

Investigating the Sustainability of Structures of space frame structure of Sheikh Safieddin Ardebili Tomb

Sara Beyraghi¹, Hassan Sattari Sarbangholi^{*2}, Ali Mohades Khorasani³

1- PhD candidate, Department of Art & Architecture, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

2- Professor

3- Associate Professor, Department of Mathematics and Computer Science, Amirkabir University of Technology, 424 Hafez Ave, Tehran

ABSTRACT

Single-layer space structures, especially in the form of dome-shaped, have good characteristics due to the high stiffness of the structure to cover large spans. These types of structures are very disposed to instability, which can limit the amount of load that can be tolerated and deformed structures, and play a fundamental role in designing structures whose loads borne by their members are mainly axial-compressive or axial-tensile. So it is important to study the stability of these structures to determine the maximum load-bearing capacity of the structure, to find the optimal geometric shape, the stiffness of the structure and collapse behavior under different loading conditions. Under different loading conditions, dome-shaped space structures exhibit various modes of instability, including member instability, nodal instability, member length instability, and general instability. Considering this type of instability, in this study, the dome-shaped space structure of the tomb of Sheikh Safi al-Din Ardabili with the special form of the dome, which has been obtained by parametric study, have been investigated. These are done by collapse analysis and the use of finite element methods. Factors such as early geometric imperfections, balanced snow load pattern in nodes, unbalanced snow load pattern in two orthogonal directions, taking into account three different height to span ratios, two lengths to width ratios of the dome and yield stress are considered In the stability behavior of the single-layer space structure of Canopy the tomb of Sheikh Safi al-Din Ardabili. The results show that the height to span ratio is an influential factor in this type of structure and with increasing this ratio, weight, the initial hardness and load capacity (for design with the same sections for all structures) increases; also the structural form of the single-layer dome-shaped space structure of the tomb of Sheikh Safi al-Din Ardabili, with its special form, is very uneconomical and inefficient, and is not recommended for structural designs and has only a beautiful aspect.

ARTICLE INFO

Receive Date: 08 January 2020

Revise Date: 09 April 2020

Accept Date: 08 October 2020

Keywords:

Space Structure
Tomb of Sheikh Safi al-Din
Ardabili
Stability of Structure
Single-Layer Dome
Finite Element

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.212214.2044>

*Corresponding author: Hassan Sattari Sarbangholi
Email address:

بررسی پایداری سازه فضاکار تک لایه‌ی آسمانه چینی خانه‌ی مقبره‌ی شیخ صفی‌الدین

اردبیلی

سارا بیرقی^۱، حسن ستاری^{۲*}، علی محدث خراسانی^۳

۱- دانشجوی دکتری معماری، گروه معماری و شهرسازی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۲- استاد دانشگاه

۳- دانشیار دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پلی‌تکنیک تهران، ایران

چکیده

سازه‌های فضاکار تک‌لایه به ویژه در فرم گنبدی شکل به دلیل سختی بالای سازه‌ای برای پوشش دهانه‌های بزرگ از ویژگی‌های خوبی برخوردارند. این نوع سازه‌ها بسیار مستعد ناپایداری هستند که این عامل می‌تواند میزان بارگذاری قابل تحمل و تغییر شکل سازه‌ها را محدود کند و نقش بنیادی در طراحی سازه‌هایی داشته باشد که بارهای تحمل شده توسط اعضای آن‌ها عمدتاً به صورت محوری-فشاری یا محوری-کششی می‌باشد لذا مطالعه‌ی پایداری این سازه‌ها برای تعیین حداکثر ظرفیت باربری سازه، یافتن فرم هندسی بهینه، سختی سازه و نحوه‌ی رفتار خرابی آن از اهمیت زیادی برخوردار است. سازه‌های فضاکار گنبدی تحت شرایط بارگذاری متفاوت، مودهای ناپایداری گوناگونی شامل ناپایداری عضو، ناپایداری گرهی، ناپایداری در امتداد طول عضو و ناپایداری عمومی را به نمایش می‌گذارند. با در نظرگیری این نوع ناپایداری، در این مطالعه سازه فضاکار تک‌لایه‌ی گنبدی مقبره‌ی شیخ صفی‌الدین اردبیلی با تاشه‌ی ویژه‌ی خود گنبد که با مطالعه‌ی پارامتریک به دست آمده‌است با انجام تحلیل‌های خرابی و استفاده از روش عناصر محدود مورد بررسی قرار گرفته‌است. اثرات عواملی همچون ناکاملی‌های هندسی اولیه، الگوی بارهای برف متوازن در گره‌ها، الگوی بارهای برف نامتوازن در دو جهت متعامد، با در نظرگیری سه نسبت ارتفاع به دهانه‌ی متفاوت، دو نسبت طول به عرض گنبد و تنش تسلیم مصالح در رفتار پایداری سازه فضاکار تک‌لایه‌ی آسمانه چینی خانه‌ی مقبره شیخ صفی‌الدین اردبیلی لحاظ گردیده‌است. نتایج نشان می‌دهد که نسبت ارتفاع به دهانه عاملی تاثیرگذار در این نوع سازه‌هاست و با افزایش این نسب وزن، سختی اولیه و ظرفیت باربری (برای طراحی با مقاطع یکسان برای تمامی سازه‌ها) افزایش می‌یابد؛ همچنین فرم سازه‌ای سازه فضاکار تک‌لایه‌ی گنبدی مقبره‌ی شیخ صفی‌الدین اردبیلی با تاشه‌ی ویژه‌ی خود بسیار غیراقتصادی و غیر بهینه است و برای طراحی‌های سازه‌ای توصیه نمی‌شود و صرفاً جنبه‌ی زیبایی دارد.

کلمات کلیدی: کلمات کلیدی: سازه فضاکار، مقبره شیخ صفی‌الدین اردبیلی، پایداری سازه، گنبد تک لایه، المان محدود

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.212214.2044
۱۳۹۸/۱۰/۱۸	۱۳۹۹/۰۱/۲۱	۱۳۹۹/۰۷/۱۷	۱۳۹۹/۰۷/۱۷	۱۴۰۰/۰۹/۳۰	doi: 10.22065/jsce.2020.212214.2044
*نویسنده مسئول:					حسن ستاری
پست الکترونیکی:					

۱- مقدمه

سازه‌های فضاکار گروهی از سازه‌ها هستند که رفتار مسلط سه بعدی دارند؛ این سازه‌ها درخور تولید انبوه صنعتی و معماری بوده که در این حالت، الزامات فنی و اقتصادی را با تلفیق مناسبی از مفاهیم سازه‌ای، اصول ایمنی و جنبه‌های اقتصادی فراهم می‌کنند [۱].

