



پوهنتون سرپل

مجله علمی - تحقیقی ارمان انبیر

سال دوم، شماره دوم (مسلسل چهارم) ۱۴۴۷ هجری قمری

بررسی مفاهیم ریاضی فرکتال‌ها و نقش آن در معماری

پوهنمل نیکزاد جمالی^۱ و جمعه خان غفوری^۲

چکیده

هندسه فرکتال، شاخه‌ای نوین از ریاضیات، چارچوبی توانمند برای تحلیل و توصیف ساختارهای پیچیده، خود-متشابه و تکرارشونده طبیعت است. ساختارهایی که از درختان و کوه‌ها گرفته تا ابرها و بافت‌های زیستی انسان مشاهده می‌شوند، با هندسه اقلیدسی قابل توضیح کامل نیستند و درک آن‌ها نیازمند مفاهیم فرکتال‌ها و ریاضیات مربوط، از جمله خود-متشابهی، بعد فرکتالی و پروسه‌های غیرخطی است. این تحقیق با روش توصیفی، تحلیلی و مروری، مفاهیم ریاضی فرکتال‌ها را بررسی کرده و نقش فرکتال‌ها را در شکل‌دهی ساختارهای معماری و ساختارهای فضایی شهری تحلیل می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از اصول فرکتالی در طراحی ساختمان‌ها، نماها، فضاهای عمومی و ساختارهای شهری، باعث ایجاد فضاهایی می‌شود که هم از نظر ساختاری منظم و هماهنگ‌اند و هم تجربه حضور در آن‌ها برای انسان لذت‌بخش، جذاب و طبیعی است. به‌کارگیری هوشمندانه فرکتال‌ها، تنوع و هماهنگی در فضاها ایجاد می‌کند، هویت شهری را تقویت می‌سازد و کیفیت منظر شهر را بالا می‌برد. هدف تحقیق تحلیل و برجسته‌سازی مفاهیم ریاضی فرکتال‌ها و نقش‌شان در ساختارهای معماری بوده نتایج این تحقیق‌هاکی از آن است که مفاهیم بنیادی ریاضی بخصوص خود-متشابهی، بعد فرکتالی و

^۱ عضو کادر علمی دیپارتمنت ریاضی پوهنخی تعلیم و تربیه پوهنتون سرپل؛

^۲ محصل سمستر هشتم دیپارتمنت ریاضی.

ایمیل آدرس نویسنده مسئول: nikzadjamali@gmail.com

شماره تماس: ۰۷۸۰۱۹۲۰۲۱

مقیاس پذیری برای درک و تحلیل ساختارهای پیچیده طبیعی و معماری ضروری بوده و از اهمیت زیاد برخوردار می‌باشد.

کلمات کلیدی: بُعد فرکتالی، خود-متشابه، ریاضیات، معماری، هندسه فرکتالی.

مقدمه

هندسه فرکتال به‌عنوان یکی از شاخه‌های نوین ریاضیات، چارچوبی علمی برای توصیف ساختارهای پیچیده، خود-متشابه و چندمقیاسی طبیعت فراهم می‌سازد. بسیاری از پدیده‌های طبیعی، برخلاف اشکال ساده و منظم هندسه اقلیدسی، دارای الگوهایی هستند که در عین بی‌نظمی ظاهری، از منظمی داخلی و تکرار شونده پیروی می‌کنند. همین ویژگی سبب شده است تا در سال‌های اخیر، توجه به این نوع هندسه در حوزه‌های مختلف علمی، به‌ویژه معماری، افزایش یابد. با این حال، بخش قابل توجهی از این توجه، بیشتر معطوف به جنبه‌های ظاهری و الهام‌گیری شکلی بوده و لایه‌های عمیق‌تر و بنیان‌های ریاضی این هندسه کمتر به‌گونه جدی و تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است.

در حالی که معماری همواره در پی ایجاد تعادل میان زیبایی، کارایی و هماهنگی با طبیعت بوده است، اتکای بیش از حد به الگوهای خطی و ساده در برخی رویکردهای معاصر، موجب شده است تا پیچیدگی‌های ساختاری طبیعت به‌طور کامل در فضاها و معماری انعکاس نیابد. این امر نشان‌دهنده نیاز به روش‌هایی است که بتوانند این پیچیدگی‌ها را نه تنها در سطح ظاهری، بلکه در سطح مفهومی و تحلیلی تبیین نمایند. در این میان، هندسه فرکتال با ارائه مفاهیمی چون خود-متشابهی، بُعد فرکتالی و مقیاس‌پذیری، ابزار مناسبی برای چنین تبیینی فراهم می‌سازد.

با وجود تحقیقات انجام‌شده در زمینه کاربرد فرکتال‌ها در معماری، هنوز نوعی خلأ در پرداختن نظام‌مند به مفاهیم بنیادی ریاضی این هندسه و نقش آن‌ها در تحلیل ساختارهای معماری احساس می‌شود. به بیان دیگر، اگرچه به حضور و کارکرد فرکتال‌ها در معماری اشاره شده است، اما تمرکز مستقیم و عمیق بر چگونگی این مفاهیم ریاضی و تأثیر آن‌ها بر درک فضا، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این موضوع، ضرورت انجام تحقیقی را برجسته می‌سازد که به‌صورت مشخص، بنیان‌های ریاضی هندسه فرکتال را در مرکز توجه قرار دهد.

بر این اساس، تحقیق حاضر با تأکید محوری بر مفاهیم بنیادی ریاضی در هندسه فرکتال، در پی آن است تا این مفاهیم را به‌صورت روشن، منسجم و تحلیلی تبیین نموده و نقش آن‌ها را در درک و تحلیل ساختارهای معماری بررسی نماید. در واقع، تمرکز اصلی این تحقیق نه صرفاً بر کاربردهای ظاهری فرکتال‌ها، بلکه بر فهم عمیق مبانی ریاضی آن‌ها به‌عنوان بنیانی برای تحلیل فضایی

در معماری است.

در این راستا، با مرور و تحلیل منابع علمی موجود، تلاش شده است تا ضمن اشاره اجمالی به دیدگاه‌های پیشین، چارچوبی مفهومی برای پیوند میان ریاضیات فرکتال و معماری ارائه گردد. اهمیت این رویکرد از آنجا ناشی می‌شود که درک دقیق مفاهیم ریاضی، می‌تواند زمینه تحلیل‌های عمیق‌تر، طراحی آگاهانه‌تر و توسعه رویکردهای علمی در معماری را فراهم سازد.

در مجموع، این تحقیق با رویکردی توصیفی و مبتنی بر مطالعه منابع معتبر، می‌کوشد با برجسته‌سازی بنیان‌های ریاضی هندسه فرکتال، گامی در جهت تقویت نگاه تحلیلی به معماری برداشته و زمینه‌ای برای تحقیقات کاربردی آینده فراهم نماید.

بیان مسئله

معماری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نمایش‌های تمدن بشری، همواره در پی ایجاد تعادل میان زیبایی، کارایی و هماهنگی با طبیعت بوده است. با این حال، در بسیاری از طراحی‌های معاصر، استفاده غالب از هندسه اقلیدسی و الگوهای خطی سبب شده است که پیچیدگی‌ها و نظم‌های پنهان موجود در طبیعت به‌درستی در فضاهای معماری بازتاب نیابد. این رویکرد، در مواردی منجر به شکل‌گیری محیط‌هایی شده است که با وجود کارکرد فنی، از نظر زیباشناسی، روانی و سازگاری با محیط طبیعی، محدودیت‌هایی داشته باشد.

هندسه فرکتال به‌عنوان بخش جدید ریاضیات، این توانایی را دارد که ساختارهای پیچیده، خود-متشابه و تکرارشونده طبیعت را توصیف کند؛ ساختارهایی که در مقیاس‌های مختلف، ضمن حفظ کلیت، دچار تغییرات ظریف می‌شوند. با وجود آن‌که تحقیقات مختلفی به کاربرد فرکتال‌ها در معماری، زیبایی‌شناسی و طراحی پایدار پرداخته‌اند، در بیشتر این مطالعات تمرکز اصلی بر جنبه‌های ساختاری و الهام‌گیری ظاهری بوده و مفاهیم ریاضی بنیادی فرکتال‌ها کمتر به‌صورت تحلیلی و نظام‌مند برجسته شده است.

