بهبود نظم هندسی سازه فضاکار فرم آزاد با نقاط تصادفی (سازه فضاکار آتی‌سنتر مشهد)

پریسا همتیان دهکردی[1*] ، مرجان گودرزی [2]، علی محدث خراسانی[3]

۱- استادیار، گروه ریاضی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، Parisa-hemmatian@pnu.ac.ir

۲- مدرس دانشگاه، دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پلی‌تکنیک، تهران، ایران، goodarzi@itrc.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پلی‌تکنیک، تهران، ایران، Mohades@aut.ac.ir

ACCEPTED MANUSCRIPT

چکیده

نظم هندسی در سازه‌های فضاکار فرم‌آزاد، از طریق کاهش تنوع طولی اعضا و افزایش تکرارپذیری طول‌های مشابه، نقش مهمی در عملکرد سازه‌ای، ساخت‌پذیری و بهره‌وری اقتصادی دارد. در این پژوهش، سازه فضاکار فرم‌آزاد آتی‌سنتر مشهد، طراحی و اجراشده توسط شرکت سازه‌های فضاکار افق نور در نرم‌افزار راینو (Rhino) به‌عنوان نمونه موردی بررسی شد. این سازه شامل ۱۷۶ گره، ۴۷۷ عضو و ۱۴ تیپ طولی است. هدف پژوهش، بهبود نظم هندسی از طریق جابه‌جایی گره‌ها روی سطح فرم آزاد و کاهش تعداد طول‌های متمایز اعضا بود. ابتدا سطح پیوسته سازه بر اساس نقاط اولیه بازسازی شد؛ سپس ۱۷۶ نقطه به‌صورت تصادفی روی سطح توزیع و با مثلث‌بندی دلانی، شبکه اولیه ایجاد گردید. برای اصلاح آرایش گره‌ها، الگوریتم پیمایش دایره‌ای و بهینه‌سازی اختاپوس با سه رویکرد شامل کمینه‌سازی انحراف طولی اعضا، تابع هدف پیشنهادی مبتنی بر کاهش اعضای دارای طول غیرتکراری و تابع هدف ترکیبی ارزیابی شدند. نتایج نشان داد تابع هدف پیشنهادی، تعداد تیپ‌های طولی را از ۱۴ به ۱۰ کاهش داد و سهم اعضای دارای طول متفاوت را از ۴۰ به ۲۵ درصد رساند. همچنین برخی شاخص‌های زاویه‌ای و مساحتی بهبود یافتند و وزن سازه ۲۶٫۲ درصد کاهش پیدا کرد. بااین‌حال، بهبود شاخص‌های کمی الزاماً به منظم‌ترین آرایش بصری منجر نشد. یافته‌ها بر ضرورت توسعه شاخصی جامع برای ارزیابی نظم هندسی با درنظرگرفتن هم‌زمان ویژگی‌های هندسی، ادراک بصری و عملکرد سازه‌ای تأکید دارند.

کلمات کلیدی

سازه فضاکار، فرم آزاد، بهبود نظم، الگوریتم پیمایش دایره‌ای، بهینه‌سازی اختاپوس.

۱- مقدمه

طراحی و ساخت سازه‌های فضاکار، به‌ویژه سازه‌های دارای پوشش شیشه‌ای، به دلیل قابلیت پوشش دهانهای بزرگ، وزن نسبتاً کم، امکان استفاده از فناوری‌های نوین طراحی و ساخت، انعطاف پذیری در شکلپذیری معماری، عملکرد مطلوب، صرفه‌جویی اقتصادی، استفاده بهینه از نور طبیعی طی دهه‌های اخیر توجه پژوهشگران و مهندسان قرار گرفته است. توسعه ابزارهای طراحی محاسباتی نیز امکان ایجاد فرمهای پیچیده و آزاد را افزایش داده است. با این حال پیچیدگی هندسی این سازه‌ها می تواند موجب افزایش تنوع اعضا، دشواری طراحی اتصالات، پیچیدگی فرآیند ساخت و افزایش هزینه های اجرایی شود. از این رو دستیابی به نظم هندسی مناسب، ضمن حفظ کیفیت معماری و الزامات سازه‌ای، یکی از مسائل مهم در طراحی و بهینه‌سازی سازه‌های فضاکار به شمار می‌رود. سازه‌های فضاکار از اعضای خطی تشکیل می‌شوند که به گونه‌ای آرایش یافته‌اند که انتقال بارها در آن به‌صورت سه‌بعدی انجام می‌شود. این سازه‌ها معمولاً دارای فرم‌های تخت یا منحنی هستند و به دلیل رفتار سازه‌ای مناسب، کاربرد گسترده‌ای در پوشش فضاهای وسیع یافته‌اند [۱]. در سازه‌های فضاکار با فرم آزاد، هندسه شبکه لزوماً از الگوهای منظم و تکرارشونده پیروی نمی‌کند و ممکن است طول اعضا، زاویه‌های بین آن‌ها و شکل و مساحت وجوه در نقاط مختلف سازه متفاوت باشد. این ویژگی، آزادی عمل بیشتری برای شکل‌دهی معماری فراهم می‌کند، اما هم‌زمان مسئله نظم هندسی و ساده‌سازی فرایند ساخت را پیچیده‌تر می‌سازد. کاهش تنوع هندسی طول اعضا می‌تواند به بهبود قابلیت ساخت و مونتاژ کمک کند؛ بااین‌حال، این بهبود باید در کنار الزامات ایمنی، پایداری و عملکرد سازه‌ای ارزیابی شود [۲]. برای سنجش کمی نظم هندسی، شاخص‌های متعددی معرفی شده است که با عنوان شاخص‌های نظم، مترهای اندازه گیری نظم، پارامترهای هندسی یا درجه های نظم شناخته 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 می گیرد [۳]. از پژوهش‌های اولیه در این زمینه می‌توان به مطالعه نوشین، حق‌نظر و همکاران در سال ۱۹۹۷ اشاره کرد که برای نخستین بار شاخص‌های نرخ طولی و نرخ شکلی را برای ارزیابی میزان نظم چندضلعی‌ها ارائه کردند [۵-۴]. نرخ طولی (r) به صورت نسبت بزرگترین ضلع سازه به کوچکترین ضلع چندضلعی و نرخ شکلی به صورت نسبت بزرگترین زاویه به کوچکترین زاویه چندضلعی تعریف می‌شود (جدول ۱) . این شاخص‌ها را می‌توان به صورت معکوس هم تعریف کرد.

جدول ۱-نرخ طولی و نرخ شکلی

$r = \frac{L_{\max}}{L_{\min}}$	(۱)
$Sr = \frac{\theta_{\max}}{\theta_{\min}}$	(۲)

برد مقادیر این شاخص‌ها بین ۰ و ۱ می باشد. مقدار ۱ متناظر با برابری همه اعضا است. مقدار نزدیک به یک نشان دهنده شباهت بیشتر طول اعضا به یکدیگر است [۵-۴]. معیارهای دیگری نظیر میانگین نرخ‌های طولی، ضریب تغییرات اضلاع، دامنه تغییرات، میانگین، واریانس، انحراف معیار اضلاع و نمودار شاخص طول (نمودار LEP) و ... معرفی شده‌اند که عمدتاً بر پایه شاخص‌های پراکندگی داده‌ها در علم آمار توسعه یافته‌اند (جدول ۲). 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. این شاخص‌ها علاوه بر اضلاع ، قابلیت تعمیم به زوایا و مساحت وجوه را نیز دارند و در نتیجه امکان ارزیابی نظم هندسی سازه‌هایی با الگوهای مختلف را فراهم می‌کنند [۶]. محاسبه این شاخص‌ها مستلزم استفاده از

ACCEPTED MANUSCRIPT

الگوریتم‌های مناسب است و هر یک از آن‌ها، با توجه به نوع سازه و هدف پژوهش، مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند. ازاین‌رو، انتخاب شاخص مناسب به ویژگی‌های هندسی سازه، سطح دقت موردنیاز و هدف تحلیل وابسته است.

جدول ۲- معرفی شاخص‌های طولی نظم

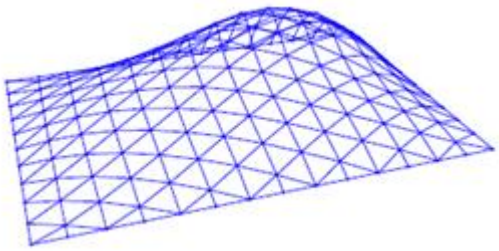
ردیف	نام محقق	سال و منبع	معیار مناسب برای سنجش نظم سازه
-۱	نوشین و همکاران	۱۹۹۷ [۵]	نرخ طولی (r) $r=\frac{L_{\max}}{L_{\min}}$ شود.این شاخص به صورت معکوس هم تعریف می شود.
-۳	نوشین و همکاران	۱۹۹۷ [۵]	نمودار شاخص طول (L)
-۴	نوشین و همکاران	۱۹۹۷ [۵]	انحراف معیار (S) $S=\sqrt{\frac{\sum(Li-Lav)^2}{n}}$
-۵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

تا کنون روش‌های متعددی برای منظم‌سازی و بهینه‌سازی سازه‌های فضاکار ارائه شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به فرآیند تراپویش[۵][1]، استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک برای منظم‌سازی پیکربندی سازه‌ها [۷]، روش‌های مقایسه و ارزیابی شاخص‌های مختلف نظم [۸] و الگوریتم های فراابتکاری [۹]، به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)[2] در بهینه‌سازی سازه‌های شبکه‌ای [۱۰] ، تکنیک‌های بازگشتی [۱۱] و ... اشاره کرد. بر این اساس، در پژوهش حاضر، سازه فضاکار فرم آزاد آتی‌سنتر مشهد به‌عنوان نمونه موردی انتخاب شد. این سازه که توسط شرکت سازه‌های فضاکار افق نور در محیط نرم‌افزار راینو (Rhino) طراحی و اجرا شده است (اشکال ۱ و ۲)، دارای ابعاد ۲۲۵۲۵ × ۲۰۱۳۷ میلیمتر بوده و از یک شبکه‌ی تک لایه تشکیل شده است. این سازه به دلیل هندسه نامنظم، تنوع طول اعضا و قابلیت مناسب برای ارزیابی و مقایسه شاخص‌های مختلف نظم هندسی، به‌عنوان نمونه موردی پژوهش حاضر انتخاب شد.

