندسه‌ی فرکتال هم‌اندیشه‌های نوینی را در ریاضیات گسترش داد و نیز الگوریتم‌ها و برنامه‌های کامپیوتری را برای چاپ و نمایش‌های گرافیکی ارتقا و توسعه داد. استفاده‌های حرفه‌ای و به‌طور کامل هنرمندانه از الگوریتم‌های کامپیوتری در تصویرسازی فرکتالی، به‌عنوان یک گونه‌ی مستقل هنری تحت عنوان رسمی فرکتال آرت به‌آغاز دهه‌ی ۱۹۹۰ و شکل‌گیری نرم‌افزارهای انحصاری خلق و تولید تصاویر فرکتالی باز می‌گردد. این شاخه‌ی هنری از دوباره‌سازی اصول تشکیل دهنده‌ی فرکتال و نمایش دوباره‌ی نتایج محاسبات و وقایع عددی در قالب تصویر ثابت، انیمیشن، موسیقی و یا دیگر مدیوم‌ها و رسانه‌ها خلق می‌شود (گروسی، ۱۳۸۷: ۲۰). مندلیبروت در کتاب هندسه‌ی فرکتال طبیعت گفته است: "هنر هندسی جدید فرکتال، نزدیکی شگفت‌آوری با کارهای شاخص نقاشی یا معماری سبک مدرسه‌ی بوزار<sup>۱۲</sup> را نشان می‌دهد. یک دلیل آشکار به واسطه‌ی آن است که هنرهای بصری کلاسیک، به‌مانند فرکتال‌ها، شامل مقیاس‌های طولی بسیار زیاد و با ارزش خودهمانندی هستند." (بویل، ۱۳۹۲: ۱۷۱). این هنر برای اجرای محاسبات طولانی (که گاه ماه‌ها به‌درازا می‌کشد) و ارزیابی و نمایش محصول و اثر ایجاد شده از رایانه بهره‌می‌گیرد. در واقع فرم اصلی یک اثر فرکتالی، تصویری دخیره شده در یک رایانه است که از یک لحاظ به دلیل نحوه‌ی تولید به هنر فرمولی شباهت دارد و از جهتی نسلی از آثار الگوریتمیک هدفمند محسوب می‌شود (تصویر ۱۶ و ۱۵). این هنر برخوردار از دقت و صراحت منطقی ریاضی و نیز شگفتی ناشی از سیستم‌های آشوبناک و اشتیاق منجر به بیان زیبایی‌شناسی هنری است. وقایع و فعالیت‌های بصری به‌نمایش در آمده در یک اثر فرکتالی بر مبنای ریاضیات پیش‌رفته است.

فرکتال آرت شاخه‌ای از هنرهای دو بعدی است و پیشینه‌ی ورود آن به هنر و نحوه‌ی پذیرش آن به‌عنوان هنر بسیار به‌عکاسی شباهت دارد. تمایز فرکتال آرت از دیگر فرم‌های دیجیتال هنر آرت، نقش بسیار مهم و گسترده‌ی ریاضیات در آن می‌باشد که از طریق زبان‌های برنامه‌نویسی کامپیوتری، هزاران فرمول محاسباتی با صدها پارامتر را در اختیار هنرمند قرار می‌دهد و هر پارامتر خود از تعداد بی‌کرانی ارزش‌های ممکن عددی و غیر عددی برخوردار است. یک تصویر ساده‌ی فرکتالی ممکن است در بردارنده‌ی تریلیون‌ها بار محاسبات ریاضی تکرار شونده باشد که فقط کامپیوتر از پس آن بر می‌آید. البته کامپیوتر در این‌جا فقط نقش ابزاری دارد مانند لنز دوربین یا قلم و رنگ نقاشی. زیبایی‌شناسی و مدیریت محاسبه‌ی جزئیات و انتخاب فرم‌ها و رنگ‌ها و ... همه توسط ذهن خلاق هنرمند انجام می‌شود. (گروسی، ۱۳۸۷: ۲۹). یک بخش اسرارآمیز تصویرهای



تصویر ۱۴: هندسه‌ی آرایه‌ی داخلی گنبد مسجد  
شیخ لطف‌الله (مستغنی، و همکاران، ۱۱۳)



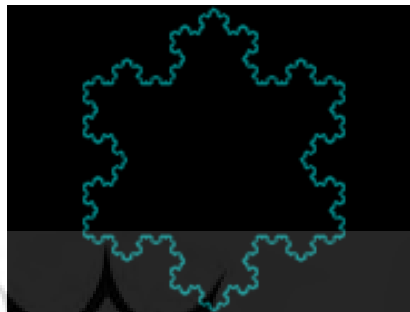
فرکتالی جزئیات نامحدود و بی‌انتهای آن‌هاست چنان که اگر قسمت کوچکی از یک تصویر را انتخاب و بزرگ کنیم دوباره تصویری با جزئیات نامحدود خواهیم داشت. این همان بعد اکتشافی فرکتال آرت است که وقتی به یک تصویر نگاه می‌کنیم می‌دانیم ممکن است تنها فردی باشیم که تا کنون آن را مشاهده کرده‌است.