بر این اساس، مسئله اصلی در این تحقیق، نه صرفاً کاربرد فرکتال‌ها در معماری، بلکه عدم تبیین روشن و تحلیلی مفاهیم ریاضی بنیادین فرکتال‌ها و نقش آن‌ها در درک و شکل‌گیری ساختارهای معماری است. به بیان دیگر، در حالی‌که مفاهیم ریاضی همچون خود-متشابهی، بُعد فرکتالی و مقیاس‌پذیری، اساس این هندسه را تشکیل می‌دهند، جایگاه آن‌ها در تحلیل معماری و نحوه تأثیرگذاری‌شان بر سازمان فضایی، کمتر به‌صورت متمرکز و نظام‌مند مورد بررسی قرار گرفته است.

در عین حال، اگرچه موضوعاتی مانند کاربردهای عملی، روش‌های طراحی مبتنی بر فرکتال و

مطالعات موردی می‌توانند در تکمیل این حوزه نقش مهمی ایفا کنند، پرداختن جامع به این ابعاد نیازمند تحقیقات تخصصی و مستقل است. از این رو، تحقیق حاضر با تمرکز مشخص بر بررسی و تبیین مفاهیم ریاضی هندسه فرکتال، می‌کوشد زمینه‌ای نظری و تحلیلی فراهم آورد که بتواند به‌عنوان پایه‌ای برای مطالعات کاربردی و طراحی محور در آینده مورد استفاده قرار گیرد.

هدف تحقیق

هدف اصلی این تحقیق، تبیین و برجسته‌سازی مفاهیم بنیادی ریاضی در هندسه فرکتال و بررسی نقش این مفاهیم در درک و تحلیل ساختارهای پیچیده معماری است؛ به‌گونه‌ای که این مفاهیم، نه صرفاً به‌عنوان ابزارهای توصیفی، بلکه به‌عنوان بنیان‌های تحلیلی در درک و تفسیر فضاهای معماری مطرح شوند. این تحقیق می‌کوشد تا با تمرکز بر مفاهیمی چون خود-متشابهی، بُعد فرکتالی، تکرار در مقیاس‌های مختلف و رفتارهای غیرخطی، چارچوبی نظری برای فهم ارتباط میان ریاضیات فرکتال و معماری ارائه نماید. در کنار هدف اصلی، اهداف فرعی تحقیق عبارت‌اند از:

- تشریح و تبیین نظام‌مند مفاهیم ریاضی فرکتال‌ها؛
- تحلیل نقش این مفاهیم در توضیح ساختارهای پیچیده طبیعی؛
- بررسی ارتباط نظری میان مفاهیم ریاضی فرکتال‌ها و سازمان فضایی در معماری؛
- فراهم‌سازی زمینه نظری برای تحقیقات کاربردی آینده در حوزه معماری مبتنی بر فرکتال.

اهمیت و ضرورت تحقیق

ویژگی‌های هندسه فرکتالی سبب شده است که در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای در بخش معماری به خود جلب کند، به‌کارگیری اصول فرکتالی در معماری می‌تواند زمینه‌ساز طراحی ساختمان‌هایی باشد که از نگاه زیبایی‌شناسی، کارایی انرژی، استفاده مؤثر از فضا و سازگاری با محیط‌زیست، عملکرد بهتری داشته باشند. الگوهای فرکتالی که در ساختار درختان، کوه‌ها، ابرها و بسیاری از پدیده‌های طبیعی مشاهده می‌شوند، نشان می‌دهند که طبیعت بر بنیاد نظم‌های ریاضی پیچیده اما هماهنگ شکل گرفته است. استفاده از این نظم‌ها در معماری، امکان ایجاد فضاهایی را فراهم می‌سازد که علاوه بر کارکرد مناسب، با طبیعت نیز هماهنگی بیشتری داشته باشند. تحقیقات نشان داده است که چنین فضاهایی می‌توانند تأثیر مثبت بر آرامش روانی و رفاه روحی انسان‌ها داشته باشند.

از سوی دیگر، ضرورت دارد که ریاضیات به‌کاررفته در اشکال و ساختارهای فرکتالی به‌صورت روشن و برجسته تبارز یابد تا نقش بنیادی ریاضی در شکل‌گیری این الگوها آشکار گردد. برجسته‌سازی مفاهیم ریاضی مانند خود-متشابه، بُعد فرکتالی و پروسه‌های تکرارشونده، می‌تواند راه را برای محققان

دیگر هموار سازد تا کاربردهای ریاضی را در هندسه فرکتالی و به‌ویژه در معماری، عمیق‌تر بررسی و توسعه دهند. با وجود نیاز روز افزون به بهره‌گیری از روش‌های نوین علمی در طراحی معماری پایدار، بررسی هندسه فرکتال و تحلیل‌های ریاضی مرتبط با آن در مطالعات داخلی هنوز جایگاه شایسته‌ای نیافته است. این تحقیق می‌کوشد گامی هرچند کوچک در جهت معرفی علمی هندسه فرکتال، توضیح مفاهیم ریاضی آن و نشان دادن نقش مؤثرش در معماری بردارد و زمینه‌ای برای تحقیقات گسترده‌تر در این بخش فراهم سازد.

سوال اصلی تحقیق

مفاهیم بنیادی ریاضی در هندسه فرکتال‌ها چگونه قابل تبیین بوده و این مفاهیم چه نقشی در درک ساختارهای پیچیده در معماری دارند؟

سؤالات فرعی تحقیق

۱. مهم‌ترین مفاهیم ریاضی در هندسه فرکتال‌ها (مانند خود-متشابهی، بُعد فرکتالی و مقیاس‌پذیری) کدام‌اند و هر یک چگونه تعریف و تبیین می‌شوند؟
۲. این مفاهیم ریاضی چگونه می‌توانند به درک بهتر ساختارهای پیچیده و چندلایه در طبیعت کمک کنند؟
۳. میان مفاهیم ریاضی فرکتال‌ها و ویژگی‌های شکلی و فضایی در معماری چه نوع ارتباط نظری قابل تبیین است؟
۴. برجسته‌سازی مفاهیم ریاضی فرکتال‌ها چه نقشی در تقویت نگاه تحلیلی به معماری دارد؟
۵. تبیین مفاهیم ریاضی فرکتال‌ها چگونه می‌تواند زمینه‌ساز توسعه رویکردهای کاربردی در طراحی معماری در تحقیقات آینده باشد؟

پیشینه تحقیق

فرشیدراد و همکاران (۱۴۰۳) در تحقیق خود نشان داده‌اند که نقش‌ها، اجزای تزئینی و ترکیب‌بندی فضایی مسجد نصیرالملک با اصول هندسه فرکتال سازگاری چشم‌گیر دارد. یافته‌های این تحقیق بیان می‌کند که الگوهای تکرارشونده در مقیاس‌های مختلف، که بیانگر ویژگی خود-متشابه (شباهت جزء به کل) و خود-سازمان‌یابی ساختاری هستند، نقش مهمی در شکل‌گیری ساختار کلی و تزئینات معماری این بنا ایفا کرده‌اند. بر اساس نتایج تحقیق، کیفیت فرکتالی مسجد نصیرالملک را می‌توان از طریق الگوهای مبتنی بر اصول و روابط هندسی (رویکرد هندسه‌مدار) به‌گونه منظم و قابل تحلیل بررسی نمود. ناصری و همکاران (۱۴۰۱) با بررسی الگوهای فرکتالی و بیومورفیک در طراحی محیط‌های باز، به این نتیجه رسیدند که استفاده از این الگوها سبب بهبود پایداری محیطی، افزایش

