تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۲۳
تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۳/۰۴/۰۴

علیرضا مستغنی[۱]، محسن علیمرادی[۲]

واکاوی کاربرد هندسه طبیعت و فراکتال در معماری پارامتریک با بررسی آرایه داخلی گنبد مسجد شیخ لطف‌الله[۳]

چکیده

با ورود رایانه، تغییراتی در روند طراحی معماری رخ داد و جریان‌هایی از جمله معماری پارامتریک ایجاد شد. یکی از اصول طراحی در این معماری هندسه فراکتال است. این مقاله به واکاوی کاربرد این نوع هندسه در معماری پارامتریک می‌پردازد. براساس مطالعات اولیه، آرایه داخلی گنبد مسجد شیخ لطف‌الله نیز با استفاده از هندسه فراکتال طراحی شده است. پژوهش به‌دنبال پاسخگویی به این دو پرسش است که آیا می‌توان با استفاده از امکانات هندسی معماری پارامتریک، این آرایه را بازتعریف نمود؟ آیا امکان تعریفی جدید از این اثر در قالب الگوریتم وجود دارد؟ لذا دراین پژوهش، هندسه مورد استفاده در آرایه داخلی گنبد این مسجد تحلیل خواهد شد و هندسه مستخرج از آن در چارچوب اصول معماری پارامتریک و با زبان الگوریتم بازتعریف می‌شود. روش تحقیق مورد استفاده در این پژوهش از نوع تاریخی و با راهبرد شبیه‌سازی رایانه‌ای بوده است که در آن منابع مطالعاتی مورد توصیف و تحلیل قرار گرفته‌اند. جهت بررسی درستی تحلیل هندسی مورد مطالعه، الگوریتم به‌وسیله افزونه گرس هاپر در نرم‌افزار راینو مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج حاکی از آن است که می‌توان آثار اصیل سنتی ایرانی را بازخوانی و به زبان معماری روز ترجمه نمود تا بتوان علاوه بر عملکردهای پیشین خود، عملکردهایی جدید بر آنها افزود. یا حتی با تلفیق با ایده‌هایی نو، تکامل بخشید.

کلید واژه‌ها: معماری پارامتریک، هندسه فراکتال، الگوریتم، مسجد شیخ لطف‌الله.

[۱] استادیار دانشکده معماری، دانشگاه هنر تهران، استان تهران، شهر تهران
E-mail: mostaghni@art.ac.ir
[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد معماری داخلی، دانشکده معماری، دانشگاه هنر تهران، استان تهران، شهر تهران (نویسنده مسئول مکاتبات)
E-mail: mohsen.alimorady@gmail.com

[۳] این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد محسن علیمرادی با عنوان «طراحی مکانی برای احیای هنرهای از یادرفته با رویکرد معماری دیجیتال» به راهنمایی دکتر مستغنی در دانشگاه هنر تهران است.

مقدمه

پس از گذار از دوره صنعتی و ورود به عصر الکترونیک، تغییر و تحولاتی در همهٔ زمینه‌ها، از جمله هنر رخ داد. معماری نیز از جمله هنرهایی است که با این تحولات، تغییراتی در آن ایجاد گشته است. ورود رایانه به معماری در ابتدا، به‌واسطه ترسیم نقشه‌های دو بعدی‌ای بود که روزگاری با خط‌کش و روان‌نویس ترسیم می‌شدند. ایده و فکر اصلی طرح را معمار طرح‌ریزی می‌کرد و سپس این طرح‌ها بر روی کاغذ ترسیم و در انتها به‌وسیله نرم‌افزارهای رایانه‌ای به کارفرما ارائه می‌گشت. البته ذکر این نکته الزامی است که این روند هم اکنون نیز ادامه داشته و فراگیر شده است. اما با گذشت زمان و بالا رفتن توانایی‌های نرم‌افزارهای معماری از نظر پردازش‌های محاسباتی، گرافیکی و غیره، به تبع آن امکان خلق فرم‌های پیچیده خارج از توانایی ذهن انسان، گستره حضور رایانه در فرآیند طراحی معماری نیز افزایش یافت (گلابچی، اندجی گرمارودی، باستانی، ۱۳۹۱؛ Woodbury, 2010). این حضور به جریان‌های وابسته به رایانه در معماری از جمله، معماری پارامتریک منجر شد. این معماری بر مبنای اصول هندسی و رشد تکاملی و ارائه الگوریتم است، به‌گونه‌ای که در آن پارامترهای مورد نیاز طراحی تحت زبان الگوریتم در یک سامانه قرار می‌گیرند. «الگوتکچر[۱]» نامی است که ترزیدیس[۲] به استفاده از الگوریتم در معماری اطلاق نموده است (Terzidis, 2006).

آن‌طور که به‌نظر می‌رسد این شاخه از معماری، به‌صورت مدون از سال ۱۹۸۰ شخصیت خود را پیدا نمود (Sumi, 2012). پاتریک شوماخر[۳] به‌عنوان یک نظریه‌پرداز و گرگ لین[۴] به‌عنوان معماری که اصول معماری پارامتریک را مبنای طراحی خویش قرار داده، جزو افراد شاخص این جریان هستند. یکی از اولین مواردی که در آن از اصول معماری پارامتریک استفاده شد، اپرای سیدنی[۵]، اثر یورن اوتزن[۶] است (Schodek, et al., 2004؛ گلابچی و دیگران، ۱۳۹۱).

معماری پارامتریک به‌واسطه امکان تحقق ایده‌های نو، روز به روز به شخصیت کامل‌تری در این عرصه می‌رسد. از این شاخه از معماری، معمارانی دیگر همچون فرانگ گه ری[۷]،زاها حدید[۸]، و دیگران در فرآیند طراحی فضاهای معماری خویش استفاده می‌کنند. معماران سنتی ایرانی همواره یکی از مهم‌ترین منابع الهام خویش را طبیعت قرار می‌داده‌اند. آثار اصیل این معماری حکایت از آن دارد که آنان به‌خوبی از هندسه‌ای پیچیده و قوی که در ساختار عناصر طبیعی به‌کار می‌رفته، آگاه بوده‌اند. محمدیان منصور در پژوهشی، نظم موجود در ساختار هندسی گره‌چینی را با نظم موجود در ساختارهای طبیعی مقایسه می‌کند. وی با تطبیق گره کند و تند دو پنج بر تصویر پراش پراگ از آلیاژ $Al_{70}Ni_{50}Co_{15}$ بر برداشت سنتی معماران ایرانی از ساختارهای موجود در طبیعت تأکید می‌کند. البته او این نکته را یادآور می‌شود که برداشت معماران ایرانی صرفاً برداشتی ظاهری از پدیده‌های طبیعی نبوده است، بلکه رجوع و وقوف معماران سنتی به قدر و هندسه و اصولی است که مبنای شکل‌گیری مخلوقات عالم نیز هست (محمدیان منصور، فرامرزی، ۱۳۹۱).

امروزه شاخه‌ای جدید در علوم بنام بیومیمتیک[۹] ایجاد شده است که به مطالعه آنچه را که می‌توان از ساختارهای طبیعی استخراج نمود می‌پردازد (Leach, 2009). روش‌های تبدیل فرآیندهای مختلف موجود در طبیعت، صنعت، جامعه و غیره به الگوریتم‌های رایانه‌ای می‌تواند موضوعات مهمی برای پژوهش و کاربرد در معماری باشد. اینکه فراکتال‌ها چگونه به الگوریتم تبدیل می‌شوند یا اینکه مفاهیم پیچیدگی، نظریه سیستم‌ها چگونه به چرخه‌های الگوریتمیک وارد می‌شوند می‌تواند کارکردهای طراحی معماری بیابد (Flake, 2000). از طرفی بررسی آثار سنتی معماری ایران، در جهت باززنده‌سازی آن‌ها با استفاده از علم روز معماری ضروری به‌نظر می‌رسد. همان‌طور که

شوماخر می‌افزاید الگوها نیازمند عملکردهای جدید هستند یا اینکه عملکردهای جدید بر عملکردهای قبلی افزوده شود (Schumacher, 2009).

نگارندگان بر این باورند که معمار مسجد شیخ لطف‌الله نیز در آرایه داخلی گنبد این مسجد از هندسه فراکتال موجود در عناصر طبیعی استفاده نموده است. هندسه فراکتال، امروزه یکی از اصول مهم طراحی در معماری پارامتریک است. در این پژوهش، ضمن بررسی کاربرد این هندسه در معماری پارامتریک، هندسه آرایه داخلی گنبد مسجد شیخ لطف‌الله مورد بررسی قرار می‌گیرد. جهت باززنده‌سازی و امکان‌سنجی اطلاق عملکردهای جدید به این آرایه، هندسه آن استخراج و به زبان الگوریتم ترجمه می‌شود. پژوهش پیش رو در پی یافتن پاسخ این پرسش‌هاست که آیا می‌توان با استفاده از امکانات هندسی معماری پارامتریک، این آرایه را بازتعریف نمود؟ آیا امکان تعریفی جدید از این اثر در قالب الگوریتم وجود دارد؟ و به‌طور کلی هدف این پژوهش، شناخت امکانات معماری پارامتریک در جهت باززنده‌سازی الگوهای اصیل معماری ایرانی در معماری معاصر است.