### ریتم‌های فرکتالی در طراحی و نقاشی

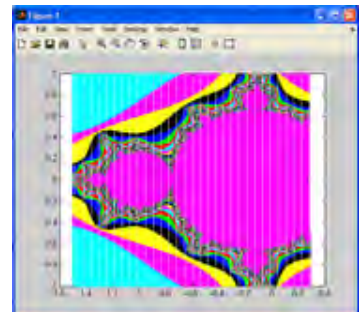
در هنر تمثیلی و در موسیقی نیز ردپای فرکتال قابل پیگیری است. برای ریشه نمونه می‌توان از موندریان نام برد. پیچیدگی‌های طرح‌های موندریان و نیز جکسون پولاک در شکل‌های ارگانیک و طبیعی دارد؛ هنر تمثیلی به دلیل این که طبیعت را به روش‌های گوناگون دوباره تولید می‌کند، مدلی از جریان جزئیات فرکتال را نمایش می‌دهد چرا که طبیعت خود جریانی از جزئیات فرکتال می‌باشد. بیت موندریان نمونه‌ی خوبی در این باره است. در نقاشی‌های اولیه‌ی او از صحنه‌های طبیعی مانند تابلوی درختان نزدیک آل، ریتم فرکتالی واضحی میان درختان جنگل وجود دارد. بعدها در طول دهه‌ی ۱۹۲۰ زمانی که به اکسپرسیونیسم انتزاعی گرایش پیدا کرد، نقاشی‌های او به صورت شکل‌های اقلیدسی در طبیعت درآمدند، اما پس از آن که موندریان به نیویورک رفت کارهایش به مرتبه‌ی جدیدی رسید. ریتم‌هایی که او آفرید، معنای استعاری زندگی را که آرزوی موندریان بود ملموس‌تر کرد. در این آثار او، تعادل پویای نقاشی‌های انتزاعی‌اش به چشم می‌خورد، اما جریانی از جزئیات جذاب زندگی و طبیعت اطراف ما نیز وجود دارد (بویل، ۱۳۹۲: ۱۶۷).

درکی از ریتم فرکتال برای معماران و طراحانی که به دنبال درک بیان پیچیده از طبیعت باشند می‌تواند منبع نامتناهی از ایده‌های طراحی به شمار آید (همان: ۲۰). شبکه‌های پلانی در هماهنگی طرح زمینه‌ی یک ساختمان، یک نقاشی یا یک طراحی گرافیکی مفید هستند و رسم آن‌ها به شکل سنتی اقلیدسی می‌باشند. تصویر ۱۷ شبکه‌ی خط‌ها (پلان) ویلا روتوندا اثر پالادیو را نشان می‌دهد. ریتم‌ها به وسیله‌ی خط‌هایی شکل گرفتند که در دو جهت متعادل هستند. ریتم‌های فرکتال که از ریتم‌های طبیعت به عنوان منبع الهام استفاده می‌کنند می‌توانند شبکه‌های طراحی را به وجود آورند. تصویر ۱۸ یک شبکه‌ی پلانی فرکتال را نشان می‌دهد که برای ریتم فرکتالی پنجره‌های نواری با طرح assisted Mullion و برای بعد  $D = 1/7$  تنظیم شده‌است.

تصویر ۱۹ پلان خانه‌ی ویلیتس کار فرانک لویدرایت را نشان می‌دهد که با یک شبکه‌ی طراحی پلان به دست آمده از اجزای اصلی پلان هماهنگ شده‌است. آشکار است که فرانک لویدرایت از یک شبکه‌ی اقلیدسی مشخص کامل مانند شبکه‌ای که برای ویلا روتوندا به کار رفته‌است، استفاده نمی‌کند. طرح او بیش‌تر طبیعی و فرکتالی است. (در بخش معماری نیز گفته شد که لویدرایت معمار ارگانیک است.)



