

Economic Analysis of Double Layer Barrel Vault Space Structures in Form, Modulation, and Ratio to Different Spans

Kaveh Yasamani¹, Hasan Salehi², Habib Saeedmonir³

1- Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Khatam Ol Anbia University, Tehran, Iran

3- Department of Civil Engineering, University of Urmia

ABSTRACT

Space structures, especially double-layer caskets, have been widely used to cover large spaces. Due to the large number of members and joints in space structures, choosing the appropriate form and modulation has a great impact on weight loss and thus reduce the cost of the structure. On the other hand, the minimum weight does not always mean that the structure is economical, and other parameters such as the number of connection nodes, the number of members and also the amount of material wasted will have a significant impact on the final cost of the structure. The purpose of this paper is the economically optimal design of two-layer cast iron space structures based on the study of various parameters such as the weight of the structure, the best shape and the ratio to the opening of the cast iron. For this purpose, 28 models in common forms of this type of structures with two-way and oblique networking in different modulations of 2 and 3 meters and in the ratio of openings between 0.2 to 0.5 in Formian software and then models under different combinations of code loading regulations, Analyzed and designed in SAP2000 software. In the following, the forms that have violated the constraint of resistance or displacement have been discarded and the economic comparison of the approved forms with considering the number of nodes and excess members in each model has been discussed in order to influence the form, member modulation and span ratio in Optimize the weight and how it is distributed between the columns and members of the network and the cost of this type of structures to be shown and the best model with the most economical to be determined as an engineering design. The results show that the two-way form on the two-way with a modulation of 3 meters and a ratio of 0.3 span compared to other forms studied, significantly reduces the cost of the design and is the most economical design.

ARTICLE INFO

Receive Date: 06 February 2019

Revise Date: 02 August 2019

Accept Date: 27 August 2019

Keywords:

Space structure

Two-layer cask

Modulation form

Mouth-to-mouth ratio

Economic

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.169377.1778>

*Corresponding author: Kaveh Yasamani

Email address: k_yasamani@mut.ac.ir

آنالیز اقتصادی چلیک‌های دولایه فضاکار در فرم، مدولاسیون و نسبت خیز به دهانه‌های متفاوت

کاوه یاسمنی^{۱*}، حسن صالحی^۲، حبیب سعیدمنیر^۳

۱- کارشناس ارشد، محقق مجتمع دانشگاهی پدافند غیرعامل سازه، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران، تهران، ایران

۲- دکتری، مدرس دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء (ص)، تهران، ایران

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

سازه‌های فضاکار و بالاخص چلیک‌های دو لایه در پوشش فضاهای بزرگ کاربرد وسیعی یافته‌اند. با توجه به تعداد زیاد اعضا و پیونده در سازه‌های فضاکار، انتخاب فرم و مدولاسیون مناسب تأثیر زیادی در کاهش وزن و در نتیجه کاهش هزینه سازه دارد. از طرفی کمینه بودن وزن همیشه به منزله اقتصادی بودن سازه نیست و پارامترهای دیگری چون تعداد گره‌های اتصال، تعداد اعضا و همچنین میزان هدر رفت مصالح تأثیر بسزایی در هزینه نهایی سازه خواهد داشت. هدف از این مقاله طراحی بهینه اقتصادی سازه‌های فضاکار چلیک دو لایه بر اساس مطالعه پارامترهای مختلفی نظیر وزن سازه، بهترین فرم و نسبت خیز به دهانه چلیک صورت گرفته است. بدین منظور ۲۸ مدل در فرم‌های متداول این نوع سازه‌ها با شبکه‌بندی دوراهه و اریبی در مدولاسیون‌های مختلف ۲ و ۳ متری و در نسبت خیز به دهانه‌های بین ۰/۲ تا ۰/۵ در نرم افزار Formian تاشه پردازشی و سپس مدل‌ها تحت ترکیبات مختلف بارگذاری آیین‌نامه‌ای، در نرم‌افزار SAP2000 تحلیل و طراحی شده است. در ادامه فرم‌هایی که قید مقاومت و یا جابجایی را نقض کرده‌اند، کنار گذاشته شده و به مقایسه اقتصادی فرم‌های تأیید شده با در نظر گرفتن تعداد گره‌ها و اعضا مازاد در هر مدل پرداخته شده است تا تأثیر فرم، مدولاسیون اعضا و نسبت خیز به دهانه در بهینه کردن وزن و نحوه توزیع آن بین ستون‌ها و اعضای شبکه و هزینه این نوع سازه‌ها نشان داده شود و بهترین مدل با بیشترین صرفه اقتصادی به‌عنوان طرح مهندسی تعیین گردد. بررسی نتایج نشان می‌دهد، فرم دوراهه روی دوراهه با مدولاسیون ۳ متری و نسبت خیز به دهانه ۰/۳ در مقایسه با سایر فرم‌های بررسی شده، هزینه‌های طرح را به طور قابل ملاحظه کاهش داده و اقتصادی ترین طرح می‌باشد.

کلمات کلیدی: سازه فضاکار، چلیک دو لایه، فرم، مدولاسیون، نسبت خیز به دهانه، صرفه اقتصادی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.169377.1778	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2019.169377.1778	۱۴۰۰/۰۳/۳۰	۱۳۹۸/۰۶/۰۵	۱۳۹۸/۰۶/۰۵	۱۳۹۸/۰۵/۱۱	۱۳۹۷/۱۱/۱۷
کاوه یاسمنی k_yasamani@mut.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

با توجه به توسعه روزافزون علم و میل طراحان و مهندسان به استفاده و به‌کارگیری دستگاه‌های نوین سازه‌ای و با عنایت به مزایای بسیار زیاد سازه‌های فضاکار^۱ استفاده از این گونه سازه‌ها به سرعت در حال افزایش است. این محبوبیت ناشی از قابلیت‌های منحصر به فرد این سازه‌ها از قبیل پوشش دهانه‌های بزرگ با جلوه‌های زیبا، وزن کم، سادگی تولید، سرعت نصب و غیره است [۱]. از طرفی ناشناخته بودن سیستم‌های جدید برای مهندسان عاملی است که باعث نگرانی طراحان بوده و در مواردی موجب صرف‌نظر طراحان در استفاده از قابلیت سازه‌های نوین است. با توجه به اینکه در اغلب موارد نیروهای ثقلی نیروهای نسبتاً مشخص‌تری برای مهندسان هستند معمولاً سازه‌ها در برابر چنین بارهایی استحکام لازم را دارا هستند ولی تأمین استقامت سازه‌ها در برابر بارهایی مثل زلزله، باد و بار حرارتی نیاز به بررسی بیشتری دارد. یکی از مزایای سازه‌های فضاکار استقامت نسبتاً خوب در برابر زلزله به دلیل وزن کم و رفتار سه بعدی آنها می‌باشد [۱].

هر یک از فرم‌های سازه‌های فضاکار تحت کنش‌های مختلف قرار دارند که از مهم‌ترین آنها بارهای ثقلی مانند بار ناشی از وزن سازه و بار برف می‌باشد که جزو کنش‌های استاتیکی دسته بندی می‌شوند. لذا هر کدام ویژگی‌های رفتاری منحصر به فردی داشته و طراحی هر یک از آنها نیازمند رفتارشناسی خاص فرم مزبور با توجه به ویژگی‌های منحصر مربوطه است. در این بین فرم‌های متداول سازه‌های فضاکار مانند چلیک‌ها به دلیل پیکربندی^۲ خاص خود از جایگاه ویژه‌ای برخوردار هستند [۲ و ۳].

با توجه به تعداد زیاد اعضا در این سازه‌ها انتخاب فرم مناسب‌تر تأثیر زیادی در کاهش وزن مصالح و در نتیجه کاهش هزینه ساخت سازه خواهد داشت. بنابراین مهم‌ترین مسئله در طرح بهینه این سازه‌ها تعیین فرم و نسبت خیز به دهانه مناسب برای ابعاد پلانی است که باید پوشش داده شود. پژوهش‌های خوبی در زمینه بهینه‌سازی^۳ سازه‌های فضاکار با استفاده از الگوریتم‌های فراتکاملی^۴ صورت گرفته که پیاده‌سازی کامپیوتری این الگوریتم‌ها در یک مسئله موجب یافتن پاسخ‌های بهینه آن به صورت دقیق می‌شود [۴ و ۵]. در این راستا یک سری از مطالعات انجام شده در مورد بررسی روش‌های طراحی سازه‌های فضاکار بر اساس مطلوبیت، استفاده از الگوریتم ژنتیک و منطق فازی می‌باشد [۷]. در بعضی مطالعات به بررسی متغیرهایی چون طول و عرض سازه، ارتفاع شبکه دولایه، فاصله ستون‌ها و طول اعضای افقی در یک جهت پرداخته شده است [۸] و در گروهی دیگر از مطالعات انجام گرفته متغیرهایی چون سطح مقطع تمامی اعضای شبکه، وجود و عدم وجود گره‌ها و اعضا مورد بررسی هستند [۹]. در تمامی مطالعات انجام شده [۱۰ و ۱۱ و ۱۲] محدودیت‌هایی از قبیل حداکثر تنش تسلیم و تغییر مکان سازه و گره‌ها، ضریب لاغری و پایداری سازه مورد استفاده و بررسی قرار گرفته‌اند که نتایج مطلوبی را نیز به دنبال داشته‌اند. اما در مطالعات اشاره شده به انتخاب فرم و شکل ظاهری این سازه‌ها توجه چندانی نشده است.