معماری پارامتریک[۱۰]

«با آغاز قرن بیست و یکم، الکترونیک به یک حقیقت قابل لمس تبدیل شده و چشم‌انداز اجتماعی زندگی انسان را دگرگون ساخته است. این انقلاب دیجیتال که بر پایه هم‌زمانی، ماده‌زدایی، بی‌واسطگی و جهانی شدن شکل گرفته و بر محور فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات متمرکز است حوزه اندیشه، تولید، مصرف، تجارت، مدیریت، ارتباط، زندگی، عشق‌ورزی و مرگ را دگرگون ساخته و با سرعت شتابان در حال شکل‌دهی مجدد بنیان مادی جامعه است» (کاستلر، ۱۳۸۰، ۲۰). و متعاقب این پیشرفت و دگرگونی در جهان امروز، انقلاب دیجیتال سبب بروز گرایش‌هایی جدید در معماری نیز گشته است و فضاها، فرم‌ها و روشهای طراحی را نیز تحت تأثیر قرار داده است.

نیل لیچ[۱۱] در نقد معماری معاصر می‌گوید: «در طراحی معماری معاصر یک جابجایی عمده قابل پیگیری است. عبور از معماری که فقط بر مبنای ویژگی‌های بصری بنا شده، به‌سوی یک معماری که با کارایی قضاوت می‌شود... به نظر می‌رسد که معماری دیگر فقط شیفته سبک و ظاهر نیست؛ پارادایم جدیدی در حال ظهور است.» (Leach, 2009, 36). پیشرفت تکنولوژی و استفاده از کامپیوتر، با این شرایط تاریخی ترکیب شد تا بتواند در تولید معماری ایفای نقش کند... زمانی که «تولید انبوه خلاقیت» و برنامه‌ریزی بر مبنای فرآیند طراحی مورد توجه همگان قرار گرفته بود، تولید معماری نیازمند ابزارها و شرایطی بود که بتواند به تحقق این ایده‌ها کمک کند (خبازی، ۱۳۹۱، ۱٤).

زیبایی شناسی جدیدی در حال پدیدار شدن است که برگرفته از روح پیچان و غلطان و موج‌مانند طبیعت، تپش مولکول‌ها و هندسه ژن‌ها است. بازتاب آن در معماری، جایگزین شدن اشکال جدید، جابجایی اشکال ایستای جهان کلاسیک است که در آن همه چیز، از جمله معماری همچون ماشین بود (جنکز، ۱۳۷۳، ۳۳ به نقل از نقره‌کار، ۱۳۸۹، ۱۱۵) (شکل ۱).

پاتریک شوماخر، معمار و پژوهشگر از این جریان به‌عنوان یک سبک جدید در معماری یاد می‌کند (Schumakher, 2009). سبکی که امروزه آن را معماری پارامتریک یا معماری الگوریتمیک می‌نامند. شوماخر همچنین معتقد است که این سبک در همه مقیاس‌ها (از شهرسازی تا معماری و طراحی داخلی) حضور یافته است و از منظر زیبایی‌شناسی پیچیدگی منظم و سیالیت یکپارچه را نمایش می‌دهد. (همان). در این معماری، اجزای اصلی یعنی ایده، الگوریتم‌های منجر به ایده، پارامترهای مؤثر بر طراحی و رایانه به‌عنوان دستیاری در جهت طی نمودن فرآیند طراحی در

کنار طراح، نقش اصلی را ایفا می‌کنند. وی می‌افزاید که حاصل فعالیت‌های جمعی طراحی–پژوهش، تولید مفاهیم مشترک، برنامه‌ها، تکنیک‌های کامپیوتری، مجموعه فرم‌ها و منطق ساختمانی و تکتونیک است که باعث بروز معماری پارامتریک شده است (Schumacher, 2008).

شکل ۱. نمونه‌ای از بروز معماری پارامتریک، زاها حدید، فرودگاه زاگرب

منبع: Jodidio, 2009, 509

«جستجوی خلاقیت در معماری امروز دیگر از شنیدن موسیقی و یک مکاشفه شخصی برای تبدیل احساس آن به اثر معماری صورت نمی‌گیرد.» (خبازی، ۱۳۹۱، ۱۱٤). مسیرهای متعدد پژوهش، معماری را از چهارراه علوم به هزارراهه‌ای تبدیل کرده که مرکز تقاطع ایده‌ها و افکار و حوزه‌های مختلف دانش بشری شده است. «اینک پارامترهای ساده‌ای مانند ابعاد و حجم دیگر برای تعریف معماری و فرم‌ها کافی نیستند.» (مهاجری و عطایی همدانی، ۱۳۹۰، ۳۸). معماری باید از گذشته خویش درس بگیرد و این آموخته‌ها را برای تولیدات بعدی خود به‌کار گیرد. این همان بخشی است که در معماری الگوریتمیک نیز تکرار خواهد شد. معماری و فرآیند طراحی الگوریتمیک، پارادایم‌های جدیدی در معماری به‌وجود آورده‌اند که دیگر در حوزه نظریه‌های پست‌مدرنیستی قابل مطالعه نیستند (خبازی، ۱۳۹۱، ۸۹).

پارامترها در طراحی معماری پارامتریک

«اعمال پارامترهای مختلف مؤثر بر طرح در الگوریتم‌های طراحی به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی معماری الگوریتمیک بیان می‌شود.» (همان، ۹۰). معماری در فضایی متأثر از پارامترهای مختلف مؤثر بر پروژه و تعریف نحوه تأثیرگذاری آنها شکل می‌گیرد. در این روش با تخصیص مقادیر مختلف در پارامترها و وضعیت‌های گوناگون، محدوده‌هایی از یک طراحی که دارای شکل صریحی نیستند، قابلیت تولید می‌یابند (مهاجری و دیگران، ۱۳۹۰، ۳۷).

خبازی در مورد نحوه کاربرد پارامترها در این معماری می‌افزاید که «طراحی در یک چرخه تکرارشونده از تأثیرپذیری و وزن گذاری پارامترها و تولید گزینه‌ها و تحلیل آنها و دریافت بازخوردها[۱۲] و اعمال مجدد آنها بر پارامترهای طراحی تا تولید گزینه‌های اصلاح شده صورت می‌گیرد و باز تکرار می‌شود تا در نهایت نتیجه‌های مطلوب که خواسته‌ها را به بهترین شکل ممکن پاسخ گفته‌اند، به‌عنوان طراحی نهایی انتخاب شوند.» (خبازی، ۱۳۹۱، ۹۱). تأثیر این پارامترها را نه فقط در روند طراحی تا رسیدن به فرم می‌توان دید، بلکه این پارامترها می‌توانند حتی در رفتار فیزیکی ساختمان نیز دخیل باشند و این نیز بخش مهمی در معماری پارامتریک محسوب می‌شود.

دـر معمـاری پارامتریـک تلاش می‌شـود تـا پارامترهای تأثیرگـذار بر رفتار فیزیکی سـاختمان (نظیـر سـازه، مـواد و مصالـح) در فرآینـد تحلیل، مـداوم به‌طور بهنـگام بر معماری اثـر بگذارد و دـر چرخه‌هـای بازخـورد، طـرح را اصـلاح نمایـد. به‌عنوان مثـال می‌تـوان زمینه اجرای یـک گنبد را به‌عنـوان یـک پارامتـر سـازه‌ای دـر طراحـی دـر نظـر گرفـت. طرح بـا توجه بـه پارامتـر زمینه گنبـد قابـل تغییـر دـر یـک چرخـه طراحـی اسـت. یا دـر رفتـار فیزیکـی سـاختمان، می‌تـوان طول یـک سـایه‌بان را بـا توجـه بـه پارامترهای میـزان تابش خورشـید، درجـه آن، اقلیـم و کاربری آن تعریـف نمود.

الگوریتم در طراحی معماری پارامتریک

موضوع مهم دیگری که بر معماری پارامتریک نیز تأثیر قابل توجهی خواهد داشت، الگوریتمی است که برای فرآیند طراحی معماری تعریف می‌شود. «الگوریتم یک فرآیند محاسباتی است که چند پارامتر یا گروهی از پارامترها را به‌عنوان ورودی دربر می‌گیرد. الگوریتم‌ها پس از فرآیند، متغیرها را به‌عنوان خروجی ارائه می‌دهند. بنابراین یک الگوریتم بیان مجموعه گام‌های محاسباتی است که ورودی‌های را به خروجی مد نظر تبدیل می‌نماید.» (Cormen, 2001, 10).