تصویر ۱۶: رسم دانه‌ی برف کخ است با برنامه‌ی Fractal Studio (فتح‌اللهی، ۱۳۸۶: ۶۵)

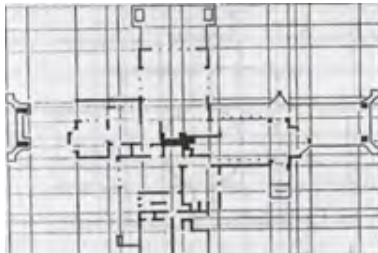


تصویر ۱۵: مجموعه‌ی مندلیبرت تولید شده توسط رایانه (فتح‌اللهی، ۱۳۸۶: ۳۷)

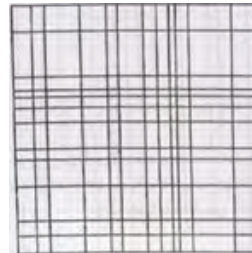
تصویر ۲۰ یک شبکه‌ی پلاتنی فرکتال است که تنها با خط‌هایی با ریتم عمودی نشان داده شده‌است. این شبکه بر پایه‌ی ریتم فرکتال  $D = 1/7$  شکل ۱۸ قرار دارد. این ریتم به خودی خود یک شکل بسیار جالب به وجود می‌آورد (همان: ۱۸۸).



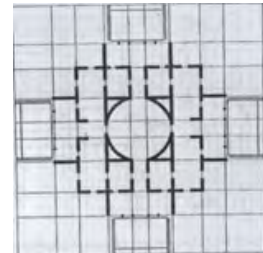
تصویر ۲۰: شبکه‌ی پلاتنی با خطوط ریتمیک عمودی (همان: ۱۸۸)



تصویر ۱۹: شبکه‌ی پلاتنی بر روی عناصر اصلی خانه‌ی ویلیتز فرانک لویدرایت (همان: ۱۸۸)



تصویر ۱۸: شبکه‌ی پلاتنی فرکتالی با بعد  $D = 1/7$  (همان: ۱۸۷)

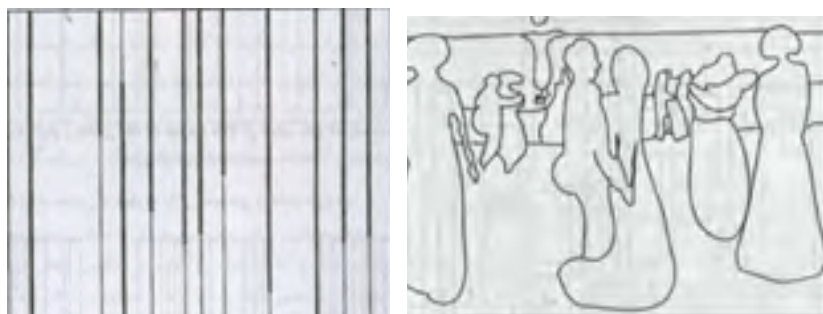


تصویر ۱۷: شبکه‌ی پلاتنی ویلا روتوندا (بوئل، ۱۳۹۲: ۱۸۷)

تصویر ۲۱ طرح کلی نقاشی صدا و تصویر ۲۲ رقص زندگی اثر ادوارد مونش به همراه شبکه‌ی طرح ریزی عمودی بر پایه‌ی جلوه‌های شاخص آن‌ها بر روی این تصویرها را نشان می‌دهد. مونش آشکارا پیچیدگی‌های ریتم‌های فرکتال طبیعی را درک کرد (همان: ۱۸۹).



تصویر ۲۱: دیاگرام نقاشی صدا از ادوارد مونش و شبکه‌ی پلاتنی عمودی که روی آن قرار دارد (همان: ۱۸۹)



تصویر ۲۲: دیاگرام نقاشی رقص زندگی از ادوارد مونش و شبکه‌ی پلاتنی عمودی که روی آن قرار دارد (همان: ۱۹۰)

شکل ۲۳ یک مقیاس از خطوط پلانی عمودی را نشان می‌دهد. در هر مربع یازده خط توزیع شدند؛ بنابراین تراکم بصری برابر خواهد بود. با توجه به بعد هر یک، تنوع بصری که از چپ به راست با افزایش بعد فرکتال شکل می‌گیرد، این موضوع مطرح می‌شود که شاید خطوط پلانی و فرکتال در کنترل دامنه‌ی کنتراست میان نظم و شگفتی در یک طرح گرافیک مفید باشد.