کیفیت زیستی و ارتقای سلامت روانی ساکنان می‌گردد. نتایج تحقیق آنان نشان می‌دهد که الهام‌گیری از ساختارهای تکرارشونده طبیعت، نقش مؤثری در طراحی فضاهای هماهنگ با محیط‌زیست دارد. صافی و همکاران (۱۴۰۲) در تحقیقی کیفی نشان دادند که به‌کارگیری الگوهای نورگیری مبتنی بر هندسه فرکتال، باعث افزایش آسایش دیداری و بهبود درک فضایی در ساختمان‌ها می‌شود. یافته‌ها تأکید می‌کند که این رویکرد می‌تواند آرامش روانی کاربران فضاهای معماری را نیز تقویت نماید. فرشیدراد و همکاران (۱۳۹۹) با تحلیل تطبیقی ساختارهای معماری، بیان کردند که اصولی چون خود-متشابهی، خودسازمان‌دهی و وحدت در کثرت، چارچوبی معتبر برای تحلیل فرکتالی ساختارهای معماری فراهم می‌سازد. نتایج آنان نشان می‌دهد که این اصول در معماری سنتی و تاریخی به‌گونه گسترده قابل مشاهده است. خیرات و شاطرزاده (۱۳۹۷) با بررسی نظری هندسه فرکتال در معماری و طبیعت، به این نتیجه رسیدند که استفاده از این هندسه می‌تواند به ایجاد فضاهایی منجر شود که هویت طبیعی قوی‌تر و هماهنگی بیشتری با محیط پیرامون داشته باشند. این تحقیق بر ضرورت توجه معماران به اصول فرکتالی تأکید دارد. دلخوش (۱۳۹۶) با تمرکز بر بُعدهای کسری فرکتال، نشان داد که این ابزارهای ریاضی امکان تحلیل دقیق‌تر اشکال نامنظم طبیعت را فراهم می‌سازد. نتایج تحقیق وی بیانگر آن است که مفاهیم ریاضی فرکتال نقش کلیدی در درک و تحلیل ساختارهای پیچیده دارند. کرمی مفرد رهام (۱۳۹۶) بیان می‌کند که معماران در دوره‌های مختلف تاریخی، به‌گونه ناخودآگاه از الگوهای خود-متشابه الهام گرفته‌اند. یافته‌های او نشان می‌دهد که ساختارهای فرکتالی، از دیرباز به‌عنوان ابزاری تحلیلی در بررسی ساختارهای معماری مورد استفاده بوده است. مبینی و فتح‌الهی (۱۳۹۳) نشان دادند که هندسه فرکتال، به‌عنوان شاخه‌ای نوین از ریاضیات، توانایی بازنمایی بی‌نظمی‌های منظم طبیعت را دارد. نتایج آنان بیان می‌کند که این هندسه ابزار مؤثری برای پیوند میان ریاضیات، هنر و معماری فراهم می‌سازد. رضایی (۱۳۹۴) تأکید می‌کند که استفاده از هندسه فرکتال در معماری طبیعت‌گرا، امکان الگوگیری علمی و منسجم از طبیعت را فراهم می‌نماید. یافته‌های وی نشان می‌دهد که اصل تکرار متجانس از جزء تا کل، نقش مهمی در ایجاد هماهنگی میان ساختار معماری و نظم طبیعی دارد. خاکپور و همکاران (۱۳۹۴) با بررسی نمونه‌های معماری سنتی و معاصر، نشان دادند که بسیاری از بناها دارای ویژگی‌های فرکتالی هستند. نتایج تحقیق آنان بیانگر آن است که به‌کارگیری اصول فرکتال می‌تواند موجب ارتقای کیفیت زیبایی‌شناسی و دینامیکی فضاهای معماری گردد. قمی‌شی و همکاران (۱۳۹۳) در تحقیقی پیرامون معماری پایدار، نتیجه گرفتند که هندسه فرکتال می‌تواند به کاهش مصرف انرژی، بهبود کیفیت فضایی و افزایش تعامل انسان با طبیعت کمک نماید. این تحقیق بر نقش فرکتال‌ها در ایجاد معماری پایدار تأکید دارد. نقی‌راد و جمشیدی (۱۳۹۳) نشان دادند که هندسه فرکتال می‌تواند به‌عنوان الگویی مؤثر در سامان‌دهی ساختار فضایی شهرها به کار رود. یافته‌های آنان بیان می‌کند که این هندسه نقش مهمی در ایجاد هویت شهری و نظم فضایی ایفا می‌نماید. داداش‌وند (۱۳۹۳) با تحلیل

مفاهیم فرکتال در معماری معاصر، نتیجه گرفت که اصول خود-متشابهی و نظم دینامیکی می‌تواند به افزایش هماهنگی و زیبایی در بناها منجر شود. وی تأکید می‌کند که هندسه فرکتال پلی میان ریاضیات و معماری ایجاد می‌نماید.

روش تحقیق

این تحقیق از نوع کتابخانه‌ای بوده و با رویکرد توصیفی-تحلیلی و بر مبنای مطالعه مروری نظام‌مند انجام شده است. چارچوب کلی تحقیق بر تحلیل مفاهیم ریاضی هندسه فرکتال و تبیین ارتباط آن‌ها با معماری استوار می‌باشد.

در مرحله نخست، منابع علمی مرتبط شامل کتاب‌ها، مقالات منتشرشده در مجلات معتبر علمی و تحقیقات پیشین، بر اساس معیارهایی چون ارتباط مستقیم با موضوع، اعتبار علمی نویسندگان، تازگی و دقت محتوا انتخاب گردید. سپس مفاهیم کلیدی هندسه فرکتال، از جمله خود-متشابهی، بُعد فرکتالی، تکرار مقیاسی و رفتارهای غیرخطی، استخراج و دسته‌بندی شد.

در مرحله دوم، این مفاهیم در قالب یک چارچوب تحلیلی مورد بررسی قرار گرفت؛ به گونه‌ای که هر مفهوم ریاضی، نخست به صورت نظری تعریف شده و سپس ارتباط آن با ساختارهای طبیعی و معماری تبیین گردید. روش تحلیل در این بخش مبتنی بر تحلیل محتوا و مقایسه دیدگاه‌های مختلف علمی بوده است.

در مرحله سوم، با تلفیق یافته‌های حاصل از منابع مختلف، تلاش شد تا پیوندی منسجم میان اساسات ریاضی فرکتال‌ها و مفاهیم معماری برقرار گردد. این پروسه از طریق تفسیر تحلیلی و استخراج نظری صورت گرفته است. به دلیل ماهیت نظری تحقیق، از روش‌های ساحوی، نمونه‌گیری و تحلیل آماری استفاده نشده و تمرکز اصلی بر تحلیل مفهومی و نظری اطلاعات و دیتاها بوده است. جهت افزایش اعتبار علمی، از منابع متعدد، مقایسه نتایج تحقیقات پیشین و ارجاع‌دهی دقیق استفاده گردیده است.

یافته‌ها

هندسه ساختارهای خود-متشابه یا فرکتال‌ها از مفاهیم مهم انجیری و از دستاوردهای برجسته ریاضیات معاصر به‌شمار می‌روند که در سال‌های اخیر، به‌ویژه پس از تحقیقات بنوا مندلبروت، توجه گسترده دانشمندان را به خود جلب کرده است.

مندلبرات در سال (۱۹۴۵) با آثار گاستون ژولیا آشنا شد؛ ریاضی‌دانی که در سال (۱۹۱۸) اثری بی‌مانند در (۱۹۹) صفحه ارائه کرده بود. هرچند مندلبرات در آغاز نتوانست به روش ریاضی ژولیا پی

ببرد، اما با انجام آزمایش‌های گوناگون، نتایج او را باز تولید کرد و به کمک گرافیک کمپیوتری نشان داد که آثار ژولیا برگرفته از ساختارهای فرکتالی بسیار زیبا هستند که امروزه شناخته شده‌اند (خاک‌پور و دیگران، ۱۳۹۴). مهم‌ترین جرقه شکل‌گیری نظریه فرکتال زمانی زده شد که مندلبرات در بررسی طول سواحل انگلیس دریافت هرچه مقیاس اندازه‌گیری بزرگ‌تر انتخاب شود، طول ساحل نیز بیشتر به دست می‌آید. این پدیده که ناشی از بی‌نظمی ذاتی طبیعت بود، به شکل‌گیری شاخه‌ای جدید در هندسه ریاضیات انجامید که بعدها «هندسه فرکتال» نام گرفت.

