

## Investigating improving of the geometric regularity of the freeform Ati Center Mashhad Space Structure

Parisa Hemmatian Dehkordi<sup>1\*</sup>, Ali Mohades Khorasani<sup>2</sup>, Marjan Goodarzi<sup>3</sup>, Mohammad Chaichi Raghimi<sup>4</sup>

1- Instructor, Department of Mathematics, Payame Noor University, Tehran, Iran.

2- Associate Professor, Laboratory of Algorithms and Computational Geometry, Department of Mathematics and Computer Science, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

3- Laboratory of Algorithms and Computational Geometry, Department of Mathematics and Computer Science, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

4- Assistant Professor, Department of Mathematics, Payame Noor University, Tehran, Iran.

### ABSTRACT

The definition of regularity is different as it has different goals. Most engineers agree that a space structure is regular if a high percentage of its elements (sides) are equal or almost equal. There are several ways for improving regularity of the space structures, In this regard, Professor Nooshin et al used methods such as Traviation Process, Stepping Projection, Recursive techniques and etc to create a special category of structures (domes and flats) and they presented grid shells that were designed in a multimodal way. They defined regularity indicators quantitatively which are known as degrees of regularity or geometric parameters or regularity measuring meters. The regularity in this research is related to the increase of elements with equal or almost equal length, reduction the number of elements with different lengths, and the reduction of the number of length intervals while maintaining the geometry of the form. The freeform space structure of Ati Center were designed by the engineers of the Ofogh Noor Space Structures Company by using a single layer grid in Rhino software. This study aims to investigate the previous regularity indicators and improving regularity of this structure with triangulation techniques and proposed algorithm which is the optimization of Delaunay triangulation obtained from 176 random points with the help of circle packing algorithm and octopus optimization to reach a suitable pattern. Also we have presented algorithms to calculate the regularity indices and we have calculated them for each structure, investigated the improving regularity and we have suggested the general definition of regularity index and we have shown that the definitions of regularity indices alone are not the basis for evaluating the regularity of two structures. So a unique definition is needed. The result of this research is effective in solving problems related to form selection, improving regularity.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 15 November 2022

**Revise Date:** 15 January 2023

**Accept Date:** 14 February 2023

### Keywords:

Space Structure

Free Form

Regularity Improving

Circle Packing Algorithm

Octopus Optimization

Parametric Form

Delaunay Triangulation

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.368513.2966>

\*Corresponding author: Parisa Hemmatian Dehkordi

Email address: Parisa-hemmatian@Pnu.ac.ir

## بررسی بهبود نظم هندسی سازه فضاکار فرم آزاد آتی سنتر مشهد

پریسا همتیان دهکردی<sup>۱\*</sup>، علی محدث خراسانی<sup>۲</sup>، مرجان گودرزی<sup>۳</sup>، محمد چایچی رقیمی<sup>۴</sup>

۱- مربی، دانشکده علوم پایه، گروه ریاضی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

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

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

۴- استادیار، دانشکده علوم پایه، گروه ریاضی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

### چکیده

تعریف نظم با توجه به اهداف مختلف متفاوت می باشد. اکثریت مهندسیین بر این توافق هستند که سازه‌های منظم است که درصد بالایی از اضلاع سازه یکسان و یا تقریباً یکسان باشد. شیوه‌هایی برای بهبود نظم فرمهای سازه‌های وجود دارد که در این راستا پروفسور نوشین و همکاران روش‌هایی نظیر فرآیند تراپویش، تصویرسازی گام به گام، 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. آنها شاخص‌های نظم سازه را به صورت کمی تعریف کرده که به درجه‌های نظم یا پارامترهای هندسی یا مترهای اندازه‌گیری نظم سازه موسوم هستند. 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) با حفظ هندسه‌ی فرم بر می‌گردد. سازه‌ی فضاکار فرم آزاد آتی سنتر مشهد توسط مهندسیین شرکت سازه‌های فضاکار افق نور به وسیله‌ی یک شبکه‌ی تک لایه در نرم‌افزار راینو طراحی و در سال ۱۳۹۹ در خیابان پاسداران مشهد ساخته شد. اهداف این پژوهش مطالعه‌ی پیشین شاخص‌های نظم، بررسی و تحلیل بهبود نظم این سازه با تکنیک‌های مثلث‌بندی و الگوریتم پیشنهادی: بهینه‌یابی مثلث‌بندی دلانی حاصل از ۱۷۶ نقطه‌ی تصادفی با کمک الگوریتم پیمایش دایره‌ای و بهینه‌سازی اختاپوس جهت رسیدن 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 نموده‌ایم و نشان می‌دهیم این شاخص‌ها به تنهایی ملاکی برای سنجش و مقایسه‌ی نظم دو سازه نمی‌باشند و یک تعریف واحد و یکتا نیاز است. نتیجه‌ی حاصل از این پژوهش در حل مسائل مرتبط با انتخاب فرم، بهبود نظم و طرح بهینه موثر می‌باشد.

کلمات کلیدی: سازه فضاکار، فرم آزاد، بهبود نظم، الگوریتم پیمایش دایره‌ای، بهینه‌سازی اختاپوس، فرم پارامتریک، مثلث‌بندی دلانی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2023.368513.2966">https://doi.org/10.22065/jsce.2023.368513.2966</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2023.368513.2966">10.22065/jsce.2023.368513.2966</a>	۱۴۰۲/۰۸/۳۰	۱۴۰۱/۱۱/۲۵	۱۴۰۱/۱۱/۲۵	۱۴۰۱/۱۰/۲۵	۱۴۰۱/۰۸/۲۴
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				پریسا همتیان دهکردی		
				Parisa_Hemmatian@Pnu.ac.ir		

## ۱- مقدمه

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 منحنی‌گونه به خود می‌گیرد [۱]. سازه‌ی فضاکار شبکه‌ای با فرم آزاد از مجموعه اعضایی تشکیل شده است که به صورتی نامنظم شکل یافته‌اند. چنین سازه‌ای می‌تواند با تغییر و یا ترکیب شکل‌های متعارف منظم به دست آید (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی، ۱۳۸۹) [۲]. به علت طبیعت سازه و هندسه‌ی این نوع سازه‌ها جهت‌گیری اعضا در محل اتصالات بسیار متغیر هستند که این خود سبب ایجاد زوایای مختلف و تنوع زیاد در اندازه‌ی المان‌ها 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. 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 آیین‌نامه‌ای را نیز برآورده کند.

محققین از سه دهه‌ی پیش تا کنون سعی کرده‌اند شاخص‌هایی جهت ارزیابی، سنجش و تحلیل نظم یک سازه و همچنین مقایسه‌ی نظم دو سازه معرفی کنند. این شاخص‌ها به مترهای اندازه‌گیری نظم یا پارامترهای هندسی یا درجه‌های نظم معروف هستند که برای تولید اطلاعات هندسی استفاده می‌شوند. با توجه به اهداف مختلف تعریف نظم سازه و شاخص نظم متفاوت است و تا کنون تعریف واحدی برای یک سازه‌ی منظم و شاخص نظم 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 سازه یکسان باشد. در بررسی نظم در سازه‌های فضاکار، شبکه‌ی خطی این سازه‌ها مورد مطالعه قرار می‌گیرد [۳]. در علم مهندسی سازه برای اولین بار پروفیسور هشیار نوشین<sup>۱</sup>، رامتین حق‌نظر<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) برابر ۱ متناظر با یک چندضلعی منظم است. این شاخص‌ها به صورت معکوس هم تعریف می‌شوند [۴-۵]. سپس این شاخص‌ها را به سازه‌هایی که از ترکیب الگوهای مختلف هندسی تشکیل شده‌اند، تعمیم دادند. همچنین برای سنجش نظم رده‌ای از سازه‌ها (گنبد‌ها و تخت) که از ترکیب وجوه مختلف حاصل می‌گردند؛ شاخص‌های دیگری مانند میانگین نرخ‌های شکلی، تعداد سایزهای متفاوت عناصر، انحراف استاندارد اضلاع و نمودار شاخص طول<sup>۳</sup> (نمودار LEP)، دامنه‌ی تغییرات اضلاع (زوایا)، میانگین اضلاع (زوایا)، واریانس اضلاع (زوایا)، انحراف طولی (ضریب تغییرات اضلاع)، انحراف شکلی (ضریب تغییرات زوایا) و ... را نیز معرفی کرده‌اند. این شاخص‌ها در رساله‌ی دکترای کورویوا<sup>۴</sup> توصیف شده‌اند [۶]. محاسبه‌ی این شاخص‌ها نیاز به الگوریتم‌هایی دارد. هر کدام از شاخص‌های معرفی شده دارای مزایا و معایبی است، همچنین با توجه به نوع پروژه این تعاریف می‌تواند توسط محقق بسط یا تغییر یابد. به طور کلی نمی‌توان گفت کدام شاخص از همه بهتر عمل می‌کند که این خود نیاز به تحقیقات و

<sup>1</sup> Hoshyar Nooshin

<sup>2</sup> Ramtin Haghazar

<sup>3</sup> Length Profile Chart

<sup>4</sup> Kuroiwa

آزمایش‌های فراوان دارد. شاخص‌های مختلف نظم سازه، همراه با منبع در جدول ۱ معرفی شده است. در همه‌ی 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

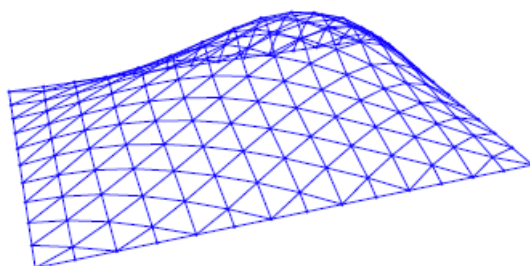
ردیف	نام محقق	سال و منبع	معیار مناسب برای سنجش نظم سازه
۱-	نوشین و همکاران	۱۹۹۷ [۵]	نرخ طولی (r) $r = \frac{L_{\max}}{L_{\min}}$ این شاخص به صورت معکوس هم تعریف می‌شود.
۳-	نوشین و همکاران	۱۹۹۷ [۵]	نمودار شاخص طول (L)
۴-	حق نظر، نوشین و همکاران	۱۹۹۷ [۵]	انحراف معیار (S) $S = \sqrt{\frac{\sum (L_i - L_{av})^2}{n}}$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

شاخص واریانس وضعیت پراکندگی اضلاع نسبت به میانگین را نشان می‌دهد. اگر همه‌ی 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 بعد اضلاع می‌باشد. شاخص ضریب تغییرات بی بعد است و صفر بودن آن بدان معناست که طول همه‌ی اضلاع سازه با هم برابر است. شاخص دامنه تغییرات حداکثر میزان پراکندگی را نشان می‌دهد و صفر بودن آن نشان دهنده‌ی برابری همه‌ی 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.