با توجه به محدودیت ابعاد پروفیل‌ها و لوله‌های موجود در بازار که در جدول ۱ نیز به آن اشاره شده است، بهینه‌سازی این سازه‌ها برای کارهای عملی و اجرایی به ویژه در حالت خطی^۵ نتایج چندانی مطلوبی را نخواهد داشت و تأثیر فرم و شکل این سازه‌ها بیشتر به چشم می‌آید [۱۳].

با توجه به موارد اشاره شده در تحقیقات پیشین، توجه چندانی به تنوع حالات بار و تأثیرات توأمان آن در طراحی این سازه‌ها نشده است. همچنین در این پژوهش‌ها مهم‌ترین پارامتر مورد بررسی وزن سازه بوده و به بررسی فرم لایه‌ها و تعداد المان‌ها و گره‌ها پرداخته نشده و تأثیر این عوامل بر روی اقتصاد مسئله مورد توجه قرار نگرفته است. به همین منظور در این تحقیق سعی بر آن است تا با لحاظ تمام حالات بار ممکن و اعمال ترکیب بارهای حاصله مدل‌های مذکور به صورت کاملاً اجرایی شوند. و همچنین جهت بهبود اقتصاد مسئله و تعیین بهینه‌ترین طرح ممکن، علاوه بر وزن سازه‌ها به بررسی فرم لایه‌ها و همچنین تعداد المان‌ها و گره‌ها پرداخته شده است.

¹ Space Structures

² Configuration

³ Optimization

⁴ Meta-heuristic algorithms

⁵ Linear optimization

۲- هندسه مدل‌ها

در تحقیق حاضر به منظور بررسی و تعیین مناسب‌ترین فرم برای این سازه‌ها، چهار فرم متداول متفاوت از این سازه‌ها با نسبت‌های خیز به دهانه مختلف در محدوده $0/2$ تا $0/5$ و در مدولاسیون‌های مختلف ۲ و ۳ متری مورد مطالعه قرار گرفته است. فرم‌های در نظر گرفته شده مطابق جدول ۱ شامل ۲۸ مدل مختلف سازه‌ای بوده که هر کدام با یک اسم اختصاری لاتین مشخص شده است. در ستون اول جدول ۱ نام مدل به صورت اختصاری بیان شده است. حروف S و D نماد شبکه هستند. اندیس اول نشان دهنده مدولاسیون به کار رفته و اندیس دوم نمایانگر نسبت خیز به دهانه می باشد.

جدول ۱: مدل‌های سازه‌ای مورد بررسی.

شماره مدل	شکل فرم	نسبت خیز به دهانه	اسم اختصاری
۱	دوراهه روی دوراهه با مدولاسیون ۲ متری	۰/۲	SS _{2-0.2}
۲	دوراهه روی دوراهه با مدولاسیون ۲ متری	۰/۳	SS _{2-0.3}
۳	دوراهه روی دوراهه با مدولاسیون ۲ متری	۰/۴	SS _{2-0.4}
۴	دوراهه روی دوراهه با مدولاسیون ۲ متری	۰/۵	SS _{2-0.5}
۵	دوراهه روی دوراهه با مدولاسیون ۳ متری	۰/۲	SS _{3-0.2}
۶	دوراهه روی دوراهه با مدولاسیون ۳ متری	۰/۳	SS _{3-0.3}
۷	دوراهه روی دوراهه با مدولاسیون ۳ متری	۰/۴	SS _{3-0.4}
۸	دوراهه روی دوراهه با مدولاسیون ۳ متری	۰/۵	SS _{3-0.5}
۹	اریبی روی اریبی با مدولاسیون ۲ متری	۰/۲	DD _{2-0.2}
۱۰	اریبی روی اریبی با مدولاسیون ۲ متری	۰/۳	DD _{2-0.3}
۱۱	اریبی روی اریبی با مدولاسیون ۲ متری	۰/۴	DD _{2-0.4}
۱۲	اریبی روی اریبی با مدولاسیون ۲ متری	۰/۵	DD _{2-0.5}
۱۳	اریبی روی اریبی با مدولاسیون ۳ متری	۰/۲	DD _{3-0.2}
۱۴	اریبی روی اریبی با مدولاسیون ۳ متری	۰/۳	DD _{3-0.3}
۱۵	اریبی روی اریبی با مدولاسیون ۳ متری	۰/۴	DD _{3-0.4}
۱۶	اریبی روی اریبی با مدولاسیون ۳ متری	۰/۵	DD _{3-0.5}
۱۷	دوراهه ۲ متری روی اریبی ۳ متری	۰/۲	S ₂ D _{3-0.2}
۱۸	دوراهه ۲ متری روی اریبی ۳ متری	۰/۳	S ₂ D _{3-0.3}
۱۹	دوراهه ۲ متری روی اریبی ۳ متری	۰/۴	S ₂ D _{3-0.4}
۲۰	دوراهه ۲ متری روی اریبی ۳ متری	۰/۵	S ₂ D _{3-0.5}
۲۱	اریبی ۳ متری روی دوراهه ۲ متری	۰/۲	D ₃ S _{2-0.2}
۲۲	اریبی ۳ متری روی دوراهه ۲ متری	۰/۳	D ₃ S _{2-0.3}
۲۳	اریبی ۳ متری روی دوراهه ۲ متری	۰/۴	D ₃ S _{2-0.4}
۲۴	اریبی ۳ متری روی دوراهه ۲ متری	۰/۵	D ₃ S _{2-0.5}
۲۵	اریبی ۲ متری روی دوراهه ۳ متری	۰/۲	D ₂ S _{3-0.2}
۲۶	اریبی ۲ متری روی دوراهه ۳ متری	۰/۳	D ₂ S _{3-0.3}
۲۷	اریبی ۲ متری روی دوراهه ۳ متری	۰/۴	D ₂ S _{3-0.4}
۲۸	اریبی ۲ متری روی دوراهه ۳ متری	۰/۵	D ₂ S _{3-0.5}

برای اعضای شبکه و بادبندها از مقاطع جدول ۲ و برای ستون‌ها از مقاطع جدول ۳ استفاده شده است. مقاطع معرفی شده در جدول ۳ ورق‌های ساخته شده‌ای هستند که کنترل‌های مربوط به فشردگی و کمانش آنها انجام شده و مورد تأیید می‌باشند. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است تعداد مقاطع موجود در بازار امکان عملیات بهینه‌سازی را محدود کرده است. چرا که اختلاف مساحت بین دو لوله نسبتاً زیاد می‌باشد، بنابراین وقتی در فرآیند بهینه‌سازی، یک مقطع تغییر نماید قیدهای طراحی شامل مقاومت و جابجایی در طرح جدید نقض خواهد شد.

جدول ۲: فهرست مقاطع لوله‌ای اعضای شبکه و بادبندها.

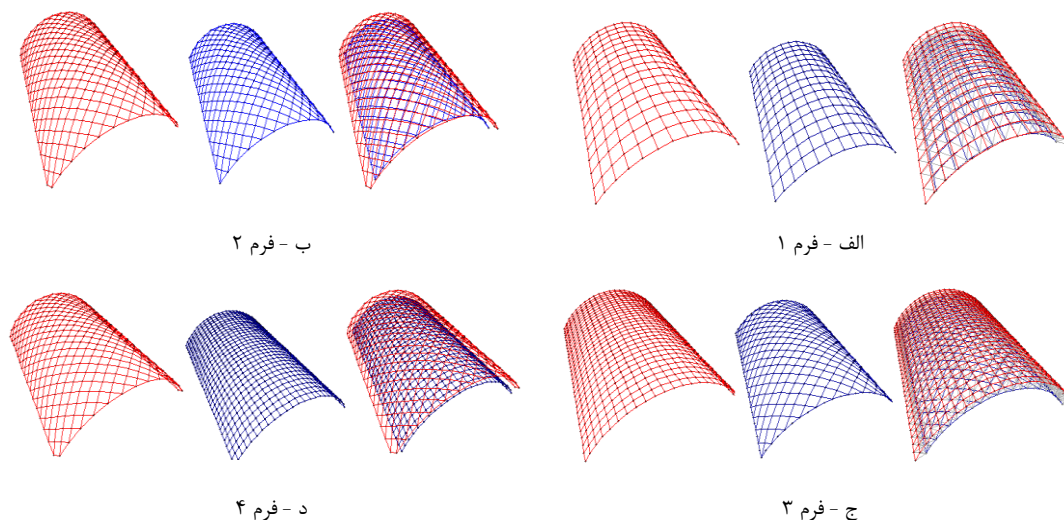
شماره لوله	قطر (cm)	ضخامت جداره (cm)
P05	۴/۸	۰/۲۹
P06	۶	۰/۳
P07	۷/۶	۰/۳
P09	۸/۹	۰/۳
P11	۱۱/۴	۰/۴
P11-B	۱۱/۴	۰/۵
P14	۱۴	۰/۴
P14-B	۱۴	۰/۵
P16	۱۶/۸	۰/۵
P16-B	۱۶/۸	۰/۶

جدول ۳: فهرست مقاطع استفاده شده برای ستون‌ها.

