Journal of Structural and Construction Engineering, 8(12), 2022, pp. 225-246

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Utilization of hyper-innovative solutions based on genetic algorithm to optimize the characteristics of diagrid systems

Ashkan KhodaBandehLou *[1], Sina Zahiri Miandoab [2]

1- Assistant Professor, Faculty Of Engineering, Civil Engineering Department, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran

2 -Ph.D. Student Of Civil Engineering-Structure, Faculty Of Engineering, Civil Engineering Department, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran

ABSTRACT

Diagonal lattice structures as a structural system in high-rise buildings are improved in terms of performance of frame and tubular structures, which drastically reduces the weight of the structure by significantly reducing the cutting lameness. The purpose of this paper is to design the optimal diagonal network in single and double layer diagonal structures in high-rise buildings under gravity and lateral loads to minimize the weight of the structure, determine the number of optimal divisions and angles, and finally compare the diagonal diagonal structures And two layers to choose from is a more cost-effective option. To perform the optimization, meta-heuristic algorithms are used in a programming environment. The grasshopper graphic programming plugin on Rhino geometric modeling software provides parameterization of the optimization problem. The optimization in the written program was performed using a genetic algorithm through the Galapagos plugin based on the output results of the Caramba structural analysis engine. Accordingly, the relationship between optimization factors including number of vertical and horizontal divisions, number and angle of members and distance between two layers in diagonal diagonal structures with evaluation parameters based on the results of structural analysis including weight, delta effect and maximum displacement Obtained separately for single-layer and double-layer structures. The results showed that the optimal weight of a single-layer structure is less than that of two-layer structures, which due to easier construction in a faster time and less energy consumption, single-layer structure is selected as a more cost-effective option.

ARTICLE INFO

Receive Date: 04 May 2021
Revise Date: 06 June 2021
Accept Date: 17 June 2021

Keywords:
High-rise Buildings
Diagonal Structures
Optimal Design
Genetic Algorithm
Galapagos

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.284618.2441

*Corresponding author: Ashkan KhodaBandehLou
Email address: a.khodabandehlou@iaurmia.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

بهره‌جویی از راه‌کارهای فرا ابتکاری بر پایه‌ی الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی تعداد تقسیم‌ها، زاویه و ساختار سامانه‌های شبکه‌ای قطری

اشکان خدابنده لو*[۱]، سینا ظهیری میاندوآب [۲]

۱ - استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

۲- دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران ، واحد ارومیه ، دانشگاه آزاداسلامی ، ارومیه ، ایران

چکیده

سامانه‌های شبکه‌ای قطری سیستم‌های سازه‌ای گسترش‌پیدا کرده از سازه‌های لوله‌ای و قابی هستند و می‌توانند با کاهش چشم‌گیر لنگی برش، وزن سازه را به‌شدت کاهش دهند و به بهبود رفتار ساختمان‌های بلندمرتبه کمک کنند. در این مقاله تعداد تقسیم‌ها، زاویه و ساختار بهینه‌ی سامانه‌های شبکه‌ای قطری تک و دولایه در ساختمان‌های بلند تعیین می‌شوند. برای این منظور از یک برنامه‌ی رایانه‌ای و راه‌کارهای فرا ابتکاری بر پایه‌ی الگوریتم ژنتیک و کارامبا به‌عنوان موتور تحلیل سازه بهره‌جویی شده است. در این تحلیل‌ها، رابطه‌ی بین عامل‌های ورودی شامل فاصله‌ی بین دو لایه، زاویه و تعداد المان‌ها و تعداد تقسیم‌های قائم و افقی با عامل‌های خروجی به‌دست آمده از تحلیل سازه به کمک موتور کارامبا، شامل بیشینه تغییرشکل‌ها، وزن و اثر پی دلتا به‌دست آمدند. بر اساس نتیجه‌های به‌دست آمده از الگوریتم‌های ژنتیک و راه‌کارهای فراابتکاری، وزن‌های به‌دست آمده برای سامانه‌های شبکه‌ای قطری دارای یک لایه در مقایسه با سامانه‌های دولایه بیشتر است. علاوه بر آن، با توجه به وزن کم‌تر، ساختار هندسی ساده‌تر، سرعت اجرای بیشتر، عدم نیاز به نیروی فنی بسیار ماهر، پایین‌تر بودن مصرف انرژی، اشغال فضای معماری کم‌تر، ایجاد فضاهای بازتر و نوردهی مناسب‌تر در سامانه‌های تک لایه نسبت به دولایه، این سامانه‌ها برای کاربرد در ساختمان‌های بلندمرتبه پیشنهاد می‌شوند.

کلمات کلیدی: سامانه‌های شبکه‌ای قطری، راه‌کارهای فرا ابتکاری، موتور تحلیل سازه کارامبا، ساختمان‌های بلند مرتبه.

سابقه مقاله:					
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	شناسه دیجیتال:
۱۴۰۰/۰۲/۱۴	۱۴۰۰/۰۳/۱۶	۱۴۰۰/۰۳/۲۷	۱۴۰۰/۰۳/۲۷	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.284618.2441
					doi: 10.22065/jsce.2021.284618.2441

***نویسنده مسئول:** اشکان خدابنده لو

پست الکترونیکی: a.khodabandehlou@iaurmia.ac.ir

۱- مقدمه

افزایش روز افزون جمعیت و ضرورت استفاده بیشتر از زمین در مراکز پرتراکم شهرها، مهاجرت و ضرورت بازسازی و نوسازی در مناطق شهری، ایجاد و گسترش مراکز صنعتی و تجمع افراد در مراکز شهری و ضرورت کاهش هزینه‌های ناشی از گسترش افقی شهرها همگی از جمله عواملی هستند که باعث شده ساختمان‌های بلند مرتبه از استقبال چشمگیری درجامعه‌ی مهندسی برخوردار شوند که مستلزم استفاده از روش‌های طراحی هندسی بهینه [۱]، مصالح هوشمند [۲] و کامپوزیت‌ها [۳] هستند. امروزه با پیشرفت علوم و فناوری، نیازها و خواسته‌های جدیدی در زمینه‌ی مهندسی سازه به‌وجود آمده است. عامل زمان در ساخت سازه‌ها اهمیت دوچندان یافته و با افزایش جمعیت بشری، علاقه به ساخت فضاهای بزرگ بدون ستون‌های میانی خواهان بسیاری پیدا کرده است. در این راستا، در قرن حاضر، تعدادی از متخصصان مجذوب قابلیت‌های منحصر به فرد سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطریی در ساختمان‌های بلند شده و پاسخ بسیاری از نیازهای جدید را در این سازه‌ها جسته‌اند. ظهور زیبایی‌شناسی مبتنی بر عملکرد بهینه‌ی سازه‌ای، سبب شکل‌گیری سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطریی شده است[۴ - ۸].

در سیستم سازه‌ای سامانه‌ی شبکه قطری توزیع جرم سازه دور از مرکز، مقاومت این سازه را در برابر نیروها و به ویژه نیروهای جانبی افزایش می‌دهد. در این گونه از سازه‌ها همه‌ی ستون‌های موجود حذف می‌شود. سیستم سامانه‌ی شبکه قطری ستونها و بادبندها را با هم ترکیب می‌کند و سبب صرفه جویی در میزان مصالح و صرفه‌ی اقتصادی و نیز بازدهی بالای سازه‌ای می‌گردد [۹]. از آن‌جا که سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری برش را از طریق عمل محوری عضوهای قطری حمل می‌کند، باعث به حداقل رساندن تغییرشکل برشی می‌شود وبه هسته با سختی برشی بالا نیاز ندارند. این گونه از سازه‌ها، شبکه‌ای از المان‌های قطری هستند که همزمان نقش باربری بارهای افقی و قائم را بر عهده دارند. برخلاف بیشتر سیستم‌های متداول ساختمان‌های بلندمرتبه که توسط مکانیسم‌های برشی و خمشی انتقال می‌یابند، در سازه‌ی سامانه‌های شبکه‌ای قطری، بارهای وارده به دلیل پیکره‌بندی مثلثی آنها و حذف ستون‌های قایم از مکانیسم انتقال بار محوری برخوردار بوده و به عبارت دیگر عملکردی خرپایی دارند [۱۰]. بر این اساس، پژوهش‌های فراوانی به معیارهای طراحی و تلاش برای دست‌یابی به هندسه‌ی بهینه در سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطری پرداخته‌اند.Moon از اولین پژوهشگرانی است که روش‌های مبنی بر سختی را برای طراحی اولیه‌ی سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطری پیشنهاد کرده است [۱]. رویکرد پارامتریک روش پیشنهادی در آن پژوهش با تعداد طبقه‌های متعدد و سختی‌های محوری، خمشی و برشی متفاوت، امکان دست‌یابی به بهینه‌ترین شکل هندسی برای سازه سامانه‌ی شبکه قطری را فراهم می‌کند. هم‌چنین، اهمیت زاویه‌ی عضوها در سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری در آن پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهشی دیگر [۱۱]، مطالعه‌ای مقایسه‌ای بین سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطری با ارتفاع‌های متفاوت و شکل‌های هندسی گوناگون انجام شده است. نتیجه‌های این پژوهش نیز نشان دادند که می‌توان به حالتی بهینه برای سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطری دست یافت. علاوه بر این، مقدار تنش مورد نیاز محلی، مهم‌ترین عامل برای تعیین اندازه‌ی سطح مقطع هر یک از عضوهای سامانه‌ی شبکه قطری تعیین گردید. بررسی رفتار سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطری در برخی دیگر از پژوهش‌ها [۱۲] نشان دادند که معیارهای سختی و مقاومت دو عامل اساسی برای تعیین رفتار سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطری و شناخت رفتار لرزه‌ای آن‌ها می‌باشد. از آنجا که به علت پیچیدگی هندسی، مقدار سختی و مقاومت یک سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری را نمی‌توان در ابتدای کار محاسبه کرد، باید معیارها و رابطه‌هایی برای تخمین تقریبی این دو عامل در اختیار مهندسین طراح قرار گیرد. در پژوهش دیگری [۱۳] حداکثر تغییرمکان و دریفت بین طبقه‌ای در سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطری مورد ارزیابی قرار گرفت و نتیجه‌های آن نشان دادند که برای دست‌یابی درست به رفتار سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطری، این دو عامل، علاه بر سختی و مقاومت، باید مد نظر قرار بگیرند. در سال‌های اخیر، برخی از پژوهش‌گران [۱۴] الگوریتم‌های بهینه‌یابی نظام‌مندی برای یافتن مناسب‌ترین شکل هندسی سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطری پیشنهاد کردند. در این الگوریتم، تلاش شده است تا با تغییر عامل‌های هندسی در سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری، هزینه‌های ساخت و همچنین تغییرمکان‌های جانبی تا حد ممکن کاهش یابند. در پژوهشی دیگر [۱۵] با تغییر عامل‌هایی مانند چگالی مصالح و زاویه‌ی هر کدام از عضوها با راستای افقی، از راهکارهای بهینه‌سازی برای دست‌یابی به کم‌ترین هزینه برای ساخت سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطری استفاده شده است. برخی از پژوهشگران [۱۶ - ۱۸] از روش کار مجازی و کاهش مقدار تغییرمکان جانبی سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری برای یافتن شکل هندسی بهینه در آن تلاش کردند.