سازه‌های فضاکار به صورت پیش‌ساخته و یا به طور انبوه تولید می‌شوند که در مقایسه با سازه‌های دیگر از حمل‌ونقل آسان و روش‌های نصب صنعتی برخوردارند و می‌توانند با استفاده‌ی بهینه از مصالح و سرعت بالای عملیات اجرایی، کمترین آسیب محیط زیستی را به همراه داشته‌باشند [۲]. سازه‌های فضاکار از نظر پیکربندی (تاشه) دارای اشکال گوناگون هستند که در این پژوهش با توجه به مطالعه‌ی موردی تاشه‌ی خاصی طبق آسمانه چینی خانه‌ی مقبره شیخ صفی‌الدین اردبیلی طراحی شده‌است.

پایداری گنبد‌های تک‌لایه‌ی فضاکار بیشتر تحت تاثیر غیرخطی‌های هندسی و صلبیت اتصالات می‌باشد. اثر صلبیت اتصال بر ظرفیت باربری سازه بسیار مهم است و نیاز به مطالعات عمیق‌تر در این زمینه می‌باشد. اثر غیرخطی‌های هندسی به هندسه‌ی سازه و لاغری اعضا وابسته است [۳]. در این تحقیق رفتار خرابی هشت مدل از نوع گنبد تک‌لایه‌ی فضاکار با سه نسبت عمق به دهانه‌ی مختلف (نسبت-های ۰/۱۰، ۰/۱۲، ۰/۱۴ و ۰/۱۶) و دو نسبت طول به عرض متفاوت (نسبت‌های ۰/۵ و ۱) با مقاطع طراحی لوله‌ای یکسان مورد بررسی قرار گرفته‌است سپس با یافتن فرم بهینه‌ی این نوع سازه، سازه فرم‌آزاد پیشنهادی با الهام از تاشه‌ی سازه‌ی بررسی شده، ارائه و پایداری آن مورد بررسی قرار گرفته‌است.

مطالعات زیادی درباره‌ی جنبه‌های مختلف سازه‌های فضاکار انجام شده‌است. مطالعات Parke نشان می‌دهد که اقتصادی‌ترین نسبت ارتفاع به دهانه، برای سازه‌های چلیکی تک‌لایه ۰/۱۷ می‌باشد [۴]. تحقیقات انجام‌شده توسط Makowski بر روی مدل‌های با مقیاس کوچک سازه‌های چلیکی تک‌لایه نشان می‌دهد که تاشه‌ی مثلثی سه‌طرفه تحت بار گسترده‌ی یکنواخت، توزیع تنش نسبتاً یکنواختی را ایجاد می‌کند. علاوه بر آن، سازه‌ی چلیکی تک‌لایه با تاشه‌ی مثلثی سه‌طرفه، تحت بارهای متقارن، نسبت به انواع دیگر آن خیز کمتری دارد [۵]. Gioncu و همکارانش، رفتار ناپایداری سازه‌های چلیکی تک‌لایه را بررسی و انواع مختلف مود کمانشی شامل کمانش عضوی، ناپایداری گرهی، ناپایداری در امتداد محور، ناپایداری عمومی و ناپایداری ترکیبی را به تفصیل تشریح نموده‌اند [۶]. Abedi ماهیت دینامیکی پدیده‌ی فروجهش گرهی و انتشار خرابی موضعی را در گنبد‌های تک‌لایه‌ی مشبک به طریق تجربی و نظری مورد مطالعه قرار داده است [۷]. عابدی و شکسته‌بند به روش استاتیکی غیرخطی تحلیل پایداری سازه‌های فضاکار را بررسی، نحوه‌ی به دست آوردن نقاط دوشاخگی و تعویض مسیر تعادل و تبدیل نقطه‌ی دوشاخگی به نقطه‌ی حدی را تبیین و با تشریح انواع مکانیزم‌های خرابی در سازه‌های فضاکار، بر لزوم استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی در حالت مکانیزم خرابی موضعی همراه با فروجهش دینامیکی تاکید نمودند [۸]. بیرقی و همکاران، ساختار یزدی‌بندی آسمانه‌ی بنای هشت‌بهشت اصفهان را با هدف تحلیل هندسی الگوریتمیک و آنالیز سازه‌ای هم در فرم سنتی و هم در فرم‌آزاد با ایجاد سازه‌فضاکار بر مبنای تاشه‌ای با الهام از فرم سازه‌ای سنتی بررسی کرده‌اند [۸].

در این مطالعه رفتار پایداری سازه‌ی تک‌لایه‌ی فضاکار آسمانه چینی خانه‌ی مقبره شیخ صفی‌الدین اردبیلی با اهداف زیر مورد بررسی قرار گرفته‌است:

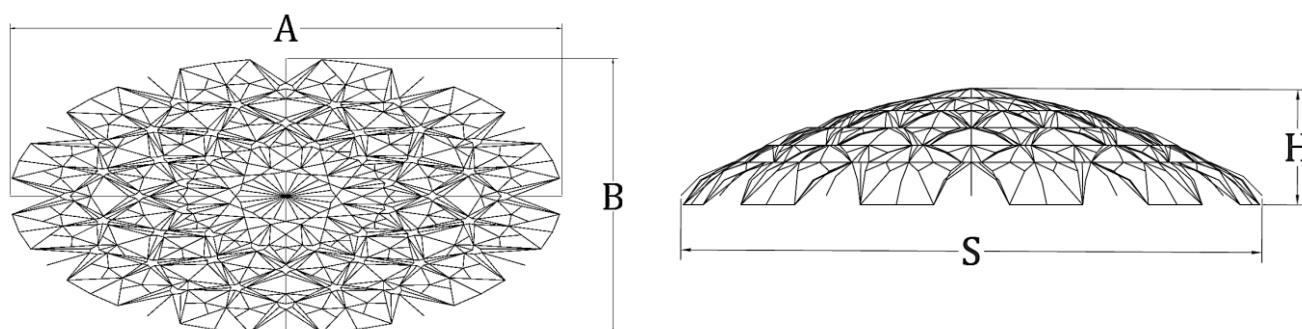
- تحلیل پایداری سازه‌ی تک‌لایه‌ی فضاکار آسمانه چینی مقبره شیخ صفی‌الدین اردبیلی با مدل‌سازی عناصر محدود جهت یافتن فرم هندسی بهینه
- ارزیابی اثر پارامترهای نسبت ارتفاع به دهانه، نسبت طول به عرض و نوع بارگذاری با در نظرگیری غیرخطی‌های هندسی و مصالح.
- تعیین مکانیزم‌های خرابی سازه‌ی تک‌لایه‌ی فضاکار آسمانه چینی مقبره شیخ صفی‌الدین اردبیلی
- ارائه‌ی مدل فرم‌آزاد با تاشه‌ی آسمانه چینی مقبره شیخ صفی‌الدین اردبیلی