اسم	ارتفاع جان (cm)	ضخامت جان (cm)	طول بال (cm)	ضخامت بال (cm)
I30	۳۰	۱/۲	۲۵	۲
I40	۴۰	۱/۵	۳۰	۲
I50	۵۰	۲	۴۰	۲/۵
I55	۵۵	۲	۴۰	۲/۵
I60	۶۰	۲	۵۰	۳
I70	۷۰	۲/۲	۶۰	۳/۵
I75	۷۵	۲/۲	۶۵	۳/۵

طول دهانه تمام مدل‌ها ۴۲ متر و طول سازه در راستای محور چلیک ۶۰ متر در نظر گرفته شده است و شبکه بر روی ستون‌های ۷ متری کناری قرار گرفته است. اعضای شبکه فضایی دارای مدولاسیون ۲ و ۳ متری هستند. با توجه به اینکه طول لوله‌ها معمولاً ۶ متری هستند پس بهترین مدولاسیون برای کاهش هدر رفت لوله مدولاسیون ۲ و ۳ متری خواهد بود که در این تحقیق نیز از این طول‌ها استفاده شده است. مطابق شکل ۱ سازه‌های فضاکار چلیکی دولایه با چهار فرم متفاوت در نظر گرفته شده اند. در حالت (الف) لایه بالایی و پایینی به صورت دوراهه و در حالت (ب) دولایه بالایی و پایینی به صورت اریبی و در حالت (ج) لایه بالایی به صورت دوراهه روی لایه پایینی به صورت اریبی فرض شده و در حالت (د) لایه بالایی به صورت اریبی روی لایه پایینی به صورت دوراهه قرار گرفته است. در مدل‌های ۱ تا ۴ ارتفاع قوس و ارتفاع بین دو لایه طوری تنظیم شده است که طول تمام اعضای لایه بالایی و میانی و اعضا در راستای محور لایه پایینی دقیقاً برابر ۲ متر بوده و فقط طول اعضا در راستای قوس لایه پایینی کمی از ۲ متر بیشتر باشد. این شرایط برای تمامی مدل‌های ۵ تا ۱۶

نیز برقرار است. در مدل‌های ۱۷ تا ۲۸ نیز اگرچه طول اعضای لایه پایین و بالا متفاوت بوده اما طول لایه میانی نیز با طول اعضای یکی از لایه‌ها برابر است، بنابراین با رعایت این مدولاسیون میزان هدر رفت لوله‌ها به حداقل رسیده است.



شکل ۱: چهار ترکیب انواع فرم لایه‌های چلیکی سازه فضاکار مورد مطالعه

۳- بارگذاری

پس از تاشه پردازی مدل‌ها در نرم‌افزار Formian [۱۴] و انتقال آن‌ها به نرم‌افزار Sap2000 [۱۵] مدل‌ها تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند. مطابق جدول ۴ برای این منظور ۱۰ حالت بار تعریف شده که این بارها بر اساس آیین‌نامه AISC-LRFD 2010 [۱۶] به صورت ترکیب بارهایی به سازه‌ها اعمال شده‌اند. ترکیب بارهای طراحی اعمال شده بر سازه‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۴: حالات بار در نظر گرفته شده.

ردیف	نوع بار	نماد
۱	مرده	D
۲	برف متقارن	S
۳	بار برف نامتقارن در باد جهت مثبت	Sp
۴	بار برف نامتقارن در باد جهت منفی	Sn
۵	زلزله در جهت محور عرضی	Ex
۶	زلزله در جهت محور طولی چلیک	Ey
۷	زلزله راستای قائم	Ez
۸	بار باد در جهت محور عرضی	Wx
۹	بار باد در جهت محور طولی چلیک	Wy
۱۰	بار حرارتی	T

جدول ۵: ترکیب بارهای اعمال شده بر سازه.

ردیف	ترکیب بار	ردیف	ترکیب بار
۱	1.4 D	۲۳	1.2 D + Ev
۲	1.2 D + 1.6 S	۲۴	1.2 D - Ev
۳	1.2 D + 1.6 Sp	۲۵	0.9 D + Ex
۴	1.2 D + 1.6 Sn	۲۶	0.9 D - Ex
۵	0.9 D + 1.6 Wx	۲۷	0.9 D + Ey
۶	0.9 D - 1.6 Wx	۲۸	0.9 D - Ey
۷	0.9 D + 1.6 Wy	۲۹	1.2 D + S + Ex
۸	0.9 D - 1.6 Wy	۳۰	1.2 D + S - Ex
۹	1.2 D + 0.8 Wx	۳۱	1.2 D + Sp + Ex
۱۰	1.2 D - 0.8 Wx	۳۲	1.2 D + Sn - Ex
۱۱	1.2 D + 0.8 Wy	۳۳	1.2 D + S + Ey
۱۲	1.2 D - 0.8 Wy	۳۴	1.2 D + S - Ey
۱۳	1.2 D + S + 1.6 Wx	۳۵	1.2 D + S + Ev
۱۴	1.2 D + S - 1.6 Wx	۳۶	1.2 D + S - Ev
۱۵	1.2 D + S + 1.6 Wy	۳۷	1.2 D + 1.6 T
۱۶	1.2 D + S - 1.6 Wy	۳۸	1.2 D - 1.6 T
۱۷	1.2 D + Sp + 1.6 Wx	۳۹	1.2 D + S + T
۱۸	1.2 D + Sn - 1.6 Wx	۴۰	1.2 D + S - T
۱۹	1.2 D + Ex	۴۱	1.2 D + Sp + T
۲۰	1.2 D - Ex	۴۲	1.2 D + Sp - T
۲۱	1.2 D + Ey	۴۳	1.2 D + Sn + T
۲۲	1.2 D - Ey	۴۴	1.2 D + Sn - T

برای کنترل جابجایی‌های مجاز گرهی نیز از ترکیب بارهای سرویس استفاده شده که همان ترکیب بارهای طراحی بدون ضریب هستند. فرضیاتی در معرفی، مقدار و نحوه اعمال بارگذاری‌ها در نظر گرفته شده که در ادامه مورد بحث قرار گرفته است.

۳-۱- بار مرده

بار مرده با یک مقدار ثابت به نسبت مساحت سهم هر گره محاسبه شده و به گره‌های لایه فوقانی (پوشانه) اعمال شده است. وزن لوازم جانبی مختلف، روکش فلزی، روشنایی‌ها، تجهیزات عملیات حرارتی و تهویه مطبوع و وزن اعضای اصلی سازه به عنوان بار مرده در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق بار یکنواخت ۷۰ کیلوگرم بر مترمربع به عنوان بار مرده لحاظ شده است. اگرچه معمولاً در طراحی سازه فضاکار مقادیر بار مرده بر اساس ابعاد اسمی و وزن مخصوص اعضا و اجزا و پوشانه‌ها و سایر کنش‌های مشمول بارهای مرده تعریف می‌گردند، اما ضرایب بار باید به نحوی اختیار شود که بارها طی آن به صورت منطقی در مدل‌سازی لحاظ گردد [۱].

۳-۲- بار برف

بار برف بر اساس آیین‌نامه اروپا [۱۷] و بر اساس رابطه (۱) محاسبه شده است و در دو حالت متقارن و نامتقارن به سازه اعمال گردیده است:

$$S = C_e \cdot C_t \cdot S_k \cdot \mu_t$$

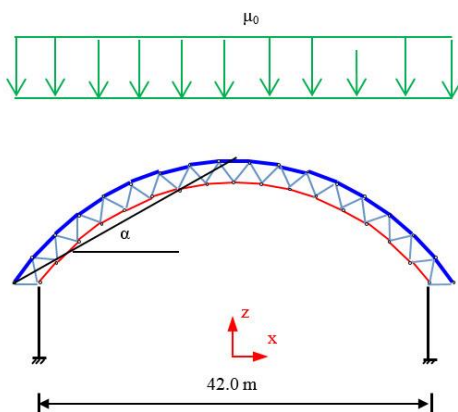
(۱)

مقدار C_e ، C_t ، S_k و μ_t به ترتیب بیانگر ضریب میزان در معرض قرارگیری باد، ضریب حرارتی، بار برف مینا (برف وارد بر سقف تخت) و ضریب شکل هستند. مقدار C_e ، C_t برابر واحد در نظر گرفته شده [۱۷] و مقدار S_k نیز برابر ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع منظور شده است. مقدار μ_t نیز متناسب با میزان قوس سقف مطابق جدول ۶ محاسبه گردیده است:

جدول ۶: محاسبه مقدار μ_t متناسب با میزان قوس سقف.

