فصلنامه پژوهش‌های معماری اسلامی/ شماره سی و دوم / پاییز ۱۴۰۰ / سال نهم / (از ص ۱۷۱ تا ص ۱۹۲)

کاربرد هندسه‌ی نقوش اسلامی در ارتقای کارکرد نور در نماهای متحرک*

حمزه محقق
کارشناسی‌ارشد معماری-گرایش پایداری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
زهرا فلاح زواره
کارشناسی‌ارشد معماری-گرایش پایداری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
عباس ترکاشوند
استادیار، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
نویسنده‌ی مسئول:.tarkashvand@iust.acir
محسن فیضی
استاد، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۲۱ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۰۶/۰۳

چکیـــــــده

امروزه ارتقای نماها به کمک ابزارهای فناورانه، سبب شده است تا آن‌ها نقش فعال‌تری را در ارتباط میان درون و برون بنا بر عهده بگیرند. از جمله‌ی این ابزار فناورانه، بهره‌گیری از نماهای متحرک الکترومکانیکی است. تجربیات و پژوهش‌های متعدد نشان داده است که سامانه‌های نمای متحرک (یا جنبشی)[۱]، می‌توانند تعامل بهتری میان درون و برون بنا برقرار سازند؛ و با تنظیم اثرات محیطی، نقش مضر آن‌ها را کاهش؛ و ارتباطات مفید درون و برون را افزایش دهد. یکی از مسائل مهم در طراحی نماهای متحرک، هندسه‌ی آن‌ها است. این هندسه از یک سو باید قابلیت باز و بسته شدن داشته؛ و از سوی دیگر، واجد ارزش‌های زیباشناختی باشد. به دلیل ماهیت نظام‌مند و مبتنی بر قواعد ریاضی در الگوهای هندسی اسلامی، امروزه می‌توان آن‌ها را به صورت پارامتریک و با نرم‌افزارها و سخت‌افزارهای نوین تولید کرد. این موضوع مبین کاربرد احتمالی آن‌ها در نماهای متحرک است. تحرک در نما (یا مدول‌های آن) مستلزم قابلیت هندسی اجزای آن در حفظ ساختار و پیوستگی خود در تغییر شکل است. اوریگامی، ابزارهای مفیدی در این خصوص فراهم می‌آورد. بنابراین به نظر می‌رسد که بتوان آرایه‌ای از مدول‌های مبتنی بر الگوهای هندسی اسلامی را به کمک دانش اوریگامی، به نمایی متحرک تبدیل کرد که تحت شرایط معین، تغییر شکل دهند؛ و از طریق تنظیم میزان ارتباط درون و برون، ابزاری برای بهینه‌سازی پارامترهای مرتبط با کارآمدی ساختمان فراهم آورند. نمای ساختمان با مجموعه عوامل زیادی در ارتباط است. در این خصوص، گفته می‌شود که تاثیر نور طبیعی در شکل‌گیری فرم ساختمان اهمیت زیادی دارد. بر این اساس، در پژوهش حاضر تلاش شد تا با ایجاد چند الگوی اوریگامی مبتنی بر الگوهای هندسی اسلامی و تطبیق آن‌ها با نور روز در ایام مختلف سال، الگوی هندسه‌ی بهینه و زاویه‌ی محرک مناسب اوریگامی استخراج شود. برای این منظور، ابتدا با استفاده از ابزارهای ریاضی مبتنی بر مقادیر کمی، الگوریتمی تولید شد که به‌وسیله‌ی آن بتوان طیف وسیعی از الگوهای هندسی اسلامی را ایجاد کرد. سپس در گام بعد، با بهره‌گیری از این هندسه‌ها به‌عنوان الگوهای مبنای تا، مدول‌های باز و بسته شونده‌ی اوریگامی تولید شد. در ادامه، سه مدول برای شبیه‌سازی عملکرد نور روز انتخاب شده و در نمای جنوبی یک اتاق با سه حالت بسته، میانی و باز در زمان انقلاب زمستانی، تابستانی و اعتدالین مورد مقایسه قرار گرفتند. مقایسه‌ی این الگوها، با شبیه‌سازی میزان دریافت نور آن‌ها، در محیط نرم‌افزار انجام شد. یافته‌های این پژوهش چند محور اصلی را شامل می‌شود. نخست آن‌که هندسه‌ی نقوش اسلامی، قابلیت بازتولید توسط الگوهای پارامتریک را دارا هستند. دیگر آن‌که این نقوش می‌توانند به ساختارهای سه‌بعدی تاشونده تبدیل شوند. همچنین مدل هندسی مبتنی بر زاویه‌ی مولد ۷۲ درجه، بهترین عملکرد را در خصوص دریافت نور روز داراست.

واژه‌های کلیدی: نمای تطبیق‌پذیر، الگوهای هندسی نقوش اسلامی، اوریگامی، نور روز، بهینه‌یابی.

* این مقاله، برگرفته از پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد نویسنده‌ی اول و دوم (حمزه محقق و زهرا فلاح زواره) است که در دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده‌ی معماری و شهرسازی، به راهنمایی نویسنده‌ی سوم و چهارم (محسن فیضی و عباس ترکاشوند) انجام شده است.

مقدمه

نما در عین آن‌که ارتباط درون و برون بنا را فراهم می‌کند؛ مهم‌ترین سامانه‌ی محافظ ساختمان در برابر شرایط محیط خارج است. پوشش ساختمان در معنای سنتی خود، بیشتر به صورت یک حصار یا جداکننده‌ی فضای داخلی و محیط پیرامون تعریف می‌شود که عملکردهایی چون پشتیبانی، کنترل، زیبایی‌شناسی و ارائه‌ی برخی خدمات را فراهم می‌آورد. بنابراین طراحان عمدتاً علاقه‌مندند که نمای ساختمان را یکپارچه و بدون مرزبندی بین دیوارها و سقف‌ها و به عنوان یک رابط[۲] و نه به عنوان جداکننده‌ای بین عوامل محیط خارجی و نیازهای ساکنین داخلی در نظر بگیرند. اما، اغلب نماها معمولاً در برقراری این ارتباط نقشی منفعل و ازپیش‌طراحی‌شده دارند؛ حال آن‌که امروزه، ارتقای برخی نماها به لطف به‌کارگیری ابزارهای فناورانه، کمک کرده است تا این پوسته نقش فعال‌تری را در ارتباط میان درون و برون بنا برعهده بگیرد. از جمله این ابزار فناورانه، بهره‌گیری از نماهای متحرک است. تجربیات و پژوهش‌های متعدد نشان داده است که سامانه‌های نمای متحرک (یا جنبشی)، می‌توانند تعامل بهتری میان درون و برون بنا برقرار سازند؛ و با تنظیم اثرات محیطی، نقش مضر آن‌ها را کاهش و ارتباطات مفید را افزایش دهند. از جمله می‌توان به کارکرد این نماها در کاهش نیاز به استفاده از سامانه‌های مکانیکی برای تامین انرژی ساختمان‌ها اشاره کرد (آلوتایبی[۳] ۲۰۱۵). بدین‌ترتیب، نماهای متحرک (یا جنبشی) امروزه به‌عنوان ضرورتی رو به تزاید در طراحی ساختمان‌های انرژی‌کارآ به شمار می‌آیند (لونن[۴] و دیگران ۲۰۱۳).

یکی از مسائل مهم در طراحی نماهای متحرک، هندسه‌ی آن‌هاست. این هندسه، از یک سو باید قابلیت باز و بسته شدن داشته و از سوی دیگر، واجد ارزش‌های زیباشناختی باشد. این ضرورت دوگانه، منشأ تلاش‌های بسیاری برای دست‌یابی به هندسه‌ی مناسب برای این نماها بوده است. در این میان، بازگشت به هندسه‌ی اسلامی و خوانش مجدد آن، با هدف یافتن قابلیت‌های آن در تولید مدول‌های تکرارپذیر و تغییر شکل‌یابنده، که می‌توانند در تولید نماهای متحرک کاربرد داشته باشند؛ راهکاری محتمل و قابل آزمون است. در هنر اسلامی، بازنمایی اشکال طبیعی به عنوان گونه‌ای از بازنمایی هستی، بر مبنای هندسه‌ی تجریدی شکل گرفته است. این موضوع، در طی قرونی که صرف توسعه‌ی این شیوه‌ی منحصر به فرد و تجریدی شد؛ منجر به اکتشافات هندسی بسیاری در علم تقارن و ایجاد مجموعه‌ای بسیار گسترده، پیچیده، زیبا و ظریف از الگوهای هندسی مجرد، اما مدولار و قابل تکثیر توسط هنرمندان جهان اسلام شد (عباس[۵] ۱۹۹۲). در همین حال، به دلیل ماهیت نظام‌مند و مبتنی بر قواعد ریاضی در الگوهای هندسی اسلامی، امروزه می‌توان آن‌ها را به صورت پارامتریک و با نرم‌افزارها و سخت‌افزارهای نوین، بازتولید کرد. این موضوع، مبین کاربرد احتمالی آن‌ها در نماهای متحرک است. تحرک در نما (یا مدول‌های آن)، مستلزم قابلیت هندسی اجزای آن در حفظ ساختار و پیوستگی خود، در تغییر شکل است (شریادین[۶] ۲۰۱۴). اوریگامی[۷]، که نوع متحرک صفحات تاشونده[۸] شناخته می‌شود؛ ابزارهای مفیدی در این خصوص فراهم می‌آورد. بنابراین، به نظر می‌رسد که بتوان آرایه‌ای از مدول‌های مبتنی بر الگوهای هندسی اسلامی را به کمک دانش اوریگامی به نمایی متحرک تبدیل کرد که تحت شرایط معین تغییر شکل دهند؛ و از طریق تنظیم میزان ارتباط درون و برون، ابزاری برای بهینه‌سازی پارامترهای مرتبط با کارآمدی ساختمان فراهم آورند.

نمای ساختمان، با مجموعه عوامل زیادی از جمله نور، منظر، دما، باد و نظایر آن در ارتباط است. در این خصوص، گفته می‌شود که تاثیر نور طبیعی در شکل‌گیری فرم ساختمان، اهمیت زیادی دارد. در بسیاری از بناها طراحی پلان‌ها، نماها، تزئینات داخلی و انتخاب رنگ‌ها، تابعی از دسترسی یا عدم دسترسی به نور طبیعی است. این عوامل، موجب شکل‌گیری دانش نوینی در حوزه‌ی نور روز در معماری شده است که در دهه‌های اخیر، توسعه و گسترش فراوانی نیز یافته است (ساین[۹] ۲۰۱۸). بدین‌ترتیب، نظر به آن‌که در ظرف یک پژوهش، امکان پرداختن به تمامی عوامل موثر بر طراحی نما فراهم نیست؛ در این پژوهش، تنها به نور به عنوان یک عامل مهم پرداخته شده است. بر این اساس، تلاش شد تا با ایجاد چند الگوی اوریگامی مبتنی بر الگوهای هندسی اسلامی و تطبیق آن‌ها با نور روز در ایام مختلف سال، الگوی هندسی بهینه و زاویه‌ی محرک مناسب اوریگامی استخراج شود. برای این منظور، ابتدا با استفاده از ابزارهای ریاضی مبتنی بر مقادیر کمی، الگوریتمی تولید شد که به‌وسیله‌ی آن بتوان طیف وسیعی از

الگوهای هندسی اسلامی را ایجاد کرد. سپس، در گام بعد، با بهره‌گیری از این هندسه‌ها به‌عنوان الگوهای مبنای تا، مدول‌های باز و بسته‌شونده‌ی اوریگامی تولید شد. در ادامه، سه مدول برای شبیه‌سازی عملکرد نور روز انتخاب شد؛ و در نمای جنوبی یک اتاق با سه حالت بسته، میانی و باز در زمان انقلاب زمستانی، تابستانی و اعتدالین مورد مقایسه قرار گرفتند. مقایسه‌ی این الگوها با شبیه‌سازی میزان دریافت نور آن‌ها در محیط نرم‌افزار انجام شد. در نهایت، با بررسی نتایج و استفاده از نمودارهای تحلیلی، مدول هندسی بهینه، شناسایی و معرفی شده است.