از مزایای سازه فضاکار تک لایه‌ی آسمانه چینی خانه‌ی مقبره‌ی شیخ صفی‌الدین اردبیلی می‌توان به موارد مختلفی به شرح ذیل اشاره نمود:

- (۱) جنبه‌ی معماری و زیبا شناسی
- (۲) جنبه‌ی سازه‌ای (طول‌های متفاوت اعضا)
- (۳) ارتفاع زیاد نسبت به اکثر گنبدها
- (۴) قابلیت تغییر در نسبت‌های طولی و عرضی
- (۵) زمان اجرای بسیار کم و مقاوم بودن در برابر زلزله
- (۶) وزن سازه‌ای کم و امکان استفاده از نور محیط در صحن داخلی گنبد

تاشه پردازی گنبد تک لایه‌ی فضاکار آسمانه چینی مقبره شیخ صفی‌الدین اردبیلی

برای ایجاد فرم گنبد ذکر شده، از نرم افزار Rhino ceros [۹] و افزونه‌ی Grasshopper [۱۰] استفاده شده‌است. در شکل ۱ به صورت شماتیک نسبت ارتفاع به دهانه و نسبت طول به عرض مورد بررسی در این مطالعه را نشان می‌دهد.



ب) A طول و B عرض گنبد

الف) H ارتفاع و S دهانه‌ی گنبد

شکل ۱: نمایش شماتیک پارامترهای هندسی گنبد تک لایه‌ی فضاکار آسمانه چینی مقبره شیخ صفی‌الدین اردبیلی

۲- مدل سازی عناصر محدود

برای بررسی رفتار ناپایداری سازه‌ی تک لایه‌ی فضاکار آسمانه چینی مقبره شیخ صفی‌الدین اردبیلی و جهت انجام تحلیل‌ها با در نظرگیری غیرخطی‌های هندسی و مصالح، با روش عناصر محدود، از نرم‌افزار Abaqus CAE, V6.14.2 [۱۱] استفاده شده‌است. مدل سازی عناصر محدود دارای مشخصات زیر است:

• نوع تحلیل

سازه‌ها با در نظرگیری رفتار غیرخطی‌شان، به صورت غیرخطی سخت‌شونده یا غیرخطی نرم‌شونده عمل می‌کنند. در رفتار غیرخطی سخت‌شونده، یک مسیر تعادل وجود دارد و با افزایش بارگذاری، سختی آن افزایش می‌یابد. در این سازه ناپایداری اتفاق نمی‌افتد و گسیختگی به صورت پلاستیک اتفاق می‌افتد اما سازه‌های با رفتار نرم‌شونده‌ی غیرخطی ممکن است دارای یک یا بیش از یک مسیر تعادل بوده و در آن‌ها ناپایداری اتفاق افتد؛ در این نوع سازه‌ها پایداری به دو حالت از بین می‌رود. در حالت اول، رفتار غیرخطی نرم‌شونده که متناسب با مود اولیه تغییرشکل می‌باشد، با کاهش تدریجی سختی به مرحله‌ای می‌رسد که سازه کاملاً سختی خود را از دست می‌دهد.

در این صورت، مسیر تعادل بار-تغییرمکان سازه، به نقطه حدی رسیده است و یک پرش دینامیکی به تاشه بسیار تغییرشکل یافته رخ می دهد که مطابق با مود اول تغییرشکل می باشد. این رفتار پدیده فروجهش یا کمانش فروجهشی نامیده می شود. در حالت دوم ناپایداری، یک سازه با مشخصه نرم شوندهگی غیرخطی، پایداری خود را از طریق کمانش ناگهانی به یک مود تغییرشکل که کاملاً با مود اولیه تغییرشکل متفاوت می باشد، از دست می دهد. این پدیده ناپایداری نقطه دوشاخگی می باشد. [۱]

• مودهای کمانش سازه

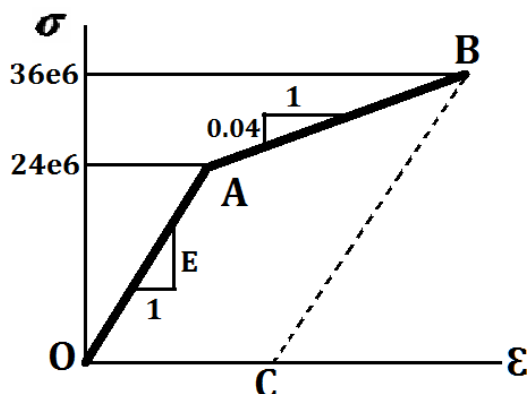
مودهای کمانشی بیانگر گرایش سازه به تغییرمکان یا مود نمو تغییرمکان سازه در نقاط بحرانی می باشد. از طریق تحلیل مودهای کمانشی، نقاط ضعف سازه ها مشخص می شود و مودهای خرابی ممکن به دقت تعیین می گردند. مودهای کمانشی متناظر با اولین نقطه بحرانی، پایین ترین مود کمانشی نامیده می شود. انرژی پتانسیل در هنگام تغییرمکان در امتداد پایین ترین مود کمانشی، دارای حداقل مقدار بوده و سازه های واقعی تحت فرایند بارگذاری تمایل به تغییرمکان در این جهت دارند. برای تعیین دقیق رابطه بار و تغییرمکان، ادامه تحلیل در مرحله پس کمانشی، یعنی تحلیل پاسخ کامل بار-تغییرمکان ضروری است. [۶]