از آنجا که پژوهشگران کمتر به بررسی و کاربرد شاخص‌های نظم و بهبود نظم سازه‌های فضاکار با فرم آزاد<sup>۵</sup> پرداختند؛ لذا در این راستا نمونه‌ی موردی سازه فضاکار فرم آزاد آتی سنتر مشهد انتخاب گردید. سازه‌ی فضاکار فرم آزاد آتی سنتر مشهد توسط مهندسی شرکت

<sup>5</sup> Free Form

سازه‌های فضاکار افق نور با ابعاد  $22525 \times 20137$  میلیمتر به وسیله یک شبکه‌ی تک لایه در نرم افزار راینو طراحی (شکل ۱) و آسمان‌نمای مجتمع در سال ۱۳۹۹ در خیابان پاسداران مشهد ساخته شد (شکل ۲). اتصالات این سازه استوانه‌هایی از جنس CK45 بوده که به وسیله CNC در زوایای مختلف فرزکاری و سوراخ کاری گردیده و نصب شده است. برای پوشش این سازه از شیشه استفاده شده است.



شکل ۱- سازه فضاکار فرم آزاد آتی سنتر مشهد ترسیم شده در نرم افزار راینو، منبع: شرکت سازه‌های فضاکار افق نور



شکل ۲- سازه فضاکار فرم آزاد آتی سنتر مشهد، منبع: شرکت سازه‌های فضاکار افق نور

در پژوهش پیش رو تمرکز و بررسی بر روی نظم هندسی فرم با ۱۷۶ نقطه می‌باشد. نظم در این پژوهش به افزایش المان‌ها با طول یکسان یا تقریباً یکسان، کاهش تعداد المان‌ها با طول‌های متفاوت و کاهش تعداد تیپ‌های طولی با حفظ هندسه‌ی آن فرم بر می‌گردد. در این پژوهش طول المان‌ها بین ۱۰۰۰ الی ۱۱۰۰ میلیمتر، ۱۱۰۰ الی ۱۲۰۰ میلیمتر و ... هر کدام یک تیپ طولی (بازه‌ی طولی) را نشان می‌دهد. المان‌های کمتر از ۱۰۰۰ میلیمتر یک تیپ طولی محسوب می‌شود و اگر در یک تیپ طولی تعداد المان‌ها ۲ یا کمتر باشد، در تیپ بعدی (در صورت عدم وجود در تیپ فعلی) محسوب می‌شود و آن را به عنوان یک تیپ در نظر نمی‌گیریم. لذا به جهت تغییر موقعیت‌های نقاط روی فرم آزاد و دستیابی به یک الگوی مثلث‌بندی مناسب، ابتدا پوسته‌ی<sup>۶</sup> (رویه‌ی) سازه‌ی فضاکار آتی سنتر به صورت پارامتریک طراحی و ۱۷۶ نقطه با تکنیک‌های مختلف روی پوسته و مثلث‌بندی دلانی<sup>۷</sup> ایجاد گردید. قید مسئله این است که ضمن تثبیت چهار نقطه‌ی گوشه سایر نقاط فقط می‌توانند روی پوسته تغییر مکان دهند. همچنین برای اولین بار الگوریتم پیشنهادی: الگوریتم پیمایش دایره‌ای و بهینه‌سازی اختاپوس را برای مثلث‌بندی بهینه‌ی حاصل از ایجاد ۱۷۶ نقطه‌ی تصادفی روی پوسته‌ی آتی سنتر را در شرایط آزمایشگاهی به کار برده، الگوریتم‌هایی برای محاسبه‌ی شاخص‌های طولی، زاویه‌ای و مساحتی نظم طراحی و در هر مرحله از انجام مثلث‌بندی‌ها شاخص‌های نظم را محاسبه کرده، تعریف کلی شاخص نظم را بر اساس شاخص‌های نظم مطالعات پیشین محققان پیشنهاد داده و در نهایت بهبود نظم سازه فضاکار آتی سنتر را با هر یک از شاخص‌ها مورد بررسی و تحلیل قرار داده‌ایم.

<sup>6</sup> Surface

<sup>7</sup> Delaunay Triangulation

تمامی مراحل پژوهش در نرم افزار راینو ورژن ۲۰۱۳.۰۶.۱۳ با کمک پلاگین گرس هاپر<sup>۸</sup> و افزونه های لانچ باکس<sup>۹</sup>، کانگورو<sup>۱۰</sup> و اختاپوس<sup>۱۱</sup> (ورژن ۰.۳.۶) انجام 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 تواند هم در نظم سازه و هم در رفتار سازه موثر باشد و مهندسیین 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. پرداختن به اطلاعات هندسی و ویژگیهای متریک در طراحی و ساخت سازه های فضاکار بسیار مهم است. خواص متریک معمولاً در ارزیابی ساختار یک شبکه، تعریف نظم ساختار یک شبکه و بهبود نظم آن کاربرد دارد و در چند دهه ی اخیر محققین در تاشه پردازی رده های از سازه ها به آن پرداخته اند [۳].

به نژاد و همکاران در رساله ی دکترای خود مفهوم پیمایش کروی را برای یافتن یک خانواده از الگوها برای گنبد های شبکه ای ارائه می دهد. این شیوه با درصد بالایی از المان های مساوی دارای مزایای سهولت ساخت، مونتاژ، کاهش هزینه و زمان می باشد [۳].

حق نظر و همکاران شیوه ی تصویر سازی گام به گام<sup>۱۲</sup> را با هدف بهبود نظم برای ایجاد گنبد های ژئودزیک به کار بردند و با استفاده از شاخص های نظم شامل تعداد کامل المان ها، انحراف معیار المان ها، میانگین نرخ شکلی، نرخ طولی و نمودار شاخص طول، سازه های حاصل از تصویر سازی نرمال و تصویر سازی پله ای را مورد تحلیل قرار دادند [۴].

پروفیسور نوشین و همکاران در مقاله ی [۵] فرآیند تراپویش (فرآیند مینیمم سازی تابع پتانسیل هندسی<sup>۱۳</sup> (تابع GP)) را برای تاشه پردازی منظم یک سازه به کار بردند. برای مثال با اجرای این فرآیند روی یک گنبد باعث تغییر در موقعیت های گره ای و کاهش تفاوت های طولی المان ها گردید و شاخص های نظم نرخ طولی، انحراف طولی و نمودار شاخص طول را برای تحلیل نظم به کار بردند.

پروفیسور نوشین و همکاران در یک مثال ساده روش ژنتیک را برای نظم تاشه پردازی سازه ای مطرح کردند. برای تابع هدف از واریانس نرمال شده استفاده کردند. این روش باعث شد طول المان ها یکسان یا نزدیک به هم باشد [۷].

پیرکوفسکی<sup>۱۴</sup> در مقاله ی [۸] برای بررسی نظم شبکه های سلولی مفاهیم نرخ طولی، انحراف معیار و ضریب تغییرات را برای مساحت های سلول ها و همچنین برای محیط های سلول ها به کار برد.

مساح و همکاران در مقاله ی [۹] الگوریتم های فرا ابتکاری (الگوریتم های بهینه سازی ذرات<sup>۱۵</sup> و بهینه سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی<sup>۱۶</sup>) را برای منظم سازی تاشه پردازی سازه به کار بردند. دو تابع هدف واریانس نرمال شده و تابع پتانسیل هندسی در بهبود نظم مثال های مطرح شده تأثیر زیادی داشت.

علی محدث خراسانی و همکاران در مقاله ی [۱۰] شیوه ی استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) را برای بهبود نظم ساختارهای پوسته ی شبکه ای توضیح دادند. آنها این شیوه را برای یک نمونه ی سازه ی تخت اجرا کردند و نشان دادند این شیوه کارآمدتر از الگوریتم ژنتیک است.

<sup>8</sup> Grasshopper

<sup>9</sup> Lunchbox

<sup>10</sup> Kangaroo

<sup>11</sup> Octpus

<sup>12</sup> Stepping Projection

<sup>13</sup> Geometric Potential Function

<sup>14</sup> Piórkowski

<sup>15</sup> Particle Swarm Optimization (PSO)

<sup>16</sup> Biogeography-Based Optimization (BBO)

مرجان گودرزی و همکاران در مقاله‌ی [۱۱] 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. تمرکز این پژوهش تحلیل تعاریف شاخص‌های هندسی نظم و بررسی بهبود نظم نمونه‌ی موردی سازه‌ی فضاکار فرم آزاد آتی‌سنتر مشهد با ۱۷۶ نقطه می‌باشد.

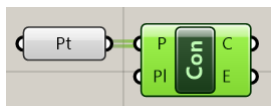
### ۳- روش تحقیق

روند پژوهش به صورت الگوریتمیک، محاسباتی، کاربردی، آزمایشگاهی و تحلیلی می‌باشد. مراحل پژوهش جهت بررسی بهبود نظم سازه فضاکار آتی‌سنتر با ۱۷۶ نقطه عبارتند از:

- ۱- طراحی سازه‌ی فضاکار آتی‌سنتر نمونه‌ی موردی در محیط گرس‌هاپر
- ۲- ایجاد الگوریتم‌هایی برای محاسبه‌ی شاخص‌های نظم (طولی، زاویه‌ای و مساحتی نظم) سازه‌ی فضاکار آتی‌سنتر
- ۳- ایجاد پوسته‌ی فرم آزاد گذرا از نقاط سازه‌ی فضاکار آتی‌سنتر به صورت پارامتریک
- ۴- شبکه‌ای کردن پوسته‌ی طراحی شده
- ۴-۱- مرحله اول ایجاد ۱۷۶ نقطه روی پوسته‌ی فرم آزاد با ۸ شیوه‌ی مختلف به کمک مولفه‌های افزونه‌ی لانچ باکس و ایجاد مثلث‌بندی دلانی
- ۴-۲- ایجاد ۱۷۶ نقطه تصادفی (ایجاد قید: با تثبیت ۴ نقطه در گوشه‌ها) روی پوسته‌ی فرم آزاد و مثلث‌بندی دلانی، بهبود نظم این مثلث‌بندی با کمک الگوریتم پیمایش دایره‌ای و بهینه‌سازی اختاپوس با استفاده از کمینه‌سازی شاخص نظم انحراف طولی.
- ۵- محاسبه‌ی شاخص‌های نظم مثلث‌بندی‌های ایجاد شده
- ۶- بررسی تعاریف شاخص‌های هندسی نظم با استفاده از تعریف پیشنهادی
- ۷- تحلیل بهبود نظم هندسی سازه‌ی فضاکار آتی‌سنتر