در معماری می‌توان الگوریتم را معادی برخی از گام‌های فرآیند طراحی دانست. نحوه عملکرد و گردش کار در الگوریتم‌ها ساده است. الگوریتم حاوی مقادیری داده ورودی، عملیات پردازش و خروجی است. این پردازش در همه الگوریتم یا به‌طور دقیق‌تر در بخشی از آن اتفاق می‌افتد. بنابراین بجای روش‌های معمولی طراحی اشیا، اطلاعات را فراهم می‌کنیم و این اطلاعات توسط الگوریتم‌ها پردازش می‌شود و در نتیجه هندسه مورد نظر تولید می‌شود (Khabazi, 2010, 20).

در معماری پارامتریک، الگوریتم نیز گاهی می‌تواند جزئی از ایده طراح باشد. این الگوریتم‌ها انعطاف‌پذیری سیستم‌ها را افزایش می‌دهند، به‌گونه‌ای که با تغییر در پروژه، می‌توان با اندکی تغییر در الگوریتم‌ها و پارامترها، نسبت به اصلاح پروژه اقدام نمود. کار با الگوریتم‌ها نمونه و روش‌هایی برای تولید اشکال جدید را ایجاد کرده است این اشکال، مقیاس و هستی‌شناسی جدید و نادری را ایجاد کرده‌اند (عباسی، ۱۳۸۹، ٦۲).

«آنالیزها و تحلیل‌های مختلف مرتبط با موضوع پروژه فرصت تبدیل شدن به اجزای مختلف الگوریتم طراحی را دارند تا بتوانند فرآیند طراحی را با داده‌های مستقیم کنترل نمایند. حاصل تأثیرگذاری این فاکتورها بر طراحی می‌تواند تولید گزینه‌های مطلوب‌تر باشد.» (خبازی، ۱۳۹۱، ۹۲).

با امکانات دیجیتالی فرم‌های جدید به‌راحتی از مصالح بیرون می‌آید و با استفاده از الگوریتم روابط بین مصالح و روش‌ها بررسی می‌شود. منافع این روش و تکنیک، توسعه سیستم‌های مصالح پیچیده و امتحان کردن دوام و عملکرد آنها از طریق شبیه‌سازی است. همچنین پیاده‌سازی و مشخص کردن مصالح از دیگر منفعت‌های استفاده از الگوریتم‌ها است (عباسی، ۱۳۸۹، ٦۰). در پروژه‌هایی که مکانیزم آنها بر مبنای نوآوری در سیستم‌های ساخت بوده و استفاده از ابزارهای طراحی جدید و تعامل با فاکتورهای مختلف طراحی سطوح است، آنالیزهای بهنگام می‌تواند اطلاعات مفیدی را به پروژه منتقل کند و ابزار کمکی مناسبی در تکمیل فرآیند طراحی باشد (خبازی، ۱۳۹۱، ۹۲). «معماری به‌عنوان یک موضوع پیچیده و چندبعدی باید بتواند فرصت و امکان پردازش اطلاعات متنوع را داشته باشد و معماری پارامتریک پایگاه مناسب سنجش و پردازش اطلاعات در حوزه طراحی را فراهم آورده است.» (همان، ۹۰).

طراحی به کمک رایانه (CAD)

طراحی به کمک رایانه[۱۳] مقوله دیگری است که در این معماری اتفاق می‌افتد. عنصر مهمی در این معماری که جایگزین دیگری نمی‌توان برای آن متصور شد. «CAD می‌تواند به‌عنوان یک فعالیت طراحی که شامل استفاده مؤثر از رایانه به منظور طراحی، ساخت یا اصلاح یک طراحی مهندسی است تعریف گردد.» (بهرامی، شیرویه زاد و اصغرزاده، ۱۳۹۰).

با وقوع انقلاب دیجیتال و ورود کامپیوتر به حوزه معماری ابتدا تصور می‌شد که کامپیوتر به‌عنوان یک ابزار فقط می‌تواند طرح‌ها و پروژه‌ها را ترسیم و ارائه نماید ولی نمی‌تواند بر محتوا و فرآیند طراحی اثر بگذارد، اما ثابت شد که این باور اشتباه است. اینک توسعه روز افزون نرم‌افزارهای طراحی، امکانات بیشتری را در اختیار طراح قرار می‌دهد. البته حوزه نرم‌افزاری CAD بسیار وسیع‌تر از گذشته شده است. این نرم‌افزارها در معماری به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که هرکدام به‌طور تخصصی پاسخگوی مسائل طراحی در آن گرایش باشند. به‌طور مثال می‌توان در افزونه گرس هاپر[۱۴] در نرم‌افزار راینو[۱۵]، میزان تابش، اقلیم، سطح پنجره را تعریف نمود و سپس میزان بهینه تابش بند پنجره را از نرم‌افزار دریافت نمود. یا به‌وسیله نرم‌افزار دیالوکس[۱۶] میزان روشنایی بهینه در یک اتاق را مشخص نمود. البته فریزر[۱۷] این نکته را به ما یادآوری می‌کند که هرنوع استفاده از رایانه در معماری را نمی‌توان معماری پارامتریک نامید، بلکه طراحی به کمک رایانه زمانی کارآمد خواهد بود که تکرار با انتقال‌های استاندارد مورد نیاز باشد. اگر بخواهیم از این موضوع فقط در جهت طراحی فرم‌های جدید استفاده کنیم، استفاده‌ای نابجا خواهد بود (Frazer, 1995, 6).

روشهای فرم‌یابی

در معماری پارامتریک از روشهای متعددی در جهت طراحی و رسیدن به فرم استفاده می‌شود. مانند :

- تغییر شکل‌های زنجیره‌ای
- میانیابی هندسی
- فرآیندهای اتفاقی
- استفاده از عملگرهای منطقی روی احجام
- استفاده از هندسه پیچیده و فراکتال (گلابچی و دیگران، ۱۳۹۱، ۸۳-۱۰۴).

همان‌طور که در بالا ذکر شد، یکی از روش‌های فرم‌یابی معماری پارامتریک، هندسه فراکتال است. این هندسه یکی از هندسه‌های پیچیده عناصر طبیعی است که در طبیعت به‌وفور یافت می‌شود. فرانک لوید رایت[۱۸]، معمار بزرگ ارگانیک در ستایش از طبیعت و لزوم توجه ویژه به آن می‌افزاید: با آنکه قرن‌هاست سمت و سوی فعالیت ما عمدتاً پشت کردن به طبیعت و جستجوی الهام در کتاب‌ها و چسبیدن کورکورانه و برده‌وار به فرمول‌های خشک و مرده بوده است، اما گنجینه الهامات طبیعت تمام‌نشدنی است و چنان غنی که هرچه از آن بردارند پایانی ندارد (رایت، ۱۳۷۱، ۱۸).

هندسه فراکتال

اصطلاح فراکتال از کلمه یونانی Fractious به معنای چندپاره گرفته شده است (Bovill, 1995, 3). مطالعه ریاضی شکل‌های همانند و ارتباط آنها با اشکال طبیعی در مضمونی با عنوان هندسه فراکتال طبیعت توسط بنیوت مندلبرات[۱۹] در سال ۱۹۷۷ معرفی شد (عرفانیان، ۱۳۸۰). در علم

ریاضی، فراکتال یک شکل هندسی است که پیچیده است و دارای جزئیات مشابه در ساختار خود در هر مقیاسی است (شکل ۲). میزان بی‌نظمی در آن از دور ونزدیک به یک میزان است (قبادیان، ۱۳۸۸، ١٦٦). به گفته کارل بویل: «هندسه فراکتال، مطالعه رسمی سازه‌های خودمتشابه است.» (Bovill, 1995, 5).

اشکال فراکتال دارای ویژگی‌هایی به شرح زیر هستند:

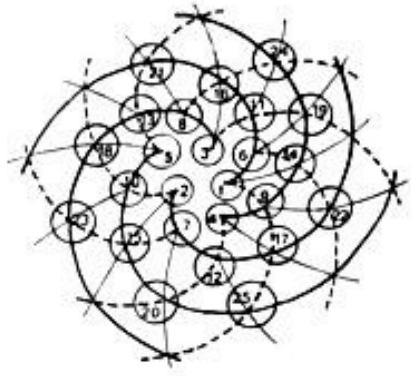
۱. بی‌قاعده‌تر از آن است که بتوان آن را با زبان هندسه اقلیدسی توصیف کرد.
۲. دارای ساختار خودمتشابه است بدین معنی که شامل کپی‌هایی از خودش در مقیاس‌های متفاوت است و تناسبات نسبی بین وجوه شکل و زوایای داخلی، ثابت باقی می‌ماند.
۳. در اشکال فراکتال هیچ خط مستقیمی وجود ندارد. لبه‌ها و وجوه داخلی آنها صاف و هموار نیست بلکه منفذدار یا تاب‌خورده است.
٤. یک ریتم تکرار شونده در اشکال فراکتال وجود دارد که آنها را به سمت تعادل سوق می‌دهد.
٥. بعد فراکتال یک معیار ریاضی برای تعیین درجه پیچیدگی بافت شکل فراکتال است که هرچه بیشتر شود میزان شگفتی ترکیب شده با نظم زیربنایی بیشتر است (ایزدی، حداد و مشکسار، ۱۳۸۷، ۷۷).