• کشف نقطه‌ی دوشاخگی و تعویض مسیر تعادل

روش عددی طول-کمان (Arch Length Method) با وجود کارایی خوب در ترسیم مسیر تعادل و فراتر از نقطه‌ی حدی، در ترسیم مسیر ثانویه‌ی تعادل در یک نقطه‌ی دوشاخگی ضعف دارند. در حالت کلی، تحلیل ناپایداری دوشاخگی شامل دو فرایند کشف نقطه-ی دوشاخگی و تعویض مسیر تعادل در آن نقطه می باشد. ابتدا یک تحلیل غیرخطی ایستاتیکی برای سازه‌ی کامل انجام می گیرد تا مسیر تعادل اصلی آن مشخص شود. وجود مقادیر منفی از طریق ویژه‌مقادیر ماتریس سختی ارزیابی می شود. وجود یک ویژه مقدار منفی قبل از بار نقطه‌ی حدی دلالت بر وجود یک نقطه‌ی دوشاخگی دارد. با انجام یک تحلیل کمانش ویژه‌مقدار برای سازه‌ی کامل، پایین ترین مود کمانش به دست می آید که نشانگر یک شکل کمانش نامتقارن است. سپس از نخستین مود کمانش به عنوان شکل ناکاملی اولیه استفاده شده و با معرفی ناکاملی‌هایی در هندسه‌ی اولیه‌ی سازه، دوباره تحلیل غیرخطی برای سازه‌ی ناکامل انجام می گردد. بدین ترتیب می توان سازه را تحت اختلال قرار داد تا از مسیر تعادل اصلی وارد مسیر تعادل ثانویه گردد. بنابراین، رفتار دوشاخگی به رفتار نقطه‌ی حدی تبدیل می گردد. ترکیب مسیرهای تعادل بنیادی و ثانویه، ناپایداری دوشاخگی متقارن را نشان خواهد داد. این روش تحلیل، تحلیل کامل-اختلال-یافته نامیده می شود و در صورت وجود مسیر دوشاخگی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. در نرم‌افزار Abaqus CAE اعمال ناکاملی متناسب با مود اصلی خرابی با دستور Imperfection صورت گرفته است [۱، ۱۱، ۱۲ و ۱۳].

• نحوه‌ی مدل سازی اتصالات گیردار و اعضا با استفاده از عناصر تیری

اتصالات سازه‌های فضاکار تک لایه معمولاً به صورت صلب می باشد که قابلیت انتقال نیروی محوری، برشی، لنگر خمشی و برشی را دارند. [۱۴] برای نمایش رفتار هر عنصر از عنصر تیری تیموشنکو (B32) با قابلیت لحاظ تغییرشکل‌های برشی و ایجاد گره‌های اضافی در وسط عضو برای افزایش دقت محاسبات، استفاده شده است. همچنین نمودار تنش-کرنش مصالح در شکل ۲ نشان داده شده است.

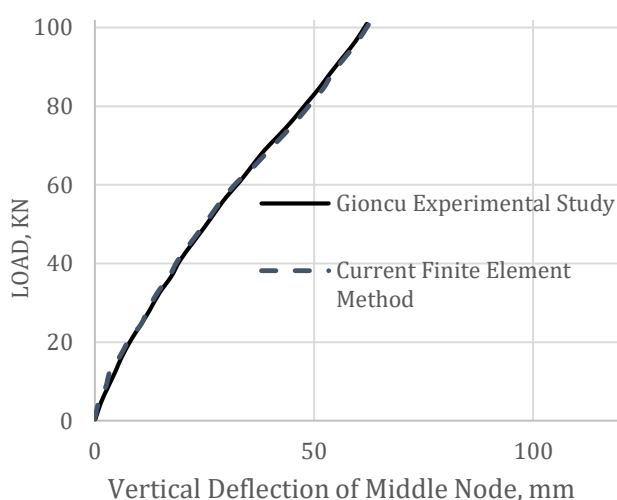


شکل ۲: نمودار تنش-کرنش مصالح الاستوپلاستیک

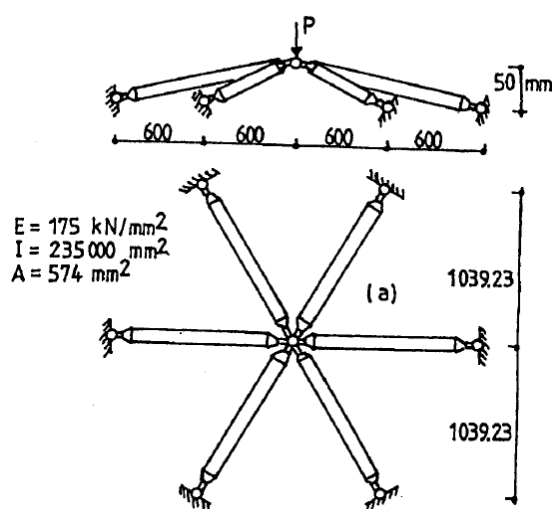
۳- صحت‌سنجی مدل‌سازی عناصر محدود

باهدف ارزیابی مدل‌سازی عناصر محدود، نتایج حاصل از تحلیل غیرخطی مذکور با نتایج حاصل از تحقیق آزمایشگاهی انجام‌شده توسط Gioncu [۱۵] مقایسه شده‌است. در مقایسه‌ی حاضر از نرم‌افزار المان محدود Abaqus CAE در تحلیل مدل‌ها استفاده شده‌است. در این تحلیل از المان تیری تیموشنکو با درون‌یابی درجه‌ی دوم (B32) استفاده شده‌است. تحلیل‌ها با در نظرگیری غیرخطی‌های هندسی و مصالح انجام می‌گیرد. برای اندازه‌گیری تسلیم مصالح، معیار گسیختگی Von-Mises در نظر گرفته شده‌است. همانطور که پیش‌تر نیز بیان شد برای به دست آوردن پاسخ بس‌خرابی، از روش Riks که بر اساس روش طول کمان اصلاح‌شده می‌باشد استفاده گردیده‌است.

مدل آزمایشگاهی شکل ۳ (الف) یک گنبد با اتصالات صلب می‌باشد. پاسخ‌های آزمایشگاهی و نرم‌افزاری در شکل ۳ (ب) مقایسه شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج کاملاً در تایید هم هستند که این حاکی از درستی نتایج نرم‌افزار و مدل‌سازی عناصر محدود می‌باشد.



