Archive of SID

نشریه معماری اقلیم گرم و خشک
سال پنجم، شماره ششم، پاییز و زمستان ۱۳۹۶

تحلیل مدل ترسیمی زبان-الگوی الگوریتمیک یزدی‌بندی آسمانه کوشک هشت‌بهشت اصفهان در راستای پایایی فرم سازه آزاد

سارا بیرقی[۱]، حسن ستاری ساربانقلی[۲*]، علی محدث خراسانی [۳]

۱- دانشجوی دکتری معماری، گروه معماری و شهرسازی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
۲- دانشیار دانشکده معماری و شهرسازی، گروه معماری و شهرسازی ،واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
۳- دانشیار دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پلی‌تکنیک تهران، ایران

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۰۶، تاریخ پذیرش نهائی: ۱۳۹۶/۰۸/۰۹)

چکیده

آسمانه در عصر صفوی دارای غنای ساختاری در بنای کوشک‌ها می باشد. ساختار یزدی‌بندی در آسمانه بنای هشت‌بهشت، با هدف تحلیل هندسی الگوریتمیک و آنالیز سازه‌ای در فرم آزاد مورد پژوهش واقع‌می‌گردد. الگوی یزدی‌بندی آسمانه با وجود آلت هندسی سینه‌فخری، از لحاظ هندسه و نقش سازه‌ای بر پایه شبکه ترسیمات رسمی‌بندی به‌وجودمی‌آید. هندسه یزدی‌بندی در آسمانه مرکزی هشت‌بهشت به صورت دوایر هم‌مرکز، واحدهای لوزی شکل و ستاره‌های تخت و کمان‌های بین ردیف‌ها می‌باشد. از مهم‌ترین سازه‌های مدرن معاصر قابل تطبیق با هندسه یزدی‌بندی، سازه فضاکار بوده که دارای رفتار لرزه‌ای مناسب به جهت سبکی وزن می‌باشد و دارای مزیت‌هایی برای پوشش دهانه‌های گسترده و بدون نیاز به ستون می‌باشد. سوال اصلی چگونگی ترسیم سه‌بعدی لایه‌های یزدی‌بندی با توجه به طراحی الگوریتمیک در جهت پایایی ساختار فرم سازه‌ای آزاد می‌باشد. ابتدا تحلیل ساختاری به صورت پلان معکوس و سپس ترسیم الگوریتمیک درGrass Hopper به‌صورت شعاعی از مرکز صوت می‌پذیرد. سپس ماهیت بارها و اتصالات با درنظرگرفتن اعضای سازه‌ای فضاکار در یزدی‌بندی در نرم‌افزارهای SAP2000، ABAQUS مورد تحلیل هندسی و بارگذاری قرارمی‌گیرد. در مرحله نهایی ارائه مدل فضاکار فرم‌آزاد با بیشترین ظرفت باربری با درنظرگیری نسبت ارتفاع به دهانه با توجه به تاشه اولیه درراستای معاصرسازی صورت‌می‌گیرد. ابتکاری که در این پژوهش پیش‌رو گرفته‌شده‌است، تطبیق پارامترهای هندسی این گنبد با یک فرم‌آزاد می‌باشد تا پایایی و ایستایی این هندسه در این فرم‌ها نیز مورد بررسی قرارگیرد و کارامدی یا ناکارامدی آن مشخص شود تا راهی برای اطمینان آزادی عمل و امکان‌پذیر بودن این روش برای معماران جهت تطبیق طرح های خود با هندسه یزدی‌بندی باشد. روش پژوهش حاضر استدال منطقی بوده و در نهایت به گونه‌بندی هندسی ترسیمی در دو زبان سنتی و مدرن و تحلیل سازه پرداخته‌می‌شود. نتیجه حاصل از پژوهش به صورت کدهای گرافیکی و پیشنهاد سازه فضاکار در ساخت سازه‌های آزاد می‌باشد.

کلید واژه‌ها: کوشک هشت‌بهشت اصفهان، تزئینات یزدی‌بندی، زبان-الگوی الگوریتمیک، تحلیل سازه گنبد، آنالیز فرم‌آزاد.

*Email: sattari@iaut.ac.ir 09143134269

این مقاله برگرفته از پایانامه دکتری سارا بیرقی با عنوان« «معاصرسازی زبان-الگو های تزئینات آسمانه چهار بنای عصر صفوی» (در راستای گسسته سازی سطوح آزاد با مطالعه موردی چهار اثر مجموعه شیخ صفی الدین اردبیلی، مجموعه شیخ کلخوران اردبیل، کاخ عالیقاپو اصفهان، عمارت هشت بهشت اصفهان) با راهنمایی دکتر حسن ستاری ساربانقلی در دانشگاه آزاد واحد تبریز و مشاوره دکتر علی محدث خراسانی در دانشگاه صنعتی امیرکبیر است.

www.SID.ir

Archive of SID

پرسش‌های پژوهش

چگونه می‌توان زبان‌الگوی الگوریتمیک جهت شبیه‌سازی سه‌بعدی هندسه یزدی‌بندی نوع تخت‌دار آسمانه کوشک هشت‌بهشت اصفهان ارائه داد؟ چگونه می‌توان سامانه سازه‌ای مدرن برطبق الگوی سه‌بعدی هندسه یزدی‌بندی در فرم‌های آزاد ارائه‌نمود؟

۱- مقدمه

زبان-الگو با قانونمند کردن الگوها، نظم ساختاری را در مجموعه‌ای از قواعد ترکیبی ایجاد می‌سازد که از طرفی عاملی بر درک و کنترل یک سیستم پیچیده و از طرف دیگر ابزار طراحی ساختار می‌باشد (خاک‌زند، حسینی‌کیا، ۱۳۹۳). یکی از راه‌های بازشناسی هندسه سنتی شناخت الگوی روابط ترسیمی می‌باشد. الگو با قابلیت ایجاد نظم و رابطه عناصر سیستم سبب گویایی بیشتر در بازترسیم هندسی می‌باشد؛ که در این حالت ساخت روابط بین عناصر با طرح ساده شده‌ای صورت‌می‌پذیرد (سلطانی و همکاران، ۱۳۹۱). منطق تکرار در ابزارهای دیجیتال عاملی برتولید الگوهای الگوریتمیک می‌باشد. ابزار طراحی دیجیتال، فرصت طراحی الگوهای مبتنی بر هندسه کلاسیک، تغییر شکل دادن و تکثیر آن در شرایط فرمی پیچیده و خاص را فراهم‌آورده‌است. پتانسیل بالای الگوهای کلاسیک در زایش فرم‌های آزاد بعنوان دلیل اصلی در بهره‌گیری از معماری بومی برمبنای تکرار موتیف‌های هندسی در عصر حاضر می‌باشد. الگوریتم‌های کامپیوتری با ساختار ریاضی-دستوری و قابلیت انطباق‌پذیری بالا جهت تولید فرم‌های جدید، مورد استفاده قرارمی‌گیرند (خبازی، ۱۳۹۳). یکی از نمونه‌های معماری سنتی با قابلیت معاصرسازی، تزئینات آسمانه مرکزی کوشک هشت‌بهشت در اصفهان می‌باشد. این مجموعه تاریخی به‌منظور حفظ ارزش‌های بصری تزئینات آسمانه ها، مورد بازبینی هندسی جهت سهولت در امر مرمت و معاصرسازی در استفاده طرح‌های آتی می‌اشد. الگوی یزدی‌بندی آسمانه به‌صورت تخت‌دار، تشکیل‌شده از تکرار واحدهای مشابه لوزی است که فضای میان ردیف‌های حلقوی شکل افقی را می‌پوشانند و عناصر افقی ستاره‌ای شکل میان این واحدهای تکرارشونده قرارمی‌گیرند (نظری و همکاران، ۱۳۹۵). درراستای معاصرسازی و تطبیق پارامترهای هندسی یزدی‌بندی با فرم‌آزاد، بایستی زبان-الگوی الگوریتمیک یزدی‌بندی استخراج گردد؛ زیرا جهت تطبیق با فرم‌آزاد، امکان ایجاد تغییر در پارامترها و مشاهده تغییرات اعمال‌شده در فرم، در کوتاهترین زمان میسر هست که سبب افزایش سرعت در روند طراحی می‌گردد. این الگو، امکان ترسیم تمام طبقات یزدی‌بندی با فرایند شعاعی مرکزگرا، طی تبدیل دایره شمسه به هشت ضلعی پیرامونی گنبد را فراهم‌می‌سازد. آلت‌های افقی ستاره شکل تخت که بر روی ردیف‌های افقی و میان مدول‌های لوزی شکل چیده شده‌اند، هیچگونه امکان تحمل بار را برای این دسته از یزدی‌ها امکان‌پذیر نمی‌سازند (شعرباف، ۱۳۸۵: ۳) به‌همین جهت مقاله حاضر به دنبال پاسخگویی به زبان سازه‌ای مدرن از الگوی یزدی‌بندی تحت دار تحت بارگذاری می‌باشد. به‌طورمعمول سازه‌های سنتی در راستای مدرن‌سازی سازه‌ای، قابلیت تطبیق با سازه‌های فضاکار آزاد با اتصالات مفصلی و اعضای لوله‌ای فولادی با هندسه مدولار را دارا می‌باشند. سازه‌های فضاکار به علت سختی بالا، سبکی انعطاف‌پذیری و زیبایی معماری یکی از پرکاربردترین سازه‌ها در صنعت ساخت‌وساز

www.SID.ir

Archive of SID

می‌باشند، در این میان سازه‌های گنبدی به دلیل سختی جانبی و قائم بالایشان کاربرد زیادی دارند (جلالیان، بهروش، ۱۳۹۳).

روند پژوهش، یافتن زبان–الگوی الگوریتم مناسب برنامه‌نویسی برای ترسیم آسمانه یزدی‌بندی کوشک هشت‌بهشت اصفهان و نهایتا ترسیم آن در سه‌بعد و آنالیز بارگذاری تحت هندسه پایه و معاصرسازی با سازه های فضاکار در سطوح گنبدی و فرم‌آزاد، است. امکان تطبیق یزدی‌بندی با سازه فضاکار یکی از راهکارهای معاصرسازی و پایایی فرمی در معماری عصر حاضر می‌باشد. در این راستا اطلاعات مربوط به آسمانه یزدی‌بندی به صورت برداشت از محل با مترلیزری و عکس‌های تخت و پاناروما از آسمانه‌ها انجام‌گرفته‌است. نتایج این پژوهش حاکی از یافتن روش جدید قابل‌اجرا برای ترسیم سه‌بعدی و بیان زبان سازه‌ای از این نوع یزدی‌بندی هست؛ که در مرمت یزدی‌بندی‌های سنتی کاربرد خواهد داشت. در این راستا ابتدا به دسته بندی هندسه یزدی‌بندی و تحلیل هندسی آن و ترسیم الگوریتمیک، پرداخته‌می‌شود. در فاز دوم مقاله از جهت معاصرسازی از سازه های فضاکار و قابلیت تطبیق با هندسه یزدی‌بندی بهره‌گرفته‌می‌شود. نکته قابل توجه در این سازه‌ها اثر نیروی زلزله افقی، زلزله قائم و بار برف است؛ که باید در طراحی آن را مدنظر قرارداد. نیروهای افقی زلزله باید برای سازه های فضاکار با پایه ها یا ستون های خرپایی مدنظر قرارگیرد ولی اگر سازه فضاکار به تنهایی مورد تحلیل قرارگیرد، نقش تعیین‌کننده در پایداری این نوع سازه را بار قائم زلزله و بار افزایشی برف ایفا خواهندکرد. بنابراین برای انجام پایداری گنبد فضاکار بدون پایه های خرپایی طراحی براساس بار برف و زلزله قائم صورت خواهدگرفت. برای بررسی پایداری از نرم افزار ABAQUS با روش المان محدود غیرخطی و روش Static Riks صرفا تحت بار افزایشی برف و با اعمال ناکاملی در طول اعضا استفاده می‌گردد؛ چرا که انجام تحلیل براساس بار قائم زلزله نیازمند انجام تحلیل‌های دینامیکی هستیم که هزینه محاسباتی بالا دارند. در بخش نهایی مقاله، جهت کاهش تعداد المان‌ها و ایده‌پردازی معمارانه و تطبیق با زبان‌الگوی الگوریتمیک از فرم‌آزاد فضاکار با تاشه‌پردازی سنتی و قابلیت تغییر پارامترها در تغییر شکل فرمی، استفاده‌می‌گردد.

۲- پیشینه پژوهش

بررسی مطالعات انجام‌شده در دو حوزه شبیه‌سازی الگوریتمیک درراستای بازترسیم نقوش و معاصرسازی تزئینات معماری‌اسلامی صورت‌می پذیرد که درراستای فازاول، منصور صاحب‌محمدیان، سینا فرامرزی (۱۳۹۰) طی مقاله «گونه‌شناسی و تدوین ساختار هندسی کاربندی در معماری‌ایران» به باززنده‌سازی این الگو با توجه به شناخت هندسی کاربندی منفرد رسمی با پایه شکل‌گیری یزدی‌بندی، پرداخته‌اند. سهیل نظری و همکاران (۱۳۹۶) در پژوهش «گونه‌شناسی و تحلیل هندسی و سازه‌ای یزدی‌بندی در معماری‌ایران» شرط اطلاق یزدی‌بندی به یک کار، وجود آلت هندسی سینه‌فخری، عنوان می‌کنند؛ به‌صورتی‌که یزدی‌بندی با خصوصیت رسمی‌بندی دارای آلت‌های تخت‌دار (واحدهای لوزی‌شکل تکرارشونده و تخت‌های ستاره‌شکل)، بدون‌تخت (قسمتی از یک شمسه (سینه‌فخری) و قسمتی از قوس‌های متقاطع) می‌باشد.

در راستای نقطه شروع رویکرد الگوریتمیک در زمینه ترسیمی هندسه اشکال، هانکین (۱۹۲۵)، روش شبکه زیرساختی چندضلعی‌ها را در مقاله

www.SID.ir

Archive of SID

«طراحی الگوهای هندسی هنراسلامی» ارائه‌کرد. توصیف هانکین از این تکنیک، یک نقطه آغاز برای رویکرد الگوریتمیک فراهم می‌کند. توضیحات هانکین نشان‌دهنده یک الگوریتم رشد از بخش میانی لبه‌ها و برش این لبه‌ها، زمانیکه همدیگر را قطع می‌کنند. درراستای چگونگی بیرون‌کشیدن محتوای هندسی از یک الگو و نحوه گسترش آن، کاپلان (۲۰۰۲)، در پایانامه «گرافیک کامپیوتری و طراحی هندسی تزئینات» روش لی(مسیریابی) را پیشنهاد می‌دهد. این مسیر ایجاد شده طی تقارن‌های چرخشی و انعکاسی داخل چندضلعی منتظم، قرارمی‌گیرد و متغیرهایی نظیر تعداد اضلاع چندضلعی، شعاع دایره‌محیطی و تعداد لایه‌های داخلی شکل در تمام طرح‌هایی که از طریق مسیر تولید می‌شوند، کاربرد دارند. یکی‌دیگر از روش‌ها، روش گرانبوم و شفارد- که در آن شبکه چندضلعی منتظم، رسم و رئوس آن نامگذاری می‌شود. این روش برای رسم نقوش هندسی با زوایای ناسازگار مناسب نیست، درحالیکه هانکین برای رسم نقوش با زاویه ناسازگار مناسب‌تر است. احمد امین‌پور (۱۳۹۴) در مقاله «ارائه دو روش جدید در ترسیم گره و مقایسه آنها» روش پارامتریک را جهت برنامه‌نویسی نقوش هندسی از شبکه چندضلعی معرفی می‌کند. همچنین در مقاله حاضر نحوه قرار دادن گره روی سطوح منحنی مورد بحث واقع می گردد. در این راستا مهدوی‌نژاد (۲۰۱۶)، در مقاله «گره در فضای گنبدی، آنالیز سه نمونه از گنبدهای ایرانی» گره دست‌گردان را درراستای نحوه تکثیر الگوهای هندسه‌اسلامی بر روی فضای گنبدی، تحت تأثیر انحنای گاووسی در سطح گنبد، بیان‌می‌کنند؛ که نشان‌دهنده تغییر چندضلعی‌های ستاره‌ای با توجه به انحنای گنبد می‌باشد. سیلویا هارمسون (۲۰۰۶)، در پایانامه دکتری «بازسازی الگوریتمیک از طاق‌های استاکتیکی مقرنس در معماری‌اسلامی» عناصر سلولی مقرنس را بر پایه مدول مربع و مدول لوزی با زوایای ۴۵ و ۱۳۵ درجه بیان‌می‌کند. مدول‌های دیگر بر اساس برش در اقطار مربع اولیه شکل می‌گیرد؛ که در پلان به‌صورت پرک، تاسه می‌باشند. شبیه‌سازی مقرنس با توجه به متغیرهای قطر و زاویه و نوع سلول‌ها و همچنین موقعیت و جهت‌گیری آن‌ها در پلان صورت‌می‌پذیرد. طبقات مقرنس در پلان با انتقال بخش‌های منحنی سلول‌های مقرنس در سطح تخت صورت‌می‌پذیرد. این الگوی ترسیمی بعنوان پایه شبیه‌سازی یزدی‌بندی آسمانه کوشک هشت‌بهشت در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرد. درراستای زبان-الگوی الگوریتمیک، گلابچی (۱۳۹۰) در کتاب «معماری دیجیتال» الگوها را به‌صورت سه‌گوش، چهارگوش و بی‌شکل دسته‌بندی می‌کند. پوشش‌های لوزی‌شکل موجود در یزدی‌بندی در زمره الگوهای چهارگوش با چرخش نسبت به محورهای مختصات می‌باشند. همپوشانی این قطعات عاملی در شکل‌گیری سطح فرم‌آزاد می‌باشد. درراستای الگوبرداری دیجیتال از ساختارهای هندسه اسلامی در عصر حاضر، زوبین خبازی (۱۳۹۳)، در کتاب «فرایندهای طراحی دیجیتال» بر پروژه کاربندی دیجیتال جهت بازتولید سازه‌ای تمرکز دارد. این سازه به لحاظ هندسه، قطعات، موقعیت‌ها، توسط ساخت دیجیتال بازتولید می‌گردد. در این پروژه با ایجاد اندکی تغییر فرمی و خروج از حالت متقارن، پیچیدگی‌های بیشتری در فرایندطراحی و ساخت، مورد کاوش قرارگرفت. این فرایند یکی از راه‌های انتقال تجربه معماری ایرانی به فضای معماری معاصر می‌باشد. درراستای تحلیل سازه‌ای و معاصرسازی در