#### ۳-۱ طراحی سازه فضاکار آتی‌سنتر نمونه موردی در محیط گرس‌هاپر

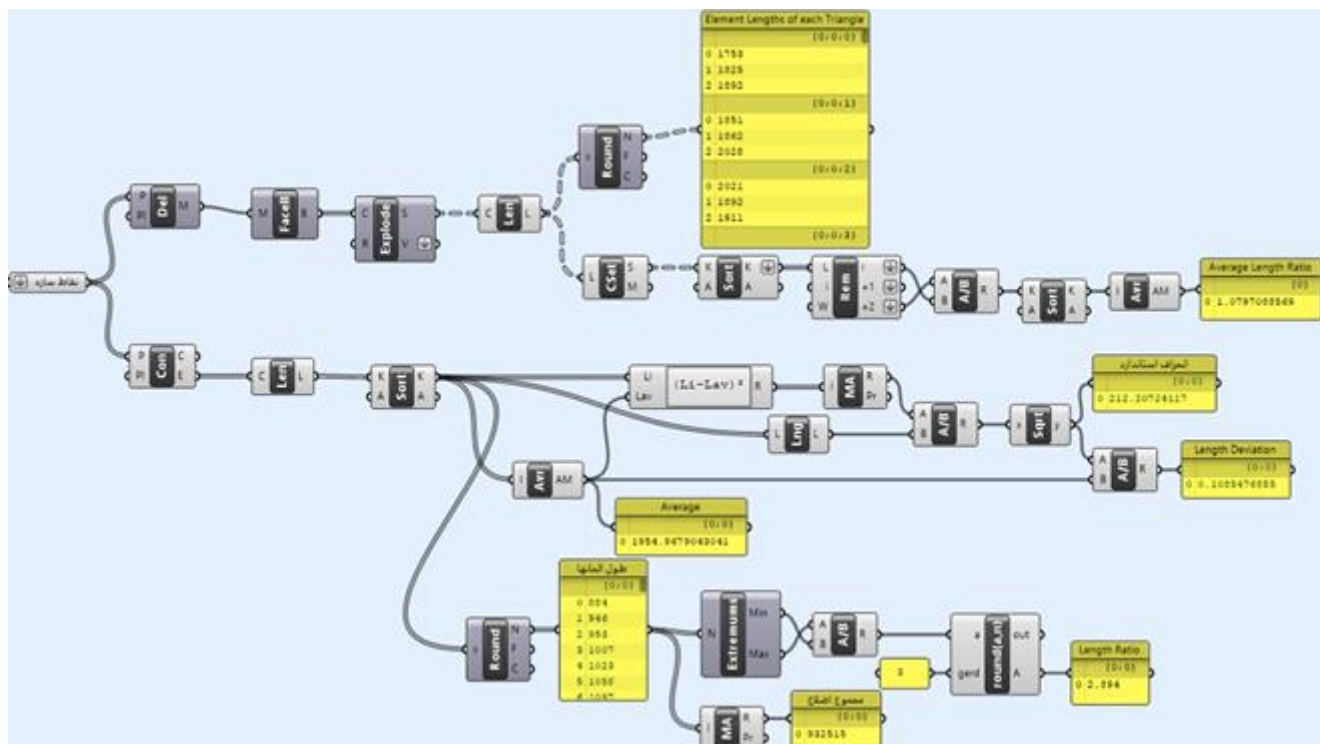
ابتدا نقاط سازه‌ی فضاکار آتی‌سنتر در محیط راینو را به مولفه‌ی نقطه اتصال دادیم و مثلث‌بندی دلانی انجام گردید (شکل ۳).



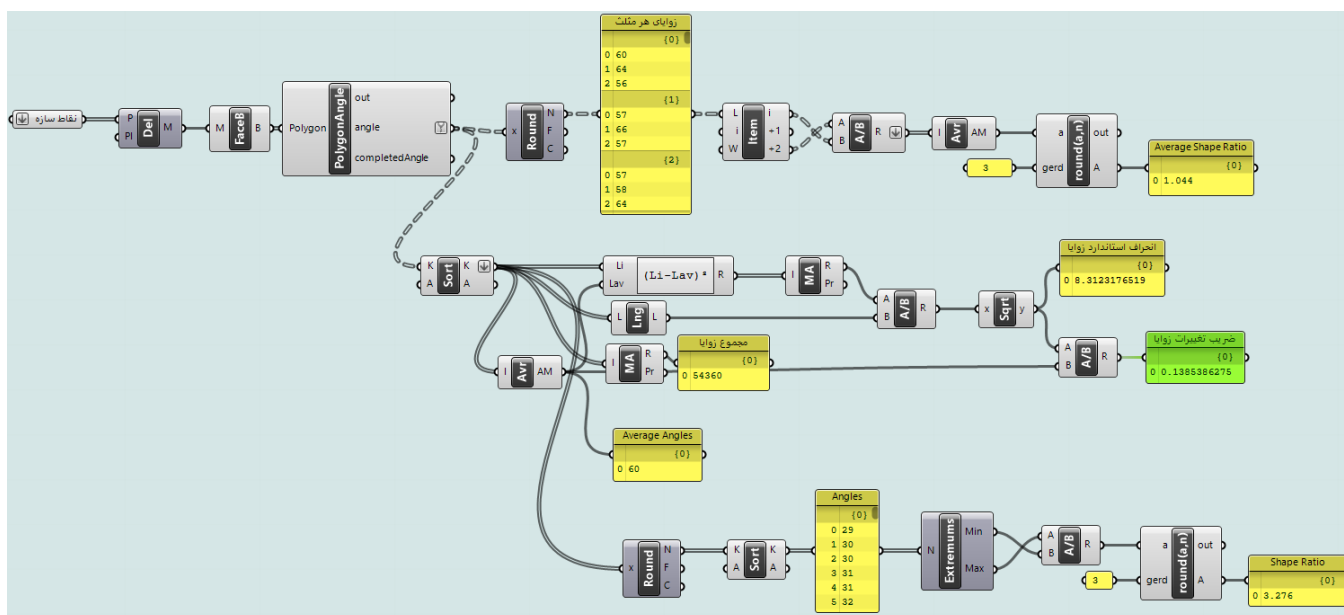
شکل ۳- اتصال نقاط و مثلث‌بندی دلانی

#### ۳-۲ محاسبه شاخص‌های نظم

طبق الگوریتم‌های اشکال ۴ الی ۶ شاخص‌های طولی، زاویه‌ای و مساحتی نظم محاسبه گردید.

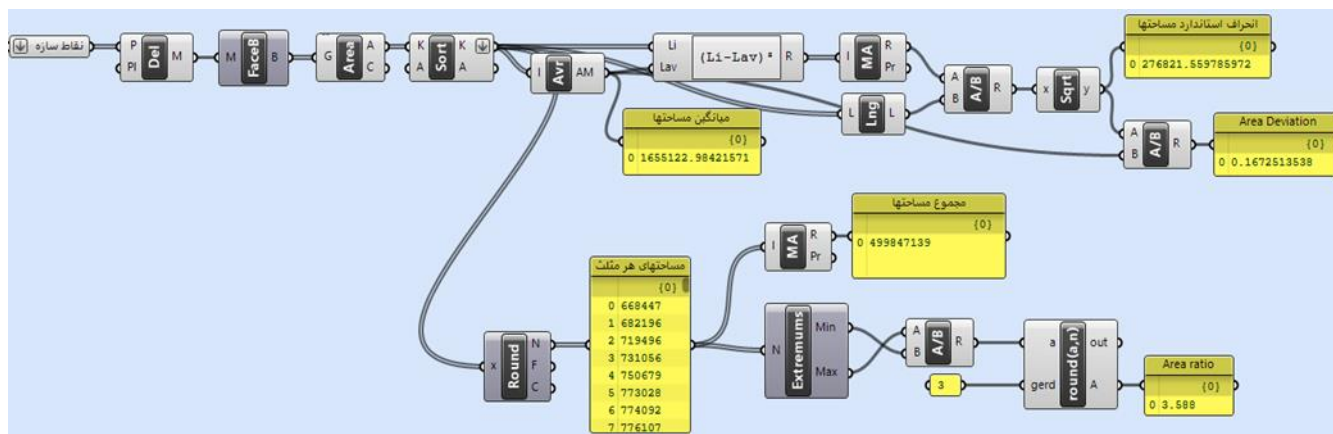


شکل ۴- الگوریتم محاسبه‌ی شاخص‌های طولی نظم، منبع: نگارندگان



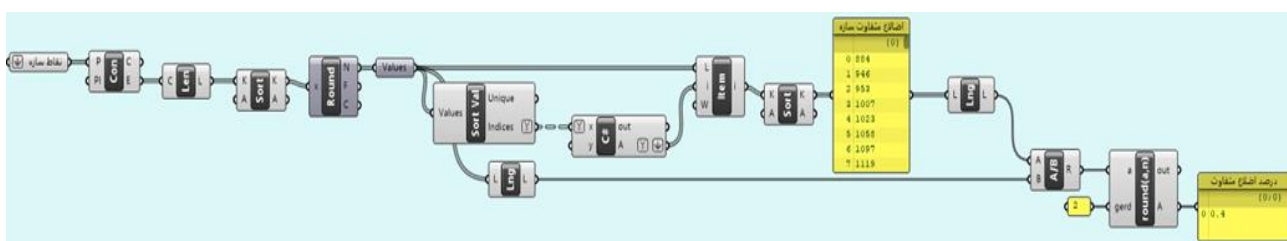
شکل ۵- الگوریتم محاسبه‌ی شاخص‌های زاویه‌ای نظم، منبع: نگارندگان





شکل ۶- الگوریتم محاسبه‌ی شاخص‌های مساحتی نظم، منبع: نگارندگان

جهت محاسبه‌ی درصد اضلاع متفاوت از الگوریتم شکل ۷ و برنامه نویسی پایتون جهت شماره اندیس‌های اضلاع استفاده نمودیم (شکل ۸).