۲. پیشینه‌ی پژوهش و مبانی نظری

امروزه، بهره‌گیری از مدول‌های اوریگامی در نماهای هوشمند برای پاسخگویی به تغییرات محیطی گسترش یافته؛ و در این خصوص پژوهش‌های چندی انجام شده است. «الغازی[۱۰]» در پژوهش خود، در جستجوی روش جامعی است که در آن، هم کیفیات زیبایی‌شناسانه‌ی نما و هم عملکرد پوسته، در نظرگرفته شود. این پژوهش، در پی یافتن روش طراحی نما بر اساس گونه‌ای از اوریگامی است که به وسیله‌ی آن بتوان یکنواختی نور[۱۱] را کنترل کرد. این پژوهش، در سه مرحله انجام شده است. نخست، رفتار جنبشی هندسه‌های اوریگامی، به وسیله ماکت‌های کاغذی، به منظور مقایسه‌ی پیکربندی‌های ساده‌ی تاشونده، بررسی شدند. پس از آن، از ابزارهای مدل‌سازی پارامتریک برای مدل‌کردن ماژول‌های جنبشی متفاوت، از طریق اعمال تغییرات در پارامترها استفاده شد. در نهایت پیکربندی‌های نماهای جنبشی سلولی اوریگامی، به وسیله‌ی شبیه‌سازی پارامتریک عملکرد نما، نسبت به نور روز بهینه‌سازی شد (الغازی ۲۰۰۶).

در پژوهشی دیگر «پزنتی» به بازتولید رفتار سایه‌بان‌های اوریگامی در یک اتاق اداری با ابعاد متوسط در طول سال می‌پردازد. در این پژوهش، بر تحلیل الگوی اصلی سایه‌اندازی، با استفاده از مصالح متفاوت و درصد جابه‌جایی آن تمرکز شده‌است. از این طریق، بررسی پتانسیل هر پیکربندی، از منظر بهره‌وری انرژی و آسایش بصری آن امکان پذیر است. اعمال تغییرات بر روی تمام عناصر مدل‌سازی شده، با استفاده از نرم‌افزار و الگوریتم تعریف قوانین مربوط به آن، کنترل می‌شود. همچنین، نرم‌افزار پارامتریک، برای ترکیب ابعاد و نسبت‌های مختلف، شبیه‌سازی اشکال جنبشی، نور روز و تحلیل حرارتی در طی سال استفاده شده است. همچنین به منظور شبیه‌سازی محیطی، از افزونه‌ی هانی‌بی[۱۲] در محیط نرم‌افزار گرس‌هاپر[۱۳] استفاده شده است. محاسبات این پژوهش، در دو مرحله توسعه یافته است. اولین تحلیل، متغیرهای «نور روز قابل استفاده[۱۴]»، «کفایت (اتونومی) نور روز[۱۵]» و «احتمال عدم آسایش خیرگی[۱۶]» را، به عنوان پارامترهای مربوط به آسایش بصری، شامل می‌شود. دومین تحلیل، پتانسیل اثر بخشی هر پیکربندی سایه‌انداز را با در نظر گرفتن «مجموع انرژی[۱۷]» کلی مورد بررسی قرار می‌دهد.

تبادکانی[۱۸] در پژوهش خود به موضوعی مشابه پرداخته است. این پژوهش با الهام از تکنیک فولدینگ، امکانات و محدودیت‌های تولید یک «نمای خورشیدی تطبیق‌پذیر[۱۹]» را در یک فضای اداری، که از طریق جبهه‌ی جنوبی نور می‌گیرد و در شهر تهران واقع شده است؛ مورد بررسی قرار می‌دهد. این پژوهش، شامل سه مرحله است: نخست به رفتار جنبشی الگوی کالایدوسایکل[۲۰] شش‌ضلعی، که سایه‌بانی سازگار برای کنترل یکنواختی نور است؛ از طریق ابزارهای طراحی رایانشی (راینو، گرس‌هاپر) پرداخته و در مرحله‌ی دوم، فهرستی از شاخص‌های اصلی نور روز و خیرگی، که مربوط به نحوه‌ی کارایی نما در خصوص آسایش بصری می‌شود؛ ارائه داده است. در این مرحله، با استفاده از پلاگین هانی‌بی، کارایی نور روز و امکان ایجاد خیرگی از طریق موتورهای محاسب «دیسیم[۲۱]» و «رادیانس[۲۲]» بررسی شده است. در مرحله‌ی سوم، بهینه‌یابی راه‌حل‌ها، از طریق الگوریتم ژنتیک و توسط افزونه‌ی گالاپاگوس[۲۳] انجام شده است (تبادکانی و دیگران ۲۰۱۵).

تفاوت پژوهش حاضر با تجربه‌های پیشین، تمرکز آن بر تولید ساختارمند هندسه‌ی نقوش اسلامی و ارزیابی کاربرد آن در بهینه‌سازی نور روز است. بررسی کاربرد هندسه‌ی اسلامی در بهینه‌سازی نور در این نماها، مستلزم ورود به چند محور اصلی است: ۱. نماهای متحرک، ۲. هندسه‌ی اسلامی، ۳. اوریگامی، و۴. نور روز. این موارد در ادامه تشریح شده است.

۲-۱. تطبیق‌پذیری در نماهای متحرک

تطبیق‌پذیری، فرآیندی تکاملی است که یک ارگانیسم را برای حیات در زیستگاه خود، تواناتر می‌سازد (لونن و دیگران ۲۰۱۳).

این موضوع، علاوه بر ارگانیسم‌های زنده، در مکانیزم‌های دست‌ساخته نیز صدق می‌کند. در این ارتباط، معماری تطبیق‌پذیر، برای اولین بار توسط «فرای اتو[۲۴]» توصیف شده است. از نظر او، معماری تطبیق‌پذیر، سامانه‌ای است که توانایی تغییر شکل، موقعیت و کاربرد دارد؛ و همچنین می‌تواند گسترش یابد. به عقیده‌ی اتو، این سامانه‌ی فناورانه، متحرک و قابل انتقال است؛ و می‌تواند به سرعت ساخته شده یا برچیده شود. بنابراین، قاعده‌ی بنیادین برای معماری تطبیق‌پذیر، اصل سبک وزنی است (رومانو[۲۵] و دیگران ۲۰۱۸).

در این ارتباط، متحرک بودن برخی نماها، راهکاری برای افزایش تطبیق‌پذیری آن‌ها با شرایط محیط درون و برون، به عنوان بخش مهمی از عوامل موثر بر شکل‌گیری نما است. در واقع، پوشش تطبیق‌پذیر ساختمان، یک عامل تعدیل‌کننده‌ی ارتباط محیط پیرامون و درون ساختمان است (لوپز[۲۶] ۲۰۱۷). نظر به پیچیدگی روزافزون این عوامل، پژوهش در خصوص نماهای هوشمند و تطبیق‌پذیر در ساختمان‌ها، به یکی از موضوعات روز در حوزه‌ی پژوهش‌های معماری تبدیل شده است. پژوهش‌ها در این خصوص نشان می‌دهد که سامانه‌های متحرک (یا جنبشی) در نما، می‌توانند مصرف انرژی گرمایشی و سرمایشی را در مقایسه با نماهای دیگر تا ۳۰ درصد کاهش دهند (کنسک[۲۷] ۲۰۱۱). همچنین، پژوهش‌های دیگر در خصوص کاربرد این نماها در مناسب‌سازی میزان نور دریافتی، مبین قابلیت این نماها برای دریافت مقادیر مناسبی از نور روز و بهینه‌سازی روشنایی داخلی، به وسیله‌ی تنظیم میزان بازشوها و برخی روش‌های دیگر، از جمله شکست نور در نما است. پژوهش‌ها، همچنین حاکی از آن است که نماهای متحرک، توانایی بسیار بالایی در ارتقای کارایی شار نوری در فضای داخلی در مقایسه با نماهای سنتی دارند. به علاوه، پژوهش‌ها در خصوص کاربردهای این نماها نشان می‌دهند که علاوه بر صرفه‌جویی مقادیر زیادی از انرژی در ساختمان، این بناها باعث بهبود آسایش ساکنان در فضاهای داخلی بنا، افزایش کیفیت بصری و ارتقای تعاملات ساکنین می‌شوند. تعاملات ساکنین، به ویژه، عاملی مهم است؛ چراکه تقویت حس رضایت ساکنین، موجب افزایش بهره‌وری آن‌ها می‌شود. در عین حال، سامانه‌های متحرک نما، معایبی نیز دارند. از جمله آن‌که هزینه‌ی راه‌اندازی بالایی در مقایسه با نماهای متداول داشته و همچنین، نیاز به تعمیر و نگه‌داری مداوم دارند (آلوتایبی ۲۰۱۵). این امر، موید ضرورت ارزیابی سودمندی آن‌ها در چرخه‌ی حیات ساختمان است.

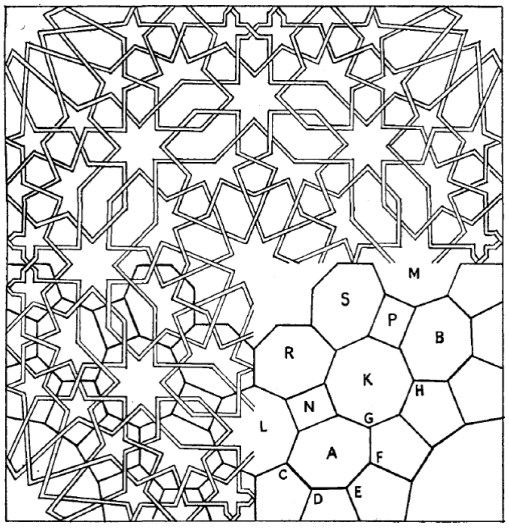
بر این اساس، نمای تطبیق‌پذیر، به طور خاص به نمایی اطلاق می‌شود که دارای سامانه‌های چندعملکردی، با قابلیت بالایی در سازگاری و تطبیق با شرایط درون و برون باشد. در این سامانه‌ها، جداکننده‌های فیزیکی بین فضای داخلی و خارجی، دارای قابلیت تغییر در عملکردها، خصوصیات یا رفتار خود در طول زمان را دارند تا بتوانندکارایی لازم در در پاسخ به شرایط مورد نیاز بنا را (عمومی و مرزی) با هدف ارتقای کارایی عمومی آن داشته باشند (رومانو و دیگران ۲۰۱۸). به عبارت دیگر، نماهای تطبیق‌پذیر، پوشش‌هایی برای بناها هستند که قابلیت تطبیق با تغییرات شرایط اقلیمی روزانه، فصلی و سالانه را همزمان با توجه به سایر نیازهای ساکنین، از جمله دید و منظر مطلوب، داشته باشند. بدین‌ترتیب، تطبیق‌پذیری در اینجا، به معنی توانایی پاسخگویی یا بهره‌مندی از شرایط اقلیمی، با هدف رسیدن به بهره‌وری، تامین موثرتر آسایش و ملزومات سلامت ساکنین است (آتیا[۲۸] و دیگران ۲۰۱۵).