فرکتال‌ها از راه تکرار اجزا در مقیاس‌های مختلف شکل می‌گیرند و اغلب با عملیه‌های دینامیکی تولید می‌شوند؛ پروسه‌هایی که عملکرد آن‌ها به وضعیت‌های پیشین وابسته است (مینی و فتح‌الهی، ۱۳۹۳). از دیدگاه ریاضی، اشکال فرکتالی دارای قوانینی ساده ولی نتایج پیچیده‌اند و مجموعه‌های آن‌ها از اجزایی تشکیل شده‌اند که هر یک شبیه کل مجموعه است. هندسه فرکتال از ظرفیت اطلاعاتی بالایی برخوردار بوده و در مقایسه با هندسه اقلیدسی، توان بیشتری در بیان پیچیدگی‌های طبیعت دارد. در نهایت، فرکتال را می‌توان تصویر ریاضی آشوب دانست؛ چرا که هر پروسه تکراری الزاماً به ساختار فرکتالی منجر نمی‌شود و شکل‌گیری چنین ساختارهایی مستلزم وجود آشوب در پروسه تولید آن‌هاست (قمیشی و دیگران، ۱۳۹۳).



شکل ۱. نمونه‌ای از یک شکل فرکتال که شامل تمام خصوصیات فرکتال می‌باشد. (قمیشی و دیگران، ۱۳۹۳)

بُعد فرکتال‌ها

بُعد فرکتال یک معیار ریاضی در تعیین درجه پیچیدگی بافت در حال نمایش است. خواص اصلی بُعد فرکتال، اعشاری بودن آن است و همین باعث تمایز شکل فرکتالی از شکل اقلیدسی می‌گردد که بُعد آن عدد صحیح می‌باشد. نظریه فرکتال با داشتن بُعد فرکتالی برای توصیف پیچیدگی در شکل‌ها به کار می‌رود. بُعد فرکتال هر چه بیشتر شود، میزان شگفتی ترکیب شده با نظم زیر بنایی بیشتر است (مبینی و فتح الهی، ۱۳۹۳). یکی از راه‌های محاسبه بُعد فرکتال استفاده از فرمول ذیل می‌باشد (صافی و دیگران، ۱۴۰۲).

$$A = \frac{1}{s^D} = \left(\frac{1}{s}\right)^D \quad \dots \quad (1)$$

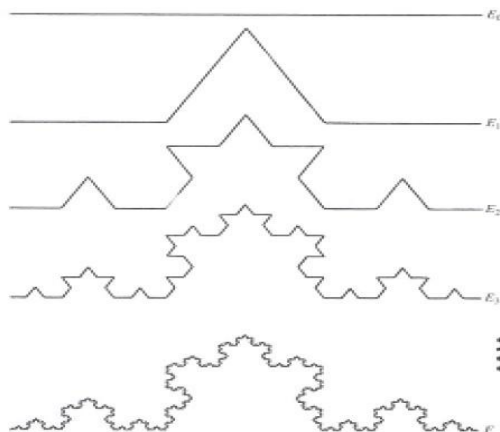
در اینجا A تعداد قطعات کوچک‌تر است که کل به آن تقسیم شده. S جزئی از مقیاس نسبت به کل و D بُعد است که می‌خواهیم محاسبه کنیم. با استفاده از فرمول ۱ داریم که:

$$D = \left(\frac{\log a}{\log s}\right) \quad \dots \quad (2)$$

از این فرمول می‌توان برای محاسبه بعدهای فرکتال استفاده کرد.

بررسی چند نمونه از فرکتال‌ها

منحنی ون‌کوچ: مثال معروف از فرکتال‌ها، منحنی ون‌کوچ است. فرض کنید E_0 یک قطعه خط از طول واحد باشد. مجموعه‌ای از E_1 شامل چهار قطعه به دست آمده به وسیله‌ای حذف یک سوم میانی از E_0 و جا گذاری آن به وسیله‌ای دو طرف از یک مثلث متوازی الاضلاع است. E_2 را به وسیله‌ای روش مشابه قبلی برای هر قطعه در E_1 ، می‌سازیم و الی آخر. بنابراین E_k از تعویض یک سوم میانی از هر قطعه‌ای مستقیم از E_{k-1} و وسیله‌ای دو طرف از یک مثلث متوازی الاضلاع، به دست می‌آید. وقتی که k بزرگ است، منحنی E_{k-1} و E_k تنها در وضعیت جالبی متفاوت هستند و وقتی که k به بینهایت میل می‌کند، دنباله‌ای منحنی‌های چند وجهی E_k به یک منحنی حدی F ، که منحنی ون‌کوچ نامیده می‌شود، میل می‌کند (دلخوش، ۱۳۹۶).



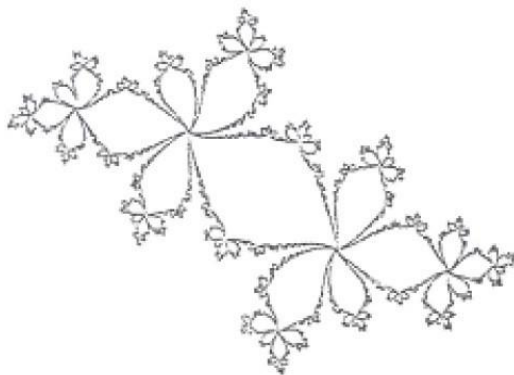
شکل ۲. منحنی ونکوچ (دلخوش، ۱۳۹۶).

به عنوان مثال، بعد تشابهی منحنی ونکوچ از چهار کاپی از خودش مقیاس شده به وسیله یک

فاکتور $\frac{1}{3}$ است، بنابراین بعد تشابهی آن $D = \frac{\log 4}{\log 3} = 1,262 \dots$ است.

مجموعه جولیا: شکل (۳) ساختار خیلی پیچیده مجموعه جولیا که از تابع $f(z) = z^2 + c$ برای

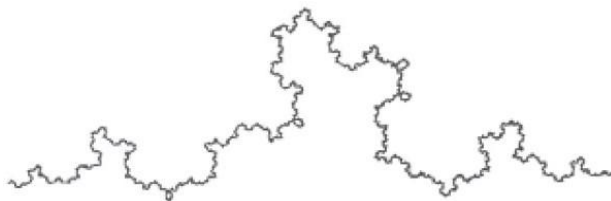
ثابت مناسب c به دست آمده، را نشان می دهد. اگر یک قسمت کوچک را به صورت دلخواه از مجموعه انتخاب و بزرگ کنیم سپس با یک قسمت بزرگ از مجموعه منطبق خواهد شد (دلخوش، ۱۳۹۶).



شکل ۳. مجموعه جولیا (دلخوش، ۱۳۹۶).

منحنی ونکوچ تصادفی: بعضی از ساختارها می توانند تصادفی باشند. شکل (۴) یک منحنی

ونکوچ تصادفی را نشان می دهد. این منحنی تصادفی مشخصاً دارای یک ساختار جالب است. اما خود-متشابه قطعی از منحنی ونکوچ با یک خود-متشابه احصائوی جایگزین شده است (دلخوش، ۱۳۹۶).



شکل ۴. منحنی ون کوچ تصادفی (دلخوش، ۱۳۹۶).