شکل ۷- الگوریتم محاسبه‌ی درصد اضلاع متفاوت سازه، منبع: نگارندگان

```

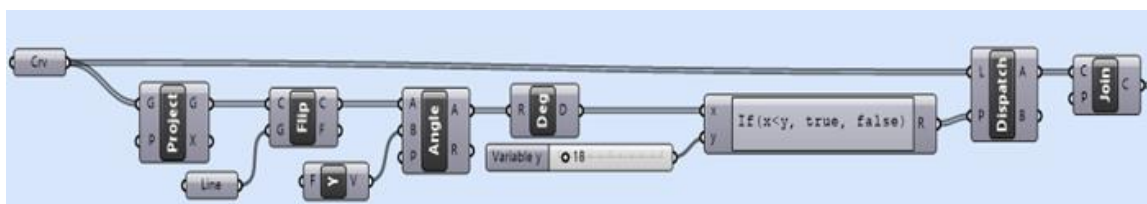
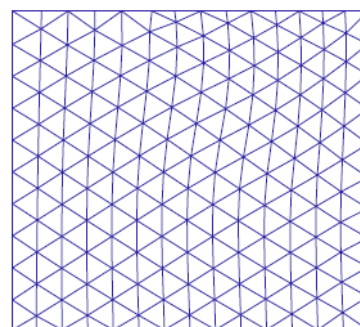
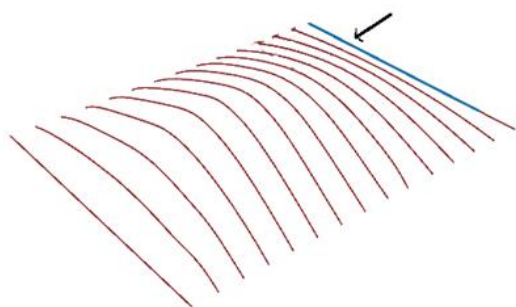
Script Editor
Script component: C#
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
using
// <summary>
// This class will be instantiated on demand by the Script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

شکل ۸- کدنویسی شماره اندیس‌های اضلاع متفاوت سازه، منبع: نگارندگان

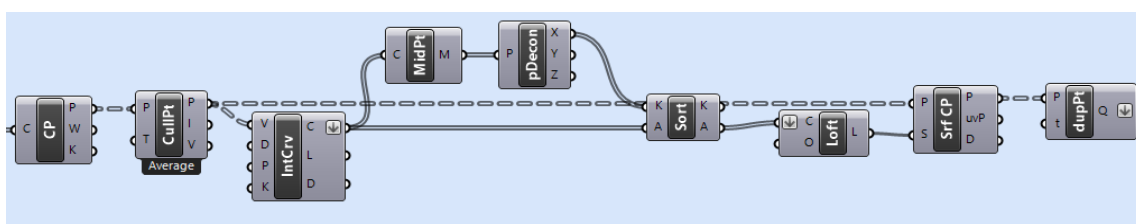
به طور مشابه الگوریتم محاسبه‌ی درصد اضلاع متفاوت و درصد زوایای متفاوت سازه محاسبه می‌گردد.

## ۳-۳ ایجاد پوسته‌ی فرم آزاد برای پوشش سازه فضاکار آبی‌سنتر به صورت پارامتریک

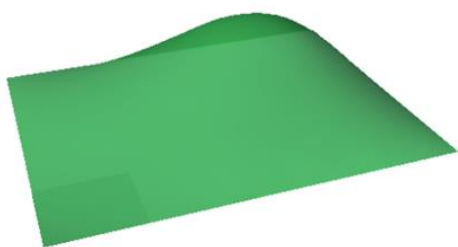
به منظور تغییر موقعیت‌های نقاط با حفظ هندسه‌ی فرم آزاد و ایجاد مثلث‌بندی با شیوه‌های دیگر ابتدا پوسته‌ی فرم آزاد طراحی گردید. جهت طراحی پوسته‌ی فرم آزاد ابتدا با کمک مولفه‌ی Project همه‌ی المان‌های سازه را به پلان تصویر و برای جداسازی خطوط در راستای محور  $y$  خط راهنما ترسیم و شرطی برقرار می‌کنیم که در آن خطوط همسو با محور  $y$  با تولرانس خطای ۱۸ درجه از خطوط دیگر جدا شوند؛ سپس این خطوط را با هم یکی کرده (شکل‌های ۹ الی ۱۱) و در ادامه با در نظر گرفتن نقاط کنترل و اتصال آنها به صورت منحنی، پوسته‌ای که از این خم‌ها می‌گذرد، با مولفه‌ی loft رسم می‌شود (شکل‌های ۱۲ و ۱۳). تمام نقاط سازه فضاکار روی پوسته قرار دارند. نمای پوسته به صورت شکل ۱۴ است.

شکل ۹- اتصال خطوط که همسو با محور  $y$  قرار دارند، منبع: نگارندگانشکل ۱۱- خط راهنما و اتصال خط‌ها در راستای محور  $y$ 

شکل ۱۰- تصویر خطوط سازه به پلان



شکل ۱۲- ادامه‌ی الگوریتم شکل ۹ ایجاد پوسته‌ی گذرنده از خم‌های ایجاد شده، منبع: نگارندگان



شکل ۱۴-نمای پوسته سازه فضاکار آتی سنتر



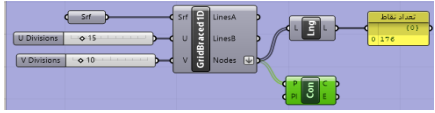
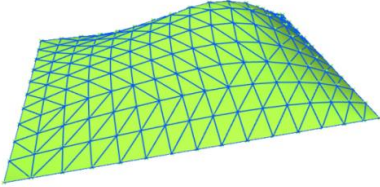
شکل ۱۳-نمای پوسته گذرنده از نقاط و منحنی ها

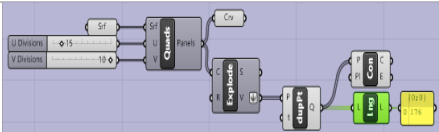
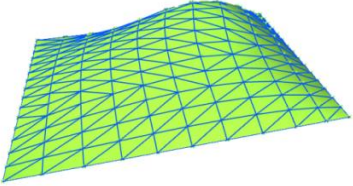
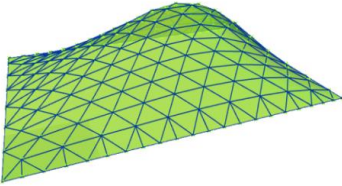
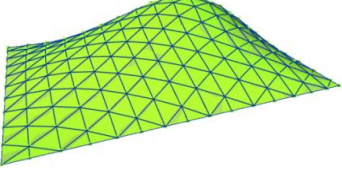
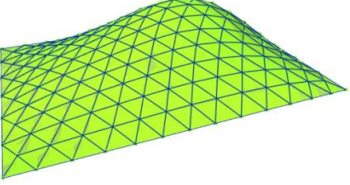
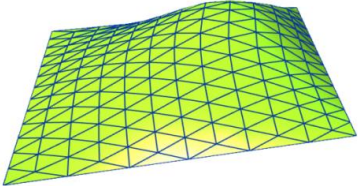
## ۳-۴ شبکه‌ای کردن پوسته‌ی طراحی شده

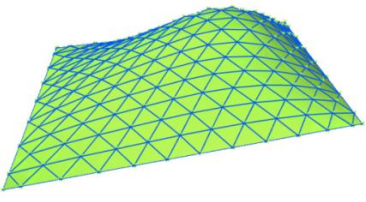
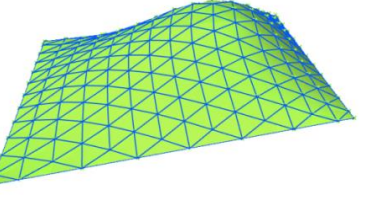
## ۳-۴-۱ مرحله اول ایجاد ۱۷۶ نقطه روی پوسته با کمک مولفه‌های افزونه لانچ باکس و ایجاد مثلث‌بندی دلانی

برای ایجاد ۱۷۶ نقطه روی پوسته‌ی شکل ۱۴ با کمک مولفه‌های افزونه‌ی لانچ باکس الگوریتم‌هایی ارائه می‌دهیم [۱۲]. سپس مثلث‌بندی دلانی ایجاد و شاخص‌های نظم محاسبه می‌گردد. سعی شده انتخاب مناسبی در تقسیمات طول و عرض برای ایجاد مثلث‌بندی‌ها صورت گیرد (جدول ۲).

جدول ۲- شیوه‌های مختلف ایجاد ۱۷۶ نقطه و انجام مثلث بندی دلانی با کمک مولفه‌های افزونه لانچ باکس، منبع: نگارندگان

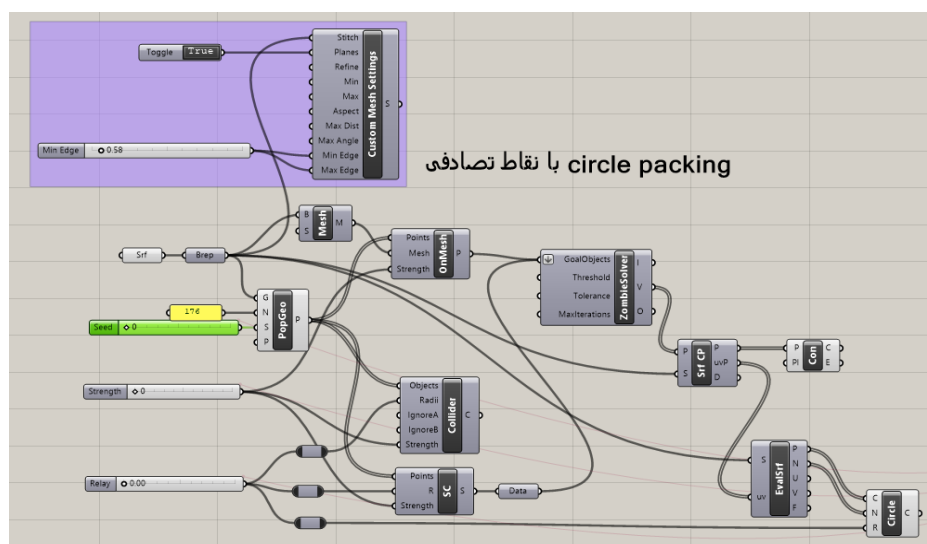
ردیف	روش مثلث‌بندی	حذف نقاط تکراری	U و V	نمای سازه
۱	مولفه Braced Grid 1-D Structure	×		
	این مولفه برای ایجاد شبکه‌ای از خطوط افقی، عمودی و مورب روی فرم به کار می‌رود. سپس نقاط حاصل مثلث بندی دلانی می‌شوند. U و V تعداد تقسیمات را در راستای طول و عرض پوسته را نشان می‌دهد.			
				
	مولفه Divide Surface	×	U=15 و V=10	
	مولفه Grid Structure	×		
	مولفه Quad Panel	✓		
	لازم به ذکر است با به کار بردن مولفه Quad Panel ، مولفه explode و حذف تقاطع تکراری تعداد نقاط به ۱۷۶ می‌رسد.			در تمامی حالات ذکر شده نمای سازه یکسان است.

		✓	 <p>مولفه TriA (مشابه مولفه Quad Panel)</p>	
	$v=15$ و $u=10$	× ✓ × ✓	مولفه Braced Grid 1-D Structure  مولفه QuadPanel  مولفه Divide  مولفه Grid Structure	۲
	$v=13$ و $u=21$	✓	مولفه TriB	۳
	$v=19$ و $u=15$	✓	مولفه TriB	۴
	$v=6$ و $u=13$ $v=6$ و $u=13$ $v=6$ و $u=13$ $v=26$ و $u=12$	✓ × × ×	مولفه TriC  مولفه Space Truss1  مولفه GridBraced2D  مولفه Hexagon Cells	۵