(ب) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نرم‌افزاری



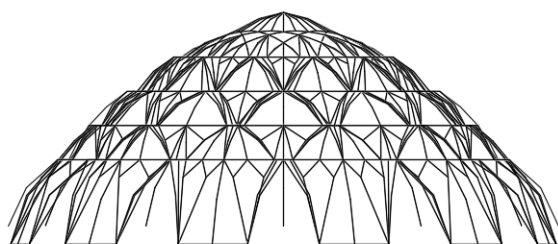
(الف) مدل آزمایشگاهی Gioncu

شکل ۳: مدل آزمایشگاهی انجام‌شده توسط Gioncu و مقایسه با نتایج صحت‌سنجی با روش عناصر محدود [۱۵]

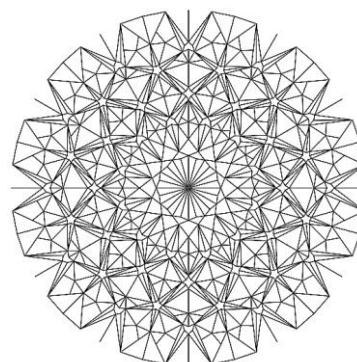
۴- مشخصات نمونه‌های تحلیلی

• ابعاد هندسی و مشخصات مصالح

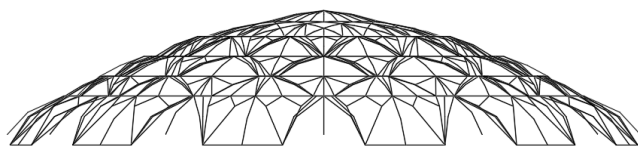
در این مطالعه، گنبد تک‌لایه‌ی فضاکار آسمانه چینی خانه‌ی مقبره شیخ صفی‌الدین اردبیلی با دهانه‌ی $S=10.452$ در پلان دایره‌ای و در پلان بیضی‌شکل و به ترتیب با طول‌های $A=10.452$ و 20.904 متر مورد بررسی قرار گرفته‌است. شکل ۴ پلان و دید از کنار دو مدل مختلف را تحت پارامترهای مختلف نشان می‌دهد. مقاطع اعضا به صورت مقاطع لوله با اتصالات صلب هستند. تنش تسلیم مصالح $F_y = 240 \text{ MPa}$ و مقدار مدول الاستیسیته $E = 200 \text{ GPa}$ فرض شده‌اند.



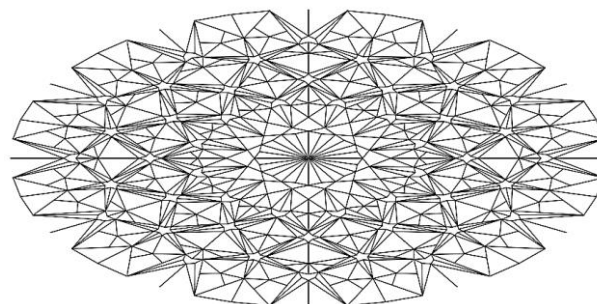
(ب) دید از کنار مدل بیضی‌شکل



(الف) پلان مدل دایره‌ای



(ب) دید از کنار مدل بیضی‌شکل

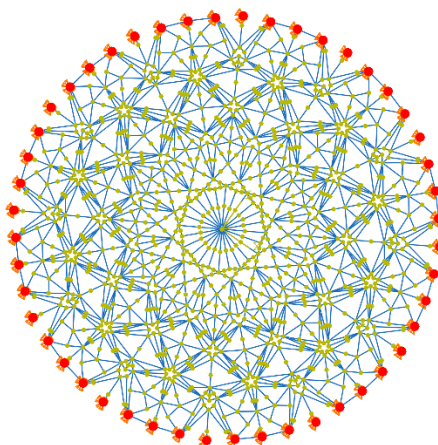


(الف) پلان مدل دایره‌ای

شکل ۴: پلان و دید از کنار دو مدل مختلف از مدل‌های مورد بررسی در این مطالعه

• شرایط تکیه‌گاهی

با توجه به اینکه این گنبد به صورت محیطی توسط تکیه‌گاه‌های زیادی احاطه شده‌است بنابراین تمامی گره‌های بیرونی‌ترین حلقه‌ی گنبد به عنوان تکیه‌گاه ساده در نظر گرفته شده‌اند. شکل ۵ محل تکیه‌گاه‌های این گنبد را نشان می‌دهد.



شکل ۵: نمایش شماتیک تکیه‌گاه‌های در نظر گرفته شده

• انواع بارگذاری گنبد‌های تک‌لایه

در طول عمر سازه، ممکن است انواع بارگذاری‌های مختلف بر روی سازه پیاده شود ولی بارگذاری مورد مطالعه در این پژوهش بارگذاری افزایشی برف می‌باشد. برای بررسی رفتار سازه‌های مورد مطالعه در این پژوهش و برای یافتن فرم بهینه از نظر هندسی، تمامی سازه‌ها به صورت یکسان ابتدا با یک تحلیل استاتیکی تحت بار مرده سپس از طریق یک تحلیل استاتیکی نموی با کنترل تغییر مکان تحت بار افزایشی برف قرار می‌گیرند. با وجود افزایش شیب گنبد‌های مورد مطالعه با افزایش نسبت ارتفاع به دهانه و کاهش میزان بارگذاری طبق آیین‌نامه‌ی بارگذاری، در این پژوهش فرض بر ثابت بودن میزان بارگذاری در تمامی گنبد‌ها و به صورت افزایش نموی بار برف از بار واحد در گره‌ها تا بیشترین بار قابل تحمل در سازه‌ها است زیرا هدف پژوهش یافتن پایدارترین سازه تحت بارگذاری یکسان افزایشی برف در همه‌ی مدل‌ها است. پس بارگذاری‌های در نظر گرفته شده به صورت زیر هستند:

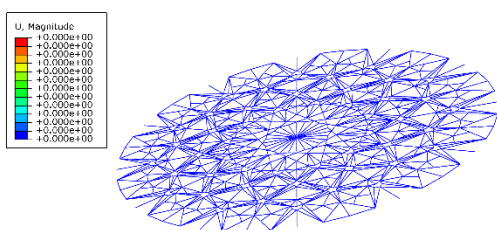
۱. بارگذاری متوازن در گره‌های سازه (بارهای گرهی معادل ناشی از سطح)
۲. بارگذاری نامتوازن در دو جهت متعامد در گره‌های تحت بار طراحی