اگر چه ساختمان‌های زیادی با سیستم دایاگرید پیشنهاد شده‌اند و به عرصه‌ی رقابت وارد گردیده‌اند، اما مطالعات کمی روی رفتار سیستم دایاگرید یا گره‌های دایاگرید در گذشته انجام شده است. از همه مهمتر، مطالعه‌ی ساختار گره‌های دایاگرید به خاطر هندسه‌ی پیچیده و ارتباط پر هزینه‌ی سیستم دایاگرید بسیار مشکل است. از این رو، یکی از مساله‌های اصلی در سامانه‌ی شبکه قطریها تعیین چیدمان المان‌های قطری است به طوری که پارامترهای هدفی هم‌چون وزن، تغییرمکان جانبی کمینه و یا پارامتری همچون سختی جانبی بیشینه گردد. در این تحقیق، مدلسازی پارامتریک سازه سامانه‌ی شبکه قطری تک لایه و دو لایه انجام می‌پذیرد. پارامتری‌سازی المان‌ها پیش‌زمینه‌ی بحث بهینه‌سازی هندسه و وزن آنها خواهد بود. در این پژوهش، وزن و پیکره‌بندی سازه سامانه‌ی شبکه قطری تک لایه و دولایه تحت بارهای ثقلی و جانبی بررسی می‌شود. هدف این پژوهش، تعیین زوایای بهینه المان‌های قطری و وزن بهینه سازه دیاگرید تک لایه و دولایه در ساختمان بلند مرتبه است. تحلیل به صورت نرم افزاری با نرم‌افزارهای معتبر مهندسی عمران و به‌ویژه نرم‌افزار پارامتریک گرس‌هاپر و کارامبا انجام می‌شود.

۲- روش بهینه‌سازی

بهینه سازی عبارت است از رسیدن به بهترین نتیجه در مورد یک عملیات در حالی که محدودیت‌های مشخصی برآورده شده باشند. بنابراین طراحی بهینه، بهترین طراحی قابل قبول بر اساس یک معیار کیفی شایستگی از پیش تعیین شده تعریف می‌شود [۱۹ - ۲۱]. اهمیت طراحی سازه‌های با وزن کم‌تر، اولین بار در صنایع هوا - فضا مورد توجه قرار گرفت که در آن‌ها طراحی سازه‌های هواپیما، به‌جای هزینه، بیشتر با وزن آن کنترل می‌شد. در دیگر صنایع مربوط به سیستمهای مهندسی سازه و ساختمان ممکن است هزینه در درجه‌ی اول اهمیت داشته باشد. هر چند که وزن سیستم، هزینه و عملکرد آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. توجه فزاینده به کمبود مواد خام و منابع انرژی شناخته شده، موجب تمایل به داشتن سازه‌هایی سبک، کارا و ارزان قیمت شده است [۲۲ - ۲۴]. یک الگوریتم خوب برای بهینه سازی باید دارای ویژگی‌هایی مانند قابل اطمینان بودن، کلی بودن و نداشتن محدودیتی روی شکل توابع، قابلیت استفاده آسان برای طراحان و دارای بازدهی بالا باشد [۲۵ و ۲۶].

مفهوم پارامتریک‌سازی بر اساس تفکر الگوریتمیک است که امکان بیان پارامترها و قواعد آن، پیوستگی، تعریف، برنامه گشایی و روشن ساختن رابطه بین اهداف طرح و پاسخ طرح را فراهم می‌کند. نام پارامتریک، برگرفته از ریاضیات (معادلهٔ پارامتریک) است و به پارامترهای خاص و متغیرهایی که قابلیت ویرایش دارند، مربوط می‌شود که نتیجه‌ی نهایی آنها را تغییر می‌دهد. طراحی پارامتریک یک الگو در طراحی است که در آن از رابطه‌ی بین عناصر برای تغییر و تبدیل آن به هندسه‌ی پیچیده و ساختار استفاده می‌شود.

در این مقاله، جهت انجام شبیه‌سازی، بهینه‌سازی چند متغیره و نیز بیان پارامتریک مدل هندسی سازه‌های مورد نظر از افزونه‌ی پارامتریک گرس‌هاپر[1] [۲۷ و ۲۸] و دو زیر شاخه‌ی درون سازمانی این افزونه به نام‌های کارامبا[2] [۲۹ و ۳۰] و گالاپاگوس[3] [۲۷] استفاده شده است. گرس‌هاپر، یک زبان برنامه نویسی بصری است که در برنامه راینو[4] [۳۱] اجرا می‌شود. برنامه‌ها با کشیدن قطعه‌ها بر روی صفحه ساخته می‌شود. خروجی به این مولفه‌ها و سپس به ورودی از اجزای پس از آن متصل می‌شود. گرس‌هاپر به طور عمده برای ایجاد الگوریتم‌های مولد مورد استفاده قرار می‌گیرد. بسیاری از اجزای گرس‌هاپر هندسه‌های دو بعدی و سه بعدی ایجاد می‌کنند. بعضی از آنها انواع دیگری از الگوریتم‌ها از جمله عددی، متنی، صوتی، تصویری و برنامه‌های کاربردی لمسی را ایجاد می‌کنند. داده‌ها می‌توانند یا به‌صورت یک ثابت تعریف شده، و یا می‌توان آن را از راینو یا یک فایل بر روی کامپیوتر وارد کرد. داده‌ها همیشه در پارامترها ذخیره شده و می‌توان به طور شناور آنها را به یک جزء به‌عنوان ورودی یاخروجی متصل کرد.

کارامبا [۲۹ و ۳۰] یک برنامهٔ اجزاء محدود برای پیش‌بینی رفتارسازه تحت بارهای ثقلی و جانبی می‌باشد. این برنامه در یک چارچوب مهندسی سازه طراحی شده و خواستگاه آن استفاده در یک محیط طراحی پارامتریک و تعاملی است. یکی از اهداف آن ساختن یک ابزار سبک و سریع برای تسهیل جریان یکپارچه‌ی اطلاعات میان مدل‌های سازه‌ای و هندسی می‌باشد. تمرکز این پژوهش بر روی

[1] Grasshopper
[2] Karamba
[3] Galapagos
[4] Rhino

امکان سنجی اعمال الگوریتم ژنتیک که نوع خاصی از روش های تکاملی می‌باشد، در بهینه سازی سازه‌ای در دنیای واقعی بوده و الگوریتم ژنتیک به مقدار زیادی به ارزیابی تابع هدف (درمورد ارزیابی سازه‌ای این موضوع اشاره دارد به محاسبات اجزاء محدود) اتکا دارد.

در این مقاله، از برنامه‌ی گالاپاگوس [۲۷] که ضمیمه‌ی نرم افزار پارامتریک گرس هاپر می‌باشد برای بهینه سازی استفاده شده است. این نرم افزار از روش‌های تکاملی برای حل مساله استفاده می‌کند. در این نرم افزار در گام اول باید یک نسل مولد انتخاب شود تا نسل‌های بعدی از این نسل تولید شوند. در نوع انتخاب این نسل مولد می‌توان چند روش به کار برد که سه روش بیشترین کاربرد را دارد: انتخاب ایزوتروپیک و یا یکنواخت، انتخاب انحصاری، انتخاب جهت دار.

در این پژوهش، نتایج حاصل از جستجو توسط الگوریتم نوشته شده در نرم افزار برنامه نویسی گرس‌هاپر می‌باشد. این برنامه شامل مدلسازی پارامتریک برج مورد نظر می‌باشد. متغیرهای این مدل پارامتریک، تعداد تقسیمات عمودی و افقی سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری و (زاویهٔ حاصله) و فاصله‌ی بین دو لایه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری در هر وجه ساختمان (برای سامانه‌ی شبکه قطری دو لایه) می‌باشد و بر اساس وزن سازه به‌عنوان تابع هدف این بهینه سازی، ارزیابی می‌شوند. هدف از انجام این بهینه‌یابی، یافتن روابط میان متغیرهای یک سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری می‌باشد تا نهایت مقرون به‌صرفگی از نظر هزینه، مصرف انرژی حداقل برای تولید ساختمان و حداکثر کیفیت در عملکرد سازه‌ای حاصل شود.

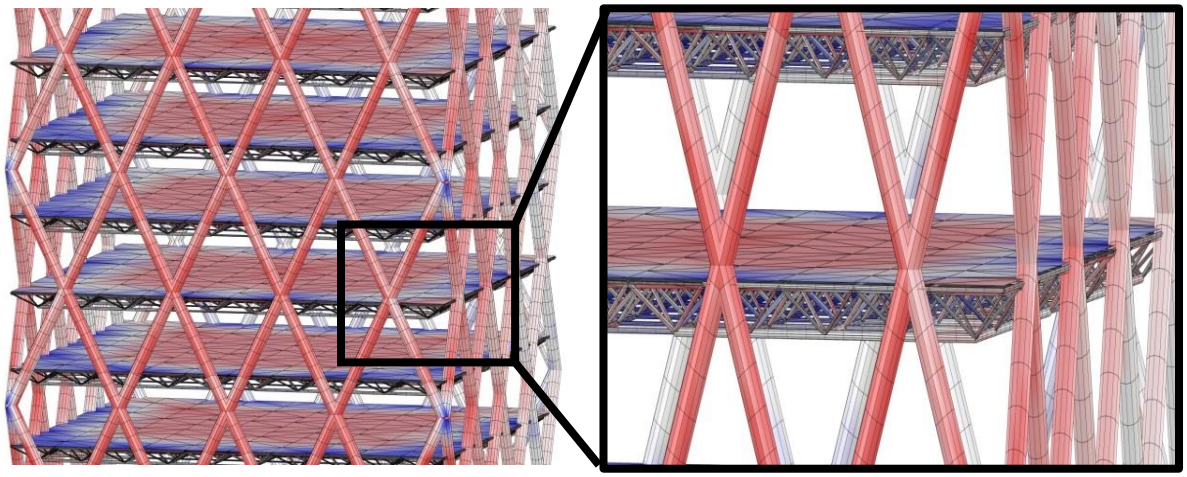
۳- الگوهای عددی

در این پژوهش، ساختمان‌های بلند مرتبه‌ای با ارتفاع ۲۰۰ متر و دارای ۴۰ طبقه با پلان مربع شکل به ابعاد ۳۰ متر در ۳۰ متر در شهر تبریز بر اساس نسخه‌ی چهارم استاندارد ۲۸۰۰ به عنوان ساختمان‌های هدف در نظر گرفته شده است. در این ساختمان‌ها، ارتفاع کف تا کف طبقات ۵ متر تعریف شده است که حدود ۱۴۰ سانتی‌متر آن را سازه‌ی کف اشغال کرده است. سازه‌ی تعریف شده برای کف طبقات به‌عنوان سازه‌ی افقی هم برای تحمل بار ثقلی و هم به‌عنوان یک دیافراگم صلب برای تحمل بارهای جانبی، سازه‌ای مرکب متشکل از یک سازه‌ی فضاکار و دال بتنی روی آن می‌باشد. در این سازه، ارتفاع دال بتنی ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع مقطع سازه‌ی فضاکار یک متر می‌باشد. جدول ۱ و جدول ۲ به‌ترتیب ویژگی‌های مکانیکی مصالح بتنی و فولادی بکار رفته در الگوهای عددی را گزارش کرده‌اند.