	$v=13$ و $u=6$ $v=13$ و $u=6$ $v=13$ و $u=6$ $v=12$ و $u=26$	✓ × × ×	مولفه TriC  مولفه Space Truss1  مولفه GridBraced2D  مولفه Hexagon Cells	۶

	$v=14$ و $u=22$	✓	Diamond مولفه	۷
	$v=22$ و $u=14$	✓	Diamond مولفه	۸

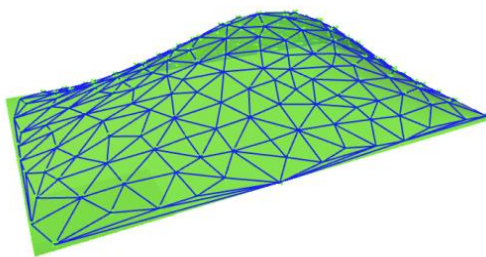
### ۲-۴-۳ مرحله دوم : بهبود نظم مثلث بندی حاصل از ۱۷۶ نقطه تصادفی با کمک الگوریتم پیمایش دایره ای و بهینه سازی اختاپوس

به منظور ارائه ی یک مثلث بندی دیگر که نقاط آن روی پوسته ی آبی ستر باشند، در این پژوهش برای اولین بار مثلث بندی دلانی بهینه ی حاصل از ۱۷۶ نقطه ی تصادفی را با استفاده از الگوریتم پیشنهادی : الگوریتم پیمایش دایره ای و بهینه سازی اختاپوس به دست آوریم؛ الگوریتم پیمایش دایره ای برای نمایش دایره هایی با شعاع یکسان روی فرم به کار می رود. مسئله ی بهینه یابی دارای یک قید و یک هدف می باشد. قید مسئله این است که با تثبیت چهار نقطه ی گوشه، سایر نقاط مجاز هستند فقط روی پوسته جابجا شوند و برای تابع هدف کمینه سازی انحراف طولی را در نظر می گیریم. به همین منظور ابتدا ۱۷۶ نقطه ی تصادفی در الگوریتم پیمایش دایره ای روی پوسته ی شکل ۱۴ ایجاد می کنیم. در الگوریتم پیمایش دایره ای مولفه ی موتور حل زامبی<sup>۱۷</sup> را به کار می بریم [۱۳] (شکل ۱۵).



شکل ۱۵- الگوریتم پیمایش دایره ای برای ۱۷۶ نقطه تصادفی، منبع : نگارندگان

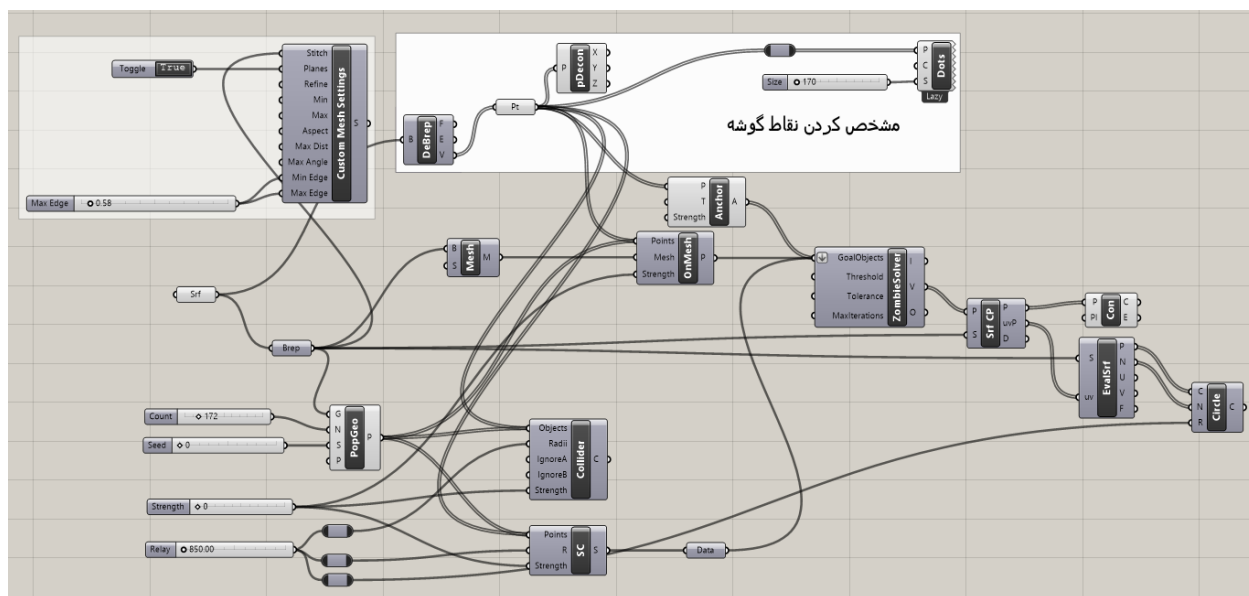
مثلث بندی دلانی حاصل از این ۱۷۶ نقطه، چهار نقطه ی گوشه را در نظر نمی گیرد (شکل ۱۶).



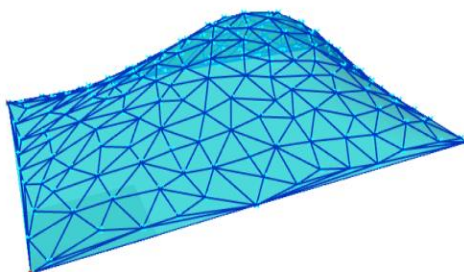
شکل ۱۶- نمای مثلث بندی دلانی حاصل از الگوریتم پیمایش دایره‌ای در حالت  $seed=0, R=0, Strength=0$

به همین منظور برای تثبیت چهار نقطه در گوشه از مولفه‌ی لنگرگاه<sup>۱۸</sup> در الگوریتم پیمایش دایره‌ای استفاده می‌کنیم و ۱۷۲ نقطه‌ی تصادفی ایجاد می‌کنیم که با ۴ نقطه‌ی گوشه ۱۷۶ نقطه می‌شود. نمای مثلث بندی به صورت شکل ۱۸ است که دارای مثلث‌های باریک و لاغر

است (شکل‌های ۱۷ و ۱۸).

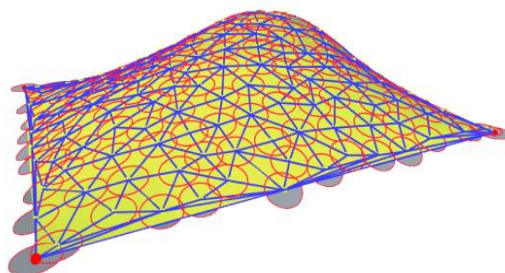


شکل ۱۷- الگوریتم پیمایش دایره‌ای برای ۱۷۶ نقطه تصادفی با استفاده از مولفه‌ی لنگرگاه، منبع: نگارندگان



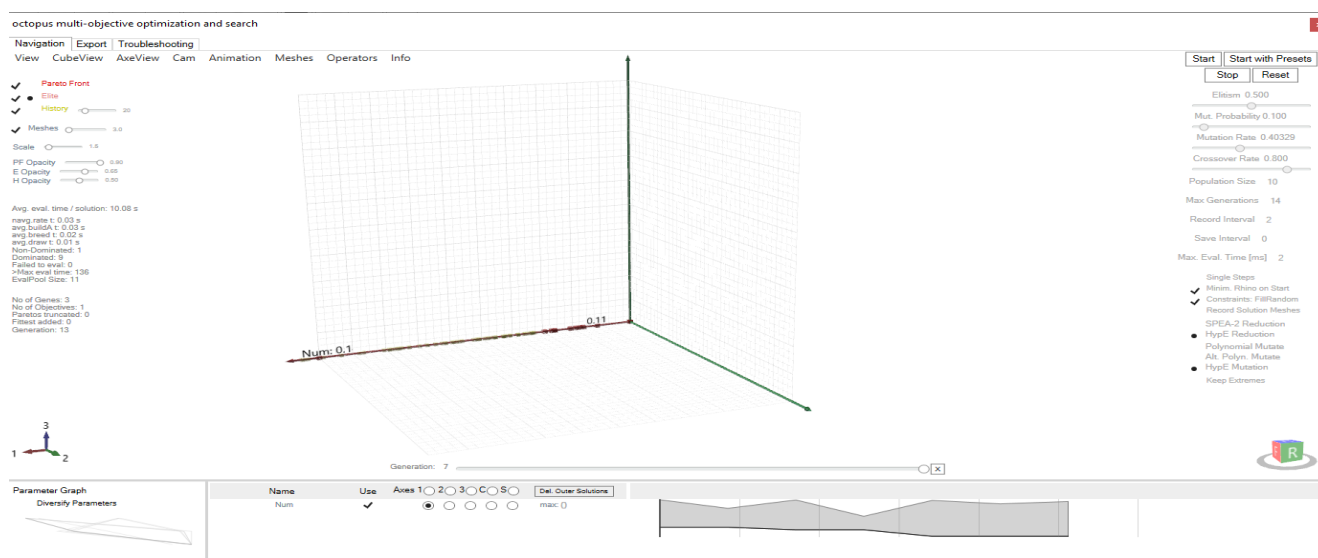
شکل ۱۸- نمای مثلث بندی حاصل برای ۱۷۶ نقطه تصادفی با استفاده از مولفه‌ی لنگرگاه در حالت  $seed=0, R=0, Strength=0$

با توجه به اینکه تنظیم پارامترهای مختلف Seed، Strength و Radius در الگوریتم پیمایش دایره‌ای و پارامترهای Mutation Rate، Population Size، Max Generation، Record Interval، Max.Eval.Time و ... دست کاربر است. لذا آزمایش‌های زیادی در این راستا برای انتخاب اعداد صورت گرفت و در نهایت شعاع را بین ۸۵۰/۰۰ و ۹۵۰/۰۰، Seed را بین ۰ و ۷۰۰۰ و Strength را هم بین ۰ و ۶۰۰۰ محدود کردیم. وقتی  $R=850$ ،  $Seed=0$  و  $Strength=0$  است، نمای مثلث‌بندی تغییری نمی‌کند و مانند شکل ۱۸ است. شکل ۱۹ نمای مثلث‌بندی و پیمایش دایره‌ای را نشان می‌دهد.

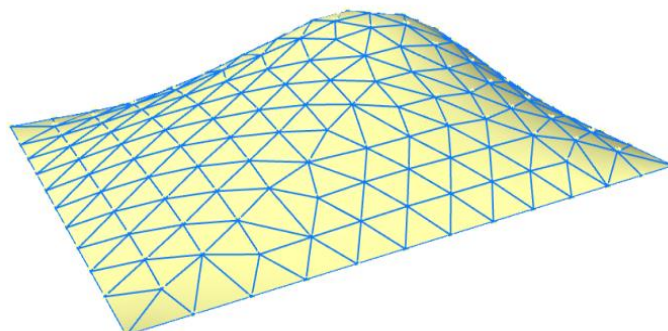


شکل ۱۹- نمای مثلث‌بندی حاصل از ۱۷۶ نقطه تصادفی با استفاده از مولفه‌ی لنگرگاه در حالت  $seed=0, Strength=0, R=850$

به منظور انجام بهینه‌سازی این مثلث‌بندی از افزونه‌ی اختاپوس استفاده می‌کنیم. برای اینکه نقاط روی پوسته بتوانند جابجا شوند، سه اسلایدر Seed، Strength و Radius را ژنوم‌های اختاپوس و تابع هدف را انحراف طولی در نظر می‌گیریم. نقاط با توجه به شعاع، اعمال نیروی فیزیکی و میزان جابجایی نقاط تصادفی، روی پوسته جابجا می‌شوند. با توجه به میزان توقف اختاپوس و سایر تنظیمات که دست کاربر است، جواب‌های متنوعی یافت می‌شود. مختصات هر کدام از نقاط ژن و مختصات ۱۷۶ نقطه به عنوان کروموزوم محسوب می‌شود. با در نظر گرفتن دو پدر و جابجایی تصادفی دو ژن جهش صورت می‌گیرد [۷-۶]. شکل ۲۰ نمای محیط افزونه اختاپوس را بعد از متوقف شدن اجرا نشان می‌دهد. از جواب‌های خوب در بین آزمایش‌های انجام شده می‌توان به حالت  $Mutation Rate=0.40329$ ،  $Population Size=14$ ،  $Max Generation=2$ ،  $Record interval=2$  و  $Max.Eval.Time=2$  اشاره کرد. نقاط پرنرنگ در شکل ۲۰ پاسخ‌هایی هستند که بهترین عملکرد را دارند و شانس انتخاب شدن برای پاسخ بهینه را دارند، در حالت ذکر شده جواب بهتر بدون ایجاد جواب مجدد به دست آمده است [۱۴].



