

# بهبود نظم گنبد فضاکار بیدبلند خوزستان با استفاده از الگوریتم پیمایش دایره‌ای و

## بهینه‌سازی ژنتیک

پریسا همتیان دهکردی<sup>۱\*</sup>، علی محدث خراسانی<sup>۲</sup>، مرجان گودرزی<sup>۲</sup>، محمد چایچی رقیمی<sup>۱</sup>

۱- گروه ریاضی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲- دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پلی تکنیک، تهران، ایران

\* Parisa-hemmatian@pnu.ac.ir

### چکیده

پروفسور هوشیار نوشین و سایر محققان در سه دهه‌ی پیش شاخص‌های نظم سازه را به صورت کمی تعریف کردند و شیوه‌های مختلفی جهت بهبود نظم سازه‌ها نظیر تراپویش، تصویرگام به گام، پیمایش کروی، تکنیک‌های بازگشتی و ... را برای ایجاد رده‌ای خاص از سازه‌های فضاکار (گنبد‌ها و تخت) و پوسته‌های شبکه‌ای که به صورت چندوجهی طراحی شده بودند، ارائه دادند و بسته به نوع پروژه یک یا چند از این شاخص‌ها را جهت تحلیل و مقایسه‌ی نظم سازه‌ها به کار بردند. با توجه به اهداف مختلف تعریف نظم هم متفاوت است. نظم مورد بررسی در این پژوهش به افزایش المان‌ها (اضلاع) با طول‌های یکسان یا تقریباً یکسان، کاهش تعداد المان‌ها با طول‌های متفاوت، کاهش تعداد تیپ‌های طولی المان‌ها (بازه‌های طولی) و کاهش تعداد شکل‌های متفاوت وجوه با حفظ هندسه‌ی فرم بر می‌گردد. هدف این پژوهش مطالعه‌ی شاخص‌های نظم و همچنین بررسی و تحلیل بهبود نظم مثلث‌بندی دلانی حاصل از نقاط گنبد فضاکار تک لایه‌ی بیدبلند خوزستان با الگوریتم پیشنهادی: به کار بردن الگوریتم پیمایش دایره‌ای و استفاده از بهینه‌سازی ژنتیک (با استفاده از کمیته‌سازی شاخص‌های مختلف نظم) در دستیابی به یک الگوی مناسب می‌باشد. جهت بررسی بهبود نظم الگوریتم‌هایی برای محاسبه‌ی شاخص‌های طولی، زاویه‌ای و مساحتی نظم ارائه داده، نتایج عددی این شاخص‌ها را محاسبه، تعریف کلی شاخص نظم را پیشنهاد نموده و نشان می‌دهیم این شاخص‌ها به تنهایی ملاکی برای سنجش و مقایسه‌ی نظم دو سازه نمی‌باشند. نتایج حاصل از این پژوهش در مباحث بهبود نظم سازه‌ها، فرمیابی و ایجاد طرح بهینه یک سازه موثر می‌باشد.

### کلمات کلیدی

گنبد، بهبود نظم، مثلث‌بندی دلانی، الگوریتم پیمایش دایره‌ای، الگوریتم ژنتیک.

امروزه به دلایل مختلف از جمله زیبایی، جذابیت، تکنولوژی ساخت، عملکرد، اقتصاد، نورپردازی، انرژی، پوشش فضاهای بزرگ، طراحی و ساخت سازه‌های فضاکار شبکه‌ای و مخصوصاً با پوشانه‌های شیشه‌ای بیشتر مورد توجه مهندسان بوده است. با استناد به گزارشی که در رابطه با "وضعیت موجود سازه‌های فضاکار" توسط انجمن بین المللی پوسته‌ها و سازه‌های فضایی (IASS) در سال ۱۹۸۴ انتشار یافت می‌توان یک سازه‌ی فضایی را به صورت یک سیستم سازه‌ای در نظر گرفت که از عضوهای خطی تشکیل یافته و طرز قرارگیری آنها به گونه‌ای است که بارها به صورت سه بعدی منتقل می‌شوند. یک سازه‌ی فضاکار اغلب شکلی صاف یا منحنی گونه به خود می‌گیرد [۱]. به علت طبیعت سازه و هندسه‌ی این نوع سازه‌ها جهت‌گیری اعضا در محل اتصالات بسیار متغیر هستند که این خود سبب ایجاد تنوع زیاد در اندازه‌المان‌ها و زوایا می‌شود، از اینرو همواره تلاش می‌شود تا عناصر متعدد در هر سازه در چند تیپ محدود طراحی شوند تا بتوان با انبوه‌سازی قطعات، در زمان و هزینه صرفه‌جویی نمود. سازه‌های فضاکار از نظر ساختار هندسی می‌توانند تخت، چلیک، استوانه، سهمی‌گون، گنبدی، آزاد و یا ترکیبی از اینها باشند. گنبد در دو جهت دارای انحناست. در صورتی که الگوی یک شبکه‌ی تخت را بر سطح منحنی تصویر نموده و تطابق دهیم، گنبد شبکه گونه‌ی تک لایه تشکیل می‌شود. گنبد از دیرباز در معماری ایران کاربرد فراوانی داشته و از اشکال بهینه و مقاوم محسوب می‌شود [۲]. نظم سازه‌ها به جهت مباحث ایجاد طرح بهینه، کاهش هزینه و زیباشناسی همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. طرح بهینه‌ی فرم یک سازه نه تنها باید از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد، بلکه باید الزامات آیین نامه‌ای را نیز برآورده کند [۳]. محققین برای اینکه بتوانند نظم هندسی یک سازه را به صورت کمی تعریف کنند و مورد ارزیابی و مقایسه قرار دهند، شاخص‌های عددی نظم را ارائه داده‌اند. این شاخص‌ها به مترهای اندازه‌گیری نظم یا پارامترهای هندسی یا درجه‌های نظم معروف هستند که برای تولید اطلاعات هندسی استفاده می‌شوند. در تحلیل و بررسی نظم تنها به مطالعه‌ی کیفیت شبکه پرداخته می‌شود، بنابراین مواردی چون ضخامت هموندها و پوشانه‌ها، مصالح مورد استفاده در پوشانه‌ها، وزن سازه و ... در نظر گرفته نمی‌شود و فقط شبکه‌ی خطی سازه متشکل از نقاط، خطوط، وجوه و زوایا مورد بررسی قرار می‌گیرد. تا کنون تعریف جامعی برای یک سازه منظم ارائه نشده است. اگر چه توافق نظر بر این است که درصد بالایی از عناصر سازه یکسان باشد و ایده‌آل این است که همه‌ی وجوه به کار رفته در سازه مشابه و طول همه‌ی عناصر یکسان باشد. یک پردازش را منظم می‌گویند اگر تفاوت طولهای عناصر نسبتاً کم باشد [۴-۵]. در علم مهندسی سازه برای اولین بار پروفسور هشیار نوشین<sup>۱</sup>، رامتین حق نظر<sup>۲</sup> و سایر محققان ابتدا شاخص‌های نرخ طولی و نرخ شکلی برای سنجش نظم چندضلعی به صورت رابطه‌های (۱) و (۲) تعریف کرده‌اند.

$$Lr = \frac{\text{Shortest edge length}}{\text{Longest edge length}} \quad (1)$$

$$Sr = \frac{\text{smallest internal angle of the polygon}}{\text{largest internal angle of the polygon}} \quad (2)$$

برد مقادیر این شاخص‌ها بین ۰ و ۱ می‌باشد و نرخ طولی (شکلی) ۱ متناظر با یک چندضلعی منظم است و برای گنبدهای ژئودزیک که از ترکیب وجوه مختلف حاصل می‌شود، شاخص‌های میانگین نرخ‌های شکلی، تعداد سازه‌های متفاوت عناصر، انحراف استاندارد اضلاع و نمودار شاخص طول<sup>۳</sup> (نمودار LEP) را ارائه داده‌اند [۴]. این شاخص‌ها به صورت معکوس هم تعریف می‌شوند [۶]. محققان شاخص‌های دیگری مانند دامنه‌ی تغییرات اضلاع (زوایا)، میانگین اضلاع (زوایا)، واریانس اضلاع (زوایا)، انحراف طولی (ضریب تغییرات اضلاع)، انحراف شکلی (ضریب تغییرات زوایا) و ... را نیز برای سنجش نظم رده‌ای از سازه‌ها (گنبدها و تخت) که از ترکیب وجوه مختلف به دست آمده‌اند، معرفی کرده‌اند. این شاخص‌ها برگرفته از شاخص‌های وضعیت پراکندگی داده‌ها در علم آمار می‌باشند و به صورت کامل در رساله‌های دکترای کورویوا<sup>۴</sup> [۴] و به نژاد [۵] توصیف شده‌اند. شاخص‌های مختلف نظم سازه، همراه با منبع در جدول

<sup>1</sup> Hoshyar Nooshin

<sup>2</sup> Ramtin Haghazar

<sup>3</sup> Length Profile Chart

<sup>4</sup> Kuroiwa

۱ معرفی شده است. در تمامی شاخص‌ها  $n$  تعداد اضلاع سازه،  $L_i$  ها طول اضلاع به کار رفته در سازه و  $L_{av}$  میانگین اضلاع به کار رفته در سازه می‌باشد.

