

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

سارا بیرقی<sup>۱</sup>، حسن ستاری ساربانقلی<sup>۲\*</sup>، علی محدث خراسانی<sup>۳</sup>

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 می‌باشد. ساختار یزدی‌بندی در آسمانه بنای هشت‌بهشت، با هدف تحلیل هندسی الگوریتمیک و آنالیز سازه‌ای در فرم آزاد مورد پژوهش واقع می‌گردد. الگوی یزدی‌بندی آسمانه با وجود آلت هندسی سینه‌فخری، از لحاظ هندسه و نقش سازه‌ای بر پایه شبکه ترسیمات رسمی‌بندی به‌وجود می‌آید. هندسه یزدی‌بندی در آسمانه مرکزی هشت‌بهشت به صورت دواپر 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 در Grass Hopper به صورت شعاعی از مرکز صوت می‌پذیرد. سپس ماهیت بارها و اتصالات با در نظر گرفتن اعضای سازه‌ای فضاکار در یزدی‌بندی در نرم‌افزارهای SAP2000، ABAQUS مورد تحلیل هندسی و بارگذاری قرار می‌گیرد. در مرحله نهایی ارائه مدل فضاکار فرم آزاد با بیشترین ظرفیت باربری با در نظرگیری نسبت ارتفاع به دهانه با توجه به تاشه اولیه در راستای معاصر سازی صورت می‌گیرد. ابتکاری که در این پژوهش پیش‌رو گرفته شده است، تطبیق پارامترهای هندسی این گنبد با یک فرم آزاد می‌باشد تا پایایی و ایستایی این هندسه در این فرم‌ها نیز مورد بررسی قرار گیرد و کارآمدی یا ناکارآمدی آن مشخص شود تا راهی برای اطمینان آزادی عمل و امکان‌پذیر بودن این روش برای معماران جهت تطبیق طرح‌های 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 پرداخته می‌شود. 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 فرم آزاد

\*Email: sattari@iaut.ac.ir 09143134269

DOI: <http://dx.doi.org/10.29252/smb.5.6.117>

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه دکتری سارا بیرقی با عنوان «معاصر سازی زبان-الگوهای 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.

## 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 ارائه نمود؟

### 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، حسینی کیا، 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 صورت می‌پذیرد (سلطانی و همکاران، ۱۳۹۱). منطق تکرار در ابزارهای دیجیتال عاملی بر تولید 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 فراهم آورده است. پتانسیل بالای الگوهای کلاسیک در زایش فرم‌های آزاد بعنوان دلیل اصلی در بهره‌گیری از معماری بومی بر مبنای تکرار موتیف‌های هندسی در عصر حاضر می‌باشد. الگوریتم‌های کامپیوتری با ساختار ریاضی-دستوری و قابلیت انطباق‌پذیری بالا جهت تولید فرم‌های جدید، مورد استفاده قرار می‌گیرند (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 آسمانه‌ها، مورد بازبینی هندسی جهت سهولت در امر مرمت و معاصرسازی در استفاده طرح‌های آتی می‌باشد. الگوی یزدی‌بندی آسمانه به‌صورت تخت‌دار، تشکیل شده از تکرار واحدهای مشابه لوزی است که فضای میان ردیف‌های حلقوی شکل افقی را می‌پوشاند و عناصر افقی ستاره‌ای شکل میان این واحدهای تکرارشونده قرار می‌گیرند (نظری و همکاران، ۱۳۹۵). در راستای 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 شمس به هشت ضلعی پیرامونی گنبد را فراهم می‌سازد. 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. به‌طور معمول 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

افزار ABAQUS با روش المان محدود غیرخطی و روش Static Riks صرفاً 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 بخش‌های 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، استفاده می‌گردد.

## ۲- پیشینه پژوهش

بررسی مطالعات انجام‌شده در دو حوزه شبیه‌سازی الگوریتمیک در راستای بازترسیم نقوش و معاصر سازی تزیینات معماری اسلامی صورت می‌پذیرد که در راستای فاز اول، منصور صاحب‌محمدیان، سینا فرامرزی (۱۳۹۰) طی مقاله «گونه‌شناسی و تدوین ساختار هندسی کاربرندی در معماری ایران» به باززنده‌سازی این الگو با توجه به شناخت هندسی کاربرندی منفرد رسمی با پایه شکل‌گیری یزدی‌بندی، پرداخته‌اند. سهیل نظری و همکاران (۱۳۹۶) در پژوهش «گونه‌شناسی و تحلیل هندسی و سازه‌ای یزدی‌بندی در معماری ایران» شرط اطلاق یزدی‌بندی به یک کار، وجود آلت هندسی سینه‌فخری، عنوان می‌کنند؛ به‌صورتی که یزدی‌بندی با خصوصیت رسمی‌بندی دارای آلت‌های تخت‌دار (واحدهای لوزی‌شکل تکرارشونده و تخت‌های ستاره‌شکل)، بدون تخت (قسمتی از یک شمشه (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

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

روند پژوهش، یافتن زبان-الگوی الگوریتم مناسب برنامه‌نویسی برای ترسیم آسمانه یزدی‌بندی کوشک هشت‌بهشت اصفهان و نهایتاً ترسیم آن در سه‌بعد و آنالیز بارگذاری تحت هندسه پایه و معاصر سازی با سازه‌های فضاکار در سطوح گنبدی و فرم‌آزاد، است. امکان تطبیق یزدی‌بندی با سازه فضاکار یکی از راهکارهای معاصر سازی 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 انجام گرفته‌است. نتایج این پژوهش حاکی از یافتن روش جدید قابل اجرا 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، پرداخته می‌شود. در فاز دوم مقاله از جهت معاصر سازی از سازه‌های فضاکار و قابلیت تطبیق با هندسه یزدی‌بندی بهره‌گرفته می‌شود. 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 سازه‌های فضاکار با پایه‌ها یا ستون‌های خربایی مدنظر قرار گیرد ولی اگر سازه فضاکار به تنهایی مورد تحلیل قرار گیرد، نقش تعیین‌کننده در پایداری این نوع سازه را بار قائم زلزله و بار افزایشی برف ایفا خواهند کرد. بنابراین برای انجام پایداری گنبد فضاکار بدون پایه‌های خربایی طراحی براساس بار برف و زلزله قائم صورت خواهد گرفت. برای بررسی پایداری از نرم

پایانامه دکتری «بازسازی الگوریتمیک از طاق‌های استاکتیکی مقرنس در معماری اسلامی» عناصر سلولی مقرنس را بر پایه مدول مربع و مدول لوزی با زوایای ۴۵ و ۱۳۵ درجه بیان می‌کند. مدول‌های دیگر بر اساس برش در اقطار مربع اولیه شکل می‌گیرد؛ که در پلان به صورت پرک، تاسه می‌باشند. شبیه‌سازی مقرنس با توجه به متغیرهای قطر و زاویه و نوع سلول‌ها و همچنین موقعیت و جهت‌گیری آن‌ها در پلان صورت می‌پذیرد. طبقات مقرنس در پلان با انتقال بخش‌های منحنی سلول‌های مقرنس در سطح تخت صورت می‌پذیرد. این الگوی ترسیمی بعنوان پایه شبیه‌سازی یزدی‌بندی آسمانه کوشک هشت‌بهشت در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در راستای زبان-الگوی الگوریتمیک، گلابچی (۱۳۹۰) در کتاب «معماری دیجیتال» الگوها را به صورت سه گوش، چهار گوش و بی‌شکل دسته‌بندی می‌کند. پوشش‌های لوزی شکل موجود در یزدی‌بندی در زمره الگوهای چهار گوش با چرخش نسبت به محورهای مختصات می‌باشند. همپوشانی این قطعات عاملی در شکل‌گیری سطح فرم‌آزاد می‌باشد. در راستای الگوبرداری دیجیتال از ساختارهای هندسه اسلامی در عصر حاضر، زوبین خبازی (۱۳۹۳)، در کتاب «فرایندهای طراحی دیجیتال» بر پروژه کاربردی 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 فرایند طراحی و ساخت، مورد کاوش قرار گرفت. این فرایند یکی از راه‌های انتقال تجربه معماری ایرانی به فضای معماری معاصر می‌باشد. در راستای تحلیل سازه‌ای و معاصر سازی در

«طراحی الگوهای هندسی هنر اسلامی» ارائه کرد. 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. در راستای چگونگی بیرون کشیدن 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، قرار می‌گیرد و متغیرهایی نظیر تعداد اضلاع چندضلعی، شعاع دایره محیطی و تعداد لایه‌های داخلی شکل در تمام طرح‌هایی که از طریق مسیر تولید می‌شوند، کاربرد دارند. یکی دیگر 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، در حالیکه هانکین برای رسم نقوش با زاویه ناسازگار مناسب‌تر است. احمد امین پور (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 می‌گردد. در این راستا مهدوی‌نژاد (۲۰۱۶)، در مقاله «گره در فضای گنبدی، آنالیز سه نمونه از گنبدهای ایرانی» گره دست‌گردان را در راستای نحوه تکثیر الگوهای هندسه اسلامی بر روی فضای گنبدی، تحت تأثیر انحنا و گاووسی در سطح گنبد، بیان می‌کنند؛ که نشان‌دهنده تغییر چندضلعی‌های ستاره‌ای با توجه به انحنا گنبد می‌باشد. سیلویا هارمسون (۲۰۰۶)، در