شکل ۲۰- نمای محیط افزونه اختاپوس



شکل ۲۱- نمای سازه‌ی حاصل از اجرای بهینه‌سازی اختاپوس با هدف مینیمم انحراف طولی اضلاع سازه

#### ۴- یافته‌ها

##### ۴-۱ نتایج عددی شاخص‌های نظم

شاخص‌های نظم سازه‌هایی که از نتایج شیوه‌های مثلث‌بندی ذکر شده به دست آمده‌اند را طبق الگوریتم‌های تشکیل‌دهنده‌های ۴ الی ۸ محاسبه کرده و نتایج را در جدول‌های ۱ الی ۳ نشان داده‌ایم. در تمامی جدول‌ها مثلث‌بندی‌های ردیف‌های شماره ۲ الی ۹ طبق مثلث‌بندی‌های جدول ۲ هستند.

جدول شماره ۱- محاسبه شاخص‌های طولی نظم

تعداد و درصد اضلاع متفاوت	تعداد تپ‌های طولی	ضریب تغییرات نرخ‌های طولی و جوجه	انحراف استاندارد نرخ‌های طولی و جوجه	انحراف طولی	انحراف استاندارد دالمان‌ها	میانگین نرخ طولی	نرخ طولی	میانگین دالمان‌ها	مجموع دالمان‌ها	دامنه تغییرات	بزرگترین دالمان	کوچکترین دالمان	تعداد مثلث‌ها	تعداد دالمان‌ها	تعداد نقاط	نوع مثلث‌بندی
۱۹۲ ٪۴۰	۱۴	۰/۱۸۱	۰/۲۱۰	۰/۱۰۸۵	۲۱۲/۲۰۷	۱/۱۶۴	۲/۸۹۴	۱۹۵۴/۹۶۸	۹۳۲۵۱۵	۱۶۷۴	۲۵۵۸	۸۸۴	۳۰۲	۴۷۷	۱۷۶	۱- نمونه موردی
۲۲۱ ٪۴۶	۱۴	۰/۰۵۹	۰/۰۹۷	۰/۲۰۵	۴۲۵/۵۴۴	۱/۶۴۵	۲/۵۸۱	۲۰۷۱/۸۴۳	۹۸۴۱۳۱	۱۷۵۰	۲۸۵۷	۱۱۰۷	۳۰۰	۴۷۵	۱۷۶	۲
۲۲۱ ٪۴۶	۱۴	۰/۰۵۸	۰/۱۰۹	۰/۲۶۰	۵۵۴/۷۹۱	۱/۸۹۶	۲/۲۳۵	۲۱۳۰/۱۷۰	۱۰۱۱۸۰۵	۱۶۵۷	۲۹۹۹	۱۳۴۲	۳۰۰	۴۷۵	۱۷۶	۳
۲۴۴ ٪۵۲	۱۴	۰/۲۰۰	۰/۲۵۷	۰/۱۹۰	۳۷۷/۱۲۷	۱/۲۸۴	۳/۹۷۷	۱۹۸۳/۱۸۵	۹۳۰۱۰۴	۲۳۱۹	۳۰۹۸	۷۷۹	۲۹۴	۴۶۹	۱۷۶	۴
۲۱۶ ٪۴۵	۱۲	۰/۱۲۹	۰/۱۶۰	۰/۱۳۶	۲۶۷/۸۵۸	۱/۲۴۲	۲/۲۴۳	۱۹۶۵/۷۵۸	۹۳۳۷۴۵	۱۳۱۸	۲۳۷۸	۱۰۶۰	۳۰۰	۴۷۵	۱۷۶	۵



۱۷۴	۹	۰/۱۲۴	۰/۱۴۳	۰/۱۳۲	۲۵۸/۵۸۱	۱/۱۵۶	۲/۶۰۸	۱۹۶۲/۹۰۲	۹۵۵۹۲۶	۲۰۶۹	۳۳۵۶	۱۲۸۷	۳۱۲	۴۸۷	۱۷۶	۶
٪۳۶																
۱۸۲	۱۴	۰/۰۹۸	۰/۱۳۲	۰/۱۹۲	۳۸۳/۱۱۸	۱/۳۵۱	۲/۶۹۳	۲۰۰۰/۳۱۱	۹۷۴۱۴۴	۲۶۲۳	۴۱۷۲	۱۵۴۹	۳۱۲	۴۸۷	۱۷۶	۷
٪۳۷																
۲۰۹	۱۱	۰/۱۱۳	۰/۱۳۷	۰/۱۲۶	۲۴۶/۸۴۴	۱/۲۱۳	۳/۸۷۲	۱۹۶۳/۶۰۶	۹۵۲۳۵۶	۲۱۳۴	۲۸۷۷	۷۴۳	۳۱۰	۴۸۵	۱۷۶	۸
٪۴۳																
۱۷۸	۱۲	۰/۱۴۵	۰/۱۶۳	۰/۱۳۲	۲۵۸/۵۲۲	۱/۱۱۷	۳/۸۵۵	۱۹۵۶/۵۳۸	۹۴۸۹۲۵	۲۶۱۲	۳۵۲۷	۹۱۵	۳۱۰	۴۸۵	۱۷۶	۹
٪۳۷																
۳۹۵	۲۸	۰/۱۲۲	۰/۶۲۲	۰/۵۶۰	۱۲۳۹/۱۰۸	۰/۶۷۱	۲۲/۶۹۵	۲۲۱۲/۱۰۷	۱۱۳۷۰۱۶	۱۵۳۲۳	۱۲۸۹۱	۵۶۸	۳۳۹	۵۱۴	۱۷۶	۱۰ نقاط تصادفی
٪۷۶																
۱۱۰	۱۰	۰/۱۴۴	۰/۱۶۱	۰/۱۰۹۴	۲۱۴/۶۸۸	۱/۱۲	۱/۶۷	۱۹۶۱/۳۶	۹۴۴۰۷	۱۱۷۰	۲۹۱۵	۱۷۴۵	۳۰۶	۴۸۱	۱۷۶	۱۱ بهبود نظم سازه
٪۲۳																۱۰

جدول شماره ۲- شاخص‌های زاویه‌ای نظم

نوع مثلث بندی	کوچکترین زاویه	بزرگترین زاویه	دامنه تغییرات زوایا	مجموع زوایا	میانگین زوایا	نرخ شکلی	شکلی میانگین نرخ شکلی	انحراف استاندارد زوایا	ضریب تغییرات زوایا	نرخ‌های شکلی انحراف استاندارد	نرخ‌های شکلی ضریب تغییرات
۱- نمونه موردی	۲۹	۹۵	۶۶	۵۴۳۶۲	۶۰/۰۰۲	۳/۲۷۶	۱/۰۴۴	۸/۳۱	۰/۱۳۸	۰/۳۲۵	۰/۳۱۱
۲	۲۹	۹۵	۶۶	۵۳۹۸۸	۵۹/۹۸۷	۳/۲۷۶	۰/۹۹۷	۲۰/۷۴۴	۰/۳۴۶	۰/۵۹۱	۰/۵۹۳
۳	۲۸	۹۴	۶۶	۵۳۹۹۸	۵۹/۹۹۸	۳/۳۵۷	۱/۵۱۱	۲۲/۷۵۰	۰/۳۷۹	۰/۹۰۴	۰/۵۹۸
۴	۲۸	۱۱۶	۸۸	۵۲۹۱۷	۵۹/۹۹۷	۴/۱۴۳	۱/۱۴۳	۱۳/۱۳۹	۰/۲۱۹	۰/۳۹۰	۰/۳۴۱
۵	۳۲	۹۵	۶۳	۵۳۹۸۷	۵۹/۹۸۶	۲/۹۶۹	۱/۰۱۵	۱۰/۷۲۸	۰/۱۷۹	۰/۳۷	۰/۳۶۵
۶	۲۳	۱۳۴	۱۱۱	۵۶۱۶۷	۶۰/۰۰۷	۵/۸۲۶	۰/۹۴۹	۱۰/۵۵۳	۰/۱۷۶	۰/۳۸۰	۰/۴
۷	۲۰	۱۳۹	۱۱۹	۵۶۱۵۷	۵۹/۹۹۶۸	۶/۹۵	۱/۲۹۲	۱۴/۸۵۴	۰/۲۴۸	۰/۶۸۳	۰/۵۲۸
۸	۲۷	۱۱۵	۸۸	۵۵۷۹۵	۵۹/۹۹۵	۴/۲۵۹	۱/۱۴۸	۱۰/۶۴۹	۰/۱۷۸	۰/۳	۰/۲۶۱
۹	۲۷	۱۲۴	۹۷	۵۵۸۰۲	۶۰/۰۰۲	۴/۵۹۳	۱/۰۹۴	۹/۲۹۱	۰/۱۵۵	۰/۴۱۹	۰/۳۸۴
۱۰	۰/۴۲۶	۱۷۷/۰۲۱	۱۷۶/۵۹۵	۶۱۰۲۰	۶۰	۴۱۵/۵۴۲	۳/۱۰۸	۲۹/۵۴۷	۰/۴۹۲	۱۷/۲۴۳	۵/۵۴۸
۱۱	۳۸	۱۰۳	۶۵	۵۵۰۸۲	۶۰	۲/۷۱	۱/۰۴۴	۸/۹۶۳	۰/۱۴۹	۰/۲۹۴	۰/۲۸۲

جدول شماره ۳- شاخص‌های مساحت نظم

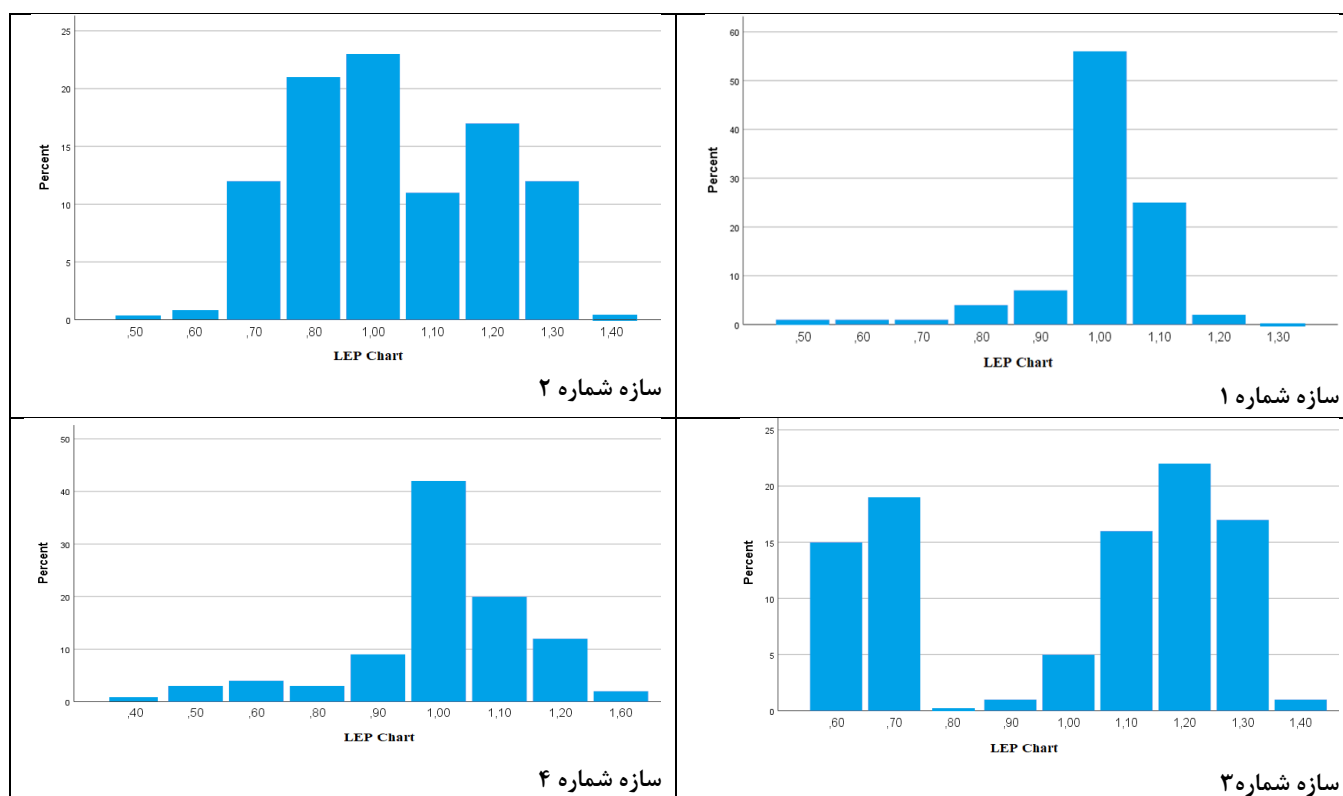
نوع مثلث بندی	کوچکترین مساحت	بزرگترین مساحت	دامنه تغییرات	نرخ مساحت	مجموع مساحت‌ها (مساحت پوسته = ۵۰۰۵۰۹۹۵۴/۵۳۴)	میانگین مساحت‌ها	انحراف استاندارد مساحت‌ها	ضریب تغییرات مساحت‌ها
۱- نمونه موردی	۶۶۸۴۴۷	۲۳۹۸۴۶۶	۱۷۳۰۰۱۹	۳/۵۸۸	۴۹۹۸۴۷۱۳۹	۱۶۵۵۱۲۲/۹۸۴	۲۷۶۸۲۱/۵۶۰	۰/۱۶۷
۲	۱۱۰۶۵۵۹	۱۹۰۴۶۱۹	۷۹۸۰۶۰	۱/۷۲۱	۴۹۹۷۸۹۳۶۰	۱۶۶۵۹۶۴/۵۴۳	۱۳۰۴۲۴/۸۴۶	۰/۰۷۸

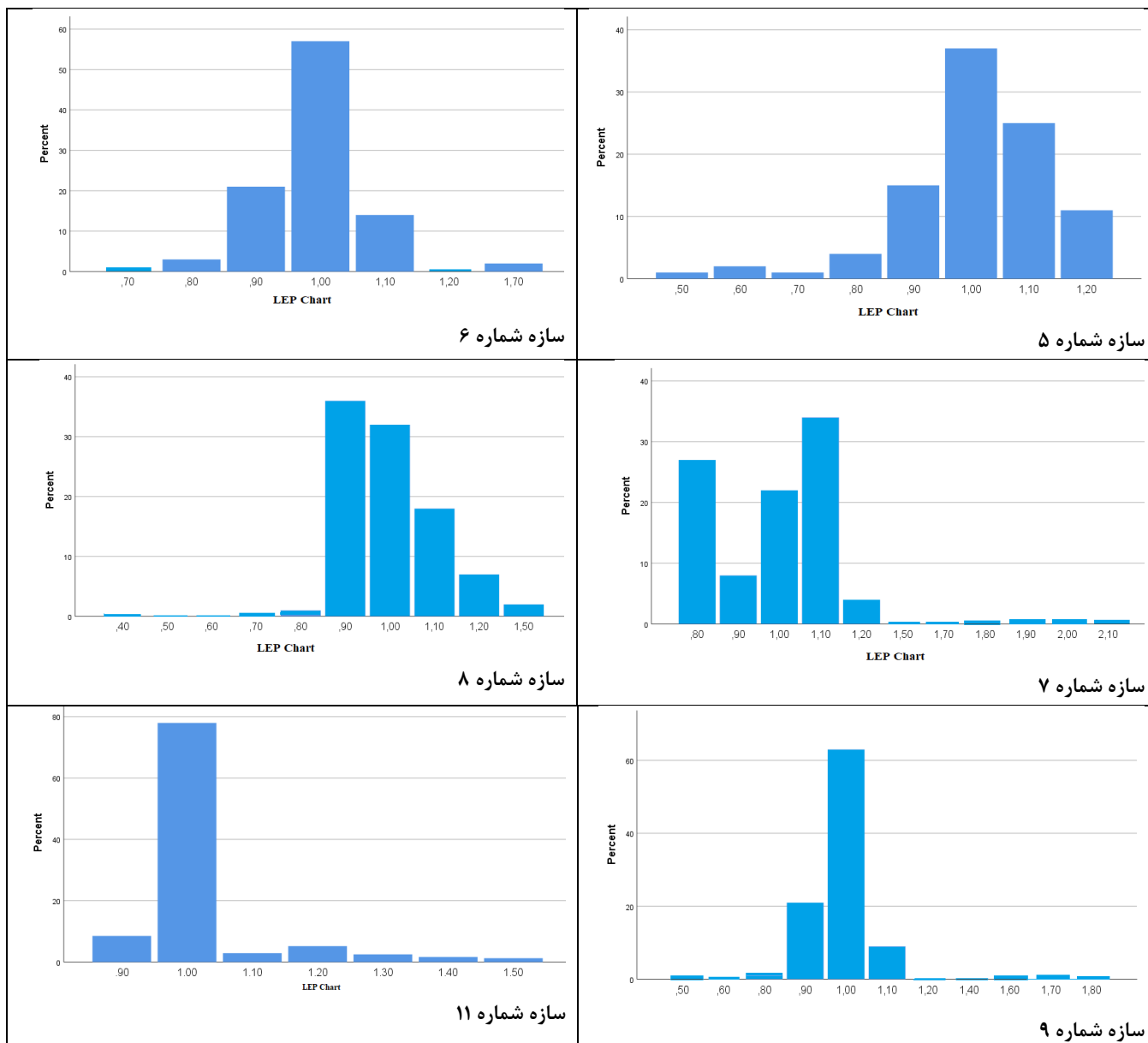