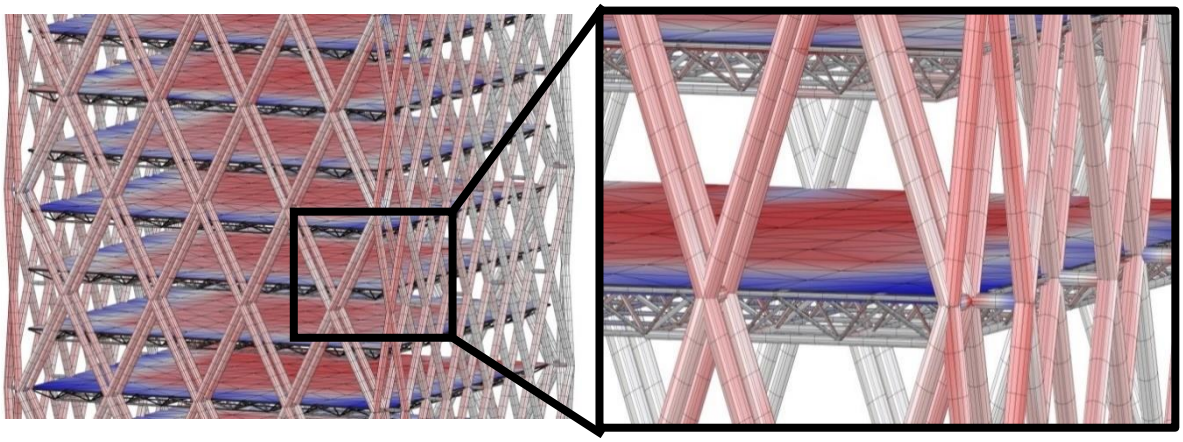
جدول ۱: مشخصات مصالح بتنی و فولادی

مشخصات مصالح	مصالح بتنی C20/25	مصالح فولادی Steel St37
مدول‌الاستیسیته $[kN/cm^2]$	۳۰۰۰	۲۱۰۰۰
مدول برشی $[kN/cm^2]$	۱۲۵۰	۸۰۷۶
وزن مخصوص $[kN/m^3]$	۲۵	۷۸/۵
ضریب انبساط حرارتی$[1/C°]$	۱×۱۰^{-۵}	$۱/۲\times۱۰^{-۵}$
تنش تسلیم $[kN/cm^2]$	۱/۳۳	۲۴

سیستم باربر جانبی الگوهای عددی، یک سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری در محیط ساختمان می‌باشد که مطابق با شکل ۱ و شکل ۲ به‌ترتیب در دو مورد مجزا به‌صورت تک‌لایه و دولایه الگوسازی شده است. سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری دولایه عبارت است از دو جداره سامانه‌ی شبکه قطری موازی هم که دو نقطه‌ی تقاطع اعضای سامانه‌ی شبکه قطری روبروی هم در دو جداره، به کمک اعضای افقی با اتصالات صلب به هم متصل شده است. سازه‌ی افقی شامل یک دیافراگم صلب مرکب متشکل از یک لایه دال بتنی و یک سازه فضاکار زیر آن است که این سازه‌ی دیافراگم به کمک اتصالات صلب به سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری در محیط پلان متصل می‌شود. داخل پلان به‌طورکامل عاری از سازه‌ی عمودی است و تمام سازه‌ی عمودی در محیط پلان قرار گرفته است تا حداکثر بازوی اهرم در مقابله با بارهای جانبی حاصل شود و در نتیجه، عملکرد سازه‌ای بهبود یابد. استفاده‌ی هم‌زمان از سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری و سازه‌ی مرکب کف طبقات، نیاز به سازه‌ی ثانویه در داخل پلان ساختمان را از بین برده است تا پلان طبقات حداکثر انعطاف‌پذیری را دارا باشند.

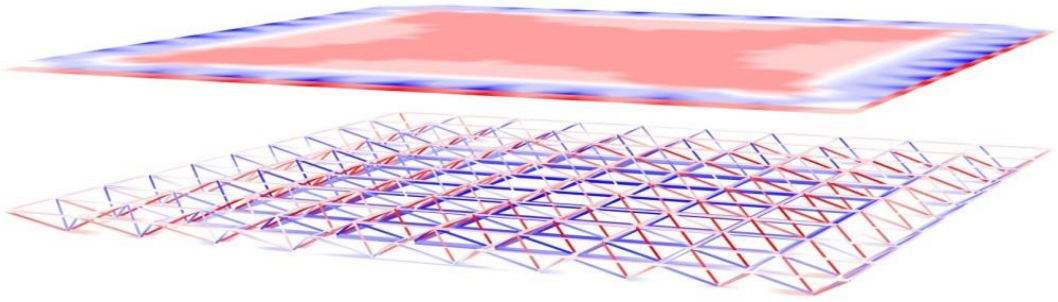


شکل ۱: دال بتنی و سازه‌ی فضاکار کف در ساختمان سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه



شکل ۲: دال بتنی و سازه‌ی فضاکار کف در ساختمان سامانه‌ی شبکه قطری دولایه

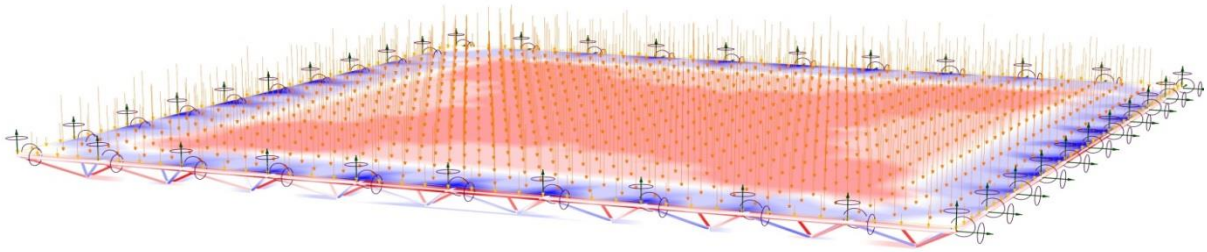
با توجه به زیاد بودن ابعاد دهانه (۳۰ متر) و با هدف عاری بودن فضای داخل از هرگونه سازه‌ی اضافی، استفاده از یک کف مرکب متشکل از یک سازه‌ی فضاکار و دال بتنی روی آن برای سازه‌ی کف طبقات به‌عنوان یک راه حل برای ارتفاع مقطع زیاد مورد نیاز معرفی شده است. سازه‌ی فضاکار استفاده شده، شبکه‌های مربع روی مربع جابجا شده با اتصالات صلب به‌صورت لبه‌ی پیش‌آمده می‌باشد که در شکل ۳ نشان داده شده است. امتیاز این نوع مقطع لبه، حذف کمانش اعضای نزدیک تکیه‌گاه، که همواره بیشترین تنش را دارا هستند، در مقایسه با لبه‌ی شبیدار می‌باشد.



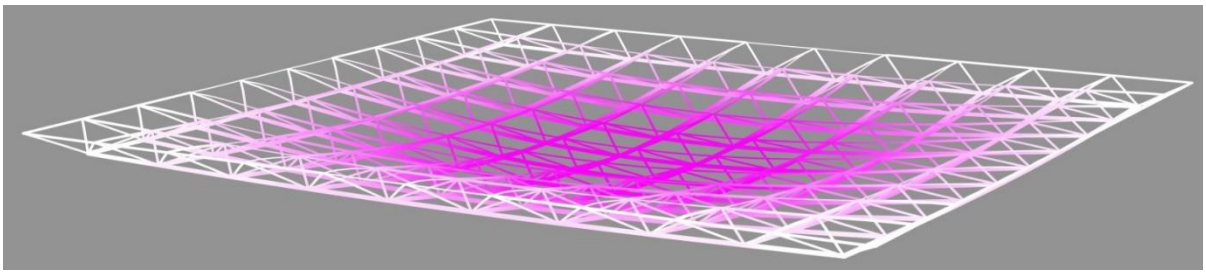
شکل ۳: سازه فضاکار مربع روی مربع جابجا شده

در این مقاله، اتصال اعضای سامانه‌ی شبکه قطری به هم به‌صورت صلب طراحی شده است. عملکرد یکپارچه میان سازه فضاکار و دال بتنی از طریق پیوندهایی برقرار می‌شود که در نقشی هم‌زمان، هم به‌عنوان پیوندهای لایه‌ی بالایی سازه فضاکار استفاده می‌شود و هم

به‌عنوان برش‌گیر، اتصال میان دو لایه را برقرار می‌سازد. دال بتنی در سیستم کف استفاده شده در این سازه دارای ضخامتی برابر ۲۰ سانتی متر است و در آن از بتن با رده‌ی مقاومتی C20/25 بهره‌جویی شده است. سازه فضاکار استفاده شده نیز دارای شبکه‌هایی با ابعاد ۳ در ۳ متر با فاصلهٔ ۱ متر بین دو لایه به‌عنوان ارتفاع مقطع سازه فضاکار و از جنس فولاد St37 می‌باشد. در تحلیل اجزاء محدود توسط افزونهٔ کارامبا در محیط برنامه نویسی گرس هاپر، بارگذاری شامل ترکیب بار زنده و مرده می‌باشد. طبق ضوابط آیین نامه بتن ایران، حداکثر تغییرشکل (خیز مجاز) سازه فضاکار $\frac{1}{240}$ کوچکترین دهانه برای بارهای مرده و $\frac{1}{360}$ کوچکترین دهانه برای بارهای زنده می‌باشد. شکل ۴ و شکل ۵ به‌ترتیب بارگذاری سازه‌ی کف و تغییر شکل آن تحت بارهای اعمالی را نشان می‌دهند.

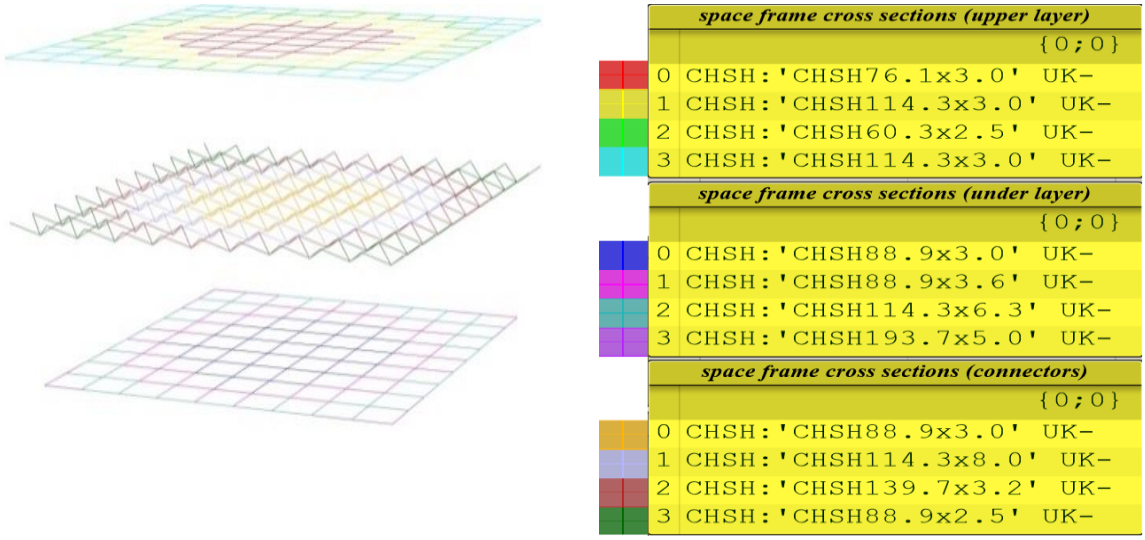


شکل ۴: بارگذاری و شرایط تکیه گاهی سازه‌ی کف



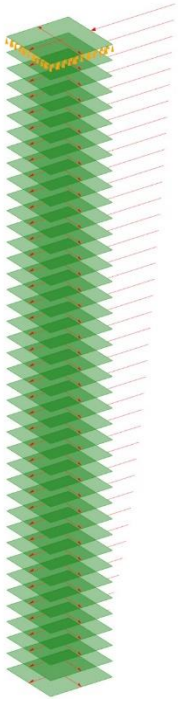
شکل ۵: تغییرشکل شماتیک سازه فضاکارکف تحت بارهای اعمالی

در فرآیند بهینه سازی پارامتریک با الگوریتم ژنتیک توسط افزونه‌ی گالاپاگوس در محیط نرم افزار گرس هاپر، مقاطع سازه فضاکار از استاندارد بریتانیا، گروه CHS (مقاطع توخالی دایره‌ای) بهینه‌یابی شده‌اند. وزن سازه به‌عنوان تابع هدف، حداکثر تغییرشکل به‌عنوان محدودیت بهینه‌یابی و مقاطع اعضای سازه فضاکار در ۱۲ گروه به‌عنوان پارامترهای بهینه سازی تشکیل شده‌اند. شکل ۶ تیپ‌بندی مقاطع و پاسخ بهینه‌سازی برای سازه‌ی کف پس از انجام تحلیل را نشان می‌دهد. سازه فضاکار سقف متشکل از سه بخش شبکه‌ی کف تحتانی، اعضای قطری رابط و شبکه‌ی کف فوقانی است که دال بتنی بر روی آن قرار می‌گیرد. مقاطع بهینه برای این سه بخش در شکل ۶ با ۴ رنگ مختلف نشان داده شده است. برای هرکدام از شبکه های کف تحتانی و فوقانی و اعضای رابط، چهار مقطع مختلف با رنگ‌های مختلف بدست آمده است.