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 آن‌ها در ظرفیت باربری گنبد تک‌لایه دیاماتیک (۶ و ۸ قاچ) توسط فنگ فان (۲۰۱۳) با بررسی اثر این ناکاملی‌ها در کاهش ظرفیت باربری سازه نشان دهنده حساس بودن سازه‌ها به وجود انواع ناکاملی‌ها از جمله ناکاملی‌های هندسی، ناکاملی‌های مصالح (مانند تش پسماند و ...) یا ترکیبی از این دو هستند. با توجه به پژوهش‌های 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 می‌گیرد. 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

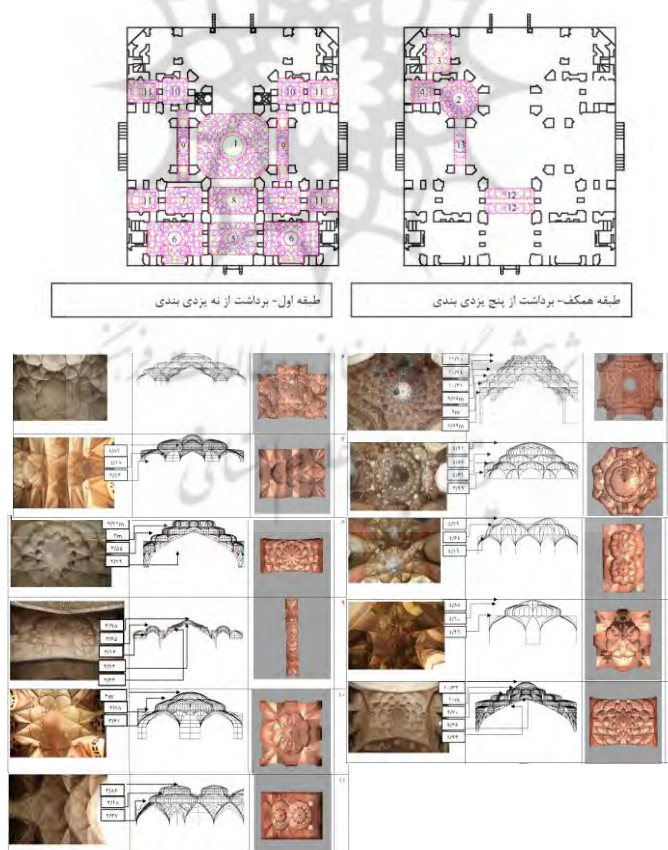
کوشک هشت‌بهشت از کاخ‌های سکونتی بسیار چشمگیر زمان خود و فرح‌انگیزتر از مجلل‌ترین کاخ‌های ممالک اروپایی بوده‌است (شاردن، ۱۳۴۹: ۳۰). بنا شامل چهار ایوان دو طبقه و با کیفیات متفاوت است، که فضای مرکزی را دربرگرفته‌است (تقوایی، ۱۳۸۹). تزئین غالب

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. در راستای پژوهش‌های صورت گرفته در سازه‌های نوین نظیر سازه‌های اسپیس‌فریم و فضاکار برپایه گنبد، افرادی نظیر عابدی (۱۹۹۷)، در پایانامه 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 قرار داده‌است. 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 تأکید نمودند. مطالعه اثر ناکاملی موجود در اعضا (کوتاه‌تر یا بلندتر بودن طول عضو نسبت

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 بیان می‌کند (دهخدا، ۱۹۹۵)؛ در واقع استفاده محلی از یزدی‌بندی بطور عمده در فضای داخلی گنبدخانه‌ها و ایوان‌های ورودی مورد بحث واقع می‌گردد.

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 شمشه صورت می‌پذیرد (رسولی، ۲۰۱۰). یزدی‌بندی شامل سطوح لایه‌ای که از عناصر ستاره و پاباریک‌ها منشعب می‌گردد و این سلول‌ها عضوی از طاق اصلی

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



تصویر ۱- پلان باز ترسیم مجموعه هشت بهشت و شماره گذاری آسمانه‌های ترسیم شده با یزدی بندی تخت‌دار

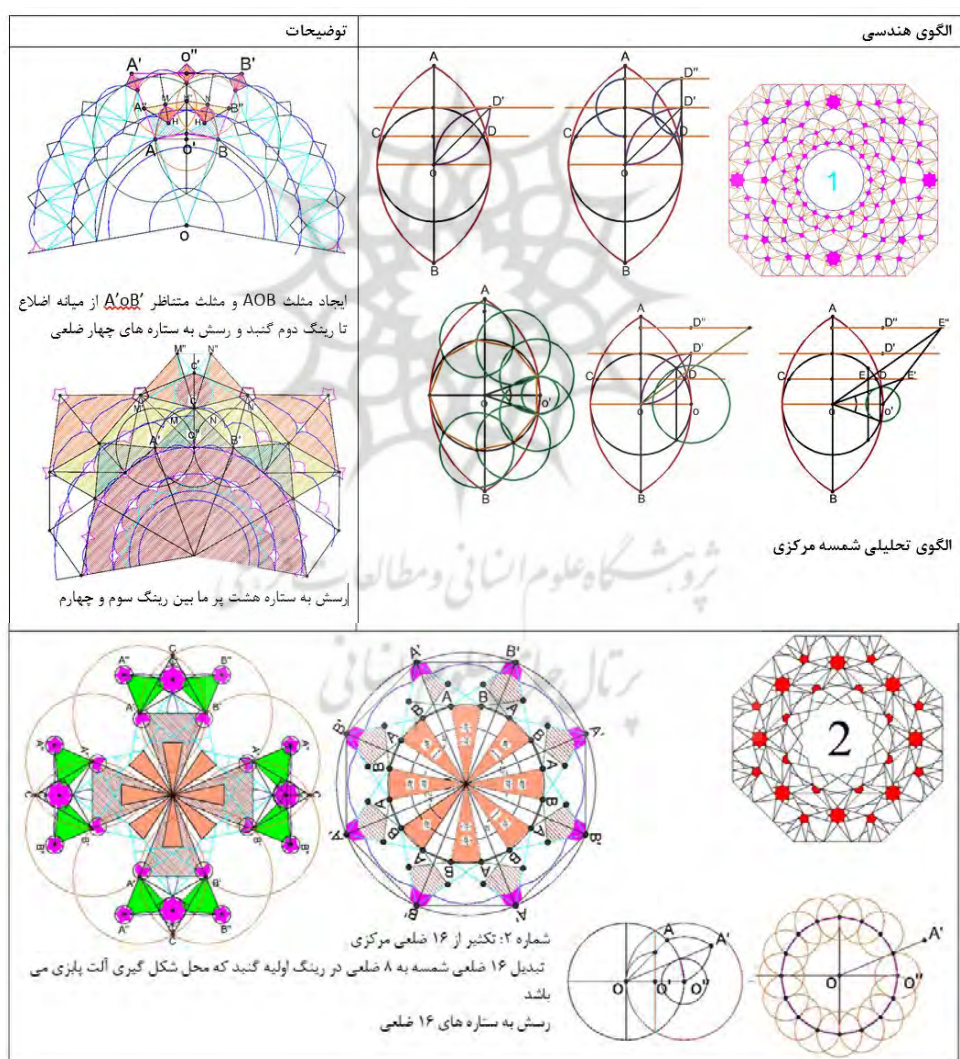
منبع: نگارندگان

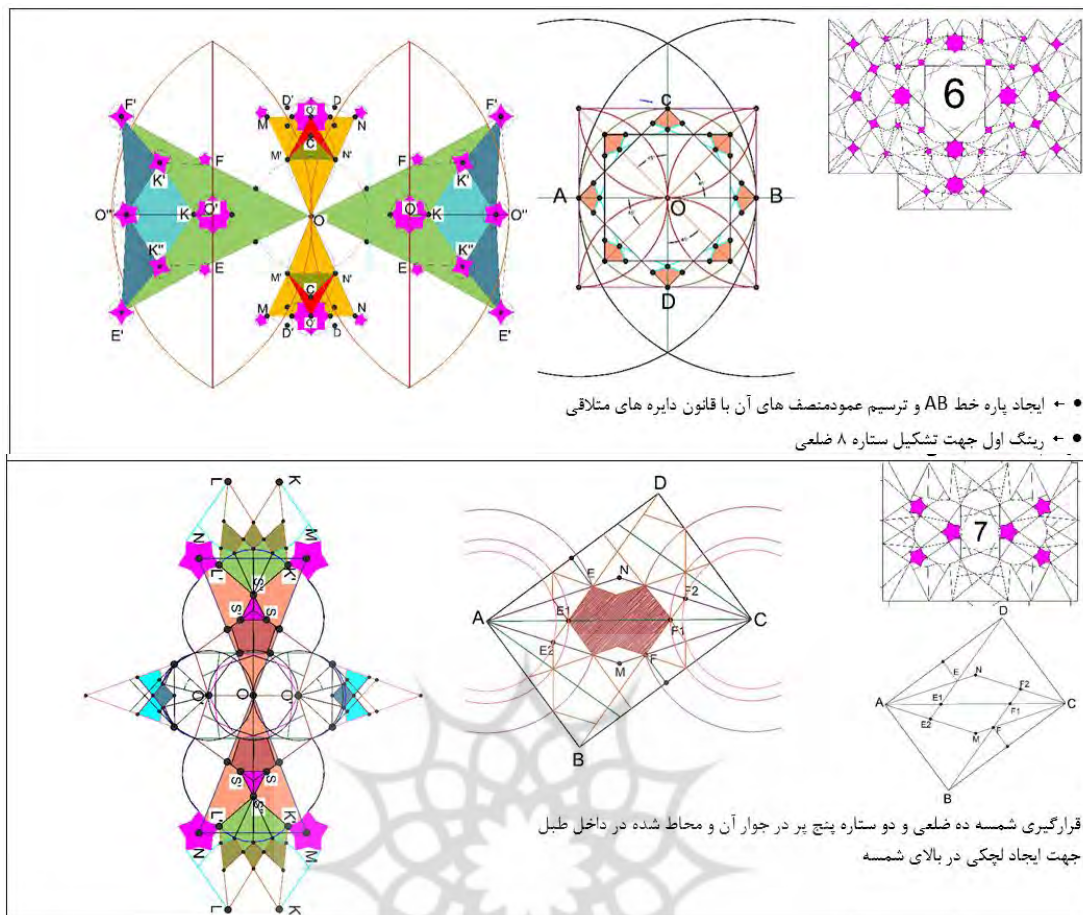
### ۳-۱- تحلیل هندسی الگوی یزدی‌بندی در آسمانه‌های کوشک هشت‌بهشت

پوشش یزدی‌بندی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عناصر در آسمانه کوشک هشت‌بهشت، با هدف دسته‌بندی، تحلیل هندسی و بررسی سازه‌ای مورد بررسی واقع می‌گردد. در این 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 در راستای ایجاد آلت سینه‌فخری در یزدی‌بندی با ترسیم دوایر و مثلث‌های متناظر متساوی‌الاضلاع جهت شکل‌گیری ردیف‌های یزدی‌بندی در طبقات آسمانه، صورت می‌پذیرد.