۲-۲. هندسه در معماری اسلامی

در ایران، تزئینات هندسی در معماری سنتی، با نام گره شناخته می‌شوند. گره‌ها، ترکیبی از شمسه و چندضلعی هستند که در یک هارمونی به هم پیوسته قرار دارند. گره‌ها، بر اساس قوانین خاص و با استفاده از خطوط راست شکل گرفته و بر روی سطوح صاف و منحنی، با به کارگیری مصالح متنوع، قابل اجرا هستند (محمدی و همکاران،[۲۹] ۲۰۱۹). گره، در دوره‌های مختلف تاریخ ایران و سایر کشورهای اسلامی، گونه‌ها و انواع متنوعی دارد. در جغرافیای ایران، مهم‌ترین انواع گره‌ها، شامل کند، تند و شل می‌شود. علاوه بر آن، گره‌ها می‌توانند بر اساس کاربرد شمسه در آن‌ها، به گره‌های ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ تقسیم شوند (رئیس‌زاده[۳۰] ۱۳۸۹؛ ۲۰۰۹؛ عبدالهی[۳۱] و دیگران ۲۰۱۳).

استفاده از نقوش هندسی اسلامی، مستلزم آگاهی از شیوه‌ی طراحی آن‌ها است. صرف‌نظر از نوع گره، پژوهشگران به روش‌های چندی برای طراحی آن‌ها اشاره کرده‌اند. از جمله می‌توان به روش‌های۱. چندضلعی، ۲. اتصال نقاط، ۳. شبکه‌بندی، ۴. بسط شعاع‌های موازی، و ۵. پرگاری اشاره کرد. شواهد به

دست آمده از آثار به‌جای مانده از گذشته، نشان می‌دهند که پرکاربردترین و به لحاظ تاریخی، وسیع‌ترین روش‌شناسی طراحی، تکنیک چندضلعی است. در این روش، نقاط کلیدی واقع در شبکه‌بندی مشتمل بر چندضلعی‌ها، مثل نقاط قرار گرفته در وسط اضلاع هر کدام از چندضلعی‌ها، به‌عنوان نقطه‌ی آغاز خطوط تشکیل‌دهنده‌ی الگو مورد استفاده قرار می‌گیرند. بعد از حذف شبکه‌بندی چندضلعی زمینه، طرح نهایی پدیدار می‌شود. با تغییر زاویه‌های بین اضلاع و خطوط به‌دست آمده از نقاط میانی آن‌ها، می‌توان با استفاده از یک زمینه‌ی چندضلعی مشخص، طرح‌ها و نقوش مختلفی را استخراج کرد (بونر[۳۲] ۲۰۱۷).



شکل ۱. طراحی نقش به روش چندضلعی (مأخذ: هنکین[۳۳] ۱۹۲۵)

علاوه بر تکنیک چندضلعی، بسیاری از الگوهای هندسی اسلامی را که پیچیدگی کمتری دارند؛ می‌توان به روش‌های دیگری نیز تولید کرد. در روش اتصال نقاط، معمولاً کار با ترسیم یک دایره که به قطعه‌های کوچک‌تر تقسیم شده آغاز؛ و پس از ایجاد واحد تکرارشونده‌ی مربعی یا چندضلعی منتظم، تقسیمات بعدی ایجاد؛ و شکل تکثیر می‌شود. ویژگی بنیادین این تکنیک در آن است که برای هر الگوی خاص، روش تولید منحصر به همان الگو استفاده می‌شود (بونر ۲۰۱۷). برخی از الگوها را، که دارای پیچیدگی کمتری است؛ می‌توان به طور مستقیم به وسیله‌ی شبکه‌های ایزومتریک ایجاد کرد. بیشتر الگوهای تولید شده به‌وسیله شبکه ایزومتریک، دارای خطوط الگویی هستند که بعضا با خود خطوط شبکه همپوشانی دارند (ماهرالنقش ۱۳۶۱؛ ماهرالنقش[۳۴] ۱۹۸۲). دسته‌ی دیگری از الگوهای هندسی نیز وجود دارند که از طریق بسط شعاع‌های موازی ساخته می‌شوند. در ساده‌ترین حالت آن، خطوط یک شبکه، در دوسوی آن به اندازه‌ی معینی آفست می‌شوند؛ و الگوهایی تولید می‌کنند. طرح‌های بسیار ساده را می‌توان با این روش ایجاد کرد (بونر ۲۰۱۷). در نهایت، می‌توان به شیوه‌ی مبتنی بر پرگار اشاره کرد که منشأ بدیع‌ترین نقوش هندسی اسلامی بوده است (همان).

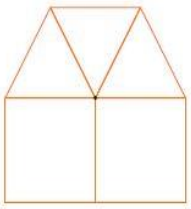
علاوه بر روش‌های سنتی، روش‌های ریاضی نیز در راستای فهم و ایجاد نقوش هندسه‌ی اسلامی شکل گرفته است. یکی از نخستین پژوهش‌ها در این زمینه، توسط الشرباشی انجام شد. او بر مبنای تداخل اشکال متشابه یا متجانس، فرمولی برای تولید طرح‌های هندسی یافت. سپس با انجام تغییرات در فرمول، توانست متغیرهای طراحی جدیدی استخراج نماید. لوانی نیز یک «کد شکل» معرفی کرد که نمودار ارتباط بین نقاط برای توصیف هندسه‌ی نقوش اسلامی، به‌وسیله‌ی نشانه‌گذاری‌هاست. پس از آن، استفاده از ابزارهای دیجیتال، به روش‌های دیگری در این خصوص انجامید. در این ارتباط، علی‌جمالی، کاپلان و ایزدی روش‌های متفاوتی را پیشنهاد داده و نرم‌افزارهای رایانه‌ای مختلفی را به منظور اکتشاف در طراحی نقوش هندسی ارائه می‌کنند. ماهیت مشترک همه‌ی این روش‌ها این است که به وسیله‌ی تعریف پارامترها و تغییر در مقادیر آن‌ها، طرح‌های جدیدی تولید می‌شود (الانی[۳۵] ۲۰۱۸). در این روش‌ها، پژوهش‌گران در گام ابتدایی، شکل‌هایی با یک متغیر پارامتریک مستقل تولید می‌نمایند. این متغیر مستقل، یکی از زوایای چندوجهی پایه را تعیین می‌کند که می‌توان با تکنیک‌هایی همچون جابجایی و نظایر آن، نقش نهایی را تولید کرد (ایزدی[۳۶] و دیگران ۲۰۱۰). از مهم‌ترین روش‌هایی که بر مبنای روابط ریاضی شکل گرفته است؛ می‌توان به مدل پیشنهادی کاپلان اشاره کرد که در این پژوهش، مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش، بر مبنای تکنیک «چندضلعی‌های متصل» هنکین، الگوریتمی برای تبدیل یک تایل‌بندی به الگوی ستاره‌ای نقوش هندسی اسلامی پیشنهاد شده است (کاپلان[۳۷] ۲۰۰۵).

۳-۲. تایل‌بندی

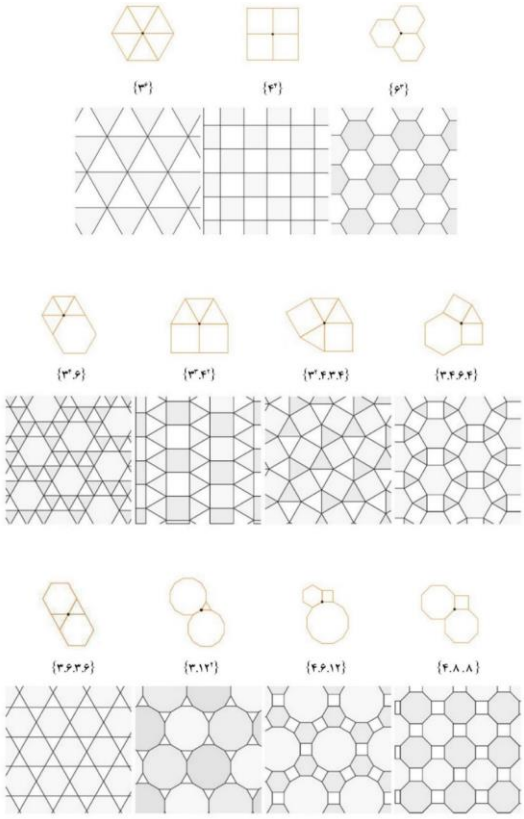
تمام تمدن‌های شناخته شده، از تایل‌بندی‌ها و الگوواره‌ها در فرم‌های متنوعی استفاده کرده‌اند. با این وجود، برخی از فرهنگ‌ها بر روی بعضی جنبه‌های خاص، تمرکز بیشتری داشته‌اند. برای مثال، رومی‌ها و بعضی تمدن‌های مدیترانه‌ای، به‌طور گسترده‌ای از اشکال پرتره‌ی انسانی و همین‌طور مناظر طبیعی، در موزاییک‌کاری‌ها استفاده کرده‌اند. از طرف دیگر، در جنبش‌های هنر مراکشی و عربی، تایل‌های متنوعی از نظر شکل و رنگ، نمود پیدا کرده است که منجر به تولید طرح‌های پیچیده‌ی هندسی شده است (گرونبایوم[۳۸] ۱۹۸۶).

۱-۳-۲. تایل‌بندی منظم[۳۹] و آرشیمدین[۴۰]

ساده‌ترین حالت تایل‌بندی یک صفحه تخت، تایل‌بندی کنج به کنج است که به وسیله چندضلعی‌های متجانس منتظم صورت می‌گیرد؛ و با نام تایل‌بندی منظم شناخته می‌شود. به‌سادگی می‌توان دریافت که در صفحه‌ی تخت اقلیدسی[۴۱] تنها سه حالت ممکن برای تایل‌بندی منظم وجود دارد که شامل مثلث‌های متساوی‌الاضلاع، مربع‌ها و شش‌ضلعی‌های منتظم می‌شود (بونر ۲۰۱۷). همچنین، می‌توان با استفاده از مجموعه‌ای از اعداد، چندضلعی‌های حول یک راس را مشخص کرد. این مجموعه، نمایه‌ی راس[۴۲] نام‌گذاری می‌شود که در آن، اعداد به‌ازای هرگام گردش حول راس، تعیین می‌شوند. برای مثال، مجموعه‌ی {۴،۴،۳،۳،۳} یک نمایه‌ی راسی است که شامل سه مثلث متساوی‌الاضلاع و دو مربع می‌شود که به ترتیب، حول یک راس جانمایی شده‌اند. ترتیب اعداد، مشخص‌کننده‌ی ترتیب چندضلعی‌هایی است که حول نقطه مرکزی، شکل گرفته‌اند (معمولا در جهت خلاف عقربه‌های ساعت گردش می‌شود) (شکل ۲) (لنگ[۴۳] ۲۰۱۸).



شکل ۲. تایل‌بندی منظم (مأخذ: لنگ ۲۰۱۸)



شکل ۳. تایل‌بندی آرشیمدین (مأخذ: لنگ ۲۰۱۸)

با استفاده از این روش نام‌گذاری، می‌توان علاوه بر سه حالت تایل‌بندی منظم، هشت حالت دیگر نیز تولید کرد که به این یازده حالت، تایل‌بندی نیمه‌منظم[۴۴] یا تایل‌بندی آرشیمدین گفته می‌شود (شکل ۳).