۵- نامگذاری مدل‌ها

در پژوهش حاضر برای بهتر مشخص شدن مدل‌ها نامگذاری‌های خاصی با توجه به شرایط هندسی و بارگذاری مدل‌ها اختصاص داده شده‌است. کل نامگذاری‌ها از عبارت SLAH-H/S(0.0-0.2-0.4-0.6)-A/B(1:1-2:1)-(SNOW-SX-SY) تبعیت می‌کند که در آن حروف SLAH خلاصه شده‌ی عبارت Single Layer Ardabili Home، S/H به معنی نسبت ارتفاع به دهانه، A/B به معنی نسبت طول به عرض، SNOW به معنی بارگذاری متوازن برف، SX به معنی بارگذاری نامتوازن برف در جهت X، SY به معنی بارگذاری نامتوازن برف در جهت Y می‌باشد. جدول ۱ نامگذاری مدل‌ها و شکل ۶ مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

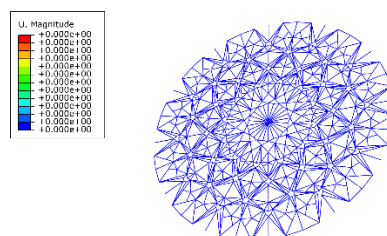
جدول ۱: مدل های مورد استفاده گنبد تک لایه‌ی فضاکار آسمانه چینی خانه‌ی مقبره‌ی شیخ صفی‌الدین اردبیلی

گنبد تک لایه‌ی فضاکار آسمانه چینی خانه‌ی مقبره‌ی شیخ صفی‌الدین اردبیلی (SLAH)				
ردیف	نوع پلان	دهانه بزرگ (متر)	دهانه/ارتفاع	نام اختصاری
۱	دایره‌ای	۱۰/۴۵۲	۰/۰	SLAH-H/S(0.0)-A/B(1:1)
۲	دایره‌ای	۱۰/۴۵۲	۰/۲	SLAH-H/S(0.2)-A/B(1:1)
۳	دایره‌ای	۱۰/۴۵۲	۰/۴	SLAH-H/S(0.4)-A/B(1:1)
۴	دایره‌ای	۱۰/۴۵۲	۰/۶	SLAH-H/S(0.6)-A/B(1:1)
۵	بیضی شکل	۲۰/۹۰۴	۰/۰	SLAH-H/S(0.0)-A/B(2:1)
۶	بیضی شکل	۲۰/۹۰۴	۰/۲	SLAH-H/S(0.2)-A/B(2:1)
۷	بیضی شکل	۲۰/۹۰۴	۰/۴	SLAH-H/S(0.4)-A/B(2:1)
۸	بیضی شکل	۲۰/۹۰۴	۰/۶	SLAH-H/S(0.6)-A/B(2:1)



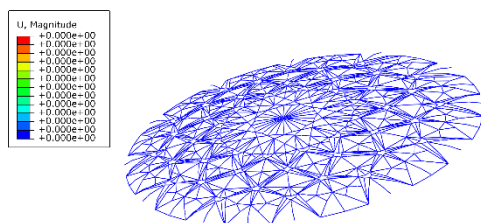
ODB: Buckle_00_21_SNOW.odb Abaqus/Standard 6.14-2 Fri Jun 28 02:09:36 Iran Daylight T
 Step: Step-1
 Increment: 0; Step Time = 0.000
 Primary Var: U, Magnitude
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

ب) مدل SLAH-H/S(0.0)-A/B(2:1)



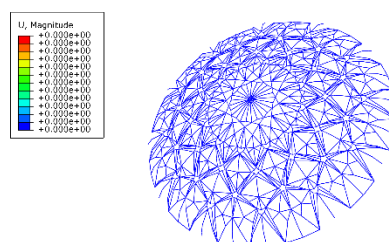
ODB: Buckle_00_11_SNOW.odb Abaqus/Standard 6.14-2 Thu Jun 27 20:38:0
 Step: Step-1
 Increment: 0; Step Time = 0.000
 Primary Var: U, Magnitude
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

الف) مدل SLAH-H/S(0.0)-A/B(1:1)



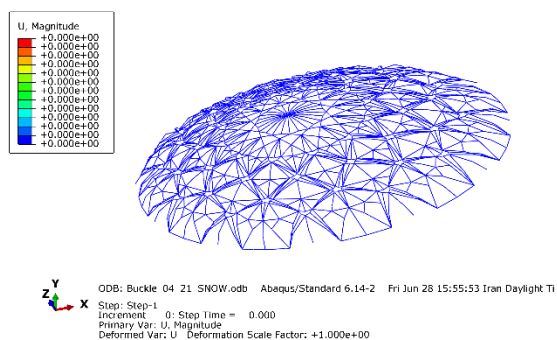
ODB: buckle_02_21_SNOW.odb Abaqus/Standard 6.14-2 Fri Jun 28 03:07:00 Iran Daylight
 Step: Step-1
 Increment: 0; Step Time = 0.000
 Primary Var: U, Magnitude
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

د) مدل SLAH-H/S(0.2)-A/B(2:1)

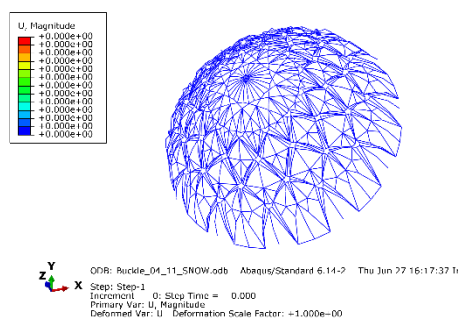


ODB: Buckle_02_11_SNOW.odb Abaqus/Standard 6.14-2 Thu Jun 27 18:23:16 Iran
 Step: Step-1
 Increment: 0; Step Time = 0.000
 Primary Var: U, Magnitude
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