جدول ۲- آنالیز هندسی آسمانه‌های کوشک هشت‌بهشت با شماره‌بندی پلانی طبق تصویر ۱





منبع: نگارندگان

#### ۴- تحلیل زبان-الگوی الگوریتمیک هندسه آسمانه هشت بهشت

راستای بازخوانی آثار سنتی معماری ایران و ترجمه به زبان معماری روز می‌باشد تا علاوه بر عملکردهای پیشین، قابلیت پذیرش عملکردهای جدیدی در فرم‌های آزاد را دارا باشد. دو روش متداول جهت ایجاد پترن بر روی سطح گنبدی موجود است، چندضلعی‌های همبسته و گسترش شعاعی از مرکز. استفاده از ترسیم شعاعی، عاملی در ایجاد ساختارهای حاکم بر گنبد‌های نیمکره‌ای و جناغی می‌باشند (بونر، ۲۰۱۷: ۵۴۰، ۵۳۴). 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.

سیستم الگوها، زبانی بوجود می‌آورد و از دیدگاه ریاضی، ساده‌ترین نوع زبان، سیستمی است که حاوی دو مجموعه باشد: الف) مجموعه‌ای از عناصر و نمادها (الگوها)، ب) مجموعه‌ای 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

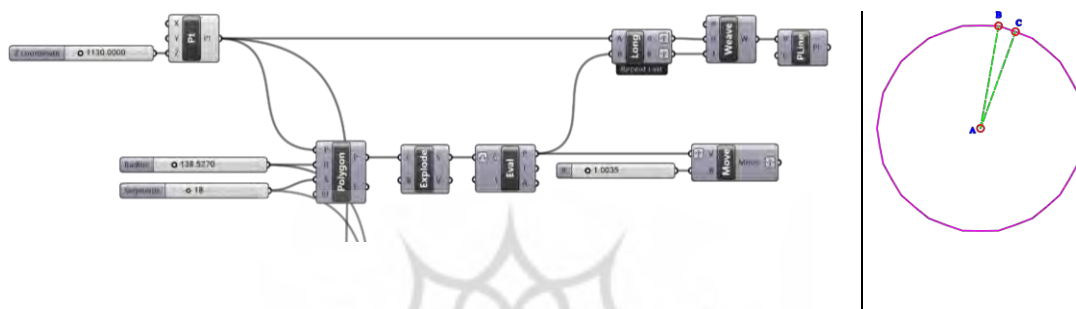


### ۴-۱-۱-۴ - کروش پیشنهادی ترسیمی الگوریتمیک یزدی بندی

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 بخش های بعدی صورت می گیرد. به صورتیکه

گسترش الگوی یزدی بندی در آسمانه با یک شبکه شعاعی از مرکز دایره به هشت ضلعی پیرامونی صورت می پذیرد.

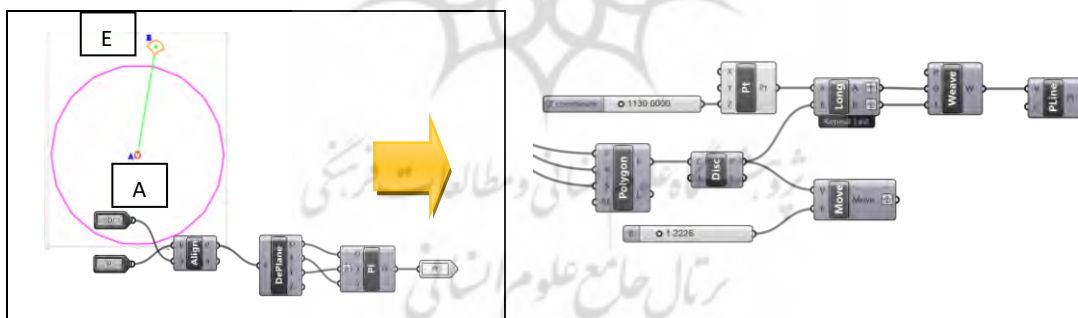
### ۴-۱-۱-۱-۴ - مرحله اول: ۱۸ ضلعی شمسه مرکز یزدی بندی



تصویر ۲- سمت راست: یک ۱۸ ضلعی منتظم توسط هر ضلع C کمی برجسته شده، تصویر ۳- سمت چپ: الگوریتم ایجاد شمسه هیجده پر

### ۴-۱-۲-۴ - مرحله دوم، سوم: الگوریتم ترسیم خطوط شعاعی و شروع طبقات یزدی بندی

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



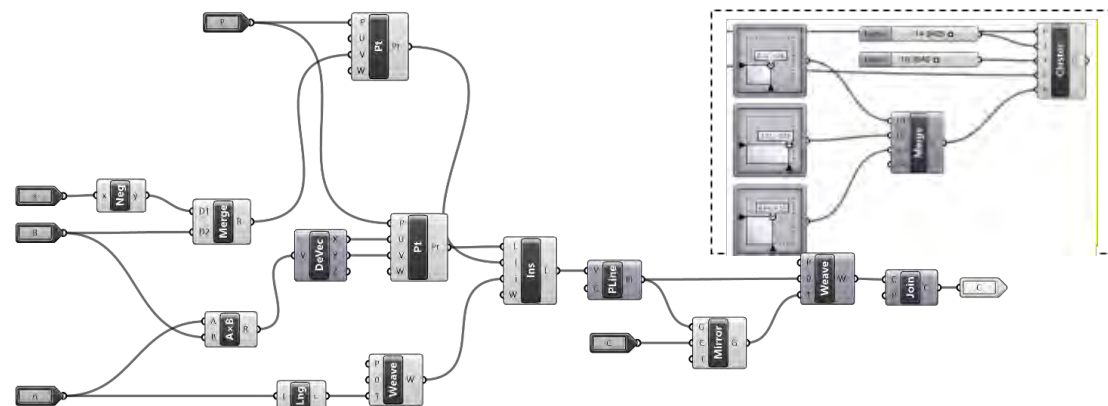
تصویر ۴- سمت راست: شمسه A را یک بار با نقاط وسط اضلاع ۱۸ ضلعی به Longest list می دهیم تا آن ها را بر اساس تعداد لیست جدا کند. بدین ترتیب نقطه A در یک لیست تکی جداگانه و نقاط مرکز اضلاع ۱۸ ضلعی در یک لیست ۱۸ تایی جداگانه دسته بندی می شوند.

تصویر ۵- سمت چپ: برای این کار به امتداد شعاع به عنوان 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 می دهیم.

### ۴-۱-۳-۴ - مرحله چهارم: ترسیم ستاره

دو نقطه از ستاره که روی محور قرار گرفته اند از جابه جایی مرکز ستاره در امتداد خط شعاع بدست می آیند و سه نقطه دیگر با کامپوننت MD Slider

که همزمان نقطه را در دو جهت روی صفحه جابه جا می کند.