فراکتال‌ها دارای بعد فراکتالی‌اند. این بعد یک عدد اعشاری خواهد بود و نه یک عدد صحیح. یکی از راه‌های محاسبه بعد فراکتال استفاده از فرمول زیر است (Bovill, 1995, 24):

$$A = \frac{1}{S^D} = \left(\frac{1}{S}\right)^D$$

در اینجا A تعداد قطعات کوچک‌تر است که کل به آن تقسیم شده، S فاکتور مقیاس قطعات نسبت به کل و D بعدی است که می‌خواهیم محاسبه کنیم. D از فرمول زیر محاسبه می‌گردد (Bovill, 1995, 24):

$$D = -\left(\frac{\log a}{\log s}\right)$$



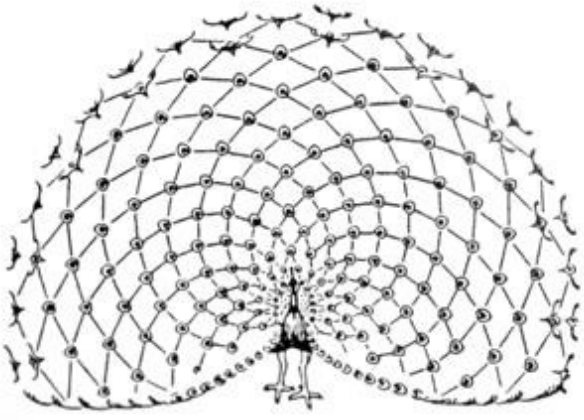
شکل ۲. نمونه هندسه فراکتال،

منبع: Bovill, 1995, 65

فراکتال در طبیعت

شاید بتوان طبیعت را بهترین الگوی انسان در تمام تاریخ معماری دانست. در عین اینکه بشر هرگز نتوانسته است گوشه‌ای از طبیعت را همان‌طور که هست به تصویر بکشد، الگوهایی از آن برگرفته که هیچ تخیل نیرومند بشری قادر به خلق چنین الگوهایی نبوده است.

فراکتال‌ها در طبیعت به صورت الگوهای هندسی نمود می‌یابند که به صورت مقیاس‌های جمع و کوچک شده تکرار می‌شوند (شکل ۳). به‌عنوان مثال می‌توان سرخس‌ها، سیستم‌های تنفسی جانداران یا تشکیل سنگهای آذرین را نام برد. در فرآیند تشکیل این نوع سنگها، بعد از هر باران فوران آتشفشان از انجماد و شکل گیری گدازه‌ها بلورهایی حاصل می‌شود که همگی شبیه هم هستند و پس از شکل گیری سنگهای آذرین به‌وجود می‌آورند. رشد آنها به یک شیوه خاص تا زمانی که به مانعی برخورد کنند ادامه می‌یابد و تنها نیروی وارده از موانع طبیعی دیگر جهت رشد آنها را تغییر می‌دهد (بمانیان، لیلیان و امیرخانی، ۱۳۸۹، ٤٦).



شکل ۳. وجود هندسه فراکتال در عناصر طبیعت

منبع: Bovill, 1995, 66

فراکتال و معماری

«یکی از دیدگاه‌های نو در هنر معاصر که ریشه در ریاضیات آشوب و بی‌نظمی دارد، دیدگاه فراکتال است. رویکرد آنان الگوبرداری هندسه از برخی اشکال پیچیده طبیعت و زیبا دانستن آن است... در این دیدگاه برای ساده‌تر کردن الگوبرداری از هندسه طبیعت، یک اصل مهم هست و آن تکرار همگون از جز تا کل است؛ به‌گونه‌ای که ریخت کل جسم با اجزا آن بسیار همانند است و هر مجموعه از ترکیب اجزاء همگون با کل ساخته می‌شود» (نقره‌کار، ۱۳۸۹، ۲۲۵).

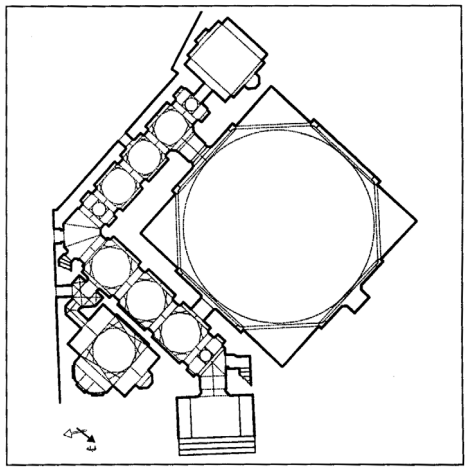
ظهور فراکتال زمانی رخ داد که تاریخ، مدرنیسم را پشت سر گذاشته بود. مدرنیسمی که جهان را مانند ماشین کوک‌شده‌ای می‌داند که دارای نظمی جبری و خطی است. لورنز ولفگانگ[۲۰] در بررسی رابطه بین معماری و فراکتال، ساختمان‌ها را به سه دسته تقسیم می‌نماید: اولین گروه مربوط به ساختمان‌هایی است که فاقد هر گونه عمق بصری بوده و از دید او غیرجذاب و حتی کسل‌کننده هستند. دسته دوم، ساختمان‌هایی بی‌هویت هستند که جزئیات غیرمرتبط به یکدیگر در ابعاد و مقیاس‌های گوناگون ارائه می‌دهند که از نظر وی منجر به اغتشاش خواهد شد. در دسته سوم ساختمان‌هایی با خاصیت خودمتشابهی جای می‌گیرند که جزئیات آن در هر مرحله و مقیاسی با سایر قسمت‌ها همخوانی دارد. با نگاه دقیق‌تر متوجه می‌شویم که ساختمان‌های این

گروه متشکل از تعداد زیادی از اجزای بسیار کوچک است که به‌گونه‌ای با یکدیگر ترکیب شده‌اند که تعداد کمتری از اجزای کمی بزرگ‌تر را شکل داده و این ترتیب به صورت سلسله مراتبی در کل آن تکرار می‌شود. هندسه فراکتالی زبانی است که توسط آن ارتباط ترکیبات معماری چنین اجزایی توصیف می‌گردد. به زبان ساده می‌توان گفت هندسه فراکتال بیان ساختارهای پیچیده را امکان‌پذیر می‌نماید (Wolfgang, 2009).

ذکر این نکته در اینجا الزامی است که معماری فراکتال حتی با تکنولوژی بالای امروزی به غنا و تکامل معماری در ساختارهای موجود در طبیعت نمی‌رسد و شاید استفاده از این هندسه در معماری به‌خصوص معماری پارامتریک، گامی کوچک در جهت نزدیک شدن به هندسه طبیعت باشد.

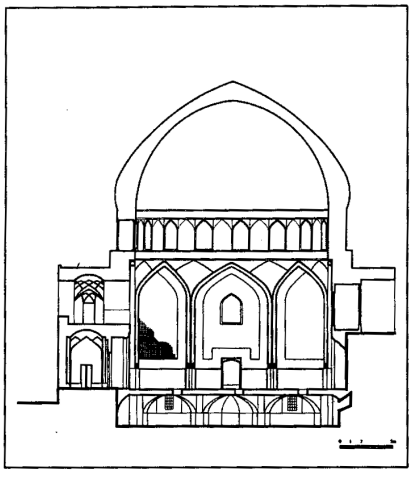
هندسه فراکتال در آرایه داخلی گنبد مسجد شیخ لطف‌الله

مسجد شیخ لطف‌الله برای شیخ لطف‌الله، یکی از دانشمندان زمان شاه عباس به‌وسیله معمار بزرگ محمد رضا اصفهانی[۲۱] در بین سال‌های ۱۰۱۲-۱۰۲۸ هجری ساخته شد(شکل ٤ و ٥)... گنبد مسجد بر روی یک کاربندی ساده و یک اربانه ساخته شده است... نگاره‌های زیر گنبد، ترنج کنگری و ترنج در هم هستند (پیرنیا، ۱۳۸۷، ۲۸۸). بر اساس کتیبه داخل مسجد تاریخ تزئین ۱۰۲۵ هـ ذکر شده است (یاوری و باوفا، ۱۳۹۰).