جدول ۱- معرفی شاخص‌های طولی نظم

Table 1- Introducing the length regularity indicators

ردیف	نام محقق	سال و منبع	معیار مناسب برای سنجش نظم سازه
۱-	نوشین و همکاران	۱۹۹۷ [۷]	نرخ طولی (r) $r = \frac{L_{\max}}{L_{\min}}$
۲-	نوشین و همکاران	۱۹۹۷ [۷]	نمودار شاخص طول (L)
۳-	نوشین و همکاران	۱۹۹۷ [۷]	انحراف معیار (S) $S = \sqrt{\frac{\sum (L_i - L_{av})^2}{n}}$
۴-	حق نظر، نوشین و همکاران	۲۰۱۴ [۶]	انحراف طول (d) $cv = \frac{S}{L_{av}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum (L_i - L_{av})^2}{n}}}{L_{av}}$
۵-	کوروپوا	۲۰۰۰ [۴]	واریانس ( $S^2$ ) $S^2 = \frac{\sum (L_i - L_{av})^2}{n}$
۶-	کوروپوا	۲۰۰۰ [۴]	دامنه تغییرات (D) $D = L_{\max} - L_{\min}$

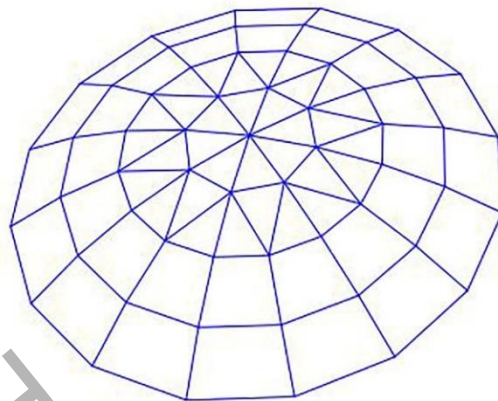
شاخص واریانس وضعیت پراکندگی اضلاع نسبت به میانگین را نشان می‌دهد. اگر تمامی اضلاع با هم برابر باشند، واریانس صفر است. انحراف معیار جذر واریانس می‌باشد. این شاخص نشان می‌دهد به طور میانگین اضلاع چه مقدار از مقدار متوسط فاصله دارند. اگر انحراف معیار اضلاع نزدیک به صفر باشد، نشانه‌ی آن است که اضلاع نزدیک به میانگین اضلاع هستند، پراکندگی اندکی دارند و هم بعد با اضلاع می‌باشد. شاخص ضریب تغییرات بی بعد است و صفر بودن آن بدان معناست که طول تمامی اضلاع سازه با هم برابر است. شاخص دامنه تغییرات حداکثر میزان پراکندگی را نشان می‌دهد و صفر بودن آن نشان دهنده‌ی برابری تمامی اضلاع سازه است. زمانی کاربرد دارد که تعداد داده‌ها کم باشد. نمودار شاخص طول توزیع طول عناصر را نشان می‌دهد. محور افقی نشان دهنده‌ی نسبت طول‌های عناصر به میانگین همه عناصر است و محور عمودی فراوانی را بر حسب درصد نشان می‌دهد. هر مستطیل متناظر با یک دسته از اضلاع است که طول آنها با هم برابر یا به هم نزدیک باشد.

تمامی این شاخص‌ها قابل توسعه به زوایا و همچنین مفاهیم میانگین، واریانس، انحراف معیار و ضریب تغییرات مرتبط با نرخ‌های طولی، نرخ‌های شکلی و مساحت‌های وجوه به کار رفته در یک سازه می‌باشند، تا کنون پژوهشگران به دلیل تنوع فرم‌ها و پیچیدگی آنها کمتر به تحلیل، بررسی و کاربرد تعاریف شاخص‌های نظم سازه‌های فضاکار و بهبود نظم این سازه‌ها پرداخته‌اند؛ همچنین محققان با کمک نرم‌افزارهای فرمیان<sup>۱</sup> و متلب<sup>۲</sup> پژوهش‌های مرتبط با بهبود نظم را انجام داده‌اند. کاربرد نرم‌افزار فرمیان در طراحی سازه‌ها با استفاده از منطق جبر فرمکس می‌باشد. لذا در این پژوهش نمونه‌ی موردی گنبد فضاکار تک لایه‌ی ساختمان پالایشگاه گاز بیدبلند خلیج فارس که در ۳۲ کیلومتری غرب شهید بهبهان در استان خوزستان واقع شده را انتخاب کرده‌ایم. این سازه توسط مهندسين شرکت سازه‌های

<sup>1</sup> Formian

<sup>2</sup> Matlab

فضا کار افق نور(سان) در نرم افزار راینو طراحی شده (شکل ۱) و ساخت آن در سال ۱۳۹۸ به اتمام رسیده است. قطر گنبد حدود ۸/۵ متر و ارتفاع گنبد حدود ۱/۳ متر می باشد.



شکل ۱: سازه فضا کار فرم آزاد ترسیم شده در نرم افزار راینو، منبع: شرکت سازه فضا کار افق نور

**Figure 1: Free form space structure drawn in Rhino software, Source: Ofogh Noor Space Structure Company**

نظم (نظم هندسی) مورد بررسی در ادبیات این پژوهش به افزایش المانها با طول یکسان یا تقریباً یکسان، کاهش تعداد تیپهای طولی و کاهش شکل های متفاوت وجوه با حفظ هندسه ی فرم گنبد بر می گردد. در این پژوهش طول المانها بین ۱۰۰۰ الی ۱۱۰۰ میلیمتر، ۱۱۰۰ الی ۱۲۰۰ میلیمتر و ... هر کدام یک تیپ طولی (بازه ی طولی) را نشان می دهند. المانهای کمتر از ۱۰۰۰ میلیمتر یک تیپ طولی محسوب می شود و اگر در یک تیپ طولی تعداد المانها ۲ یا کمتر باشد، در تیپ بعدی (در صورت عدم وجود در تیپ فعلی) محسوب می شود و آن را به عنوان یک تیپ در نظر نمی گیریم. به منظور تغییر موقعیت نقاط با حفظ هندسه ی گنبد ابتدا پوسته ی (رویه ی) گذرا از نقاط سازه را به صورت پارامتریک طراحی و نقاط حاصل مثلث بندی دلانی می گردد. از مثلث بندی دلانی نقاط سازه گنبد اشودلر<sup>۱</sup> حاصل می شود [۳]. در مورد شاخص هایی که در حالت نظم کامل سازه مقدار صفر می گیرند، مقدار خطا برابر با |شاخص نظم| و اگر در حالت نظم کامل سازه برابر ۱ باشد، مقدار خطا برابر |شاخص نظم-۱| می باشد. در این پژوهش برای اولین بار بهبود نظم مثلث بندی دلانی گنبد بیدبلند خوزستان (گنبد اشودلر) را با به کار بردن کمینه سازی خطاهای نظم مورد تحلیل و بررسی قرار می دهیم. مسئله ی بهینه سازی دارای یک قید و یک هدف می باشد. قید مسئله این است که نقاط ورودی سازه فقط قابلیت جابجایی روی پوسته ی گذرا از نقاط سازه را دارند و هدف مسئله کمینه سازی خطاهای اندازه گیری می باشد. جهت تغییر موقعیت نقاط روی پوسته روش پیشنهادی: الگوریتم پیمایش دایره ای و بهینه سازی ژنتیک را به کار می بریم. اجرای بهینه سازی ژنتیک را با استفاده از افزونه ی گالاپاگوس<sup>۲</sup> انجام می دهیم [۸]. الگوریتم هایی برای محاسبه ی شاخص های نظم هندسی (طولی، زاویه ای و مساحتی نظم) و درصد اضلاع و زوایای متفاوت سازه طراحی می کنیم و همچنین بر اساس تعاریف شاخص های نظم مطالعات پیشین محققان، تعریف کلی برای شاخص نظم هندسی را ارائه می دهیم و نشان می دهیم جهت مقایسه و ارزیابی دو سازه شاخص های نظم هندسی به تنهایی ملاک تصمیم گیری نمی باشند. بهینه سازی با تنظیمات پیش فرض گالاپاگوس اجرا شده است.

## ۲- پیشینه تحقیق

نحوه ی اتصال اعضا در گره ها و ایجاد نقش های مختلف کلید نظم سازه ها با الگوهای متنوع هندسی است. نقش های هندسی سازه می توانند هم در نظم سازه و هم در رفتار سازه موثر باشند و مهندسی باید تصمیم های فنی و مدیریتی زیادی اخذ کنند که ماحصل آن کاهش هزینه، عملکرد مطلوب تر، افزایش موارد فنی و مقاومت، ایمنی و افزایش ضرایب اطمینان باشد. آرایش هندسی منظم موجب آسان تر شدن کار طراحی و مونتاژ می شود.

<sup>1</sup> Schwedler Dome

<sup>2</sup> Galapagoas Plug-in

پرداختن به اطلاعات هندسی و ویژگیهای متریک در طراحی و ساخت سازه‌های فضاکار بسیار مهم است. خواص متریک معمولاً در ارزیابی، تعریف نظم و بهبود نظم ساختار یک شبکه کاربرد دارد و در چند دهه‌ی اخیر محققین در تاشه‌پردازی<sup>۱</sup> (طراحی مفهومی) رده‌ای از سازه‌ها به آن پرداخته‌اند [۵].

علیرضا به نژاد<sup>۲</sup> در رساله‌ی دکترای خود مفهوم پیمایش کروی را برای یافتن یک خانواده از الگوها برای گنبدهای شبکه‌ای ارائه می‌دهد. این شیوه با درصد بالایی از المان‌های مساوی دارای مزایای سهولت ساخت، مونتاژ، کاهش هزینه و زمان می‌باشد [۵]. رامتین حق نظر<sup>۳</sup> و همکاران شیوه‌ی تصویرسازی گام به گام<sup>۴</sup> را با هدف بهبود نظم برای ایجاد گنبدهای ژئودزیک به کار بردند، برای تولید گنبدهای ژئودزیک از چندوجهی‌های ار شمیسی و افلاطونی استفاده کرده و برای افزایش نظم در گنبدها، مفهوم چندوجهی‌های گرد شده را نیز ارائه و به کار گرفته‌اند و با استفاده از شاخص‌های نظم شامل تعداد کامل المان‌ها، انحراف معیار المان‌ها، میانگین نرخ شکلی، نرخ طولی و نمودار شاخص طول، سازه‌های حاصل از تصویرسازی نرمال و تصویرسازی پله‌ای را مورد تحلیل قرار دادند [۶].

نوشین و همکاران در مقاله‌ی [۷] فرآیند تراپویش<sup>۵</sup> (فرآیند مینیمم‌سازی تابع پتانسیل هندسی<sup>۶</sup> (تابع GP)) را برای تاشه‌پردازی یک سازه به کار برده‌اند. برای مثال با اجرای این فرآیند روی یک گنبد باعث تغییر در موقعیت‌های گره‌ای و کاهش تفاوت‌های طولی المان‌ها گردید و برای تحلیل بهبود نظم پارامترهای نرخ طولی، انحراف طولی و نمودار شاخص طول را به کار برده‌اند. نوشین و همکاران در مقاله‌ی [۹] در یک مثال ساده‌ی سازه‌ی تخت روش ژنتیک را برای نظم تاشه‌پردازی سازه‌ی مطرح کردند. برای تابع هدف از واریانس نرمال شده<sup>۷</sup> استفاده کردند. این روش باعث شد طول المان‌ها یکسان یا نزدیک به هم باشد. پیرکوفسکی<sup>۸</sup> برای بررسی نظم شبکه‌های سلولی، مفاهیم انحراف معیار و ضریب تغییرات را برای مساحت‌های سلول‌ها و همچنین برای محیط‌های سلول‌ها به کار برد [۱۰].