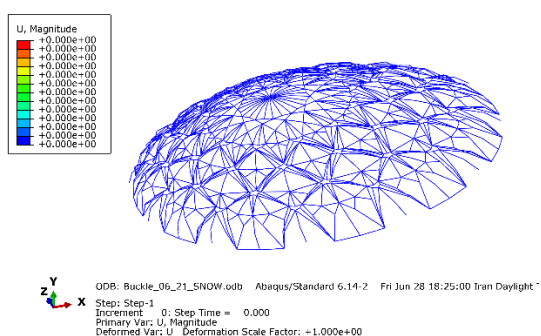
ج) مدل SLAH-H/S(0.2)-A/B(1:1)



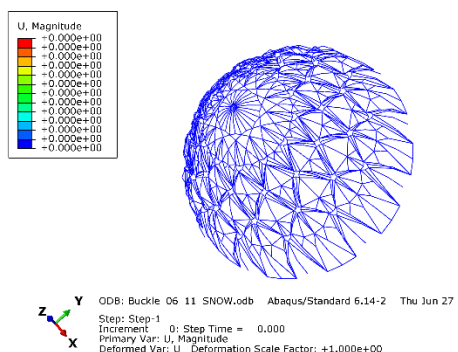
و) مدل SLAH-H/S(0.4)-A/B(2:1)



ه) مدل SLAH-H/S(0.4)-A/B(1:1)



ج) مدل SLAH-H/S(0.6)-A/B(2:1)

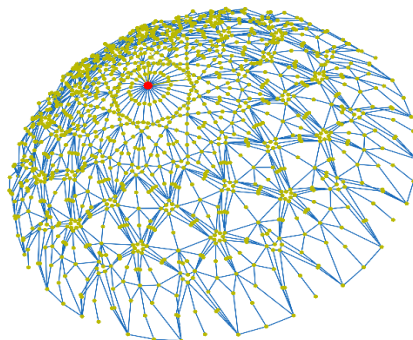


ز) مدل SLAH-H/S(0.6)-A/B(1:1)

شکل ۶: شکل شماتیک مدل‌های مورد مطالعه در این پژوهش

۶- نقطه‌ی کنترل بار-جابجایی

به منظور مقایسه‌ی بهتر نتایج حاصل از جابجایی‌ها، نقطه‌ی مشترکی از همه‌ی سازه‌ها باید به عنوان نقطه‌ی کنترل جابجایی در نظر گرفته شود. در این مطالعه، بالاترین نقطه‌ی گنبد یعنی تاج گنبد به عنوان نقطه‌ی کنترل سازه انتخاب شده‌است. شکل ۷ نمایش شماتیکی از نقطه‌ی کنترل سازه است.



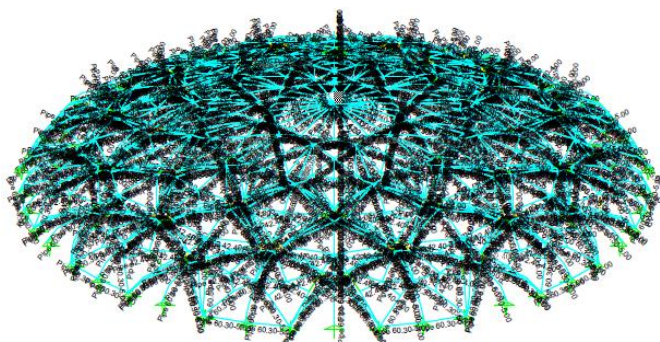
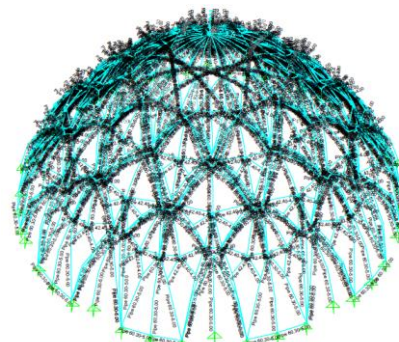
شکل ۷: نمایش شماتیک نقطه‌ی کنترل جابجایی سازه

۷- طراحی مدل‌ها

پس از تاشه‌پردازی و لایه‌بندی مدل‌ها در نرم‌افزار Rhino ceros و افزونه‌ی Grasshopper، مدل‌ها به نرم‌افزار SAP2000 [۱۶] انتقال می‌یابند. با توجه به شرایط خاص هندسی مدل‌ها بارگذاری مدل‌ها، میزان بارگذاری مدل‌ها نیز متفاوت خواهد بود. از طرفی با در نظر گرفتن اینکه بتوان نتایج تحلیل پایداری را در مدل‌های مختلف نسبت به هم مورد ارزیابی و مقایسه قرار داد، طراحی برای تمامی مدل‌ها دارای نیپ‌بندی یکسانی می‌باشند و تمامی مدل‌ها با استفاده از آیین‌نامه‌ی ASCE 7-10 [۱۷] تحلیل و بر اساس روش LFRD طراحی شده‌اند. جدول ۲ تیپ‌بندی مدل‌های طراحی شده و شکل ۸ طراحی دو مدل از سازه را در نرم‌افزار SAP2000 نشان می‌دهد. در طراحی مدل‌ها، بار مرده ۵۰ کیلوگرم بر مترمربع بدون در نظر گرفتن وزن خود سازه، بار برف زمین با در نظر گرفتن منطقه‌ی با برف زیاد به مقدار ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع، بار حرارتی با در نظر گرفتن تغییرات حرارت محل ساختگاه $\pm 25^{\circ}C$ ، بار باد مطابق با آیین‌نامه‌ی بارگذاری مبحث ششم مقررات ملی ساختمان [۱۸] برای بارگذاری گنبدها و اثر زلزله مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ زلزله [۱۹] در نظر گرفته می‌شود. مقاطع اعضا به صورت دایره‌ی توخالی هستند. در طراحی مدل‌ها از مشخصات مصالح ST37 استفاده شده و نسبت پواسن برابر ۰/۳ فرض شده‌است. در مورد اعمال اثر زلزله، مطالعه‌ی منابع مختلف و آیین‌نامه سازه‌های فضاکار [۲۰]، نشان می‌دهد که برای طراحی لرزه‌ای سازه‌های فضاکار غیرمتعارف لازم است تا تحلیل تاریخچه‌ی زمانی انجام شود. طبق استاندارد ۲۸۰۰ زلزله، در تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی باید حداقل سه نوع شتابنگاشت در نظر گرفته شود. زلزله‌های انتخابی با توجه به بزرگای زلزله مابین ۵ تا ۷ ریشتر (کمینه بزرگای قابل خسارت و بیشینه بزرگای قابل تولید توسط گسل‌های فعال)، نوع گسل امتدادلغز راستگرد، فاصله از گسل ۱۰ تا ۲۰ کیلومتر، خاک نوع II (ترکیبی از خاک نوع II و III با سرعت امواج برشی ۳۷۵ تا ۷۵۰ متر بر ثانیه) و بدون حساسیت به پالس [۲۱]، سه شتابنگاشت انتخاب می‌شوند. با توجه به نتایج حاصل، سه شتابنگاشت Anza، Parkfield و Livermore انتخاب شدند. مشخصات این شتابنگاشت‌ها در جدول ۳ آورده شده‌است.