[1] Traviation

[2] Particle Swarm Optimization(PSO)

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۱: سازه فضاکار فرم آزاد آتی‌سنتر مشهد ترسیم شده در نرم افزار راینو توسط مهندسین شرکت سازه‌های فضاکار افق نور (مدل M1)



شکل۲: سازه فضاکار فرم آزاد آتی سنتر مشهد

در این پژوهش، اعضای سازه بر اساس طول به تیپ‌های مختلف، شامل بازه‌های ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰ میلی‌متر، ۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰ میلی متر و به همین ترتیب، طبقه‌بندی شدند. اعضایی با طول کمتر از ۱۰۰۰ میلی‌متر در یک گروه مستقل قرار گرفتند. با این حال، چنانچه تعداد اعضای هر بازه کمتر از سه عضو بود، آن بازه به‌عنوان یک تیپ مستقل در نظر گرفته نشد و اعضای آن در بازه مجاور ادغام شدند تا از ایجاد تیپ‌هایی با فراوانی اندک جلوگیری شود. از آنجا که مدل اولیه سازه در محیط نرم‌افزار راینو تنها شامل خطوط و رئوس است، امکان تغییر مستقیم موقعیت گره‌ها بر روی فرم آزاد وجود ندارد. ازاین‌رو، به‌منظور ایجاد یک شبکه مثلث‌بندی جدید و متناسب با هندسه پوسته، ابتدا رویه سازه فضاکار آتی‌سنتر به‌صورت پارامتریک بازسازی شد. سپس الگوریتم‌های لازم برای محاسبه شاخص‌های نظم، شامل شاخص‌های طولی، زاویه‌ای و مساحتی، توسعه و پیاده‌سازی شدند. برای تولید شبکه مثلثی، از مثلث‌بندی دلانی[1] استفاده شد. این روش یکی از متداول‌ترین الگوریتم‌های تولید شبکه‌های مثلثی است که با بیشینه‌سازی حداقل زاویه مثلث‌ها، از تشکیل مثلث‌های کشیده و نامناسب جلوگیری کرده و شبکه‌ای با کیفیت هندسی مطلوب ایجاد می‌کند [۱۲]. اگرچه روش‌های مختلفی برای تولید نقاط اولیه بر روی پوسته وجود دارد، در این پژوهش ۱۷۶ نقطه با توزیع اولیه تصادفی بر روی رویه پارامتریک ایجاد شد. این تعداد با هدف حفظ تعداد گره‌های سازه نمونه و فراهم کردن امکان مقایسه مستقیم نتایج انتخاب شد، به‌گونه‌ای که تغییرات مشاهده‌شده در شاخص‌های نظم و وزن سازه تنها ناشی از تغییر آرایش هندسی نقاط باشد. هدف اصلی پژوهش، بهبود نظم هندسی شبکه دلانی حاصل از این نقاط و ارزیابی تأثیر آن بر کاهش تنوع طول اعضا و وزن سازه در مقایسه با سازه نمونه موردی است. تمامی‌مراحل مدل‌سازی، توسعه الگوریتم‌ها و فرآیند بهینه‌سازی در نرم‌افزار راینو ورژن ۲۱۳۰۶. ۱۳. ۷ و با کمک افزونه گرس‌هاپر[2]، کانگورو[3] و اختاپوس[1] (ورژن ۶ . ۳ . ۰) انجام شده است.

[1] Delaunay Triangulation
[2] Grasshopper
[3] Kangaroo

ACCEPTED MANUSCRIPT

۲- پیشینه تحقیق

نظم هندسی سازه‌های فضاکار به نحوه‌ی اتصال اعضا، آرایش شبکه و یکنواختی ابعاد المان‌ها وابسته است و نقش مهمی در عملکرد سازه‌ای، ساخت‌پذیری، سهولت مونتاژ و کاهش هزینه‌های اجرایی دارد و مهندسین باید تصمیم‌های فنی و مدیریتی زیادی اخذ کنند که ماحصل آن کاهش هزینه، عملکرد مطلوب‌تر، افزایش موارد فنی و مقاومت، ایمنی و افزایش ضرایب اطمینان باشد. آرایش هندسی منظم موجب آسان‌تر شدن کار طراحی و مونتاژ می‌شود. 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 دهه‌ی اخیر محققین در تاشه‌پردازی[۲] رده‌ای از سازه‌ها به آن پرداخته‌اند. به نژاد و همکاران 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 هم طول ، موجب بهبود ساخت‌پذیری، سهولت مونتاژ و کاهش هزینه‌های اجرایی شد [۳].حق‌نظر و همکاران روش تصویرسازی گام‌به‌گام را برای بهبود نظم گنبدهای ژئودزیک ارائه کردند. در این پژوهش، سازه‌های حاصل با استفاده از شاخص‌هایی شامل تعداد کامل اعضا، انحراف معیار طول اعضا، میانگین نرخ شکلی، نرخ طولی و نمودار شاخص طول مورد ارزیابی قرار گرفتند [۴].
نوشین و همکاران فرآیند تراپویش (فرآیند مینیمم‌سازی تابع GP) را برای منظم‌سازی پیکربندی سازه‌های فضاکار معرفی کردند. در این روش، با تغییر کنترل‌شده موقعیت گره‌ها، و کاهش اختلاف طول اعضا امکان دستیابی به آرایش هندسی منظم تر فراهم شد. همچنین شاخص‌هایی مانند نرخ طولی، انحراف طولی و نمودار شاخص طول برای ارزیابی میزان نظم هندسی به کار گرفته شد. آنها برای تاشه‌پردازی از نرم‌افزار فرمیان[۳] استفاده کردند [۵]. در ادامه، نوشین و همکاران روشی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، برای منظم‌سازی پیکربندی سازه‌های شبکه‌ای ارائه کردند. در این پژوهش، تابع هدف بر اساس واریانس نرمال‌شده تعریف شد و نتایج نشان داد که الگوریتم پیشنهادی می‌تواند پراکندگی طول اعضا را کاهش داده و یکنواختی هندسی سازه را افزایش دهد [۷]. پیرکوفسکی و همکاران با هدف ارزیابی نظم شبکه‌های سلولی، معیارهایی مانند نرخ طولی، انحراف معیار و ضریب تغییرات را برای ویژگی‌های هندسی سلول‌ها شامل محیط و مساحت به کار گرفتند و قابلیت توسعه این شاخص‌ها را برای تحلیل یکنواختی شبکه‌ها بررسی کردند [۸]. با توسعه روش‌های محاسباتی، استفاده از الگوریتم‌های فرابتکاری برای بهبود نظم هندسی سازه‌های فضاکار مورد توجه قرار گرفت. مساح و همکاران در سال ۲۰۲۰ الگوریتم‌های PSO و بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی را برای منظم‌سازی تاشه‌پردازی سازه‌های فضاکار بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که توابع هدف مبتنی بر واریانس نرمال‌شده و پتانسیل هندسی می‌توانند نقش مؤثری در افزایش نظم شبکه داشته باشند [۹]. محدث خراسانی و همکاران در سال ۲۰۲۱ روش PSO را برای بهبود نظم پوسته‌های شبکه‌ای به کار گرفتند و عملکرد آن را با الگوریتم ژنتیک مقایسه کردند. نتایج نشان داد که الگوریتم PSO توانایی مناسبی در کاهش پراکندگی طول اعضا و افزایش نظم هندسی دارد [۱۰]. همچنین، گودرزی و همکاران در سال ۲۰۲۱ 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 بیشتر از ۵۰ درصد بهبود یافته است. همچنین با در نظر گرفتن شبکه‌بندی چهارضلعی و مثلثی روی سطوح نتیجه شد بهبود نظم شبکه‌بندی چهارضلعی از شبکه بندی مثلثی بهتر است. [۱۱]. در سال‌های اخیر، با گسترش روش‌های طراحی پارامتریک و هوش مصنوعی، مطالعات به سمت بهینه‌سازی سازه‌های فضاکار فرم‌آزاد حرکت کرده است. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۳ روشی ترکیبی از خوشه‌بندی و بهینه‌سازی را برای کاهش تنوع هندسی گره‌ها در سازه‌های فضاکار فرم‌آزاد ارائه کردند. در این پژوهش، با گروه‌بندی گره‌های مشابه و سپس بهینه‌سازی هندسی آن‌ها، تعداد انواع مختلف گره‌ها کاهش یافت؛ به‌گونه‌ای که ضمن حفظ تقریب مناسب هندسه فرم‌آزاد، ساخت‌پذیری و قابلیت تولید سازه بهبود پیدا کرد [۱۳]. همتیان دهکردی و همکاران در سال