۴-۲. اوریگامی

اوریگامی، که اصالتاً هنر باستانی تا کردن کاغذ است؛ اولین بار در قرن اول یا دوم قبل از میلاد مسیح شکل گرفته و با این‌که در ژاپن عمومیت یافت؛ منشأ اصلی آن کشور چین است (ماسری[۴۵] ۲۰۱۵). کلمه‌ی اوریگامی، ریشه‌ی ژاپنی دارد. اورو[۴۶] به معنی تا شده و کامی[۴۷] به معنی کاغذ است. منشأ اوریگامی، به‌طور خاص، کاربردی نبوده و اهداف هنری و تفننی داشت (هرناندز[۴۸] و دیگران ۲۰۱۹). اوریگامی با کشف بنیان‌های جدید آن، تکنیک‌ها و زیرمجموعه‌هایی مثل جعبه‌ی تا (روش تا کردن متشکل از یک شبکه تا)، اوریگامی مدولار یا تک، واحدهای هم‌شکل که به هم

اتصال می‌یابند؛ شبکه‌بندی‌ها، اوریگامی‌های با الگوی تای منحنی، تا شونده‌های تر و نظایر آن به تکامل خود ادامه داد. در ادامه با استفاده از علوم ریاضی مربوط به هندسه‌ی فولدینگ و مفاهیم مکملی همچون قضیه ماکاوا-کاوازکی و اصل هوزیتا هاتوری، به طور علمی گسترش پیدا کرد؛ و کاربردهای بسیاری یافت. این مبانی، منجر به ظهور تئوری‌های پیچیده‌تر طراحی اوریگامی، مثل تئوری درخت و تکنیک هم‌بندی دایره-رودخانه رابرت لنگ شد (ماسری ۲۰۱۵) که امروزه، به‌عنوان ابزاری برای تولید صنعتی نقوش هندسی شناخته می‌شود.

خلق یک ساختار اوریگامی که دارای ویژگی‌های مطلوب و به‌طور خاص، یک شکل دلخواه برای ما باشد؛ به‌عنوان طراحی اوریگامی شناخته می‌شود. طراحی اوریگامی نه تنها چالشی است که هنرمندان اوریگامی با آن روبه‌رو هستند؛ بلکه به‌طور کلی، طراحان و مهندسانی که در پی به‌کارگیری اوریگامی برای حل مشکلات مهندسی هستند نیز با آن مواجه می‌شوند (هرناندز و دیگران ۲۰۱۹). یکی از مشهورترین روش‌ها در خصوص طراحی اوریگامی، روش درخت لنگ است. این روش، در یک بسته‌ی نرم‌افزاری به نام درخت‌ساز[۴۹] پیاده شد. به علاوه، «دمین» و همکاران نیز، روشی برای طراحی اوریگامی پیشنهاد دادند که بر پایه‌ی شکل هدف و با به‌کارگیری چندضلعی‌ها و سطوح سه‌بعدی پلی‌هدرال صورت می‌گیرد. همچنین «فوچی» و همکاران، روش طراحی اوریگامی دیگری را بر اساس بهینه‌سازی توپولوژی پیشنهاد دادند. در رویکرد آن‌ها، موقعیت خطوط تا، از پیش تعریف می‌شود. در این پیکربندی مفروض، که اصطلاحاً ساختار پایه نام گرفت؛ زوایای تا متغیر هستند. در نهایت «تاچی» نیز روشی برای فراهم آوردن الگویی از خطوط تا در یک صفحه‌ی تخت محدب معرفی کرد که با استفاده از یک شبکه‌ی مش چندضلعی، می‌تواند اشکال سه‌بعدی دلخواه، ایجاد کند. این شیوه نیز، در یک بسته نرم‌افزاری به نام اوریگامایزر پیاده شد (هرناندز و دیگران ۲۰۱۹). در این پژوهش، نظر به پیچیدگی هندسه‌ی پایه، از روشی ویژه استفاده شد که در بخش روش پژوهش به آن اشاره می‌شود.

۵-۲. نور روز

موضوع نور روز در معماری، به مقوله‌ی نور طبیعی در ساختمان‌ها ارتباط دارد؛ و به ملزومات فراهم کردن کیفیت دیداری مطلوب، به‌وسیله‌ی تامین میزان بهینه‌ی روشنایی در فضا می‌پردازد (ساین ۲۰۱۸). استفاده از نور غیرطبیعی در محیط مصنوع، مقدار قابل توجهی از میزان مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهد. تحقیقات انجام شده در آژانس بین‌المللی انرژی[۵۰] حاکی از آن است که تامین نور مصنوعی، ۱۹ درصد از میزان کل تولید برق را به خود اختصاص می‌دهد. در کشورهای توسعه یافته، تامین روشنایی، به‌طور میانگین، ۳۴ درصد از مصرف بخش صنعتی و ۱۴ درصد از مصرف بخش خانگی را شامل می‌شود. در کشورهای در حال توسعه، این مقادیر معمولا بیشتر از کشورهای توسعه یافته است (کارلوسی[۵۱] و دیگران ۲۰۱۵). این در حالی است که در عمل، می‌توان با بهره‌گیری از منبع بی‌پایان نور طبیعی، به‌طور قابل ملاحظه‌ای در مصرف برق صرفه‌جویی کرد. با این وجود، هدف از تامین نور طبیعی در ساختمان‌ها، تنها به مسائل اقتصادی خلاصه نمی‌شود. نور، برای فیزیولوژی و سلامت انسان اهمیت به‌سزایی دارد؛ زیرا بشر همواره در محیطی زیسته است که دائما در معرض نور طبیعی قرار داشته و برای سلامتی و اسایش خود به آن نیاز دارد (ساین ۲۰۱۸). نیاز انسان به نور طبیعی، بخشی از شرایط آسایش دیداری را فراهم می‌کند. آسایش بصری، که به‌عنوان احساس ذهنی رضایت ناشی از شرایط دیداری محیط پیرامونی شناخته می‌شود، به فیزیولوژی چشم انسان، مقادیر فیزیکی نور و نحوه‌ی توزیع آن در فضا و انتشار طیفی منبع نور بستگی دارد. آسایش بصری، معمولاً بر اساس برخی از عوامل ارتباطی بین نیازهای انسانی و محیط نوری شامل میزان نور، یکنواختی نور، کیفیت رنگی نور و پیش‌بینی ریسک ایجاد خیرگی برای ساکنان تعریف می‌شود (کارلوسی و دیگران ۲۰۱۵).

در این ارتباط، شاخص کفایت نور روز (UDI[۵۲]) برای سنجش میزان نوری که در یک فضای مشخص در دسترس است؛ استفاده می‌شود. این شاخص، تلاشی برای یکپارچه‌سازی سنجش سطح نور روز و خیرگی به‌طور همزمان است. شاخص کفایت نور روز، به‌صورت روشنایی افقی نور روز در فضای داخلی و یک نقطه‌ی آزمایشی مفروض در دامنه‌ی مشخص، در کسری از زمان سالانه تعریف می‌شود. این شاخص، یک مقیاس متریک دوطرفه است که شامل آستانه‌ی پایین، آستانه‌ی بالا و یک محدوده‌ی قابل قبول می‌شود که به ترتیب، $UDI_{underlit}$، $UDI_{overlit}$ $UDI_{usefull}$ نام‌گذاری می‌شوند. بر اساس تحقیقات انجام شده در گذشته،

مقادیر متفاوتی برای این بازه پیشنهاد شده است (تبادکانی و دیگران ۲۰۱۵).

- روشنایی روز کمتر از ۱۰۰ لوکس، معمولاً کافی نیست؛ چه با در نظر گرفتن منبع نور طبیعی به تنهایی یا در ترکیب با نور مصنوعی.
- روشنایی نور روز در بازه ۱۰۰ تا ۵۰۰ لوکس، موثر در نظر گرفته می‌شود؛ هم در شرایطی که نور روز به تنهایی در نظر گرفته شود؛ و هم در تلفیق با نور مصنوعی.
- روشنایی نور روز در بازه ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ لوکس اغلب مطلوب در نظر گرفته شده و یا حداقل قابل تحمل است.
- روشنایی نور روز بالاتر از ۲۰۰۰ لوکس باعث ایجاد عدم آسایش بصری یا حرارتی ویا هردوی این موارد می‌شود.

بنابراین، پیشنهاد می‌شود که همه‌ی مقادیر روشنایی نور روز در بازه ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ لوکس به‌عنوان روشنایی مفید[۵۳] برای ساکنان یک فضا در نظر گرفته شود (نابیل[۵۴] ۲۰۰۶).

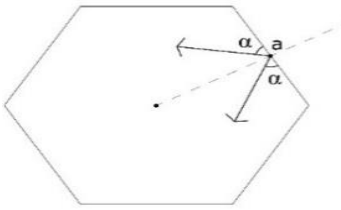
همان‌طور که در ابتدای چارچوب نظری مورد اشاره قرار گرفت؛ امروزه، بهره‌گیری از مدول‌های اوریگامی در نماهای هوشمند، برای پاسخگویی به عوامل محیطی گسترش یافته است. به طور خاص، تحقیقات متعددی در مورد عملکرد این دست از نماها نسبت به نور روز صورت گرفته است که معمولاً با تغییر برخی از پارامترهای موثر در هندسه‌ی مدول‌ها، نوع متریال مورد استفاده و نحوه‌ی عملکرد جنبشی آن‌ها همراه می‌شود. این تغییرات، منجر به حصول نتایج مختلفی از میزان کیفیت نور دریافتی و نحوه‌ی توزیع آن در فضای داخلی شده و سپس، حالت‌های بهینه‌ی مدول‌ها برای دریافت نور مطلوب روز معرفی می‌شوند. در این پژوهش، این فرآیند، در خصوص هندسه‌ی نقوش اسلامی انجام خواهد شد.

۳. روش پژوهش

در این پژوهش، با استفاده از روش‌های پارامتریک و الگوریتم‌های هندسی، روشی پیشنهاد می‌شود که به‌وسیله‌ی آن، می‌توان طیف وسیعی از الگوهای هندسی مورد استفاده در نقوش اسلامی و به‌طور خاص، معماری اسلامی را به آرایه‌های اوریگامی تبدیل نمود؛ به نحوی که قابلیت استفاده در نماهای تطبیق‌پذیر را داشته باشند. در عین حال، به بررسی کارایی یکی از مدول‌های تولید شده پرداخته شده است؛ و با شبیه‌سازی عملکرد نما نسبت به دریافت بیشینه‌ی نور مطلوب روز، اقدام به تغییر پارامترهای زاینده‌ی الگوها می‌شود. بر این أساس، پژوهش حاضر شامل سه بخش کلی می‌شود. قسمت اول به الگوریتم زاینده‌ی الگوهای هندسی نقوش اسلامی اختصاص یافته است. در قسمت دوم، فرآیند تبدیل این الگوها به مدول‌های باز و بسته‌شونده‌ی اوریگامی تبیین می‌شود. در قسمت سوم، عملکرد یکی از این آرایه‌ها نسبت به نور روز بهینه‌سازی شده است؛ و ضمن آن‌که مدول بهینه پیشنهاد می‌شود؛ در نهایت کاربردی‌ترین هندسه‌ی نقوش اسلامی در بهینه‌سازی نماهای متحرک، تبیین می‌شود.