شکل ۴. پلان مسجد شیخ لطف‌الله

منبع: پیرنیا، ۱۳۸۷، ۲۹۹



شکل۵. مقطع مسجد شیخ لطف‌الله

منبع: پیرنیا، ۱۳۸۷، ۲۹۹

آرتور پوپ[۲۲] گنبد این مسجد را این‌گونه توصیف می‌نماید: «گنبد کوتاه تک‌پوشه آن به قطر ۱۲ متر، بار فراوانش که روی دیوارهای قطور (به قطر ۱۷۰ سانتی‌متر) قرار گرفته، به بنا استحکامی آرام می‌بخشد. اسلیمی‌های آبی و سفید باوقار به گرد زمینه‌ای به رنگ شیر و قهوه، پیچ‌وتاب می‌خورد و یک سردر مقرنس درخشان در میان آن باشکوه نمایان است. خود اطاق نشانه کمال نهایی نقشه گنبد روی اطاق چهارگوش است که اینک با پالایش افزاینده زمان ساده و ملایم شده بود.» (پوپ، ۱۳۹۰، ۲٦۱-۲). نمای داخلی این گنبد را می‌توانیم بهترین نمونه نبوغ ایران اسلامی بشناسیم (یاوری و باوفا، ۱۳۹۰).

جزئیات به‌کار رفته در نمای داخلی این گنبد که تلفیقی استادانه از آجر و کاشی معرق است این جمله میس وندروهه[۲۳]، معمار بزرگ را به ذهن متبادر می‌نماید که «قدرت خداوند در جزئیات

تجلی می‌یابد[۲۴]» (Emmitt et al., 2004, 3). راجر سیوری[۲۵] در توضیح این جزئیات اضافه می‌نماید که «در داخل گنبد، شبکه‌ای از نقش‌های لیمویی‌شکل اضافه شده است که با دور شدن شمسه‌ای که در رأس قرار دارد بزرگتر می‌شود. این نقوش با آجر ساده احاطه شده است و داخل هر نقش با طرح شاخ و برگ که روی گچ نشانده شده و روی گچ اخرایی رنگ تزئین شده است و حاشیه آنها با نوشته‌های عریض سفید رنگ روی زمینه آب تیره پوشیده شده است (سیوری، ۱۳۸۰، ۲۲۵).

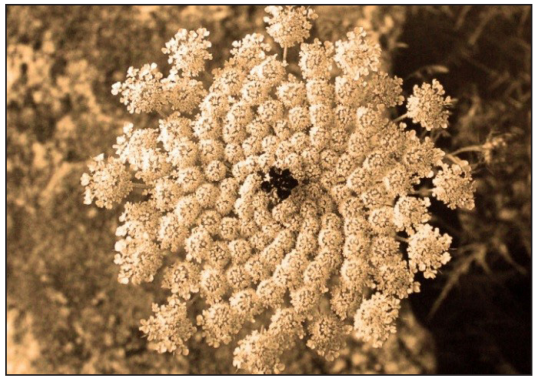
اردلان در مورد استفاده از ریاضیات در معماری می‌گوید: «از طریق استفاده از اعداد و هندسه، به‌عنوان عبارات ریاضی، آفرینش اشکال یادآور الگوهای ازلی عالم مثال است. با توجه به این موضوع]که[ریاضیات به صورت زبان خرد دیده می‌شود، ابزاری است برای تأویل که بنا به ماهیتش از دنیای محسوس به دنیای معلوم منتهی می‌شود. ریاضیات انتزاعی است مربوط به حواس، اگرچه ماهیت نوعی‌اش عینی است. این انتزاع‌ها از دنیای معلوم به‌عنوان راهنمایی پایه برای جوهرهٔ ابدی و عینی موجود در نظم الهی به‌کار می‌آید» (اردلان و بختیار، ۱۳۹۰، ۵۱).

«گاهی عمق مفهوم و زیبایی‌های صوری این هندسه آنچنان است که ناچار باید اعتراف کرد که جز با شهود، دستیابی به این حد از توانایی هندسی، امکان نداشته است» (نقره‌کار، ۱۳۸۹، ۲۰۳). ندیمی با تأکید بر اینکه معماران سنتی، معماری را در هماهنگی و مکمل طبیعت می‌دانستند، می‌افزاید: «طبیعت محسوس و هندسه پنهان و شگفت‌انگیز آن که رمزگشای صورت مثالی است، منبع الهام معمار مسلمان بوده است. وی با شهود این رمزها و برگرفتن آن با عمق جان و پرگشودن در فضای خیال، نقش‌پرداز حقیقت می‌گردد. الهام معمار سالک از طبیعت از نقش پنهان آن است که هندسه وجدانی خود را پس از تکثرات و تنوعاتش پیش چشمشان شهودی قرار می‌دهد» (ندیمی، ۱۳۷۸، ۳۷۹، برگرفته از نقره‌کار، ۱۳۸۹، ۲۳۱).

شکل‌های مورد استفاده در معماری به‌خصوص در مساجد که نمود بارز معماری سنتی هستند، از مفهوم سنتی ریاضیات، به‌خصوص هندسه و اشکال هندسی جدایی‌پذیر نیستند. از مباحث جالب در معماری دوران اسلامی، انتخاب نوع هندسه‌ای است که معماران آن را در طرح‌های خود به‌کار گرفته‌اند. با بررسی آرایه داخلی گنبد مسجد و همچنین شباهت آن به اشکال طبیعی دارای هندسه فراکتال این فرضیه به ذهن خطور می‌کند که معمار آن در طراحی آن با الهام از الگوهای طبیعی و هندسه فراکتال به چنین طرح اعجاب‌آوری رسیده است.

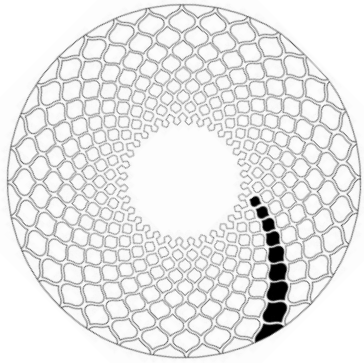
در این مورد عناصر طبیعی که احتمال الهام گرفتن طرح از آنها وجود دارد، گل زردک و همچنین گل آفتابگردان است. در شکل‌های ٦، ٧ و ٨ شباهت طرح این آرایه را به این عناصر مشاهده می‌کنیم. در هر دو مورد نیز هندسه متشکله اجزا، هندسه فراکتال است (شکل ۹). نظر بر این است که طراح با انتخاب این عناصر، سعی در رسیدن به هدف خویش که همانا القای حس عرفانی گذر از کثرت و رسیدن به حس وحدت بوده داشته است (سیف، ۱۳۸۸). اما موضوع دیگری که در هندسه مورد استفاده در این گنبد به چشم می‌آید، موضوع منظره در هندسه فراکتالی، خصوصاً در این گنبد است. اگرچه در هر نوع معماری و در هر مقیاسی و با هر ویژگی مفهوم منظره به شرط رویارویی یک انسان با ابژه[۲۶] معماری متجلی است، اما در یک معماری فراکتال با ابعادی برتر از ابعاد یک هندسه اقلیدسی این مفهوم خود را بسیار قوی‌تر معرفی می‌کند.

در معماری فراکتال تغییر موقعیت ناظر و تغییر موقعیت معماری، هر دو را با هم خواهیم دید. به همین دلیل است که این نوع معماری، یک معماری پویا است (بمانیان و دیگران، ۱۳۸۹، ٤٨). در هندسه این گنبد شاهد خواهیم بود که با تغییر موقعیت ناظر نسبت به گنبد، در اکثر موارد شاهد تغییر موقعیت معماری، در عین ثابت بودن ابژه، و سوق دادن چشم به مرکزیت گنبد خواهیم بود (شکل ۱۰).