شکل ۲۳: سه طرح شبکه‌ی پلانی فرکتالی با توزیع فرکتالی از چپ به راست  $D=1/10$ ،  $D=1/3$ ،  $D=1/7$  (همان: ۱۹۰)

یک مقیاس گرافیکی از بعد فرکتال که در حال افزایش نیز می‌تواند برای تخمین بصری بعد فرکتال ریتم‌های استفاده شده به وسیله‌ی نقاشانی مانند مونش به کار رود. در معماری بومی یک مخلوط فرکتال از نظم و شگفتی وجود دارد. طبیعت در جریان طبقه‌بندی شده‌ی خود همانند از ریتم‌های فرکتالی منظم شده است.

### نتیجه

هندسه و ریاضی فرکتال از دل آشوب‌ها و بی‌نظمی‌های هر چند به ظاهر بی‌قاعده‌ی طبیعت بنیاد گرفته شد، برای پاسخ‌گویی بسیاری از پرسش‌های حل نشده‌ی برخی از دانش‌های بشری، دریچه‌ای تازه گشود و در این راستا، شاخه‌های گوناگون هنری نیز بی‌بهره نبودند. در آفرینش‌های هنری، هنرمندان سالیان دور و دراز، آن چه را که با اندیشه و احساس خود دریافت می‌کردند از عرصه‌ی ذهنیت به دنیای دیدنی و عینی آوردند و آثاری آفریدند که در دنیای مدرن و پس از تلاش دانشمندی چون بنوا مندلبروت و پایه‌گذاری دانش فرکتال، با داشتن ویژگی‌های فرکتالی، در دسته‌ی پدیده‌های فرکتالی می‌گنجد؛ تا جایی که نه تنها هنر آن‌ها (که در زمان خود شاید بیش‌تر به دیدنی‌های آسایش‌بخش زندگی به آن‌ها نگریسته می‌شد تا یک آفرینش هنری)، که زیست بوم و پرستش‌گاه و طرح شهرهای آن‌ها هم فرکتالی بود. این را در نسبت‌های طلایی یونانی و تا اسلیمی‌های ایرانی که سابقه‌اش به ساسانیان و پیش‌تر برمی‌گردد، نمایان است و هر دو دسته نماینده طرز فکر برگرفته شده از طبیعت مردمان آفریننده خود بودند و هنر فرکتال گذشته‌ای تاریخی هم‌پای آفرینندگی انسان در هنر دارد.

هنرمندان همواره و در هر دوره‌ای فن‌آوری زمانه‌ی خود را به عنوان وسیله‌ای جهت آفرینندگی نوین و تازه‌تر به کار برده‌اند. دانش نوین فرکتال نیز به هنر نوین راه یافت؛ در طراحی‌های شهرهای نوین و معماری‌های امروزی (معماران پست مدرن و ساختار شکن)، در نقاشی و موسیقی، و سرانجام در شاخه‌ی تازه‌تر هنرهای رایانه‌ای. سودمندی‌های دانش فرکتال و به دنبال آن معماری پارامتریک برای معماری نوین شامل استفاده از هندسه‌ای به جز هندسه‌ی اقلیدسی، جست‌وجوی فرم‌های جدید و پیچیده، امکان بهره‌مندی از ابزار رایانه و آفرینش طرح‌های تازه‌تر، در همان حال که رایانه باعث حذف کارهای تکراری می‌شود.

در نهایت باید گفت که دانش فرکتال امکانی در اختیار هنرمند است برای آفرینش طرح‌هایی بس نوین و باشکوه که با روان طبیعت گرای آدمی همسو است. فرکتال آفرینش همه گونه طرح غیر تکراری را برای هنرمند امکان پذیر می‌کند. آن چه بیش از هر چیزی با مطالعه‌ی فرکتال‌ها و نقش آن‌ها در طبیعت و پیوندشان با هنر به ذهن می‌رسد این پرسش است که آیا بهتر نیست هنرمندان هر اقلیم و فرهنگی، آفرینش‌های هنری پیشینیان خود را این بار از منظر فرکتال‌ها، دوباره خوانی کنند و به دنبال آفرینشی هم راستا با زیست بوم خود، اما منطبق با علاقه و دانش زمانه‌ی خود باشند تلاش برای یافتن پاسخ این پرسش خود می‌تواند موضوع پژوهشی دیگر قرار بگیرد.