www.SID.ir

Archive of SID

هندسه‌های معماری ایرانی؛ مردمی (۱۳۹۴)، در مقاله «همسازی سازه و معماری در راستای جانمایی بهینه تکیه‌گاه‌ها به روش الگوریتم ژنتیک (نمونه‌موردی: پوشانه‌های با فرم‌آزاد، طراحی شده براساس هندسه گره ایرانی)»، استفاده از گره ایرانی را در طراحی سازه‌های پوششی و محاسبه پارامترهای کمی در رفتار متناسب با نیروها مطرح می‌سازد. خوری (۲۰۱۷)، در پایانامه با عنوان «ساختارهای پوسته‌ای گره‌ای برگرفته از هندسه اسلامی» فرایند طراحی شامل مطالعه جامع پارامتری بر تأثیر توپولوژی الگو در شکل پوسته ساختاری و عملکرد ساختاری پوسته را مطرح می‌سازد. درراستای پژوهش‌های صورت‌گرفته در سازه‌های نوین نظیر سازه‌های اسپیس‌فریم و فضاکار برپایه گنبد، افرادی نظیر عابدی (۱۹۹۷)، درپایانامه دکتری «ناپایداری‌ها در گنبدها» ماهیت دینامیکی پدیده فروجهش گرهی و انتشار خرابی موضعی را در گنبدهای تک‌لایه مشبک به طریق تجربی و نظری مورد مطالعه قرارداده‌است. مطالعات پارکر (۱۹۸۵)، «آنالیز ساختارهای طاقی» نشان‌دهنده اقتصادی‌ترین نسبت ارتفاع به دهانه، برای چلیک‌های تک‌لایه با نسبت ۰,۱۷ می‌باشد. عابدی و شکسته بند (۱۳۸۸) (۱۳۹۳)، در «تحلیل پایداری سازه‌های فضاکار و مبانی پایداری سازه‌ها» به روش استاتیکی غیرخطی، تحلیل پایداری سازه‌های فضاکار را بررسی کرده و نحوه کشف نقاط دوشاخگی و تعویض مسیر تعادل و تبدیل نقطه دوشاخگی به‌حدی را تبیین و با تشریح انواع مکانیزم‌های خرابی در سازه‌های فضاکار، بر لزوم استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی در حالت مکانیزم خرابی موضعی همراه با فروجهش دینامیکی تاکیدنمودند. مطالعه اثر ناکاملی موجود در اعضا (کوتاه‌تر یا بلندتر بودن طول عضو نسبت به طول ایده‌آل) در سازه فضاکار چلیکی تک‌لایه توسط ال‌شیخ (۲۰۱۳) با اعمال این ناکاملی در نقاط مختلف به اعضای سازه برای تعیین نقاط حساس به ناکاملی در سازه و مطالعه اثر انحنای اولیه اعضا و انحراف آن ها در ظرفیت باربری گنبد تک لایه دیاماتیک (۶ و ۸ قاچ) توسط فنگ فان (۲۰۱۳) با بررسی اثر این ناکاملی ها در کاهش ظرفیت باربری سازه نشان دهنده حساس بودن سازه‌ها به وجود انواع ناکاملی‌ها ازجمله ناکاملی‌های هندسی، ناکاملی‌های مصالح (مانند تش پسماند و ...) یا ترکیبی از این دو هستند. باتوجه به پژوهش های مشابه در زمینه معاصر سازی الگوهای هندسه اسلامی و تحلیل پایداری گنبدها، مقاله حاضر در راستای بیان زبان الگوی الگوریتمیک در طی مراحل چهارده گانه و آنالیز سازه‌ای به صورت سازه فضاکار با الگوهای یزدی‌بندی در آسمانه مرکزی کوشک هشت‌بهشت اصفهان می‌باشد؛ به‌صورتی که محاسبات سازه‌ای اعم از بارگذاری و هندسه در آنالیز این بخش مدنظر نویسندگان قرار می گیرد. در فاز نهایی مقاله جهت تطبیق زبان–الگوی الگوریتمیک با معماری معاصر از هندسه فرم‌آزاد جهت محاسبه ایستایی و پایایی این الگو، استفاده می‌گردد.

۳- الگوی حاکم بر آسمانه‌های کوشک هشت‌بهشت

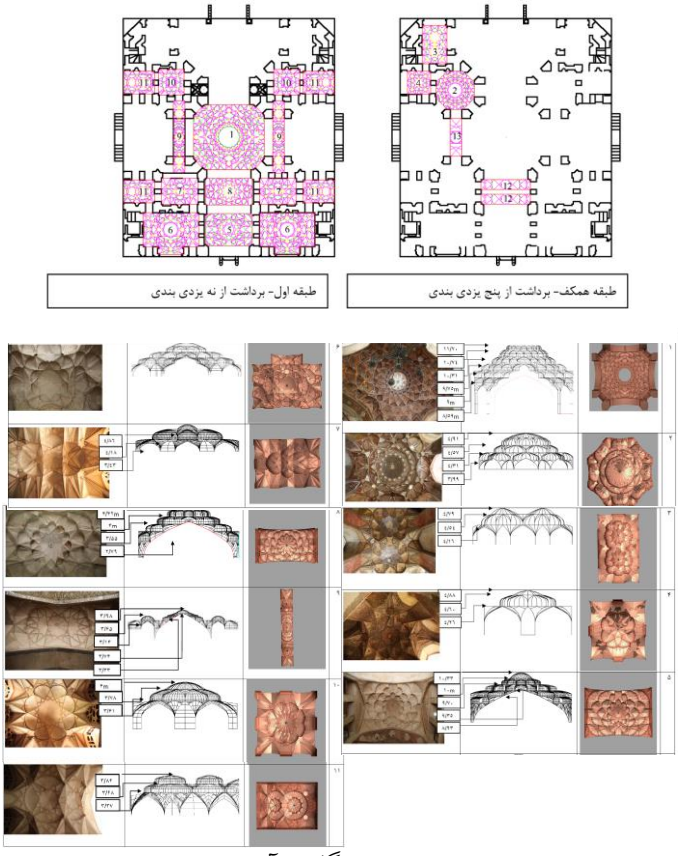
کوشک هشت‌بهشت از کاخ‌های سکونتی بسیار چشمگیر زمان خود و فرح‌انگیزتر از مجلل‌ترین کاخ‌های ممالک اروپایی بوده‌است (شاردن، ۱۳۴۹: ۳۰). بنا شامل چهار ایوان دو طبقه و با کیفیات متفاوت است، که فضای مرکزی را دربرگرفته‌است (تقوایی، ۱۳۸۹). تزئین غالب

www.SID.ir

Archive of SID

فضای مرکز و حجره‌های پیرامونی به‌صورت یزدی‌بندی تخت‌دار با واحدهای نیمه‌معلق و تویزه‌های باربر جهت اسکلت سازه‌ای هست. الگوی آسمانه در کوشک هشت‌بهشت به‌صورت ساختار یزدی‌بندی در فضاهای چهارگوش مرکز و اتاقک‌های پیرامونی است. فرایند ترسیم الگو به صورت ترسیم شکل پایه، ترسیم ستاره‌ها، تکثیر آن‌ها، ردیف‌های ارتباطی ستاره‌ها، ترسیم خطوط رسمی‌بندی و سپس ترسیم شمسه صورت‌می پذیرد (رسولی، ۲۰۱۰). یزدی‌بندی شامل سطوح لایه‌ای که از عناصر ستاره و پاباریک ها منشعب می‌گردد و این سلول‌ها عضوی از طاق اصلی محسوب می‌گردد (نژادابراهیمی و همکاران، ۲۰۱۳)؛ به‌صورتی که استاد لرزاده وسعید فلاح، یزدی‌بندی را به‌صورت ترکیبی از رسمی‌بندی و مقرنس معرفی می‌کنند (رئیس زاده، مفیدی، ۱۹۹۵)؛ از سویی دیگر استاد شعرباف، آن را در گروه کاربندی طبقه‌بندی می‌نماید (شعرباف، ۱۹۹۳). دهخدا در فرهنگ لغت، یزدی‌بندی را به‌عنوان یک عنصر تزئینی در طاق بیان‌می‌کند (دهخدا، ۱۹۹۵)؛ درواقع استفاده محلی از یزدی‌بندی بطورعمده در فضای داخلی گنبدخانه‌ها و ایوان‌های ورودی مورد بحث واقع‌می‌گردد.

جدول ۱- تحلیل ارتفاعی آسمانه های کوشک هشت بهشت طبق شماره بندی در پلان ها، جهت استخراج کد طبقات در جدول ۱- بخش ترسیم الگوریتمیک(مأخذ: نویسندگان)



تصویر۱- پلان بازترسیم مجموعه هشت بهشت و شماره گذاری آسمانه های ترسیم شده با یزدی بندی تخت دار
منبع: نگارندگان

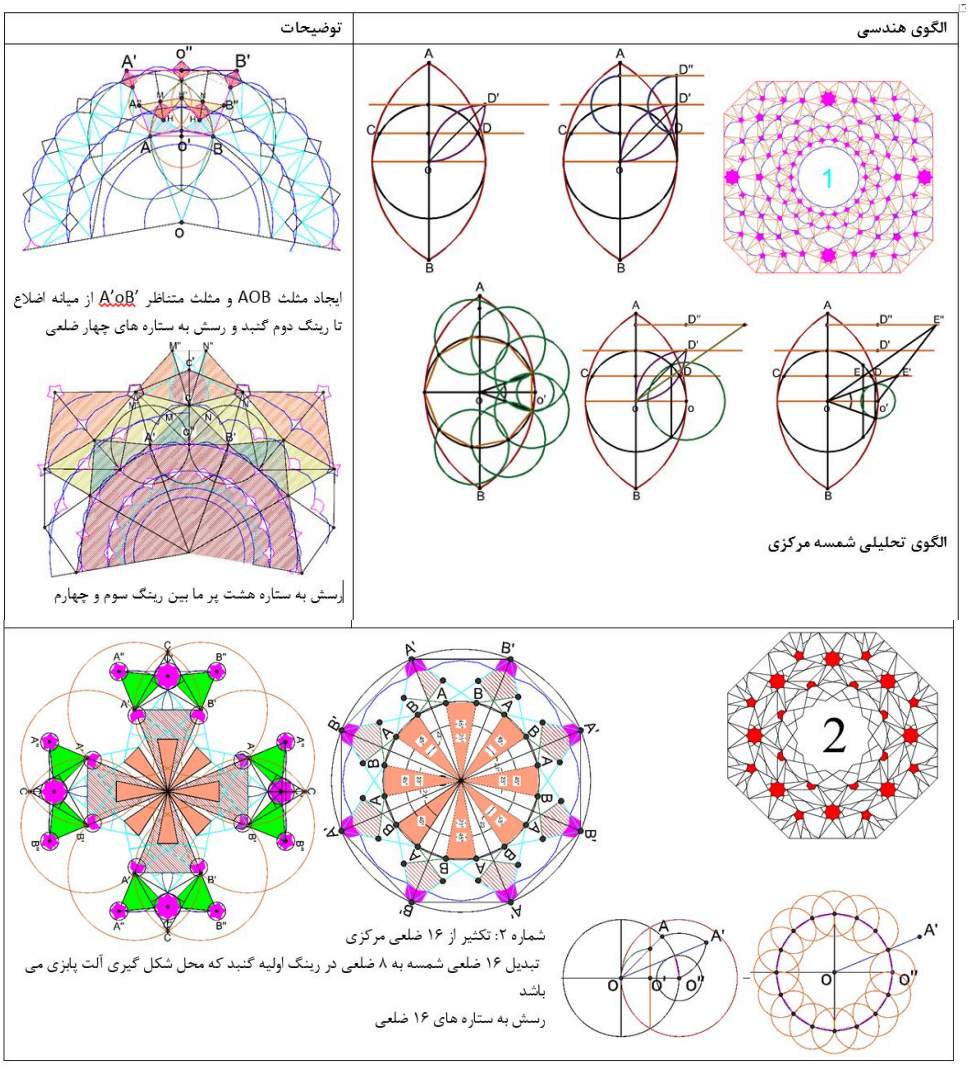
www.SID.ir

Archive of SID

۳-۱- تحلیل هندسی الگوی یزدی‌بندی در آسمانه‌های کوشک هشت‌بهشت

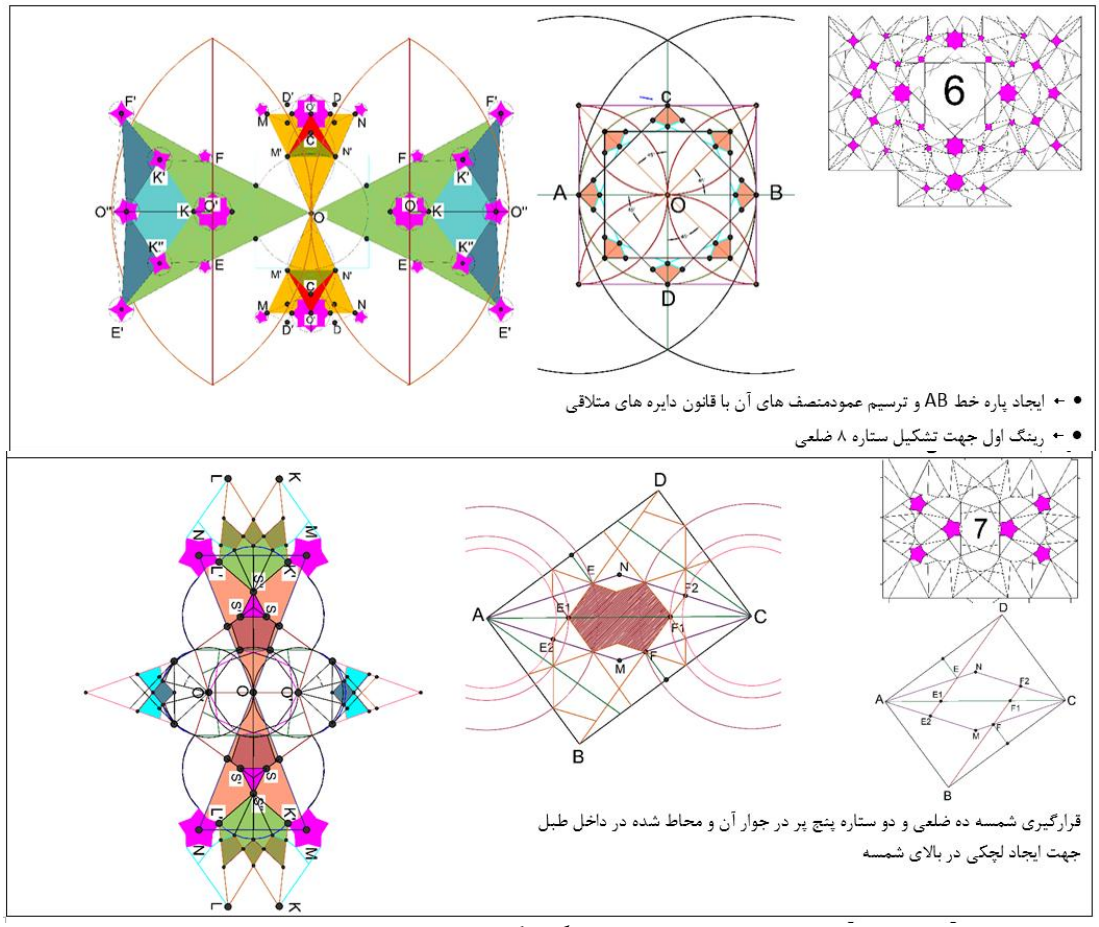
پوشش یزدی‌بندی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عناصر در آسمانه کوشک هشت‌بهشت، با هدف دسته‌بندی، تحلیل هندسی و بررسی سازه‌ای مورد بررسی واقع می‌گردد. دراین راستا ابتدا با کنکاش در هندسه آسمانه‌ها با توجه به روش ترسیم سنتی در ۵ آسمانه با یزدی‌بندی بر پایه رسمی‌بندی و با تعداد ردیف‌های حلقوی بیشتر، از ۱۱ نمونه موجود تحلیل گشته و سپس روش پیشنهادی با نرم افزار راینو و پلاگین گرس‌هاپر به‌عنوان افزونه در این نرم افزار، مورد شبیه‌سازی واقع می‌گردد. روش ترسیم سنتی درراستای ایجاد آلت سینه‌فخری در یزدی‌بندی با ترسیم دوایر و مثلث‌های متناظر متساوی‌الاضلاع جهت شکل‌گیری ردیف‌های یزدی‌بندی در طبقات آسمانه، صورت‌می پذیرد.