[1] Octopus
[2] Configuration Processing
[3] Formian

ACCEPTED MANUSCRIPT

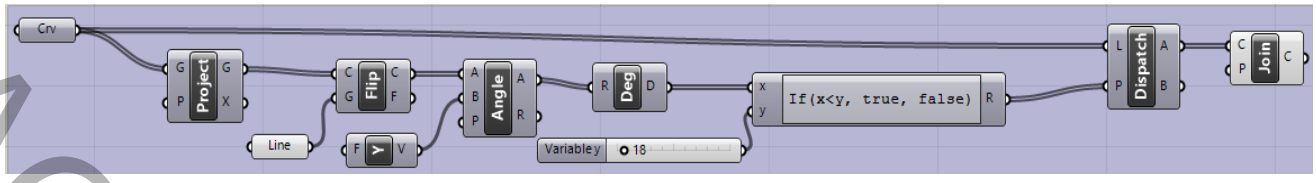
۲۰۲۳ در مطالعه‌ای به بررسی شاخص‌های نظم هندسی و بهبود نظم مثلث‌بندی دلانی در گنبد فضاکار تک‌لایه بیدبلند خوزستان پرداختند. در این مطالعه، با توسعه شاخص‌های طولی، زاویه‌ای و مساحتی نظم و ارائه الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر پیمایش دایره‌ای و بهینه‌سازی ژنتیک، تأثیر تغییر موقعیت نقاط بر بهبود شبکه‌بندی بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که ارزیابی نظم هندسی یک سازه نمی‌تواند تنها بر اساس یک شاخص منفرد انجام شود و برای شاخص نظم هندسی تعریف یکتا و واحدی نیاز است [۱۴]. فاویلی و همکاران در سال ۲۰۲۴ روشی مبتنی بر یادگیری عمیق هندسی برای بهینه‌سازی فرم و شبکه‌بندی پوسته‌های شبکه‌ای فرم‌آزاد مثلثی ارائه کردند. در این روش، جابه‌جایی گره‌ها با حفظ هندسه کلی فرم انجام شد و هدف، کاهش نرمی سازه‌ای و دستیابی به فرم بهینه بود [۱۵]. در ادامه این مطالعات، بی و همکاران در سال ۲۰۲۴ رویکردی مبتنی بر خوشه‌بندی و بهینه‌سازی هندسی را با هدف کاهش تنوع گره‌ها، اعضا و پنل‌ها در سطوح فرم‌آزاد ارائه کردند. در این روش، با شناسایی و گروه‌بندی اجزای دارای ویژگی‌های هندسی مشابه، امکان کاهش تنوع قطعات و بهبود ساخت‌پذیری سازه فراهم شد [۱۶]. ژونگ و همکاران در سال ۲۰۲۵، بهینه‌سازی پوسته‌های شبکه‌ای را با تأکید بر بهبود هم‌زمان عملکرد سازه‌ای و افزایش شباهت هندسی پنل‌ها بررسی کردند. نتایج این پژوهش بر اهمیت کاهش تفاوت‌های هندسی پنل‌ها و ایجاد شبکه‌ای یکنواخت‌تر، در کنار تأمین الزامات عملکردی سازه، تأکید دارد [۱۷]. تمرکز این پژوهش بر بررسی و بهبود نظم هندسی سازه فضاکار فرم‌آزاد آتی‌سنتر مشهد به‌عنوان نمونه موردی است. در این پژوهش، نظم هندسی به افزایش تعداد اعضای هم‌طول یا با طول‌های تقریباً یکسان، کاهش تنوع طول اعضا و کاهش تعداد تیپ‌های طولی، همراه با حفظ هندسه کلی سازه، اطلاق می‌شود. برای این منظور ابتدا پوسته سازه به‌صورت پارامتریک مدل‌سازی شد تا امکان جابه‌جایی کنترل‌شده گره‌ها و بهبود آرایش هندسی آن فراهم شود. سپس با حفظ تعداد گره‌های سازه اصلی، ۱۷۶ نقطه به‌صورت تصادفی روی پوسته ایجاد و با استفاده از مثلث‌بندی دلانی، شبکه اولیه تولید شد. مثلث‌بندی دلانی یکی از متداول‌ترین روش‌های تولید شبکه‌های مثلثی است که با بیشینه‌سازی حداقل زاویه مثلث‌ها، از ایجاد المان‌های باریک و نامناسب جلوگیری کرده و شبکه‌ای با کیفیت هندسی مطلوب فراهم می‌کند. در ادامه، برای بهبود آرایش گره‌ها، الگوریتم پیشنهادی پیمایش دایره‌ای به کار گرفته شد. در این الگوریتم، هر گره در محدوده‌ای دایره‌ای پیرامون موقعیت اولیه خود جابه‌جا می‌شود تا ضمن حفظ هندسه کلی فرم، امکان دستیابی به شبکه‌ای با نظم هندسی بیشتر فراهم گردد. سپس فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از افزونه اختاپوس در محیط گرس‌هاپر انجام شد. افزونه اختاپوس در محیط گرس‌هاپر با بهره‌گیری از الگوریتم‌های تکاملی و رویکرد بهینه‌سازی پارتو، امکان بررسی هم‌زمان چند تابع هدف و استخراج مجموعه‌ای از راه‌حل‌های غیرمغلوب را فراهم می‌کند؛ به‌گونه‌ای که بتوان گزینه‌های طراحی را بر اساس مصالحه میان اهداف متعارض ارزیابی و مقایسه کرد [۱۸]. در این پژوهش، از مؤلفه‌ی[1] این افزونه برای بهینه‌سازی هم‌زمان دو تابع هدف، شامل بهبود شاخص‌های نظم هندسی و کاهش وزن سازه، استفاده شد. در نهایت، نتایج حاصل با سازه نمونه از نظر شاخص‌های نظم و وزن مقایسه و تحلیل شدند.

روش تحقیق

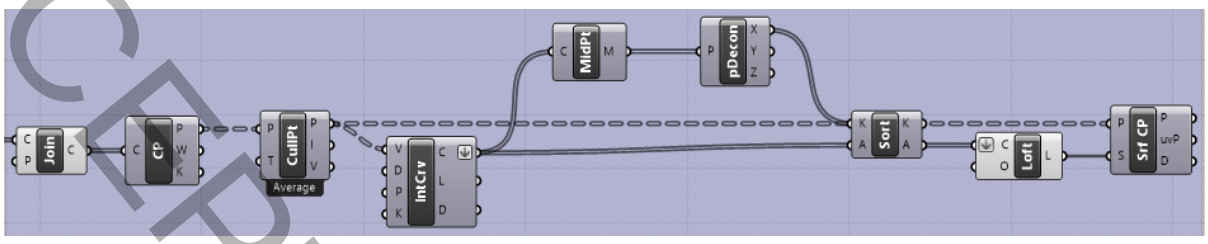
این پژوهش با رویکردی الگوریتمی، محاسباتی، آزمایشگاهی و تحلیلی، به بررسی و بهبود نظم هندسی سازه فضاکار فرم‌آزاد آتی‌سنتر مشهد می‌پردازد. ابتدا نقاط سازه‌ی فضاکار آتی‌سنتر در محیط راینو را به مولفه‌ی نقطه اتصال دادیم و مثلث‌بندی دلانی انجام گردید. جهت طراحی پوسته‌ی (سطح) فرم آزاد ابتدا با کمک مولفه‌ی Project 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 (شکل ۳و ۴) و در ادامه با در نظر گرفتن نقاط کنترل و اتصال آنها به صورت منحنی، فرم گذرا از این خمها با مولفه‌ی loft رسم می‌شود (شکل‌های ۵ و ۶). تمام نقاط سازه فضاکار روی پوسته قرار دارند. ۱۷۶ نقطه‌ی تصادفی روی فرم در نظر گرفته و مثلث بندی دلانی آنها ترسیم گردید. مثلث‌بندی دلانی حاصل از این ۱۷۶ نقطه ۴ نقطه گوشه را در نظر نمی گیرد (شکل ۷).

[1] Component

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۳: الگوریتم اتصال خمها به صورت ردیفی



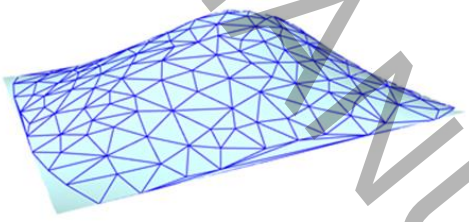
شکل ۴ : الگوریتم ترسیم فرم گذرنده از ۱۷۶ نقطه



شکل ۵: نمای پوسته‌ی گذرنده از نقاط و منحنی ها



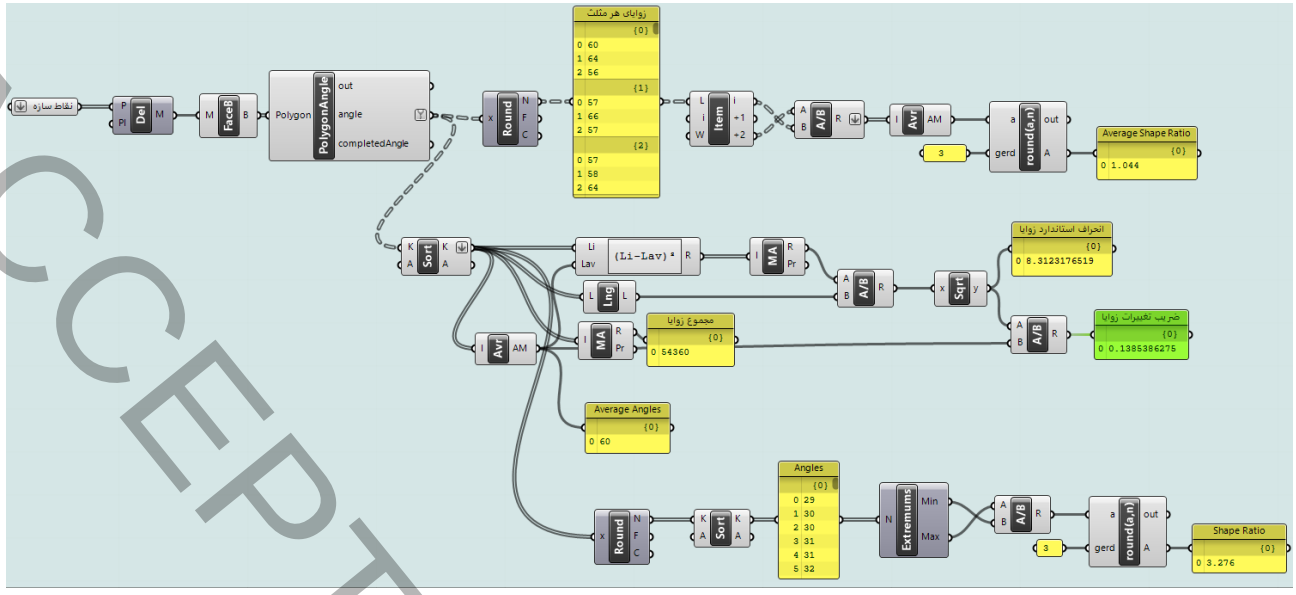
شکل ۶: نمای پوسته‌ی سازه فضاکار آتی‌سنتر



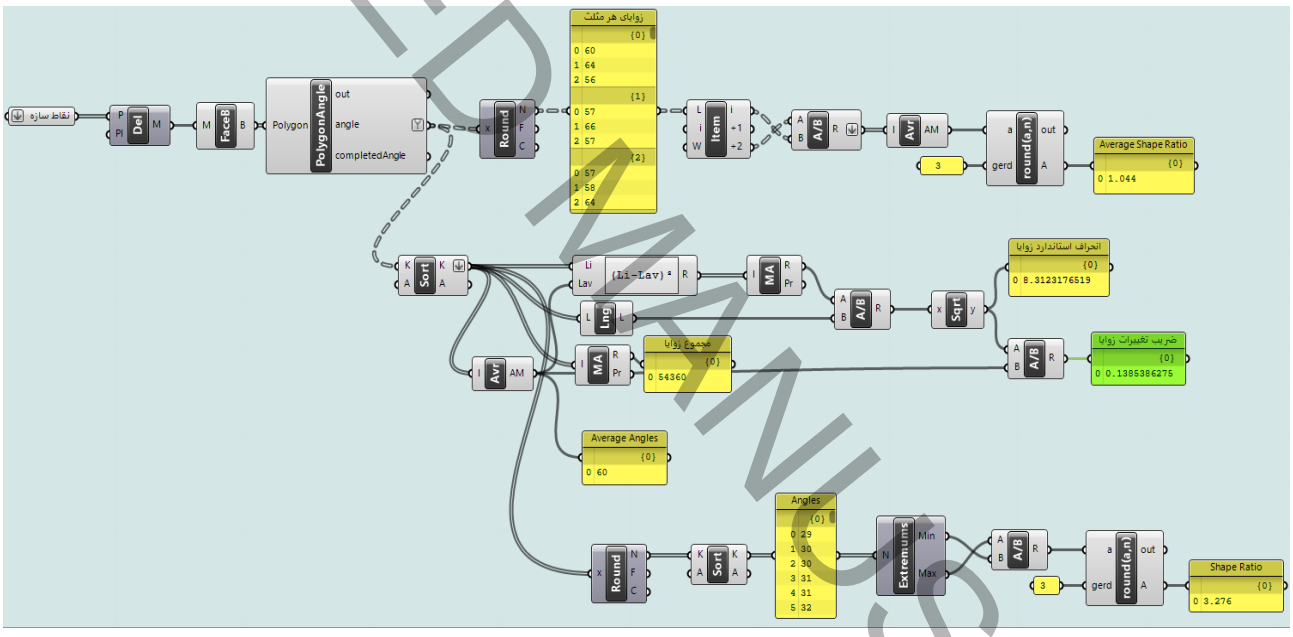
شکل ۷ : مثلث‌بندی دلانی حاصل از ایجاد ۱۷۶ نقطه تصادفی

برای محاسبه‌ی شاخص‌های نظم هندسی، الگوریتم‌های محاسبه معیارهای نظم هندسی شامل شاخص‌های طولی، زاویه‌ای و مساحتی توسعه داده شد (شکل‌های ۶ الی ۱۲).