۰/۰۷۶	۱۲۶۰۷۶/۲۸۵	۱۶۶۵۹۶۸/۶۱۷	۴۹۹۷۹۰۵۸۸	۱/۵۸۸	۷۰۱۶۳۰	۱۸۹۴۶۵۷	۱۱۹۳۰۲۷	۳
۰/۲۱۲	۳۶۰۰۴۷/۹۲۳	۱۶۹۹۳۱۰/۹۵۷	۴۹۹۵۹۷۴۲۳	۳/۶۰۵	۱۵۳۳۰۹۹	۲۱۲۱۶۴۳	۵۸۸۵۴۴	۴
۰/۱۸۲	۳۰۳۶۰۹/۴۹۴	۱۶۶۵۳۶۹/۴۳۷	۴۹۹۶۱۰۸۳۱	۳/۴۳۷	۱۴۳۱۵۶۰	۲۰۱۸۹۸۵	۵۸۷۴۲۵	۵
۰/۰۷۸	۱۲۵۰۲۶/۸۸۵	۱۶۰۱۷۴۱/۸۸۱	۴۹۹۷۴۳۷۰	۱/۷۶۴	۷۹۹۳۷۲	۱۸۴۶۱۲۲	۱۰۴۶۷۵۰	۶
۰/۰۷۷	۱۲۲۵۷۰/۶۸۸	۱۶۰۱۷۸۶/۷۴۴	۴۹۹۷۵۷۴۷۴	۱/۶۰۷	۶۸۷۱۹۵	۱۸۲۰۰۶۹	۱۱۳۲۸۷۴	۷
۰/۱۰۱۸	۱۶۴۰۶۹/۲۳۷	۱۶۱۱۹۶۴/۱۶۳	۴۹۹۷۰۸۸۹۵	۳/۵۱۵	۱۳۴۳۱۸۱	۱۸۷۷۲۸۷	۵۳۴۱۰۶	۸
۰/۱۰۲	۱۶۴۰۸۷/۴۰۹	۱۶۱۱۹۲۳/۲۰۴	۴۹۹۶۹۶۱۹۴	۳/۴۰۴	۱۳۰۹۶۱۴	۱۸۵۴۳۶۵	۵۴۴۷۵۱	۹
۰/۳۴۰	۴۹۶۴۲۸/۱۰۶	۱۴۵۸۵۲۵/۷۹۹	۴۹۴۴۳۹۹۱۰	۸۲/۱۴۶	۲۹۸۵۲۸۳	۳۰۲۲۰۷۲	۳۶۷۸۹	۱۰
۰/۱۱۲	۱۸۲۱۹۴/۷۱۴	۱۶۳۳۳۵۹/۷۰۵	۴۹۹۸۰۸۰۶۲	۱/۷۰۷	۱۰۳۱۴۸۳	۲۴۹۰۵۹۳	۱۴۵۹۱۱۰	۱۱

## ۲-۴ نتایج نمودارهای شاخص طول

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. جدول شماره ۴ نمودار شاخص طول را برای هر کدام از سازه‌های شماره ۱ الی ۹ و سازه‌ی شماره ۱۱ را نشان می‌دهد.

جدول شماره ۴- نمودارهای شاخص طول، منبع: نگارندگان





منبع: نگارندگان

### ۳-۴ بررسی تعاریف شاخص‌های هندسی نظم با استفاده از تعریف پیشنهادی

تا کنون محققان تعاریف مختلفی از شاخص‌های عددی نظم ارائه دادند. از نظر محققین تعریف شاخص نظم مانند تعریف زیبایی در معماری است که بسته به اهداف مختلف متفاوت است [۶-۵]. شاخصی برای نظم مناسب است که مقدار آن با تغییر مقیاس متقارن سازه تغییر نکند. در این پژوهش هیچکدام از شاخص‌های محیط مناسب شاخص نظم نیستند. شاخص‌هایی که با تغییر مقیاس متقارن دچار تغییر نمی‌شوند، عبارتند از:

- نرخ طولی، انحراف طولی، میانگین نرخ طولی و ضریب تغییرات نرخ‌های طولی وجوه به کار رفته در سازه
- نرخ شکلی، انحراف استاندارد و ضریب تغییرات زوایا
- نرخ مساحت، ضریب تغییرات مساحت‌ها

همچنین علاوه بر تعاریف فوق شاخص‌های نظم دیگری نیز می‌توان 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- نتیجه گیری

در تمامی مثلث‌بندی‌ها رابطه‌ی (۴) برقرار است.

$$(4) \quad 1 - \text{تعداد نقاط} + \text{تعداد وجوه} = \text{تعداد اضلاع}$$

در مقایسه‌ی نظم سازه‌ها (به جز سازه‌ی شماره ۱۰ که مثلث‌بندی تقاط تصادفی است و برای ساخت مناسب نمی‌باشد) موارد ۱ الی ۶ نتیجه می‌شود.

۱- با در نظر گرفتن هر کدام از شاخص‌های نرخ طولی و نرخ شکلی به عنوان شاخص نظم، سازه‌ی شماره ۱۱ که از بهبود نظم مثلث‌بندی دلانی نقاط تصادفی 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 هر کدام از شاخص‌های انحراف طولی، انحراف استاندارد زوایا و ضریب تغییرات زوایا به عنوان شاخص نظم، سازه‌ی نمونه موردی مقدار کمتری نسبت به سایر سازه‌ها دارد، بنابراین از نظم بیشتری نسبت به سایر سازه‌ها برخوردار است.

۳- با در نظر گرفتن میانگین نرخ طولی به عنوان شاخص نظم، سازه‌ی شماره ۹ که از مولفه‌ی Diamond ( $u=14$  و  $v=22$ ) 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 هر کدام از شاخص‌های ضریب تغییرات نرخ‌های طولی، نرخ مساحت و ضریب تغییرات مساحت به عنوان شاخص نظم، سازه‌ی شماره ۳ که با مولفه‌ی Braced Grid 1-D Structure در حالت  $u=10$  و  $v=15$  حاصل شده است، مقدار کمتری نسبت به سایر سازه‌ها دارد، بنابراین از نظم بیشتری نسبت به سایر سازه‌ها برخوردار است.

۵- نمودار شاخص طول نشان می‌دهد که سازه‌ی شماره ۱۱ دامنه‌ی تغییرات کمتری دارد، بنابراین وضعیت پراکندگی اضلاع آن نسبت به سایر سازه‌ها کمتر است.

۶- سازه‌ی شماره ۱۱ (شکل ۲۱) که از بهینه‌سازی مثلث‌بندی دلانی نقاط تصادفی حاصل شده، نشان می‌دهد که نسبت به حالت اولیه‌ی آن سازه‌ی شماره ۱۰ (شکل ۱۸) که از مثلث‌بندی دلانی نقاط تصادفی به دست آمده، از بهبود نظم بیشتری برخوردار است و شاخص‌های عددی نظم آن موید همین مطلب است. این سازه از دید بصری منظم به نظر نمی‌رسد.

مشاهده می‌شود که سازه‌های شماره ۳، ۹، ۱۱ و نمونه‌ی موردی با توجه به شاخص نظم مرتبط با آن از نظم بیشتری نسبت به سایر سازه‌ها برخوردار هستند، با توجه به متفاوت بودن تعاریف شاخص‌های نظم، نتایج حاصل از بررسی شاخص‌های نظم نیز متفاوت است و وحدت رویه‌ای بین نتایج عددی شاخص‌های نظم وجود ندارد. همچنین تعریف پیشنهادی نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن مقادیر مختلف  $a_i$  ها با توجه به اهداف کاربر یکی از سازه‌های شماره ۱ الی ۹ و ۱۱ از نظم بیشتری برخوردار می‌شود 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 مهندسی سازه و ریاضیدانان نیاز است که بتوان تعریف واحدی برای شاخص نظم هندسی ارائه نمود.