جدول- آنالیز هندسی آسمانه های کوشک هشت بهشت با شماره‌بندی پلانی طبق تصویر ۱



www.SID.ir

Archive of SID



منبع: نگارندگان

٤- تحلیل زبان-الگوی الگوریتمیک هندسه آسمانه هشت بهشت

سیستم الگوها، زبانی بوجود می‌آورد و از دیدگاه ریاضی، ساده‌ترین نوع زبان، سیستمی است که حاوی دو مجموعه باشد: الف) مجموعه ای از عناصر و نمادها (الگوها)، ب) مجموعه ای از قواعد برای ترکیب این نمادها (ارتباط میان الگوها). زبان الگو در عمل به دو نیاز کاملاً متفاوت پاسخ می‌گوید:۱. از طرفی راهی برای درک و کنترل یک سیستم پیچیده است.۲. از طرف دیگر ابزار لازم در طراحی است که با کمک آن می‌توان چیزهایی را با عملکرد و ساختاری منسجم ساخت (خاک زند، ۱۳۹۳). زبان الگوریتم، در بحث پارامتریک مقاله حاضر در راستای بازخوانی آثار سنتی معماری ایران و ترجمه به زبان معماری روز می‌باشد تا علاوه‌بر عملکردهای پیشین، قابلیت پذیرش عملکردهای جدیدی در فرم‌های‌آزاد را داراباشد. دو روش متداول جهت ایجاد پترن بر روی سطح گنبدی موجوداست، چندضلعی های همبسته و گسترش شعاعی از مرکز. استفاده از ترسیم شعاعی، عاملی در ایجاد ساختارهای حاکم بر گنبدهای نیمکره ای و جناغی می‌باشند (بونر، ۲۰۱۷: ۵۳۴،۵۴۰). فرایند شعاعی عاملی در ترسیم زبان-الگوی الگوریتمیک در پژوهش حاضر هست. بنابراین زبان الگوی الگوریتمیک با ساده سازی طرح از مرکز به سمت پایه گنبد در طی چهارده مرحله قابلیت بیان پیدا می‌کند.

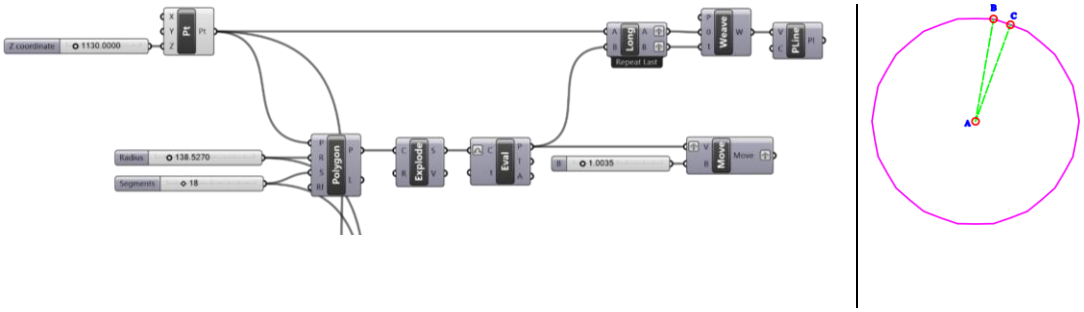
www.SID.ir

Archive of SID

٤-١- کروش پیشنهادی ترسیمی الگوریتمیک یزدی‌بندی

در فرایند بازتعریف هندسه این آرایه، ابتدا بایستی داده های اولیه الگوریتم تولید شود بدین منظور گام اول تعریف الگوواره اصلی با تعیین نقطه مرکزی شمسه و تقسیم اضلاع به هیجده ضلعی اصلی و یافتن میانه اضلاع جهت توسعه بخش‌های بعدی صورت می‌گیرد. به‌صورتیکه گسترش الگوی یزدی‌بندی در آسمانه با یک شبکه شعاعی از مرکز دایره به هشت ضلعی پیرامونی صورت می‌پذیرد.

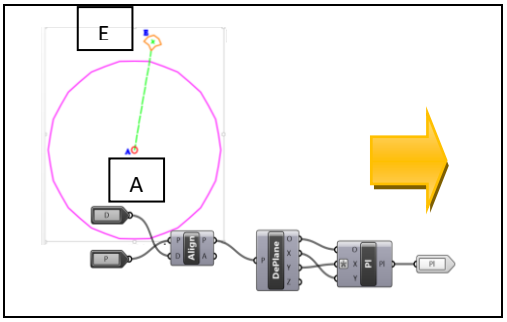
٤-١-١- مرحله اول: ۱۸ ضلعی شمسه مرکز یزدی‌بندی

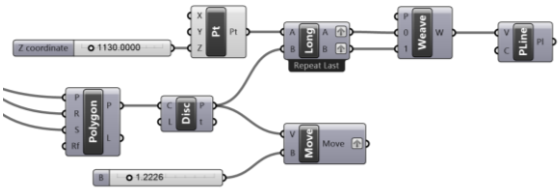


تصویر۲- سمت راست: یک ۱۸ ضلعی منتظم توسط هر ضلع C کمی برجسته شده، تصویر۳- سمت چپ: الگوریتم ایجاد شمسه هیجدپر

٤-١-٢- مرحله دوم، سوم: الگوریتم ترسیم خطوط شعاعی و شروع طبقات یزدی‌بندی

به تعدادی خطوط شعاعی نیاز داریم که از مرکز A خارج شده و از دو سر پره های شمسه عبور می‌کنند.





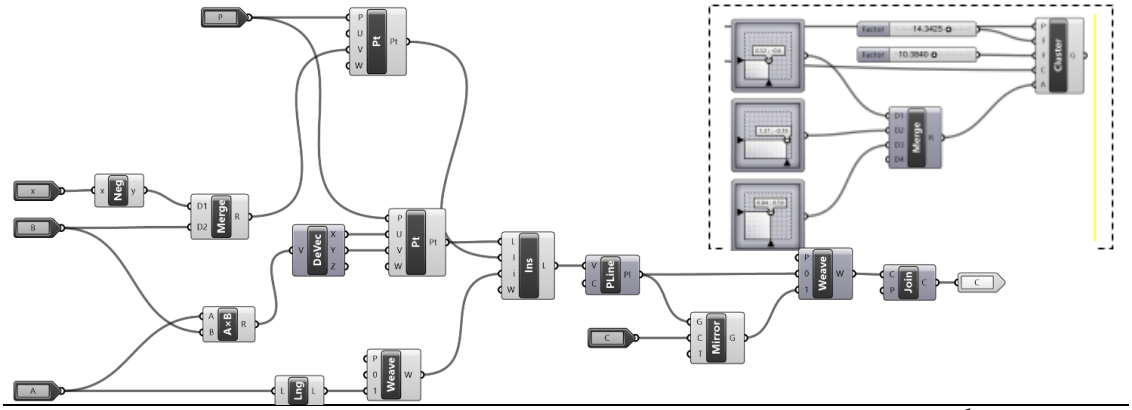
تصویر ۴- سمت راست: شمسه A را یک‌بار با نقاط وسط اضلاع ۱۸ ضلعی به Longest list می‌دهیم تا آن‌ها را بر اساس تعداد لیست جدا کند. بدین ترتیب نقطه A در یک لیست تکی جداگانه و نقاط مرکز اضلاع ۱۸ ضلعی در یک لیست ۱۸ تایی جداگانه دسته بندی می‌شوند.
تصویر ۵- سمت چپ: برای این کار به امتداد شعاع به‌عنوان بردار جهت و یک نقطه به عنوان مرکز ستاره E نیاز داریم. یک صفحه مختصات محلی متصل به مرکز ستاره E و در امتداد خط شعاع قرار می‌دهیم.

٤-١-٣- مرحله چهارم: ترسیم ستاره

دو نقطه از ستاره که روی محور قرار گرفته‌اند از جابه‌جایی مرکز ستاره در امتداد خط شعاع بدست می‌آیند و سه نقطه دیگر با کامپوننت MD Slider که همزمان نقطه را در دو جهت روی صفحه جابه‌جا می‌کند.

www.SID.ir

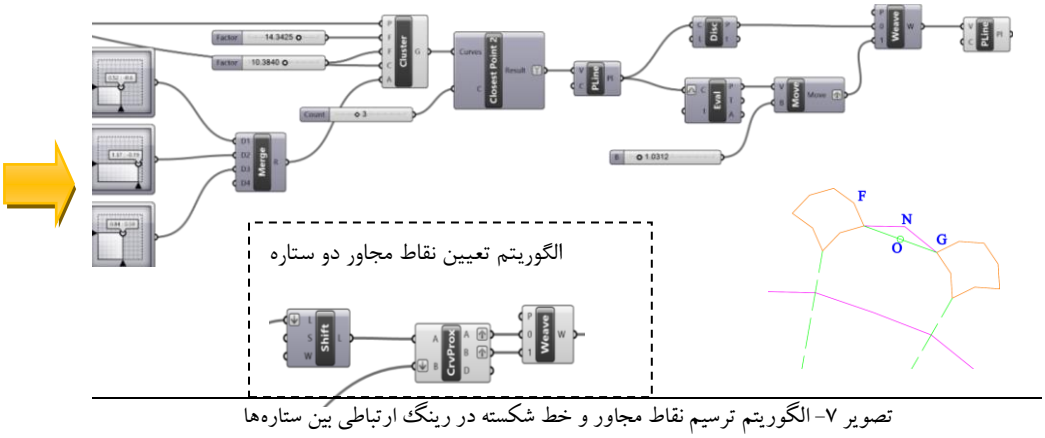
Archive of SID



تصویر۶- الگوریتم ترسیم ستاره در کلاستر فوق، از ورودی P صفحه مختصات محلی و از ورودی C خط شعاع را وارد می‌کنیم

٤-١-٤- مرحله پنجم: ترسیم خط شکسته بین دو ستاره

برای این‌کار به دو نقطه F و G از دو ستاره مجاور نیاز داریم. ویژگی این دو نقطه بین بقیه نقاط ستاره‌ها این است که از بقیه به هم نزدیک‌تر هستند. از همین ویژگی برای تعیین، دسترسی و معرفی آنها استفاده می‌کنیم.



تصویر ۷- الگوریتم ترسیم نقاط مجاور و خط شکسته در رینگ ارتباطی بین ستاره‌ها

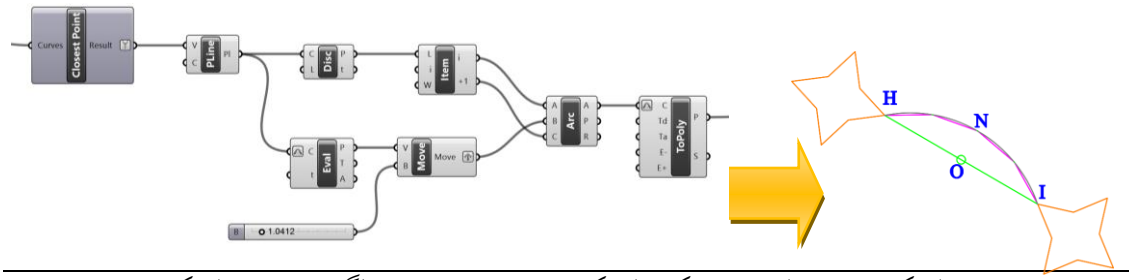
٤-١-٥- مرحله ششم: ترسیم ستاره‌های پای‌پنجم و خط واصل آن‌ها

این تراز به صورت نسبتی از شمسه مرکزی با توجه به داده‌های عددی حاصل از متر لیزری با قابلیت جابه‌جایی، مکانیابی می‌گردد. در این جا روش متفاوتی برای ترسیم خط شکسته بین دو ستاره ارائه می‌شود. برای ترسیم این خط پس از پیداکردن نقاط مقابل هم H و I ابتدا بین این دو نقطه یک کمان ترسیم می‌کنیم و سپس این کمان را به خطوط شکسته تبدیل می‌کنیم. در الگوریتم قبلی نقاط مجاور دو ستاره را بدست‌آوردیم. آنرا در یک کلاستر خلاصه می‌کنیم. در الگوریتم ذیل، خروجی آنرا به کامپوننت PLine می‌دهیم تا بین هر دو نقطه خطی ترسیم کند. با کامپوننت Evaluate وسط آن، O را می‌گیریم و کمی جابه‌جا می‌کنیم تا نقطه N بدست‌آید و سپس با کامپوننت Discontinuity دو سر هر پاره خط H و I را گرفته و سپس با کامپوننت Arc از سه نقطه H

www.SID.ir

Archive of SID

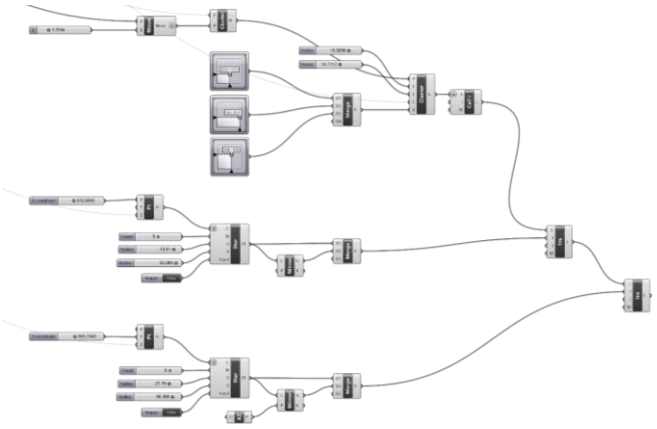
و I و N یک کمان عبور می‌دهیم. با کامپونت Curve to Polygon این کمان را به یک خط شکسته تبدیل می‌کنیم. با کامپونت Weave خط‌های شکسته را با ستاره‌ها یکی می‌کنیم تا تراز چهارم کامل شود. این فرایند در همه طبقات تکرار می‌شود. بدین‌ترتیب که ابتدا ستاره را ترسیم کرده بین آنها خط شکسته ترسیم می‌کنیم.

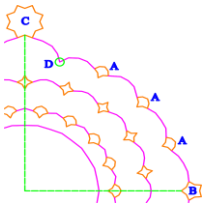


تصویر ۸- ترسیم خط شکسته بین دو نقطه با بیش از یک نقطه شکست. تصویر ۹- سمت چپ: الگوریتم ترسیم خط شکسته بین دو ستاره با بیش از یک نقطه شکست

٤-١-٦- مرحله هفتم: ترسیم ستاره های پای چهارم

کلیه مراحل این قسمت مثل قسمت قبلی است با این تفاوت که ستاره هایی که در امتداد محورها هستند، B و C باید حذف شوند و بجای C ستاره هشت پر و در محور دیگر بجای B ستاره پنج پر قرار گیرد.