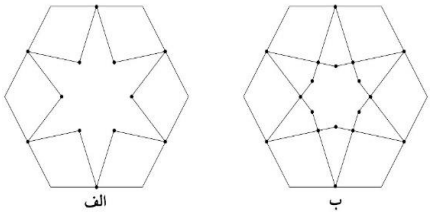
۳-۱. تولید الگوهای هندسی بر مبنای نقوش اسلامی

برای تولید الگوهای هندسی بر اساس مبانی نظری مورد اشاره، روشی شبیه به روش چندضلعی‌های متصل، که اولین بار توسط هنکین معرفی شد استفاده می‌شود. این روش، بعدها توسط کاپلان توسعه پیدا کرده و علاوه بر به‌کارگیری آن در صفحه‌ی تخت، در هندسه‌های کروی و هذلولوی نیز کاربرد یافت. بدین‌ترتیب، روش به‌کار رفته در این پژوهش، بر بنیان نظریه‌های کریستالوگرافی و تایل‌بندی در بستر فضای دو بعدی شکل می‌گیرد. برای استفاده از روش چندضلعی‌های متصل، در ابتدا نیاز است که تایل‌بندی‌های مختلف به‌منظور اعمال فرایند زایش الگوهای هندسی تولید شود. بنابراین در شکل‌پایه‌ی۵۵ تکثیرشونده، تایل‌بندی در نظر گرفته شده و پس از اعمال روش زاینده‌ی الگوی هندسی بر روی آن، با توجه به بردارهای انتقال مورد نیاز برای هر شکل‌پایه، آرایه‌ای از الگوهای هندسی تولید می‌شود. برای نیل به این هدف، الگوریتمی عمومی در محیط گرس‌هاپر تولید شد که قابلیت اعمال بر روی تمامی چندضلعی‌های منتظم را داراست. برای این منظور، در گام نخست، ابتدا به طول هر ضلع، متغیر a نسبت داده می‌شود. سپس نقطه‌ی وسط اضلاع هرکدام از چندضلعی‌های شکل‌پایه استخراج شده و از این نقطه، دو بردار ترسیم می‌شود که هر دو بردار، به‌صورت قرینه، نسبت به عمود منصف هر ضلع از اضلاع چندضلعی منتظم قرار می‌گیرند. زاویه‌ی بین بردار و پاره‌خط ضلع، زاویه‌ی بردار α را تشکیل می‌دهد که به‌صورت پارامتریک و بین مقادیر صفر تا ۹۰ درجه قابل تغییر است (شکل ۴).



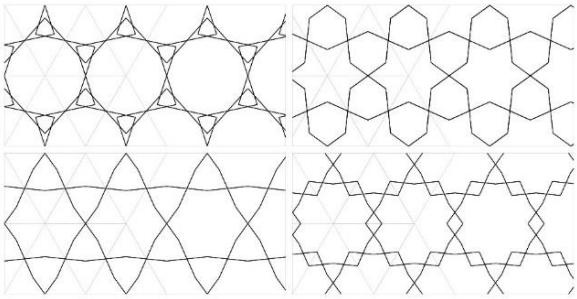
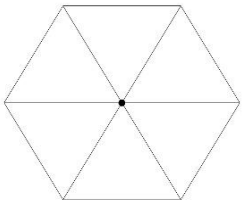
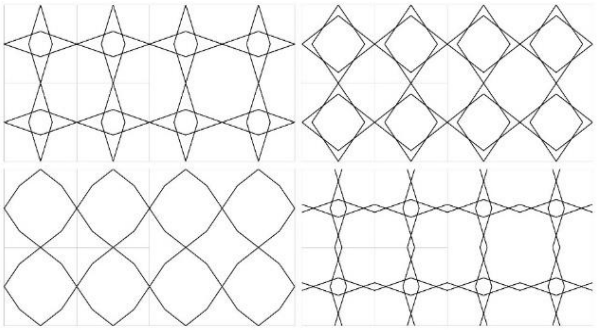
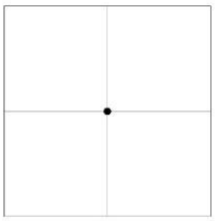
شکل ۴. انتخاب نقطه و زاویه‌ی بردارها

با زوایای بردار ۷۲، ۳۶ و ۵۴ درجه، می‌توان به‌ترتیب گره‌های تند، کند و شل ایجاد نمود. همچنین با تبدیل این بردارها به نیم‌خط‌های نامتناهی و تعمیم آن‌ها به سایر اضلاع، می‌توان در چند مرحله نقاط تقاطع را استخراج کرد (شکل ۵).

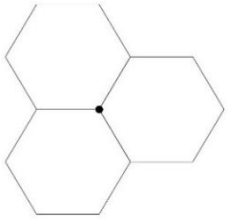
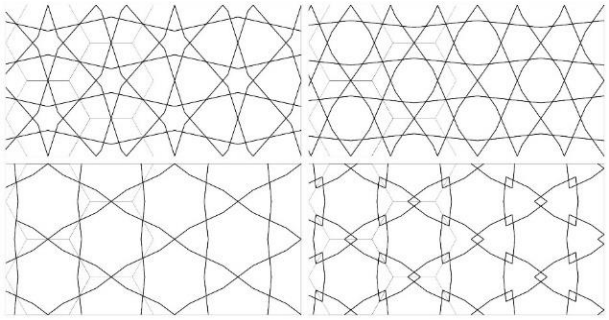


شکل ۵. مرحله‌ی دوم: امتداد بردارها و تولید گره

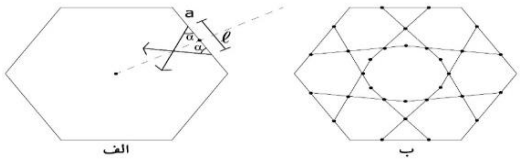
جدول ۱. آرایه‌های هندسی اسلامی با مولدهای سه‌گانه‌ی تایل‌بندی آرشی‌مدین (مأخذ: نگارندگان)

آرایه‌های هندسی متناسب با نوع گره		شکل پایه
گره شل	گره تند	{۳۶}
		
دو نقطه‌ای‌کند – ℓ=۰/۲	گره کند	
گره شل	گره تند	{۳۴}
		
دو نقطه‌ای تند – ℓ=۰/۲	گره کند	
گره شل	گره تند	{۶۳}

ادامه جدول ۱. آرایه‌های هندسی اسلامی با مولدهای سه‌گانه‌ی تایل‌بندی آرشی‌مدین (مأخذ: مأخذ: نگارندگان)

		
	گره کند	دو نقطه‌ای کند – ℓ=۰/۲

به این ترتیب و با حذف نقاط تقاطع اضافه، می‌توان به الگوی قرینه‌ی هندسی دلخواه دست پیدا کرد. این الگو، می‌تواند بر اساس دفعات تقاطع خطوط در هر چرخه و همین طور تغییر مقادیر زاویه‌ی α متغیر باشد. با توسعه‌ی این روش، می‌توان الگوهای پیچیده‌تری ایجاد نمود. برای این منظور در وسط هر ضلع، به جای یک نقطه‌ی منحصر به فرد، دو نقطه مشخص می‌شود. سپس با تغییر فاصله‌ی بین این دو نقطه (ℓ) به صورت $[0,a]/a$ می‌توان الگوهای متنوع‌تری تولید کرد (شکل ۶).

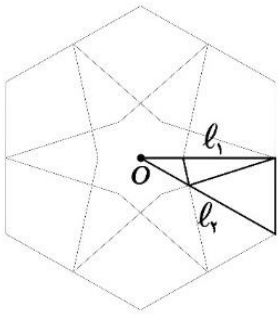


شکل ۶. تولید گروه‌های پیچیده‌تر

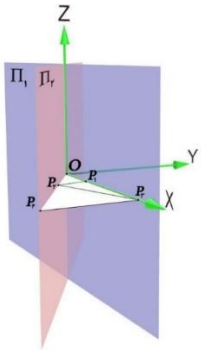
پس از تکمیل فرایند تولید الگو در شکل پایه، تایل‌بندی با استفاده از بردارهای انتقال مربوط به هرکدام از انواع شکل‌های پایه، به تعداد مورد نظر طراح، تایل‌بندی شده و متعاقب آن، الگو تکمیل شده و در نهایت، با حذف تایل‌بندی زمینه، آرایه‌ای از الگوی هندسی اسلامی به‌دست می‌آید. برای تایل‌بندی از شیوه‌ی آرشی‌مدین استفاده شده است (جدول ۱).

۲-۳. روش تولید مدول‌های اوریگامی

برای تبدیل الگوهای هندسی در هر تایل، به مدول اوریگامی باز و بسته شونده از روشی شبیه به روش پیشنهادی ژائو در این خصوص استفاده شد (ژائو[۵۶] و دیگران ۲۰۱۷). برای این منظور، لازم است الگوی هندسی در تایل مفروض، به کوچک‌ترین جزء سازنده‌ی آن تجزیه شود. با کمی دقت در ساختار الگوی درون تایل، می‌توان متوجه شد که جزء تکرارشونده آن، ناحیه‌ای به شکل مثلث قائم‌الزاویه است که قاعده‌ی بزرگ‌تر آن، خط اتصال‌دهنده‌ی مرکز چندضلعی و وسط یکی از اضلاع آن (ℓ_1)، وتر آن منطبق بر یکی از قطرهای چندضلعی (ℓ_2) و قاعده‌ی کوچک‌تر آن، نصف همان ضلع مفروض است (شکل ۷). در ادامه، دو صفحه‌ی Π_1 و Π_2 که بر صفحه‌ی تایل عمود هستند و به ترتیب، از ℓ_1 و ℓ_2 می‌گذرند و در محور Y (مرکز تقارن O در حالت دو بعدی) با هم تلاقی می‌کنند؛ رسم شده و نقطه‌های حاصل از برخورد خطوط الگوی مبنا با خط ℓ_1، به‌صورت $P_1, P_3, \dots, P_{2i-1}$ به ازای $i \geq 1$ و همچنین، نقاط حاصل از برخورد خطوط الگو با خط ℓ_2، به شکل $P_2, P_4, \dots, P_{2i}$ به ازای $i \geq 1$ نام‌گذاری می‌شوند (شکل ۸).

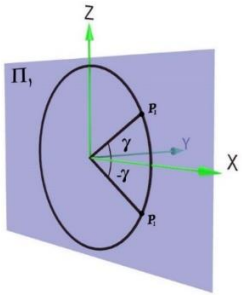


شکل ۷. جزء سازنده‌ی الگوی هندسی



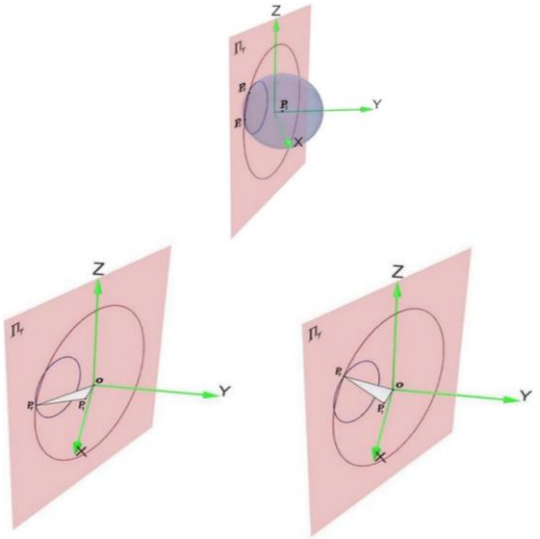
شکل ۸. نام‌گذاری نقاط حاصل از برخورد خطوط جزء سازنده‌ی الگو با صفحات متقاطع عمود بر صفحه‌ی تایل

برای یافتن مقادیر ممکن برای مختصات نقطه P_1، بین حالت تخت تا نشده و حالت تا شده تا آستانه‌ی خود تداخلی مدول اوریگامی، دایره‌ای به مرکز O و شعاع OP_1 روی صفحه Π_1 رسم می‌شود. پاره‌خط OP_1 می‌تواند حول مرکز O بین زاویه ۹۰- تا ۹۰+ درجه دوران کند؛ این زاویه با «γ» نمایش داده می‌شود. در نتیجه، با تغییر این زاویه در هر مرحله، مختصات جدیدی از P_1 به‌دست می‌آید. γ متغیری پارامتریک و مستقل است که تغییر در مقادیر آن، سکانس‌های مختلفی بین حالت تا نشده‌ی تخت و حالت تا شده تولید می‌کند. در این پژوهش، این زاویه، «زاویه‌ی محرک اوریگامی» نامیده می‌شود (شکل ۹). مختصات سایر نقاط، به صورت سلسه‌مراتبی، وابسته به مختصات نقطه‌ی P_1 هستند.