شکل ۶: تیپ بندی مقاطع بعد از بدست آوردن پاسخ

سازه‌های بلند و کلیهٔ اجزاء آنها باید در برابر اثرات ناشی از بار باد و زلزله تحلیل شوند و برای اثر هر یک از این دو که بیشتر باشد، طراحی و ساخته شوند. جهت طراحی سازه در برابر باد ضوابط مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران، و برای طراحی در برابر زلزله، مشخصات و بارگذاری لرزه‌ای مطابق ضوابط آیین نامه ۲۸۰۰ ایران برای شهر تبریز درنظر گرفته شده است. اثر باد باتوجه به میانگین سرعت باد درمنطقه، ارتفاع، شکل هندسی ساختمان‌ها، میزان پوشش وگرفتگی محاسبه شد. بار باد در این پژوهش به صورت دینامیکی اعمال شده است و به صورت بردارهایی تعریف می‌شود که شامل فشار و مکش در هر طبقه که در مساحت سطح موثر آن ضرب می‌شود و مطابق شکل ۷، به علت صلب بودن دیافراگم طبقات، بردار حاصل به مرکزثقل وارد می‌شود.

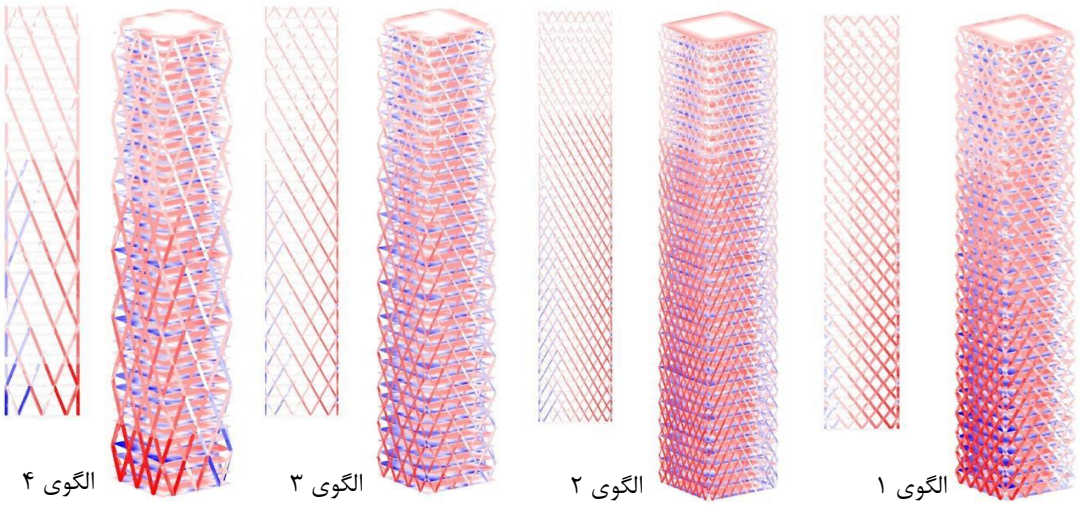


شکل ۷: بارگذاری باد در طبقات مختلف سازه

۴- بهینه‌سازی

در این پژوهش، انجام بهینه‌سازی سازه سامانه‌ی شبکه قطری با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری انجام شده است که استفاده از یک محیط برنامه نویسی را ملزم می‌کند. افزونه‌ی برنامه‌نویسی گرافیکی گرس هاپر بر روی نرم افزار مدل سازی هندسی راینو و قابلیت بیان پارامتریک هر مساله امکان بهینه‌سازی الگوریتمیک را نیز فراهم می‌سازد. در شکل ۸ و شکل ۹ به ترتیب مدل پارامتریک سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه برای برخی از مقادیر محتمل پارامترهای حاکم بر مساله و بهینه سازی نشان داده شده است. همچنین در هریک از سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه مقادیر پارامترها و نیز بهینه‌ترین حالت مساله‌ی حاکم به‌ترتیب در جدول ۳ و جدول ۴ ارایه شده است. برنامه‌ی نوشته شده امکان بهینه‌سازی الگوریتمیک رافراهم می‌سازد. تابع هدف و قیدهای مربوط به دست‌یابی به طراحی بهینه سازه‌های مجهز به سامانه‌ای شبکه‌ای قطری به‌صورت زیر است:

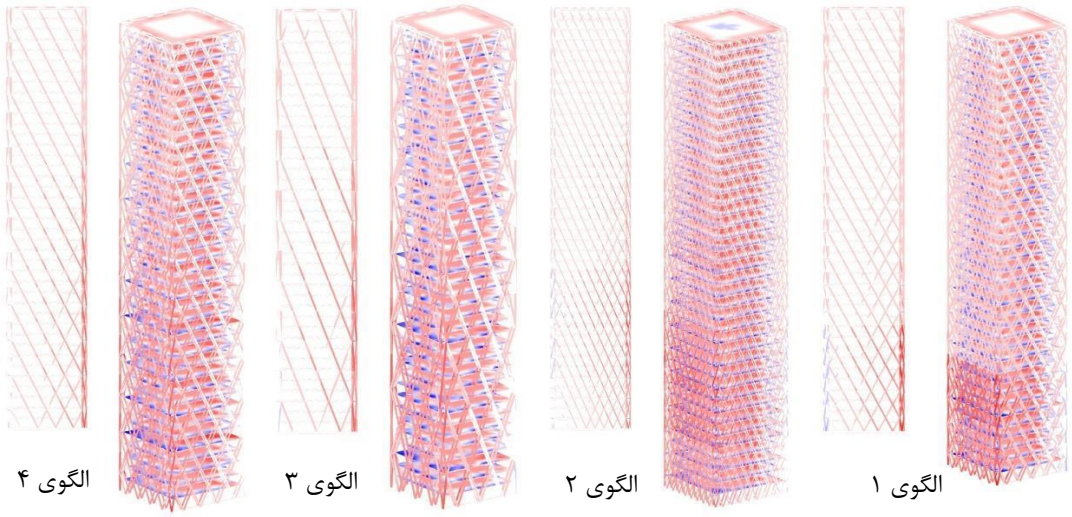
$$DRIFT = \Delta m = Cd \times \Delta eu \leq 0.02h \quad (۱)$$



شکل ۸: نشان دادن پارامتریک سازی در سازه سامانه‌ی شبکه قطری تک لایه

جدول ۳: نتایج پارامتریک سازی در سازه سامانه‌ی شبکه قطری تک لایه

پارامترها	الگوی ۱	الگوی ۲	الگوی ۳	الگوی ۴
تقسیمات عمودی	۴۶	۵۶	۲۶	۱۴
تقسیمات افقی	۱۰	۱۶	۸	۶
زاویه با محور افق	۵۵/۳۹	۶۴/۰۱	۶۴/۰۱	۷۰/۷۰
وزن (تن)	۲۱۷۳۸	۲۲۰۸۴	۲۱۵۰۸	۲۱۵۴۳



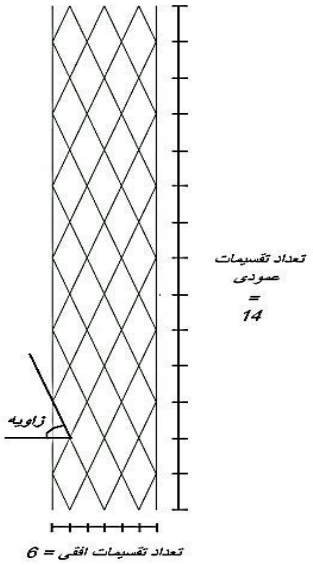
شکل ۹: نشان دادن پارامتریک سازی در سازه سامانه‌ی شبکه قطری دو لایه

جدول ۴: نتایج پارامتریک سازی در سازه سامانه‌ی شبکه قطری دو لایه

پارامترها	الگوی ۱	الگوی ۲	الگوی ۳	الگوی ۴
تقسیمات عمودی	۴۶	۵۶	۲۴	۱۴
تقسیمات افقی	۱۰	۱۶	۸	۶
زاویه با محور افق	۵۵/۳۹	۶۴/۰۱	۶۵/۷۷	۷۰/۷۰
وزن (تن)	۲۱۹۳۳	۲۲۰۰۷	۲۱۸۰۱	۲۲۲۸۱

فرآیند بهینه‌سازی پارامتریک با الگوریتم ژنتیک و به کمک افزونه‌ی گالاپاگوس در محیط نرم افزار گرس هاپر انجام می‌شود. متغیرهای بهینه سازی به‌صورت عددی به‌عنوان ژن‌های (Genome) بهینه‌سازی در ورودی کامپوننت گالاپاگوس و تابع هدف بهینه سازی به‌صورت سازگاری (Fitness) در خروجی کامپوننت گالاپاگوس تعریف می‌شود.

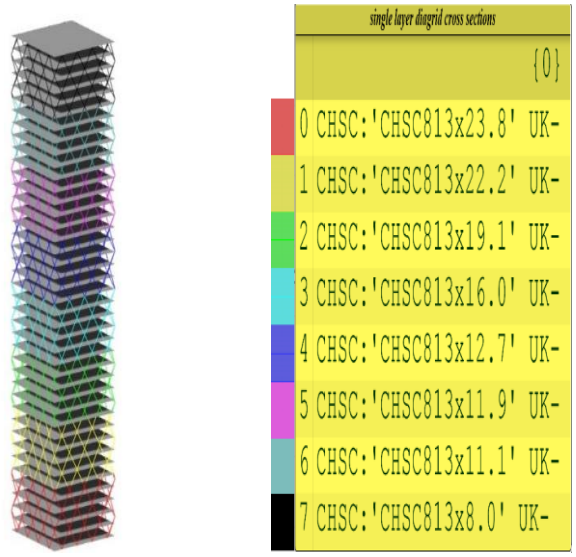
تعداد تقسیمات افقی (تعداد تقسیمات طول جداره که بیان کننده‌ی تعداد چشمه‌های سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری در محور افقی می‌باشد)، تقسیمات عمودی (تعداد تقسیمات ارتفاع جداره که بیان کننده‌ی تعداد چشمه‌های سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری در محور عمودی می‌باشد)، زاویه‌ی اعضای سامانه‌ی شبکه قطری با محور افق (که درحقیقت از تقسیمات افقی و عمودی حاصل می‌شود)، تعداد اعضا (که به تعداد تقسیمات افقی و عمودی وابسته‌اند)، فاصله‌ی بین دو لایه (در سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطری دولایه که بیانگر طول اعضای سازه‌ای افقی می‌باشد که اتصال دهنده‌ی دولایه ازطریق اتصال دوگره روبروی هم است) و مقاطع سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری در استاندارد بریتانیا گروه CHS (مقاطع توخالی دایره‌ای) مطابق شکل ۱۰، متغیرهای بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند.