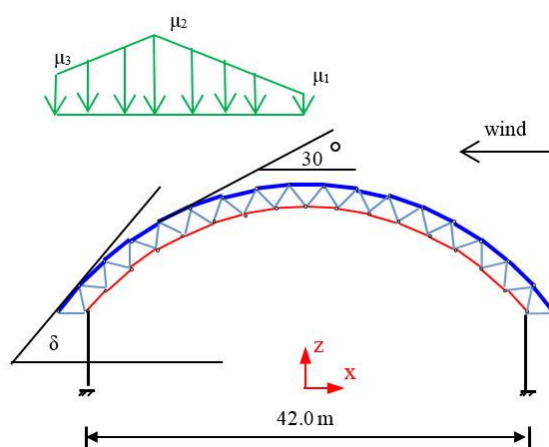
	$30^\circ < \alpha \leq 60^\circ$	$15^\circ < \alpha \leq 30^\circ$
$\delta > 60$	$\delta > 60$	$\delta < 60$
$\mu_0 = 0.8$	$\mu_0 = 0.8$	$\mu_0 = 0.8$
$\mu_1 = 0$	$\mu_1 = 0.4$	$\mu_1 = 0.4$
$\mu_2 = 0$	$\mu_2 = 1.2(60 - \alpha)/30$	$\mu_2 = 0.8 + 0.4[(\alpha - 15)/15]$
$\mu_3 = 0$	$\mu_3 = 0$	$\mu_3 = \mu_2(60 - \alpha)/30$

زوایای α و δ و ضرایب μ در جدول ۶ نشان داده شده است. در شکل ۲ توزیع بار برف متقارن و در شکل ۳ توزیع بار برف نامتقارن نشان داده شده است.



شکل ۲: توزیع بار برف متقارن.

مقدار μ_0 در شکل ۳ تأثیر مقدار ضریب شکل در حالت توزیع متقارن بار برف را نشان می دهد.



شکل ۳: توزیع بار برف نامتقارن.

ضرایب μ_1 ، μ_2 و μ_3 به ترتیب بیانگر تأثیر میزان قوس چلیک در موقعیت‌های مختلف هستند و مقدار آنها در شرایط مختلف مطابق با روابط جدول ۶ تغییر می‌کند. ضریب μ_1 برای نقطه میانی قوس (محل عبور محور استوانه) می‌باشد. ضریب μ_2 برای قسمتی از قوس است که شیب برابر 30° درجه سانتی‌گراد بوده و ضریب μ_3 برای قسمتی از قوس است که شیب در آن نقطه کمتر از 60° درجه سانتی‌گراد است، چون در شیب 60° درجه مقدار این ضریب برابر صفر خواهد بود.

۳-۳- بار باد

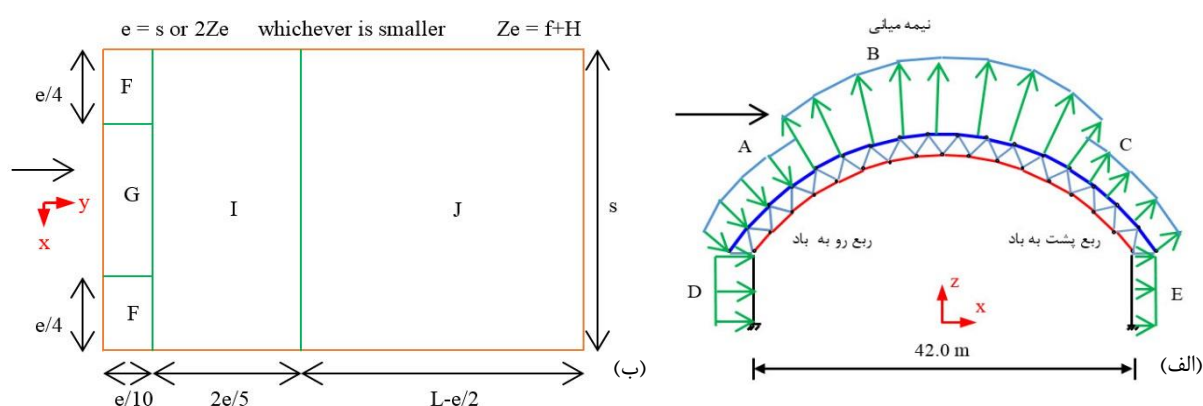
بر اساس آیین‌نامه باد اروپا [۱۸] مقدار بار باد از رابطه ۲ محاسبه شده و نحوه توزیع آن به سطح چلیک و ستون‌ها مطابق شکل ۳ و ۴ می‌باشد.

$$W_e = C_e \cdot q_b \cdot C_{pe} \quad (2)$$

مقدار C_e ، q_b و C_{pe} به ترتیب بیانگر ضریب میزان در معرض قرارگیری باد^۶، بار باد مبنای^۷ و ضریب فشار خارجی^۸ هستند. مقدار C_e برابر ۲ در نظر گرفته شده و مقدار q_b نیز برابر 60 کیلوگرم بر مترمربع می‌باشد. مقدار C_{pe} نیز متناسب با میزان ویژگی‌های ظاهری سازه تغییر می‌کند [۱۸].

در شکل ۴-الف)، ضرایب C ، B و E همواره باعث ایجاد مکش در سطح مشخص شده می‌گردند و ضریب D نیز همواره به صورت فشار بر سطح وارد می‌شود. اما ضریب A در قوس‌های با شیب کم بیانگر مکش و در شیب زیاد بیانگر فشار می‌باشد.

در شکل ۴-ب)، تمامی ضرایب بیانگر مکش وارد شده بر سطح چلیک هستند.



شکل ۴: توزیع بار باد (الف) در جهت x و (ب) در جهت y .

۳-۴- بار زلزله

بار زلزله در جهت x و y مطابق آیین ۲۸۰۰ ایران [۱۹] لحاظ شده و برای زلزله قائم از آیین‌نامه چین [۲۰] استفاده گردیده که مقدار آن از رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$E_z = 0.2 (\text{Dead} + 0.55 \text{ Snow})$$

$$E_z = 0.2 (70 + 0.55 \times 122.4) = 26.24 \text{ kg/m}^2 \quad (3)$$

⁶ Exposure coefficient

⁷ Basic velocity pressure

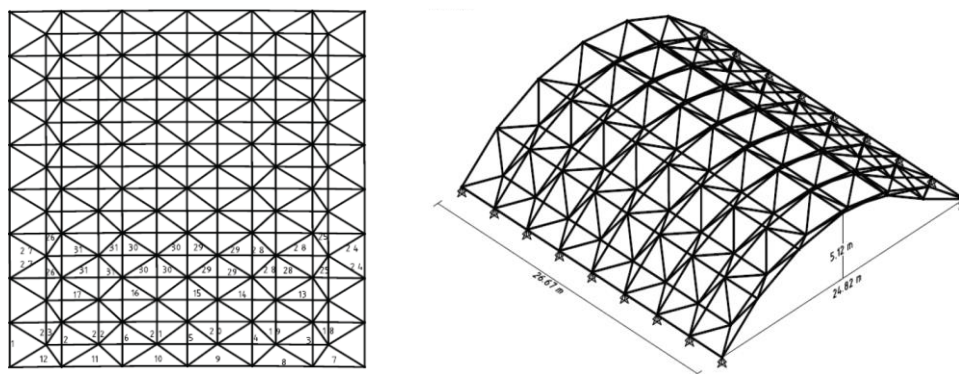
⁸ External pressure coefficient

بار حرارتی نیز یکی از مؤثرترین بارهای اجرایی وارد برسازه‌های فضاکار است که برای در نظر گرفتن اختلاف طول به وجود آمده در اعضا به دلیل طولانی شدن زمان سوار کردن سازه اعمال می‌شود. بار حرارتی در این تحقیق به صورت گرادیان حرارتی و به مقدار ۲۵ درجه سانتی‌گراد به تمامی اعضای سازه لحاظ شده است.