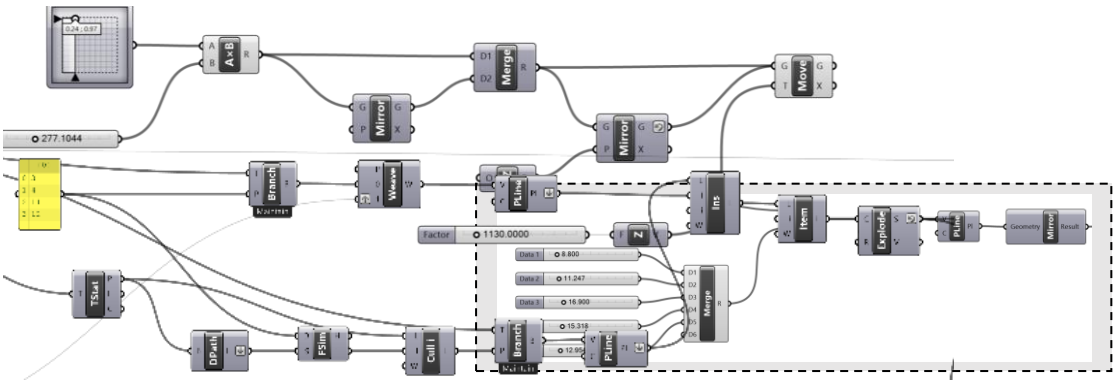
تصویر ۱۰- الگوریتم ترکیب ستاره های پای چهارم

٤-١-٧- مرحله هشتم: ترسیم نقطه شکست تراز چهارم

برای ترسیم نقطه D ابتدا نقطه ای را روی صفحه مختصات مشخص می‌کنیم و موقعیت آن‌را در دو جهت مختصات کم و زیاد می‌کنیم و قرینه آنرا نیز بدست‌آورده و دوباره قرینه می‌کنیم و ۴ نقطه بدست آمده را در محور Z جابجا می‌کنیم تا با بقیه پلان در یک تراز قرارگیرد. این مراحل را در یک کلاستر خلاصه می‌کنیم.

www.SID.ir

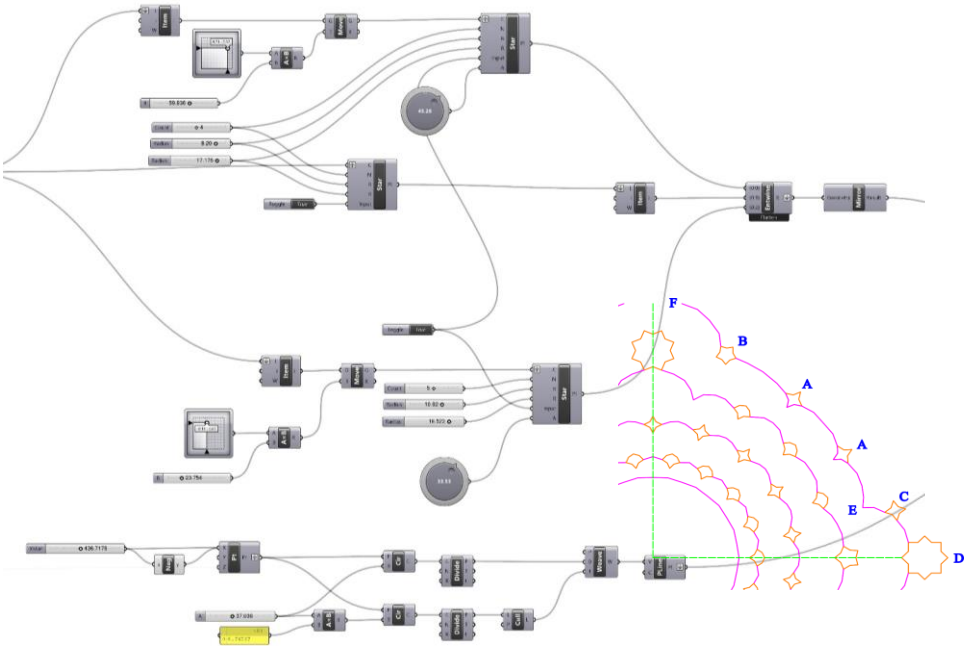
Archive of SID



تصویر ۱۱- بالا: الگوریتم ترسیم نقطه شکست، تصویر ۱۲- وسط: الگوریتم ترسیم خط مستقیم بین نقاط مجاور ستاره ها در تراز چهارم تصویر ۱۳- پایین: ترسیم خطوط شکسته بین نقاط مجاور و قرینه کردن آنها

٤-۱-۸- مرحله نهم: ترسیم تراز سوم

در این تراز ترتیب ستاره ها نسبتا از وضعیت شعاعی خارج شده و کمی به گوشه های کار نزدیک می‌شوند. چهار نوع ستاره در این تراز قرار دارند. ستاره A چهارپر است و روی دایره قرار دارد. ستاره B پنج پر است و با کمی جابجایی از دایره خارج شده. ستاره C چهارپر است و باز هم کمی از دایره خارج شده. و ستاره D تک است و در محور افقی قرار گرفته. در محور عمودی هم ستاره ای نداریم. بدین ترتیب نوع اول بسادگی روی تقسیمات شعاع ترسیم میشود، نوع دوم و سوم را ابتدا روی شعاع ترسیم میکنیم و سپس کمی بصورت نسبی و با توجه به برداشت های حاصل از مترلیزری، جابجا می کنیم تا در موقعیت مطلوب قرار بگیرد. ستاره هشت پر محور افقی را هم روی همان محور ترسیم می کنیم.



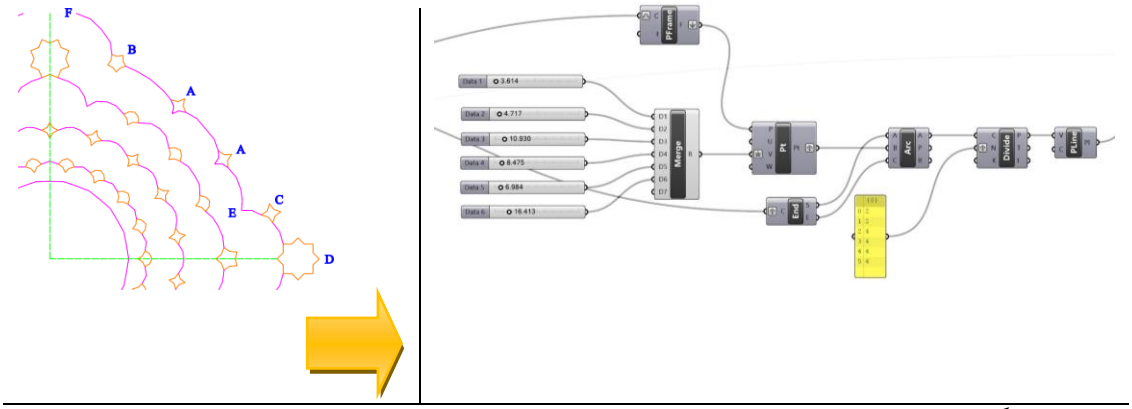
تصویر ۱۴– الگوریتم ترسیم ستاره های تراز سوم

www.SID.ir

Archive of SID

٤-۱-۹- مرحله دهم: ترسیم خط شکسته تراز سوم

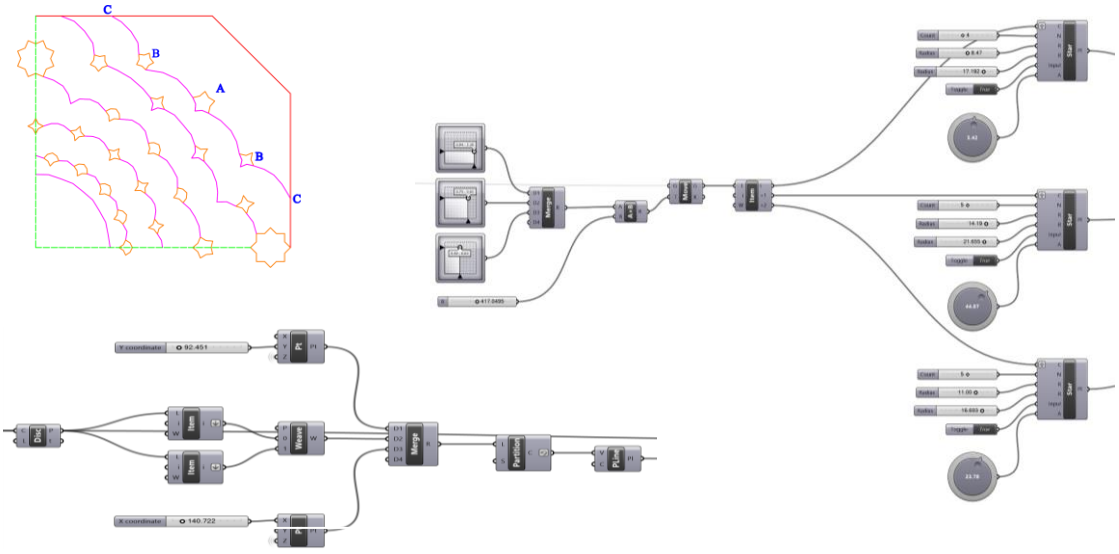
در الگوریتم فوق نقاط مجاور ستاره‌ها را با کلاستر Closest Point مشخص کرده با کامپوننت Branch به دو شاخه تقسیم می‌کنیم. یک شاخه شامل خطوط بدون شکست مضاعف (نقطه E) است و شاخه دیگر با شکست مضاعف E است.



تصویر ۱۵- الگوریتم ترسیم خط شکسته بین نقاط مجاور تراز سوم؛ اعداد وارد شده به کامپونت Merge (تعیین‌کننده انحنای قوس لبه تراز) در نتیجه برداشت‌های محلی با متر لیزری حاصل‌شده و بصورت نسبی قابلیت جابه‌جایی نسبت به یکدیگر را دارا می‌باشند. بدین ترتیب از دو نظر می‌توان به ترکیب‌های متنوعی رسید.۱ .انحنای کمان ۲ .تعداد نقاط شکست می‌توان پارامترهای فوق را برای کمان‌های متعدد از یک کامپونت واحد وارد کرد ابزار Entwine این داده‌ها را یکجا جمع میکند و پس اعمال تغییرات با ابزار Explode Tree یا Bang می‌توان همه محصول‌ها را دوباره تفکیک کرد.

٤-۱-۱۰- مرحله یازدهم: ترسیم تراز دوم

این تراز تفاوت چندانی با ترازهای قبلی ندارد و روش ترسیم آن عبارتست از ترسیم ستاره‌ها و ترسیم خط مستقیم بین نقاط مجاور دو ستاره و تبدیل آن به خط شکسته است.



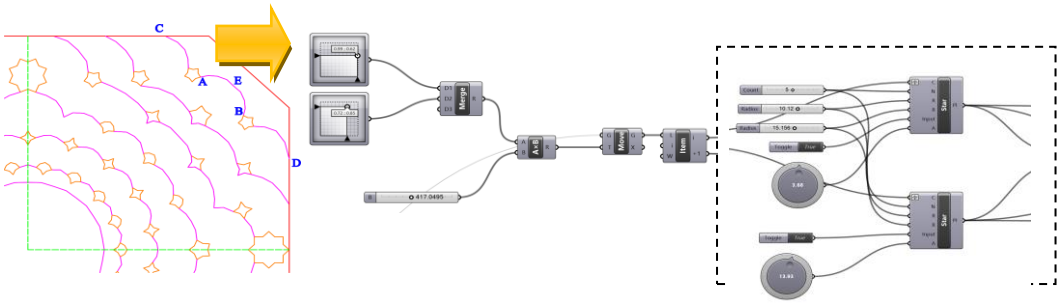
تصویر ۱۶- سمت راست: الگوریتم ترسیم ستاره های تراز دوم -تصویر ۱۷- سمت چپ: ترسیم خط مستقیم بین دو نقطه مجاور از دو ستاره

www.SID.ir

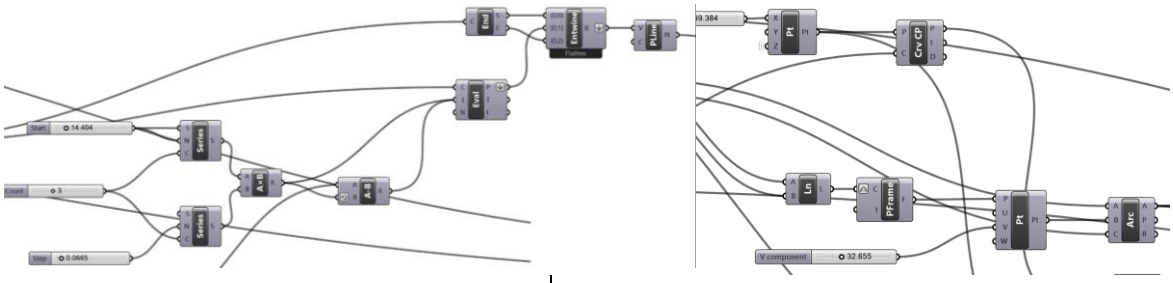
Archive of SID

٤-۱-۱۱- مرحله دوازدهم: ترسیم تراز اول

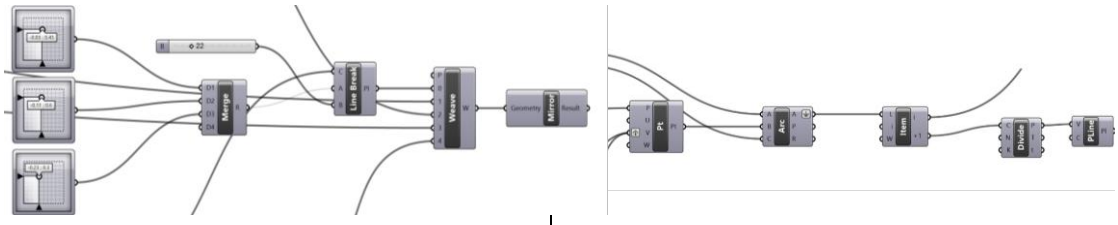
نقطه مرکز یزدی‌بندی را به اندازه شعاع گنبد، جابجا می‌کنیم تا مرکز دو ستاره پنج پر بدست‌آید. از سه نقطه A و B و E یک کمان عبور می‌دهیم. در بخش بالای الگوریتم فوق ابتدا نقطه C را ترسیم می‌کنیم و سپس نزدیک‌ترین نقطه ستاره A به این نقطه را پیداکرده و بین آنها یک خط ترسیم می‌کنیم.



تصویر ۱۸: سمت چپ: ترسیم دو نقطه مرکز ستاره‌های پنج‌پر .تصویر۱۹: سمت راست: ترسیم ستاره‌های پنج‌پر



تصویر ۲۰- سمت راست: ترسیم کمان بین نقاط A و B تصویر ۲۱- سمت چپ: ترسیم خط شکسته بین دو نقطه A و B



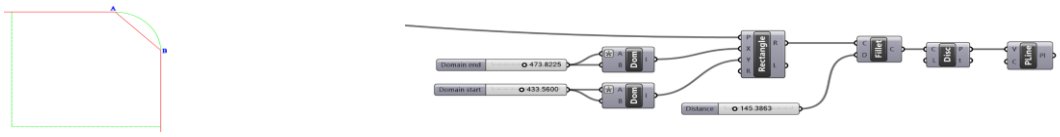
تصویر ۲۲- راست: ترسیم خط شکسته بین نقطه ستاره A و نقطه C تصویر ۲۳- سمت چپ: ترسیم خط شکسته بین ستاره B و نقطه D -برای این کار از کلاستر Line Break استفاده می‌کنیم. در پایان ستاره‌های پنج‌پر و همچنین خطوط شکسته را با کامپوننت Weave یکی می‌کنیم. ویژگی طراحی پارامتریک در این است که عملگرهای متعدد با یک دستور کنترل می‌شوند مثلا برای ترسیم خط شکسته بین جفت-نقاط به دستگاه‌های مختصات محلی Local نیاز داریم. هر دستگاه محلی نسبت به دستگاه مختصات مبدأ Global میزان چرخش متفاوتی دارد اما در گرسهاپر نیازی نیست میزان چرخش هریک را جداگانه تعریف کنیم کافیست تعداد نامحدودی پاره‌خط (بین جفت-نقاط) را به کامپوننت Perpendicular Frameبدهیم تا بر روی هرکدام دستگاه مختصات محلی مختص آن خط را بسازد.

www.SID.ir

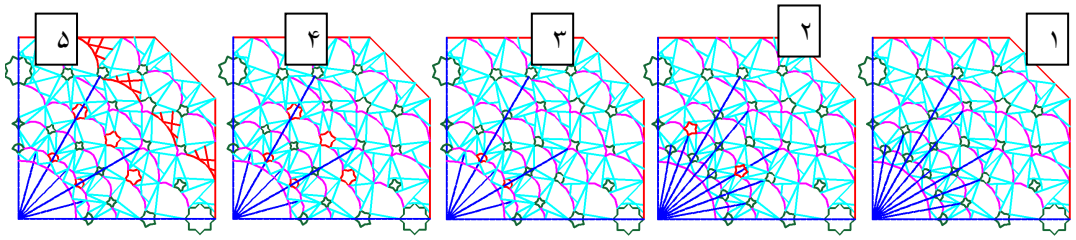
Archive of SID

٤-۱-۱۲- مرحله سیزدهم: گوشه‌های زمینه

با توجه به اینکه زمینه یزدی‌بندی یک مستطیل پخ خورده‌است و میزان پخ آن اختیاری است، ابتدا مستطیل را ترسیم می‌کنیم و گوشه آنرا Fillet می‌کنیم و از دو نقطه ابتدا و انتهای کمان بدست‌آمده یک خط ترسیم می‌کنیم.