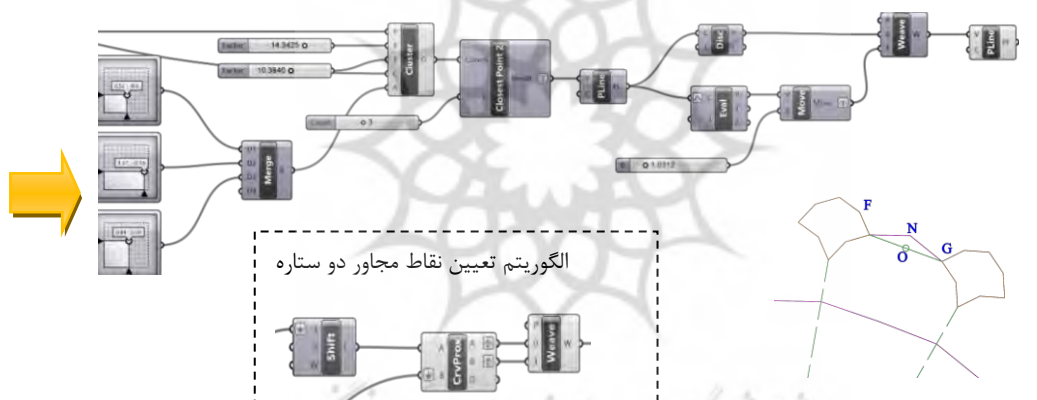


تصویر ۶- الگوریتم ترسیم ستاره در کلاستر فوق، از ورودی P صفحه مختصات محلی و از ورودی C خط شعاع را وارد می‌کنیم

#### ۴-۱-۴- مرحله پنجم: ترسیم خط شکسته بین دو ستاره

برای این کار 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 رنگ ارتباطی بین ستاره‌ها

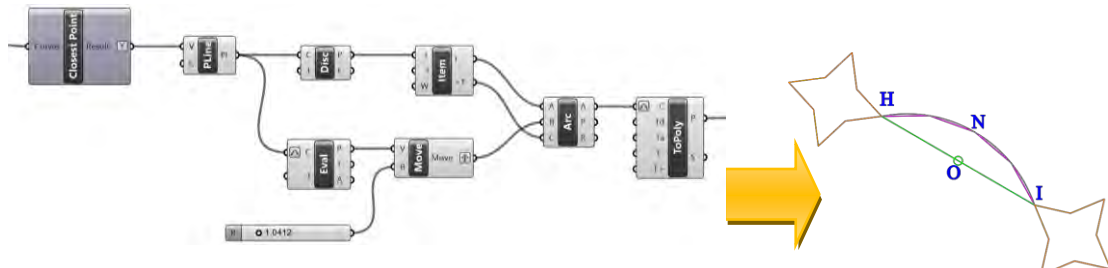
#### ۴-۱-۵- مرحله ششم: ترسیم ستاره‌های پای پنجم و خط واصل آن‌ها

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 پیدا کردن 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

قبل از ترسیم نقاط مجاور دو ستاره را بدست آوردیم. 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 بدست آید و سپس با کامپوننت Discontinuity دو سر هر پاره خط H و I را گرفته و سپس با کامپوننت Arc از سه نقطه H

چهارم کامل شود. این فرایند در همه طبقات تکرار می شود. بدین ترتیب که ابتدا ستاره را ترسیم کرده بین آنها خط شکسته ترسیم می کنیم.

I و N یک کمان عبور می دهیم. با کامپوننت Curve to Polygon این کمان را به یک خط شکسته تبدیل می کنیم. با کامپوننت Weave خط های شکسته را با ستاره ها یکی می کنیم تا تراز

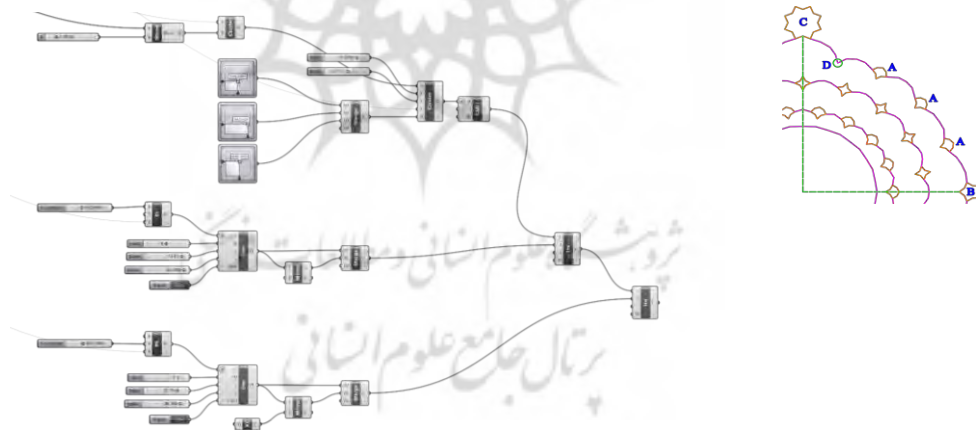


تصویر ۸- ترسیم خط شکسته بین دو نقطه با بیش از یک نقطه شکست. تصویر ۹- سمت چپ: الگوریتم ترسیم خط شکسته بین دو ستاره با بیش از یک نقطه شکست

#### ۴-۱-۶- مرحله هفتم: ترسیم ستاره های پای چهارم

هشت پر و در محور دیگر بجای B ستاره پنج پر قرار گیرد.

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



تصویر ۱۰- الگوریتم ترکیب ستاره های پای چهارم

بدست آورده و دوباره قرینه می کنیم و ۴ نقطه بدست آمده را در محور Z جابجا می کنیم تا با بقیه پلان در یک تراز قرار گیرد. این مراحل را در یک کلاستر خلاصه می کنیم.

#### ۴-۱-۷- مرحله هشتم: ترسیم نقطه شکست تراز چهارم

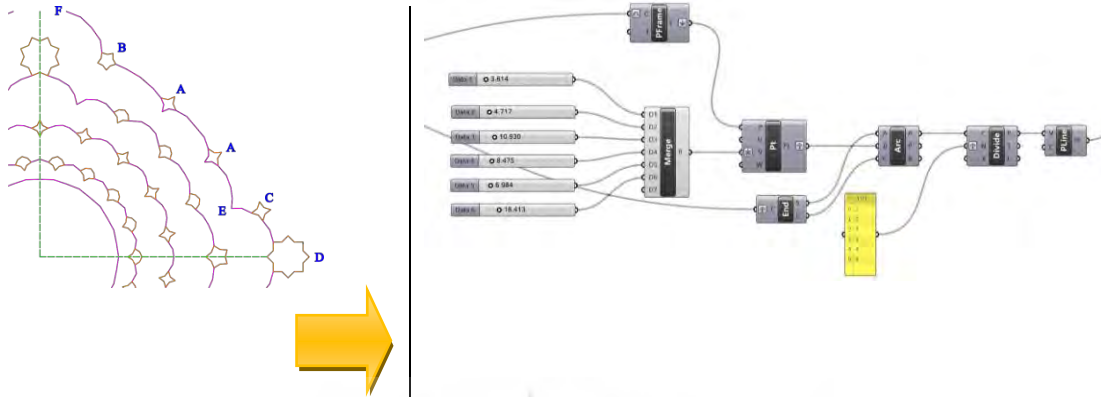
برای ترسیم نقطه D ابتدا نقطه ای را روی صفحه مختصات مشخص می کنیم و موقعیت آنرا در دو جهت مختصات کم و زیاد می کنیم و قرینه آنرا نیز



۴-۱-۹- 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.

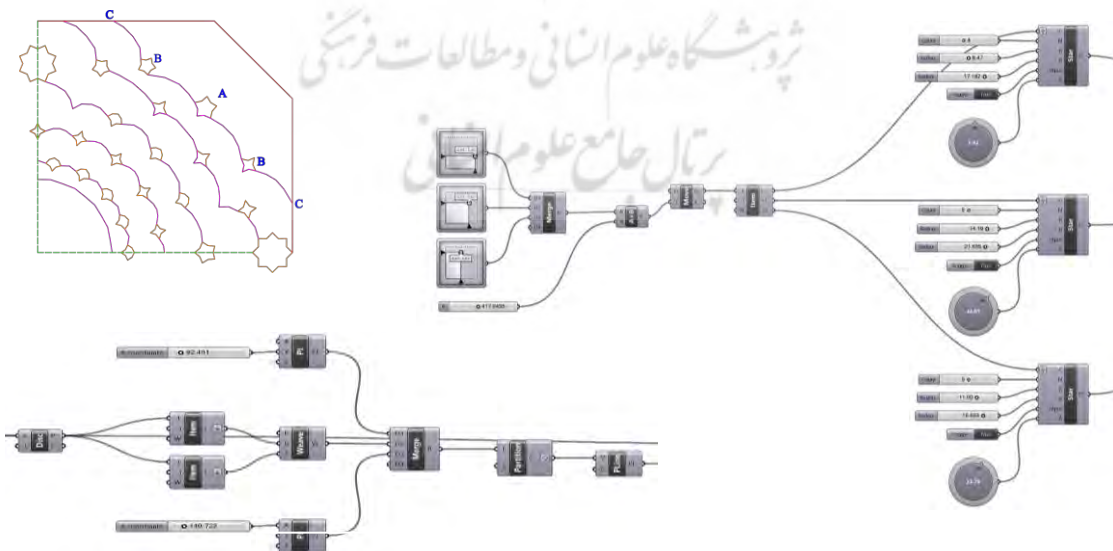


تصویر ۱۵- الگوریتم ترسیم خط شکسته بین نقاط مجاور تراز سوم؛ اعداد وارد شده به کامپوننت Merge (تعیین کننده انحنای قوس لبه تراز) در نتیجه برداشت‌های محلی با متر لیزری حاصل شده و بصورت نسبی قابلیت جابه‌جایی نسبت به یکدیگر را دارا می‌باشند. بدین ترتیب از دو نظر می‌توان به ترکیب‌های متنوعی رسید. ۱. انحنای کمان ۲. تعداد نقاط شکست می‌توان پارامترهای فوق را برای کمان‌های متعدد از یک کامپوننت 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.