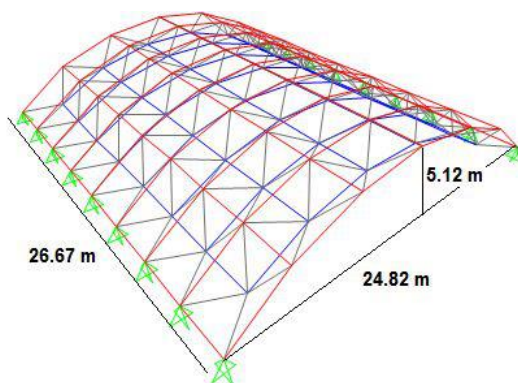
۴- بررسی صحت نتایج عددی

برای اثبات سنجش درستی نتایج و ارزیابی دقت و قابلیت اعتماد مدل‌های عددی ایجاد شده، لازم است در ابتدا راستی آزمایی مدل‌ها انجام شود. به منظور اعتبار سنجی مدل‌ها، از نتایج یک مقاله در ارتباط با موضوع طرح شده استفاده شده است. که در این راستا نتایج مدل‌سازی عددی Kaveh and Eftekhar [۲۱] مورد استفاده قرار گرفته است. جزئیات تحلیل و نحوه راستی آزمایی در زیر شرح داده شده است.

سازه نشان داده شده در شکل ۵ متشکل از دو شبکه مربعی است که تحت اثر دو نوع بارگذاری متقارن و نامتقارن مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است. مطابق شکل ۵ برای پایداری سازه از عناصر قطری استفاده شده که شبکه بالایی را به شبکه پایینی متصل کرده است. و تکیه‌گاه‌های مفصلی در دو طرف لبه‌های شبکه بالایی چلیک در نظر گرفته شده اند [۲۱]. شکل ۶ نیز تصویر سازه مدل شده در این تحقیق را نشان می‌دهد که مطابق با مدل مورد بررسی طراحی و مدلسازی شده است [۲۱].

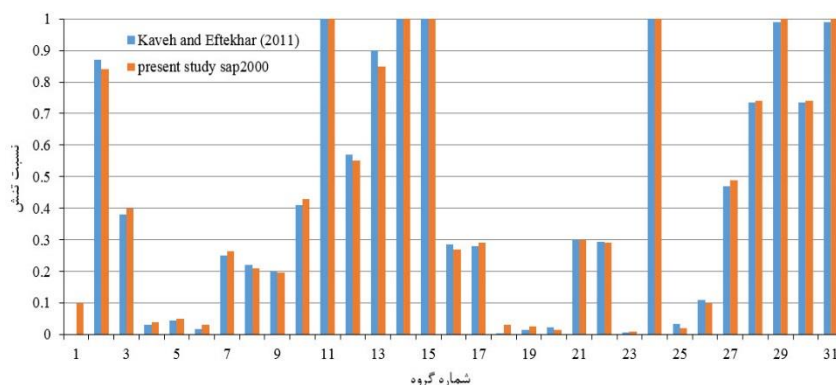


شکل ۵: ابعاد و مشخصات سازه به همراه پلان سازه مدل [۲۱].



شکل ۶: ابعاد هندسی مدل در نرم افزار Sap2000.

نمودار نسبت حداکثر تنش ایجاد شده در المان‌های هر گروه به تنش مجاز به دست آمده از مطالعات Kaveh and Eftekhar [۲۱] و نمودار نسبت حداکثر تنش هر گروه به تنش مجاز به دست آمده از مدل صحت‌سنجی در این تحقیق به وسیله نرم افزار Sap2000 در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: مقایسه نسبت تنش اعای هر گروه در مدل Kaveh and Eftekhar و مدل عددی در نرم افزار Sap2000.

همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است به‌طور کلی تطابق مناسبی بین نمودار به دست آمده در این تحقیق با نمودار ارائه شده در مرجع [۲۱] وجود دارد که بیانگر صحت روش مدل‌سازی است.

۵- بررسی نتایج

همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، ۲۸ مدل مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. فرضیاتی که جهت بررسی فنی و اقتصادی مدل‌ها لحاظ شده است عبارتند از:

- طراحی بر اساس آیین‌نامه AISC-LRFD2010 [۱۶] است.
- قید مقاومت برای طراحی حداکثر نسبت تنش کمتر یا مساوی است.
- قید حداکثر جابجایی یا خیز مجاز بر اساس آیین‌نامه سازه‌های فضاکار ایران [۱] از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$\Delta = L/400 \quad (۴)$$

که Δ و L به ترتیب بیانگر خیز مجاز و طول دهانه است. با توجه به اینکه طول دهانه در تمامی مدل‌ها برابر ۴۲ متر است، بنابراین خیز مجاز در تمامی مدل‌ها برابر ۱۰/۵ سانتی‌متر است.

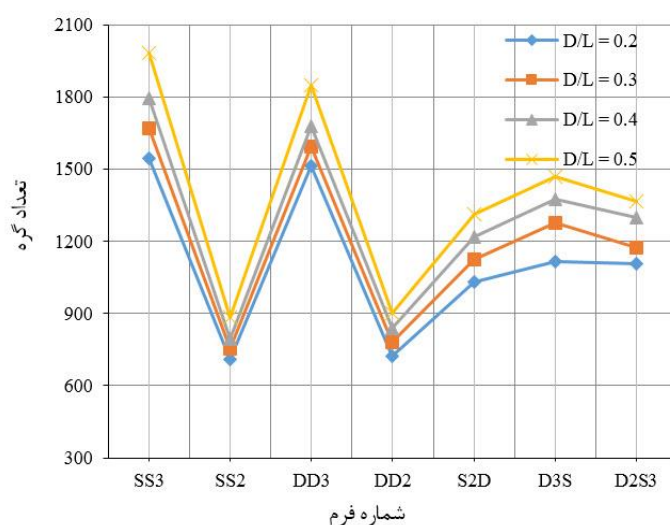
- هزینه هر کیلوگرم فولاد مصرفی ۱ واحد پول در نظر گرفته شده است.
- هزینه هر عضو مازاد یک مدل نسبت به مدل دارای عضو کمتر ۱۰ واحد پول در نظر گرفته شده است.
- هزینه هر گره ۱۷/۵ واحد پول در نظر گرفته شده است.

با لحاظ فرضیات مورد نظر جهت بررسی نتایج حاصل از تحلیل، مدل‌هایی که قیدهای طراحی را نقض کرده و یا از لحاظ اقتصادی اصلاً مقرون به صرفه نیستند با عنوان فرم‌های نقض شده سازه‌ای و مدل‌هایی که قیدهای طراحی را ارضا نموده و همچنین از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه می‌باشند با عنوان فرم‌های تأیید شده سازه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه این

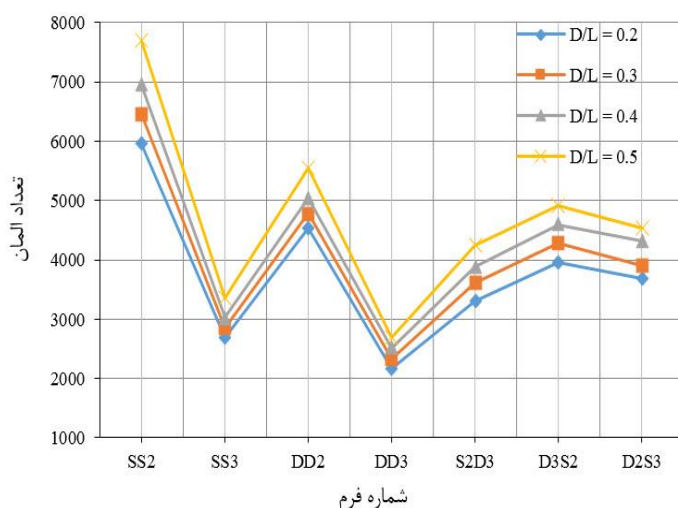
فرضیات در همه مدل‌ها یکسان است، بنابراین حتی در صورت وجود تفاوت‌های جزئی بین واقعیت و فرضیات در نظر گرفته شده شرایط برای همه مدل‌ها یکسان بوده و صرفاً حالت مقایسه‌ای دارد.

۵-۱- فرم‌های نقض شده سازه ای

شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب نمودار تعداد گره‌ها و اعضا مربوط به شکل فرم‌ها را در چهار نسبت خیز به دهانه نشان می‌دهد. همانطور که در شکل‌های ۸ و ۹ مشخص شده فرم SS_2 و DD_2 دارای بیشترین تعداد گره‌ها و اعضا هستند که نسبت به سایر فرم‌ها غیر اقتصادی‌تر خواهند بود.



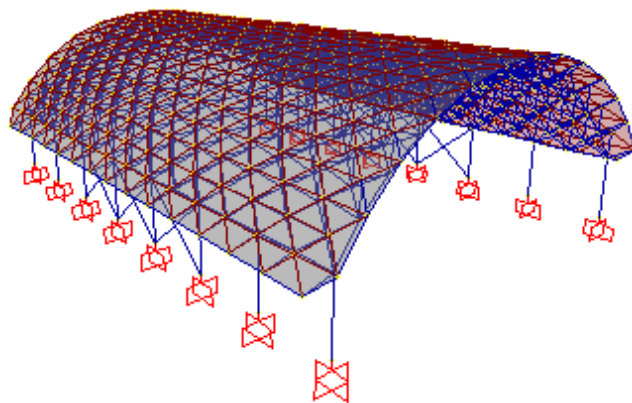
شکل ۸: تعداد گره‌های فرم‌های مختلف در نسبت‌های خیز به دهانه متفاوت.