تصویر۲۴- ترسیم کمان بین دو نقطه، جهت رسش به حاشیه گنبد



تصویر ۲۵- تصاویر حاصل از تغییرات در عناصر یزدی‌بندی قبل از ارتفاع دهی به طبقات، شماره یک وضع موجود هشت بهشت هشت، در شماره دو ستاره‌های تراز پنجم از ۴پر به ۵ پر تغییر کرده‌اند در شماره ۳ تعداد تقسیمات دایره مرکزی از ۳۶ به ۲۴ تغییر کرده در شماره ۴ علاوه بر تغییر تقسیمات مرکزی، ستاره‌های تراز چهارم نیز تغییر کرده‌اند در شماره پنج علاوه بر تغییر تعداد تقسیمات مرکزی و ستاره‌های تراز چهارم، تعداد نقاط شکست در خط لبه تخته افقی تراز دوم از ۴ به ۶ تغییر کرده همه این تغییرات با رنگ قرمز مشخص شده‌اند. برای حالت دوم و چهارم: برای تغییر تعداد پرهای ستاره در تصویر ۱۹ سمت راست کافی است در ورودی N از کلاستر ستاره عدد ورودی را از ۴ به ۵ تغییر بدهیم. برای حالت سوم: در تصویر ۲ اگر عدد ۱۸ را به ۱۲ تبدیل کنیم تعداد تقسیمات مرکزی تغییر می‌کند. برای حالت پنجم و افزایش تعداد نقاط شکست از ۴ به ۶: در تصویر۹ از کامپونت Curve to Polyline استفاده‌شده، ورودی دوم این کامپونت Td یا Tolerance (Distance) فاصله نقاط شکست را تعیین می‌کند. حالت پیش فرض آن ۱ است که برای حالت اولیه مناسب بود می‌توان با یک اسلایدر این مقدار را کم کرد (کمتر از۱) تا به تعداد تقسیمات مورد نیاز (در این حالت ۶ تقسیم) دست‌یافت.

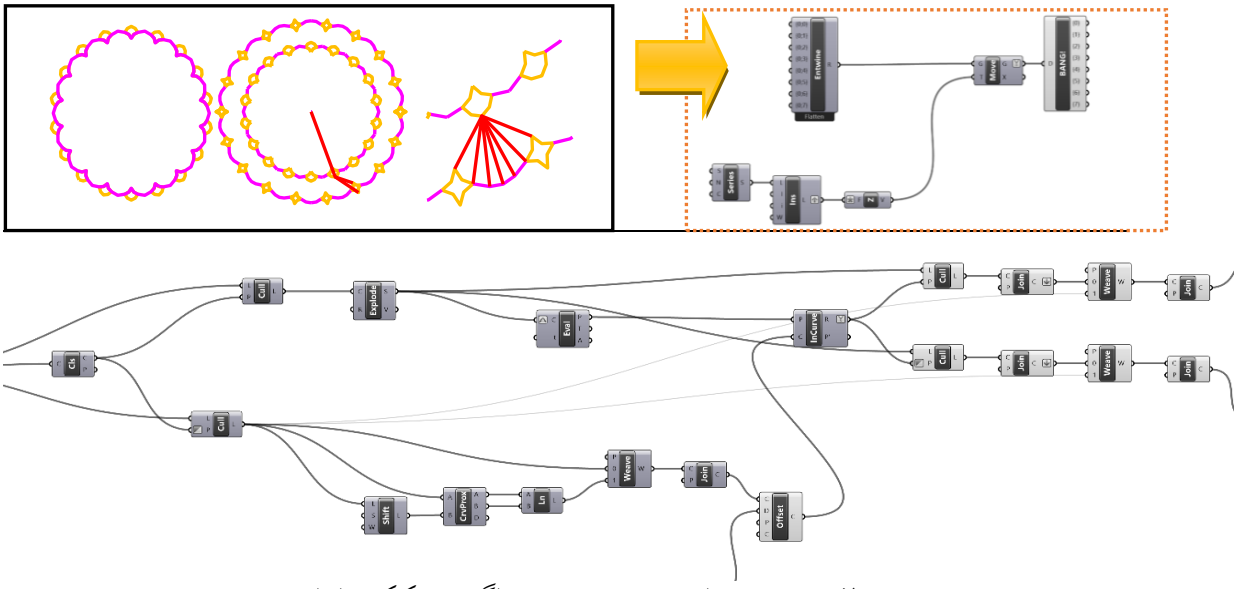
٤-۱-۱۳- مرحله چهاردهم: ارتفاع‌دهی به طبقات یزدی‌بندی با رسم کمان بین طبقات

ارتفاع طبقات یکسان هستند؛ اندازه آن برابر است با ارتفاع وضع موجود تقسیم بر تعداد طبقات ابتدا مکان شمسه در بالاترین نقطه ممکن و همچنین پای اولین تراز در پایین‌ترین نقطه مشخص می‌شود. اگر اختلاف ارتفاع این دو نقطه H و تعداد طبقات n باشد ارتفاع هر طبقه برابر است با H/n اگر ارتفاع کل‌کار H یا تعداد طبقات n تغییرکنند به‌تبع آنها فاصله طبقات متوالی هم تغییر خواهندکرد. پس از تکمیل پلان برای ترسیم کمان بین طبقات یزدی‌بندی بطورکلی باید نقاط خاصی از هر تراز را جداکرده و با ترتیب مشخصی بین آن‌ها کمان رسم کنیم. با توجه به ترتیب قرارگیری ستاره‌ها و شکست‌های خطوط بین ستاره‌ها از هر تراز به تراز دیگر نحوه پیداکردن و مرتبط کردن نقاط، متغیر خواهدبود و به روش‌های متنوعی باید انجام شوند. برای ارتفاع دادن به طبقات ابتدا همه خطوط بدست‌آمده از طبقات مختلف را با کامپونت Entwine یکی می‌کنیم و سپس با کامپونت Series جابه‌جایی همه آن‌ها را به‌صورت پارامتریک، یک‌جا وارد می‌کنیم و نهایتاً برای جداکردن، آن‌ها را با کامپونت Explode Tree یا

www.SID.ir

Archive of SID

Bang از یکدیگر جدا می‌کنیم. در پلان یزدی‌بندی هر طبقه از سمت داخل به طبقه بالا و سمت خارج به طبقه پایین متصل می‌شود، لذا باید داخل و خارج هر طبقه را از هم تفکیک کنیم. با توجه به اینکه ستاره‌ها خطوط بسته هستند آن‌ها را با کامپونت Cull Pattern و Closed تفکیک می‌کنیم که بررسی‌می‌کند که آیا خط بسته است یا نه.



تصویر ۲۶- بالا: ارتفاع دادن به طبقات- تصویر ۲۷- پایین: الگوریتم تفکیک خطوط داخلی و خارجی

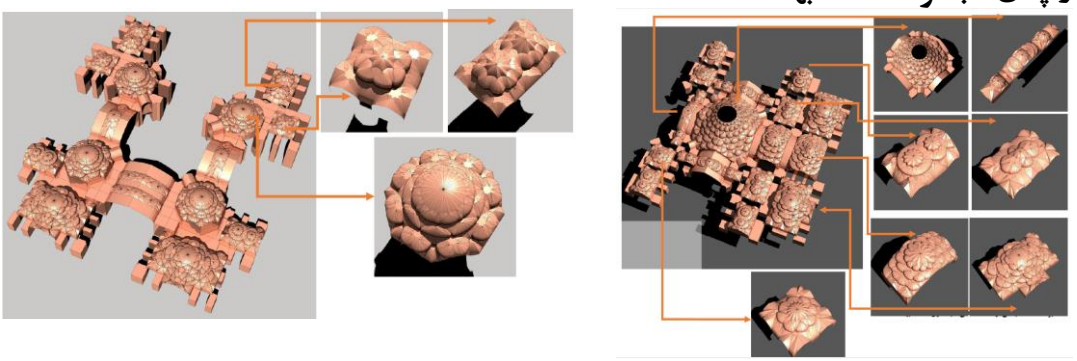
روش دیگر تفکیک با فاصله از مرکز یا فاصله از نقطه بیرونی طبقه بالایی است. فواصل نقاط را با کامپونت Distance بدست‌می‌آوریم و سپس با کامپونت Equality آن‌ها را با نقطه موردنظر مقایسه کرده و سپس با کامپونت Cull Index از هم تفکیک می‌کنیم. برای ترسیم قوس‌ها از یک طبقه به طبقه دیگر به نقاط ابتدا و انتها نیاز داریم. با توجه به اینکه این خطوط از چند نقطه به یک نقطه وصل می‌شوند برای تفکیک این نقاط از یکدیگر می‌توانیم از این ویژگی استفاده‌کنیم. برای این‌کار ابتدا با کامپونت Discontinuity نقاط را بدست‌آورده و سپس به صورت لیست‌های جداگانه به کامپونت Longest List می‌دهیم تا براساس تعدا نقاط (یک به چند) تفکیک کند. به این ترتیب که نقاط هر طبقه را با شماره مشخص می‌کنیم و سپس بین شماره‌های نظیر در پلان را به کلاستر ترسیم قوس بین طبقات می‌دهیم. روش دیگر استفاده از Stack Data و List Item است به‌صورتی‌که هندسه واحدهای لوزی‌شکل در این‌گونه، برگرفته از قسمتی از قوس‌های متقاطع و شمسه یک رسمی کامل است.

تصویر۲۸- سمت راست: الگوریتم دورترین نقطه- تصویر ۲۹- سمت چپ: الگوریتم تفکیک نقاط با شماره آن ها

www.SID.ir

Archive of SID

٤-١-١٤- جانمایی ١٤ یزدی‌بندی در فضاهای آسمانه مرکز و غرفه‌های پیرامونی در پلان مجموعه هشت‌بهشت



تصویر۳۰- سمت راست: شماره‌های ۲-۳-۴ برداشت شده از طبقه همکف کوشک هشت‌بهشت تصویر ۳۱- سمت چپ: برداشت از آسمانه‌های طبقه بالا

۵- مشبک سازی هندسه یزدی‌بندی گنبد مرکزی هشت بهشت در راستای تحلیل سازه ای

پژوهش حاضر قصد دارد هندسه گنبدی بنای هشت‌بهشت اصفهان را در قالب یک سازه مدرن تعریف‌کند .برای این کار نیاز است تا مدل های تطابقی معماری به‌دست‌آمده، از نظر سازه‌ای محک زده‌شوند تا پایایی و ایستایی آن تائیدشده تا نیازهای معماری امروزی ذکرشده را برآورده‌کند. گنبد مشبک، یک سیستم سازه فضاکار متشکل از یک یا چندلایه (از اجزا) است که در تمامی جهات به فرم قوسی درآمده‌است. برخی از گنبدها دارای رویه‌ای ظاهری هستند که بخشی از یک سطح منفرد و واحد همانند کره را تشکیل می‌دهند و برخی دیگر متشکل از مجموعه‌ای از سطوح گنبدی شکل متفاوت می‌باشند.(عابدی، شکسته‌بند، ۱۳۸۸). گنبد مورد بررسی در این پژوهش، گنبد یزدی‌بندی هشت‌بهشت است. از مزایای سازه‌های فضاکار می‌توان به موارد مختلفی به شرح ذیل اشاره نمود: جنبه‌ی معماری و زیباشناسی، هزینه‌بر بودن با وجود داشتن معماری زیبا، جنبه‌ی سازه‌ای (طول‌های متفاوت اعضا)، ارتفاع زیاد نسبت به اکثر گنبدها. ساخت گنبدهای فضاکار تک لایه با صدها عضو و اتصال با دقت کامل و بدون ناکاملی تقریبا غیرممکن است. مطالعات گذشته نشان می‌دهد که این سازه‌ها به وجود انواع ناکاملی‌ها ازجمله ناکاملی‌های هندسی، ناکاملی‌های مصالح (مانند تش پسماند و ...) یا ترکیبی از این دو حساس هستند. ۱. ناکاملی در سازه‌ها بر دو نوع است: ناکاملی هندسی[1]: که شامل مواردی نظیر، انحناء اولیه‌ی اعضاء سازه‌ای؛ انحراف گره‌های سازه‌ای از هندسه‌ی ایده‌آل ۲. ناکاملی های مکانیکی [2]که شامل مواردی نظیر، تنش پسماند؛ خروج از مرکزیت بار؛ عدم انطباق (ناکاملی در طول اعضا) [3]می‌باشند (عابدی،شکسته‌بند،۱۳۹۳). در این پژوهش ناکاملی موردبررسی در اعضای سازه‌ای یزدی‌بندی، انحناء اولیه اعضای سازه‌ای گرفته‌شده‌است و میزان آن ۰/۰۰۵ گرفته شده است که به عنوان ضریبی از مواداول می‌باشد. پدیده‌های ناپایداری در سازه‌های فضاکار را می‌توان در سه رده‌ی اصلی طبقه‌بندی نمود: فروجهش گرهی،

www.SID.ir

Archive of SID

کمانش عضوی و خرابی پیشرونده. روش پژوهش حاضر عملا به‌صورت عددی بوده و در حالت کلی مراحل انجام پژوهش سازه‌ای به ۴ قسمت به شرح ذیل تقسیم می‌شود: مرحله تاشه‌پردازی و ایجاد مدل و هندسه سازه – طراحی سازه و استخراج ابعاد اعضای سازه- انجام تحلیل های غیرخطی استاتیکی -استخراج رفتار سازه و بحث صورت‌می‌پذیرد.

۵-۱- مدل‌سازی عناصرمحدود در اعضای سازه‌ای یزدی‌بندی

برای انجام تحلیل‌های پایداری با استفاده از روش عناصرمحدود انجام تحلیل‌های غیرخطی هندسی و مکانیکی ضروری‌است. برای انجام این کار از نرم افزار المان‌محدود ABAQUS CAE 6.14.2 استفاده‌شده‌است. سازه‌ها با توجه به غیرخطی‌های موجود در آن‌ها، دارای رفتار غیرخطی سخت‌شونده و غیرخطی نرم‌شونده هستند. در سازه‌های تک‌لایه با زاویه کوچک بین اعضای‌سازه، کوتاه‌شدگی محوری به طور قابل ملاحظه ای بزرگ می‌باشد و بر اثر این کوتاه شدگی‌ها تغییرات مهمی در هندسه اولیه رخ می‌دهد. نکته مهم دیگر آن است که در حین پدیده فروجهش گرهی، هندسه اولیه سازه طوری تغییر می‌کند که بعضی از اعضای سازه وارد ناحیه پلاستیک می‌شوند. بنابراین برای تحلیل واقعی یک سازه چلیکی تک‌لایه، هردو حالت غیرخطی هندسی و غیرخطی مصالح بایستی لحاظ گردند. جهت دنبال نمودن مسیرهای تعادل و گذر از نقطه بحرانی به محدوده پس‌بحرانی از روش طول_کمان [۴] استفاده‌شده‌است. در این مطالعه پایداری سازه فضاکار یزدبندی هشت‌بهشت تک‌لایه با انجام تحلیل‌های استاتیکی خرابی با استفاده از روش‌های عناصر محدود، با درنظرگیری ناکاملی هندسی اولیه، با توزیع متوازن برف در همه گره‌ها و نامتوازن برف در چندین گره طبق آیین‌نامه بارگذاری برای نسبت طول به عرض یکسان در پلان (مربعی) و نسبت طول به عرض متفاوت (مستطیلی) و برای چهار نسبت ارتفاع به دهانه متفاوت برای هر مدل مورد بررسی قرارگرفته‌است.