نظریه آشوب

واژه آشوب در نگاه نخست بی‌نظمی و فقدان کنترل را تداعی می‌کند؛ پدیده‌هایی که در ظاهر فاقد نظم‌اند، مانند کوه‌ها، درختان، تحولات اجتماعی و نظام‌های اقتصادی. با این حال، آشوب در معنای علمی خود مفهومی ژرف‌تر دارد. هرچند این پدیده‌ها ظاهری آشفته دارند، اما در بنیاد خود تابع قوانینی معین و قابل‌شناسایی‌اند و از همین رو می‌توان آن‌ها را به‌وسیله روش‌های علمی بررسی و تحلیل کرد. همین خواص سبب شد ادوارد لورنتس در سال (۱۹۶۳) نظریه آشوب را مطرح سازد. نکته اساسی در ورود به این بحث آن است که آشوب را نباید با تصادف یا بی‌نظمی مطلق یکسان دانست، زیرا بسیاری از پدیده‌ها پیش از رسیدن به وضعیت آشوبناک، رفتار منظم و تناوبی دارند. آشوب زمانی رخ می‌دهد که یک سیستم با تغییرات پی‌درپی از یک حالت تناوبی به حالتی غیرتناوبی گذر کند. نظریه سیستم‌های آشوب بخشی از دانش سیستم‌های دینامیکی غیرخطی است؛ سیستم‌هایی که عملکرد آینده آن‌ها به شدت به شرایط اولیه وابسته است. در چنین سیستم‌هایی، تغییرات بسیار کوچک در وضعیت آغازین می‌تواند پیامدهای بزرگ و پیش‌بینی‌ناپذیر در آینده ایجاد کند؛ پدیده‌ای که با «تاثیر پروانه‌ای» شناخته می‌شود و نمونه‌های آن را می‌توان در جریان‌های هوایی و چرخه‌های اقتصادی مشاهده کرد. غیرخطی بودن این سیستم‌ها موجب پیچیدگی رفتار و نامنظمی منحنی‌های آن‌ها می‌شود و همین وابستگی شدید به شرایط اولیه، مرز اصلی میان آشوب و سایر پدیده‌های تصادفی را مشخص می‌سازد. در پدیده‌های آشوبناک، نظم را نباید تنها در یک مقیاس جست‌وجو کرد، زیرا ممکن است سیستمی در مقیاس محلی پایا و قابل‌پیش‌بینی باشد، اما در مقیاس‌های بزرگ‌تر رفتاری آشفته از خود نشان دهد. در همین راستا، آدامز آشفتگی را سرچشمه زایش می‌داند و بیان می‌کند که زندگی از آشفتگی پدید می‌آید، در حالی که نظم حاصل عادت است (مبینی و فتح‌الهی، ۱۳۹۳). نظریه آشوب بر اصولی چون

تأثیر عمیق تغییرات کوچک و گرایش ذاتی سیستم‌ها به بقا استوار است؛ به گونه‌ای که کوچک‌ترین تغییر می‌تواند به بی‌نظمی‌های بزرگ منجر شود و زندگی همواره راهی برای ادامه یافتن می‌یابد (ناصری و دیگران، ۱۴۰۱). این نظریه که در آغاز تنها یک دیدگاه نظری بود، با تحقیقات دانشمندانی چون هانری پوانکاره، ادوارد لورنتس، بنوا مندلیبروت و مایکل فایگنباوم گسترش یافت. پوانکاره نخستین کسی بود که نشان داد مسئله سه کتله، مانند خورشید، زمین و ماه، ماهیتی آشوبناک و غیرقابل حل قطعی دارد. با توسعه این مطالعات، نظریه آشوب به یک علم مستقل بدل شد و امروزه کاربردهای گسترده‌ای در معماری و انجینیری ساختمانی یافته است. این نظریه با معرفی فرکتال‌ها و مفاهیمی چون بعد غیرصحیح و خود-متشابه، راهی نو برای کشف نظم پنهان در پدیده‌های پیچیده گشود؛ راهی که می‌تواند در علوم انسانی و هنر نیز به گونه‌ای جدی مورد استفاده قرار گیرد (مبینی و فتح‌الهی، ۱۳۹۳).

فرکتال از دیدگاه هندسی

اشکال اقلیدسی با توابع ثابت تولید می‌شوند، اما اشکال فرکتال از طریق پروسه‌های دینامیکی شکل می‌گیرند؛ پروسه‌هایی که حافظه دارند و رفتارشان به گذشته وابسته است. هر فرکتال دارای خاصیت خود-متشابه است؛ یعنی بخش‌های کوچک آن شبیه کل هستند. این اشیاء طولی بی‌نهایت دارند اما در فضای محدود جای می‌گیرند و می‌توانند بسیاری از اشکال پیچیده و به ظاهر نامنظم طبیعت را به صورت ریاضی توصیف کنند. به همین دلیل، هندسه فرکتال را می‌توان «بیان ریاضی معماری طبیعت» دانست. هر پروسه تکراری و دینامیکی لزوماً فرکتال تولید نمی‌کند؛ این ساختارها معمولاً با آشوب و پروسه‌های پیچیده شکل می‌گیرند. وقتی به یک جسم فرکتال نزدیک می‌شویم، بخش‌های کوچکی که از دور دانه‌ای و بی‌نظم به نظر می‌رسند، همانند کل خود جلوه می‌کنند (کرمی مفردرام، ۱۳۹۶). از نظر هندسی، فرکتال باید سه خاصیت اصلی داشته باشد:

۱. خود-متشابهی: بخش‌ها شبیه کل هستند و تناسبات نسبی شکل‌ها و زوایای داخلی حفظ می‌شود. تغییر اندازه، دوران یا تبدیل شکل، خود-متشابهی آن را از بین نمی‌برد. مثال کلاسیک، نسبت‌های طلایی است که از گذشته تا امروز ابزاری مناسب برای معماران بوده و ساختار ماریچی مستطیل خود-متشابه را ایجاد می‌کند.

۲. خود مقیاسی: فرکتال‌ها در تمامی مقیاس‌ها از دور و نزدیک نامنظم و پیچیده‌اند و نماد نظم در بی‌نظمی هستند.

۳. تعادل و تکرار: تقارن ساده‌ترین شکل تعادل است، اما بسیاری از ساختارها با تکرار یا چرخش حول یک محور به ریتم و تعادل می‌رسند. این خاصیت در طبیعت، بدن انسان، ریتم انگشتان و حتی ساختارهای ذهنی مشاهده می‌شود.

هندسه فرکتال برخلاف هندسه اقلیدسی، ابزار بهتری برای توضیح و ایجاد پدیده‌های طبیعی است. این هندسه با الگوریتم بیان می‌شود و اشیاء پیچیده را می‌توان با قوانین و ساختارول‌های ساده توضیح داد. هر فرکتال نامنظم است، هیچ قسمتی صاف ندارد و اجزایش شبیه کل هستند. فرکتال‌ها از طریق تکرار توسعه می‌یابند و شکل‌گیری آن‌ها وابسته به موقعیت اولیه است. همچنین، در پس عناصر به‌ظاهر نامنظم طبیعی، قوانین منظمی وجود دارد که با الگوریتم‌های ساده قابل نمایش است (کرمی مفردهام، ۱۳۹۶).

فرکتال و ریاضیات

همان طوری که می‌دانیم هندسه شاخه مهم از ریاضیات است که پایه‌گذاری پیشرفت اکثر علوم محسوب می‌شود و به طور عموم دو نوع هندسه وجود دارد، هندسه اقلیدسی و غیر اقلیدسی. اصول هندسه اقلیدسی بر مبنای اندازه‌گیری و مفاهیمی مثل خط، نقطه و سطح است. اکثر قضایای دوران مکتب زیر مجموعه همین هندسه می‌باشد. اما هندسه اشکال و توابع ناهموار، آشفته و غیر اقلیدسی تنها به بررسی اشکال کلاسیک موجود در طبیعت می‌پردازد. در این هندسه غیر کلاسیک جایی ندارد. بنوت مندلبرات ریاضیدان لهستانی، طلسم یکی از تیوری‌های ریاضی را شکست و بالاخره در سال (۱۹۷۵) میلادی به عنوان هندسه فرکتال شناخته شد. هندسه فرکتال یکی از شاخه‌های جدیدی ریاضیات در بخش هندسه می‌باشد. که به مطالعه اشکال نامنظم و پیچیده طبیعت می‌پردازد. این هندسه با تکرار الگوها و شباهت اجزای کوچک به کل ساختار، توانست بسیاری از پدیده‌هایی را که پیش از آن قابل توصیف نبودن، مدل‌سازی کند. هندسه فرکتال در میان ریاضی دانان و محققان، به‌ویژه در بررسی رفتار توابع، مجموعه‌ها و ساختارهای پیچیده، کاربرد وسیع یافته است. اگر چه این شاخه در ابتدا با تردیدهای مواجه بود، اما به تدریج جایگاه خود را در ریاضیات مدرن تثبیت کرد (داداش‌وند، ۱۳۹۳).