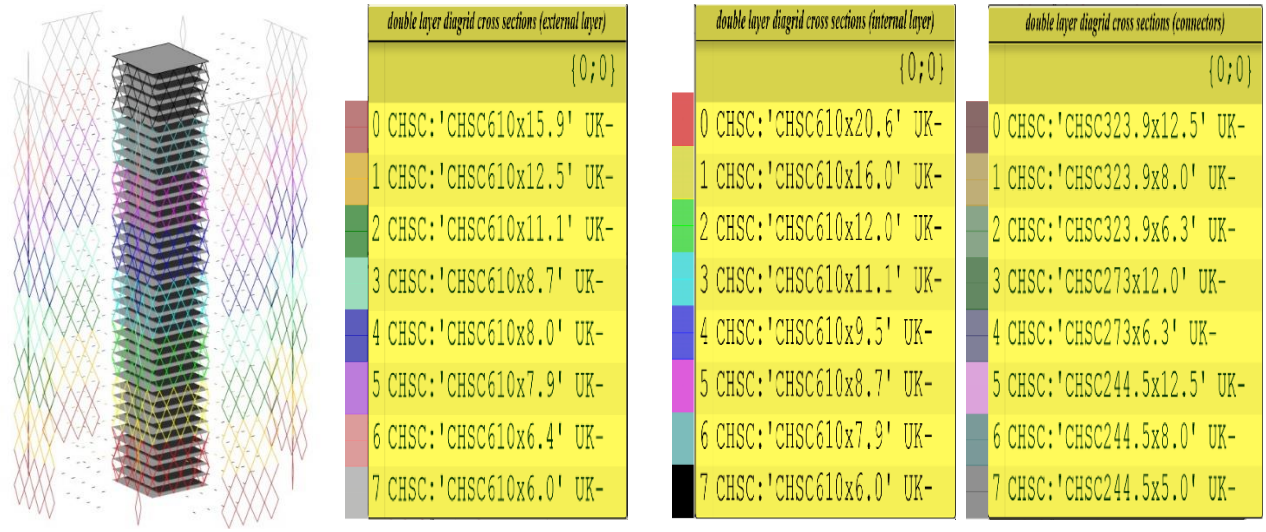
شکل ۱۰: متغیرهای بهینه سازی

از طرف دیگر، وزن ساختمان (شامل وزن همه‌ی اعضای سازه‌ای شامل سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری و سازه‌ی کف مرکب طبقات)، اثر پی- دلتا (که برابر است با مجموع پی- دلتای تمام اعضا که ازحاصلضرب نیروی فشاری در تغییرمکان به‌دست می‌آیند) و همچنین، حداکثر تغییرمکان ساختمان (که برابر است با تغییرمکان نقطه‌ای از سازه که بیشترین جابجایی راتحت ترکیب بارمورد نظر نسبت به وضعیت اولیه‌ی خود داشته است)، به عنوان خروجی‌های و عامل‌های ارزیابی بهینه‌سازی در نظر گرفته شدند.

تعداد تقسیمات افقی و عمودی هر وجه سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری و همچنین مقاطع اعضای سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری از استاندارد بریتانیا گروه CHS (مقاطع توخالی دایره‌ای) در ۸ تیپ‌بندی متفاوت مطابق با شکل ۱۱ با رنگ‌های تفاوت، متغیرهای تعریف‌شده برای بهینه‌سازی الگوریتمیک سازه سامانه‌ی شبکه قطری تک لایه هستند. تیپ‌بندی مقاطع در هر ۵ طبقه یکسان می‌باشند و با توجه به اینکه بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک نیاز به عددی کردن متغیرها دارد، دربرنامه‌ی نوشته‌شده مقاطع تعریف‌شده به صورت عددی برنامه‌نویسی شده است. در بهینه‌سازی الگوریتمیک سازه سامانه‌ی شبکه قطری دولایه، علاوه بر تعداد تقسیمات افقی و عمودی هر وجه سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری و مقاطع اعضای سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری ازاستاندارد بریتانیا گروه CHS (مقاطع دایره‌ای توخالی)، فاصله‌ی بین دو لایه‌ی سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری نیز متغیرهای تعریف‌شده برای بهینه‌سازی الگوریتمیک در نظر گرفته شده‌اند. مطابق شکل ۱۲، تیپ‌بندی مقاطع در سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری برای هر یک از ۵ طبقه برای لایه‌ی داخلی، لایه‌ی خارجی و المان‌های اتصال دهنده‌ی دولایه، به‌صورت مجزا در ۸ تیپ‌بندی انجام شده است. در شکل ۱۲، مقطع‌های بهینه‌ی بدست آمده برای لایه داخلی، خارجی و اعضای اتصال دهنده بین دو لایه تیپ‌بندی مقاطع جهت بهینه‌سازی سازه سامانه‌ی شبکه قطری دولایه، شامل لایه داخلی، خارجی و اعضای اتصال دهنده بین دو لایه، برای هر لایه بدست آمده و با رنگ‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۱۱: تیپ بندی مقاطع اعضا در سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری تک لایه و مقاطع بهینه بدست آمده

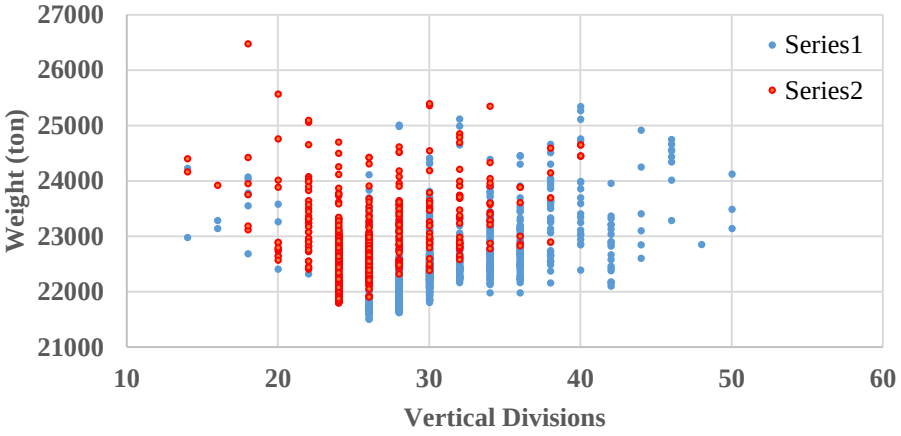


شکل ۱۲: تیپ بندی مقاطع اعضا درسازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری دو لایه و مقاطع

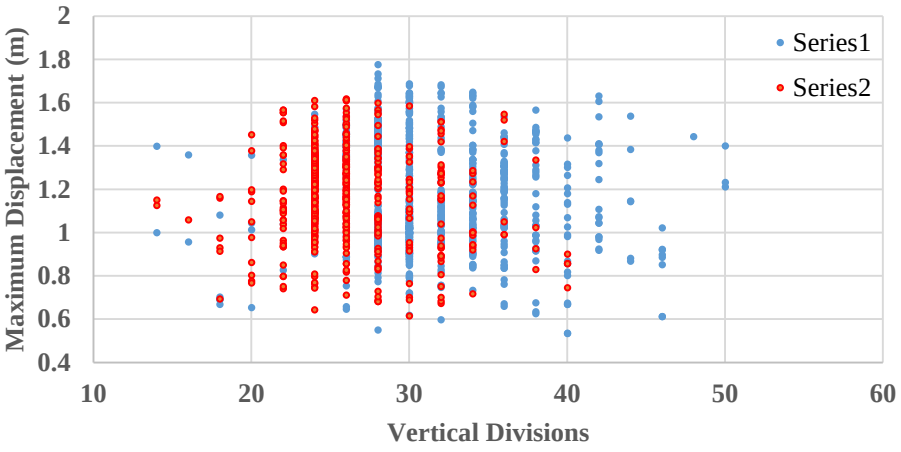
وزن سازه به‌عنوان تابع هدف این بهینه‌سازی، معیار سنجش و ارزیابی پاسخ‌ها در فرآیند بهینه‌یابی الگوریتمیک انتخاب شده است. محدودیت در الگوریتم‌های بهینه‌سازی به‌عنوان یک رکن اساسی معرفی می‌شود و با توجه به اینکه در افزونه‌ی گالاپاگوس امکان تعریف محدودیت وجود ندارد، در این پژوهش از برنامه‌نویسی برای واردکردن تابع محدودیت در نرم افزار گرس هاپر استفاده شده است. دریفت (تغییرمکان‌های نسبی طبقات) به‌عنوان محدودیت بهینه‌یابی در این مقاله به‌صورت گرافیکی برنامه‌نویسی شده است.

در مراحل بهینه‌یابی، پس از تعیین پارامترهای بهینه‌سازی (تعداد تقسیمات افقی، تعداد تقسیمات عمودی و مقاطع سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری)، دریفت نرم افزاری طبقات از طریق برنامه‌نویسی و موتور تحلیل نرم افزار کارامبا محاسبه می‌شود. برای محاسبه‌ی دریفت نرم افزاری بدون اعمال ضریب طبقات در نرم افزار کارامبا نیاز به برنامه نویسی می‌باشد. در نتیجه با توجه به ضوابط استاندارد ۲۸۰۰، در برنامه‌نویسی صورت گرفته دریفت هر طبقه بررسی می‌گردد. و درصورت تجاوز اندازه‌ی دریفت واقعی از حد تعریف شده، پاسخ مربوطه از میان پاسخ‌های ثبت‌شده برای بررسی در فرآیند الگوریتم بهینه سازی حذف می‌شود.

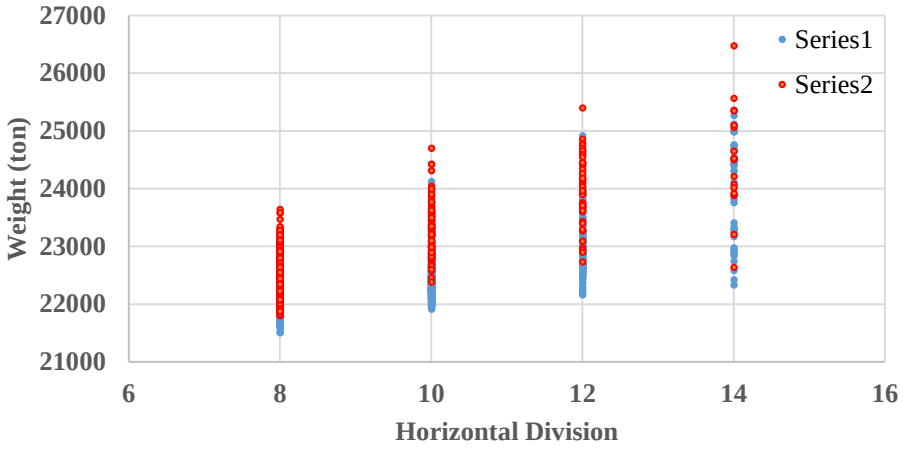
پس از انجام فرآیند بهینه‌سازی، رابطه‌ی بین عامل‌های بهینه‌یابی (تعداد تقسیمات عمودی و افقی، تعداد و زاویه‌ی اعضا و فاصله‌ی بین دو لایه در سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطری دولایه) و پارامترهای ارزیابی بر اساس نتایج حاصل از تحلیل سازه (وزن، اثر پی-دلتا و حداکثر تغییرمکان) به‌صورت مجزا برای سازه سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه به‌دست می‌آیند. شکل ۱۳ تا شکل ۲۹، نتیجه‌های فرآیند بهینه‌سازی را نشان می‌دهند. در این شکل‌ها، نقاط آبی رنگ برای سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه (Series 1) و نقاط قرمز رنگ برای سامانه‌ی شبکه قطری دولایه (Series 2) اختصاص داده شده است.