اما سوالاتی مطرح می‌گردد که باید در پژوهش‌های بعدی به آنها پاسخ گفت.

- ۱- استفاده از تکنیک‌های دیگر جهت مثلث‌بندی با ۱۷۶ نقطه در بهبود نظم سازه‌ی آتی سنتر چقدر موثر می‌باشند؟
- ۲- مثلث‌بندی نقاط تصادفی با کدام شیوه‌ی بهینه‌سازی با استفاده از چه تابع هدفی و با چه تعداد نقاطی به تساوی هم‌ی اضلاع می‌رسد؟
- ۳- آیا سازه‌های حاصل از شیوه‌های مختلف بهبود نظم مثلث‌بندی دلانی نقاط تصادفی از وزن کمتری نسبت به سازه نمونه موردی برخوردار می‌شوند و در کاهش هزینه موثر واقع می‌شوند؟

و ...

## سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از همکاری و هم‌اندیشی مهندسی شرکت سازه‌های فضاکار افق نور، اساتید ریاضی، مهندسی سازه و معماران پارامتریک اصفهان کمال سپاسگزاری را دارند.

## مراجع

- [1] Tsuboi, Y. (1984) Analysis, design and realization of space frames. *Bulletin of the International Association of Shell and Spatial Structures*, Vol 15, PP: 84-85.
- [2] Office of Deputy for Strategic Supervision, Bureau of Technical Execution System, (2010), *Code of Practice for Skeletal Steel Space Structures*, Islamic Republic of Iran Vice presidency for Strategic Planning and Supervision, No 400. In Persian.
- [3] Behnejad, S.A. (2018), *Geometrical Data for Lattice Spatial Structures: Regularity, Historical Background and Education*, A Thesis Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy, Spatial Structures Research Centre, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Surrey, PP 1-217.
- [4] Haghazari R., Nooshin H. and Golabchi M., (2014), Improving the Regularity of Geodesic Domes Using the Concept of Stepping Projection ", *International Journal of Space Structures*, Vol 29 No.2, PP 81-95.
- [5] Nooshin, H., Ishikawa, I., Disney, P. L. and Butterworth, J. W., (1997), The Traviation Process, *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, Vol 38(125), PP 165-176.
- [6] Kouroiwa, Y. (2000), *Regularization of Structural forms using Genetic Algorithms*, A Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, Space Structures Research Centre Department Of Civil Engineering University Of Surrey, Published by ProQuest LLC (2019), PP:1-350.
- [7] Nooshin, H., Kuriowa, Y., and Disney P.L., (1999), "A genetic method for regularization of structural configurations", *IASS Congress 20-24 September; Madrid, Spain*. PP 1-10.
- [8] Piórkowski, A., Mazurek P. and Gronkowska-Serafin J., (2015). Comparison of Assessment Regularity Methods Dedicated to Isotropic Cells Structures Analysis. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. PP 1-11.
- [9] Massah S.A., Ahmadi H. (2017), Regularizing structural configurations by using meta-heuristic algorithms, *Geomechanics and Engineering*, Vol. 12, No. 2. PP 197-210.
- [10] Mohades A., Goodarzi M. and Forghani-elahabad M., (2020), Particle Swarm Optimization Method in Optimization of Grid Shell Structures, *Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics*, v.7, n.1, PP 1-6.

- [11] Goodarzi M., Mohades A. and Forghani-elahabad M., (2021), Improving the Gridshells' Regularity by Using Evolutionary Techniques, *Mathematics*, Vol 9(440), PP 1-18.
- [12] <https://www.food4rhino.com/en/app/lunchbox> (2020).
- [13] <https://grasshopperdocs.com/components/kangaroo2/zombieSolver.html>
- [14] R.Vier(n.d.),2017,Octopus,Retrieved,July28,from <http://www.grasshopper3d.com/group/octopus>