ACCEPTED MANUSCRIPT

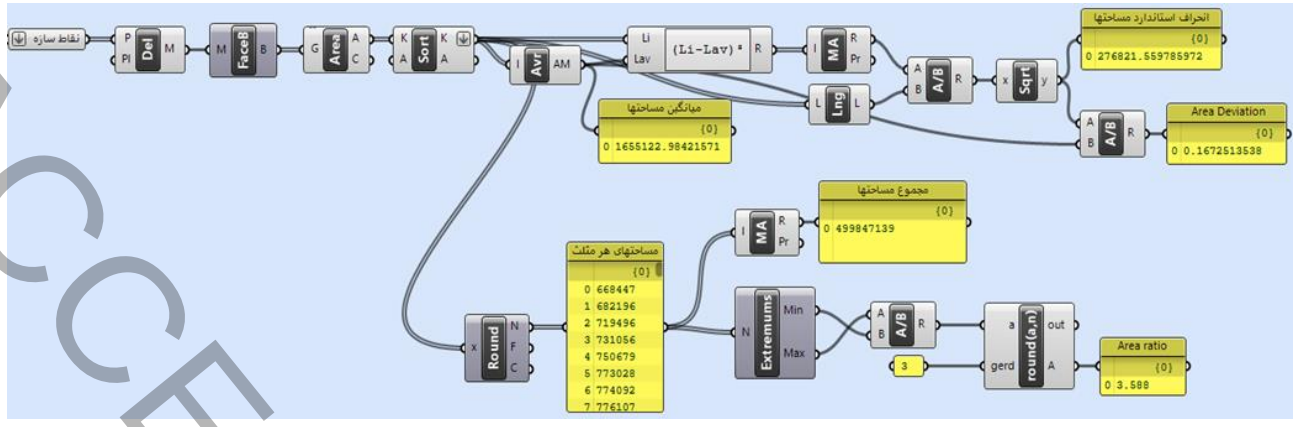


شکل ۸ : الگوریتم محاسبه شاخص‌های طولی نظم



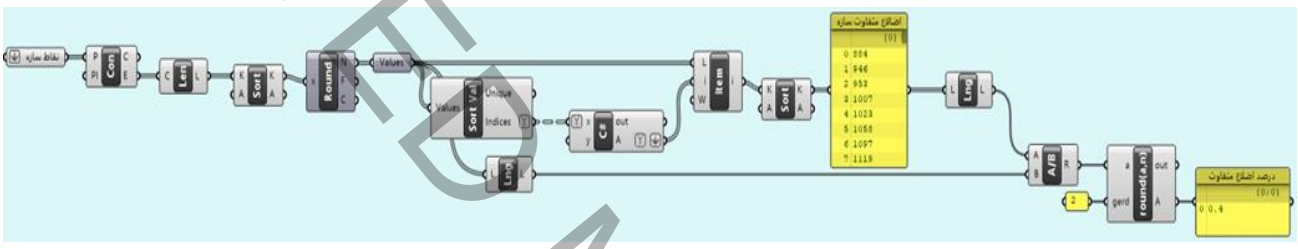
شکل ۹ : الگوریتم محاسبه‌ی شاخص‌های زاویه‌ای نظم

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۱۰ : الگوریتم محاسبه‌ی شاخص‌های مساحتی نظم

جهت محاسبه‌ی درصد اضلاع متفاوت از الگوریتم شکل ۱۱ و برنامه‌نویسی پایتون جهت شماره اندیس‌های اضلاع استفاده نمودیم (شکل ۱۲).



شکل ۱۱: الگوریتم محاسبه‌ی درصد اضلاع متفاوت سازه



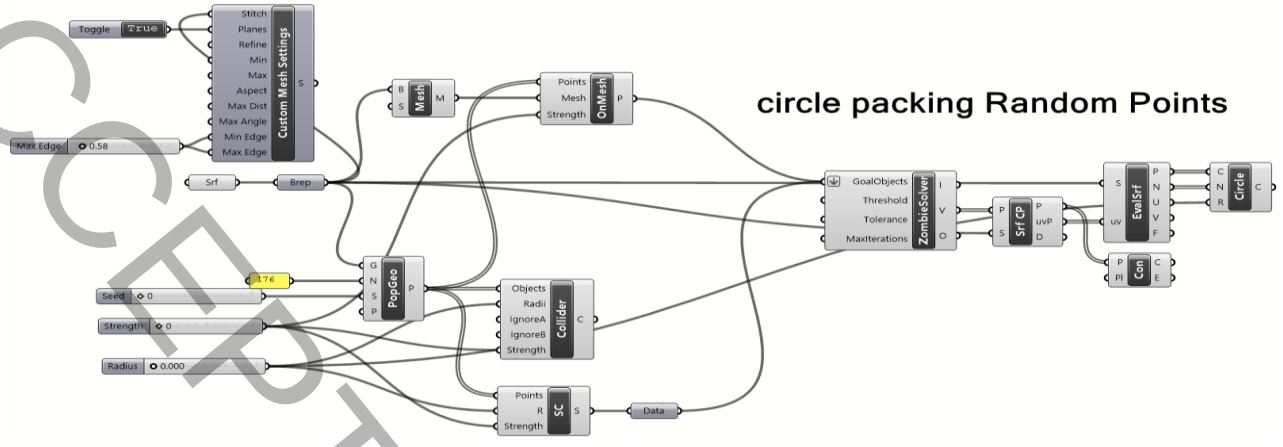
شکل ۱۲: کدنویسی شماره اندیس‌های اضلاع متفاوت سازه

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

در ادامه، به‌منظور بهبود آرایش گره‌ها، الگوریتم پیشنهادی پیمایش دایره‌ای (شکل ۱۳) برای جابه‌جایی کنترل‌شده نقاط بر روی پوسته و افزونه بهینه‌سازی چندهدفه اختاپوس برای کمینه‌سازی توابع هدف به‌کار گرفته شد. پس از دست‌یابی به شبکه بهینه،

ACCEPTED MANUSCRIPT

شاخص‌های نظم هندسی محاسبه و مدل اولیه و دو مدل بهینه در نرم‌افزار SAP2000 تحلیل شدند. در نهایت، تأثیر بهبود آرایش گره‌ها بر نظم هندسی، کاهش تنوع طول اعضا و وزن سازه مورد ارزیابی قرار گرفت.



شکل ۱۳: الگوریتم پیمایش دایره‌ای برای ۱۷۶ نقطه تصادفی

مراحل اصلی پژوهش به شرح زیر است:

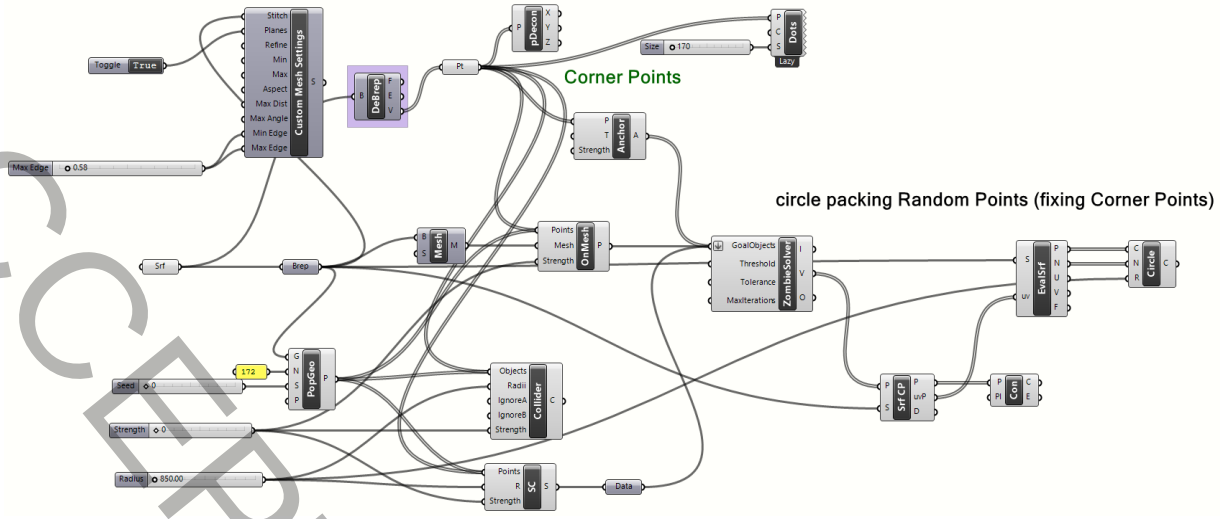
۱. مدل‌سازی پارامتریک پوسته سازه فضاکار آتی‌سنتر.
۲. ایجاد ۱۷۶ نقطه روی پوسته (۱۷۲ نقطه تصادفی و ۴ نقطه ثابت در گوشه‌ها) و تولید شبکه اولیه با استفاده از مثلث‌بندی دلانی.
۳. بهبود آرایش گره‌ها با الگوریتم پیمایش دایره‌ای و بهینه‌سازی چندهدفه اختاپوس.
۴. محاسبه شاخص‌های نظم هندسی برای شبکه اولیه و شبکه بهینه.
۵. مدل‌سازی دو سازه در نرم‌افزار SAP2000 و محاسبه وزن آن‌ها.
۶. تحلیل و مقایسه نتایج از نظر نظم هندسی و وزن سازه.