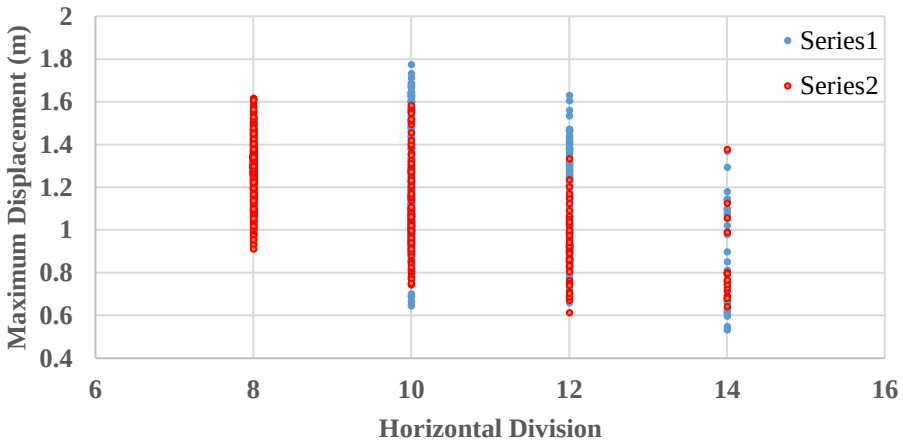
شکل ۱۳: مقایسه‌ی تعداد تقسیمات عمودی- وزن در سازه سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه



شکل ۱۴: مقایسه‌ی تعداد تقسیمات عمودی- حداکثر تغییرمکان در سازه سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه

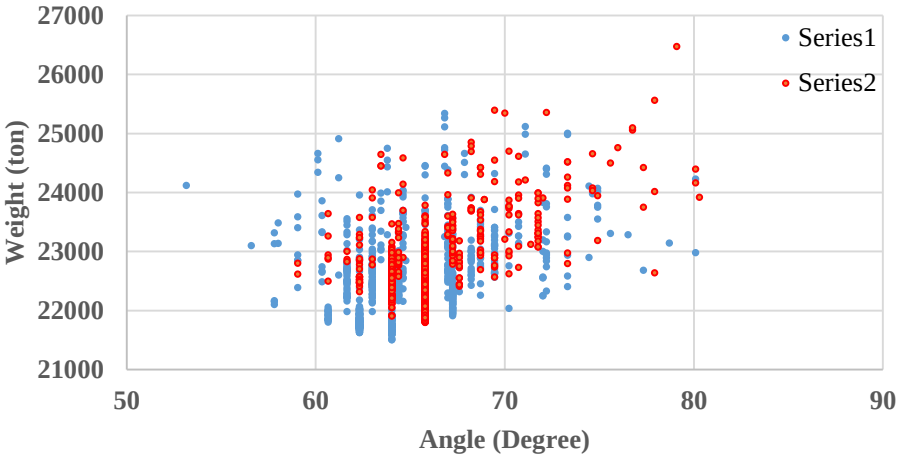


شکل ۱۵: مقایسه‌ی تعداد تقسیمات افقی- وزن در سازه سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه

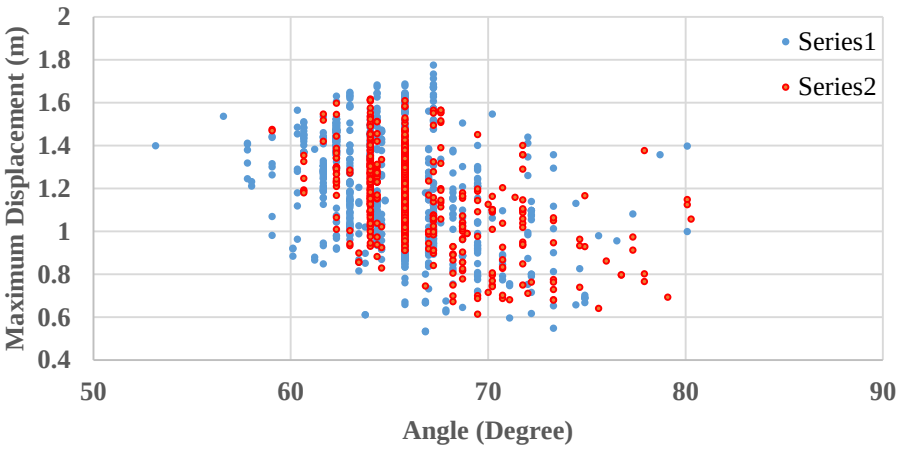


شکل ۱۶: مقایسه‌ی تعداد تقسیمات افقی- حداکثر تغییرمکان در سازه سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه

بررسی شکل ۱۳ تا شکل ۱۶ نشان می‌دهد که با کاهش تعداد تقسیمات عمودی و افقی در سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه، وزن کاهش و تغییرمکان افزایش می‌یابد. این افزایش تغییرمکان موجب می‌شود که با تعداد تقسیمات کمتر از یک مقدار مشخص، تغییرمکان طبقات از دریفت مجاز تجاوز کند و بدین ترتیب بهینه‌ترین پاسخ، حالتی است که تعداد تقسیمات عمودی و افقی پایین‌ترین تعدادی است که تغییرمکان سازه از دریفت مجاز تجاوز نمی‌کند. نتیجه‌ها نشان می‌دهند که در حالت بهینه، حدود ۳۰ درصد مصرف فولاد در سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه کاهش می‌یابد که در سازه‌ای با این مقیاس، صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه و مصرف انرژی حاصل می‌شود. از طرف دیگر، می‌توان دریافت که بهینه‌ترین وزن برای سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری تک لایه عدد کوچکتری است. از وزن کمتر سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری تک لایه در مقایسه با سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری دو لایه می‌توان این نتیجه را گرفت که صلبیت بسیار زیاد دیافراگم و بازوی اهرم ۳۰ متری حاصل از دیافراگم میان لایه‌های داخلی سامانه‌ی شبکه قطری روبروی هم، در مقایسه با صلبیت ناچیز و بازوی اهرم کوتاه عناصر اتصال دهنده‌ی بین دو لایه، باعث می‌شود که لایه‌ی داخلی سامانه‌ی شبکه قطری در مقایسه با لایه‌ی خارجی بسیار صلب‌تر باشد، نقش لایه‌ی خارجی در انتقال بار کم‌رنگ شود و لایه‌ی داخلی وظیفه‌دار اصلی انتقال بار باشد.

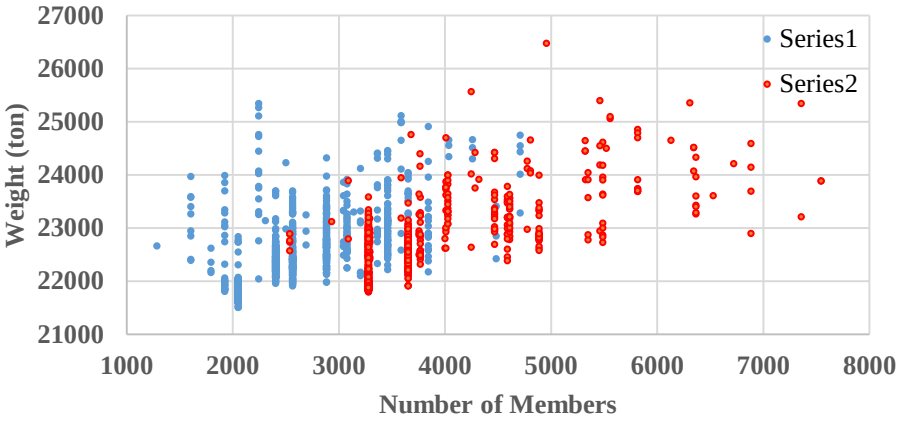


شکل ۱۷: مقایسه‌ی زاویه – وزن در سازه سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه

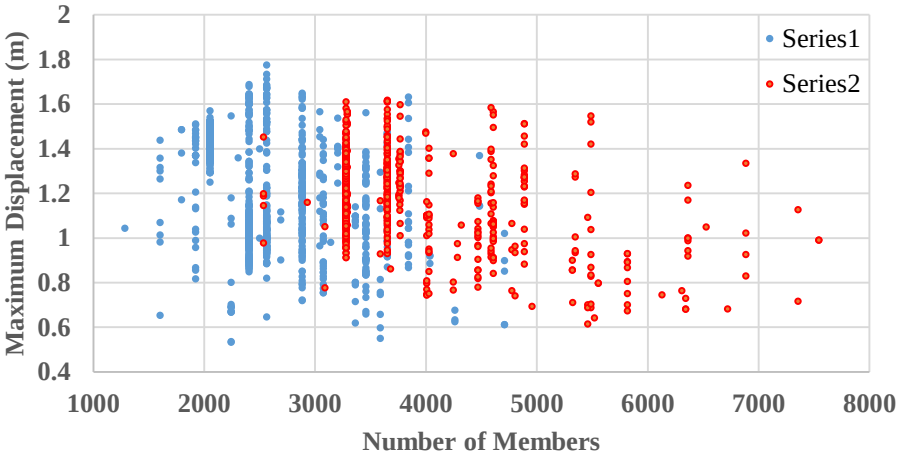


شکل ۱۸: مقایسه‌ی زاویه– حداکثر تغییرمکان در سازه سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه

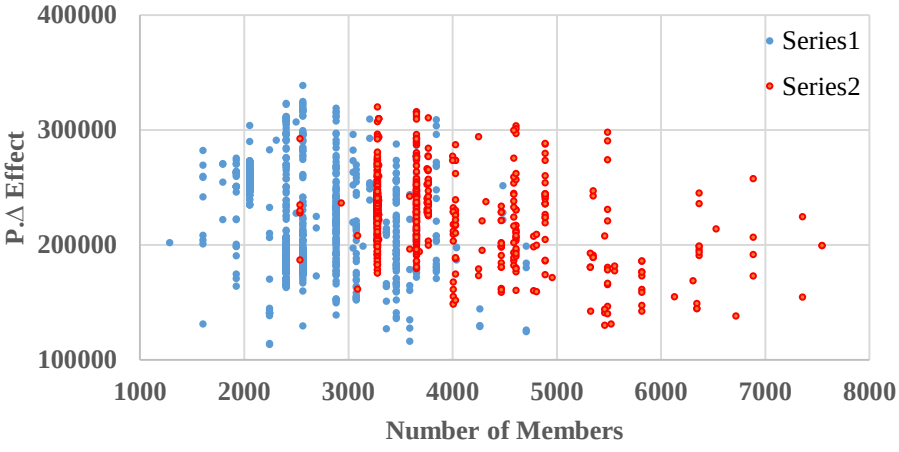
همان‌طور که در شکل ۱۷ و شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه که دارای عضوهایی با زاویه‌های بیشتری هستند، وزن بیشتر و حداکثر تغییرمکان کم‌تری دارند. بهینه‌ترین پاسخ برای تقسیمات عمودی در حقیقت تعیین کننده‌ی زاویه‌ی بهینه است. بهینه‌ترین تقسیمات عمودی حالتی است که تحت زاویه‌ی حاصله، کمترین لنگی برشی دراعضای سامانه‌ی شبکه قطری حاصل می‌شود و در نتیجه تنش‌های غیرمحوری (خمش وبرش) کمینه خواهند بود. در این حالت، محوری (کشش و فشار) بودن حداکثری تنش در عضوها به حداقل رسیدن وزن منجر می‌شود.