شکل ۹: تعداد اعضا فرم‌های مختلف در نسبت‌های خیز به دهانه متفاوت.

در ادامه به عنوان نمونه‌ای از مثال مدل‌های نقض شده، نتایج مدل‌های اریبی روی اریبی با مدولاسیون ۳ متری با نسبت خیز به دهانه $0.3/0.3(DD_3)$ بررسی شده است. مقدار خیز حداکثر ایجاد شده در این مدل برابر $8/84$ سانتی‌متر بوده بنابراین کمتر از حد مجاز می‌باشد پس قید جابجایی در این مدل ارضا شده است.

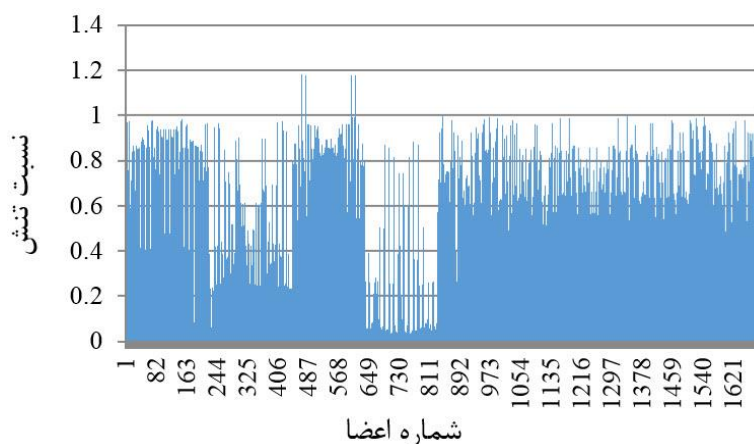
شکل ۱۰ مدل آریبی روی آریبی با مدولاسیون ۳ متری با نسبت خیز به دهانه ۰/۳ و شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب حداکثر جابجایی قائم گره‌ها و نسبت تنش ایجاد شده در اعضای این مدل را نشان داده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشخص شده بعضی از اعضای شبکه پاسخگو نیستند و مقدار نسبت تنش آن‌ها بزرگتر از ۱ بوده بنابراین نمی‌توان این فرم را تأیید کرد.



شکل ۱۰: مدل (DD_{3-0.3}) آریبی روی آریبی با مدولاسیون ۳ متری با نسبت خیز به دهانه ۰/۳.



شکل ۱۱: نمودار حداکثر جابجایی قائم گره‌های مدل (DD_{3-0.3}).



شکل ۱۲: نمودار نسبت تنش ایجاد شده در اعضای مدل (DD_{3-0.3}).

در جدول ۷ مدل‌هایی که به دلیل نقض یکی از شرایط نسبت تنش کمتر یا مساوی ۱ و یا حداکثر خیز مجاز کمتر یا مساوی ۱۰/۵ تأیید نشده‌اند نشان داده شده است. این مدل‌ها شامل ۷ نمونه می باشد.

جدول ۷: مدل‌های تحلیل شده تأیید نشده.

شماره مدل	نام مدل	نسبت تنش	جابجایی (cm)
۹	DD _{2-0.2}	۱/۲	۱۱/۷۴
۱۰	DD _{2-0.3}	۱/۱	۱۰/۱
۱۳	DD _{3-0.2}	۱/۲۷	۱۳/۷۲
۱۴	DD _{3-0.3}	۱/۴	۸/۸۴
۱۵	DD _{3-0.4}	۱/۳۲	۸/۰۴
۱۶	DD _{3-0.5}	۱/۲	۷/۴۲
۲۵	D ₂ S _{3-0.2}	۱	۱۲/۲

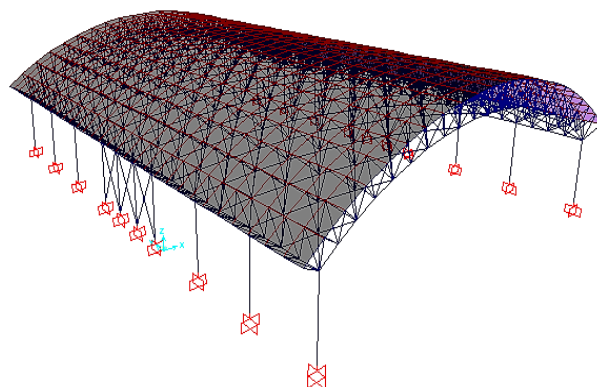
۵-۲- فرم‌های تأیید شده سازه ای

مدل‌هایی که در بند ۱-۵ به آن‌ها اشاره شد قیده‌های طراحی را نقض کرده اند بنابراین این مدل‌ها تأیید نشده و مابقی مدل‌ها هر دو شرط طراحی (نسبت تنش کمتر یا مساوی از ۱ و یا حداکثر جابجایی کمتر یا مساوی ۱۰/۵) را ارضا کرده اند، بنابراین جهت تعیین بهترین و اقتصادی‌ترین طرح مهندسی از بین مدل‌های باقی‌مانده به مقایسه هزینه‌های ناشی از تعداد گره‌ها و اعضا و هزینه ناشی از وزن این سازه‌ها پرداخته خواهد شد. مدل‌های باقی‌مانده مطابق جدول ۸ شامل ۲۱ مدل نشان داده شده می باشد.

جدول ۸: مدل‌های تحلیل شده تأیید شده.

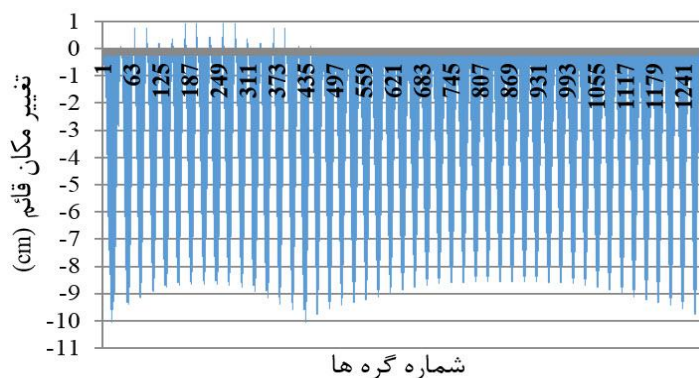
شماره مدل	نام مدل	نسبت تنش	جابجایی (cm)
۱	SS _{2-0.2}	۱	۹/۳۵
۲	SS _{2-0.3}	۱	۸/۴۳
۳	SS _{2-0.4}	۱	۷/۹۴
۴	SS _{2-0.5}	۱	۷/۱۲
۵	SS _{3-0.2}	۱	۱۰/۵
۶	SS _{3-0.3}	۱	۹
۷	SS _{3-0.4}	۱	۸/۶
۸	SS _{3-0.5}	۱	۷/۲۵
۱۱	DD _{2-0.4}	۱	۹/۳۷
۱۲	DD _{2-0.5}	۱	۸/۵۶
۱۷	S ₂ D _{3-0.2}	۱	۱۰/۵
۱۸	S ₂ D _{3-0.3}	۱	۹/۵
۱۹	S ₂ D _{3-0.4}	۱	۸/۸۵
۲۰	S ₂ D _{3-0.5}	۱	۸/۰۳
۲۱	S ₂ D _{3-0.5}	۱	۱۰/۵
۲۲	D ₃ S _{2-0.3}	۱	۱۰/۱
۲۳	D ₃ S _{2-0.4}	۱	۹/۳۸
۲۴	D ₃ S _{2-0.5}	۱	۸/۷۴
۲۶	D ₂ S _{3-0.3}	۱	۱۰/۵
۲۷	D ₂ S _{3-0.4}	۱	۹/۹۵
۲۸	D ₂ S _{3-0.5}	۱	۹/۱۷

مدل آریبی ۳ متری روی دوراهه ۲ متری و نسبت خیز به دهانه $0.3/D_3S_2$ در شکل ۱۳ نشان داده شده است. نتایج حاصل از طراحی مدل تأیید شده مذکور در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است.



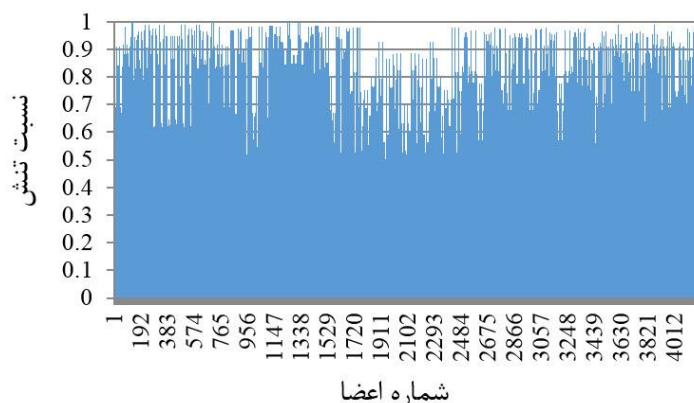
شکل ۱۳: مدل آریبی ۳ متری روی دوراهه ۲ متری و نسبت خیز به دهانه $0.3/D_3S_2$.