۱-۳- بهبود نظم مثلث‌بندی حاصل از ۱۷۶ نقطه تصادفی با کمک الگوریتم پیمایش دایره‌ای و بهینه‌سازی اختاپوس

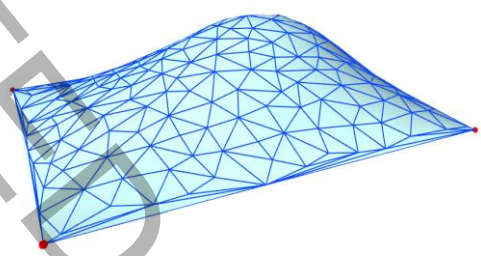
از آنجا که مثلث‌بندی دلانی حاصل از این ۱۷۶ نقطه تصادفی چهار نقطه گوشه را در نظر نمی گیرد، به همین منظور برای تثبیت چهار نقطه در گوشه از مولفه‌ی لنگرگاه[1] در الگوریتم پیمایش دایره‌ای استفاده می‌کنیم و ۱۷۲ نقطه‌ی تصادفی ایجاد می‌کنیم که با ۴ نقطه‌ی گوشه ۱۷۶ نقطه می‌شود. الگوریتم و نمای مثلث‌بندی در حالت seed=0,R=0,Strength=0 به صورت شکل‌های ۱۵و ۱۶ است که دارای مثلث‌های باریک و لاغر است. در این الگوریتم Seed مقدار اولیه تولید اعداد تصادفی و تعیین‌کننده آرایش اولیه نقاط، R شعاع محدوده مجاز جابه‌جایی هر نقطه و Strength شدت جابه‌جایی یا میزان نیروی اعمال‌شده به نقاط در فرآیند پیمایش است.

[1] Anchor

ACCEPTED MANUSCRIPT

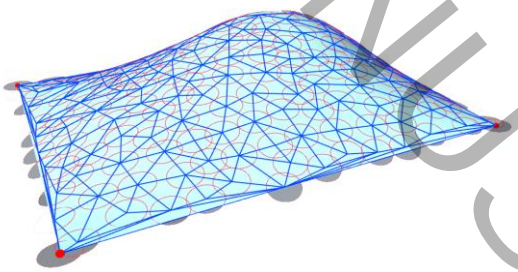


شکل۱۴: الگوریتم پیمایش دایره‌ای برای ۱۷۶ نقطه تصادفی با استفاده از مولفه‌ی لنگرگاه



شکل ۱۵: نمای مثلث‌بندی حاصل برای ۱۷۶ نقطه تصادفی با استفاده از مولفه‌ی لنگرگاه در حالت seed=0,R=0,Strength=0

نقاط با توجه به شعاع، اعمال نیروی فیزیکی و میزان جابجایی نقاط تصادفی، روی پوسته جابجا می‌شوند. لذا در این پژوهش 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=۸۵۰ ، Seed=۰ و ۰ =Strength است، نمای مثلث‌بندی تغییری نمی‌کند و مانند شکل ۱۶ است. شکل ۱۶ نمای مثلث‌بندی را همراه با پیمایش دایره‌ای نشان می‌دهد.



شکل ۱۶: نمای مثلث‌بندی و پیمایش دایره‌ای در حالت R=۸۵۰ ، Seed=۰ و Strength=۰

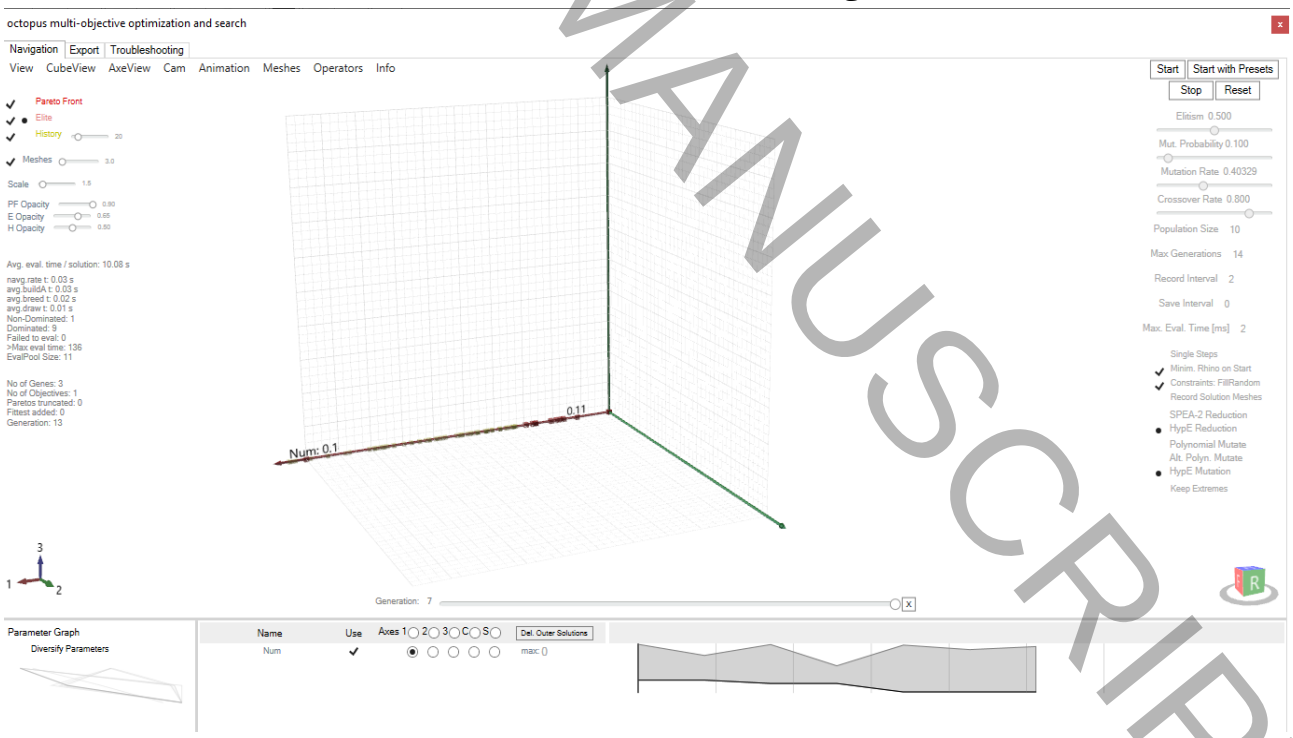
با تنظیم پارامترهای Seed، R و Strength در الگوریتم پیمایش دایره‌ای و همچنین پارامترهای Mutation Rate (نرخ جهش)، Population Size (تعداد افراد هر نسل)، Max Generation (حداکثر تعداد نسل‌ها)، Record Interval (فاصله ثبت نتایج) و Max Eval Time (حداکثر زمان ارزیابی) در فرآیند بهینه‌سازی اختاپوس که دست کاربر است، پاسخ‌های متنوعی برای آرایش گره‌ها حاصل می‌شود. برای بهینه‌سازی دو تابع هدف مورد بررسی قرار گرفت. درحالت اول تابع هدف را انحراف طولی اضلاع به کار رفته در سازه (رابطه‌ی (۱)) را به عنوان تابع هدف در نظر گرفته که انحراف طولی اضلاع به کار رفته در سازه است. این شاخص میزان پراکندگی طول اعضای سازه را بیان می‌کند و با کاهش آن، یکنواختی طول اعضا و در نتیجه نظم هندسی سازه افزایش می‌یابد. در حالت دوم رابطه‌ی پیشنهادی این پژوهش که بر پایه رابطه‌ی (۳) توسعه یافته است، به‌عنوان تابع هدف مورد استفاده قرار گرفت. دلیل انتخاب

ACCEPTED MANUSCRIPT

این رابطه آن است که رابطه‌ی (۳) همه طول اعضا را با در نظر گرفتن مقادیر تکراری ارزیابی می‌کند، در حالی که در ساخت سازه‌های فضاکار، کاهش تعداد تیپ‌های طولی اهمیت ویژه‌ای دارد. ازاین‌رو، در رابطه پیشنهادی تنها طول‌های متمایز اعضا پس از حذف مقادیر تکراری در محاسبات وارد شده‌اند تا علاوه بر کاهش پراکندگی طول‌ها، کاهش تعداد تیپ‌های طولی نیز مورد توجه قرار گیرد. در این رابطه، L_i ها اعداد بعد از حذف تکراری طول اضلاع، n تعداد کل اضلاع سازه و L_{av} میانگین اعداد بعد از حذف تکراری طول اضلاع می‌باشد. برای استخراج طول‌های متمایز از مؤلفه‌ی Create Set در محیط گرس‌هاپر استفاده شد که تنها یک نمونه از هر مقدار تکراری را نگه می‌دارد.

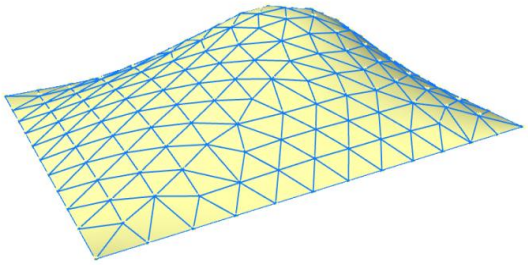
$$\frac{\sqrt{\frac{\sum\left(L_i - L_{av}\right)^2}{n}}}{L_{av}} \qquad (۳)$$

در فرآیند بهینه‌سازی، مختصات هر نقطه به‌عنوان یک ژن و مجموعه مختصات ۱۷۶ نقطه به‌عنوان یک کروموزوم در نظر گرفته شد. عملگر جهش نیز با انتخاب دو کروموزوم والد و جابه‌جایی تصادفی دو ژن در آن‌ها انجام گرفت. برای تابع هدف اول (کمینه‌سازی ضریب تغییرات طول اعضا)، یکی از مناسب‌ترین پاسخ‌های حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده با تنظیم پارامترهای(نرخ جهش) Mutation Rate=۰/۴۰۳۲۹، ۱(اندازه جمعیت) Population Size=۰ ، (حداکثر نسل) Max Generation=۱۴، (فاصله ثبت) Record ۲ =interval و (حداکثر پارامترها) Max.Eval.Time=۲ به دست آمد. در نمودار فرآیند بهینه‌سازی (شکل ۱۷)، نقاط پررنگ بیانگر جواب‌های برتر (Pareto-optimal) هستند که بهترین عملکرد را داشته و بیشترین شانس انتخاب به‌عنوان پاسخ نهایی را دارند. در این تنظیم، جواب بهینه بدون نیاز به تکرار مجدد فرآیند بهینه‌سازی حاصل شد [۱۹]. شکل ۱۸ نمای مثلث‌بندی را با هدف مینیمم انحراف طولی اضلاع (رابطه‌ی (۳)) و شکل ۱۹ نمای مثلث‌بندی را با هدف مینیمم رابطه‌ی پیشنهادی انحراف طولی اضلاع و یکی از مناسب‌ترین پاسخها را با انتخاب Mutation Rate=۰/۴۰۳۲۹، Population Size=۱۲، Max Generation=۱۳، Record ۱ =interval و Max.Eval.Time=۲ نشان می‌دهد.