شکل ۱۹: مقایسه‌ی تعداد عضوها - وزن در سازه سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه

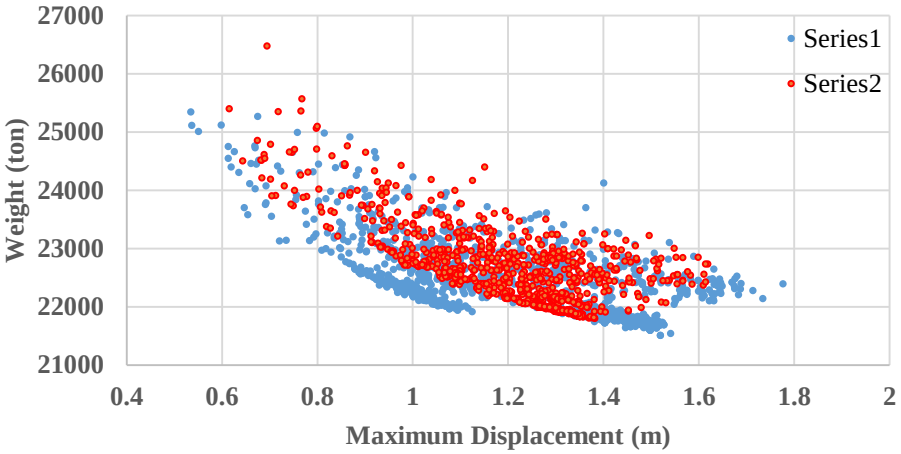


شکل ۲۰: مقایسه‌ی تعداد عضوها - حداکثر تغییرمکان در سازه سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه



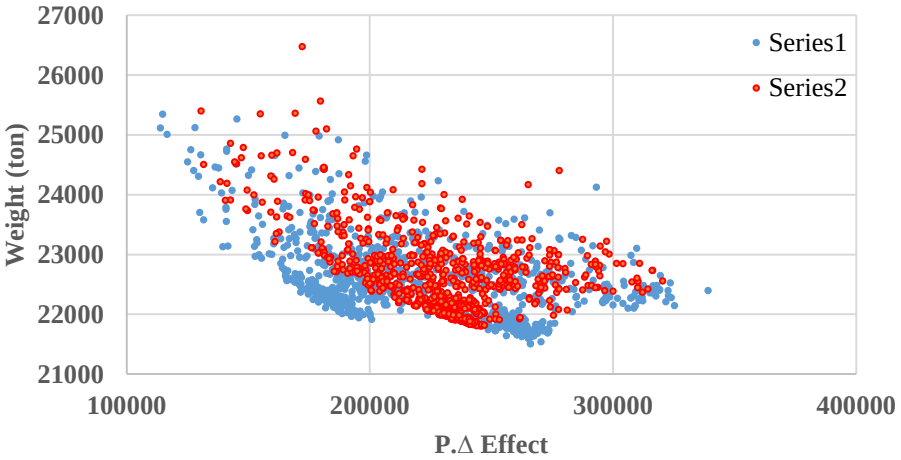
شکل ۲۱: مقایسه‌ی تعداد عضوها- پی دلتا در سازه سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه

تعداد اعضای سامانه‌ی شبکه قطری به‌عنوان یک پارامتر مهم در میزان انرژی مصرف شده برای تولید مصالح، حمل و نقل، صرف نیروی انسانی و بازگشت سرمایه نقش به‌سزایی در صرف هزینه و انرژی ایفا می‌کند. بررسی شکل ۱۹ تا شکل ۲۱ نشان می‌دهد که بر طبق انتظار، با افزایش تعداد عضوها، وزن سازه افزایش می‌یابد و مقدار حداکثر جابجایی و اثر پی – دلتا کاهش خواهد یافت. نتیجه‌ها نشان می‌دهند که بهینه‌ترین وزن در حالتی است که تعداد اعضا کم می‌باشد و این نتیجه‌ای مفید در مورد صرف انرژی و هزینه است. در مقایسه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه و با توجه به تعداد تقسیمات به‌طور تقریبی یکسان دو حالت، واضح است که تعداد اعضا در سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه به مراتب پایین‌تر باشد و با توجه به بهینه‌ترین حالت، سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه گزینه‌ی مقرون به صرفه‌تر از هر لحاظ می‌باشد.



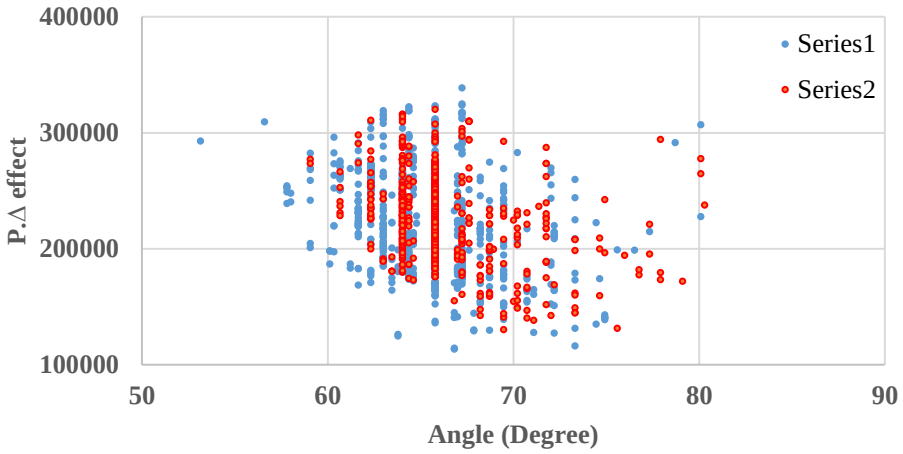
شکل ۲۲: مقایسه‌ی حداکثر تغییرمکان- وزن در سازه سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه

بررسی شکل ۲۲ نشان می‌دهد که بر طبق انتظار، سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه با وزن کم‌تر، حداکثر تغییرمکان بیشتری تجربه می‌کنند. از این رو، دست‌یابی به حالت بهینه باید به نحوی انجام شود که هم‌زمان با کم بودن وزن سازه، حداکثر تغییرمکان آن از حد مجاز بیشتر نشود.



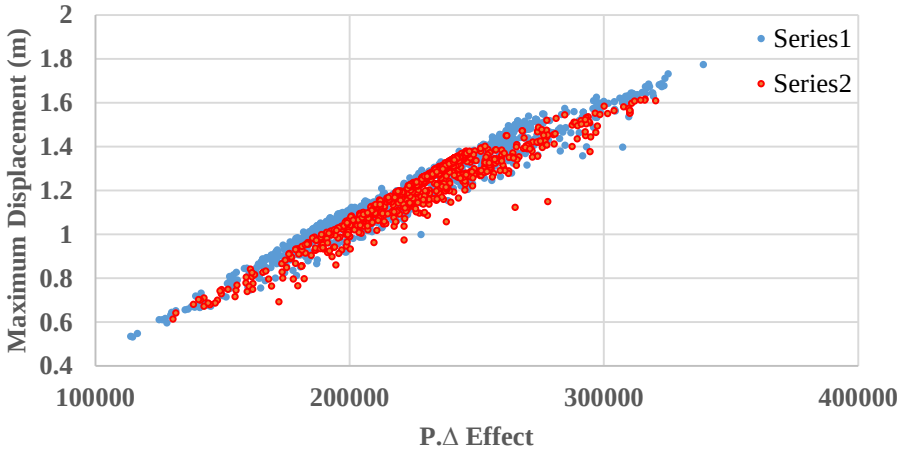
شکل ۲۳: مقایسه‌ی اثر پی دلتا - وزن در سازه سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه

مطابق با رابطه‌ی حداکثر تغییرمکان و وزن سازه (شکل ۲۳)، رابطه‌ی بین اثر پی دلتا و وزن سازه نشان می‌دهد که هر چه وزن سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه کمتر باشد، اثر پی دلتا شدیدتر خواهد بود. بنابراین، انتخاب حالت بهینه بین وزن سازه، تغییرمکان حداکثر و اثر پی دلتا باید با دقت بالایی انجام شود.



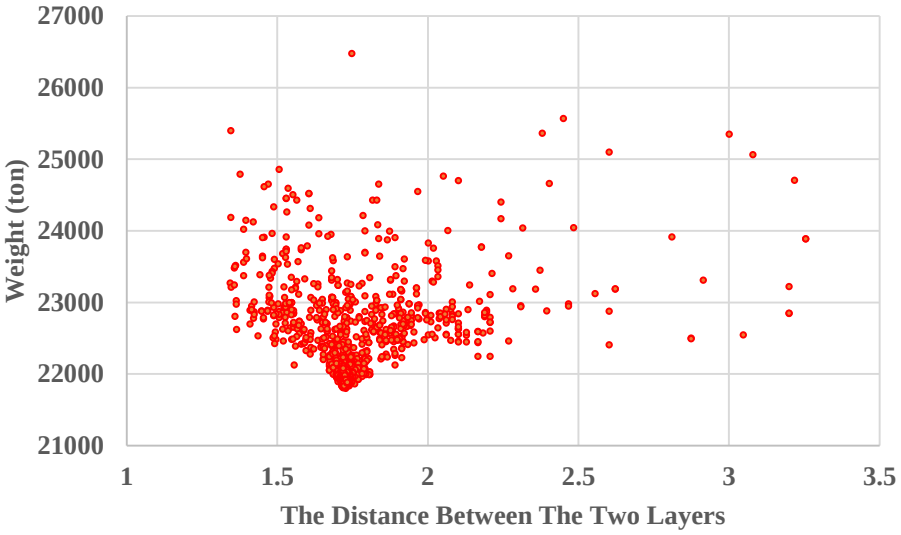
شکل ۲۴: مقایسه‌ی زاویه- اثر پی دلتا در سازه سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه

در مورد رابطه‌ی زاویه و اثر پی- دلتای سازه در شکل ۲۴ می‌توان گفت تحت زاویه‌ی بهینه که در آن وزن سازه حداقل است، حداکثر نیروهای محوری در اعضای سامانه‌ی شبکه قطری سازه‌ای به وجود می‌آید که این بیشینه بودن نیروهای محوری منجر به افزایش اثر پی دلتا و خطر کمانش اعضای سازه‌ای می‌شود. در نتیجه، اثر پی دلتا باید به‌عنوان یک پارامتر مهم در طراحی سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطری کنترل شود.

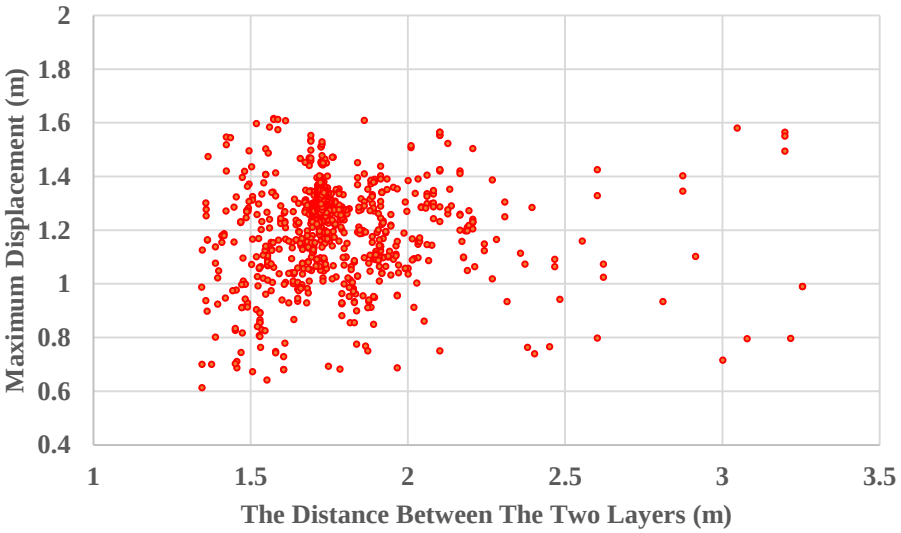


شکل ۲۵: مقایسه‌ی اثر پی دلتا- حداکثر تغییرمکان در سازه سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه

ارزیابی شکل ۲۵ نشان می‌دهد که بر طبق انتظار، با افزایش حداکثر تغییرمکان، اثر پی دلتا نیز افزایش می‌یابد. از این رو، می‌توان در حالت بهینه، با کنترل حداکثر تغییرمکان سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه بر طبق آیین‌نامه‌های موجود، اثر پی دلتا را نیز در حد مجاز کنترل کرد.