شکل ۶.گل زردک وحشی

منبع: نگارندگان

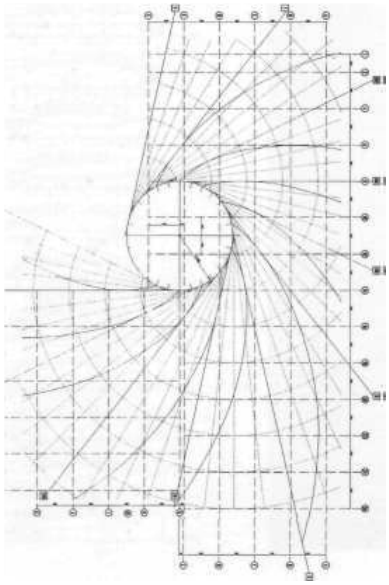


شکل ۷. هندسه آرایه داخلی مسجد

منبع: نگارندگان

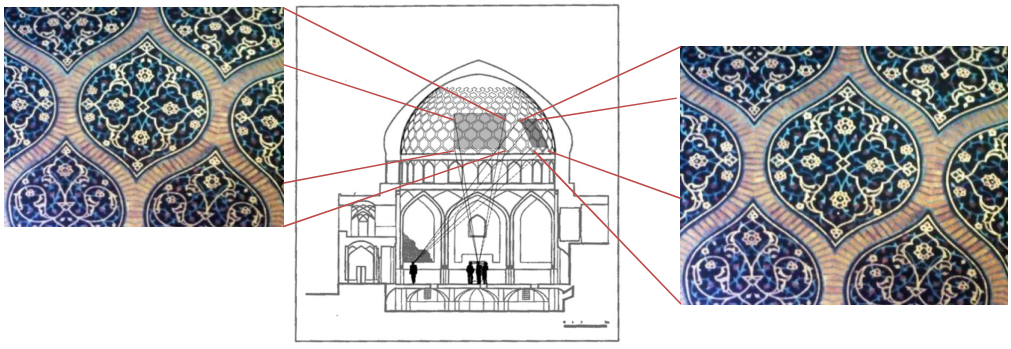
شکل ۸. هندسه گل آفتابگردان

منبع: نگارندگان



شکل ۹. هندسه استخراجی از گل آفتابگردان

منبع: Jencks, 1997, 176



شکل ۱۰. تغییر موقعیت معماری در عین ثابت بودن ابژه

منبع: نگارندگان

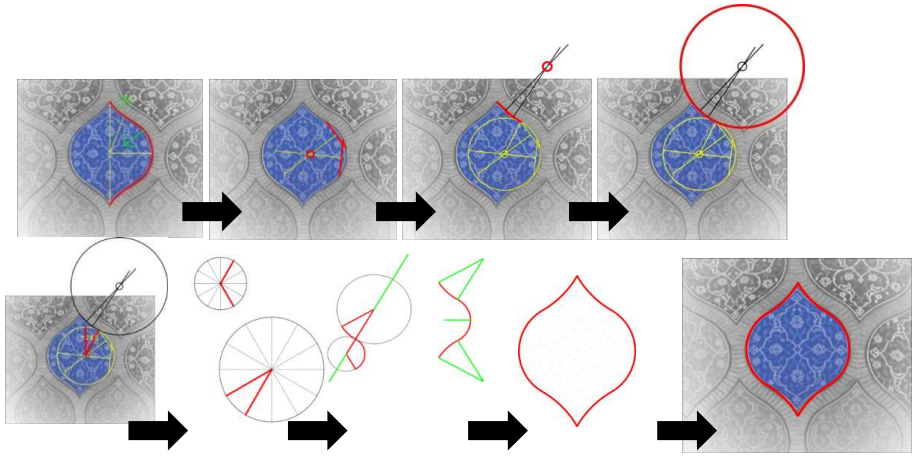
بازتعریف هندسه آرایه داخلی مسجد بر اساس اصول معماری پارامتریک

- استخراج هندسه الگوواره آرایه

در فرآیند بازتعریف هندسه این آرایه، ابتدا باید داده‌های اولیه الگوریتم آن تولید می‌شد. بدین منظور گام اول، استخراج هندسه الگوواره‌های مورد استفاده در آن است. به‌طور خلاصه، مراحل زیر در استخراج این هندسه طی شد:

۱. تشخیص موج سینوسی در هندسه الگوواره
۲. یافتن مرکز و شعاع دایره‌ها
۳. یافتن تعداد تقسیمات دایره‌ها (به تعداد ۱۲ قسمت)
٤. یافتن قطاع مورد نظر از تقسیمات دایره
٥. انجام دو مرحله تقارن محوری نسبت به محورهای X و Y
٦. تطابق با شکل اصلی به‌منظور ارزیابی درستی مراحل

پس از طی مراحل فوق و استخراج هندسه آن، داده‌های عددی مربوط به این هندسه نیز باید استخراج می‌شد. بدین منظور با احتساب شعاع دایره اصلی گنبد، رابطه بین مرکز دایره و محور تقارن شکل و همچنین لحاظ نمودن بندهای آجری، داده‌های شعاع دوایر محیطی، دایره کوچک و بزرگ استخراج گردید.



شکل ۱۱. مراحل استخراج الگوواره

منبع: نگارندگان

جدول ۱. متغیرها (شعاع‌های دایره محیطی، دایره کوچک و بزرگ)

ردیف	شعاع دایره محیطی	شعاع دایره کوچک	شعاع دایره بزرگ
۱	۳,۸۵	۰,۲۳	۰,٤٦
۲	٤,۲٦	۰,۲٦	۰,۵۲
۳	٤,٦۵	۰,۲۸	۰,۵٦
٤	۵	۰,۳۰	۰,٦۰
۵	۵,۳۳	۰,۳۲	۰,٦٤
٦	۵,٦۲۵	۰,۳٤	۰,٦۸
۷	۵,۸۵	۰,۳۷	۰,۷٤
۸	۵,۹۸	۰,۳۹	۰,۷۸
۹	٦,۰۳	۰,٤۰	۰,۸۰

منبع: نگارندگان

- وارد کردن داده‌ها به نرم‌افزار و طراحی الگوریتم رسم آن

برای ترسیم آرایه این گنبد در قالب اصول معماری پارامتریک، از افزونه گراس هاپر در نرم‌افزار راینو استفاده شد. گراس هاپر یکی از مهم‌ترین نرم‌افزارهای طراحی پارامتریک محسوب می‌شود. گرس هاپر به‌سرعت رشد می‌کند و به یک بستر نرم‌افزاری مناسب برای معماران جهت طراحی

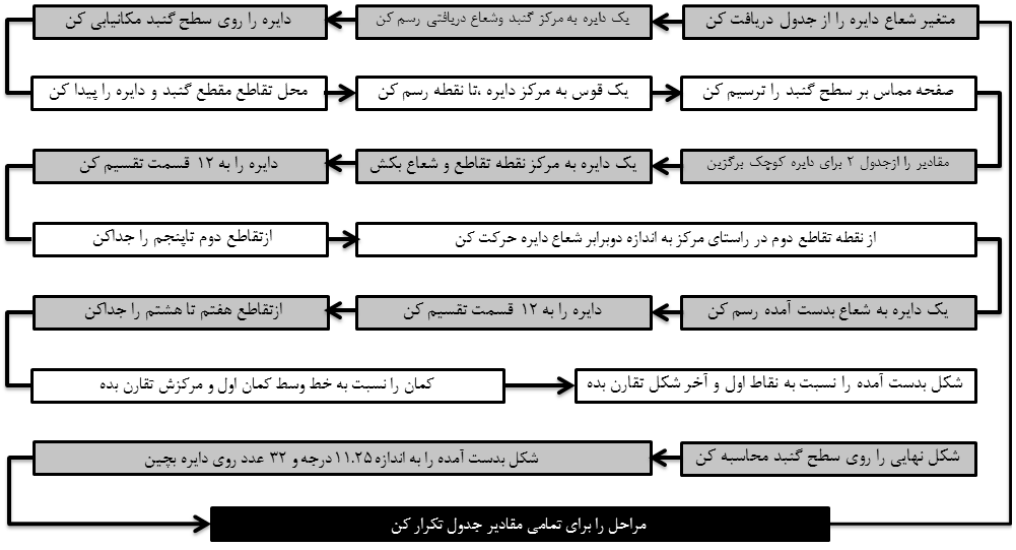
تبدیل می‌شود. این افزونه بیشتر از آنکه یک نرم‌افزار یا یک ابزار باشد، راهی برای تفکر در مورد مسائل طراحی ارایه می‌دهد. «این نرم‌افزار امروزه به‌عنوان یک "متد[۲۷]" پارامتریک محسوب می‌شود.» (Khabazi, 2010, 6). در این نرم‌افزارها داده‌های ورودی و خروجی را به‌عنوان پارامترها می‌شناسیم. «پارامترها اشیایی هستند که داده‌ها را بیان می‌دارند مانند یک نقطه یا یک خط.» (Khabazi, 2010, 8). پارامترها در آرایه داخلی گنبد مسجد شیخ لطف‌الله عبارت‌اند از :

۱. مقطع گنبد که از روی شکل مقطع مسجدبرداشت شد (پیرنیا، ۱۳۸۷،۲۸۸)(شکل ۱۲)
۲. نقطه مرکزی گنبد
۳. دوایر محیطی
٤. دوایر کوچک و بزرگ تشکیل دهنده الگووارهها.

و همچنین برای این پارامترها، الگوریتمی طراحی شد تا آرایه به‌وسیله نرم‌افزار گرس هاپر ترسیم شود (شکل‌های ۱۳و ١٤).