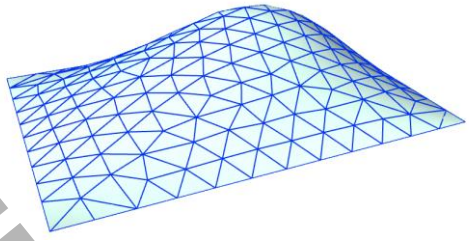


شکل۱۷ : فرآیند بهینه‌سازی در افزونه اختاپوس

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل۱۸: نمای سازه‌ی حاصل از اجرای بهینه‌سازی اختاپوس با هدف مینیمم انحراف طولی اضلاع سازه



شکل ۱۹ : نمای سازه‌ی حاصل از اجرای بهینه‌سازی اختاپوس با هدف مینیمم رابطه‌ی پیشنهادی (مدل M2)

۳-۲ مدل‌سازی در نرم‌افزار Sap

به منظور مدل‌سازی سازه‌های مورد نظر و مقایسه‌ی نتایج طراحی مقاطع آنها، از نرم افزار سپ[1] ۲۰۰۰ بهره گرفته شده است. سازه‌های مورد نظر دارای ابعاد کلیِ ثابت در پلان به صورت مستطیل با ابعاد طول و عرض ۲۲/۵ و ۲۰/۱ متر می‌باشد. همچنین دارای شرایط مرزی، تکیه‌گاهی و شرایط بارگذاری یکسان می‌باشند و تفاوت اصلی در نحوه‌ی مثلث‌بندی شبکه‌ها می‌باشد. شرایط مرزی به این صورت است که کلیه گره‌های واقع در لبه‌های سازه ثابت است؛ به این معنا که از حرکات انتقالی و چرخشی گره‌های لبه جلوگیری می‌شود. بارهای وارد بر سازه‌های مورد نظر شامل بار مرده، بار برف و بار باد می‌باشد که بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان تعیین شده‌اند. در جدول ۳ مقادیر بارهای وارده به صورت بارهای گسترده وارد بر واحد سطح افقی ارائه شده است.

جدول ۳: بارهای وارده بر سازه‌های مورد نظر

بار	بار مرده (daN/m^2)	بار برف (daN/m^2)*	بار باد (daN/m^2)
همه مدل‌ها	**۷۰**	**۱۵۰**	**۸۶**

ترکیب بارهای مورد استفاده در این پژوهش، بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان به صورت جدول ۴ می‌باشد.

جدول ۴: ترکیب بارهای مورد استفاده

$1.4D$
$1.2D+0.5S$
$1.2D+1.6S+0.8W$
$1.2D+0.5S+1.6W$
$0.9D+1.6W$

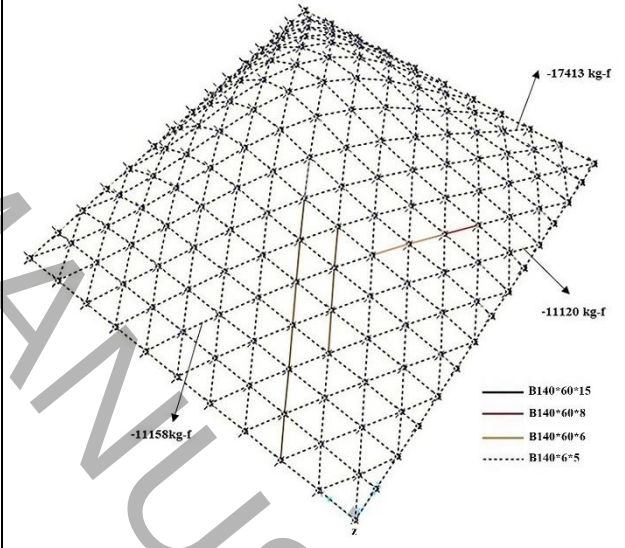
[1] Sap 2000

ACCEPTED MANUSCRIPT

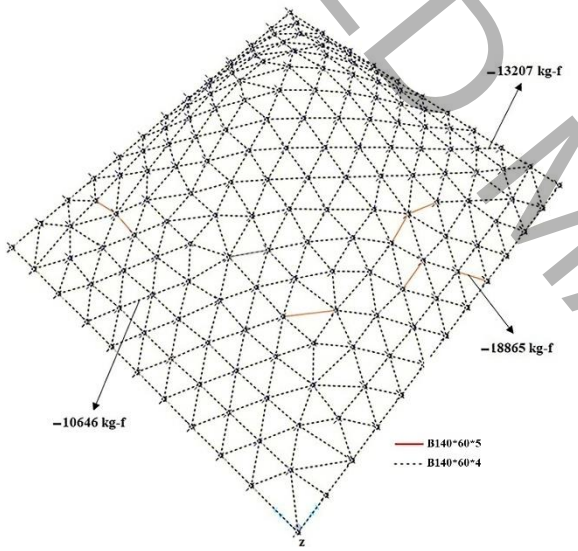
لازم به ذکر است که مقاطع مورد نظر برای اجزای شبکه در همه مدل‌ها از نوع قوطی فولادی ۱۴۰ میلی‌متر در ۶۰ میلی‌متر بوده که دارای ضخامت‌های مختلف می‌باشند و پس از انجام تحلیل و طراحی توسط نرم‌افزار، مناسب‌ترین (کمترین) ضخامت از نظر اقتصادی که بتواند بارهای وارده را بر اساس ترکیب بارهای فوق الذکربه نحو ایمن تحمل نماید، توسط نرم افزار مشخص می‌گردد. مشخصات مصالح مورد نظر برای مقاطع در جدول ۵ ارائه شده است. به منظور تحلیل و طراحی سازه‌های مورد نظر توسط نرم‌افزار، از آیین‌نامه طراحیAISC360-19 که مبحث دهم مقررات ملی ساختمان (طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی) بر آن منطبق است، استفاده شده است. جداول ۶ و ۷ تعداد و وزن مقاطع طراحی شده برای مدل نمونه M1 (سازه‌ی شکل ۱ (سازه‌ی نمونه موردی)) و مدل بهینه شده M2 (سازه‌ی شکل ۱۹) نشان می‌دهد. شکل‌های ۲۰ و ۲۱ مقاطع و حداکثر نیروهای محوری طراحی شده را تحت بارهای طراحی برای مدل‌های M1 و M2 نشان می‌دهند.

جدول ۵: مشخصات مصالح در نظر گرفته شده برای مقاطع فولادی

تنش تسلیم F_y	تنش نهایی F_u	ضریب ارتجاعی E	نسبت پواسون
۲۴۰ *MPa*	۳۷۰ *MPa*	*MPa* ۲۰۰۰۰۰	۰/۳



شکل ۲۰: مقاطع و حداکثر نیروهای محوری طراحی شده در اعضا تحت بارهای طراحی برای مدل M1



شکل ۲۱: مقاطع و حداکثر نیروهای محوری طراحی شده در اعضا تحت بارهای طراحی برای مدل M2

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول ۶: تعداد و وزن مقاطع طراحی شده برای مدل M1

مقطع	تعداد	وزن *kg*
B 140*60*5	۵۰۰	۱۱۳۵۶/۹
B 140*60*6	۲۴	۸۲۷,۶۴
B 140*60*8	۶۳	۲۸۵۳/۶۱
ورن کل سازه (kg)	۴۷۷	۱۵۰۲۸/۲۱
وزن کل سازه (kN)	۴۷۷	۱۵۴/۷

جدول۷: تعداد و وزن مقاطع طراحی شده برای مدل M2

مقطع	تعداد	وزن kg
B 140*60*4	473	11178.9
B 140*60*5	8	234.5
ورن کل سازه (kg)	481	11413/4
وزن کل سازه (kN)	481	114/13

همچنین، نتایج تحلیل و طراحی سازه‌ها در نرم‌افزارSAP2000 ، که خلاصه آن در جدول ۸ ارائه شده است، شامل مقادیر حداکثر نیروی محوری، وزن کل سازه و مقطع با بیشترین فراوانی در مدل نمونه (M1) و مدل بهینه (M2) است.

جدول ۸: مقایسه نتایج

مدل	حداکثر نیرو (kN)	وزن کل (kN)	مقطع با بیشترین تکرار	تعداد تکرار
M1	۱۷۴/۱۳	۱۵۴/۷	$BOX140\times60\times5$	۵۰۰
M2	۱۸۸/۶۵	۱۱۴/۱۳	$BOX140\times60\times4$	۴۷۳

- جدول ۸ بیانگر آن است که مدل بهینه M2 با وجود افزایش اندک حداکثر نیروی محوری نسبت به مدل نمونه، با استفاده از مقاطع اقتصادی‌تر، وزن کل سازه را (از 154.70 kN به 114.13 kN معادل حدود ۲۶/۲ درصد کاهش داده است. همچنین بیشترین تعداد اعضا در مدل M2 از مقطع B140×60×4 تشکیل شده است، در حالی که در مدل نمونه M1 بیشترین تعداد اعضا از مقطع B140×60×5 استفاده می‌کنند. این نتایج نشان می‌دهد که بهبود نظم هندسی شبکه، امکان استفاده گسترده‌تر از مقاطع با ضخامت کمتر را فراهم کرده و در نتیجه موجب کاهش وزن و مصرف مصالح شده است.

۳-یافته‌ها

شاخص‌های نظم سازه‌ی نمونه موردی، سازه‌ی حاصل از ایجاد نقاط تصادفی (شکل ۱۵) و سازه های حاصل از بهبود نظم شکل های ۱۸ و ۱۹، مطابق الگوریتم‌های ارائه‌شده در شکل‌های ۸ الی ۱۱ محاسبه شده، هدف از این مقایسه، بررسی میزان تأثیر فرآیند بهینه‌سازی بر بهبود نظم هندسی شبکه، کاهش تنوع طول اعضا، افزایش یکنواختی وجوه و زوایا، و در نهایت ارزیابی تأثیر این تغییرات بر کاهش وزن و بهبود ساخت‌پذیری سازه می باشد که نتایج آن در جدول‌های ۹ تا ۱۱ آورده شده است.