۴-۱-۱۰- 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 ستاره‌های تراز دوم- تصویر ۱۷- سمت چپ: ترسیم خط مستقیم بین دو نقطه مجاور از دو ستاره

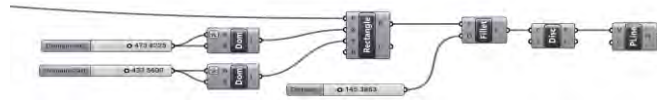
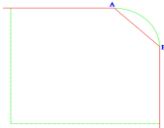


#### ۴-۱-۱۲- مرحله سیزدهم: گوشه‌های

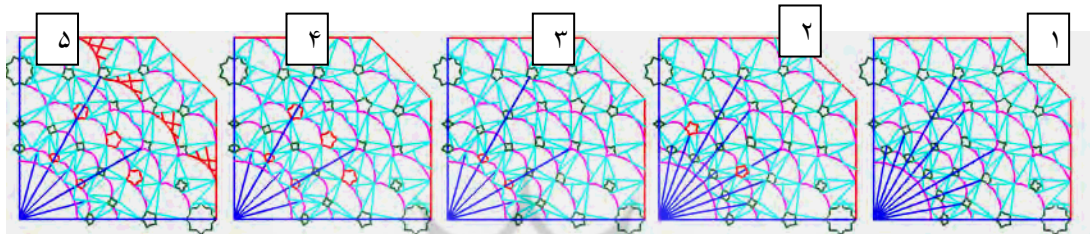
زمینه

با توجه به اینکه زمینه یزدی بندی یک مستطیل پخ خورده است و میزان پخ آن اختیاری است، ابتدا

مستطیل را ترسیم می‌کنیم و گوشه آنرا Fillet می‌کنیم و از دو نقطه ابتدا و انتهای کمان بدست آمده یک خط ترسیم می‌کنیم.



تصویر ۲۴- ترسیم کمان بین دو نقطه، جهت ریش به حاشیه گنبد



تصویر ۲۵- تصاویر حاصل از تغییرات در عناصر یزدی بندی قبل از ارتفاع دهی به طبقات، شماره یک وضع موجود هشت بهشت هشت، در شماره دو ستاره‌های تراز پنجم از ۴ پر 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 ۱۲ 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 تصویر ۹ از کامپوننت Curve to Polyline استفاده شده، ورودی دوم این کامپوننت 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 از ۱) تا به تعداد تقسیمات مورد نیاز (در این حالت ۶ تقسیم) دست یافت.

#### ۴-۱-۱۳- مرحله چهاردهم: ارتفاع دهی به

طبقات یزدی بندی با رسم کمان بین طبقات

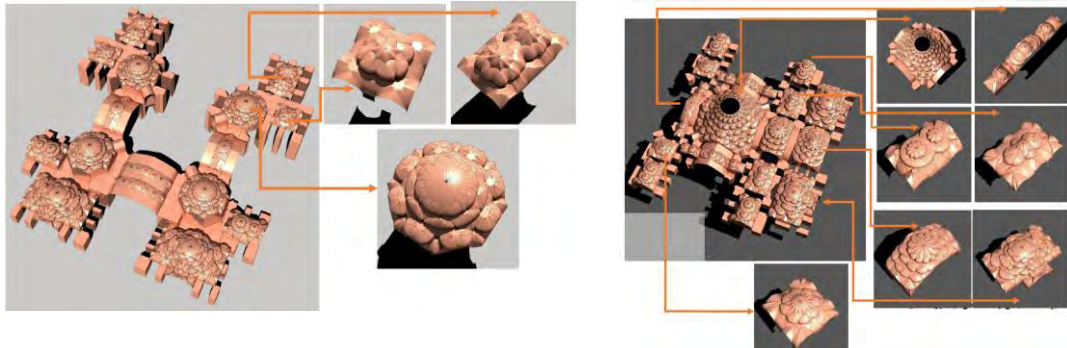
ارتفاع طبقات یکسان هستند؛ اندازه آن برابر است با ارتفاع وضع موجود تقسیم بر تعداد طبقات ابتدا مکان شمس در بالاترین نقطه ممکن و همچنین پای اولین تراز در پایین ترین نقطه مشخص می‌شود. اگر اختلاف ارتفاع این دو نقطه H و تعداد طبقات n باشد ارتفاع هر طبقه برابر است با  $H/n$  اگر ارتفاع کل کار H یا تعداد طبقات n تغییر کنند به تبع آنها فاصله طبقات متوالی هم تغییر خواهند کرد. پس از تکمیل پلان برای ترسیم کمان

بین طبقات یزدی بندی بطور کلی باید نقاط خاصی از هر تراز را جدا کرده 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 پیدا کردن و مرتبط کردن نقاط، متغیر خواهد بود و به روش‌های متنوعی باید انجام شوند. برای ارتفاع دادن به طبقات ابتدا همه خطوط بدست آمده از طبقات مختلف را با کامپوننت Entwine یکی می‌کنیم و سپس با کامپوننت Series جابه‌جایی همه آن‌ها را به صورت پارامتریک، یک جا وارد می‌کنیم و نهایتاً برای جدا کردن، آن‌ها را با کامپوننت Explode Tree





#### ۴-۱-۱۴- جانمایی ۱۴ یزدی‌بندی در فضاهای آسمانه مرکز و غرفه‌های پیرامونی در پلان مجموعه هشت‌بهشت



تصویر ۳۰- سمت راست: شماره‌های ۲-۳-۴ برداشت شده از طبقه همکف کوشک هشت‌بهشت تصویر ۳۱- سمت چپ: برداشت از آسمانه‌های طبقه بالا

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 تقریباً غیرممکن است. مطالعات گذشته نشان می‌دهد که این سازه‌ها به وجود انواع ناکاملی‌ها از جمله ناکاملی‌های هندسی، ناکاملی‌های مصالح (مانند تنش پسماند و ...) یا ترکیبی از این دو حساس هستند. ۱. ناکاملی در سازه‌ها بر دو نوع است: ناکاملی هندسی<sup>۱</sup>: که شامل مواردی نظیر، انحنای اولیه‌ی اعضا سازه‌ای؛ انحراف گره‌های سازه‌ای از هندسه‌ی ایده‌آل ۲. ناکاملی‌های مکانیکی<sup>۲</sup> که شامل مواردی نظیر، تنش پسماند؛ خروج از مرکزیت بار؛ عدم انطباق (ناکاملی در طول اعضا)<sup>۳</sup> می‌باشند (عابدی، شکسته‌بند، ۱۳۹۳). در این پژوهش ناکاملی مورد بررسی در اعضای سازه‌ای یزدی‌بندی، انحنای اولیه‌ی اعضای سازه‌ای گرفته‌شده است و میزان آن ۰/۰۰۵ گرفته شده است که به عنوان ضریبی از موداوم می‌باشد. پدیده‌های ناپایداری در سازه‌های فضاکار را می‌توان در سه رده‌ی اصلی طبقه‌بندی نمود: فروجهش گرهی،

#### ۵- مشبک سازی هندسه یزدی‌بندی گنبد مرکزی هشت بهشت در راستای تحلیل سازه‌ای

پژوهش حاضر قصد دارد هندسه گنبدی بنای هشت‌بهشت اصفهان را در قالب یک سازه مدرن تعریف کند. برای این کار نیاز است تا مدل‌های تطابقی معماری به دست آمده، از نظر سازه‌ای محک زده شوند تا پایایی و ایستایی آن تأیید شده تا نیازهای معماری امروزی ذکر شده را برآورده کند. گنبد مشبک، یک سیستم سازه فضاکار متشکل از یک یا چند لایه (از اجزا) است که در تمامی جهات به فرم قوسی درآمده است. 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

کمانش عضوی و خرابی پیشرونده. روش پژوهش حاضر عملاً به صورت 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 صورت می‌پذیرد.

### ۵-۱- مدل‌سازی عناصر محدود در اعضای سازه‌ای یزدی بندی

برای انجام تحلیل‌های پایداری با استفاده از روش عناصر محدود انجام تحلیل‌های غیرخطی هندسی و مکانیکی ضروری است. برای انجام این کار از نرم افزار المان محدود ABAQUS CAE 6.14.2 استفاده شده است. سازه‌ها با توجه به غیرخطی‌های موجود در آنها، دارای رفتار غیرخطی سخت‌شونده و غیرخطی نرم‌شونده هستند. در سازه‌های تک‌لایه با زاویه کوچک بین اعضای سازه، کوتاه‌شدگی محوری به طور قابل ملاحظه ای بزرگ می‌باشد و بر اثر این کوتاه‌شدگی‌ها 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، هر دو 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<sup>۴</sup> استفاده شده است. در این مطالعه پایداری سازه فضاکار یزدبندی هشت‌بهشت تک‌لایه با انجام تحلیل‌های استاتیکی خرابی با

استفاده از روش‌های عناصر محدود، با در نظر گیری 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 قرار گرفته است.

### ۵-۲- مودهای کمانشی سازه یزدی بندی کوشک هشت‌بهشت

مودهای کمانشی بیانگر گرایش سازه به تغییر مکان یا مودنمو، تغییر مکان 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، پایین‌ترین مود کمانشی نامیده می‌شود. انرژی پتانسیل در هنگام تغییر مکان در امتداد پایین‌ترین مود کمانشی، دارای حداقل مقدار بوده و سازه‌های واقعی تحت فرایند بارگذاری تمایل به تغییر مکان در این جهت دارند. برای تعیین دقیق رابطه بار و تغییر مکان، ادامه تحلیل در مرحله پس کمانشی، یعنی تحلیل پاسخ کامل بار-تغییر مکان، ضروری است (چن، شن، ۲۷۸-۲۷۱:۱۹۹۳).

### ۵-۳- مشخصات سازه‌های یزدی بندی 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

تمامی گنبدها از مقاطع یکسان برای تحلیل و مقایسه بهتر نتایج استفاده شده است. برای پژوهش حاضر از چهار گنبد مربعی به دهانه ۳۰ متر و نسبت های 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 استفاده شده است که جمعا ۱۶ مدل می شود.