با توجه به شکل ۱۴ حداکثر خیز ایجاد شده در گره‌های $(D_3S_2-0.3)$ ، برابر $10/1$ سانتی‌متر است که از خیز مجاز کمتر بوده است.



شکل ۱۴: نمودار حداکثر جابجایی قائم گره‌های مدل $(D_3S_2-0.3)$.

نمودار نسبت تنش اعضای این مدل در شکل ۱۵ نشان داده شده که تمامی اعضا پاسخگو بوده و طبق این شکل از ظرفیت مقاطع به صورت کامل استفاده شده چون نسبت تنش بسیاری از اعضا بزرگ‌تر از 0.9 هستند. اما در این مدل نیز به علت تعداد بالای گره‌ها و اعضا هزینه ساخت سازه بالا بوده و از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نخواهد بود.



شکل ۱۵: نمودار نسبت تنش ایجاد شده مدل $(D_3S_2-0.3)$.

۳-۵- هزینه وزن مدل ها در فرم‌های تأیید شده سازه ای

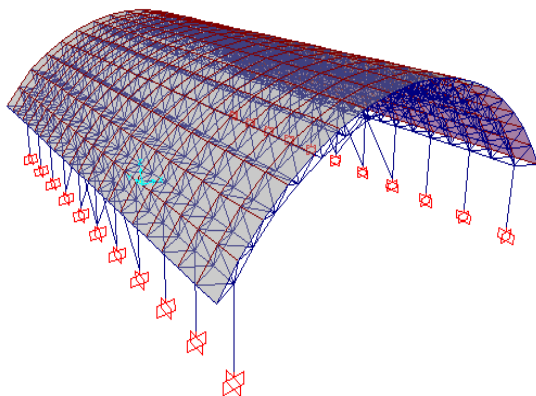
وزن سازه در هر یک از ۲۱ مدل تأیید شده، در جدول ۹ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود وزن سازه در مدل‌های ۲، ۶، ۱۲ و ۱۹ با نسبت خیز به دهانه برابر ۰/۳ کمترین مقدار را دارا می باشد. در تمامی فرم‌ها، وزن سازه در نسبت خیز به دهانه ۰/۵ نسبت به سایر نسبت خیز به دهانه‌ها بیشتر بوده که موجب غیر اقتصادی شدن طرح گردیده و ساخت سازه با این نسبت خیز به دهانه در صورتی مناسب تلقی خواهد شد که نیاز به تأمین فضای سازه در راستای قائم (ارتفاع) مطرح باشد.

جدول ۹: وزن سازه در مدل‌های تأیید شده.

شماره مدل	وزن مدل (تن)	شماره مدل	وزن مدل (تن)
۱	۱۰۹	۱۸	۹۵
۲	۱۰۳	۱۹	۹۷
۳	۱۰۵	۲۰	۱۰۶/۴
۴	۱۱۰/۴	۲۱	۱۱۲/۶
۵	۱۰۲/۳	۲۲	۱۰۲
۶	۹۱	۲۳	۱۰۳/۴
۷	۹۱/۹	۲۴	۱۱۳
۸	۱۰۲/۱	۲۶	۹۶
۱۱	۱۰۸/۷	۲۷	۹۶/۷
۱۲	۱۱۳/۲	۲۸	۱۰۵/۶
۱۷	۱۰۷/۵		

جدول ۱۰ بررسی و مقایسه اقتصادی مدل‌های تأیید شده و هزینه‌های ناشی از وزن فولاد مصرفی، تعداد گره‌ها و اعضا را نشان می دهد. همان‌طور که در جدول ۱۰ مشخص شده، در تمام فرم‌های تأیید شده کمترین هزینه در نسبت خیز به دهانه ۰/۳ است. به همین دلیل در تمام فرم‌هایی که نمودار نسبت تنش اعضا در آن‌ها نشان داده شده از نسبت خیز به دهانه ۰/۳ استفاده شده است. در جدول ۱۰ هزینه ناشی از گره‌ها، اعضا و وزن سازه به صورت جداگانه محاسبه شده و در نهایت هزینه نهایی به دست آمده است.

با توجه به جدول ۱۰ مدل شماره ۶ به دلیل تعداد اعضا و گره‌های کمتر و همچنین به دلیل وزن کمتر، اقتصادی‌تر از دیگر مدل‌های تأیید شده است. بنابراین مدل شماره ۶ دوراھه روی دوراھه با مدولاسیون ۳ متری ($SS_{3-0.3}$) که در شکل ۱۶ نشان داده شده به عنوان طرح مهندسی تعیین می شود.

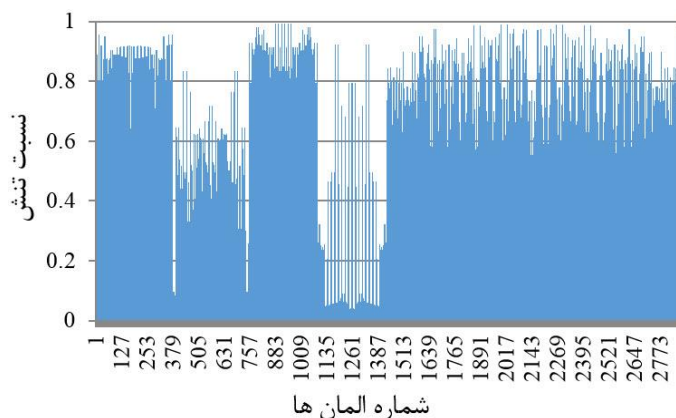
شکل ۱۶: مدل ($SS_{3-0.3}$) دوراھه روی دوراھه با مدولاسیون ۳ متری با نسبت خیز به دهانه ۰/۳.

جدول ۱۰: مقایسه کلی فرم‌های تأیید شده به لحاظ هزینه.

شماره مدل	نام مدل	وزن سازه (تن)	تعداد گره	تعداد اعضا	هزینه وزن (واحد پول)	هزینه گره (واحد پول)	هزینه عضو (واحد پول)	هزینه کل (واحد پول)
۱	SS _{2-0.2}	۱۰۹	۱۵۴۴	۵۹۵۲	۱۰۹۰۰۰	۲۷۰۲۰	۵۹۵۲۰	۱۹۵۵۴۰
۲	SS _{2-0.3}	۱۰۳	۱۶۷۰	۶۴۴۸	۱۰۳۰۰۰	۲۹۲۲۵	۶۴۴۸۰	۱۹۶۷۰۵
۳	SS _{2-0.4}	۱۰۵	۱۷۹۶	۶۹۴۴	۱۰۵۰۰۰	۳۱۴۳۰	۶۹۴۴۰	۲۰۵۸۷۰
۴	SS _{2-0.5}	۱۱۰/۴	۱۹۸۵	۷۶۸۸	۱۱۰۴۰۰	۳۴۷۳۷/۵	۷۶۸۸۰	۲۲۲۰۱۷/۵
۵	SS _{3-0.2}	۱۰۲/۳	۷۱۰	۲۶۸۸	۱۰۲۳۰۰	۱۲۴۲۵	۲۶۸۸۰	۱۴۱۶۰۵
۶	SS _{3-0.3}	۹۱	۷۵۵	۲۸۵۶	۹۱۰۰۰	۱۳۲۱۲/۵	۲۸۵۶۰	۱۳۲۷۷۲/۵
۷	SS _{3-0.4}	۹۱/۹	۷۹۶	۳۰۲۴	۹۱۹۰۰	۱۳۹۳۰	۳۰۲۴۰	۱۳۶۰۷۰
۸	SS _{3-0.5}	۱۰۲/۱	۸۸۲	۳۳۶۰	۱۰۲۱۰۰	۱۵۴۳۵	۳۳۶۰۰	۱۵۱۱۳۵
۱۱	DD _{2-0.4}	۱۰۸/۷	۱۶۸۱	۵۰۳۶	۱۰۸۷۰۰	۲۹۴۱۷/۵	۵۰۳۶۰	۱۸۸۴۷۷/۵
۱۲	DD _{2-0.5}	۱۱۳/۲	۱۸۴۹	۵۵۴۰	۱۱۳۲۰۰	۳۲۳۵۷/۵	۵۵۴۰۰	۲۰۰۹۵۷/۵
۱۷	S ₂ D _{3-0.2}	۱۰۷/۵	۱۰۳۰	۳۳۰۸	۱۰۷۵۰۰	۱۸۰۲۵	۳۳۰۸۰	۱۵۸۶۰۵
۱۸	S ₂ D _{3-0.3}	۹۵	۱۱۲۵	۳۶۲۰	۹۵۰۰۰	۱۹۶۸۷/۵	۳۶۲۰۰	۱۵۰۸۸۷/۵
۱۹	S ₂ D _{3-0.4}	۹۷	۱۲۲۰	۳۸۸۴	۹۷۰۰۰	۲۱۳۵۰	۳۸۸۴۰	۱۵۷۱۹۰
۲۰	S ₂ D _{3-0.5}	۱۰۶/۴	۱۳۱۵	۴۲۴۴	۱۰۶۴۰۰	۲۳۰۱۲/۵	۴۲۴۴۰	۱۷۱۸۵۲/۵
۲۱	S ₂ D _{3-0.5}	۱۱۳	۱۱۱۸	۳۹۴۸	۱۱۳۰۰۰	۱۹۵۶۵	۳۹۴۸۰	۱۷۲۰۴۵
۲۲	D ₃ S _{2-0.3}	۱۱۲/۶	۱۲۷۷	۴۲۷۲	۱۱۲۶۰۰	۲۲۳۴۷/۵	۴۲۷۲۰	۱۷۷۶۶۷/۵
۲۳	D ₃ S _{2-0.4}	۱۰۲	۱۳۷۴	۴۵۹۶	۱۰۲۰۰۰	۲۴۰۴۵	۴۵۹۶۰	۱۷۲۰۰۵
۲۴	D ₃ S _{2-0.5}	۱۰۳/۴	۱۴۷۱	۴۹۱۰	۱۰۳۴۰۰	۲۵۴۷۲/۵	۴۹۱۰۰	۱۷۸۲۴۲/۵
۲۶	D ₂ S _{3-0.3}	۹۶	۱۱۷۳	۳۸۹۳	۹۶۰۰۰	۲۰۵۲۷/۵	۳۸۹۳۰	۱۵۵۴۵۷/۵
۲۷	D ₂ S _{3-0.4}	۹۶/۷	۱۳۰۱	۴۳۱۹	۹۶۷۰۰	۲۲۷۶۷/۵	۴۳۱۹۰	۱۶۲۶۵۷/۵
۲۸	D ₂ S _{3-0.5}	۱۰۵/۶	۱۳۶۵	۴۵۳۲	۱۰۵۶۰۰	۲۳۸۸۷/۵	۴۵۳۲۰	۱۷۴۸۰۷/۵