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول ۹ : محاسبه شاخص‌های طولی نظم

نوع مثلث‌بندی	تعداد نقاط	تعداد المان‌ها	تعداد مثلث‌ها	کوچکترین طول المان	بزرگترین طول المان	دامنه تغییرات	مجموع المان‌ها	میانگین المان‌ها	نرخ طولی	میانگین نرخ طولی	انحراف استاندارد المان‌ها	انحراف طولی المان‌ها	انحراف معیار نرخ‌های طولی وجوه	ضریب تغییرات نرخ‌های طولی وجوه	تعداد تیپ‌های طولی	تعداد و درصد اضلاع متفاوت
۱-سازه نمونه موردی (شکل ۱)	۱۷۶	۴۷۷	۳۰۲	۸۸۴	۲۵۵۸	۱۶۷۴	۹۳۲۵۱۵	۱۹۵۴/۹۶۸	۲/۸۹۴	۱/۱۶۴	۲۱۲/۲۰۷	۰/۱۰۸۵	۰/۲۱۰	۰/۱۸۱	۱۴	۱۹۲ ٪۴۰
۲- سازه شکل ۱۵	۱۷۶	۵۱۴	۳۳۹	۵۶۸	۱۲۸۹۱	۱۵۳۲۳	۱۱۳۷۰۱۶	۲۲۱۲/۱۰۷	۲۲/۶۹۵	۰/۶۷۱	۱۲۳۹/۱۰۸	۰/۵۶۰	۰/۶۲۲	۰/۱۲۲	۲۸	۳۹۵ ٪۷۶
۳-سازه شکل ۱۸	۱۷۶	۴۸۲	۳۰۷	۱۸۵۵	۳۲۰۸	۱۳۵۳	۹۴۷۲۰۲	۱۹۶۵/۱۷۱	۱/۷۲۹	۱/۱۳۱	۲۲۸/۸۳۱	۰/۱۱۷	۰/۱۶۶	۰/۱۴۷	۱۱	۱۱۱ ٪۲۳
۴-سازه شکل ۱۹	۱۷۶	۴۸۱	۳۰۶	۱۸۴۷	۲۹۰۴	۱۰۵۷	۹۴۲۹۸۱	۱۹۶۰/۴۵۴	۱/۵۷۲	۱/۱۱۹	۲۱۰/۷۵۹	۰/۱۰۷	۰/۱۵۳	۰/۱۳۷	۱۰	۱۲۲ ٪۲۵

- نتایج جدول ۹ نشان می‌دهد که سازه حاصل از نقاط تصادفی (شکل ۱۵) از نظر شاخص‌های طولی، نامنظم‌ترین حالت را داشته و بیشترین دامنه تغییرات طول اعضا، نرخ طولی و تعداد تیپ‌های طولی را داراست. در مقابل، بهینه‌سازی موجب بهبود چشمگیر شاخص‌های طولی شده است. در میان مدل‌های بهینه، مدل M2 (شکل ۱۹) با کمترین دامنه تغییرات، نرخ طولی، انحراف طولی و ضریب تغییرات نرخ‌های طولی، مناسب‌ترین عملکرد را نشان می‌دهد. همچنین کاهش تعداد تیپ‌های طولی اعضا از ۱۴ به ۱۰ بیانگر افزایش یکنواختی طول اعضا و بهبود قابلیت ساخت و مونتاژ سازه است.

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول ۱۰: محاسبه شاخص‌های زاویه‌ای نظم

نوع مثلث‌بندی	کوچکترین زاویه	بزرگترین زاویه	دامنه تغییرات زوایا	مجموع زوایا	میانگین زوایا	نرخ شکلی	میانگین نرخ شکلی	انحراف استاندارد زوایا	ضریب تغییرات زوایا	انحراف استاندارد نرخ‌های شکلی وجوه	ضریب تغییرات نرخ‌های شکلی
۱-سازه نمونه موردی (شکل ۱)	۲۹	۹۵	۶۶	۵۴۳۶۲	۶۰/۰۰۲	۳/۲۷۶	۱/۰۴۴	۸/۳۱	۰/۱۳۸	۰/۳۲۵	۰/۳۱۱
۲- سازه شکل ۱۵	۰/۴۲۶	۱۷۷/۰۲۱	۱۷۶/۵۹۵	۶۱۰۲۰	۶۰	۴۱۵/۵۴۲	۳/۱۰۸	۲۹/۵۴۷	۰/۴۹۲	۱۷/۲۴۳	۵/۵۴۸
۳-سازه شکل ۱۸	۳۱	۱۱۸	۸۷	۵۵۲۴۴	۶۰	۳/۸۰۶	۱/۰۵۱	۹/۹۹	۰/۱۶۷	۰/۳۱۳	۰/۲۹۸
۴-سازه شکل ۱۹	۳۹	۱۰۲	۶۳	۵۵۰۸۲	۶۰	۲/۶۲	۱/۰۴۷	۸/۸۱۳	۰/۱۴۷	۰/۲۸۲	۰/۲۶۹

- نتایج جدول ۱۰ نشان می‌دهد که سازه حاصل از نقاط تصادفی (شکل ۱۵) دارای بیشترین پراکندگی زاویه‌ای بوده و از نظر شاخص‌های زاویه‌ای نامنظم‌ترین حالت را دارد. در مقابل، هر دو مدل بهینه‌شده نسبت به این سازه بهبود قابل‌توجهی در شاخص‌های زاویه‌ای نشان می‌دهند. در میان مدل‌های قابل مقایسه، سازه نمونه (شکل ۱) کمترین انحراف استاندارد زوایا و ضریب تغییرات زوایا را داراست و از این نظر منظم‌تر ارزیابی می‌شود، در حالی که مدل M2 (شکل ۱۹) با کمترین نرخ شکلی، انحراف استاندارد نرخ‌های شکلی و ضریب تغییرات نرخ‌های شکلی، عملکرد بهتری نسبت به مدل M1 (شکل ۱۸) داشته و به سازه نمونه نزدیک‌تر است.

جدول ۱۱: محاسبه شاخص‌های مساحتی نظم

نوع مثلث بندی	کوچکترین مساحت وجوه	بزرگترین مساحت وجوه	دامنه تغییرات مساحت‌ها	نرخ مساحت	مجموع مساحت‌ها (مساحت پوسته= ۵۰۰۵۰۹۹۵۴/۵۳۴)	میانگین مساحت‌ها	انحراف استاندارد مساحت‌ها	ضریب تغییرات مساحت‌ها
۱-سازه نمونه موردی (شکل ۱)	۶۶۸۴۴۷	۲۳۹۸۴۶۶	۱۷۳۰۰۱۹	۳/۵۸۸	۴۹۹۸۴۷۱۳۹	۱۶۵۵۱۲۲/۹۸۴	۲۷۶۸۲۱/۵۶۰	۰/۱۶۷
۲- سازه شکل ۱۵	۳۶۷۸۹	۳۰۲۲۰۷۲	۲۹۸۵۲۸۳	۸۲/۱۴۶	۴۹۴۴۳۹۹۱۰	۱۴۵۸۵۲۵/۷۹۹	۴۹۶۴۲۸/۱۰۶	۰/۳۴۰
۳-سازه شکل ۱۸	۱۵۰۴۱۵۳	۲۴۸۴۹۵۸	۹۸۰۸۰۵	۱/۶۵۲	۴۹۹۷۹۳۸۱۲	۱۶۲۷۹۹۲/۸۸۱	۱۶۴۷۶۰/۶۳۴	۰/۱۰۱۲
۴-سازه شکل ۱۹	۱۵۰۱۸۲۱	۲۴۹۱۴۸۴	۹۸۹۶۶۳	۱/۶۵۹	۴۹۹۷۳۹۳۷۳	۱۶۳۳۱۳۵/۱۸۵	۱۸۰۵۰۴/۲۴	۰/۱۱۰۵

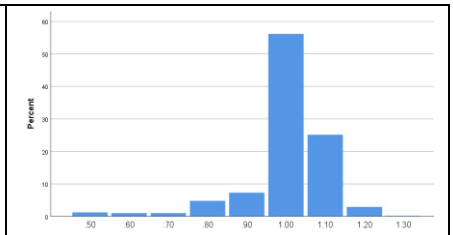
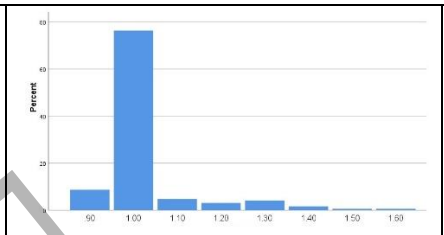
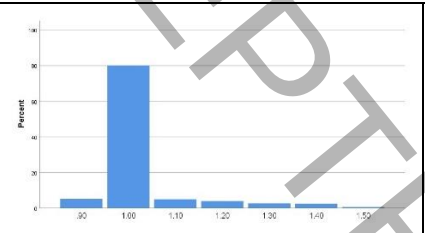
- نتایج جدول ۱۱ نشان می‌دهد که سازه حاصل از نقاط تصادفی (شکل ۱۵) از نظر شاخص‌های مساحتی، نامنظم‌ترین وضعیت را داشته و بیشترین نرخ مساحت و ضریب تغییرات مساحت‌ها را داراست. در مقابل، فرآیند بهینه‌سازی موجب کاهش چشمگیر پراکندگی مساحت وجوه شده است. در میان مدل‌های بهینه، مدل M1 (شکل ۱۸) کمترین دامنه تغییرات

ACCEPTED MANUSCRIPT

مساحت‌ها، کمترین نرخ مساحت و کمترین ضریب تغییرات مساحت‌ها را به خود اختصاص داده و از نظر شاخص‌های مساحتی اندکی عملکرد بهتری نسبت به مدل M2 (شکل۱۹) دارد. با این حال، اختلاف دو مدل بسیار ناچیز بوده و هر دو نسبت به سازه نمونه و سازه حاصل از نقاط تصادفی، نظم مساحتی بهتری نشان می‌دهند. نمودار شاخص طول نشان می‌دهد که سازه‌های شماره ۱۸ و ۱۹ دامنه‌ی تغییرات کمتری نسبت به سایر سازه‌ها دارند. همچنین مقایسه این دو سازه نشان می‌دهد که سازه شکل ۱۹ از نظر فراوانی اعضای هم‌طول عملکرد مناسب‌تری دارد.

جدول شماره ۱۲ نمودار شاخص طول را برای هر کدام از سازه‌های شکل‌های ۱، ۱۸ و ۱۹ را نشان می‌دهد.