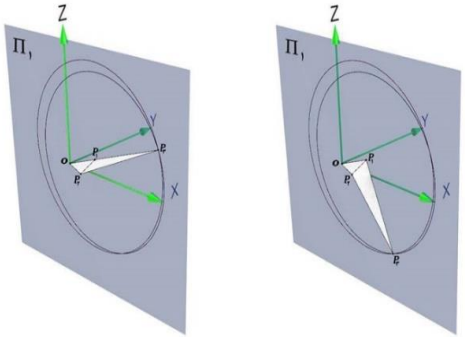
شکل ۹. شیوه‌ی محاسبه مختصات نقطه P_1

برای به‌دست آوردن مقادیر ممکن مختصات نقطه‌ی P_2 لازم است کره‌ای به شعاع OP_2 به مرکز O رسم شود که پس از برخورد با صفحه‌ی Π_2 حاصل، دایره‌ای به همان شعاع می‌شود. سپس، کره‌ای به شعاع P_1P_2 به مرکز P_1 رسم می‌شود. حاصل برخورد کره‌ی مفروض با صفحه‌ی Π_2 دایره‌ای است که در دو نقطه با دایره از پیش ترسیم شده به مرکز O برخورد دارد. این دو نقطه، پاسخ‌های ممکن برای یک زاویه محرک معین در بازه ۹۰- تا ۹۰+ هستند (شکل ۱۰).



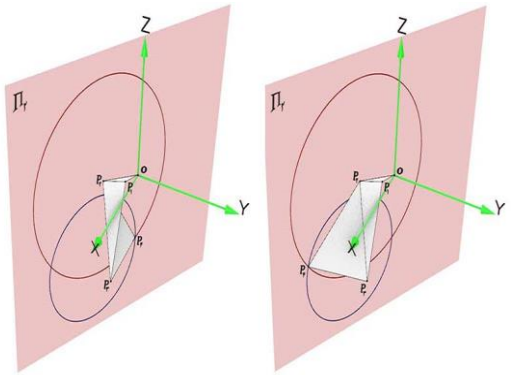
شکل ۱۰. پاسخ‌های ممکن برای نقطه P_2 و شکل‌گیری اولین وجه از جزء سازنده‌ی مدول اوریگامی

در مرحله‌ی بعد، به‌منظور یافتن مقادیر ممکن برای مختصات نقطه‌ی P_3 لازم است کره‌ای به شعاع P_1P_3 و به مرکز P_1 رسم شود. حاصل برخورد آن با صفحه‌ی Π_1 دایره‌ای به همان شعاع می‌شود. سپس، کره‌ای به شعاع P_2P_3 و مرکز P_2 رسم می‌شود که از برخورد آن با صفحه Π_1 دایره‌ای به‌دست می‌آید که در دو نقطه با دایره‌ی ترسیم شده به مرکز P_1 برخورد دارد. این دو نقطه نیز، پاسخ‌های ممکن برای نقطه P_3 هستند (شکل ۱۱).



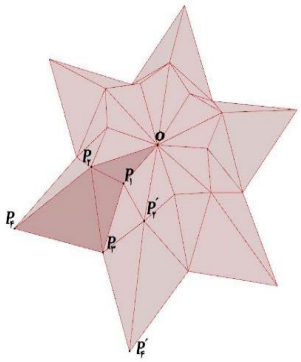
شکل ۱۱. پاسخ‌های ممکن برای نقطهP_3 و شکل‌گیری دومین وجه از جزء سازنده‌ی مدول اوریگامی

مراحلی که به تفصیل بیان شد، برای سایر نقاط، اعم از اندیس‌های فرد و زوج، با همان ترتیب قابل اجراست. حاصل آن، مجموعه‌ی وجوه تاشونده‌ی درون جزء سازنده (مثلث قائم‌الزاویه) اوریگامی را تشکیل می‌دهد (شکل ۱۲).



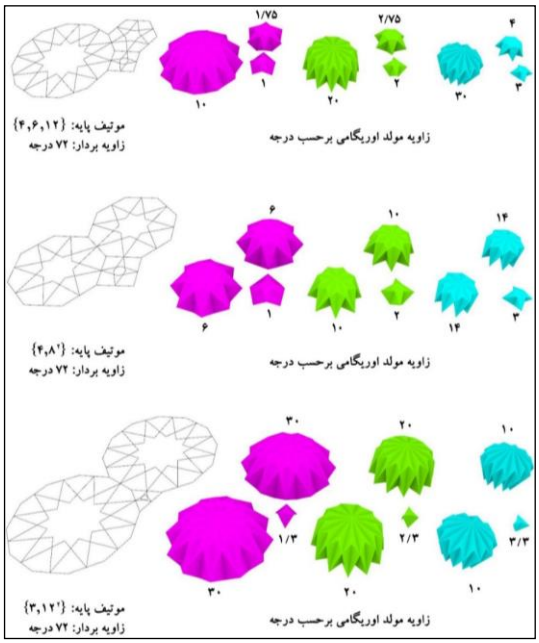
شکل ۱۲. پاسخ‌های ممکن برای نقطه P_4 و شکل‌گیری سومین وجه از جزء سازنده‌ی مدول اوریگامی

با قرینه سازی انعکاسی جزء تاشونده، نسبت به صفحه‌ی Π_1 و سپس دوران آن به تعداد اضلاع تایل، مدول اوریگامی تولید می‌شود (شکل ۱۳). توجه به این نکته ضروری است که با طی مراحل پیشنهاد شده، مشخص می‌شود که 2^{i-1} حالت تا شوندگی برای جزء تاشونده‌ی اوریگامی و متعاقباً کل مدول، وجود دارد.



شکل ۱۳. نمونه‌ی تکمیل شده یک مدول اوریگامی، پس از انجام مرحله‌ی قرینه سازی انعکاسی و دوران آن به تعداد اضلاع

بر اساس موارد پیش‌گفته، سه نوع مختلف از موتیف‌های پایه، هندسه نقوش حاصل از آن‌ها و مدول‌های اوریگامی تولید شده، در شکل ۱۴ نمایش داده شده است.



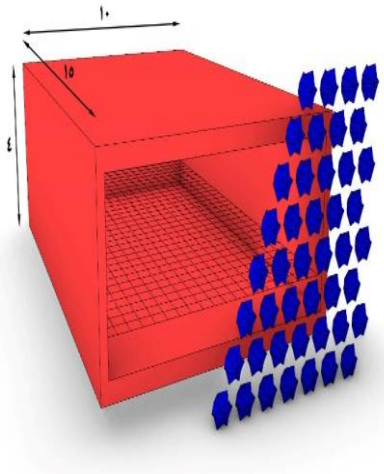
شکل ۱۴. مدل‌های اوریگامی تولید شده بر أساس موتیف‌های پایه

۳-۳. ارزیابی عملکرد آرایه‌ها، نسبت به نور روز

در این مرحله، به معرفی روش بررسی عملکرد اوریگامی باز و بسته‌شونده‌ی تولید شده به‌وسیله‌ی الگوی مولد، درون تایل‌های ۶ ضلعی آرایه هندسی اسلامی، نسبت به نور روز پرداخته می‌شود. با اعمال الگوریتم طراحی شده بر روی تایل‌بندی حاصل از اتصال ۶ ضلعی‌های منتظم و با تغییر پارامتر «زاویه‌ی بردار» به مقادیر ۷۲، ۵۴ و ۳۶ درجه، که حاصل آن به‌ترتیب گره‌های تند، شل و کند می‌شود، سه مدول مختلف از اوریگامی به دست می‌آید. در مرحله‌ی بعد، با تعین سه زاویه‌ی مختلف برای پارامتر «زاویه‌ی محرک اوریگامی» در هر مدول، سه حالت بسته، میانی و باز تولید می‌شود. در مدول اول (شماره ۱) این سه زاویه به‌ترتیب ۳۲،۱۵ و ۵۰ درجه، در مدول دوم (شماره ۲) به ترتیب ۲، ۷ و ۱۲ درجه و در مورد مدول سوم (شماره ۳) این زاویه‌ها به ترتیب ۳، ۱۸ و ۳۰ درجه است.

در عین حال، برای بررسی میزان دریافت نور مطلوب روز، از شاخص UDIUseful استفاده شد. بر اساس مطالعات، میزان مطلوب نور روز دریافتی در این پژوهش، بین ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ لوکس (ر. ک. ۴-۲) است. میزان شدت روشنایی، بیش از

مقادیر این بازه[۵۷]، ایجاد خیرگی کرده و مقادیر کمتر از آن[۵۸]، نور کافی برای انجام فعالیت‌های معمول فراهم نمی‌کند. برای انجام شبیه‌سازی‌ها، مقادیر نور روز دریافتی، در اتاقی به ابعاد ۱۰×۱۵×۴ متر با جهت‌گیری ۱۸ درجه به سمت جنوب شرقی، که در سطح افقی شبکه‌بندی شده است، در ارتفاع ۸۰ سانتی‌متری از کف اتاق که شامل سلول‌های مربع شکل به ابعاد ۰/۵×۰/۵ متر است، محاسبه شده است (شکل۳-۱۲). شبیه‌سازی، با استفاده از افزونه‌ی هانی‌بی در محیط گرس‌هاپر انجام شد. موتورهای محاسب مورد استفاده‌ی این افزونه، دیسیم و رادیانس است. بازه‌ی زمانی شبیه‌سازی، زمان انقلاب زمستانی، تابستانی و اعتدالین، در ساعت‌های ۹، ۱۲ و ۱۵ بوده است. مکان شبیه‌سازی، شهر تهران است که داده‌های اقلیمی آن، از ایستگاه هواشناسی، قابل استحصال است. انتخاب مواد و متریال برای سطوح داخلی اتاق و همین‌طور پوشش شیشه‌ای، براساس استاندارد ASHRAE ۹۰.۱-۲۰۱۰ منطبق با پهنه‌بندی اقلیمی تهران، در نظر گرفته شده است. میزان نور عبوری از مصالح شیشه‌ای، ۸۰ درصد و میزان انعکاس نور از مصالح سقف، دیواره و کف به ترتیب ۸۲، ۷۵ و ۳۷ درصد است. مصالح مورد استفاده برای مدول‌های اوریگامی، به نحوی انتخاب شده است که میزان ۵۹ درصد از نور دریافتی را بازتاب می‌دهد. همچنین، میزان نسبت سطح پنجره به دیوار[۵۹]۸۰ درصد در نظر گرفته شده است

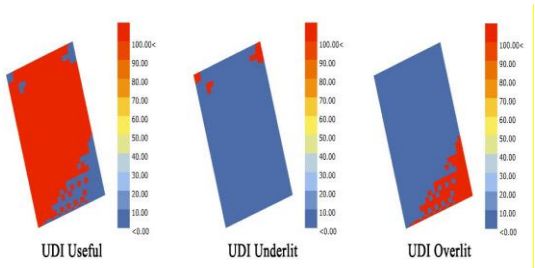


شکل ۳-۱۵. نمونه‌ی اتاق مورد بررسی برای محاسبات نور روز

قبل از شروع فرآیند محاسبه‌ی میزان نور روز دریافتی در بازه‌های زمانی مختلف، لازم است که آرایه‌ی مدول‌های اوریگامی، روی پوشش شیشه‌ای جنوبی، اعمال شوند. برای این‌که بتوان تاثیر واحدهای فضایی همسایه را در میزان نور دریافتی فضا محاسبه کرد، لازم است آرایه‌ی مدول‌های متحرک، قدری فراتر از کادر پنجره اعمال شوند.