در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نیز به ترتیب نمودار حداکثر جابجایی قائم گره‌ها و نسبت تنش ایجاد شده در اعضای مدل (SS_{3-0.3}) نشان داده شده که بر اساس این دو نمودار حداکثر جابجایی قائم گرهی برابر ۹/۱۵ سانتی‌متر و نسبت تنش اعضای این مدل نیز برای تمامی اعضا کمتر از ۱ بوده و سازه پاسخگو می باشد.

شکل ۱۷: نمودار حداکثر جابجایی قائم گره‌های مدل (SS_{3-0.3}).



شکل ۱۸: نمودار نسبت تنش ایجاد شده در اعضای مدل (SS3-0.3).

۶- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر برای تعیین بهترین فرم و اقتصادی ترین طرح چلیک های دولایه فضاکار، از ۲۸ مدل در چهار شبکه بندی مختلف استفاده شده و در ادامه این مدل ها تحت ترکیبات مختلف بارگذاری مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته اند. با توجه به اینکه قیدهای طراحی در این مطالعه نسبت تنش در اعضا و جایجایی قائم گرهی اعضا سازه است، حداکثر خیز قائم گرهی با استفاده از رابطه 4 برابر $10/5$ سانتی متر محاسبه شد. با انجام تحلیل بر روی مدل های مورد نظر، نتایج زیر استخراج شد.

در ۷ مدل از سازه های چلیکی فضاکار مورد بررسی، قیدهای طراحی ارضا نشده، به طوری که نسبت تنش اعضای این مدل ها بزرگتر از ۱ بوده و سازه پاسخگو نبوده و یا حداکثر جایجایی قائم گرهی بیشتر از مقدار مجاز ($10/5$ سانتی متر) بوده است. بنابراین علی رغم حداقل بودن تعداد گره ها و اعضا و مقرون به صرفه بودن هزینه سازه، مدل های مذکور مورد تأیید نبوده و رد خواهند شد.

در ۲۱ مدل باقی مانده تأیید شده، که قیدهای طراحی در آن ها ارضا شده اند، برای مشخص شدن بهترین طرح مهندسی به مقایسه هزینه های ناشی از تعداد گره ها، تعداد اعضا (وزن سازه) پرداخته شده و نهایتاً با محاسبه مجموع هزینه های کل در هر مدل، مدل شماره ۶ فرم (SS3-0.3)، (شبکه بندی دوراهه روی دوراهه با مدولاسیون ۳ متری و نسبت خیز به دهانه $0/3$)، به عنوان بهترین و اقتصادی ترین طرح انتخاب شده است. در مدل بهینه مذکور حداکثر جایجایی قائم گرهی برابر $9/15$ سانتی متر و نسبت تنش بیشتر اعضای آن بین $0/9$ تا ۱ می باشد که بیانگر حداکثر استفاده از ظرفیت مقاطع سازه است. همچنین به لحاظ تعداد مقاطع و فولاد مصرفی نیز این مدل (SS3-0.3)، نسبت به سایر مدل ها مقرون به صرفه خواهد بود.

۷- مراجع

- [1] Office of Deputy for Strategic Supervision Bureau of Technical Execution System. (2010). *Code of Practice for Skeletal Steel Space Structures*, Standard No. 400, Tehran, Iran.
- [2] Nooshin, H. (1984). *Formex Configuration Processing in Structural Engineering*. Elsevier Applied Science Publishers. London, pages 273.
- [3] Nooshin, H. (2013). *Course on Space Structures*, Book A&B, ACECR of Kerman, Iran.
- [4] Eberhart, RC. Kennedy, J. (1995). *A new optimizer using particles swarm theory*. *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japan, pages 39–43.
- [5] Kennedy, J. Eberhart, RC. (1995). *Particle swarm optimization*. *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, Vol. IV, Piscataway, NJ, pages 1942–1948.
- [6] Perez, RE. Behdinan, K. (2007). *Particle swarm approach for structural design optimization*. *Journal of Computer & Structure*, vol. 85, pages 1579-1588.
- [7] Sheidaii, MR. Abedi, K. Babaei, M. (2017). *Desirability-Based Design of Space Structures Using Genetic Algorithm and Fuzzy Logic*. *International Journal of Civil Engineering*, Volume 15, Issue 2, pages 231–242.

- [8] Rajeev, S. Krishnamoorthy, SC. (1992). *Discrete optimization of structure using genetic algorithms*. *Journal of Structural Engineering ASCE*, Vol. 118, No. 5, pages 1233-1250.
- [9] Hayalioglu, MS. (2004). *Optimum load and resistance factor design of steel space frames using genetic algorithm*. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 21, No. 4, pages 292-299.
- [10] Behraves, A. Ebadi, MM. Rashtchi, V. (2009). *optimization of space structures with fuzzy constraints via real coded genetic algorithm*. *Proceedings of the world congress on engineering*, vol iiwce, London, u.k.
- [11] Nooshin. H. (2011). *Space Structures and Configuration Processing International Journal of Space Structures*. vol 16 No. 3.
- [12] Goldberg, DE. (2004). *Genetic Algorithm in Search Optimization and Machine Learning*. Addison Wesley, Reading, Massachusetts.
- [13] Hoseinzadeh, N. (2015). *Optimal design of double layer Barrel vaults considering non-linear behaviour using improved colliding bodies algorithm*. university of Tehran, Iran.
- [14] GNU General Public, Formian. (1999). The university of Surrey Guilford, version 2.2.
- [15] Computers and Structures, Inc. SAP2000. (2011). *Integrated structural analysis and design software*, Berkeley, version 14.1.1.
- [16] AISC-LRFD2010, *Manual of Steel Construct-Load and Resistance Factor Design*. American Institute of Steel Construction, Chicago.
- [17] Euro code 1. (2005). *Actions on structures. General acts - Snow loads*. Part 1.3: CEN, pr EN 1991-1-3.
- [18] Euro code 1. (2004). *Actions on structures. General acts-Wind actions*. Part 1.4: CEN, pr EN 1991-1-4.
- [19] Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings. (2014). Standard No. 2800, 4th Edition, Road Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.
- [20] Tien, TL. (2009). *Space Frame Structures*. Department of Civil Engineering, Chinese Academy of Building Research, Beijing, China.
- [21] Kaveh, A. Eftekhar, B. (2011). *Optimal design of double layer barrel vaults using an improved Hybrid Big Bang- Big Crunch Method*. *Asian journal of civil engineering*. Vol,13, no,4. Page 465-487.