سعیدرضا مساح<sup>۹</sup> و همکاران الگوریتم‌های فراابتکاری شامل الگوریتم‌های بهینه‌سازی ذرات<sup>۱۰</sup> (PSO) و بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی<sup>۱۱</sup> (BBO) را برای منظم‌سازی تاشه‌پردازی سازه به کار بردند. دو تابع هدف واریانس نرمال شده و تابع پتانسیل هندسی در بهبود نظم مثال‌های مطرح شده تأثیر زیادی داشت [۱۱].

مرجان گودرزی و همکاران تکنیک‌های بازگشتی الگوریتم ژنتیک و الگوریتم PSO را جهت بهبود نظم رده‌ای از پوسته‌های شبکه‌ای با انحنای متفاوت (نیمکره، سهموی هذلولوی و سینوسی) ارائه دادند و مشاهده گردید روی سطوح یکسان تکنیک بهینه‌سازی ازدحام ذرات از تکنیک ژنتیک بهتر عمل می‌کند و نظم بیش از ۵۰ درصد بهبود یافته است. همچنین با در نظر گرفتن شبکه‌بندی چهارضلعی و مثلثی روی سطوح نتیجه شد بهبود نظم شبکه‌بندی چهارضلعی از شبکه‌بندی مثلثی بهتر است [۱۲].

تا کنون پژوهشگران به دلیل تنوع فرم‌ها و پیچیدگی آنها کمتر به نقد، بررسی، تحلیل بهبود نظم و تعاریف شاخص‌های نظم سازه‌های فضاکار پرداخته‌اند و به صورت نمونه‌های موردی بررسی شده است. لذا تمرکز این پژوهش تحلیل بهبود نظم هندسی نمونه‌ی موردی گنبد فضاکار بیدبلند خوزستان با الگوریتم پیشنهادی: استفاده از الگوریتم پیمایش دایره‌ای و بهینه‌سازی ژنتیک با ۵۷ نقطه‌ی ورودی می‌باشد.

<sup>1</sup> Configuration Processing

<sup>2</sup> Alireza Behnejad

<sup>3</sup> Ramtin Haghazar

<sup>4</sup> Stepping Projection

<sup>5</sup> Traviation Process

<sup>6</sup> Geometric Potential Function

<sup>7</sup> Normalized Variance

<sup>8</sup> Piórkowski

<sup>9</sup> Saeed Reza Massah

<sup>10</sup> Particle Swarm Optimization(PSO)

<sup>11</sup> Biogeography-Based Optimization(BBO)

### ۳- روش تحقیق

روند تحقیق در این پژوهش الگوریتمیک، کاربردی، محاسباتی، آزمایشگاهی و تحلیلی می‌باشد و مراحل انجام پژوهش عبارتند از :

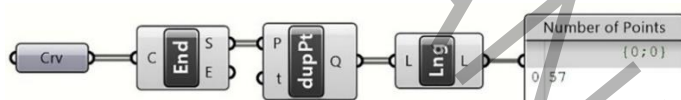
- ۱- ارائه الگوریتم‌هایی برای محاسبه شاخص‌های نظم و محاسبه درصد اضلاع و زوایای متفاوت سازه
- ۲- طراحی پوسته‌ی گذرا از نقاط سازه به صورت پارامتریک
- ۳- ایجاد مثلث‌بندی دلانی
- ۴- ایجاد الگوریتم پیمایش دایره‌ای
- ۵- استفاده از بهینه‌سازی ژنتیک (افزونه گالاپاگوس) با هدف مینیمم شاخص‌های نظم
- ۶- محاسبه شاخص‌های نظم سازه‌های حاصل از اجرای مرحله ۵
- ۷- بررسی تعاریف شاخص‌های نظم با استفاده از تعریف پیشنهادی
- ۸- تحلیل بهبود نظم گنبد فضاکار

#### ۳-۱ الگوریتم‌های محاسبه شاخص‌های نظم و درصد تعداد اضلاع و زوایای متفاوت

گرس‌هاپر یک زبان برنامه‌نویسی بصری است که توسط دیوید راتن<sup>۱</sup> در موسسه رابرت مک نیل<sup>۲</sup> و همکاران توسعه یافته است. گرس‌هاپر در نرم‌افزار راینو اجرا می‌شود. برنامه‌ها با کشیدن قطعات بر روی این صفحه ساخته می‌شوند. تعریف هندسه با خطوط ریاضی سبب شده است که راینو در تبدیل هندسه به نمونه‌های واقعی قابل ساخت جلوتر از دیگر نرم‌افزارهای مدل‌ساز باشد. این افزونه به طراحان این امکان را می‌دهد که بدون نیاز به آموختن برنامه‌نویسی به روش مبتکرانه‌ای بتوانند در دنیای طراحی به اکتشاف فرم‌های جدید بپردازند و علاوه بر آن در حل مسائل ریاضی و آماری نیز افزونه‌هایی دارد که محاسبات را می‌توان با آن انجام داد [۱۳].

تمامی پژوهش با کمک نرم‌افزار راینو ورژن ۰۱.۱۳۰۰۱.۲۲۲۰۸.۰۲۱، ۷، پلاگین گرس‌هاپر و افزونه‌های آن و نرم‌افزار Spss انجام و همچنین تمامی محاسبات در افزونه‌ی گرس‌هاپر با ده رقم اعشار تنظیم شده است.

با توجه به آنکه مفروضات مسئله فقط داشتن نقاط، خطوط، زوایا و وجوه به کار رفته در سازه است، لذا برای محاسبه شاخص‌های نظم ضروری است الگوریتم‌هایی جهت محاسبه شاخص‌های طولی، زاویه‌ای و مساحت نظم ارائه شود. با استفاده از الگوریتم شکل ۲ تعداد نقاط را محاسبه نمودیم.

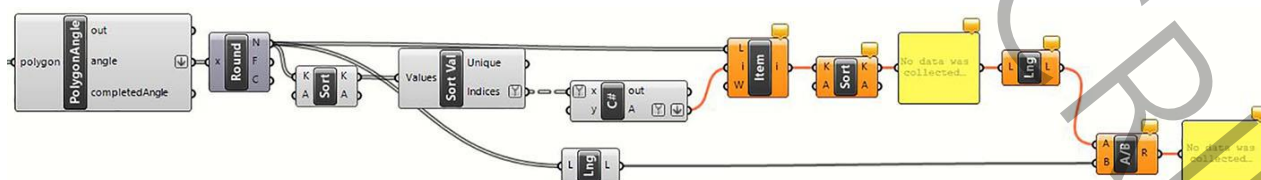


شکل ۲: الگوریتم محاسبه تعداد نقاط، منبع: نگارندگان

Figure 2: Algorithm for calculating the number of points, Source: Authors

همانطور که مشاهده می‌گردد این گنبد شامل ۵۷ نقطه است.

جهت محاسبه تعداد اضلاع (زوایای) متفاوت سازه از الگوریتم شکل ۳ در گرس‌هاپر استفاده نمودیم که در آن از برنامه‌نویسی پایتون (شکل ۴) جهت محاسبه تعداد اندیسه‌های اضلاع (زوایای) متفاوت استفاده نمودیم.



شکل ۳: الگوریتم محاسبه درصد زوایای متفاوت سازه، منبع: نگارندگان

Figure 3: Algorithm for calculating the percentage of different angles of the structure, Source: Authors

<sup>1</sup> David Rutten

<sup>2</sup> Robert Mcneel

```

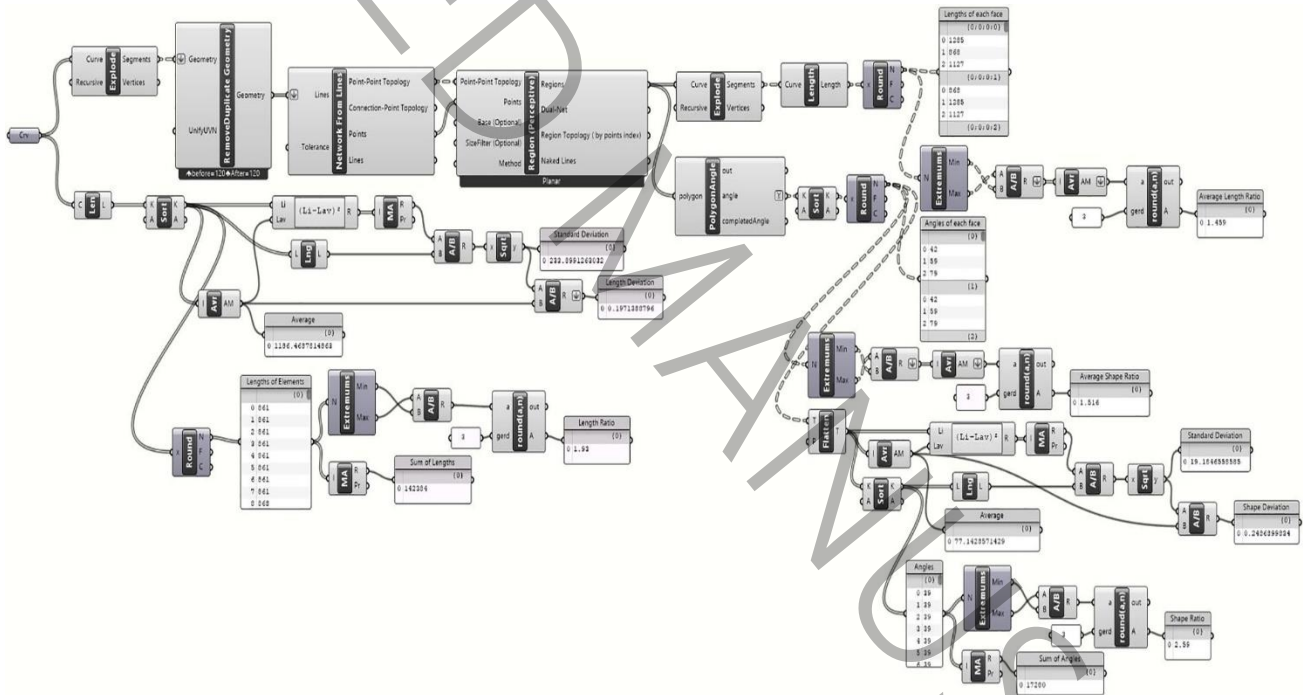
Script Editor
Script component: Cf
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16 // <summary>
17 // This class will be instantiated on demand by the Script component.
18 // </summary>
19
20 public class Script_Instance : GH_ScriptInstance
21 {
22     // Utility functions
23
24     // Members
25
26     // Private
27     [Private]
28     void RunScript(DataTree<double> x, object y, ref object A)
29     {
30         var tr = new DataTree<double>();
31         for (int i = 0; i < x.BranchCount; i++)
32         {
33             if (x.Branches[i].Count == 1)
34             {
35                 tr.AddRange(x.Branches[i], new GH_Path(i));
36             }
37         }
38         A = tr;
39     }
40
41     // <Custom additional code>
42
43     // </Custom additional code>
44 }
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67