#### پی‌نوشت:

۱. Chaos: از ریشه‌ی یونانی خائوس، به معنای در هم ریختگی، آشفتگی و بی‌نظمی و هم ارز واژه‌ی تلاطم در علم مکانیک (روح‌الامین، ۱۳۹۲: ۸).
۲. Stationary.
۳. Self-similarity مثلث و مربع خاصیت خود متشابهی یا خود همانندی دارند؛ اما دایره، این ویژگی را ندارد، زیرا از کنار هم قرار دادن به عنوان نمونه ۳ دایره نمی‌توان به دایره بزرگ‌تر رسید. با این که تمام دایره‌ها خاصیت تشابه را دارند، اما خود متشابه نیستند. در بررسی خود متشابهی یک شکل، یک جزء پایه داریم که اجزاء بزرگ‌تر شکل، از ترکیب  $n$  تا از آن جزء به وجود می‌آیند.
۴. Cantor Set (۱۸۸۳)
۵. Koch Snowflake (۱۹۰۴)
۶. Sierpinski Gasket (۱۹۱۹)
۷. (Pythagoras tree fractal)
۸. Copy Machine
۹. Julia Sets
۱۰. Mandebrot Set
۱۱. L- Systems
۱۲. برجسته‌ترین مدرسه‌ی عالی هنرهای زیبا که در پاریس قرار دارد و در ۱۶۴۸ توسط شارل لبرن تأسیس شد.

#### منابع:

- افکاری، الهام (۱۳۸۳). روش‌های کنترل آشوب در سیستم‌های دینامیکی. تخصیلات تکمیلی دانشگاه شیراز
- الوانی، سید مهدی، دانایی فرد، حسن (۱۳۸۴). تئوری نظم در بی‌نظمی و مدیریت. تهران: صفار
- بلیان اصل، لیدا؛ ستارزاده، داریوش؛ خورشیدیان، ساناز و نوری، مریم (۱۳۹۰). بررسی ویژگی‌های هندسی گره‌ها در تئزین‌های اسلامی از دیدگاه هندسه‌ی فرکتال. شهر ایرانی اسلامی، ۱۳۹۰، (۶)، ۸۵-۹۵
- بویل، کارل (۱۳۹۲). هندسه‌ی فرکتال در معماری و طراحی. ترجمه‌ی محمدعلی اشرف گنججوئی، حسین فلاح، چاپ دوم، کرمان: دانشگاه شهید باهنر کرمان
- حاجی کریمی، بابک (۱۳۸۹). نظریه‌ی آشوب و کاربرد آن در تصمیم‌گیری‌های سازمانی. فصلنامه‌ی علوم رفتاری، سال سوم (۲)، ۳۱-۴۶
- روح‌الامین، احسان (۱۳۹۲). بررسی تطبیقی هندسه‌ی فرکتال و هندسه‌ی نقوش اسلامی. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی هنر اسلامی دانشگاه هنر اصفهان
- سرورزاده، کورش؛ اشتیاقی، علیرضا (۱۳۹۰). تئوری شبکه‌ای و شهر فراکتال. چاپ اول، جهرم: دانشگاه آزاد اسلامی
- شجاع، احمد، (۱۳۷۳). مقدمات تئوری آشوب و مجموعه‌های حد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه کرمان
- شفیعی، علیرضا (۱۳۷۴). مطالعه‌ی فرکتال‌ها و کاربرد آن‌ها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه اصفهان
- فتح‌اللهی، نوشین (۱۳۸۶). فرکتال‌ها و کاربرد آن در کامپیوتر. پایان‌نامه‌ی کارشناسی نرم افزار دانشگاه آزاد همدان
- فقیه، نظام‌الدین (۱۳۸۱). نظریه‌ی فرکتال در گشایش رموز رشد، توسعه و تحول در سیستم‌های سازمان مند و بغرنج. مجموعه مقاله‌های اولین همایش معرفی و کاربرد مدل‌های ناخطی پویا و محاسباتی در اقتصاد. تهران: دانشگاه علامه طباطبائی. ۹۱-۱۲۰.
- گروسی، مهرداد. فراکتال آرت. آینده‌ی خیال، ۱۳۸۷، (۹)، ۲۰-۳۰
- محمودی‌نژاد، هادی (۱۳۸۸). معماری زیست مینا. چاپ اول، تهران: هله‌لطحان
- مستغنی، علیرضا و علیمرادی، محسن (۱۳۹۵). واکاوی کاربرد هندسه‌ی طبیعت و فراکتال در معماری پارامتریک با بررسی آرایه‌ی داخلی مسجد شیخ لطف‌الله. نامه‌ی معماری و شهرسازی، ۱۳۹۵، (۱۶)، ۱۰۳-۱۲۱