تفاوت هندسه فرکتال و اقلیدسی

هندسه اقلیدسی، یا هندسه دکارتی، بر مبنای تناسبات صحیح در سه بعد طول، عرض و ارتفاع ساخته شده است و شامل اشکال دو بعدی (مثل مربع، مثلث، دایره) و سه بعدی (استوانه، مکعب، هرم) می‌شود. این اشکال معمولاً در طبیعت یافت نمی‌شوند؛ چرا که در حقیقت، هیچ مخروطی کامل یا کروی خالص وجود ندارد. هندسه اقلیدسی، ماهیتی کمی و خطی دارد و سیستم‌های آن گرافی منحنی و منظم را نشان می‌دهند، در حالی که هندسه فرکتال غیرخطی است و گراف آن‌ها به دلیل رفتار نامنظم

و ناپیوسته، سنتی و مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست. هندسه فرکتال می‌تواند پیچیدگی‌های طبیعت را توضیح دهد؛ اشکالی که خود-متشابه، معین و در عین حال غیرقابل پیش‌بینی‌اند و تنوع و گوناگونی آن‌ها در فضای لایته‌های بی‌پایان است. همان‌طور که اشکال اقلیدسی از نقاط و خطوط ساخته می‌شوند، اشکال فرکتالی از واحداث کوچک تشکیل می‌شوند که با تکرار و تغییر مقیاس رشد می‌کنند. این هندسه اجازه می‌دهد تا جزء در کل و کل در جزء دیده شود و به بررسی پیچیدگی‌های طبیعی و مصنوعی، مانند ساختمان‌ها، کمک کند. مندلیبرات بیان کرده است که این شکل‌های عجیب و پیچیده، معانی و مفاهیم مشخصی دارند و برای توضیح آن‌ها، هندسه نوینی به نام هندسه فرکتال پایه‌گذاری شد؛ هندسه‌ای که هندسه اقلیدسی را به‌عنوان زیرمجموعه‌ای در خود جای داده و هرگز با آن در تناقض نیست. خاصیت خود-متشابهی فرکتال، الهام گرفته از طبیعت است و ابزار مناسبی برای نمایان ساختن کل در جزء و جزء در کل به‌شمار می‌آید. با رشد استفاده از این هندسه در معماری، شاخه‌ای جدید به نام معماری فرکتال شکل گرفت که با وجود بهره‌گیری از اصول هندسه اقلیدسی، آزادی و گوناگونی بی‌نظیری در طراحی به وجود آورده است (نقیبی‌راد و جمشیدی، ۱۳۹۳).

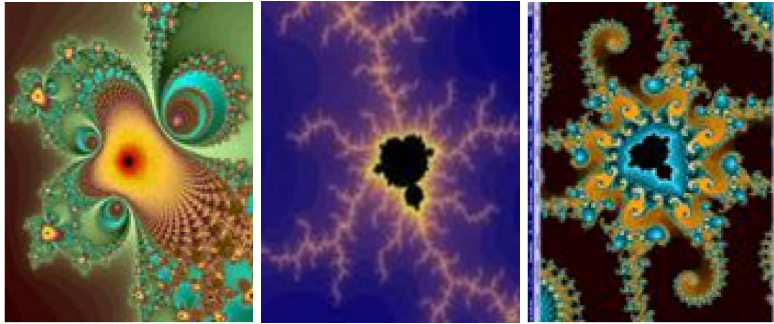
رابطه فرکتال و طبیعت

الگوهای طبیعی حاصل تأثیر و تأثر عوامل گوناگون‌اند و از نظم دقیق و شگفت‌انگیز پیروی می‌کنند. ساختارهای طبیعت دارای ساختارهای سازمان‌دهنده‌اند و هندسه فرکتال، روشن‌ترین شیوه برای درک و بیان این نظم نهفته به‌شمار می‌رود. هندسه اقلیدسی با احجام منظم و صاف، توان توضیح بسیاری از پدیده‌های طبیعی را ندارد، زیرا اشکال طبیعت ناهموار‌اند و این ناهمواری در همه مقیاس‌ها تکرار می‌شود؛ خواص که از شاخصه‌های اساسی فرکتال‌ها است. مندلیبرات با تأکید بر همین واقعیت بیان می‌کند که ابرها کروی نیستند، کوه‌ها مخروطی نیستند، سواحل دایروی شکل ندارند و صاعقه در خط مستقیم حرکت نمی‌کند. در طبیعت، جزء و کل اغلب شباهت ساختاری دارند؛ چنان‌که شاخه‌ای از درخت یا بخشی از گل، تصویر کوچکی از کلیت آن است. این همسانی مقیاسی، پیوند عمیق میان فرکتال و طبیعت را نشان می‌دهد (کرمی مفردرهم، ۱۳۹۶).

هندسه فرکتال؛ زبان ریاضی طبیعت

مندلیبرات با بنیان‌گذاری هندسه فرکتال نشان داد که بی‌نظمی‌های طبیعت تصادفی نیستند، بلکه دارای نظم پنهان و قانون‌مند داخلی‌اند. اشکال فرکتالی خود-متشابه‌اند؛ یعنی جزء، بازتابی از کل است و ساختار از دور و نزدیک تقریباً یکسان دیده می‌شود. این اشکال با پروسه‌های دینامیکی و غیرخطی شکل می‌گیرند و تا بی‌نهایت قابل بزرگ‌نمایی‌اند، بدون آن‌که نظم‌شان از بین برود. طبیعت سرشار از این الگوهاست؛ از کوه‌ها، ابرها، سواحل دریا و دانه‌های برف گرفته تا گل‌نباتات، ریشه و شاخه درختان. حتی دگرگونی طبیعت در گذر زمان نیز ماهیت فرکتالی دارد. هندسه فرکتال توانمندترین

ابزار برای توضیح ساختارهای طبیعی است؛ همان‌گونه که هندسه اقلیدسی در توصیف ساخته‌های بشری کارآمد است اما در برابر طبیعت ناتوان می‌ماند. از این رو، فرکتال‌ها امروز نه تنها در فهم طبیعت، بلکه در شبیه‌سازی، گرافیک کامپیوتری و تحلیل آشوب جایگاه برجسته‌ای یافته‌اند (مبینی و فتح‌الهی، ۱۳۹۳).



شکل ۵. نمونه‌های از فرکتال (مبینی و فتح‌الهی، ۱۳۹۳).

فرکتال در مناظر طبیعی

این ساختارها همان طوری که از اسم آن‌ها پیداست دارای ساختار طبیعی هستند و بشر در آن هیچ گونه مداخله‌ای نداشته است مانند اشکال ذیل. شاید بسیار در عکاسی معماری به یک منظره برخورد کرده باشید که دوردست تپه‌ها و کوه‌ها می‌شوند. بد نیست بدانید که خود این منظره دارای ساختاری فرکتال با هندسه فرکتال قابل حل است (قمیشی و دیگران، ۱۳۹۳).



شکل ۶. منظر طبیعی فرکتال (قمیشی و دیگران، ۱۳۹۳).

معماری و فرکتال‌ها

معماری، هنر سازماندهی فضا است و هندسه از دیرباز برای سازماندهی اشکال و نظم‌بخشی به ساختمان‌ها به کار رفته است. هندسه فرکتال شاخه‌ای از ریاضیات است که شکل فیزیکی طبیعت و

تغییرات آن در زمان را توصیف می‌کند. خواص فرکتالی در معماری، نمایش جزئیات به صورت سلسله‌مراتبی است؛ وقتی کسی به یک ساختمان نزدیک یا وارد آن می‌شود، باید جزئیات کوچک‌تر و جذابی دیده شود که معنای کلی ترکیب را منتقل کند این همان ایده فرکتال در معماری است (خیرات و شاطرزاده، ۱۳۹۷).