```

شکل ۴: کد پایتون جهت نمایش اندیسه‌های زوایای متفاوت سازه، منبع: نگارندگان

Figure 4: Python code to display the indices of different angles of the structure, Source: Authors

طبق الگوریتم شکل ۵ طول‌ها و زوایای هر وجه و شاخص‌های طولی و زوایای نظم محاسبه می‌شوند. زوایا برحسب درجه و طول‌ها بر حسب میلی‌متر هستند. ابتدا محاسبات انجام و بعد طول اضلاع و زوایا گرد شده‌اند.



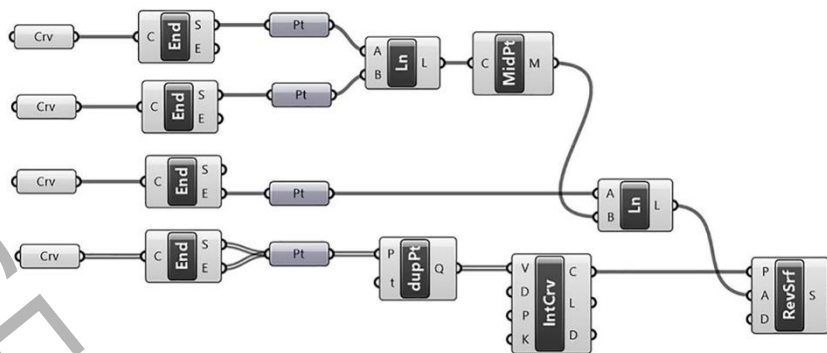
شکل ۵: الگوریتم محاسبه زوایا و طول‌های هر وجه و شاخص‌های زوایای نظم، منبع: نگارندگان

Figure 5: Algorithm for calculating angles and lengths of each face and angle indices of regularity, source: Authors

به صورت روند مشابه مساحتی نظم و درصد اضلاع متفاوت سازه محاسبه می‌شود.

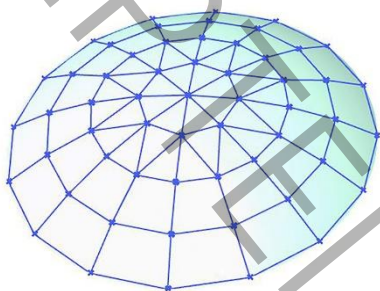
## ۲-۳ ایجاد پوسته‌ی گنبد فضاکار به صورت پارامتریک

از نقاط گنبد فضاکار یک پوسته (رویه) می‌گذرد. برای آنکه بتوان از تکنیک‌های دیگر جهت ایجاد نقش‌های مختلف هندسی استفاده کرده، رسم پوسته‌ی گذرا از نقاط این گنبد ضروری است. لذا پوسته را به صورت پارامتریک طبق الگوریتم شکل ۶ ایجاد کردیم. پوسته‌ی گنبد از دوران کمان مشخص شده شکل ۷ حول محور قائم (ارتفاع گنبد) حاصل می‌شود. همه‌ی نقاط روی پوسته قرار دارند (شکل ۸).



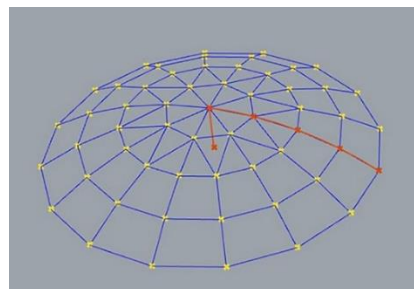
شکل ۶: الگوریتم ایجاد پوسته‌ی گذرا از نقاط گنبد، منبع: نگارندگان

Figure 6: Algorithm for creating transient surface from dome points, Source: Authors



شکل ۸: پوسته‌ی گذرا از نقاط گنبد

Figure 8: Transient surface of points

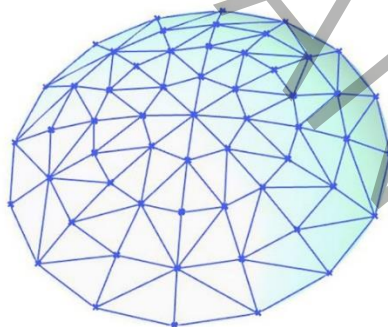


شکل ۷: ترسیم کمان و محور قائم (ارتفاع گنبد)

Figure 7: Drawing the arc and vertical axis (dome height)

۳-۳ بهبود نظم مثلث‌بندی دلانی گذرنده از نقاط سازه

برای ایجاد نقش‌های دیگر ابتدا مثلث‌بندی دلانی گذرا از نقاط گنبد را ایجاد می‌کنیم (شکل ۹).



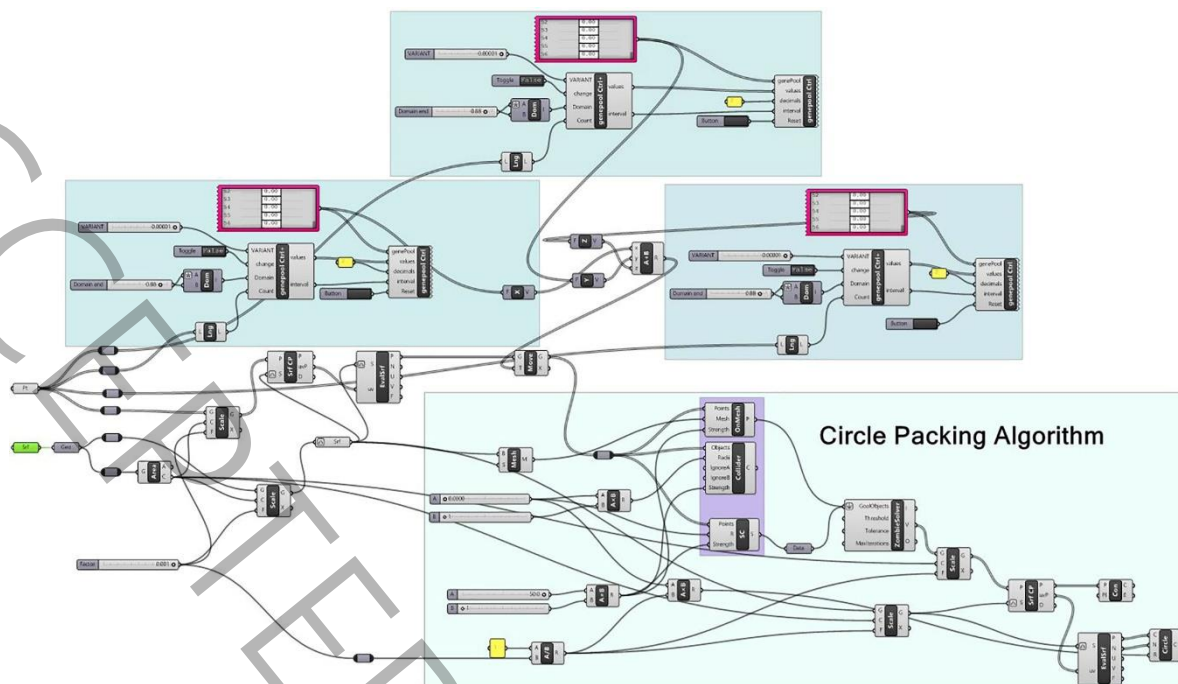
شکل ۹: مثلث‌بندی دلانی حاصل از نقاط گنبد

Figure 9: Delaunay triangulation of dome points

برای جابجایی نقاط از مولفه‌های ژن پول<sup>۱</sup> با محدودیت دامنه بین ۰ و ۱ و الگوریتم پیمایش دایره‌ای با محدودیت دامنه‌ی شعاع استفاده کردیم (شکل ۱۰). اسلایدر شعاع را در محدوده‌ی بین ۰ و ۰/۵۹۵۰ و دامنه را ۰/۸۸ در نظر گرفتیم که در این راستا آزمایش‌های زیادی برای انتخاب کران بالای شعاع و دامنه انجام شده است. با تغییر دامنه و تغییر کران بالای اسلایدر شعاع جواب‌های متفاوت دیگری حاصل می‌شود. الگوریتم پیمایش دایره‌ای برای نمایش دایره‌ها باشعاع یکسان و مماس بر هم روی پوسته‌ی گنبد به کار می‌رود.