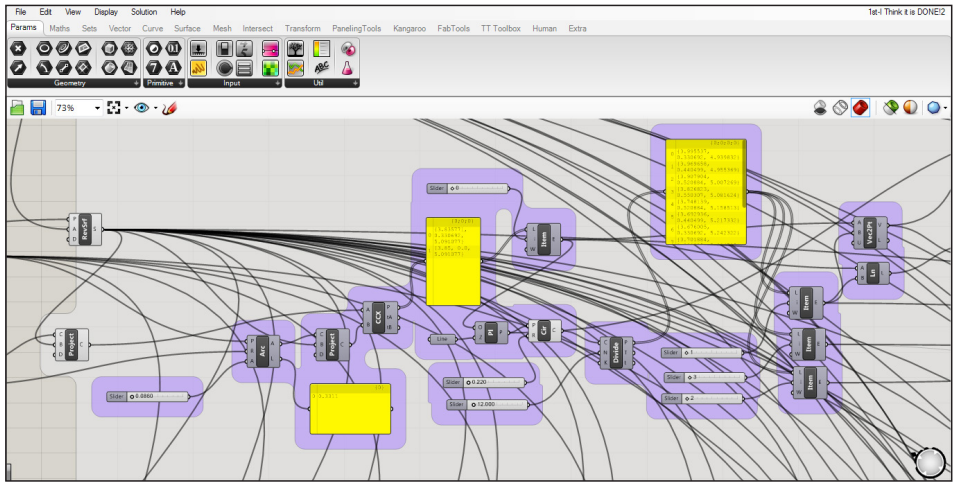
شکل ۱۲. مقطع مسجد شیخ لطف‌الله

منبع: پیرنیا، ۱۳۸۷، ۲۸۸



شکل ۱۳. الگوریتم طراحی شده برای ترسیم آرایه

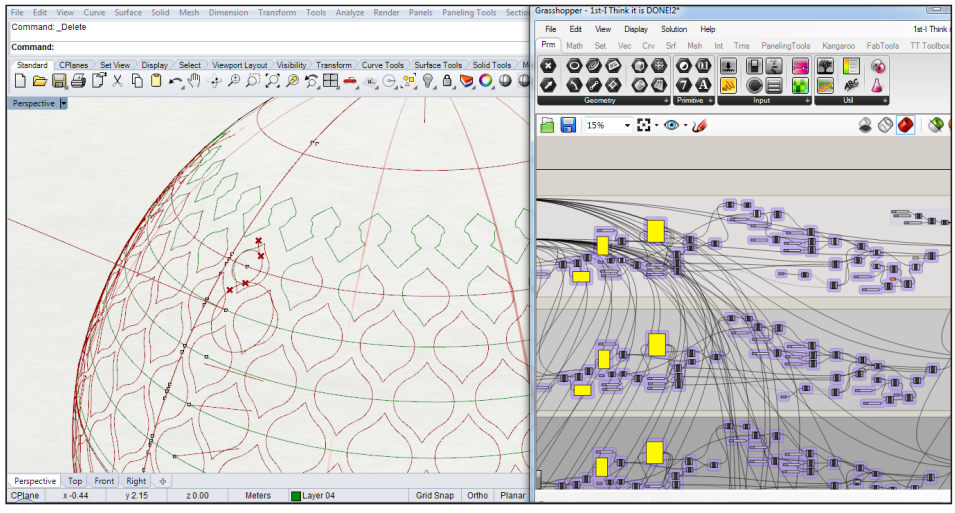
منبع: نگارندگان



شکل ۱۴. رسم الگوریتم در افزونه گراس هاپر

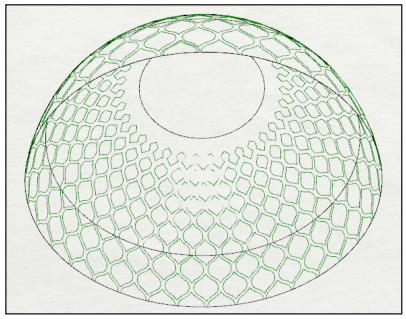
منبع: نگارندگان

و نتیجه در نرم‌افزار ترسیم و آرایه مستخرج روی مقطع گنبد اعمال شد (شکل‌های ۱۵، ۱۶ و۱۷).



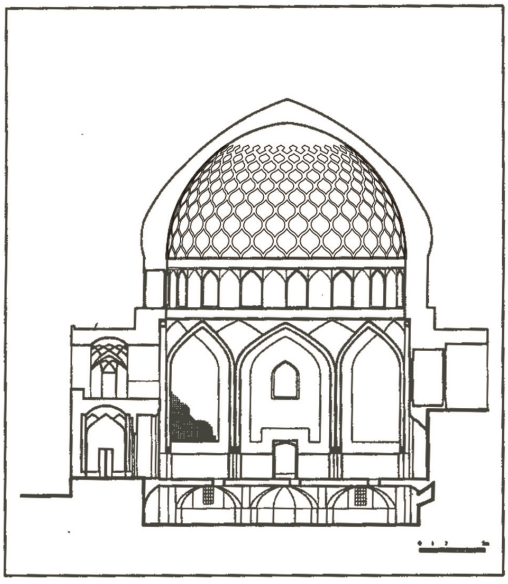
شکل ۱۵. نتیجه الگوریتم ترسیم شده در نرم‌افزار راینو

منبع: نگارندگان



شکل ۱۶. شبیه‌سازی نهایی آرایه داخلی گنبد مسجد شیخ لطف‌الله

منبع: نگارندگان



شکل ۱۳. الگوریتم طراحی شده برای ترسیم آرایه
منبع: نگارندگان

نتیجه‌گیری

جستجو در طبیعت و کشف فرم‌ها و ایده‌های جدید از آن، ما را به غنی‌ترین گنجینه الهامات جهان متصل می‌نماید. موضوعی که در معماری سنتی ایرانی به بهترین شکل از آن در ناب‌ترین آثار معماری بهره گرفته شده است. محمدیان منصور در پژوهش خود گره دوپنج را بر ساختار سیلیکونی تطبیق داد و بر این مدعا که معماران سنتی ایران از ساختار هندسی عناصر طبیعت آگاهی داشته اند تأکید کرد.

همچنین با پیشرفت علوم و ورود رایانه به فرآیند طراحی معماری، معماری پارامتریک روز به روز با استقبال بیشتری از سوی جامعه طراحان روبه‌رو است. بروز این جریان جدید در معماری، امکانات ویژه‌ای را به طراح و معمار خواهد داد. امکاناتی از جمله:

- محدود نبودن طراح به استفاده از هندسه اقلیدسی
- ایجاد تکاپویی در معماری برای جستجوی فرم‌های جدید که در آن از هندسه‌های پیچیده استفاده شده است
- امکان ایجاد تغییر در پارامترها و مشاهده تغییرات اعمال شده در کوتاه‌ترین زمان
- افزایش سرعت در روند طراحی در رسیدن به فرم مد نظر
- حذف شدن کارهای تکراری که به رایانه محول می‌شود

پژوهش پیش رو با بررسی هندسه فراکتال در معماری پارامتریک و عناصر طبیعی، بر این موضوع تأکید دارد که حتی پیچیده‌ترین هندسه‌ها نیز امروزه با ورود رایانه‌ها و بروز معماری پارامتریک، به‌راحتی قابل برداشت و الهام است.

در این تحقیق به‌عنوان یک نمونه، آرایه داخلی گنبد مسجد شیخ لطف‌الله که هندسه مورد استفاده در آن از نوع هندسه فراکتالی است مورد بررسی قرار گرفت. هندسه این آرایه استخراج گشت. در این هندسه از یک الگوواره به‌عنوان شکل پایه استفاده شده و شکل‌های مبنا بر اساس هندسه فراکتالی و در زمینه گنبد طراحی و اجرا شده‌اند. این اصول همان اصولی است که در هندسه

فراکتال مورد استفاده قرار می‌گیرد. این هندسه در قالب معماری پارامتریک و زبان الگوریتم ترجمه شد و مشاهده شد که این آرایه در نرم‌افزار قابل ترسیم است.

بازخوانی آثار اصیل سنتی ایرانی و ترجمه آن به زبان معماری روز (از جمله معماری پارامتریک) فرصتی را برای معماری ایران ایجاد می‌کند تا بتوان در جهت باززنده‌سازی اصول معماری ایران، علاوه بر عملکردهای پیشین این آثار، عملکردهایی جدید بر آن افزود یا حتی با تلفیق با ایده‌هایی نو، آن را تکامل بخشید و در آثار جدید معماری مورد استفاده قرار داد. آنچه که تعریف الگوریتمی هندسهٔ این آثار را از تعاریف قبل متمایز می‌سازد، تعریف بر اساس پارامترهای قابل تغییر است. بدین صورت می‌توان برای هر زمینه‌ای پارامترها را تغییر داده، و اثری با متناسب با زمینه اجرای آن محل طراحی نمود.

همان‌طور که گفته شد، موضوع جالبی که در خلال این پژوهش به‌دست آمد، این بود که هندسه فراکتال در سال ۱۹۷۷ میلادی برای اولین بار به‌طور رسمی به‌عنوان شاخه‌ای مجزا توسط مندلبرت معرفی شد، درحالی‌که تاریخ ساخت این تزئین به حدود چهارصدسال پیش یعنی سال ۱۰۲۵ ه.ق (۱۶۰۴ میلادی) باز می‌گردد.

مخاطبان این پژوهش جامعه معماران، طراحان داخلی، کارشناسان مرمت آثار تاریخی و طراحان اماکن مذهبی هستند. نکته‌ای که در این میان به ذهن خطور می‌کند این است که چگونه آرایه فوق با این هندسه پیچیده در آن زمان و با امکانات محدود در زمینه گنبد اجرا شده است. که این موضوع خود می‌تواند پرسش و زمینه‌ای برای پژوهش‌های آتی فراهم آورد.