نامتوازن برف طبق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران، بار حرارتی تحت تغییرات دمایی  $\pm 25$  درجه سلسیوس و همچنین بار قائم زلزله می باشد. برای مصالح از فولاد ST52 با تنش تسلیم  $F_y = 52 \times 10^6 \text{ kg/m}^2$  و مدول الاستیسیته  $E = 2.1 \times 10^{10} \text{ kg/m}^2$  و با سطح مقطع tube به صورت چهار مقطع مختلف برای هر گنبد استفاده شده است. در پایان مرحله طراحی باتوجه به نزدیک بودن مقاطع به هم از لحاظ ابعادی، برای

جدول ۳- مدل های موردی استفاده شده در این پژوهش

گنبد تک لایه فضاکار یزدی بندی هشت بهشت (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

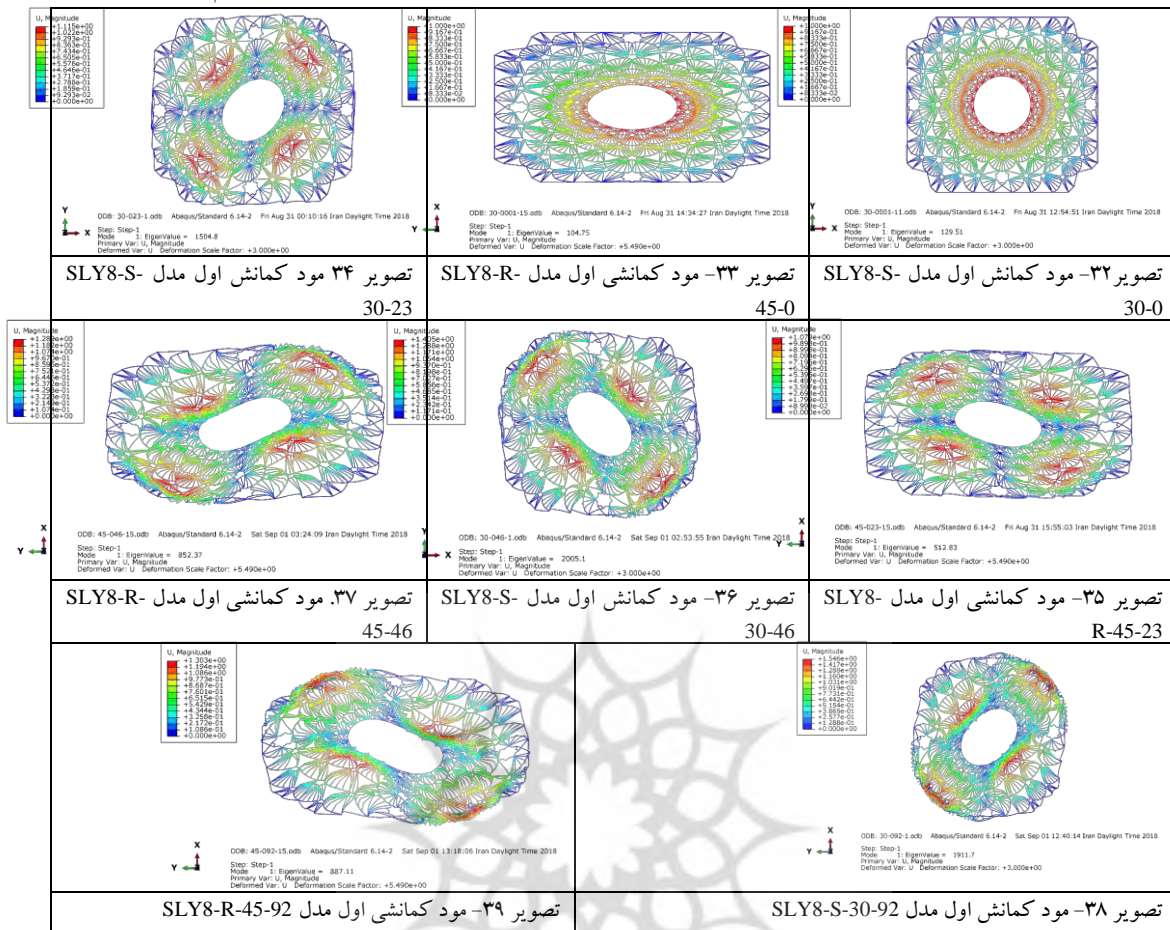
پایداری ابتدا بارگذاری متوازن برف به صورت افزایشی مورد استفاده قرار می گیرد. برای تحلیل تحت اثر بارگذاری افزایشی برف، ابتدا سازه ها تحت آنالیز کمانشی<sup>۵</sup> قرار می گیرد. سپس با اعمال ناکاملی ۰,۰۰۵ به عنوانی ضریبی از مود کمانشی اول، سازه تحت آنالیز طول - کمان قرار می گیرد. تصاویر ۳۲ تا ۳۹ شکل مودهای کمانشی اول را برای مدل ها نمایش می دهند.

باتوجه به این که در تحقیق حاضر اثر شرایط تکیه گاهی مورد بررسی نیست. بنابراین مفاصل اطراف سازه با توجه به معماری سازه به صورت تکیه گاه های ساده در نظر گرفته شده اند.

#### ۵-۴- تحلیل سازه فضاکار یزدبندی کوشک هشت بهشت

تحلیل تحت اثر بارگذاری متوازن برف، تمامی مدل ها با استفاده از آیین نامه AISC-360-10 به صورت حدی طراحی شده اند. برای تحلیل

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



منبع: نگارندگان

با توجه به آنالیز کمانشی انجام شده نتایج بار بحرانی کمانش برای پنج مود اول کمانش به صورت زیر ارائه می شود:

جدول ۵- مودهای کمانش مدلها تحت اثر بارگذاری متوازن برف

آنالیز کمانشی تحت بارگذاری متوازن برف								
SLY8-S-30-0	SLY8-S-30-23	SLY8-S-30-46	SLY8-S-30-46	SLY8-R-45-0	SLY8-R-45-23	SLY8-R-45-46	SLY8-R-45-92	
129.51	1504.8	2005.1	1911.17	104.75	512.83	852.37	887.11	مود ۱
377.68	1737.9	2436.1	2515.6	222.39	584.74	985.61	1076.5	مود ۲
432.77	1814.8	2512.2	2530.6	313.39	640.42	1040.9	1108.1	مود ۳
553.18	2265	3235.5	3329.4	365.72	687.23	1168.6	1307.2	مود ۴
646.23	2267.5	3280.4	3483.1	404.32	828.04	1343	1488.3	مود ۵

منبع: نگارندگان

با توجه به 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، مود اول 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 تغییر مکان نقطه مشخصی از سازه را نشان می‌دهد.

جدول ۶- نمودارهای بار-تغییر مکان، تحت بار متوازن برف در سازه فضاکار با هندسه یزدی بندی حاکم بر ساختار

<p>تصویر ۴۲- نمودار بار تغییر مکان مدل‌های SLY8-R-45-46 و SLY8-S-30-46</p>	<p>تصویر ۴۱- نمودار بار تغییر مکان مدل‌های SLY8-R-45- و SLY8-S-30-23</p>	<p>تصویر ۴۰- نمودار بار تغییر مکان مدل‌های SLY8-R-45-0 و SLY8-S-30-0</p>
<p>تصویر ۴۵- مقایسه نمودار بار تغییر مکان مدل‌های با پلان مستطیلی</p>	<p>تصویر ۴۴- مقایسه نمودار بار تغییر مکان مدل‌های با پلان مربعی</p>	<p>تصویر ۴۳- نمودار بار تغییر مکان مدل‌های SLY8-R-45-92 و SLY8-S-30-92</p>

منبع: نگارندگان

با توجه به نمودارهای تصاویر ۴۰ تا ۴۳ بار-تغییر مکان سازه مشخص می‌شود؛ که سازه با پلان مستطیلی ظرفیت باربری کمتری نسبت به سازه با پلان مربعی دارد. همچنین تصویر ۴۴ نمودار بار-تغییر مکان را برای مدل‌های 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-تغییر مکان را برای

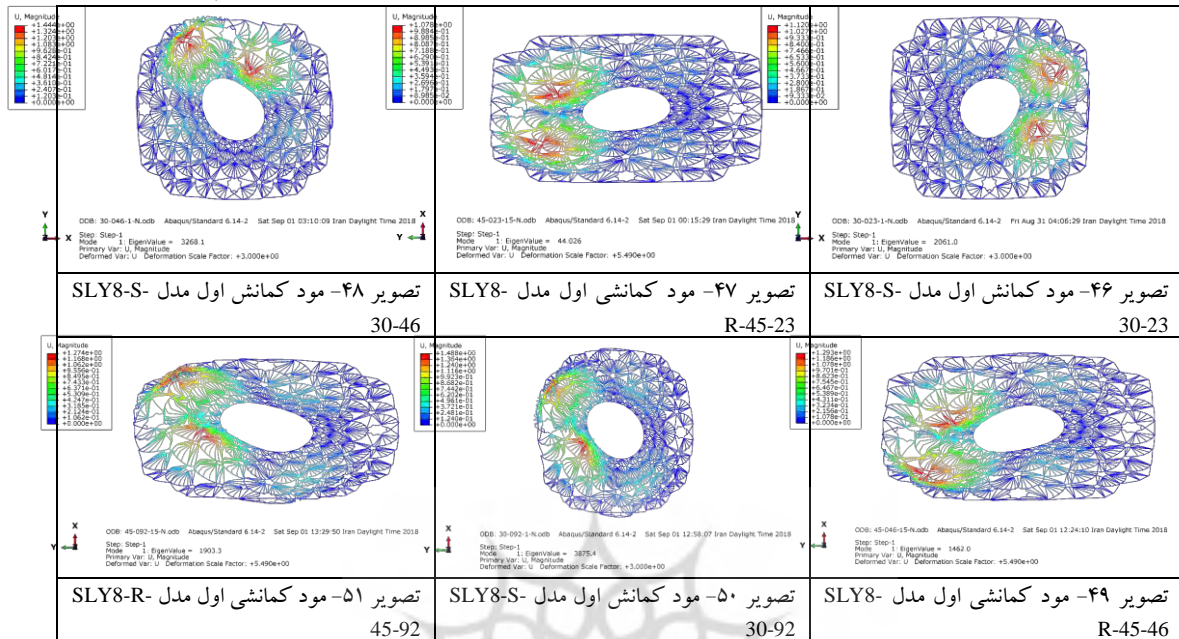
## ۵-۵- تحلیل تحت اثر بارگذاری نامتوازن برف

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

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.