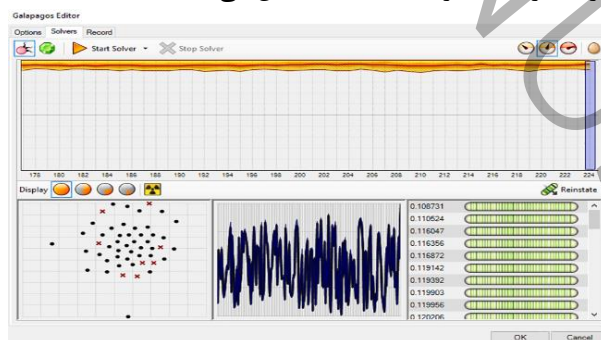
<sup>1</sup> Gene Pool





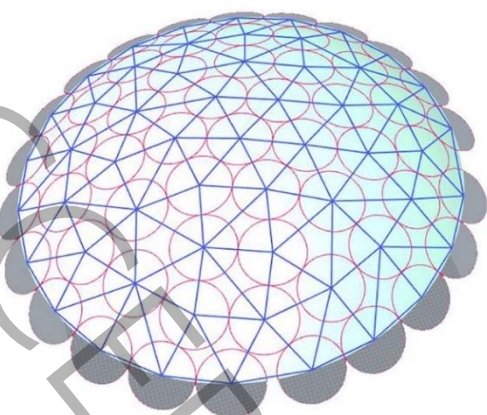
شکل ۱۰: الگوریتم پیمایش دایره‌ای، منبع: نگارندگان  
**Figure 10: Circle Packing Algorithm, Source: Authors**

شاخصی برای نظم سازه مناسب می‌باشد که نسبت به تغییر مقیاس متقارن آن دچار تغییر نشود. لذا با چندین مورد آزمایش تغییر مقیاس متقارن مثلث‌بندی دلانی نمونه موردی دریافتیم که هیچکدام از شاخص‌های محیط مناسب ارزیابی نظم دو سازه نیستند. شاخص‌های نرخ طولی، نرخ شکلی، نرخ مساحت، میانگین نرخ شکلی، ضریب تغییرات اضلاع، واریانس زوایا، انحراف استاندارد زوایا، ضریب تغییرات زوایا و ضریب تغییرات مساحت دچار تغییر نمی‌شوند و برای ارزیابی نظم سازه مناسب هستند. جهت انجام بهینه‌سازی، کمینه‌سازی خطاها را با استفاده از الگوریتم ژنتیک از طریق اجرای افزونه‌ی گالاپاگوس مورد آزمایش قرار دادیم. ژنوم‌های افزونه‌ی گالاپاگوس را مولفه‌های ژن پول و اسلایدر شعاع در نظر گرفتیم. با اجرای گالاپاگوس ۵۷ نقطه‌ی سازه نقاط با توجه به شعاع و اعمال نیروی فیزیکی روی پوسته طوری جابجا می‌شوند که مقدار خطا در مثلث‌بندی حاصل به کمترین مقدار خود برسد. برای نمونه شکل ۶ فرآیند بهینه‌سازی را با هدف کمینه‌سازی ضریب تغییرات مساحت‌ها نشان می‌دهد.

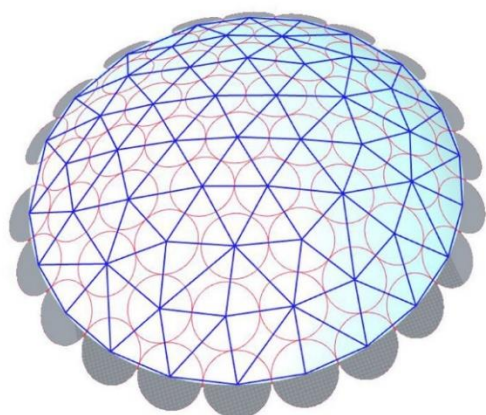


شکل ۱۱: فرآیند بهینه‌سازی با هدف مینیمم ضریب تغییرات اضلاع  
**Figure 11: Optimization process with the aim of minimizing the coefficient of variation of the sides**

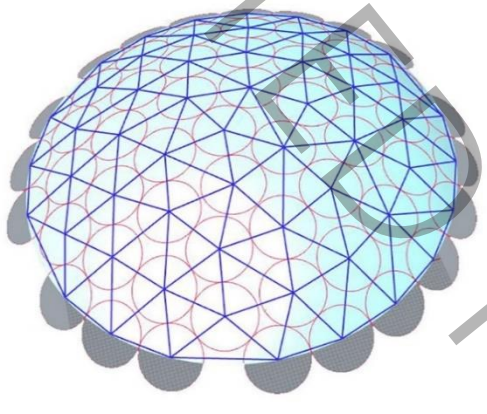
نتایج مثلث‌بندی بعد از اجرای بهینه‌سازی ژنتیک در اشکال ۱۲ الی ۲۰ ارائه شده است.



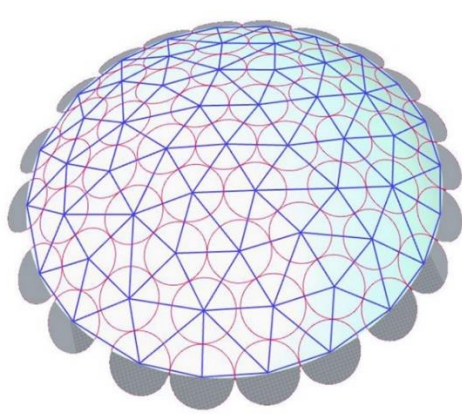
شکل ۱۳: سازه حاصل از بهینه‌سازی با هدف |۱- نرخ طولی|  
**Figure 13: The structure resulting from optimization with the aim of minimum |1- length ratio|**



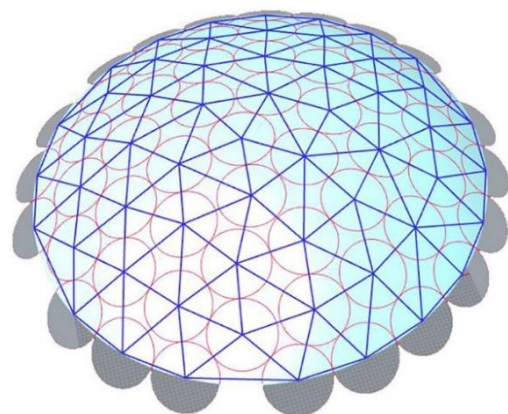
شکل ۱۲: سازه حاصل از بهینه‌سازی با هدف انحراف طولی  
**Figure 12: The structure resulting from optimization with the aim of minimum length deviation**



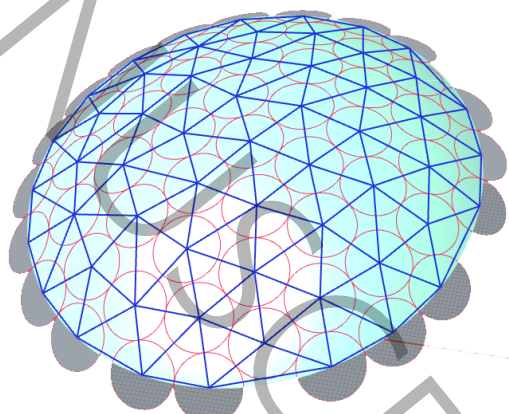
شکل ۱۵: سازه حاصل از بهینه‌سازی ژنتیک با هدف |۱- نرخ مساحت|  
**Figure 15: Structure resulting from genetic optimization with the aim |1- Area ratio|**



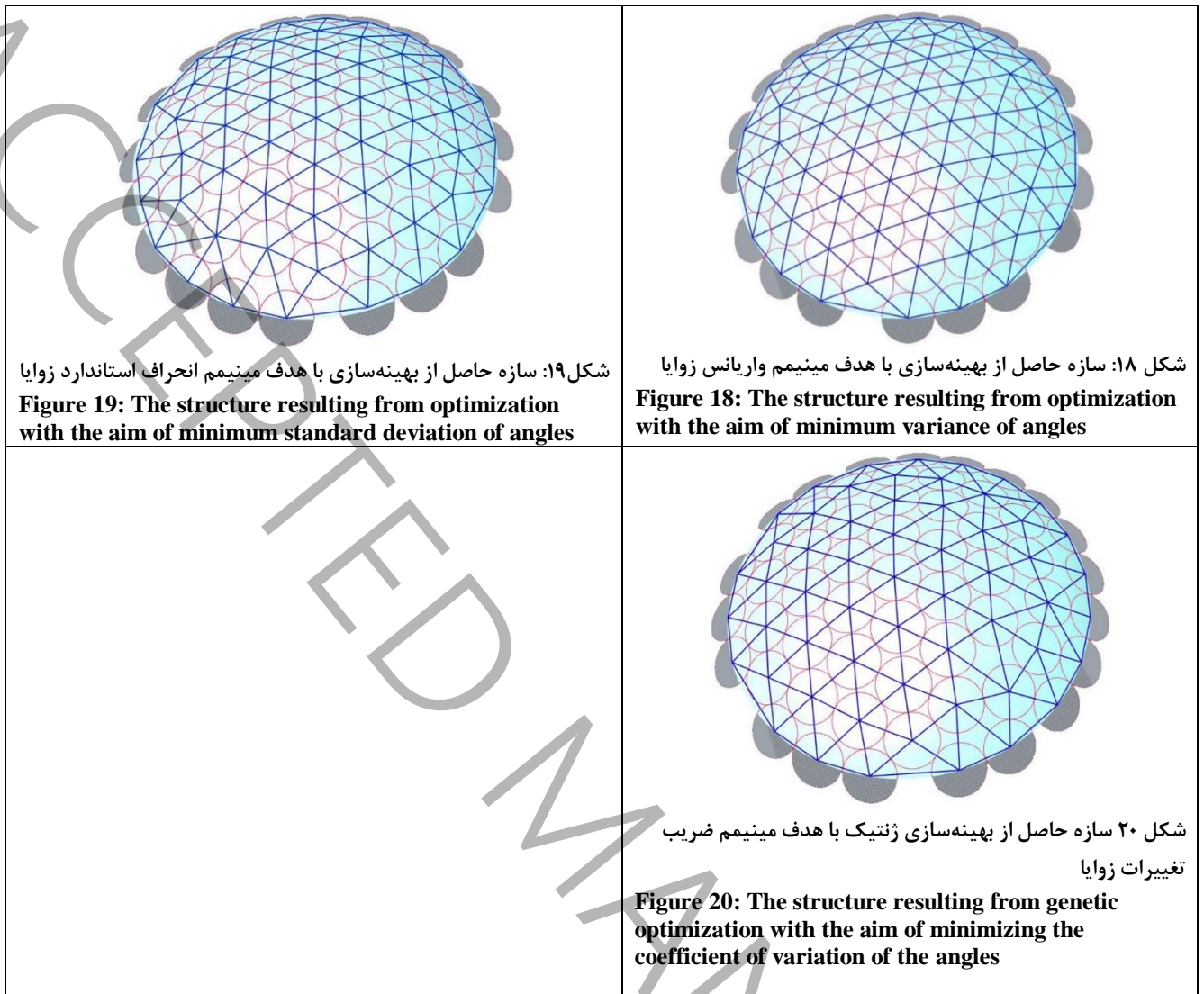
شکل ۱۴: سازه حاصل از بهینه‌سازی با هدف مینیمم |۱- نرخ شکلی|  
**Figure 14: The structure resulting from optimization with the aim of minimum |Shape ratio-1|**



شکل ۱۷: سازه حاصل از بهینه‌سازی ژنتیک با هدف |۱- میانگین نرخ شکلی|  
**Figure 17: The structure resulting from genetic optimization with the aim of minimum |Average shape ratio-1|**



شکل ۱۶: سازه حاصل از بهینه‌سازی ژنتیک با هدف ضریب تغییرات مساحت  
**Figure 16: The structure resulting from genetic optimization with the aim of minimum coefficient of variation of the areas**



منبع: نگارندگان  
 Source : Authors

#### ۴- یافته‌ها

##### ۴-۱ نتایج محاسبات شاخص‌های نظم

شاخص‌های طولی، زاویه‌ای، مساحت و تعداد تیپ‌های طولی را برای هریک از سازه‌های فوق محاسبه کرده و نتایج در جداول ۲، ۳، ۴ و ۵ خلاصه شده است. جدول ۲ تعداد تیپ‌های طولی اضلاع هر سازه را نشان می‌دهد. شماره‌ی سازه‌ها در جدول ۲ متناظر با شماره‌ی سازه‌ها در جداول ۲، ۳، ۴ و ۵ می‌باشد.