پی‌نوشت‌ها

1. Algotecture
2. Terzidis
3. Patrik Schumacher
4. Greg Lynn
5. Sydney Opera House (Sydney, Australia)
6. Jørn Oberg Utzon
7. Frank Gehry
8. Zaha Hadid

این معمار در سال‌های اخیر اکثر آثار خود را بر مبنای معماری پارامتریک طراحی نموده است.

9. Biomimetic
10. Parametric Architecture, Parametric Design
11. Nil leach
12. Feedback loops.
13. Computer Aided Design, (CAD)
14. Grasshopper Plugin
15. Rhinoceros
16. DiaLUX
17. John Frazer
18. Frank Lioyd Wright
19. Benoît Mandelbrot
20. Lorenz Wolfang

۲۱. سازنده این بنا از قدرت و امکاناتی که در اختیار داشته حداکثر استفاده را برای به ثمر رساندن نبوغ و خلاقیت خویش به‌کار برده است. وی همچنین مسلماً در پیاده کردن طرح خویش از وجود نابغه زمان خویش، شیخ بهایی که در همه آثار ساختاری زمان شاه عباس شریک و سهیم بوده حداکثر استفاده را برده است و به همین سبب اشعار او را در کتیبه شمالی مسجد نوشته است (نجم‌آبادی، ۱۳۸۱، ۹۱).

22. Arthur Upham Pope

23. Ludwig Mies van der Rohe
24. "God is in the Detail"
25. Roger Savory
26. Object
27. method

فهرست منابع

- اردلان، نادر و بختیار، لاله (۱۳۹۰) *حس وحدت*، ترجمه ونداد جلیلی، نشر علم معمار رویال، تهران.
- ایزدی، فاطمه؛ حداد، شمیلا و مشکسار، مریم (۱۳۸۷) «هندسه فراکتال و بازتاب آن در معماری»، *فصلنامه گزارش سازمان نظام مهندسی استان فارس*، بهار و تابستان، ٥٦، صص. ٧٦-٨١.
- بمانیان، محمدرضا؛ لیلیان، محمدرضا و امیرخانی، آرین (۱۳۸۹) «هندسه فراکتال در ساختارهای هنر و معماری»، *فصلنامه جلوه نقش، تابستان*، ۳، صص. ٤٢-٥٠.
- بهرامی، مهدی؛ شیرویه‌زاد، هادی و اصغرزاده، فرهاد(۱۳۹۰)، «ارزیابی و اولویت‌بندی نرم‌افزارهای CAD/CAM با به‌کارگیری فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)»، *دوماهنامه هوش مصنوعی و ابزار دقیق*، ۲۹، صص. ۲-۷.
- پوپ، آرتور (۱۳۹۰) *معماری ایران*، ترجمه غلامحسین صدری افشار، نشر دات، تهران.
- پیرنیا، محمدکریم (۱۳۸۷) *سبک‌شناسی معماری ایران*، تدوین غلامحسین معماریان، چاپ هشتم، انتشارات سروش دانش، تهران.
- خبازی، زوبین (۱۳۹۱) *پارادایم معماری الگوریتمیک*، انتشارات کسری، تهران.
- لویدرایت، فرانک (۱۳۷۱) «برای اعتلای معماری»، ترجمهٔ فرزانه طاهری، *مجله آبادی*، سال دوم، پنجم، صص. ۱۸-۲۹.
- سیف، هادی (۱۳۸۸) *کاشی‌کاری داخلی گنبد مسجد شیخ لطف‌الله، روایت عارفانهٔ حدیث هنری گذر از کثرت و رسیدن به وحدت*، انتشارات کانون پرورش فکری کودکان و نوجوانان، تهران.
- سیوری، راجر (۱۳۸۰) *ایران عصر صفوی*، ترجمه کامبیز عزیزی، ویرایش سوم، نشر مرکز، تهران.
- عباسی، زهرا (۱۳۸۹) «الگوریتم‌های کامپیوتری در معماری دیجیتال»، *ماهنامه بین المللی راه و ساختمان*، ۷٦، صص. ٦٠-٦٥.
- عرفانیـان، عباس(۱۳۸۰) «معماری طبیعت: هندسه فرکتال و نظری آشوب »، *مجله فضا*، ۲-۳. صص. ۲۵-۳۲.
- قبادیان، وحید (۱۳۸۸) *مبانی و مفاهیم در معماری معاصر غرب*، دفتر پژوهش‌های فرهنگی، تهران.
- کاستلر، مانوئل (۱۳۸۰) *عصر اطلاعات اقتصاد، جامعه و فرهنگ*. ظهور جامعه شبکه‌ای، ترجمه احمد علیقلیان و افشین خاکباز، انتشارات طرح نو، تهران.
- گلابچی، محمود؛ اندجی گرمارودی، علی و باستانی، حسین (۱۳۹۱) *معماری دیجیتال؛ کاربرد فناوری‌های CAD/CAM/CAE در معماری*، انتشارات دانشگاه تهران، تهران
- محمدیان منصور، صاحب و فرامرزی، سینا (۱۳۹۱) «مقایسه نظم شبه‌تناوبی شاه‌گره با ساختار شبه‌بلوری سیلیکون»، *نشریه هنرهای زیبا، هنرهای تجسمی*، ۵۰، صص. ٦٩-٨٠.
- مهاجری، مظفر و عطایی همدانی، محمدرضا (۱۳۹۰) «دسته بندی راهبردهای رایانه‌ای در آفرینش معماری»، *تفکر معماری*، ۲۵، صص. ٣٦-٤٠.
- نجم آبادی، محمدحسین (۱۳۸۱) *مسجد شیخ لطف‌الله و ویژگی‌های آن*، نشر و پژوهش فرزان روز، تهران.
- نقره‌کار، عبدالحمید، (۱۳۸۹) *مبانی نظری معماری*، انتشارات دانشگاه پیام نور، تهران.
- یاوری، حسین؛ باوفا، رقیه (۱۳۹۰) اصفهان، *باغ آسمان. سیری در حکمت معماری اسلامی و تزئینات وابسته به آن در دوره صفویه*، نشر سیمای دانش، تهران.

- Bovill, Carl (1995) *Fractal Geometry in Architecture and Design*, Birkhauser, Boston.
- Cormen, Thomas H. (2001) *Introduction to algorithms*, 2nd ed, Cambridge, Mass: MIT Press.
- Emmitt, Stephen; Olie, John & Schmid, Peter (2004) *Principles of architectural detailing,* 1st edition, Oxford, Blackwell Pub., UK.
- Flake, Gary William (2000) *The computational beauty of nature, Computer explorations of fractals, chaos, complex systems, and adaptation,* Cambridge, MIT Press, Mass.
- Frazer, John (1995) *An Evolutionary Architecture*, Architectural Association, London.
- Jencks, Charles (1997) *Architecture of the jumping universe, A polemic : how complexity science is changing architecture and culture,* Rev. ed., Wiley, Chichester.
- Jodidio, Philip (2009) *Zaha Hadid. Complete works 1979-2009,* Taschen, Köln.
- Khabazi, Zubin (2010) *Generative Algorithms using Grasshopper,* Digital Publication, Available online at www.morphogenesism.com.
- Leach, Nil (2009) "Digital morphogenesis", *AD theoretical Meltdown,* Vol. 79, No. 1, pp 35-37.
- Schodek, Daniel; Betchthold, Martin; Griggs, Kimo; Martin Kao, Kenneth & Steinberg, Marco (2004) *Digital Design and Manufacturing, CAD/CAM Applications in Architecture*, John Wiley & Sons, New York.
- Schumacher, Patrik (2008) "Style as research programme," In DRL ten ,AA DRL Document, AA publication, Architectural Association. Available Form: "http://www.patrikschumacher.com/Texts/Style as Research Programme.htm." Accessed on November 2013
- Schumacher, Patrik (2009) "Parametricism-A new global style for architecture and urban Design," AD, digital cities Vol 79. Available at: "http://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism - A New Global Style for Architecture and Urban Design.html." Accessed on November 2013
- Schumacher, Patrik (2009)" Patterns of Architecture," In AD, Architectural Design, Vol. 79, No. 6. Available at: "http://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametric%20Patterns.html" Accessed on November 2013.
- Sumi, K. Kavi (2012) "Parametric Desgin- A new paradigm in architecture," Available at: "https://www.academia.edu/2644485/parametric_design",Accessed on November 2013.
- Terzidis, Kostas (2006) *Algorithmic architecture*, Oxford; Burlington, Architectural Press, MA.
- Wolfgang, E Lorenz (2009) "Fractal Geometry of Architecture. Implementation of the Box-Counting Method in a CAD-software," *The New Realm of Architectural Design,* pp. 697–704.
- Woodbury, Robert (2010) *Elements of Parametric Design,* London, Routledge, New York.
- http://www.jainmathemagics.com. Accessed on December 2013.