۵-۲- مودهای کمانشی سازه یزدی‌بندی کوشک هشت‌بهشت

مودهای کمانشی بیانگر گرایش سازه به تغییرمکان یا مودنمو، تغییرمکان سازه در نقاط بحرانی می‌باشد. از طریق تحلیل مودهای کمانشی، نقاط ضعف سازه‌ها مشخص می‌شود و مودهای خرابی ممکن به دقت تعیین می‌گردند. مودهای کمانشی متناظر با اولین نقطه بحرانی، پایین ترین مود کمانشی نامیده می‌شود. انرژی پتانسیل در هنگام تغییرمکان در امتداد پایین‌ترین مود کمانشی، دارای حداقل مقدار بوده و سازه‌های واقعی تحت فرایند بارگذاری تمایل به تغییرمکان در این جهت دارند. برای تعیین دقیق رابطه بار و تغییرمکان، ادامه تحلیل در مرحله پس کمانشی، یعنی تحلیل پاسخ کامل بار-تغییرمکان، ضروری است (چن، شن، ۱۹۹۳:۲۷۱-۲۷۸).

۵-۳- مشخصات سازه‌های یزدی‌بندی کوشک هشت‌بهشت

در پژوهش حاضر مدل‌های مختلفی تحلیل گردیده‌اند که از نظر ابعاد و بارگذاری متفاوت می‌باشند. بارگذاری مورد استفاده برای طراحی این مدل‌ها شامل بار ۵۰ کیلوگرم برای هر مترمربع، بار برف متوازن ۱۵۰ کیلوگرم برای هر مترمربع، بار

www.SID.ir

Archive of SID

نامتوازن برف طبق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران، بار حرارتی تحت تغییرات دمایی ± 25 درجه سلسیوس و همچنین بار قائم زلزله می‌باشد. برای مصالح از فولاد ST52 با تنش تسلیم $F_y = 52 \times 10^6\ kg/m^2$ و مدول الاستیسیته $E = 2.1 \times 10^{10}\ kg/m^2$ و با سطح مقطع tube به صورت چهار مقطع مختلف برای هر گنبد استفاده‌شده‌است. در پایان مرحله طراحی باتوجه به نزدیک بودن مقاطع به هم از لحاظ ابعادی، برای تمامی گنبدها از مقاطع یکسان برای تحلیل و مقایسه بهتر نتایج استفاده‌شده‌است. برای پژوهش حاضر از چهارگنبد مربعی به دهانه ۳۰ متر و نسبت‌های ارتفاع به دهانه صفر، ۰/۲۳، ۰/۴۶ و ۰/۹۲ و چهار گنبد مستطیلی به دهانه بزرگ ۴۵ متر و نسبت های ارتفاع به دهانه صفر، ۰/۲۳، ۰/۴۶ و ۰/۹۲ تحت دو نوع بارگذاری متوازن و نامتوازن برف استفاده‌شده‌است که جمعا ۱۶ مدل می‌شود.

جدول ۳- مدل‌های موردی استفاده‌شده در این پژوهش

گنبد تک‌لایه فضاکار یزدی‌بندی هشت‌بهشت (SLY8)				
ردیف	نوع پلان	دهانه (متر)	ارتفاع/دهانه	نام اختصاری
۱	مربعی	۳۰	۰	SLY8-S-30-0
۲	مربعی	۳۰	۰,۲۳	SLY8-S-30-23
۳	مربعی	۳۰	۰,۴۶	SLY8-S-30-46
۴	مربعی	۳۰	۰,۹۲	SLY8-S-30-92
۵	مستطیلی	۴۵	۰	SLY8-R-45-0
۶	مستطیلی	۴۵	۰,۲۳	SLY8-R-45-23
۷	مستطیلی	۴۵	۰,۴۶	SLY8-R-45-46
۸	مستطیلی	۴۵	۰,۹۲	SLY8-R-45-92

منبع: نگارندگان

باتوجه به این که در تحقیق حاضر اثر شرایط تکیه‌گاهی مورد بررسی نیست. بنابراین مفاصل اطراف سازه با توجه به معماری سازه به‌صورت تکیه‌گاه‌های ساده در نظر گرفته‌شده‌اند.

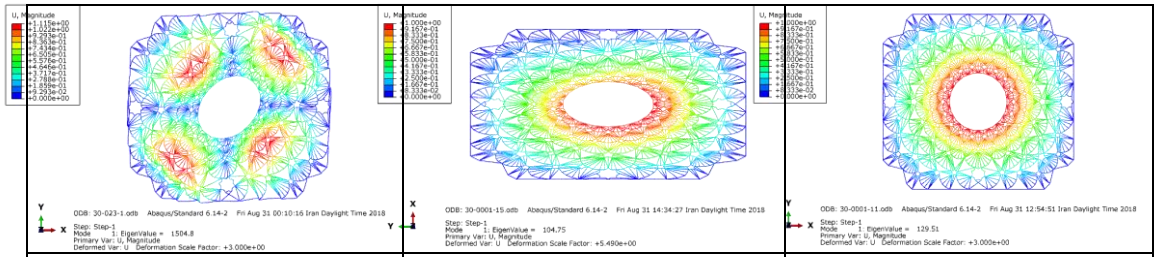
۵-٤- تحلیل سازه فضاکار یزدبندی کوشک هشت‌بهشت

تحلیل تحت اثر بارگذاری متوازن برف، تمامی مدل‌ها با استفاده از آیین نامه AISC-360-10 به‌صورت حدی طراحی شده‌اند. برای تحلیل پایداری ابتدا بارگذاری متوازن برف به صورت افزایشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای تحلیل تحت اثر بارگذاری افزایشی برف، ابتدا سازه‌ها تحت آنالیز کمانشی[5] قرار می‌گیرد. سپس با اعمال ناکاملی ۰,۰۰۵ به عنوانی ضریبی از مودکمانشی اول، سازه تحت آنالیز طول – کمان قرار می‌گیرد. تصاویر ۳۲ تا ۳۹ شکل مودهای کمانشی اول را برای مدل‌ها نمایش می‌دهند.

www.SID.ir

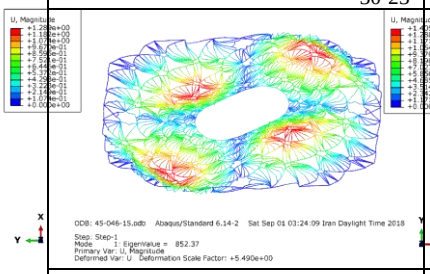
Archive of SID

جدول ۴- آنالیز کمانشی بر طبق مود اول جهت بارگذاری متوازن برف در سازه فضاکار با هندسه یزدی‌بندی حاکم بر ساختار

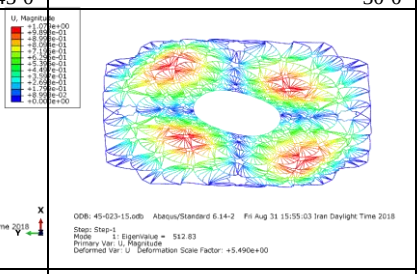


تصویر۳۲- مود کمانش اول مدل SLY8-S-30-0

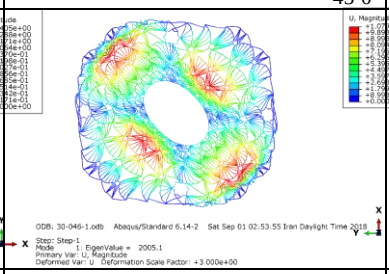
تصویر ۳۳- مود کمانشی اول مدل SLY8-R-45-0



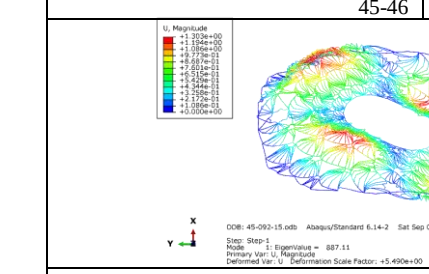
تصویر ۳۴ مود کمانش اول مدل SLY8-S-30-23



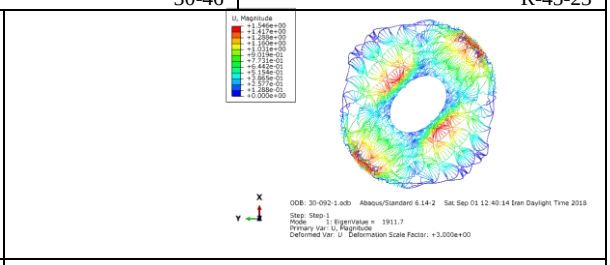
تصویر ۳۵- مود کمانشی اول مدل SLY8-R-45-23



تصویر ۳۶- مود کمانش اول مدل SLY8-S-30-46



تصویر ۳۷. مود کمانشی اول مدل SLY8-R-45-46



تصویر ۳۸- مود کمانش اول مدل SLY8-S-30-92

تصویر ۳۹- مود کمانشی اول مدل SLY8-R-45-92

منبع: نگارندگان

با توجه به آنالیز کمانشی انجام شده نتایج بار بحرانی کمانش برای پنج مود اول کمانش به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

جدول ۵- مودهای کمانش مدل‌ها تحت اثر بارگذاری متوازن برف

آنالیز کمانشی تحت بارگذاری متوازن برف								
	SLY8-R-45-92	SLY8-R-45-46	SLY8-R-45-23	SLY8-R-45-0	SLY8-S-30-46	SLY8-S-30-46	SLY8-S-30-23	SLY8-S-30-0
مود ۱	887.11	852.37	512.83	104.75	1911.17	2005.1	1504.8	129.51
مود۲	1076.5	985.61	584.74	222.39	2515.6	2436.1	1737.9	377.68
مود ۳	1108.1	1040.9	640.42	313.39	2530.6	2512.2	1814.8	432.77
مود۴	1307.2	1168.6	687.23	365.72	3329.4	3235.5	2265	553.18
مود ۵	1488.3	1343	828.04	404.32	3483.1	3280.4	2267.5	646.23

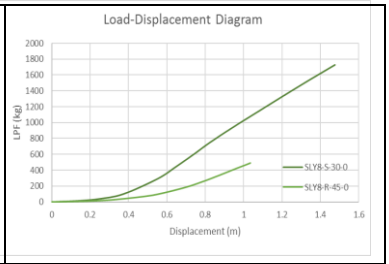
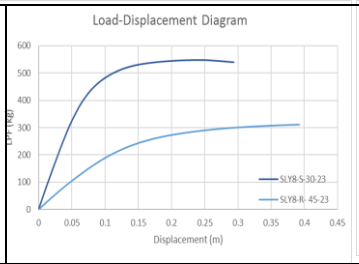
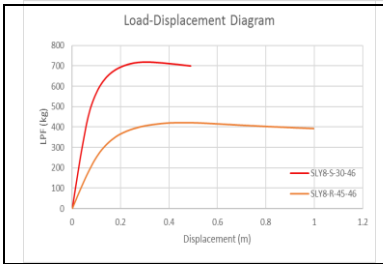
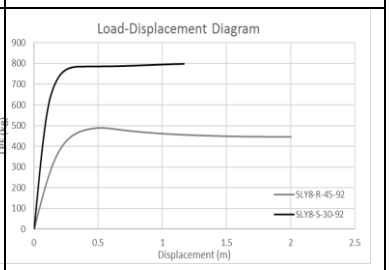
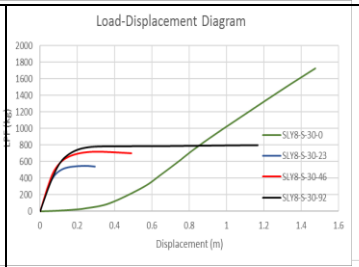
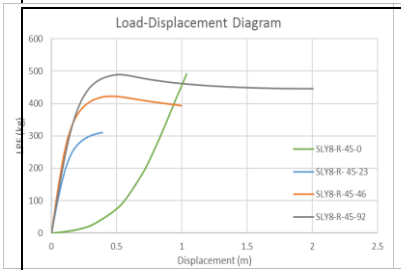
منبع: نگارندگان

www.SID.ir

Archive of SID

با توجه با اینکه بار بحرانی کمانش تمامی مودها در مود اول در تمامی مدل‌ها کمتر از بقیه مودهاست و با توجه به اینکه در سازه‌های فضاکار تک‌لایه مود غالب، مودال می‌باشد لذا برای انجام آنالیز پایداری به روش طول–کمان، ناکاملی را به مود اول اعمال می‌کنیم. تصاویر ۴۰ تا ۴۵ نمودار بار افزایشی برف و تغییرمکان نقطه مشخصی از سازه را نشان می دهد.

جدول ۶– نمودارهای بار–تغییر مکان ، تحت بار متوازن برف در سازه فضاکار با هندسه یزدی‌بندی حاکم بر ساختار

		
تصویر ۴۰– نمودار بار تغییرمکان مدل‌های SLY8-S-30-0 و SLY8-R-45-0	تصویر ۴۱– نمودار بار تغییرمکان مدل‌های SLY8-S-30-23 و SLY8-R-45-23	تصویر ۴۲– نمودار بار تغییرمکان مدل‌های SLY8-S-30-46 و SLY8-R-45-46
		
تصویر ۴۳– نمودار بار تغییرمکان مدل‌های SLY8-S-30-92 و SLY8-R-45-92	تصویر ۴۴– مقایسه نمودار بار تغییرمکان مدل‌های با پلان مربعی	تصویر ۴۵– مقایسه نمودار بار تغییرمکان مدل‌های با پلان مستطیلی

منبع: نگارندگان

با توجه به نمودارهای تصاویر ۴۰ تا ۴۳ بار–تغییرمکان سازه مشخص می‌شود؛ که سازه با پلان مستطیلی ظرفیت باربری کمتری نسبت به سازه با پلان مربعی دارد. همچنین تصویر۴۴ نمودار بار–تغییرمکان را برای مدل های SLY8-S-30-0، SLY8-S-30-23، SLY8-S-30-46، SLY8-S-30-92 نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار مشخص می‌شود که برای این نوع سازه فضاکار با مقاطع یکسان برای تمامی مدل‌ها نسبت ۰/۹۲ ظرفیت باربری بیشتری در مقابل بار افزایشی برف دارد. تصویر ۴۵ نمودار بار–تغییرمکان را برای مدل‌های SLY8-R-45-0، SLY8-R-45-23، SLY8-R-45-46، SLY8-R-45-92 نشان می‌دهد. با توجه به این نمودارها نسبت ۰/۹۲ ظرفیت باربری بیشتر را در برابر بار افزایشی برف نشان می‌دهد.

۵–۵– تحلیل تحت اثر بارگذاری نامتوازن برف

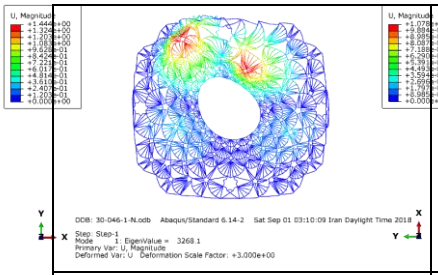
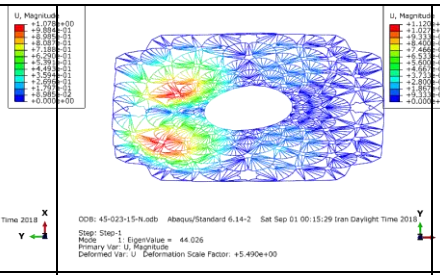
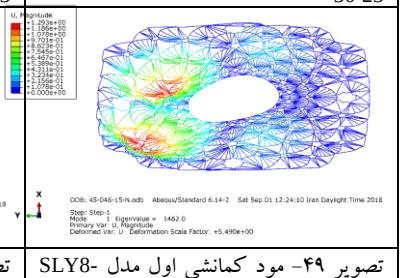
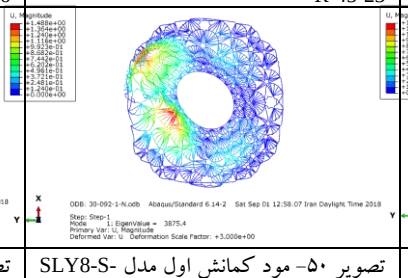
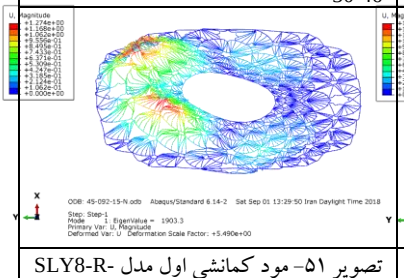
اشکال ۴۶ تا ۵۱ شکل مودهای کمانشی اول را برای مدل‌ها نمایش می‌دهند. برای نسبت ارتفاع به

www.SID.ir

Archive of SID

دهانه صفر با توجه به مبحث ششم مقررات ملی ساختمان، بار برف نامتوازن تعلق نمی‌گیرد.