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

جدول ۷- آنالیز کماتشی بر طبق مود اول جهت بارگذاری نامتوازن برف در سازه فضاکار با هندسه یزدی بندی حاکم بر ساختار



منبع: نگارندگان

با توجه به آنالیز کماتشی انجام شده برای بار برف نامتوازن، نتایج بار بحرانی کماتش برای پنج مود اول کماتش به صورت زیر ارائه می‌شود:

جدول ۸- آنالیز کماتشی تحت بارگذاری نامتوازن برف

	SLY8-S-30-0	SLY8-S-30-23	SLY8-S-30-46	SLY8-S-30-46	SLY8-R-45-0	SLY8-R-45-23	SLY8-R-45-46	SLY8-R-45-92	
-		2061	3268.1	3875.4	-	880.52	1462	1903.3	مود ۱
-		2453.2	4212.8	4899.9	-	1151.94	1931.7	2467.5	مود ۲
-		3555	5304.2	5468.8	-	1480.92	2319.5	2562.5	مود ۳
-		3989.2	6003.8	6018.77	-	1709.6	2677.6	2918.6	مود ۴
-		4727.8	7060.7	6917.7	-	2081.6	3228.3	3560.3	مود ۵

منبع: نگارندگان

مود اول اعمال می‌کنیم. تصاویر ۵۲ تا ۵۳ نمودار بار افزایشی برف و تغییر مکان نقطه مشخصی از سازه را تحت بار نامتوازن برف نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه بار بحرانی کماتش تمامی مودها در مود اول در تمامی مدل‌ها کمتر از بقیه مودهاست و با توجه به اینکه در سازه‌های فضاکار تک‌لایه مود غالب مود اول می‌باشد لذا برای انجام آنالیز پایداری به روش طول-کمان، ناکاملی را به

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

<p>تصویر ۵۴- نمودار بار تغییر مکان مدل های SLY8-S-30-92 و SLY8-R-45-92 (نامتوازن برف)</p>	<p>تصویر ۵۳- نمودار بار تغییر مکان مدل های SLY8-R-45-46 و SLY8-S-30-46 (نامتوازن برف)</p>	<p>تصویر ۵۲- نمودار بار تغییر مکان مدل های SLY8-R-45-23 و SLY8-S-30-23 (نامتوازن برف)</p>
<p>تصویر ۵۶- مقایسه نمودار بار تغییر مکان مدل های با پلان مستطیلی</p>	<p>تصویر ۵۵- مقایسه نمودار بار تغییر مکان مدل های با پلان مربعی</p>	

منبع: نگارندگان

تطبیق پارامترهای هندسی گنبد فضاکار با یک فرم آزاد در راستای سنجش پایایی و ایستایی هندسه در این فرم ها می باشد. به این ترتیب کارآمدی یا ناکارآمدی آن، در راستای اطمینان از آزادی عمل و امکان پذیر بودن این روش برای معماران جهت تطبیق طرح های خود با هندسه های سنتی صورت می گیرد. با توجه به نتایج مشاهده شده برای سازه فضاکار گنبد یزدی بندی هشت بهشت نتیجه می شود، که ظرفیت باربری این نوع از سازه فضاکار نسبت به مقاطعی که برای طراحی آن استفاده شده است بسیار کم است؛ بنابراین یک طرح فرم آزاد فضاکار پیشنهاد می شود، تا با استفاده از آن بتوان نیازهای طراحی را برطرف کرد و سازه را از نظر مقاطع طراحی، اقتصادی تر، تعداد المان ها را کمتر و از نظر زیبایی و ایده پردازی معماری به فرم جدیدی از سازه های فضاکار فرم آزاد با تاشه پردازی سنتی و پیکربندی

تصویر ۵۵ نمودار بار-تغییر مکان را برای مدل های SLY8-S-30-0، SLY8-S-30-23، SLY8-S-30-46، SLY8-S-30-92 نشان می دهد. با توجه به این نمودار، مشخص می شود 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-تغییر مکان 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 می دهد.

۶- تطبیق پارامترهای هندسی گنبد فضاکار با پایه یزدی بندی در فرم آزاد مرکزگرا

نظر افزایش ظرفیت باربری انتخاب شود. برای مدل‌های مستطیلی سازه فضاکار فرم آزاد یزدی‌بندی هشت‌بهشت، نیز می‌توان به نتایج مدل مربعی متناظر استناد کرد. برای سه مدل در نظر گرفته شده، مقاطع یکسان مانند مدل SLY8-S-30-0 در طراحی در نظر گرفته شد و این مدل‌ها تحت آنالیز کمانشی و سپس تحت آنالیز طول-کمان با میزان ناکاملی ۰/۰۰۵ موداول قرار گرفتند. با توجه به اینکه در گنبد فرم آزاد 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 استفاده شده است. (تصاویر ۵۷ تا ۵۹ در نرم افزار ABAQUS تولید شده است.)

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 یافته است. 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، ۴/۲۰ و ۵/۹۰ متر برای ارتفاع گپ از پایین‌ترین نقطه گنبد برای سه مدل مختلف مربعی در نظر گرفته شد؛ تا بهینه‌ترین ارتفاع برای گپ از

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

تصویر ۶۰. نمودار بار تغییر مکان سازه فضاکار فرم آزاد پیشنهادی با ارتفاع متغیر برای گپ با پلان مربعی	تصویر ۵۹. مود کمانشی اول مدل سوم $\text{Gap Height} = 5/90$	تصویر ۵۸- مود کمانشی اول مدل دوم $\text{Gap Height} = 4/20$	تصویر ۵۷- مود کمانشی اول مدل اول $\text{Gap Height} = 1/96$

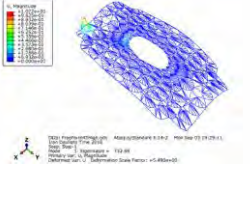
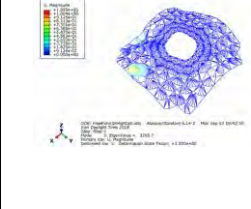
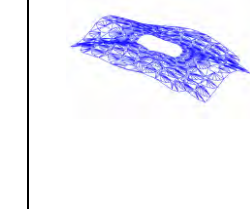
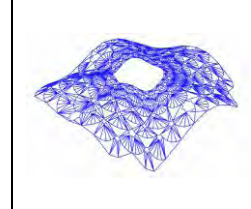
منبع: نگارندگان

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 ذکر شده 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.)

با توجه به نمودار ۶۰ کاملاً 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 تصاویر ۶۱ و ۶۲ با ارتفاع گپ میانی ۵/۹۰ ایجاد و باز طراحی می‌شوند تا هم از نظر قطر و ضخامت مقاطع تقلیل پیدا کنند و هم از نظر اقتصادی و وزن، مناسب باشند. نتایج حاصل از طراحی مجدد همان‌طور که



جدول ۱۱- آنالیز کمانشی و سپس آنالیز به روش طول - کمان با ناکاملی ذکر شده فقط به صورت بارگذاری متوازن برف

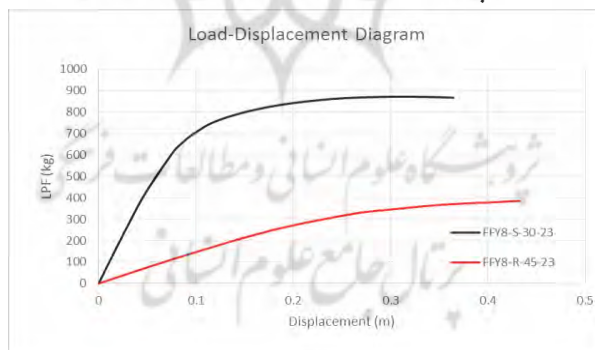
			
تصویر ۶۴- مود کمانشی اول مدل FFY8-R-45-23	تصویر ۶۳- مود کمانش اول مدل FFY8-S-30-23	تصویر ۶۲- مدل FFY8-R-45-23	تصویر ۶۱- مدل FFY8-S-30-23

جدول ۱۲- مدل‌های استفاده شده برای سازه های فرم آزاد مرکز گرا با پایه یزدی بندی کوشک هشت بهشت

گنبد تک لایه فضاکار فرم آزاد با تاشه برگرفته شده از یزدی بندی هشت بهشت (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 تصویر ۶۵ می توان مشاهده کرد سازه فرم آزاد پیشنهاد شده دارای ظرفیت باربری بیش از حد نیاز برای بار افزایشی برف است و به راحتی می تواند نیازهای بارگذاری برای طراحی را برطرف نماید. مقاطعی که برای طراحی این سازه ها در نظر گرفته شده اند با مشخصات مکانیکی قبلی و با مقاطع جدول ۱۳ هستند (که در بازار موجود می باشد). با مقایسه این مقاطع با مقاطع استفاده شده برای سازه فضاکار گنبدی یزدی بندی هشت بهشت می توان کاهش وزن سازه و ضخامت اعضا را به راحتی ایجاد کرد.