کاربرد هندسه فرکتال در معماری

در چند دهه اخیر، دانشمندان برای توصیف پیچیدگی طبیعت، نظریه فرکتال را گسترش دادند. این نظریه، که براساس علم آشوب و قوانین فیزیکی استوار است، اشکال و ساختارهای پیچیده و خود-متشابه را توصیف می‌کند. ساختارهای فرکتالی، هرچند در ساحه‌ای محدود قرار دارند، دارای پیچیدگی بالایی هستند و به همین دلیل در طراحی شهری و معماری کاربرد فراوان دارند. معماران با بهره‌گیری از این هندسه، می‌توانند از سلطه سبک‌های گذشته رها شوند و با الگوبرداری از طبیعت، فضاهایی دینامیکی، متنوع و هماهنگ ایجاد کنند. طبیعت، با وجود ثبات و پایداری طولانی، همواره در حال تغییر و تنوع است و این ریتم و هماهنگی، الگویی منحصر به فرد برای معماری محسوب می‌شود (رضایی، ۱۳۹۴).

هندسه فرکتال و کاربرد آن در ساختار فضایی شهرها

هندسه فرکتال دارای ویژگی‌هایی است که اگر آگاهانه در طراحی بناها و شهرها به کار رود، می‌تواند هویت فضایی و ساختاری منحصر به فرد را ایجاد کند. هویت شهری، مجموعه ویژگی‌های دینامیکی و تدریجی شهرها است که تعامل منطقی و طبیعی بین انسان و محیط را ممکن می‌سازد (نقیبی‌راد و جمشیدی، ۱۳۹۳).

در طراحی شهری دو گرایش اصلی وجود دارد:

۱. گرایش به هندسه اقلیدسی و عقلانی؛
۲. گرایش به هندسه ارگانیک و فطری.

الگوهای فرکتالی، نمونه‌ای از هندسه ارگانیک هستند که طرح‌ها را دینامیکی، واقع‌گرا و سرشار از تنوع می‌کنند. این طراحی‌ها برخلاف سبک‌های از پیش تعیین شده، بر اساس حس مشترک و واقعیت محیط استوارند و می‌توانند بدون کاپی برداری، حس مثبت فضاهای تاریخی را چندین برابر افزایش دهند. هندسه فرکتال در معماری گذشته و معاصر مشاهده می‌شود: در گذشته به شکل ناآگاهانه و امروزه با ابزار و آگاهی کامل. کاربرد آن در دو مقیاس است:




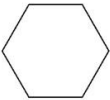


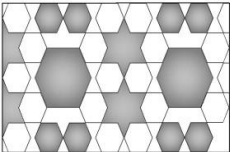
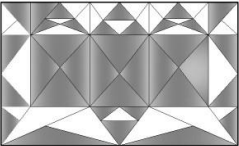
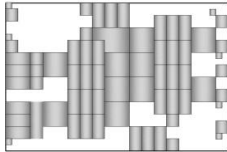
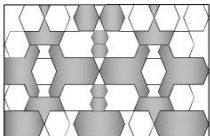

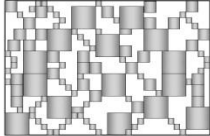
- مقیاس خرد: ساختمان‌ها، پلان، نما، تزئینات و فضای داخلی؛
- مقیاس کلان: شکل و ساختار شهری.

نمونه‌هایی از فرکتال در معماری تاریخ اروپا، شرق، افریقا و ایران مشاهده می‌شود که نشان از

رعایت الگوهای طبیعی و ارگانیک در شهرسازی دارد. در معماری معاصر، طراحانی مانند زاها حدید، دانیل لیبسکیند، پیتز آیزنمن و فرانک گهری، سیالیت فضایی و تکرار ساختارها با پیچیدگی و روابط آشوب‌گونه را در آثارشان به کار برده‌اند. با تکیه بر اصول فرکتال، می‌توان ساختارهای شهری نامنظم را بهبود داد و شهرها را هم‌سو با ساختارهای طبیعی و ارگانیک توسعه بخشید (نقیبی‌راد و جمشیدی، ۱۳۹۳).

هندسه فرکتال در بدنه‌های شهر

نماهای شهری به‌عنوان سیما و مناظر شهری در دیوارها و بدنه‌های شهری نقش ایفا می‌کنند. نماها در ساختار جداره‌های یک شهر توجه کاربران را می‌توانند به خود جلب نماید. استفاده از هندسه فرکتال در نما می‌تواند بنا را از زمینه خود برجسته کند و آنرا به یک بدنه شاخص شهری تبدیل نماید. به منظور تحلیل و بررسی کاربرد هندسه فرکتال در بدنه‌های شهری در جدول ذیل نمونه‌هایی آورده شده است. جدول ۱. الگوهای فرکتالی در بدنه‌های شهر (نقیبی‌راد و جمشیدی، ۱۳۹۳).

فرکتال در نما			
			نمونه
			واحد فرکتال
			ترکیبات پیشنهادی
			

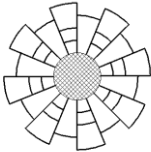



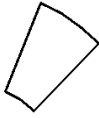
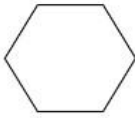
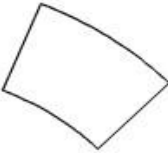
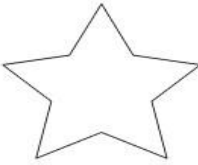
در نماهای شهری با هندسه فرکتال، برخلاف نظم یکنواخت هندسه اقلیدسی، ترکیبی از تنوع، انسجام و یکپارچه‌گی مشاهده می‌شود که توجه شهروندان را جلب می‌کند و از یکنواختی محیط شهری

می‌کاهد. هویت شهری می‌تواند از طریق تکرار، شباهت و تفاوت در واحدهای فرکتالی شکل گیرد. این واحدها، تحت تأثیر عوامل محیطی و با ریتم‌های پیچیده، با بی‌نظمی و در عین حال نظم، ساختارهای چندبعدی تولید می‌کنند. در پروسه طراحی، لایه‌های فرکتالی می‌توانند با تغییر محور، زاویه، ریتم و تناسب با یکدیگر ترکیب شوند و ساختارهای جدیدی بر اساس قوانین فرکتال شکل دهند. کاربرد این اصول در نماها، نه تنها جذابیت دیدنی ایجاد می‌کند، بلکه موجب تنوع، هماهنگی و چشم‌نوازی محیط شهری شده و تجربه شهروندان را غنی می‌کند. همچنین هندسه فرکتال در نورپردازی، ایجاد سایه‌روشن، پر و خالی شدن سطوح و انسجام اجزا نقش مؤثر دارد (نقیبی‌راد و جمشیدی، ۱۳۹۳).

هندسه فرکتال در سایت‌های شهری

همانطور که گفته شد کاربرد هندسه فرکتال در مقیاس کلان، در ساختارهای فضایی شهرها صورت می‌گیرد. نمونه‌های انتخاب شده در جدول شماره ذیل آزادی انتخاب واحدهای فرکتالی را در سایت‌های شهری به نمایش می‌گذارد که فارغ از محدودیت‌های قوانین هندسه اقلیدسی می‌باشند.

جدول ۲. کاربرد فرکتال در مقیاس شهری (نقیبی‌راد و جمشیدی، ۱۳۹۳).

فرکتال در مقیاس شهری				
				نمونه
				واحد فرکتال

کاربرد هندسه فرکتال در این فضاها منجر به ایجاد مسیرهایی مشخص و متنوع می‌گردد و بر جذابیت و تداوم دیدنی و حرکتی فضاها می‌افزاید و تنوع فضایی را موجب می‌شود. حرکت بر روس این اشکال در فضای شهری حس کنجکاوی را با خود به همراه دارد و خسته کننده و کسالت آور نخواهد بود و حتی می‌توان با تکیه بر این اصول بر نقطه‌ای خاص تأکید ورزید و کاربران را به آن سمت هدایت نمود. هندسه فرکتال با ایجاد حسی متنوع در فضا باشندگان در فضا را مجذوب این ساختارها می‌نماید. استفاده از این هندسه نسبت به هندسه اقلیدسی در طراحی فضای شهری مزیت‌های بیش

تری دارد و با ایجاد عناصر متکثر در فضا طراحان و کاربران را با دنیای جدیدی از تحولات رو به‌رو می‌نماید و آن‌ها را از قید و بند رها می‌سازد (نقیبی راد و جمشیدی، ۱۳۹۳).