جدول ۷- آنالیز کمانشی بر طبق مود اول جهت بارگذاری نامتوازن برف در سازه فضاکار با هندسه یزدی‌بندی حاکم بر ساختار

 تصویر ۴۶- مود کمانش اول مدل SLY8-S-30-23	 تصویر ۴۷- مود کمانشی اول مدل SLY8-R-45-23	تصویر ۴۸- مود کمانش اول مدل SLY8-S-30-46
 تصویر ۴۹- مود کمانشی اول مدل SLY8-R-45-46	 تصویر ۵۰- مود کمانش اول مدل SLY8-S-30-92	 تصویر ۵۱- مود کمانشی اول مدل SLY8-R-45-92

منبع: نگارندگان

با توجه به آنالیز کمانشی انجام‌شده برای بار برف نامتوازن، نتایج بار بحرانی کمانش برای پنج موداول کمانش به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

جدول ۸- آنالیز کمانشی تحت بارگذاری نامتوازن برف

	SLY8-R-45-92	SLY8-R-45-46	SLY8-R-45-23	SLY8-R-45-0	SLY8-S-30-46	SLY8-S-30-46	SLY8-S-30-23	SLY8-S-30-0
مود ۱	1903.3	1462	880.52	-	3875.4	3268.1	2061	-
مود۲	2467.5	1931.7	1151.94	-	4899.9	4212.8	2453.2	-
مود ۳	2562.5	2319.5	1480.92	-	5468.8	5304.2	3555	-
مود۴	2918.6	2677.6	1709.6	-	6018.77	6003.8	3989.2	-
مود ۵	3560.3	3228.3	2081.6	-	6917.7	7060.7	4727.8	-

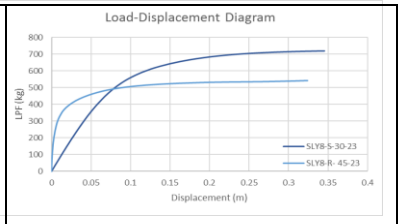
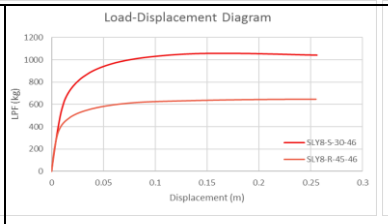
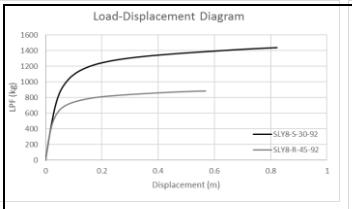
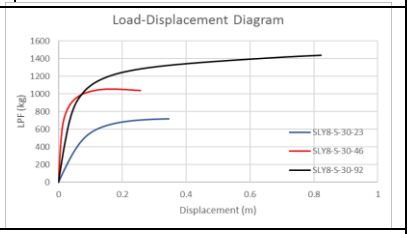
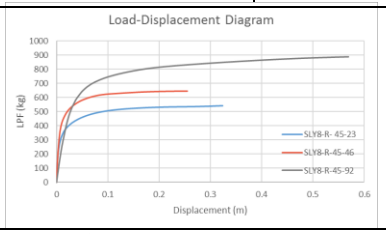
منبع: نگارندگان

با توجه به اینکه بار بحرانی کمانش تمامی مودها در موداول در تمامی مدل‌ها کمتر از بقیه مودهاست و با توجه به‌اینکه در سازه‌های فضاکار تک‌لایه مود غالب موداول می‌باشد لذا برای انجام آنالیز پایداری به روش طول-کمان، ناکاملی را به موداول اعمال می‌کنیم. تصاویر ۵۲ تا ۵۳ نمودار بار افزایشی برف و تغییرمکان نقطه مشخصی از سازه را تحت بار نامتوازن برف نشان می‌دهد.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۹- نمودارهای بار- تغییر مکان، تحت بار نامتوازن برف در سازه فضاکار با هندسه یزدی‌بندی حاکم بر ساختار

		
تصویر ۵۲. نمودار بار تغییرمکان مدل‌های SLY8-S-30-23 و SLY8-R-45-23 (نامتوازن برف)	تصویر ۵۳. نمودار بار تغییرمکان مدل‌های SLY8-S-30-46 و SLY8-R-45-46 (نامتوازن برف)	تصویر ۵۴. نمودار بار تغییرمکان مدل‌های SLY8-S-30-92 و SLY8-R-45-92 (نامتوازن برف)
		
تصویر ۵۵. مقایسه نمودار بار تغییرمکان مدل‌های با پلان مربعی	تصویر ۵۶. مقایسه نمودار بار تغییرمکان مدل‌های با پلان مستطیلی	

منبع: نگارندگان

تصویر ۵۵ نمودار بار–تغییرمکان را برای مدل های SLY8-S-30-0، SLY8-S-30-23، SLY8-S-30-46، SLY8-S-30-92 نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار، مشخص می‌شود که برای این نوع سازه فضاکار با مقاطع یکسان برای تمامی مدل ها نسبت ۰/۹۲ ظرفیت باربری بیشتری در مقابل بار افزایشی نامتوازن برف دارد. تصویر ۵۶ نمودار بار–تغییرمکان را برای مدل های SLY8-R-45-0، SLY8-R-45-23، SLY8-R-45-46، SLY8-R-45-92 نشان می دهد. با توجه به این نمودارها نسبت ۰/۹۲ ظرفیت باربری بیشتر را در برابر بار افزایشی نامتوازن برف نشان می‌دهد.

۶- تطبیق پارامترهای هندسی گنبد فضاکار با پایه یزدی‌بندی در فرم‌آزاد مرکزگرا

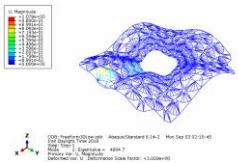
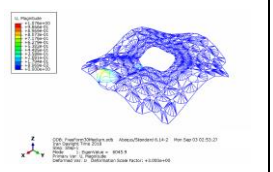
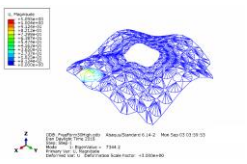
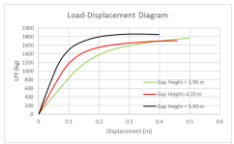
تطبیق پارامترهای هندسی گنبد فضاکار با یک فرم‌آزاد درراستای سنجش پایایی و ایستایی هندسه در این فرم‌ها می‌باشد. به این ترتیب کارامدی یا ناکارامدی آن، درراستای اطمینان از آزادی عمل و امکان‌پذیر بودن این روش برای معماران جهت تطبیق طرح‌های خود با هندسه‌های سنتی صورت می‌گیرد. با توجه به نتایج مشاهده‌شده برای سازه فضاکار گنبد یزدی‌بندی هشت‌بهشت نتیجه می‌شود، که ظرفیت باربری این نوع از سازه فضاکار نسبت به مقاطعی که برای طراحی آن استفاده شده‌است بسیار کم است؛ بنابراین یک طرح فرم‌آزاد فضاکار پیشنهاد می‌شود، تا با استفاده از آن بتوان نیازهای طراحی را برطرف کرد و سازه را از نظر مقاطع طراحی، اقتصادی‌تر، تعداد المان ها را کمتر و از نظر زیبایی و ایده‌پردازی معماری به فرم جدیدی از سازه های فضاکار فرم‌آزاد با تاشه‌پردازی سنتی و پیکربندی

www.SID.ir

Archive of SID

مدرن رسید و معماری سنتی را با معماری معاصر تلفیق کرد. هندسه سازه‌های فرم‌آزاد یزدی‌بندی هشت‌بهشت پیشنهادی مطابق شکل‌های مدل‌شده توسط نرم افزار Grasshopper و Rhinoceros 5 به صورت پارامتریک می‌باشد؛ همچنین طول و عرض سازه مانند مدل‌های قبلی تغییر نیافته ولی تعداد المان‌ها در این سازه به شدت کاهش یافته‌است. در این سازه اولین پارامتری که مورد بررسی قرار می‌گیرد، ارتفاع گپ (حفره میانی سازه فضاکار) برای تعیین نسبت ارتفاع به دهانه بهینه، از پایین‌ترین نقطه گنبد است. سه ارتفاع ۱/۹۶، ۴/۲۰و ۵/۹۰ متر برای ارتفاع گپ از پایین‌ترین نقطه گنبد برای سه مدل مختلف مربعی در نظر گرفته‌شد؛ تا بهینه‌ترین ارتفاع برای گپ از نظر افزایش ظرفیت باربری انتخاب شود. برای مدل‌های مستطیلی سازه فضاکار فرم‌آزاد یزدی‌بندی هشت‌بهشت، نیز می‌توان به نتایج مدل مربعی متناظر استنادکرد. برای سه مدل در نظر گرفته‌شده، مقاطع یکسان مانند مدل SLY8-S-30-0 در طراحی در نظرگرفته‌شد و این مدل‌ها تحت آنالیز کمانشی و سپس تحت آنالیز طول- کمان با میزان ناکاملی ۰/۰۰۵ موداول قرارگرفتند. با توجه به‌اینکه در گنبد فرم‌آزاد یزدی‌بندی هشت‌بهشت برای توزیع نامتوازن برف به مدل‌سازی‌های پیچیده و تعیین دقیق بار نامتوازن برف نیاز است، بنابراین در سازه‌های مذکور فقط از بار برف متوازن استفاده‌شده‌است. (تصاویر ۵۷ تا ۵۹ در نرم افزار ABAQUS تولید شده است.)

جدول ۱۰-آنالیز کمانشی بر طبق موداول جهت بارگذاری متوازن برف در سازه فضاکار آزاد با هندسه یزدی‌بندی حاکم بر ساختار

			
تصویر۵۷- مود کمانش اول مدل اول Gap Height = ۱/۶۹	تصویر۵۸- مود کمانشی اول مدل دوم Gap Height =۴/۲۰	تصویر۵۹. مود کمانشی اول مدل سوم Gap Height =۵/۹۰	تصویر ۶۰. نمودار بار تغییرمکان سازه فضاکار فرم آزاد پیشنهادی با ارتفاع متغیر برای گپ با پلان مربعی

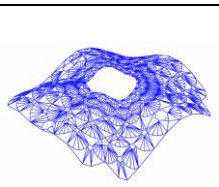
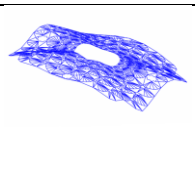
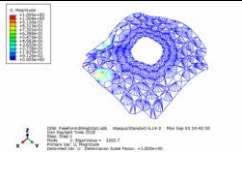
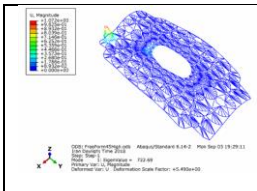
منبع: نگارندگان

با توجه به نمودار ۶۰ کاملا مشخص است که مناسب‌ترین ارتفاع برای گپ میانی ارتفاع ۵/۹۰ متر است بنابراین این سازه با پلان مربعی و همچنین پلان مستطیلی همانند جدول ۱۲ و تصاویر۶۱ و ۶۲ با ارتفاع گپ میانی ۵/۹۰ ایجاد و باز طراحی می‌شوند تا هم از نظر قطر و ضخامت مقاطع تقلیل پیداکنند و هم ازنظر اقتصادی و وزن، مناسب باشند. نتایج حاصل از طراحی مجدد همان‌طور که در جدول ۱۳ مشاهده می‌شود، کاهش شدید در قطر، ضخامت و وزن سازه را نشان می‌دهد. بعد از مرحله طراحی مدل‌های جدول ۱۲ تحت آنالیز کمانشی و سپس آنالیز به روش طول- کمان با ناکاملی ذکرشده فقط به صورت بارگذاری متوازن برف قرار می‌گیرند. (تصاویر ۶۱ و ۶۲ در نرم افزار Rhinoceros و تصاویر ۶۳ و ۶۴ در نرم افزار ABAQUS تولید شده است).

www.SID.ir

Archive of SID

جدول۱۱– آنالیز کمانشی و سپس آنالیز به روش طول – کمان با ناکاملی ذکرشده فقط به صورت بارگذاری متوازن برف

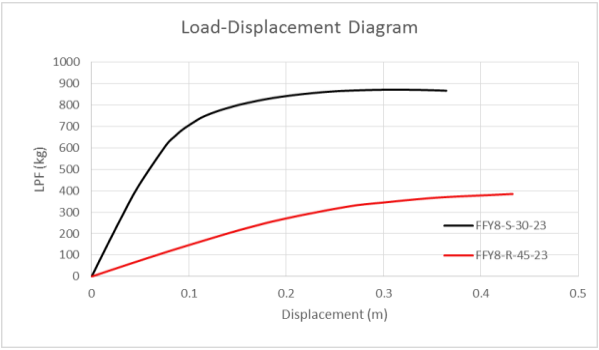
			
تصویر۶۱– مدل FFY8-S-30-23	تصویر۶۲– مدل FFY8-R-45-23	تصویر۶۳– مود کمانش اول مدل FFY8-S-30-23	تصویر۶۴– مود کمانشی اول مدل FFY8-R-45-23

جدول ۱۲– مدل‌های استفاده‌شده برای سازه های فرم‌آزاد مرکزگرا با پایه یزدی‌بندی کوشک هشت‌بهشت

گنبد تک‌لایه فضاکار فرم‌آزاد با تاشه برگرفته شده از یزدی‌بندی هشت‌بهشت (FFY8)				
ردیف	نوع پلان	دهانه (متر)	ارتفاع/دهانه	نام اختصاری
۱	مربعی	۳۰	۰,۲۳	FFY8-S-30-23
۲	مستطیلی	۴۵	۰,۲۳	FFY8-R-45-23

منبع: نگارندگان

همانطور که از تصویر۶۵ می‌توان مشاهده کرد سازه فرم‌آزاد پیشنهادشده دارای ظرفیت باربری بیش از حد نیاز برای بار افزایشی برف است و به‌راحتی می‌تواند نیازهای بارگذاری برای طراحی را برطرف نماید. مقاطعی که برای طراحی این سازه‌ها در نظر گرفته شده‌اند با مشخصات مکانیکی قبلی و با مقاطع جدول ۱۳ هستند (که در بازار موجود می‌باشد). با مقایسه این مقاطع با مقاطع استفاده‌شده برای سازه فضاکار گنبدی یزدی‌بندی هشت‌بهشت می‌توان کاهش وزن سازه و ضخامت اعضا را به‌راحتی ایجاد کرد.