جدول ۲- تعداد تیپ‌های طولی هر سازه

**Table 2: The number of length types of each structure**

۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	شماره سازه
۸	۶	۷	۶	۷	۷	۶	۶	۶	۶	۴	تعداد تیپ‌های طولی

جدول ۳- شاخص‌های طولی محاسبه شده

Table 3: Results of length regularity indicators calculations

شماره سازه	نوع سازه	تعداد نقاط	تعداد اضلاع	تعداد وجوه	کوچکترین ضلع	بزرگترین ضلع	نرخ طولی	مجموع اضلاع	میانگین اضلاع	میانگین نرخ طولی	انحراف استاندارد	انحراف طولی	درصد اضلاع متفاوت
۱	نمونه موردی	۵۷	۱۲۰	۶۴	۸۶۱	۱۶۶۲	۱/۹۳	۱۴۲۳۸۴	۱۱۸۶/۵۳	۱/۳۳	۲۳۳/۸۹۹	۰/۱۹۷	-
۲	مثلث‌بندی دلانی نقاط نمونه موردی	۵۷	۱۵۲	۹۶	۸۶۱	۱۸۴۰	۲/۱۴	۱۹۶۴۸۰	۱۲۹۲/۵۸	۱/۵۵	۳۰۰/۱۷۳	۰/۲۳۲	-
۳	بهینه‌سازی با هدف انحراف طولی	۵۷	۱۴۷	۹۱	۱۱۷۷	۱۷۰۴	۱/۴۴۸	۱۸۵۴۹۴	۱۲۶۱/۷۸۱	۱/۱۸۵	۱۳۷/۱۹۵	۰/۱۰۹	٪۳۷
۴	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف  ۱- نرخ طولی	۵۷	۱۴۶	۹۰	۱۱۷۷	۱۶۶۵	۱/۴۱۵	۱۸۵۴۹۹	۱۲۷۰/۵۲۱	۱/۳۱۵	۱۴۷/۵۸۰	۰/۱۱۶	٪۳۴
۵	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف  ۱- نرخ شکلی	۵۷	۱۴۷	۹۱	۱۱۷۵	۱۶۵۳	۱/۴۰۷	۱۸۵۶۴۷	۱۲۶۲/۹۱۴	۱/۱۹۹	۱۳۹/۵۷	۰/۱۱۱	٪۴۴
۶	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف  ۱- نرخ مساحت	۵۷	۱۴۸	۹۲	۱۱۸۰	۲۰۳۷	۱/۷۲۶	۱۸۷۰۲۴	۱۲۶۳/۶۸۱	۱/۱۸۴	۱۶۱/۹۱۶	۰/۱۲۸	٪۳۷
۷	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف ضریب تغییرات مساحت	۵۷	۱۴۸	۹۲	۱۱۶۸	۲۰۵۶	۱/۷۶	۱۸۶۸۰۴	۱۲۶۲/۱۸۸	۱/۱۷۷	۱۵۴/۴۹۷	۰/۱۲۲	٪۳۷
۸	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف وارپانس زوایا	۵۷	۱۴۸	۹۲	۱۱۷۹	۲۰۱۳	۱/۷۰۷	۱۸۶۰۸۹	۱۲۵۷/۳۷۹	۱/۱۵۴	۱۵۳/۳۸۸	۱/۱۲۱۹ ۰	٪۳۲
۹	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف انحراف استاندارد زوایا	۵۷	۱۴۸	۹۲	۱۱۴۴	۱۷۴۹	۱/۵۲۹	۱۸۴۴۳۱	۱۲۴۶/۱۸۳	۱/۱۶۵	۱۳۳/۷۲۹	۰/۱۰۷	٪۴۹
۱۰	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف ضریب تغییرات زوایا	۵۷	۱۴۸	۹۲	۱۱۷۴	۲۰۱۱	۱/۷۱۳	۱۸۶۱۴۷	۱۲۵۷/۹۵	۱/۱۵۳	۱۵۲/۹۱۲	۰/۱۲۲	٪۳۷
۱۱	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف  ۱- میانگین نرخ شکلی	۵۷	۱۴۸	۹۲	۱۱۷۹	۲۰۰۲	۱/۶۹۸	۱۸۵۸۷۱	۱۲۵۵/۸۹۹	۱/۱۴۹	۱۵۶/۱۸۹	۰/۱۲۴	٪۳۴

جدول ۴- شاخص‌های زاویه‌ای محاسبه شده

Table 4: The results of angle regularity calculations

شماره سازه	نوع سازه	تعداد نقاط	تعداد وجوه	تعداد زوایا	کوچکترین زاویه	بزرگترین زاویه	نرخ شکلی	میانگین نرخ شکلی	میانگین زوایا	انحراف استاندارد زوایا	ضریب تغییرات زوایا	درصد زوایای متفاوت
۱	نمونه موردی	۵۷	۶۴	۲۲۴	۳۹	۱۰۱	۲/۵۹	۱/۵۱۶	۷۷/۱۴۳	۱۹/۱۸۵	۰/۲۴۹	-
۲	مثلث‌بندی دلانی نقاط نمونه موردی	۵۷	۹۶	۲۸۸	۳۴	۱۰۱	۲/۹۷	۲/۱۸۱	۶۰	۲۰/۶۴۸	۰/۳۴۴	-
۳	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف انحراف طولی	۵۷	۹۱	۲۷۳	۴۳	۹۳	۲/۱۶۳	۱/۳۷۵	۶۰	۱۰/۵۰۵	۰/۱۷۵	٪۳
۴	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف  ۱- نرخ طولی	۵۷	۹۰	۲۷۰	۴۴	۸۹	۲/۰۲۳	۱/۴۵	۶۰	۱۲/۱۲۶	۰/۲۰۲	٪۳
۵	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف  ۱- نرخ شکلی	۵۷	۹۱	۲۷۳	۴۵	۸۹	۱/۹۷۸	۱/۴۱۱	۶۰	۱۱/۲۷۲	۰/۱۸۸	٪۲
۶	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف  ۱- نرخ مساحت	۵۷	۹۲	۲۷۶	۳۰	۱۱۹	۳/۹۶۷	۱/۴۱۵	۶۰	۱۲/۱۸۹	۰/۲۰۳	٪۲
۷	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف ضریب تغییرات مساحت	۵۷	۹۲	۲۷۶	۳۰	۱۲۱	۴۰۳	۱/۴۰۵	۶۰	۱۱/۵۷۹	۰/۱۹۳	٪۴
۸	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف واریانس زوایا	۵۷	۹۲	۲۷۶	۳۱	۱۱۷	۳/۷۷۴	۱/۳۳۱	۶۰	۱۰/۴۱۶	۰/۱۷۳	٪۴
۹	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف انحراف استاندارد زوایا	۵۷	۹۲	۲۷۶	۴۱	۹۶	۲/۳۴	۱/۱۶۵	۶۰	۸/۹۰۷	۰/۱۴۹	٪۴
۱۰	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف ضریب تغییرات زوایا	۵۷	۹۲	۲۷۶	۳۲	۱۱۷	۳/۶۵۶	۱/۳۲۸	۶۰	۱۰/۴۶۲	۰/۱۷۴۳	٪۳
۱۱	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف  ۱- میانگین نرخ شکلی	۵۷	۹۲	۲۷۶	۳۲	۱۱۵	۳/۵۹۴	۱/۳۲۵	۶۰	۱۰/۵۲۶	۰/۱۷۵	٪۵