جدول ۱۲: نمودارهای شاخص طول سازه‌ها

		
سازه شماره ۱	سازه شماره ۱۸	سازه شماره ۱۹

- در تمامی مثلث‌بندی‌ها به‌منظور اطمینان از صحت توپولوژی شبکه‌های مثلث‌بندی‌شده و قابلیت مقایسه آنها، رابطه‌ی اویلر (رابطه‌ی ۴ برای تمامی نتایج بررسی شد. برقرار بودن رابطه (۴) در همه حالت‌های سازه‌ای نشان می‌دهد که ساختار توپولوژیکی شبکه‌ها معتبر بوده و تغییرات ایجاد شده تنها ناشی از جابه‌جایی گره‌ها و بهبود آرایش هندسی آنها است، نه تغییر در ساختار شبکه یا تعداد اجزای آن. ازاین‌رو، مقایسه شاخص‌های نظم بر پایه شبکه‌هایی با ساختار توپولوژیکی یکسان انجام شده است.

تعداد اضلاع = تعداد وجوه + تعداد نقاط - ۱ (۴)

۴-بحث و پیشنهاد شاخص ترکیبی نظم

نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های طولی، زاویه‌ای و مساحتی نشان داد که هر یک از این شاخص‌ها جنبه متفاوتی از نظم هندسی را ارزیابی می‌کنند و در نتیجه، همواره یک سازه را به‌عنوان منظم‌ترین سازه معرفی نمی‌کنند. به‌عنوان مثال، بیشتر شاخص‌های طولی و مساحتی، مدل M2 (شکل ۱۹) را دارای بهترین عملکرد معرفی می‌کنند، در حالی که شاخص‌های مبتنی بر انحراف استاندارد زوایا و ضریب تغییرات زوایا، سازه نمونه (شکل ۱) را منظم‌تر ارزیابی می‌کنند. این اختلاف نشان می‌دهد که مفهوم نظم هندسی، مفهومی چندبعدی است و نمی‌توان آن را تنها با یک شاخص کمی توصیف کرد. از سوی دیگر، نتایج تحلیل سازه‌ای نشان داد که مدلی که بر اساس اغلب شاخص‌های طولی بهینه تشخیص داده شده است، از نظر وزن سازه و ساخت‌پذیری نیز عملکرد بهتری دارد و امکان استفاده از مقاطع سبک‌تر و کاهش مصرف مصالح را فراهم می‌کند. بنابراین، ارزیابی نظم هندسی صرفاً بر مبنای یکنواختی زوایا یا طول اعضا کافی نیست و لازم است معیارهای مؤثر بر رفتار سازه، ساخت‌پذیری و جنبه‌های اجرایی نیز در ارزیابی نظم لحاظ شوند. بر این اساس، در این پژوهش یک چارچوب کلی برای تعریف شاخص ترکیبی نظم (رابطه‌ی (۵)) پیشنهاد می‌شود که در آن شاخص نهایی از ترکیب خطی شاخص‌های مختلف به‌دست می‌آید :

$$a_1 r_1 + a_2 r_2 + \ldots + a_9 r_9 \qquad (۵)$$

ACCEPTED MANUSCRIPT

که هر کدام از r_i ها نشان دهنده‌ی یکی از شاخص‌های نظم ذکر شده‌ی فوق و هر کدام از a_iها می‌توانند اعدادی بین صفر و یک، به سلیقه‌ی کاربر و $\sum_{i=1}^{9} a_i$ برابر ۱ باشد، یا a_iها مقادیری دلخواه باشند. لذا با توجه به مقادیر مختلف a_iها یکی از سازه‌های شماره ۱، ۱۸ و ۱۹ از نظم بیشتری برخوردار می‌شود و جواب منحصر به فردی به دست نمی‌آید. با توجه به رابطه‌ی ۲ تعاریف زیادی برای شاخص نظم می‌توان ارائه نمود که مقدار آن با تغییر متقارن مقیاس ثابت بماند. هر چند شاخص‌های نظم دیگری هم می‌توان تعریف نمود. بنابراین یک تعریف استاندارد و جهانی نیاز است تا بتوان به صورت قطعی مشخص نمود کدام سازه از بهبود نظم بیشتری نسبت به سایر سازه‌ها برخوردار است که این امر به تحقیقات و آزمایش‌های فراوانی نیاز دارد و تیمی از محققین، مهندسین سازه و ریاضیدانان نیاز که بتوان تعریف جامعی برای شاخص نظم به صورت کمی ارائه نمود.

نتیجه گیری

در این پژوهش، بهبود نظم هندسی شبکه‌های مثلث‌بندی دلانی حاصل از ۱۷۶ نقطه تصادفی با استفاده از الگوریتم پیمایش دایره‌ای و بهینه‌سازی اختاپوس بررسی شد. بدین منظور، علاوه بر تابع هدف متداول مبتنی بر کمینه‌سازی پراکندگی طول اعضا، تابع هدفی بر پایه کاهش تعداد تیپ‌های طولی اعضا پیشنهاد شد و عملکرد آن با استفاده از شاخص‌های طولی، زاویه‌ای و مساحتی، همراه با تحلیل سازه در نرم‌افزار SAP2000 ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که مدل M2 در اغلب شاخص‌های طولی عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها داشته و تعداد تیپ‌های طولی اعضا را از ۱۴ به ۱۰ کاهش داده است. همچنین تحلیل سازه‌ای نشان داد که این مدل، با وجود افزایش اندک حداکثر نیروی محوری، امکان استفاده از مقاطع سبک‌تر را فراهم کرده و وزن کل سازه را حدود ۲۶٫۲ درصد نسبت به سازه نمونه کاهش داده است. این نتایج بیانگر آن است که بهبود نظم هندسی علاوه بر افزایش ساخت‌پذیری، موجب کاهش مصرف مصالح و هزینه‌های اجرایی نیز می‌شود. از سوی دیگر، مقایسه شاخص‌های طولی، زاویه‌ای و مساحتی نشان داد که هر یک تنها بخشی از مفهوم نظم هندسی را ارزیابی می‌کنند و الزاماً به انتخاب یک سازه واحد به‌عنوان منظم‌ترین سازه منجر نمی‌شوند. همچنین بررسی شاخص ترکیبی پیشنهادی نشان داد که با تغییر ضرایب وزنی، سازه‌های متفاوتی به‌عنوان گزینه برتر انتخاب می‌شوند؛ ازاین‌رو، هنوز شاخصی جامع و استاندارد برای ارزیابی کمی نظم هندسی سازه‌های فضاکار وجود ندارد. در مجموع، روش پیشنهادی این پژوهش رویکردی مؤثر برای بهبود نظم هندسی، کاهش تعداد تیپ‌های طولی اعضا و سبک‌سازی سازه‌های فضاکار ارائه می‌دهد. با این حال، توسعه شاخصی جامع که بتواند هم‌زمان ویژگی‌های هندسی، عملکرد سازه‌ای، ساخت‌پذیری و ادراک بصری از نظم را در نظر بگیرد، همچنان یکی از موضوعات مهم پژوهش‌های آینده به شمار می‌رود.

تشکر و قدردانی

از مهندسین شرکت سازه‌های فضاکار افق نور که در انجام این پژوهش کمک نمودند، سپاسگزاریم.

منابع

[1] Tsuboi, Y. (1984). Analysis, design and realization of space frames. Bulletin of the International Association of Shell and Spatial Structures, 15, 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. PhD thesis, Spatial Structures Research Centre, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Surrey, 1–217.

[4] Haghnazar, R., Nooshin, H., & Golabchi, M. (2014). Improving the regularity of geodesic domes using the concept of stepping projection. International Journal of Space Structures, 29(2), 81–95.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[5] Nooshin, H., Ishikawa, I., Disney, P. L., & Butterworth, J. W. (1997). The Traviation Process. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, 38(125), 165–176.

[6] Kouroiwa, Y. (200?). Regulariazation of Structural Forms Using Genetic Algorithms. PhD thesis, Space Structures Research Centre, Department of Civil Engineering, University of Surrey. Published by ProQuest LLC (2019), 1–350.

[7] Nooshin, H., Kuriowa, Y., & Disney, P. L. (1999). A genetic method for regularization of structural configurations. IASS Congress, 20–24 September, Madrid, Spain, 1–10.

[8] Piórkowski, A., Mazurek, P., & Gronkowska-Serafin, J. (2015). Comparison of assessment regularity methods dedicated to isotropic cells structures analysis. Advances in Intelligent Systems and Computing, 1–11.

[9] Massah, S. A., & Ahmadi, H. (2017). Regularizing structural configurations by using meta-heuristic algorithms. Geomechanics and Engineering, 12(2), 197–210.

[10] Mohades, A., Goodarzi, M., & 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, 7(1), 1–6.

[11] Goodarzi, M., Mohades, A., & Forghani-Elahabad, M. (2021). Improving the gridshells' regularity by using evolutionary techniques. Mathematics, 9, 440.

[12] Elshakhs, Y. S., Deliparaschos, K. M., Charalambous, T., Oliva, G., & Zolotas, A. (2024). A comprehensive survey on Delaunay triangulation: Applications, algorithms, and implementations over CPUs, GPUs, and FPGAs. IEEE Access, 12, 12562–12585.

[13] Zhang, Y., Liu, Y., Lee, T. U., Rezaee Javan, A., Pietroni, N., & Xie, Y. M. (2023). Reducing the number of different nodes in space frame structures through clustering and optimization. Engineering Structures, 284, 116016.

[14] Hemmatian Dehkordi, P., Mohades Khorasani, A., Goodarzi, M., & Chaichi Raghimi, M. (2023). Improving the regularity of the Bidboland Khuzestan space dome using circular traversal algorithm and genetic optimization. Journal of Structural and Construction Engineering, 55(4), 873–892.

[15] Favilli, A., Laccone, F., Cignoni, P., Malomo, L., & Giorgi, D. (2024). Geometric deep learning for statics-aware grid shells. Computers & Structures, 292, 107238.

[16] Bi, M., Liu, Y., Xu, T., He, Y., Ma, J., Zhuang, Z., & Xie, Y. M. (2024). Clustering and optimization of nodes, beams and panels for cost-effective fabrication of free-form surfaces. Engineering Structures, 307, 117912.

[17] Zhong, Y., Liu, Y., Lu, H., Feng, R., & Xie, Y. M. (2025). Design and optimisation of grid shells for maximising both structural performance and panel similarity. Engineering Structures, 329, 119820.

[18] Duan, Y., Yang, Y., Zhang, T., Wei, Y., Shi, C., Zhang, S., Li, P., Jiao, Z., & Gao, W. (2026). A two-stage multi-objective optimization framework for sunspace design: Separating baseline building and sunspace effects on energy, comfort, and daylight in cold-region rural dwellings. Journal of Building Engineering, 117, 114678.

[19] R. Vierlinger, “Octopus,” *Grasshopper3D*. [Online]. Available: https://www.grasshopper3d.com/group/octopus. [Accessed: Nov. 26, 2026].

ACCEPTED MANUSCRIPT