شکل ۲۶: فاصله‌ی بین دو لایه- وزن در سازه سامانه‌ی شبکه قطری دولایه



شکل ۲۷: فاصله‌ی بین دو لایه- حداکثر تغییرمکان در سازه سامانه‌ی شبکه قطری دولایه

درمورد فاصله‌ی بهینه میان دو لایه‌ی سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری در هر وجه ساختمان، مطابق با شکل ۲۶ و شکل ۲۷، اینگونه می‌توان نتیجه گرفت که کاهش فاصله میان دو لایه، بازوی اهرم سازه‌ای را کاهش می‌دهد و افزایش این فاصله، صلبیت سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری را کاهش می‌دهد که هر دو حالت منجر به افزایش نیروهای سازه‌ای و در نتیجه افزایش سطح مقاطع عضوها و افزایش وزن می‌شود. بهینه‌ترین پاسخ برای فاصله میان دو لایه فاصله‌ای است که در آن بازوی اهرم و صلبیت در یک حالت تعادل قرار می‌گیرد و نیروهای سازه‌ای در آن کمینه است.

بررسی رابطه‌های بین عامل‌های بهینه‌یابی (تعداد تقسیمات عمودی و افقی، تعداد و زاویه‌ی اعضا و فاصله‌ی بین دو لایه در سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطری دولایه) و پارامترهای ارزیابی بر اساس نتایج حاصل از تحلیل سازه (وزن، اثر پی-دلتا و حداکثر تغییرمکان) بهینه‌ترین پاسخ برای هر یک از سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه را نتیجه می‌دهد. جدول ۵ و جدول ۶ به‌ترتیب نتیجه‌های به‌دست آمده برای سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه را به کمک برنامه‌ی نوشته‌شده در این پژوهش را گزارش می‌کنند.

جدول ۵: مشخصات سازه سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه بهینه

تعداد تقسیمات افقی	۸
تعداد تقسیمات عمودی	۲۶
زاویهٔ اعضا با محور افق (درجه)	۶۴/۰۱
تعداد اعضای سامانه‌ی شبکه قطری	۲۰۴۸
اثر پی-دلتای کل ساختمان (کیلو نیوتن در متر)	۲۶۵۹۴۰
حداکثر تغییرمکان سازه (متر)	۱/۵۱
وزن (تن)	۲۱۵۰۸

جدول ۶: مشخصات سازه سامانه‌ی شبکه قطری دولایه بهینه

تعداد تقسیمات افقی	۸
تعداد تقسیمات عمودی	۲۴
زاویه ی اعضا با محور افق (درجه)	۶۵/۷۷
تعداد اعضای سامانه‌ی شبکه قطری	۳۲۷۶
اثر پی-دلتای کل ساختمان (کیلو نیوتن در متر)	۲۴۵۷۳۰
حداکثر تغییرمکان سازه (متر)	۱/۳۸
فاصلهٔ بین دو لایه (متر)	۱/۷۲
وزن (تن)	۲۱۸۰۱

۵- نتیجه گیری

این مقاله به طراحی بهینه‌ی شبکه‌ی قطری در سازه‌های دایاگرید تک‌لایه و دولایه در ساختمان‌های بلند مرتبه تحت اثر بارهای ثقلی و جانبی پرداخته است. برای این منظور، رابطه‌ی بین عامل‌های بهینه‌یابی شامل تعداد تقسیمات عمودی و افقی، تعداد و زاویه‌ی اعضا و فاصله‌ی بین دو لایه در سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطری دولایه با پارامترهای ارزیابی بر اساس نتایج حاصل از تحلیل سازه شامل وزن، اثر پی دلتا و حداکثر تغییرمکان به‌صورت مجزا برای سازه سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه به‌دست آمدند. نتیجه‌های زیر به‌دست آمدند:

- بررسی‌ها نشان دادند که با کاهش تعداد تقسیمات عمودی و افقی در سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه، وزن کاهش و تغییرمکان افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه که دارای عضوهایی با زاویه‌های بیشتری هستند، وزن بیشتر و حداکثر تغییرمکان کم‌تری دارند.
- با افزایش تعداد عضوها، وزن سازه افزایش می‌یابد و مقدار حداکثر جابجایی و اثر پی – دلتا کاهش خواهد یافت. سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه و دولایه با وزن کم‌تر، حداکثر تغییرمکان بیشتری تجربه می‌کنند و هر چه وزن کمتر باشد، اثر پی دلتا شدیدتر خواهد بود.
- در سازه‌های سامانه‌ی شبکه قطری دولایه، کاهش فاصله میان دو لایه، بازوی اهرم سازه‌ای را کاهش می‌دهد و افزایش این فاصله، صلبیت سازه‌ی سامانه‌ی شبکه قطری را کاهش می‌دهد که هر دو حالت منجر به افزایش نیروهای سازه‌ای و در نتیجه افزایش سطح مقاطع عضوها و افزایش وزن می‌شود. از این رو، در این سازه‌ها، بهینه‌ترین پاسخ برای فاصله میان دو لایه فاصله‌ای است که در آن بازوی اهرم و صلبیت در یک حالت تعادل قرار گیرد.
- بررسی‌ها نشان می‌دهد که در حالت کلی، وزن بهینه‌ی سازه سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه در مقایسه با دولایه کمتر است که با توجه به ساخت ساده‌تر در مدت زمان سریعتر و مصرف انرژی کمتر، سازه سامانه‌ی شبکه قطری تک‌لایه به عنوان گزینه‌ی مقرون به صرفه‌تر انتخاب می‌شود.

منابع

[1] S. Qingxuan, Y. Ying, and B. Wang. "Experimental investigation on the seismic performance of concrete-filled steel tubular joints in diagrid structures." *Structures*. Vol. 31. Elsevier, 2021.

[2] H. Jahangir, M. Bagheri, "Evaluation of Seismic Response of Concrete Structures Reinforced by Shape Memory Alloys", International Journal of Engineering, 2020; 33(3): 410-418. DOI: 10.5829/IJE.2020.33.03C.05.

[3] A., Terán-Gilmore, S., Roeslin, E., Tapia-Hernández, & E., Cuadros-Hipólito, (2021). "Displacement-based design of tall earthquake-resistant diagrid systems." *Journal of Building Engineering*, *35*, 102022.

[4] Y. Kim, M. Kim, I. Jung, Y. Ju, S. K.-E. Structures, and undefined 2011, "Experimental investigation of the cyclic behavior of nodes in diagrid structures," *Elsevier*.

[5] N. Panchal, V. P.-J. of R. in E. and, and undefined 2014, "Diagrid structural system: Strategies to reduce lateral forces on high-rise buildings," *academia.edu*.

[6] R. Deshpande, S. Patil, S. R.-I. research journal of, and undefined 2015, "Analysis and Comparison of Diagrid and Conventional Structural System," *irjet.net*.

[7] M. Shah, S. Mevada, V. P.-I. J. of, and undefined 2016, "Comparative Study of Diagrid Structures with Conventional Frame Structures," *ingentaconnect.com*.

[8] D. Mascarenhas and D. Aithal, "Study on Diagrid Structures with Various Aspect Ratio under the Action of Wind," 2017.

[9] K. Kamath, S. Hirannaiah, J. N.-P. in Science, and undefined 2016, "An analytical study on performance of a diagrid structure using nonlinear static pushover analysis," *Elsevier*.

[10] M. Hegde, "Comparative Analysis of Conventional Steel Structure with Diagrid Structures of varied angles," 2017.

[11] E. Mele, M. Toreno, G. Brandonisio, and A. De Luca, "Diagrid structures for tall buildings: case studies and design considerations," *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, vol. 23, no. 2, pp. 124–145, Feb. 2014.

[12] G. Montuori, E. Mele, G. B.-T. S. D., and undefined 2014, "Design criteria for diagrid tall buildings: Stiffness versus strength," *Wiley Online Libr*.

[13] G. Montuori, E. Mele, G. Brandonisio, A. D. L.-E. Structures, and undefined 2014, "Secondary bracing systems for diagrid structures in tall buildings," *Elsevier*.

[14] B. Ekici, S. Kutucu, İ. S. (CEC), 2015 IEEE, and undefined 2015, "Addressing the high-rise form finding problem by evolutionary computation," *ieeexplore.ieee.org*.

[15] I. Chatzikonstantinou, B. E. (CEC), 2015 IEEE, and undefined 2015, "Multi-objective diagrid façade optimization using differential evolution," *ieeexplore.ieee.org*.

[16] P. Isaac, B. I.-I. R. J. of E. and, and undefined 2017, "Comparative study of performance of high rise buildings with diagrid, hexagrid and octagrid systems under dynamic loading," *irjet.net*.

[17] P. MALI, D. W.-J. of, and undefined 2018, "Comparative Study of Seismic Performance of Conventional Tube Structures and Diagrid Structure," *engineeringjournals.stmjournals.in*.

[18] D. Ballur and M. Manjunath, "Analytical study of diagrid structural system for rectangular and rectangular-chamfered multistory building," 2017.

[19] G. Dethe, M. Banagar, P. Kenjale, A. Das, M. D.- Analysis, and undefined 2018, "Analysis of Diagrid Structure," *irjet.net*.

[20] L. Simone, C. Passoni, A. Marini, A. B. on S. R., and undefined 2016, "Diagrid solutions for a sustainable seismic, energy, and architectural upgrade of European RC buildings," *aisberg.unibg.it*.

[21] O. Elhami, N. A.-M. C. E. journal, and undefined 2018, "Estimation of Diagrid Structures Response Factor," *mcej.modares.ac.ir*.

[22] T. Li, T. Y. Yang, G. Tong, D. P. Tung, and Y. Li, "Performance-based seismic design and evaluation of fused steel diagrid frame," *Earthq. Spectra*, p. 121017EQS257M, Jul. 2018.

[23] C. Liu, Q. Li, Z. Lu, and H. Wu, "A review of the diagrid structural system for tall buildings," *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, vol. 27, no. 4, p. e1445, Mar. 2018.

[24] D. Varkey and M. George, "Dynamic Analysis Of Diagrid System With Complex Shape," *ijiset.com*.

[25] G. M. Montuori, E. Mele, G. Brandonisio, and A. De Luca, "Design criteria for diagrid tall buildings: Stiffness versus strength," *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, vol. 23, no. 17, pp. 1294–1314, Dec. 2014.

[26] J. Lee, J. Kong, J. K.-I. J. of S. Structures, and undefined 2018, "Seismic Performance Evaluation of Steel Diagrid Buildings," *Springer*.

[27] D. Rutten, "Grasshopper: Generative Modeling for Rhino. Version 0.7. 0045," *Comput. Software]. Robert McNeel Assoc. Retrieved from www. Grasshopp. com*, 2010.

[28] A. Tedeschi and S. Andreani, *AAD, Algorithms-aided Design: Parametric Strategies Using Grasshopper*. Le Penseur Publisher, 2014.

[29] C. Preisinger, "Karamba: parametric structural modeling," *Comput. Softw.*, 2011.

[30] C. Preisinger, "Linking structure and parametric geometry," *Archit. Des.*, vol. 83, no. 2, pp. 110–113, 2013.

[31] R. McNeel and others, “Rhinoceros,” *NURBS modleing Wind. http//www. rhino3d. com/jewelry. htm*, 2015.