بحث و تحلیل یافته‌ها

یافته‌های این تحقیق در پرتو سوالات تحقیق و بررسی پیشینه مطالعاتی نشان می‌دهد که بخش عمده تحقیقات پیشین در زمینه هندسه فرکتال در معماری، بیشتر بر جنبه‌های شکلی، زیبایی‌شناختی و کاربردهای ظاهری این هندسه متمرکز بوده‌اند، در حالی که تبیین مفاهیم بنیادی ریاضی آن کمتر به صورت نظام‌مند و تحلیلی مورد توجه قرار گرفته است؛ موضوعی که با دیدگاه محققانی چون فرشیدراد و همکاران (۱۳۹۹) و خیرات و شاطرزاده (۱۳۹۷) نیز همخوانی دارد. در این راستا، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مفاهیمی همچون خود-متشابهی، بُعد فرکتالی، تکرار در مقیاس‌های مختلف و رفتارهای غیرخطی، نه تنها ابزارهایی برای توصیف ساختارهای پیچیده طبیعی هستند، بلکه می‌توانند به عنوان چارچوبی تحلیلی در فهم و تفسیر سازمان فضایی در معماری نیز مورد استفاده قرار گیرند. این امر بیانگر آن است که بدون درک دقیق و عمیق مبانی ریاضی فرکتال‌ها، کاربرد آن‌ها در معماری غالباً به سطحی از تقلید صوری و الگوگیری ظاهری محدود می‌شود و نمی‌تواند به درک واقعی از منطق شکل‌گیری ساختارهای پیچیده منجر گردد. از سوی دیگر، تحلیل مفاهیم ریاضی فرکتال‌ها نشان می‌دهد که این مفاهیم ظرفیت آن را دارند تا درک ما از نظم‌های پنهان در طبیعت را تعمیق بخشیده و زمینه‌ای نظری برای بازاندیشی در نحوه سازمان‌دهی فضاهای معماری فراهم سازند. با این وجود، تمرکز این تحقیق بر بُعد نظری و مفهومی موجب شده است که بررسی‌های کاربردی، مدل‌سازی‌های عملی و مطالعات موردی در حیطه این تحقیق قرار نگیرد؛ از این رو، می‌توان چنین استنباط کرد که اگرچه این تحقیق گامی در جهت تبیین اساسات ریاضی فرکتال‌ها برداشته است، اما توسعه کاربردهای عملی این مفاهیم در طراحی معماری، نیازمند انجام تحقیقات تکمیلی و تخصصی در آینده خواهد بود.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مفاهیم بنیادی ریاضی هندسه فرکتال، به‌ویژه خود-متشابهی، بُعد فرکتالی و مقیاس‌پذیری، نقش اساسی در درک و تحلیل ساختارهای پیچیده طبیعی و معماری ایفا می‌کنند. این مفاهیم، فراتر از ابزارهای صرفاً توصیفی، به عنوان چارچوبی تحلیلی عمل می‌کنند که امکان بازخوانی و تفسیر ساختارهای معماری را از دیدگاه علمی و نظام‌مند فراهم می‌سازد. بر این اساس، می‌توان بیان کرد که هندسه فرکتال ظرفیت آن را دارد تا به عنوان پلی میان ریاضیات و معماری، درک عمیق‌تری از نظم‌های پنهان در طبیعت و بازتاب آن‌ها در فضاهای معماری ایجاد نماید.

همچنین، یافته‌ها نشان می‌دهد که درک صحیح و دقیق مبانی ریاضی فرکتال‌ها، پیش شرط اساسی

برای کاربرد آگاهانه و مؤثر این هندسه در معماری است؛ به گونه‌ای که در صورت فقدان این درک، استفاده از فرکتال‌ها به سطحی از تقلید ظاهری و کاربردهای سطحی محدود شده و از ظرفیت‌های واقعی آن‌ها در بهبود کیفیت فضایی و ادراکی محیط کاسته می‌شود.

در عین حال، این تحقیق با تمرکز بر بُعد نظری و مفهومی، کوشیده است زمینه‌ای علمی برای درک بهتر هندسه فرکتال فراهم آورد؛ با این وجود، بررسی ابعاد کاربردی، طراحی محور و تجربی این مفاهیم خارج از حیطه این تحقیق بوده است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود که تحقیقات آینده با بهره‌گیری از روش‌های عملی و مطالعات موردی، به چگونگی به‌کارگیری مفاهیم ریاضی فرکتال‌ها در پروسه طراحی معماری و شهرسازی پرداخته و امکان تبدیل این مبانی نظری به راهکارهای اجرایی را مورد بررسی قرار دهند. در مجموع، این تحقیق را می‌توان گامی مقدماتی اما ضروری در جهت تقویت پیوند میان ریاضیات، فرکتال‌ها و معماری دانست که می‌تواند بستر مناسبی برای توسعه مطالعات عمیق‌تر در این حوزه فراهم سازد.

مآخذ

- خاکپور، مظاهر و دیگران. (۱۳۹۴). بررسی علم فرکتال و تأثیر آن در طراحی و ضرورت آشنایی معماران معاصر، اولین همایش بین‌المللی ایده‌های نو در معماری و شهرسازی.
- خیرات، الهام و شاطرزاده، علی. (۱۳۹۷). بررسی هندسه فرکتال و تأثیر آن در معماری و طبیعت، کنفرانس عمران، معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام.
- دلخوش، مهدی. (۱۳۹۶). معرفی فرکتال‌ها و بُعدهای کسری، نشریه ریاضی و جامعه، ۲ (۱)، ۱-۲۳.
- داداش‌وند، مهران. (۱۳۹۳). فراکتال و مفاهیم آن در معماری، همایش ملی معماری، عمران و توسعه نوین شهری.
- رضی‌بی، ندا. (۱۳۹۴). نقش هندسه‌های نوین در معماری طبیعت‌گرا (تطبیق‌دهی هندسه فراکتال در معماری ارگانیک).
- صافی، نقیب‌الله و دیگران. (۱۴۰۲). بررسی کاربرد هندسه فرکتال برای مؤثریت نور در ساختمان‌ها، مجله علمی-تحقیقی ارمغان انبیر، ۱ (۱)، ۱۵۶-۱۶۹.
- غفاریان خرم، مه‌گل و دیگران. (۱۳۹۵). هندسه فرکتال‌ها و پایه‌گذاری تحولی عظیم در معماری، کنفرانس دوسالانه جامعه و معماری معاصر.

فرشیدراد، فرناز و دیگران. (۱۴۰۳). تبیین تطبیقی نظام‌های هندسه فرکتال در سازماندهی معماری و آرایه‌های مسجد نصیرالملک، فصلنامه نگره، ۱۹ (۶۹)، ۱۴۵-۱۶۳.

فرشیدراد، فرناز و دیگران. (۱۳۹۹). تبیین قوانین هندسه فرکتال در ساختار فرم معماری، ارائه مدل پژوهشی معماری مبتنی بر فرم، باغ نظر، ۱۷ (۸۴)، ۵-۱۸.

قمیشی، زهرا و دیگران. (۱۳۹۳). نقش هندسه فرکتال در معماری و توسعه پایدار، دومین کنگره بین‌المللی سازه، معماری و توسعه شهری.

کرمی مفرد، رهام. (۱۳۹۶). ماهیت فرکتال و تأثیر آن بر معماری، کنفرانس پژوهش‌های معماری و شهرسازی اسلامی و تاریخی ایران.

میمنی، مهتاب و فتح‌اللهی، نوشین. (۱۳۹۳). بررسی جایگاه هندسه فرکتال در هنر و چگونگی ظهور آن در هنرهای تجسمی، پیکره، ۶ (۳)، ۷-۲۴.

نقیبی‌راد، پرستو و دیگران. (۱۳۹۳). کاربرد هندسه فرکتال در فرم کالبدی فضایی شهرها. اولین همایش ملی در جستجوی شهر فردا.

ناصری، پارمیس و دیگران. (۱۴۰۱). تبیین کاربری الگوهای فرکتال و بیومورفیک هندسی طبیعت در طراحی منظر پایدار، نشریه فرهنگ و زیست‌فناوری معماری، ۳ (۸)، ۸۱-۱۰۳.