٤. یافته‌های تحقیق

پس از انجام فرآیند شبیه‌سازی و محاسبه‌ی میزان نور دریافتی، می‌توان کیفیت نور ورودی در سطح افقی فضا را به صورت نمودارهای متغیرهای UDI Useful، UDI Overlit و UDI Underlit مشاهده کرد. سلول‌های قرمز رنگ، نشان دهنده‌ی گره‌هایی از صفحه هستند که میزان تعریف شده نور روز در بازه‌ی معین را دریافت کرده‌اند (شکل ۱۶).



شکل ۱۶. نمودارهای UDI برای مدول ۱ زاویه ۱۵ درجه در ساعت ۳ بعد از ظهر اول دی ماه

یافته‌های حاصل از پژوهش، شامل سه قسمت عمده می‌شود. قسمت اول، در بردارنده ابزاری رایانشی به منظور تولید تعداد زیادی از الگوهای هندسی نقوش اسلامی، اعم از الگوهای مرسوم و مورد استفاده، و همین‌طور، الگوهای ابداعی منطبق با دستور زبان الگوهای سنتی اسلامی است. قسمت دوم آن، در بردارنده ابزاری است که به وسیله‌ی آن، می‌توان الگوهای اسلامی مورد نظر را به آرایه‌هایی شامل مدول‌های باز و بسته شونده‌ی اوریگامی تبدیل نمود. یافته‌های این دو قسمت، در روش، به تفصیل بیان شد. قسمت سوم، به یافته‌های حاصل از عملکرد مدول‌های اوریگامی تولید شده، نسبت به نور روز و انتخاب مدول (زاویه بردار هندسه) بهینه می‌پردازد. مقادیر بازه‌های ۳ گانه‌ی UDI مطلوب برای اتاق، در جدول ۲ نمایش داده شده است

جدول ۲. زوایای محرک بهینه برای UDI Useful و مقادیر آن (مأخذ: نگارندگان)

UDI Useful								
مدول ۳			مدول ۲			مدول ۱		
۱ فروردین	زاویه محرک	UDI Useful برحسب درصد	۱ فروردین	زاویه محرک	UDI Useful برحسب درصد	۱ فروردین	زاویه محرک	UDI Useful برحسب درصد
۰۹:۰۰	۳۰	۶۸/۰۶	۰۹:۰۰	۷	۸۰/۹۵	۰۹:۰۰	۳۲	۸۱/۵۵
۱۲:۰۰	۳۰	۷۵/۲۶	۱۲:۰۰	۷	۸۸/۴۵	۱۲:۰۰	۳۲	۸۹/۵۰
۱۵:۰۰	۳۰	۶۱/۶۱	۱۵:۰۰	۱۲	۸۱/۲۵	۱۵:۰۰	۵۰	۹۲/۵۰
۱ تیر	زاویه محرک	UDI Useful برحسب درصد	۱ تیر	زاویه محرک	UDI Useful برحسب درصد	۱ تیر	زاویه محرک	UDI Useful برحسب درصد
۰۹:۰۰	۳۰	۶۱/۷۶	۰۹:۰۰	۱۲	۹۰/۷۰	۰۹:۰۰	۵۰	۹۵/۰۵
۱۲:۰۰	۳۰	۶۸/۰۶	۱۲:۰۰	۱۲	۹۶/۸۵	۱۲:۰۰	۵۰	۹۹/۸۵
۱۵:۰۰	۳۰	۶۵/۵۱	۱۵:۰۰	۱۲	۷۹/۹۱	۱۵:۰۰	۵۰	۸۸/۶۰
۱ مهر	زاویه محرک	UDI Useful برحسب درصد	۱ مهر	زاویه محرک	UDI Useful برحسب درصد	۱ مهر	زاویه محرک	UDI Useful برحسب درصد
۰۹:۰۰	۳۰	۷۴/۹۶	۰۹:۰۰	۷	۸۳/۳۵	۰۹:۰۰	۳۲	۸۷/۵۵
۱۲:۰۰	۳۰	۷۵/۸۶	۱۲:۰۰	۷	۸۶/۷۰	۱۲:۰۰	۳۲	۸۶/۶۵
۱۵:۰۰	۱۸	۶۴/۴۶	۱۵:۰۰	۱۲	۷۳/۹۱	۱۵:۰۰	۵۰	۹۰/۴۰
۱ دی	زاویه محرک	UDI Useful برحسب درصد	۱ دی	زاویه محرک	UDI Useful برحسب درصد	۱ دی	زاویه محرک	UDI Useful برحسب درصد
۰۹:۰۰	۳۰	۷۱/۶۶	۰۹:۰۰	۲	۷۴/۰۶	۰۹:۰۰	۳۲	۶۹/۴۱
۱۲:۰۰	۳۰	۸۰/۳۵	۱۲:۰۰	۷	۷۷/۸۱	۱۲:۰۰	۳۲	۸۰/۶۵
۱۵:۰۰	۳۰	۵۹/۶۷	۱۵:۰۰	۱۲	۷۳/۷۶	۱۵:۰۰	۵۰	۸۲/۴۵

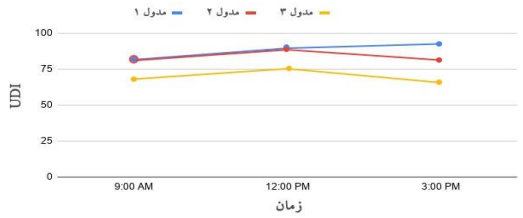
با بررسی زوایای محرک بهینه در بازه‌ی UDI Useful در مورد مدول شماره ۱ در ۱۲ زمان مورد نظر، مشخص می‌شود که در هیچ‌یک از اوقات، حالت «بسته» رخ نداده و حالت‌های «میانی» و «تقریبا باز» سهم یکسانی را به خود اختصاص می‌دهند. در مورد مدول شماره ۲ تنها در ساعت ۹ صبح اول دی ماه، بهترین زاویه‌ی محرک، بیان‌گر حالت بسته است. در این مدول، حالت میانی، ۵ و حالت تقریبا باز، ۶ زمان معین را به خود اختصاص می‌دهند. در مدول شماره ۳ تنها در ساعت ۳ بعدازظهر اول مهرماه، حالت میانی رخ داده و در سایر زمان‌ها، زاویه‌ی محرک بهینه، بیان‌گر حالت تقریبا باز است.

همچنین، مقادیر UDI Overlit نشان می‌دهد که در مدول ۱ تنها در ساعت ۹ صبح اول دی، منحصراً حالت میانی رخ می‌دهد. در روز ۱ تیرماه، ساعت‌های ۱۲ و ۱۵، عملکرد حالت‌های بازشوندگی، نسبت به نور روز یکسان است و مقادیر UDI Overlit صفر درصد را نشان می‌دهد. در همین حال، مقادیر زوایای محرک برای سایر زمان‌ها، بیانگر حالت بسته است. در مورد مدول ۲ در اول دی ماه ساعت ۹ صبح، منحصرا حالت میانی رخ داده و در ساعت ۱۵ اول تیرماه، حالت‌های بازشوندگی نسبت به نور یکسان بوده و مقادیر UDI Overlit صفر درصد است. در سایر اوقات، حالت تقریباً بسته رخ می‌دهد. در مورد مدول ۳ در اول تیرماه ساعت ۱۵، محاسبات برای هر ۳ حالت، مقدار صفر درصد را نشان می‌دهد و در ساعت ۹ صبح اول مهر ماه، منحصراً حالت میانی دیده می‌شود. در سایر زمان‌ها، حالت بازشوندگی این مدول به صورت بسته تعریف می‌شود.

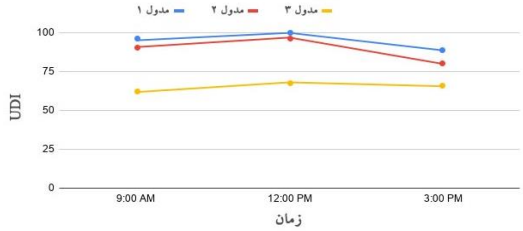
مقادیر UDI Underlit نشان می‌دهد که در مدول ۱ در تمام زمان‌ها، حالت تقریبا باز رخ می‌دهد. با این ملاحظه که در ساعت‌های ۹ صبح و ۱۲ بعداز ظهر اول دی ماه، حالت میانی نیز، همان میزان صفر درصد را نشان می‌دهد. در مدول ۲ در تمام زمان‌ها، حالت تقریبا باز دیده شده است؛ به استثنای ساعت ۱۵ اول دی ماه که مقدار زاویه‌ی محرک، حالت میانی را نشان می‌دهد. در مدول ۳ به استثنای ساعت ۱۵ اول مهرماه، با حالت تقریبا باز مواجه هستیم و در این زمان استثنا، مقدار زاویه‌ی محرک، حالت میانی را نشان می‌دهد.

بر این أساس، برای تعیین بهترین مدول نسبت به عملکرد آن در میزان نور روز دریافتی، لازم است مقادیر بیشینه‌ی UDI به‌دست آمده از زوایای محرک اوریگامی، در هر ۳ مدول با هم مقایسه شوند.

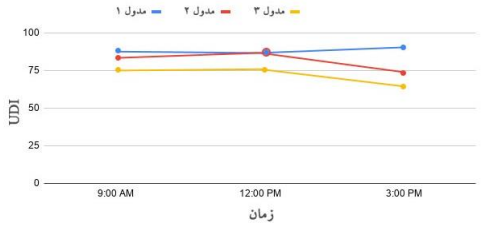
نمودارهای به دست آمده از مقایسه‌ی مقادیر UDI Useful در اولین روز فصول چهارگانه، موید این موضوع است که به طور کلی، مدول شماره ۱ با زاویه‌ی بردار هندسه‌ی ۷۲ درجه، عملکرد بهتری را نسبت به سایر مدول‌ها از خود نشان می‌دهد.