جدول ۵- شاخص‌های مساحتی محاسبه شده

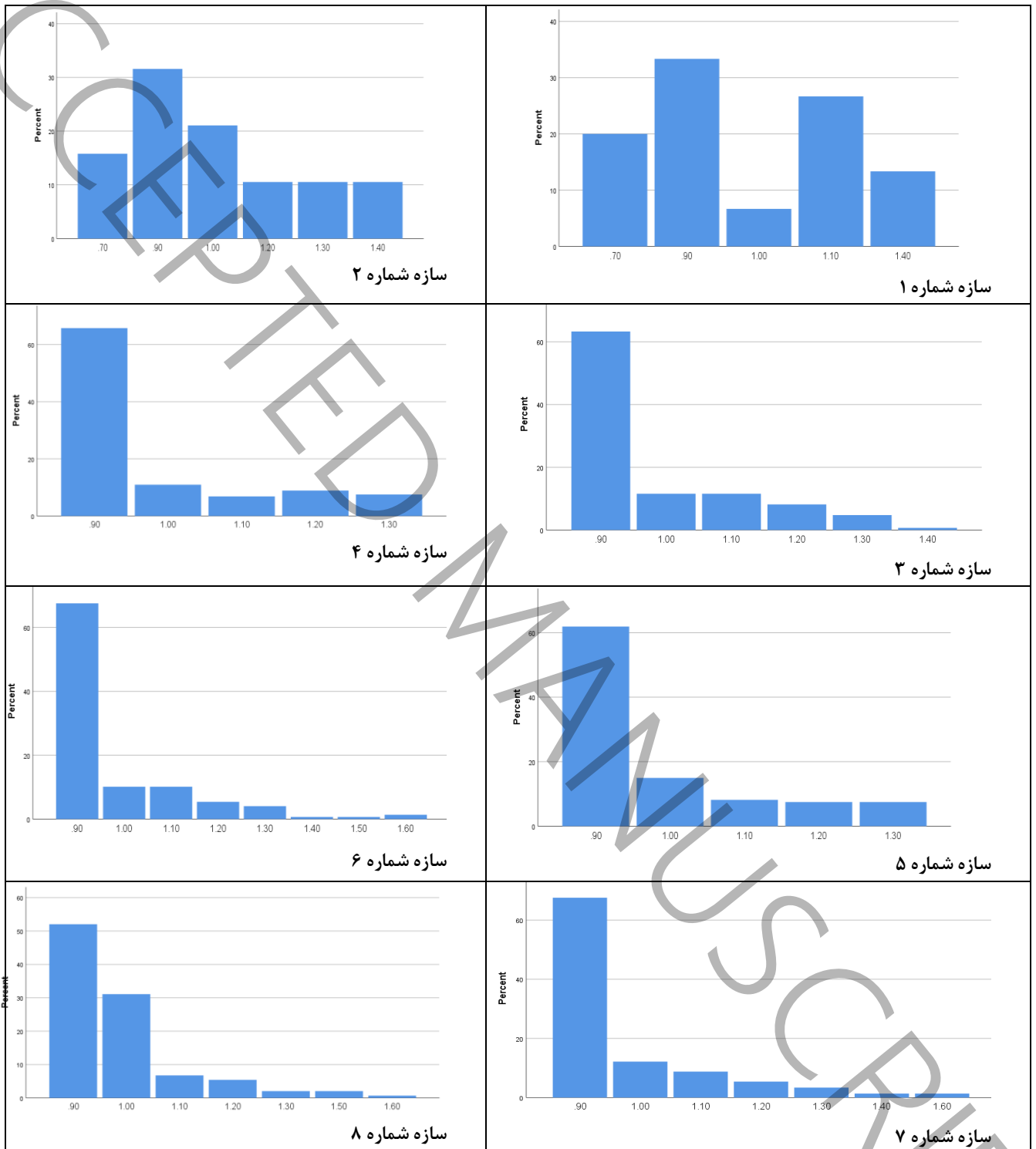
Table 5: The results of area regularity calculations

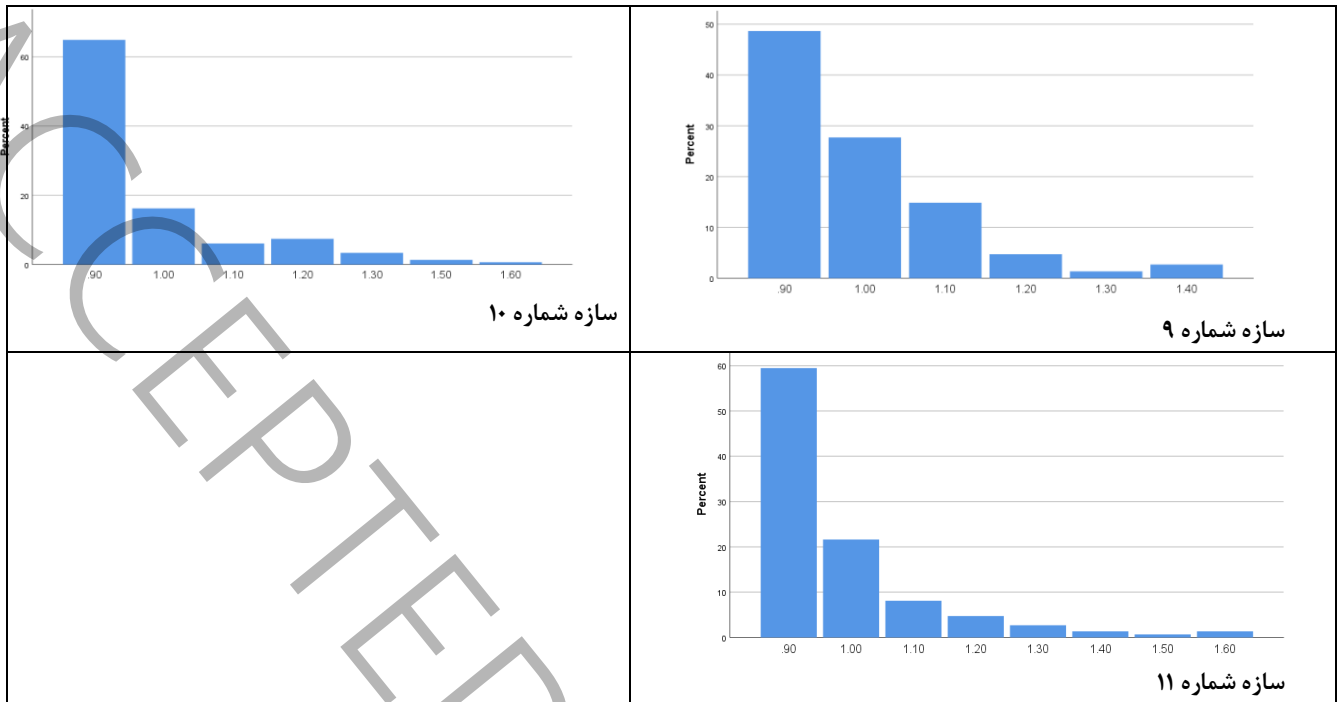
شماره سازه	نوع سازه	تعداد نقاط	تعداد وجوه	کوچکترین مساحت	بزرگترین مساحت	نرخ مساحت	میانگین مساحت‌ها	انحراف استاندارد مساحت‌ها	ضریب تغییرات مساحت‌ها
۱	نمونه موردی	۵۷	۶۴	۴۴۸۶۸۸	۱۶۲۵۵۸۸	۳/۶۲	۹۴۴۴۷۲/۳۹	۴۸۷۵۸۲/۵۳۲	۰/۵۱۶
۲	مثلث‌بندی دلانی نقاط نمونه موردی	۵۷	۹۶	۴۴۸۶۸۸	۹۱۸۶۸۴	۲/۰۴۷	۶۲۹۶۴۸/۲۸	۱۶۴۵۶۸/۰۳۹	۰/۲۶۱
۳	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف انحراف طولی	۵۷	۹۱	۶۰۰۴۸۱	۸۸۲۲۹۸	۱/۴۶۹	۶۶۸۸۱۳/۸۷۸	۴۷۹۹۷/۱۹۳	۰/۰۷۱
۴	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف  ۱- نرخ طولی	۵۷	۹۰	۶۰۵۷۲۳	۸۵۷۰۲۳	۱/۴۱۵	۶۷۷۳۴۱/۶۷۱	۴۶۷۶۵/۴۴۷۶	۰/۰۶۹
۵	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف  ۱- نرخ شکلی	۵۷	۹۱	۶۰۰۳۷۸	۷۸۹۰۶۲	۱/۳۱۴	۶۶۷۱۹۳/۶۳	۴۰۷۷۴/۰۰۳	۰/۰۶۱
۶	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف  ۱- نرخ مساحت	۵۷	۹۲	۶۰۳۲۹۶	۷۶۲۰۹۰	۱/۲۶۳	۶۵۹۷۸۳/۱۰۵	۳۹۴۸۳/۸۷۳	۰/۰۵۹
۷	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف ضریب تغییرات مساحت	۵۷	۹۲	۵۹۹۹۸۳	۷۶۸۲۶۳	۱/۲۸	۶۶۰۵۱۸/۳۱۲	۳۸۱۱۷/۱۰۵	۰/۰۵۸
۸	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف وارianس زوایا	۵۷	۹۲	۶۰۲۶۱۶	۸۷۹۲۱۸	۱/۴۵۹	۶۵۹۸۲۴/۷۳۳	۰۸۶۱۱۲۹	۰/۰۹۳
۹	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف انحراف استاندارد زوایا	۵۷	۹۲	۵۶۸۸۰۴	۸۲۹۹۵۲	۱/۴۶۲	۶۵۲۴۲۸/۵۰۲	۵۵۶۹۴/۴۷۲	۰/۰۸۵
۱۰	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف ضریب تغییرات زوایا	۵۷	۹۲	۶۰۴۷۱۸	۸۷۶۶۵۴	۱/۴۵	۶۶۰۲۶۱/۷۵۸	۵۹۸۹۹/۹۵۱	۰/۰۹۱
۱۱	بهینه‌سازی ژنتیک با هدف  ۱- میانگین نرخ شکلی	۵۷	۹۲	۶۰۲۳۱۸	۹۰۴۰۶۳	۱/۵۰۱	۶۵۷۷۸۱/۸۰۷	۵۸۹۶۶/۹۱۳	۰/۰۰۹

با داشتن طول اضلاع و نسبت آنها به میانگین اضلاع و انتقال نتایج به نرم افزار Spss نمودار درصد فراوانی ترسیم می‌گردد که همان نمودار شاخص طول است. نمودار شاخص طول برای سازه‌های ۱ الی ۱۱ در جدول ۵ رسم شده است.