تصویر ۶۵– نمودار بار–تغییرمکان سازه‌های فرم‌آزاد با بار متوازن برف

جدول۱۳– مقاطع طراحی شده برای مدل‌های جدول ۱۲ (تولید شده توسط نرم افزار SAP2000)

مقاطع طراحی برای دو مدل فرم آزاد پیشنهادی (میلی متر)						
مدل ها	شعاع	ضخامت	شعاع	ضخامت	شعاع	ضخامت
FFY8-S-30-23	۵۰/۸	۳	۷۶/۲	۳	۸۸/۹	۴
FFY8-R-45-23	۷۶/۲	۳	۸۸/۹	۴	۱۰۰/۱۶	۴

منبع: نگارندگان

www.SID.ir

Archive of SID

۷- تحلیل و جمع بندی

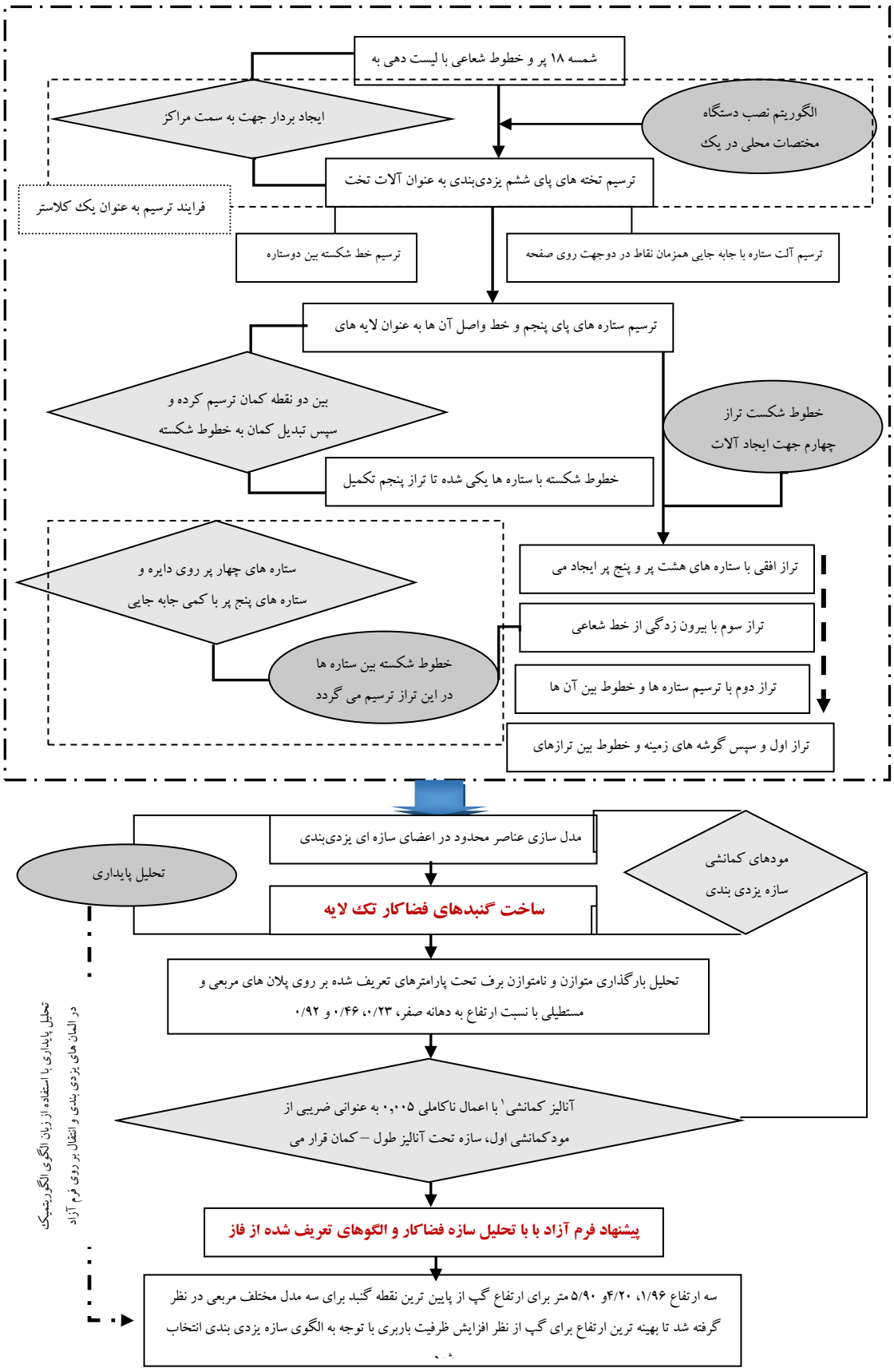
فرایند شعاعی عاملی در ترسیم زبان-الگوی الگوریتمیک طی چهارده مرحله در پژوهش حاضر هست. در ترسیم الگوریتمی مدنظر، در مرحله اول هندسه ترسیمی از مرکز شمسه ۱۸پر آغاز می‌گردد در مرحله بعدی؛ ترسیم تخته‌های پای‌ششم یزدی‌بندی به عنوان آلات‌تخت، سپس، ترسیم آلت ستاره با جابه‌جایی همزمان نقاط در دوجهت روی صفحه ایجاد می‌گردد. در مرحله بعد، ترسیم خط شکسته بین دوستاره، با بررسی هر ستاره با ستاره کناری و مرتب سازی لیست ها صورت می‌پذیرد. درادامه، ترسیم ستاره‌های پای‌پنجم و خط واصل آن‌ها به‌عنوان لایه‌های تخت یزدی‌بندی می‌باشد. در مرحله بعد، تراز افقی با ستاره‌های هشت پر و پنج پر ایجاد می‌گردد؛ سپس خطوط شکست تراز چهارم جهت ایجاد آلات سینه‌فخری در این مرحله ترسیم می‌گردد. طی مراحل بعدی وارد ترسیم تراز سوم با بیرون‌زدگی از خط شعاعی شده،. درنهایت خطوط شکسته بین ستاره‌ها در این تراز، ترسیم می‌گردد. در مرحله بعد، تراز دوم با ترسیم ستاره‌ها و خطوط بین آن‌ها صورت می پذیرد. در طی مراحل نهایی تراز اول و سپس گوشه‌های زمینه و خطوط بین ترازهای تخت ترسیم می‌گردد. این زبان‌الگوی ساده شده در طی ۱۴ مرحله وارد تحلیل سازه ای در فرم گنبد و معاصرسازی طی آزاد مرکزا با قابلیت تطبیق پارامتری با یزدی‌بندی صورت می‌پذیرد.

۸- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، آسمانه کوشک هشت‌بهشت اصفهان به‌صورت یزدی‌بندی تخت‌دار با حلقه‌های افقی مورد بررسی قرارگرفت. با آنالیز ترسیم هندسی سنتی در آسمانه، نحوه تکثیر طبقات یزدی‌بندی در سطح مورد بررسی قرارگرفت. طی بخش اول مقاله، زبان-الگو الگوریتمی، از ترسیم طبقات یزدی‌بندی در طی ۱۴ مرحله مشخص‌گردید. پارامترهای یزدی‌بندی شدیدا وابسته به هندسه و بارگذاری بوده و این عوامل رفتار آن‌ها را تغییر می‌داد، بنابراین نتایج کسب شده از پارامترها، وارد تحلیل سازه در فرم گنبدی و فرم‌آزادمرکزگرا با قابلیت تطبیق با الگوی مدل‌سازی شده گشت. سازه‌های فضاکار موردتحقیق در این مطالعه با توجه به غیرخطی‌های موجود در آن‌ها، اکثرا دارای رفتار غیرخطی سخت‌شونده بوده و مدل‌های بسیار کمی از آن‌ها دارای رفتار غیرخطی نرم‌شونده هستند. بنابراین روش استاتیکی غیرخطی، تحلیل پایداری سازه های فضاکار فقط به بررسی نحوه کشف نقاط دوشاخگی و تعویض مسیر تعادل و تبدیل نقطه دوشاخگی به حدی پرداخت. بنابراین لزوم استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی در حالت مکانیزم خرابی موضعی همراه با فروجهش دینامیکی در مدل‌های با رفتار غیرخطی نرم‌شونده تاکیدگشت.

www.SID.ir

Archive of SID



نمودار۱: فلوچارت پژوهشی درراستای معاصرسازی سازه یزدی‌بندی (مأخذ: نویسندگان)

www.SID.ir

Archive of SID

با انجام تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی مشاهده‌شد که بیشترین نوع مکانیزم خرابی می‌تواند در حالت بارگذاری گسترده متوازن برف صورت‌گیرد.

تاثیر نسبت ارتفاع به دهانه عاملی تاثیرگذار در رفتار این نوع گنبدهاست و با افزایش این نسبت وزن، سختی اولیه و ظرفیت باربری سازه افزایش می‌یابد.

در نسبت ارتفاع به دهانه صفر، مدل سازه‌ای رفتاری غیر از رفتار کمانشی نشان‌داد. با توجه به رفتار سازه می‌توان نتیجه گرفت که نسبت ارتفاع به دهانه صفر، رفتار سخت‌شوندگی است و رفتار شبیه صفحات تحت بارگذاری برون صفحه ای، با تکیه‌گاه های کناری از خود نشان می‌دهد.

هرچه نسبت ارتفاع به دهانه افزایش می‌یابد میزان تغییرشکل الاستیک سازه افزایش می‌یابد و پدیده کمانش موضعی اعضا محتمل‌تر می‌شود.

نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۹۲ نسبتی بهینه نسبت به سایر مدل‌ها در سازه فضاکار گنبدی یزدی‌بندی هشت‌بهشت است و درحالی‌که دارای وزنی زیاد در مقایسه با نسبت‌های دیگر است، ظرفیت باربری و سختی اولیه مناسبی دارد.

با توجه به نتایج مشاهده‌شده برای سازه‌های فرم‌آزاد پیشنهادی، می‌توان گفت که به‌دلیل وجود اعضای با لاغری بسیار کم در سازه، به‌جای کمانش اعضا، پدیده گسیختگی یا تسلیم اعضا، اتفاق می‌افتد. بنابراین این نوع سازه‌ها و ردازی صرفا جنبه معماری و زیبایی داشته و برای سازه های صنعتی یا مکان‌هایی با بارگذاری‌های سنگین توصیه نمی‌شود چراکه از نظر اقتصادی منجر به ساخت سازه‌ای پرهزینه و سنگین می‌شود.

با توجه به نتایج می‌توان گفت که باید برای حصول نتایج بهتر و مناسب‌بودن سازه از لحاظ باربری، اقتصادی بودن، وزن کم، لاغری مناسب اعضای سازه‌ای باید روی تاشه‌پردازی عملیات بهینه‌سازی صورت‌گیرد.

پی‌نوشت‌ها

[1] Geometrical imperfection
[2] Mechanical imperfections
[3] Lack of Fit
[4] Arch Length Method (Riks Method)
[5] Linearized Eigen Value Buckling Analysis

منابع و مآخذ

- امین پور، احمد. اولیا، محمدرضا. ابوئی، رضا. حاجبی، بیتا. ۱۳۹۴. ارائه دو روش جدید در ترسیم گره و مقایسه آنها. نشریه علمی-پژوهشی انجمن علمی معماری و شهرسازی ایران.شماره ۱۱. دوره ۷. صفحات ۶۷-۸۳
- تقوایی، ویدا. ۱۳۸۹. بازخوانی صورت کاخ هشت بهشت اصفهان. مجله علمی-پژوهشی نامه معماری و شهرسازی. شماره ۵. دوره ۳. پاییز و زمستان. صفحه ۱۴۹-۱۶۱
- سلطانی، مهرداد. منصوری، سید امیر. فرزین، احمدعلی. ۱۳۹۱. تطبیق نقش الگو و مفاهیم مبتنی بر تجربه در فضای معماری. مجله باغ نظر. شماره ۲۱. سال نهم. تابستان. ۳-۱۴
- شاردن، ژان. ۱۳۴۹. سیاحت نامه شاردن. ترجمه محمدعلی عباسی. جلد هفتم. تهران. انتشارات: امیرکبیر.

www.SID.ir

Archive of SID

- صاحب محمدیان منصور، سینا فرامرزی. ۱۳۹۰. گونه شناسی و تدوین ساختار هندسی کاربندی در معماری ایران. نشریه هنرهای زیبا - معماری و شهرسازی. دوره ۳. شماره ۴. زمستان. صفحه ۸۱-۹۶
- خاک زند، مهدی. حسینی کیا، سید محمد مهدی. ۱۳۹۳. دستیابی به زبان الگوی اسلامی-ایرانی طراحی محیط و منظر. فصلنامه مطالعات شهر ایرانی اسلامی. دوره ۵. شماره۱۷. ۴۵-۵۲
- جلالیان ژارآباد، امیر. بهروش، علاءالدین. ۱۳۹۳. بررسی رفتار لرزه ای و ضریب رفتار گنبدهای دولایه فضاکار. نشریه صنعت مقاوم سازی و بهسازی. شماره ۹. پاییز. صفحه ۴۶-۵۱
- رییسی، مهدی. بمانیان، محمدرضا. تهرانی، فرهاد. ۱۳۹۰. بازنگری در مفهوم کاربندی بر مبنای هندسه نظری، عملی و نقش ساختمانی. مرمت و معماری ایران. شماره پنجم. ۳۳- ۵۴ .
- عابدی ،ک. شکسته بند، ب. ۱۳۸۸. تحلیل پایداری سازه های فضاکار. انتشارات: دانشگاه صنعتی سهند تبریز
- عابدی، ک . شکسته‌بند، ب. ۱۳۹۳. مبانی پایداری سازه‌ها. دانشگاه صنعتی سهند. انتشارات: شبکه‌ی جامع کتاب گیسوم. صفحه ۹۹۳
- مستغنی، علیرضا. علیمرادی، محسن. ۱۳۹۳. واکاوی کاربرد هندسه طبیعت و فرکتال در معماری پارامتریک با بررسی آرایه داخلی گنبد شیخ لطف الله . مجله علمی-پژوهشی نامه معماری و شهرسازی. دوره۸. شماره ۱۶. صفحه ۱۰۳-۱۲۲
- مهدوی نژاد، مهدی. شهری، شقایق. ۱۳۹۳. معاصرسازی الگوی مسکن بومی تهران با کاربرد روش های مقداری. فصلنامه هویت شهر. شماره ۲۰. زمستان. دوره ۸. شماره ۲۰. صفحه ۳۵-۴۸
- مردمی، کریم. سهیلی فرد، مهدی. آقاعزیزی، مجید. ۱۳۹۴. همسازی سازه و معماری در راستای جانمایی بهینه تکیه گاه ها به روش الگوریتم ژنتیک (نمونه موردی: پوشانه های با فرم آزاد، طراحی شده براساس هندسه گره ایرانی). فصلنامه علمی پژوهشی نقش جهان. شماره۵-۲. صفحه ۶۵-۷۵
- نظری، سهیل. مظاهریان، حامد. معماریان، غلامحسین . کاظم پور،حمیدرضا. ۱۳۹۶. گونه شناسی و تحلیل هندسی و سازه ای یزدی‌بندی در معماری ایران. نشریه هنرهای زیبا – معماری و شهرسازی. دوره .۲۲ شماره ۱ بهار. صفحه ۵۳-۶۴

-Abedi, K. (1997).Propagation of Local Instabilities in Braced Domes. PhD Thesis. University of Surrey

-A. El-Sheikh.(2002).“Effect of geometric imperfection on single-layer barrel vaults”, International Journal of Space Structures, Vol. 17, No. 4, pp. 271-283.

-Dehkhoda, A. (1995). Dehkhoda Dictionary. Tehran. Tehran, Iran: University of Tehran

-Fan, Feng, Jiachuan Yan, and Zhenggang Cao. (2012). "Elasto-plastic stability of single-layer reticulated domes with initial curvature of members." Thin-Walled Structures 60 . 239-246.

-Grunbaum,B. and Shephard, G.(1992). “ Interlace patterns in Islamic and Moorish art” Leonardo, 25, 331-339

-Hankin E. Hanbury .(1925). Examples of Methods of Drawing Geometrical Arabesque Pattern. The Mathematical Gazette. pp. 371–373.

-Harmsen, Silvia .(2006). Algorithmic Computer Reconstructions of Stalactite Vaults - Muqarnas - in Islamic Architecture . phd Dissertation. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

-Jay Bonner.(2017). Islamic Geometric Patterns Their Historical Development and Traditional Methods of Construction with a chapter on the use of computer algorithms to generate Islamic geometric patterns by Craig Kaplan. This Springer imprint is published by Springer Nature

-Kaplan Craig S.. (2002). Computer Graphics and Geometric Ornamental Design. PhD Dissertation Thesis. University of Washington

-Kasraei ,Mohammad Hossein; Nourian, Yahya ; Mahdavinejad, Mohammadjava. (2016). Girih for Domes: Analysis of Three Iranian Domes. Nexus Network Journal .April. Volume 18. Issue 1. pp 311–321

-•Khouri Noor K. (2017) .Structural Grid Shell Design with Islamic Pattern Topologies , Submitted to the Department of Architecture in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Building Technology at the MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY June

-Nejad ebrahimi, Ahad; Aliabadi, M & Aghaei, S .(2013). Domes Decorative Elements in Persian Architecture. Alam Cipta. University of Putra Malaysia. Vol(2). pp.113-127.

-Parke, G. A. R.. (1985). Comparison of the Structural Behavior of Various Types of Braced Barrel Vaults. Analysis. Design and Construction of Braced Barrel Vaults. Z.S. Makowski. (Editor). Granada Publishing Ltd.. London and New York . pp 90-120.

-Rasuli, P. f. (2010). Algorithm of Formfinding of Yazdi_bandi in Islamic Geometry. Machine and procces of picture.

-Raeiszade, M.. & Mofidi, H. (1995). Revival of a Forgotten Art. Tehran, Iran: Mola.

-Shaarbaf, A. (1993). Ghereh v karbandi. Tehran. Iran: Entesharat Elmi Farhanghi.

www.SID.ir