تصویر ۶۵- نمودار بار-تغییر مکان سازه های فرم آزاد با بار متوازن برف

جدول ۱۳- مقاطع طراحی شده برای مدل های 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

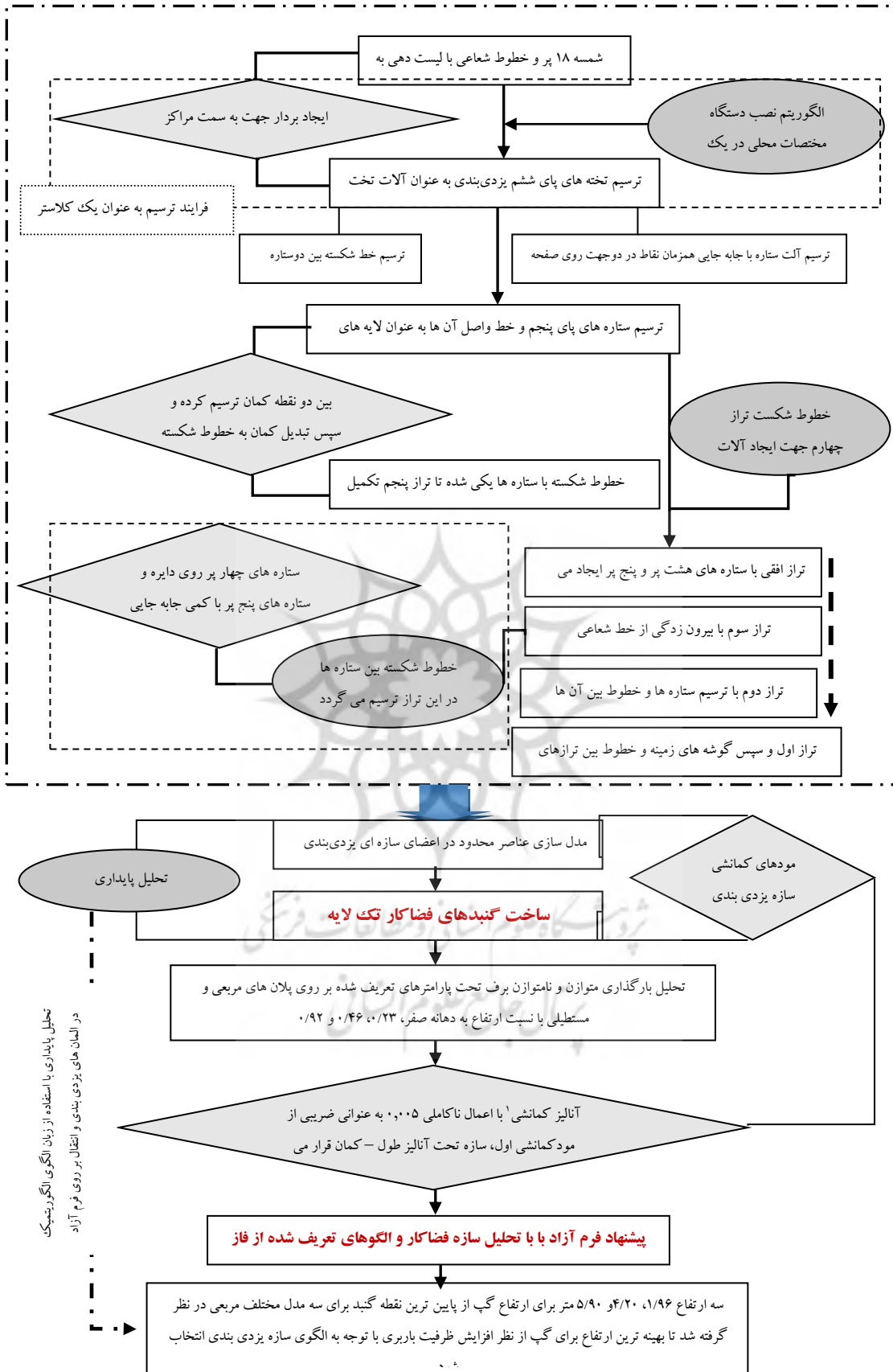
منبع: نگارندگان

## 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 شمس ۱۸ پر آغاز می گردد در مرحله بعدی؛ ترسیم تخته‌های پای ششم یزدی بندی به عنوان آلات تخت، سپس، ترسیم آلت ستاره با جابه‌جایی همزمان نقاط در دو جهت روی صفحه ایجاد می گردد. در مرحله بعد، ترسیم خط شکسته بین دو ستاره، با بررسی هر ستاره با ستاره کناری و مرتب سازی لیست ها صورت می پذیرد. در ادامه، ترسیم ستاره‌های پای پنجم و خط واصل آنها به عنوان لایه‌های تخت یزدی بندی می باشد. در مرحله بعد، تراز افقی با ستاره‌های هشت پر و پنج پر ایجاد می گردد؛ سپس خطوط شکست تراز چهارم جهت ایجاد آلات سینه‌فخری در این مرحله ترسیم می گردد. طی مراحل بعدی وارد ترسیم تراز سوم با بیرون زدگی از خط شعاعی شده، در نهایت خطوط شکسته بین ستاره‌ها در این تراز، ترسیم می گردد. 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 می گردد. این زبان الگوی ساده شده در طی ۱۴ مرحله وارد تحلیل سازه ای در فرم گنبد و معاصر سازی طی آزاد مرکز با قابلیت تطبیق پارامتری با یزدی بندی صورت می پذیرد.

## ۸- نتیجه گیری

در مقاله حاضر، آسمانه کوشک هشت بهشت اصفهان به صورت یزدی بندی تخت دار با حلقه‌های افقی مورد بررسی قرار گرفت. با آنالیز ترسیم هندسی سنتی در آسمانه، نحوه تکثیر طبقات یزدی بندی در سطح مورد بررسی قرار گرفت. طی بخش اول مقاله، زبان-الگو الگوریتمی، از ترسیم طبقات یزدی بندی در طی ۱۴ مرحله مشخص گردید. پارامترهای یزدی بندی شدیداً 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 فرم آزاد مرکزگرا با قابلیت تطبیق با الگوی مدل سازی شده گشت. سازه‌های فضاکار مورد تحقیق در این مطالعه با توجه به غیرخطی‌های موجود در آنها، اکثراً دارای رفتار غیرخطی سخت شونده بوده و مدل‌های بسیار کمی از آنها دارای رفتار غیرخطی نرم شونده 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 نرم شونده تاکید گشت.



نسبت ارتفاع به دهانه  $0/92$  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 به دلیل وجود اعضای با لاغری بسیار کم در سازه، به جای کماتش اعضا، پدیده گسیختگی یا تسلیم اعضا، اتفاق می‌افتد. بنابراین این نوع سازه‌ها و ردازی صرفاً جنبه معماری و زیبایی داشته و برای سازه‌های 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 مناسب بودن سازه از لحاظ باربری، اقتصادی بودن، وزن کم، لاغری مناسب اعضای سازه‌ای باید روی تاشه‌پردازی عملیات بهینه‌سازی صورت گیرد.

با انجام تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی مشاهده شد که بیشترین نوع مکانیزم خرابی می‌تواند در حالت بارگذاری گسترده متوازن برف صورت گیرد.

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 کماتشی نشان داد. با توجه به رفتار سازه می‌توان نتیجه گرفت که نسبت ارتفاع به دهانه صفر، رفتار سخت‌شوندگی است و رفتار شبیه صفحات تحت بارگذاری برون صفحه‌ای، با تکیه‌گاه‌های کناری از خود نشان می‌دهد.

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

## پی‌نوشت‌ها

- <sup>1</sup> Geometrical imperfection
- <sup>2</sup> Mechanical imperfections
- <sup>3</sup> Lack of Fit
- <sup>4</sup> Arch Length Method (Riks Method)
- <sup>5</sup> 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.

- صاحب محمدیان منصور، سینا فرامرزی. ۱۳۹۰. گونه شناسی و تدوین ساختار هندسی کاربردی 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. شماره ۱۷. 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
- ریسی، مهدی. بمانیان، محمدرضا. تهرانی، فرهاد. ۱۳۹۰. بازنگری در مفهوم کاربردی 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. شکسته بند، ب. ۱۳۹۳. مبانی پایداری سازه‌ها. دانشگاه صنعتی سهند. انتشارات: شبکه‌ی جامع کتاب گیسوم. صفحه ۹۹۳
- مستغنی، علیرضا. علیمراد، 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. دوره ۸. شماره ۱۶. صفحه ۱۰۳-۱۲۲
- مهدوی نژاد، مهدی. شهری، شقایق. ۱۳۹۳. معاصر سازی الگوی مسکن بومی تهران با کاربرد روش های مقدراری. فصلنامه هویت شهر. شماره ۲۰. زمستان. دوره ۸. شماره ۲۰. صفحه ۳۵-۴۸
- مردمی، کریم. سهیلی فرد، مهدی. آقاعیزی، 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. شماره ۵-۲. 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; Mahdavejad, 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 proces of picture.
- Raeszade, M.. & Mofidi, H. (1995). Revival of a Forgotten Art. Tehran, Iran: Mola.
- Shaarbaf, A. (1993). Ghereh v karbandi. Tehran. Iran: Entesharat Elmi Farhanghi.