جدول ۶- نمودارهای شاخص طول برای سازه‌های شماره ۱ الی ۱۱، طراحی با نرم افزار Spss، منبع: نگارندگان

Table 6: LEP charts for structures number 1 to 11, designed with Spss software, source: authors





#### ۴-۲ بررسی تعاریف شاخص‌های نظم با استفاده از تعریف پیشنهادی

تا کنون محققان تعاریف مختلفی از شاخص‌های نظم ارائه دادند ولی تعریف واحدی برای شاخص نظم ارائه نشده است. از نظر محققین تعریف شاخص نظم مانند تعریف زیبایی در معماری است که بسته به اهداف مختلف متفاوت است [۵-۶]. شاخصی برای نظم مناسب است که مقدار آن با تغییر مقیاس متقارن سازه تغییر نکند. در این پژوهش تعداد این شاخص‌ها نه مورد می‌باشد که آنها را با  $r_i$  نشان می‌دهیم. همچنین علاوه بر تعاریف فوق شاخص‌های نظم دیگری نیز می‌تواند تعریف کرد مانند ضرب نرخ طولی در نرخ شکلی یا جمع آنها یا ضرب دو شاخص نظم و ... ما برای اولین بار تعریف کلی شاخص نظم را بر اساس رابطه‌ی (۳) پیشنهاد می‌دهیم که در آن هر کدام از  $r_i$  ها نشان دهنده‌ی یکی از شاخص‌های نظم ذکر شده‌ی فوق و هر کدام از  $a_i$  ها می‌توانند اعدادی بین صفر و یک و مجموعشان یک باشد و یا بنا به سلیقه‌ی کاربر تعیین شوند.

$$Pr = a_1 r_1 + a_2 r_2 + \dots + a_n r_n \quad (3)$$

با توجه به مقادیر مختلف  $a_i$  ها تعاریف مختلفی از شاخص‌های نظم ایجاد می‌گردد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در تمامی مثلث‌بندی‌ها رابطه‌ی (۱) برقرار است.

$$(1) \quad 1 - \text{تعداد نقاط} + \text{تعداد وجوه} = \text{تعداد اضلاع}$$

- ۱- با در نظر گرفتن نرخ طولی و نرخ شکلی به عنوان شاخص نظم، سازه‌ی شماره ۵ که با هدف |نرخ شکلی| حاصل شده است، مقدار کمتری نسبت به سایر سازه‌ها دارد، بنابراین از نظم بیشتری نسبت به سایر سازه‌ها برخوردار است.
- ۲- با در نظر گرفتن نرخ مساحت به عنوان شاخص نظم، سازه‌ی شماره ۶ که با هدف |نرخ مساحت| حاصل شده است، مقدار کمتری نسبت به سایر سازه‌ها دارد، بنابراین از نظم بیشتری نسبت به سایر سازه‌ها برخوردار است.
- ۳- با در نظر گرفتن هر کدام از شاخص‌های میانگین نرخ شکلی، انحراف طولی، انحراف استاندارد زوایا و ضریب تغییرات زوایا به عنوان شاخص نظم، سازه‌ی شماره ۹ که با هدف انحراف استاندارد زوایا حاصل شده است، مقدار کمتری نسبت به سایر سازه‌ها دارد، بنابراین از نظم بیشتری نسبت به سایر سازه‌ها برخوردار است.
- ۴- با در نظر گرفتن ضریب تغییرات مساحت به عنوان شاخص نظم، سازه‌ی شماره ۷ که با هدف ضریب تغییرات مساحت حاصل شده است، مقدار کمتری نسبت به سایر سازه‌ها دارد، بنابراین از نظم بیشتری نسبت به سایر سازه‌ها برخوردار است.



۵- تعداد تیپ‌های طولی سازه‌های شماره‌های ۱ و ۲ از همه کمتر است که این خود امر مونتاژ را ساده می‌نماید، مونتاژ قسمتی از کار مهندسان می‌باشد و نمی‌توان به صورت قطعی گفت که آیا این دو سازه از وزن کمتری نسبت به سایر سازه‌ها برخوردار است. از نظر بیننده انتظار می‌رود که این دو سازه از نظم بیشتری نسبت به سایر سازه‌ها برخوردار باشد، در حالی که با نتایج عددی شاخص‌های نظم سازگار نیست.

۶- نمودار شاخص طول نشان می‌دهد که سازه‌های شماره ۴ و ۵ از دامنه‌ی تغییرات کمتری نسبت به سایر سازه‌ها برخوردار است، و در بین این دو، سازه‌ی شماره ۵ از دامنه‌ی تغییرات اضلاع و زوایای کمتری برخوردار است، بنابراین از وضعیت پراکندگی اضلاع بهتری برخوردار است.

۷- مجموع اضلاع سازه‌ی نمونه‌ی موردی و سازه‌ی شماره ۹ از سایر سازه‌ها کمتر می‌باشند. مجموع اضلاع یک سازه ارتباطی با نظم یک سازه ندارد ولی در شرایط یکسان می‌تواند در انتخاب یک سازه با نظم بیشتر کمک نماید.

همانطور که مشاهده می‌شود با توجه به متفاوت بودن تعاریف شاخص‌های نظم، نتایج حاصل از بررسی شاخص‌های نظم نیز متفاوت است و نتایج نشان می‌دهد که سازه‌های شماره ۵، ۶، ۷ و ۹ با توجه به شاخص نظم مرتبط با آن از نظم بیشتری نسبت به سایر سازه‌ها برخوردار هستند و این نشان می‌دهد هر کدام از شاخص‌های نظم فوق به تنهایی عاملی برای مقایسه‌ی نظم دو سازه نمی‌باشند، همچنین تعریف پیشنهادی نشان می‌دهد که با مقادیر مختلف  $a_i$  ها یکی از سازه‌های شماره ۳ الی ۱۱ از نظم بیشتری برخوردار می‌شود که از دید بصری منظم به نظر نمی‌رسند و جواب منحصر به فردی به دست نمی‌آید. بنابراین نیاز است که تعریف شاخص نظم بهبود یابد تا به صورت قطعی تصمیم گرفت کدام سازه از نظم هندسی بیشتری برخوردار است. این امر نیاز به تحقیقات و آزمایش‌های فراوان دارد و تیم تحقیقاتی از محققین مهندسين سازه و رياضيدانان نیاز است که بتوان تعریف واحدی برای شاخص نظم ارائه نمود. اما سوالاتی مطرح می‌شود که در پژوهش‌های بعدی باید به آن پاسخ داد.

- استفاده از شیوه‌های هندسی، محاسباتی و بهینه‌سازی‌های دیگر چقدر در بهبود نظم گنبد اشودلر موثر هستند؟
- استفاده از توابع هدف دیگر جهت رسیدن به اضلاع یکسان در بهبود نظم موثر می‌باشند؟
- آیا استفاده از شیوه‌های بهبود نظم در کاهش وزن یک سازه‌ی فرم آزاد موثر است؟

و ...

## تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از هم‌اندیشی مهندسين سازه‌ی شرکت سازه فضاکار افق نور، مهندسين سازه‌ی اصفهان و معماران پارامتریک اصفهان که در این پروژه ما را یاری رساندند، کمال سپاسگزاری را دارند

## منابع

- [1] Y. Tsuboi, Analysis, design and realization of space frames, Bulletin of the International Association of Shell and Spatial Structures, 15 (1984) 84-85.
- [2] H. Nooshin, Space structures and configuration processing, Progress in Structural Engineering and Materials, 1(3) (1998) 329-336.
- [3] B.T.E.S. O.D.S.S, Code of Practice for Skeletal Steel Space Structures, Islamic Republic of Iran Vice presidency for Strategic Planning and Supervision, (2010) 1-523, In Persian.
- [4] Y. Kouroiwa, Regularization of Structural Forms using Genetic Algorithms, PHD Thesis, University of Surrey, 2000.
- [5] S.A. Behnejad, Geometrical data for lattice spatial structures: regularity, historical background and education, PHD Thesis, University of Surrey, 2020.

- [6] R. Haghazari, H. Nooshin, M. Golabchi, Improving the regularity of geodesic domes using the concept of stepping projection, *International Journal of Space Structures*, 29(2) (2014) 81-95.
- [7] H. Nooshin, K. Ishikawa, P. Disney, J. Butterworth, The traviation process, *Journal of the International Association for shell and spatial structures*, 38(3) (1997) 165-175.
- [8] D. Rutten, Galapagos: On the logic and limitations of generic solvers, *Architectural Design*, 83(2) (2013) 132-135.
- [9] H. Nooshin, Y. Kuriowa, P.L. Disney, A genetic method for regularization of structural configurations, in: *IASS Congress Spain, Madrid, 1999*, pp. 1-10.
- [10] A. Piórkowski, P. Mazurek, J. Gronkowska-Serafin, Comparison of assessment regularity methods dedicated to isotropic cells structures analysis, in: *Image Processing & Communications Challenges 6*, Springer, 2015, pp. 169-178.
- [11] S.R. Massah, H. Ahmadi, Regularizing Structural Configurations by using Meta-Heuristic Algorithms, *Geomechanics and Engineering*, 12(2) (2017) 197-210.
- [12] M. Goodarzi, A. Mohades, M. Forghani-elahabad, Improving the Gridshells' Regularity by Using Evolutionary Techniques, *Mathematics*, 9(4) (2021) 440.
- [13] A. Tedeschi, *AAD, Algorithms-aided design: parametric strategies using Grasshopper*, Le penseur publisher, 2014.

# On Improving regularity of Delaunay Triangulation of Khuzestan Bidbland Dome via Circle Packing Algorithm and Genetic Optimization

Parisa Hemmatian Dehkordi<sup>a1\*</sup>, Ali Mohades Khorasani<sup>b</sup>, Marjan Goodarzi<sup>c</sup>, Mohammad Chaichi Raghimi<sup>d</sup>

<sup>a1\*</sup> Instructor, Department of Mathematics, Payame Noor University, Tehran, Iran

<sup>b</sup> Associate Professor. Laboratory of Algorithms and Computational Geometry, Department of Mathematics and Computer Science, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran;

<sup>c</sup> Lecturer University, Laboratory of Algorithms and Computational Geometry, Department of Mathematics and Computer Science, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran;

<sup>d</sup> Assistant Professor, Department of Mathematics, Payame Noor University, Tehran, Iran

## Abstract

Professor Nooshin et al. defined structural regularity indicators quantitatively three decades ago and used various methods for improving regularity of structures, such as stepping projection, sphere packing concept, recursive techniques, and etc, to create a special category of space structures (domes and flats) and grid shells that were designed in a multifaceted manner, and depending on the type of project, they used one or more of these indicators to analyze and compare the regularity of the structures. The regularity studied in this research is related to increase of equal lengths or almost equal lengths, the reduction the count of elements with different lengths, the reduction of the number of length intervals and different shapes of faces while maintaining the geometric form. The aim of this research is to study the previous regularity indicators, investigate and analyze the improving regularity of Delaunay triangulation obtained from the points of the single layer dome of Bidboland Khuzestan with the proposed algorithm: using the circle packing algorithm and genetic optimization (using the minimization of different regularity indicators) to reach a suitable pattern. In order to analysis the improving regularity. we have presented algorithms for calculating the regularity indicators, we have calculated the numerical results of these indices and we have suggested a general definition for regularity degree. we show that each of these indices alone are not criteria for measuring and comparing the regularity of two structures. The results of this research are effective in improving the regularity of structures, form finding and creating the optimal design of a structure.

## KEYWORDS

Dome, Improving Regularity, Delanauy Triangulation, Genetic Optimization, Circle Packing Algorithm.

---

<sup>1</sup> Corresponding Author: Email: Parisa-hemmatian@Pnu.ac.ir