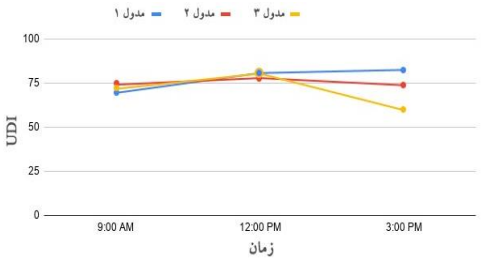
نمودار ۱. مقایسه مقادیر UDI Useful در روز ۱ فروردین برای مدول‌های ۳ گانه



نمودار ۲. مقایسه مقادیر UDI Useful در روز ۱ تیر برای مدول‌های ۳ گانه



نمودار ۳. مقایسه مقادیر UDI Useful در روز ۱ مهر برای مدول‌های ۳ گانه



نمودار ۴. مقایسه مقادیر UDI Useful در روز ۱ دی برای مدول‌های ۳ گانه

۵. نتیجه‌گیری

این پژوهش، با هدف بررسی کاربرد هندسه‌ی نقوش اسلامی در بهینه‌سازی نور روز در نماهای متحرک انجام شد. برای این منظور، ابتدا روشی برای تولید هندسه‌ی نقوش اسلامی، به صورت پارامتریک ارائه شد. پس از آن، روشی نیز برای تبدیل نقوش حاصله به سازه‌های سه‌بعدی متحرک (تا شونده)، بر اساس اوریگامی، پیشنهاد شد. در نهایت، ساختارهای سه‌بعدی تولید شده بر اساس نقوش هندسی اسلامی، بر اساس عملکرد آن‌ها در خصوص دریافت نور روز مناسب در طول یک‌سال، مورد مقایسه قرار گرفتند. یافته‌های این پژوهش، چند محور اصلی را شامل می‌شود. نخست آن‌که هندسه‌ی نقوش اسلامی، قابلیت بازتولید توسط الگوهای پارامتریک را دارا هستند. دیگر آن‌که، این نقوش، می‌توانند به ساختارهای سه‌بعدی تاشونده، تبدیل شوند. همچنین، مدل هندسی مبتنی بر زاویه‌ی مولد ۷۲ درجه، با موتیف‌های پایه‌ی ۴، ۶ و ۱۲ وجهی، بهترین عملکرد را در خصوص دریافت نور روز داراست. یافته‌های این پژوهش، به طور کلی، موید قابلیت هندسه‌ی نقوش اسلامی، در پدیدآوردن نماهای متحرک و تطبیق‌پذیر با محیط است. تعمیم و توسعه‌ی این یافته، به ویژه با هدف افزایش دقت محاسبات و همچنین، افزودن متغیرهای محیطی دیگر، نیازمند پژوهش‌های دیگر، به ویژه در حوزه‌ی انرژی، منظر و تابش است

پی‌نوشت‌ها

1. KineticFacade
2. Interface
3. Alotaibi
4. Loonen
5. Abbas
6. Shariadin
7. Origami
8. Folded Plates
9. Singh
10. Elghazi
11. Daylight Uniformity
12. Honey Bee
13. Grasshopper
14. Useful Daylight Illumination (UDI)
15. Daylight Autonomy (DA)
16. Discomfort Glare Probabilities (DGP)
17. Total Energy (TE)
18. Tabadkani
19. Adaptive Solar Facade
20. Kaleidocycle
21. Daysim
22. Radiance
23. Galapagos
24. Frei Otto
25. Romano
26. López
27. Kensek
28. Attia
29. Shahbazi
30. Raeiszadeh
31. Abdullahi
32. Bonner
33. Hankin
34. Maheronaghsh
35. Alani
36. Izadi
37. Kaplan
38. Grunbaum
39. Regular tiling
40. Archimedean tiling
41. Euclidean plane
42. Vertex figure
43. Lang
44. Semi regular
45. Macri
46. Oru
47. Kami
48. Hernandez
49. TreeMaker
50. International Energy Agency (IEA)
51. Carlucci
52. Useful Daylight Illuminance
53. Useful Illumination
54. Nabil
55. Motive
56. Zhao
57. UDI Underlit
58. UDI Overlit
59. WWR

منابع

۱. رئیس‌زاده، مهناز، و حسن مفید. ۱۳۸۹. احیای هنرهای از یاد رفته: مبانی معماری سنتی در ایران به روایت استاد حسین لرزاده. تهران: انتشارات مولی.

۲. ماهرالنقش، محمود. ۱۳۶۱. طرح و اجرای نقش در کاشیکاری ایران: دوره‌ی اسلامی. تهران: انتشارات موزه رضا عباسی.

۳. محمدی، امیر امجد، احد نژاد ابراهیمی و یاسر شهبازی. ۱۳۹۹. *هندسه کاربندی در معماری ایران؛ پاسخ به چالش کاربندی رسمی و اختری*. فضل‌نامه پژوهش‌های معماری اسلامی، شماره بیست و ششم، بهار ۱۳۹۹، سال هشتم. تهران.

Referenses

1. Abas, S. J., and A. Salman. 1992. Geometric and Group-Theoretic Methods for Computer Graphic Studies of Islamic Symmetric Patterns. *Computational Graphic Forum* 11 (1): 43-53.
2. Abdullahi, Yahya, and Mohamed Rashid Bin Embi. 2013. Evolution of Islamic Geometric Patterns. *Frontiers of Architural Research* 2(2): 243–251.
3. Alani, Mostafa W. 2018. Algorithmic Investigation of the Actual and Virtual Design Space of Historic Hexagonal-based Islamic Patterns. *International Journal of Architectural Computing*.
4. Alotaibi, Fahad. 2015. The Role of Kinetic Envelopes to Improve Energy Performance in Buildings. *Journal of Architectural Engineering Technology*.
5. Attia, Shady, Fabio Favoino, Roel Loonen, Aleksandar Petrovski, and Aurora Monge-Barrio. 2015. Adaptive Façades System Assessment: An Initial Review. In *10th Conference on Advanced Building Skins*. November2015, Switzerland.
6. Bonner, Jay. 2017. *Islamic Geometric Patterns*. Springer International Publications.
7. Demaine, Erik D., and Joseph O'Rourke. 2007. *Geometric Folding Algorithms: Linkages, Origami, Polyhedra*. Boston: Cambridge University Press.
8. Elghazi, Yomna Saad, and Ayman Hassaan Mahmoud. 2016. Origami Explorations: A Generative Parametric Technique for Kinetic Cellular Façade to Optimize Daylight Performance. In *34th Annual eCAADe Conference*, Finland.
9. Fei, L.J., Debnath, Sujan. 2013. Origami Theory and its Applications: A Literature Review. International *Journal of Social, Business, Psychological, Human Science and Engineering* 7 (1): 113-117.
10. Grunbaum, Branko .1986. Tilings and Patterns. University of Washington. *The American Mathematical Monthly* 95(1).
11. Hankin, E. H. 1925. Examples of Methods of Drawing Geometrical Arabesque. *The Mathematical Gazette*12 (176): 370 – 373.
12. Izadi, Ali, Mahdi Rezaei (Ghahroudi), and Azam Bastanfard. 2010. A Computerized Method to Generate Complex Symmetric and Geometric Tiling Patterns. *Intelligent Computer Graphics*:185-210.
13. Kaplan, Craig S. 2005. Islamic Star Patterns from Polygons in Contact. In *Graphics Interface ۲۰۰۵ Conference*, May ۹-۱۱, Victoria, British Columbia, Canada.

14. Kaplan, Craig S., and David H.Salesin. 2004. Islamic Star Patterns in Absolute Geometry. *ACM Transactions on Graphics Volume* 23 (2).
15. Kensek, Karen, and Ryan Hansanuwat. 2011. Environment Control Systems for Sustainable Design: A Methodology for Testing, Simulating and Comparing Kinetic Facade Systems. *Journal of Creative Sustainable Architecture and Built Environment* 1: 27-46.
16. Lang, Robert J. 2012. Origami Design Secrets: Mathematical Methods for an Ancient Art. *CRC Press.*
17. 2018. Twists, Tilings, and Tessellations: Mathematical Methods for Geometric Origami. *CRC Press*.
18. Loonen, R. C. G. M., M. Trcka, D. Costola, and J. L. M. Hensen. 2013. Climate Adaptive Building Shells: State-of-the-Art and Future Challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 25: 483-493.
19. López, Marlén, Ramón Rubio, Santiago Martín, and Ben Croxford. 2017. Active Materials for Adaptive Architectural Envelopes Based on Plant Adaptation Principles. *Journal of Facade Design and Engineering*3(1).
20. Maheronaghsh, Mahmoud. 1982. *Design and Implementation of Patterns in Iranian Tiling: The Islamic Era*. Tehran: Reza Abbasi Museum Publications.
21. Macri, Scott. 2015. *Practical Applications of Rigid Thick Origami in Kinetic Architecture*. University of Hawai'i at Manoa, School of Architecture, Doctoral Projects.
22. Peraza Hernandez, Edwin A., Darren J. Hartl, Dimitris C. Lagoudas, 2019. *Active Origami: Modeling, Design, and Applications*. Springer International Publications.
23. RaeisZadeh, Mahnaz, and Hosein Mofid. 2010. *Revival of Forgotten Arts: Fundamentals of Traditional Architecture in Iran.* Tehran: Mola Publications.
24. Romano, Rosa, Laura Aelenei, Daniel Aelenei, and Enrico Sergio Mazzucchelli. 2018. What is an Adaptive Façade? Analysis of Recent Terms and Definitions from an International Perspective. *Journal of Façade Designe Engineering* 6(3): 65-76.
25. Singh, Pooja. 2018. Built Architecture: The Role of Natural Light. *International Journal of Research and Analytical Reviews* (August).
26. Tabadkani, Amir, Masoud Valinejad Shoubi, Farzaneh Soflaei, and Saeed Banihashemi. 2019. Integrated Parametric Design of Adaptive Facades for User's Visual Comfort. *Automation in Construction* (106).
27. Zhao, Yan, Yoshihiro Kanamori, and Jun Mitani. 2017. Geometry of Axisymmetric 3D Origami of Triangular Facets. In *the 17th International Conference on Geometry and Graphics*, (ICGG) 2016.
28. http://skyscrapercenter.com/abu-dhabi/al-bahar-tower-2/9130/
29. http://www.ctbuh.org/TallBuildings/FeaturedTallBuildings/AlBaharTowersAbuDhabi/tabid/384/5/language/en-US/Default.aspx

Journal of Research in Islamic Architecture / No.32 / Autumn 1400

Application of Islamic Geometric Patterns in Improving the Performance of Daylighting in Kinetic Façades

Hamzeh Mohaghegh
M. Arch. Iran University of Science and Technology, School of Architecture and Environmental Design
Corresponding author: mail@gmail.com

Zahra Fallah Zavareh
M. Arch. Iran University of Science and Technology, School of Architecture and Environmental Design

Abbas Tarkashvand
Assistant Professor, Iran University of Science and Technology, School of Architecture and Environmental Design
Corresponding author: Tarkashvand@iust.ac.ir

Mohsen Faizi
Professor, Iran University of Science and Technology, School of Architecture and Environmental Design

Recived: 10/06/2020 **Accepted:** 25/09/2021

Abstract

Today, the improvement of facades by means of technological tools has caused them to play a more active role in the relationship between inside and outside the building. One of these technological tools is the kinetic electromechanical device. numerous experimental efforts and researches have shown that moving (or kinetic) facade systems can establish a better interaction between inside and outside the building and by adjusting the environmental conditions, reduce their harmful role and increase the useful connection between inside and outside. one of the important issues in designing kinetic facades is their mechanism's geometric shapes. This geometry, on the one hand, must be able to open and close, and on the other hand, must have aesthetic values. due to the systematic and mathematical nature in Islamic geometric patterns, they can be produced parametrically with new software and hardware. This indicates their possible use in kinetic facades. mobility in the facade (or its modules) requires the geometrical ability of its components to maintain its structure and continuity during transformation. The art of Origami is a useful tool to achieve this feature. Therefore, it seems that it is possible to turn an array of modules based on Islamic geometric patterns into a kinetic facade with the help of origami knowledge, which is transformed under certain conditions and a tool to optimize parameters related to the building performance by adjusting the internal and external connection. The facade of a building is associated with a set of factors. in this regard, it is said that the effect of natural light in shaping the shape of the building is very important. Accordingly, in this research, an attempt was made to extract the optimal geometry pattern and the appropriate origami stimulus angle by creating several origami patterns based on Islamic geometric patterns and adapting them to daylight at different times of the year. For this purpose, first, using quantitative mathematical tools, an algorithm was developed that could be used to create a wide range of Islamic geometric patterns. Then, in the next step, origami opening and closing modules were generated using these geometries as basic crease patterns. Next, three modules were selected to simulate daylight performance according to install them to the south façade of a room, and

compared with three closed, medium and open modes, during the winter, summer and equinox. The comparison of these patterns was done by simulating the amount of light received in the software. The findings of this study include several main axes. First, the geometry of Islamic motifs can be reproduced by parametric patterns. second, these patterns can be transformed into three-dimensional folding structures. Also, the geometric model based on the 72-degree generating angle allows to receive the optimal amount of daylight.

Keywords: Kinetic Façade - Islamic geometric patterns – Origami – Daylighting - Optimization