جدول ۲: مقاطع طراحی مدل‌ها

مقاطع طراحی با تیپ‌بندی یکسان برای تمامی مدل‌ها (میلی متر)		
مقاطع	شعاع	ضخامت
Pipe-60.30-5.00	30.15	5.00
Pipe-42.40-4.00	21.20	4.00

ب) گنبد با نسبت $A/B=2:1$ الف) گنبد با نسبت $A/B=1:1$

شکل ۸: طراحی گنبدها در نرم‌افزار SAP2000

جدول ۳: مشخصات شتابنگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل تاریخی زمانی (برگرفته از سایت [www. https://peer.berkeley.edu/](https://peer.berkeley.edu/))

Accelerograms	Year	Station Name	Magnitude	PGA-H1	PGA-H2	PGA-V	RSN
Parkfield	1966	Temblor pre-1969	6.19	0.356	0.2727	0.13726	33
Livermore	1980	Dell Valle Dam (Toe)	5.42	0.04	0.05	0.023	219
Anza	1980	Anza-Pinyon Flat	5.2	0.122	0.11	0.0465	225

۸- زمان تناوب اصلی و مودهای کمانشی سازه‌فضاکار تک‌لایه‌ی آسمانه چینی خانیه‌ی مقبره شیخ صفی-الدین اردبیلی

بعد از مدل‌سازی در نرم‌افزار Abaqus CAE برای تمامی مدل‌ها تحت بارگذاری مرده و برف، تحلیل فرکانسی ویژه مقدار انجام شد و فرکانس‌های اصلی سازه به دست آمد. جدول ۴ زمان تناوب اصلی مدل‌ها را تحت تحلیل فرکانسی با نرم‌افزار Abaqus CAE تحت بار مرده و برف نمایش می‌دهد.

جدول ۴: زمان تناوب اصلی مدل‌ها تحت تحلیل فرکانسی ویژه مقدار تحت بار مرده و زنده در نرم‌افزار Abaqus CAE

SLAH-H/S(0.6)-A/B(2:1)	SLAH-H/S(0.4)-A/B(2:1)	SLAH-H/S(0.2)-A/B(2:1)	SLAH-H/S(0.0)-A/B(2:1)	SLAH-H/S(0.6)-A/B(1:1)	SLAH-H/S(0.4)-A/B(1:1)	SLAH-H/S(0.2)-A/B(1:1)	SLAH-H/S(0.0)-A/B(1:1)	نام مدل زمان تناوب اصلی سازه (ثانیه)
0.765	0.501	0.357	0.398	0.416	0.289	0.145	0.227	تحت بار متوازن برف
0.682	0.466	0.346	-	0.377	0.257	0.143	-	تحت بار نامتوازن برف در جهت X
0.669	0.464	0.342	-	0.377	0.257	0.143	-	تحت بار نامتوازن برف در جهت Y

۹- تحلیل خرابی سازه‌های گنبدی تک‌لایه

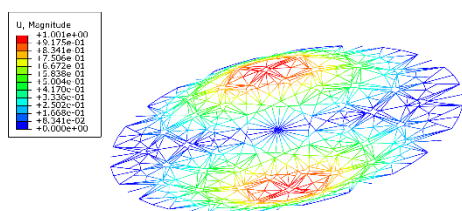
با توجه به اینکه در سازه‌های فضاکار عمده بارهای تاثیرگذار در ناپایداری سازه‌ها بار برف و بار قائم زلزله می‌باشد بنابراین تحلیل‌های انجام شده در این مطالعه به صورت اعمال بار مرده و سپس اعمال بار افزایشی برف خواهد بود. برای تحلیل تحت بار افزایشی برف، ابتدا سازه تحت آنالیز خطی کمانشی ویژه مقدار (Linearized Eigen Value Buckling Analysis) قرار می‌گیرد سپس با اعمال ناکاملی ۰/۰۰۵ به عنوان ضریبی از مود کمانشی اول که از آیین‌نامه‌ی سازه‌های فضاکار (نشریه شماره ۴۰۰) [۲۰] گرفته شده‌است، سازه

تحت آنالیز طول-کمان قرار می‌گیرد. به این صورت که ابتدا بار مرده به صورت استاتیکی با در نظر گیری غیرخطی‌های هندسی و مصالح به سازه اعمال می‌شود سپس بار نموی برف در یک تحلیل تغییرمکان کنترل با استفاده از روش Riks با قابلیت رسم نمودار نیرو-تغییرمکان را قبل و بعد از نقطه‌ی خرابی با در نظر گیری غیرخطی‌های هندسی و مصالح، اعمال می‌شود. سپس در صورت وجود فروجهش دینامیکی (Snap Through) در نمودار نیرو-جابجایی تحلیل دینامیکی در محل نقطه‌ی حدی بر روی سازه انجام می‌شود تا نقطه‌ی خرابی واقعی سازه تعیین شود. جدول ۵ بارهای بحرانی کمانشی مدل‌ها را با تحلیل Linearized Eigen Value Buckling Analysis تحت اثر بارگذاری متوازن و نامتوازن برف نشان می‌دهد.

جدول ۵: مودهای کمانش مدل‌ها تحت اثر بارگذاری متوازن برف

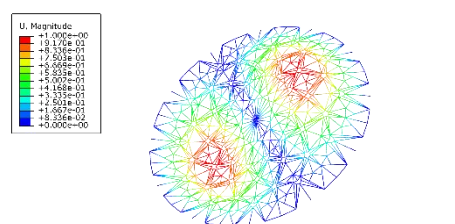
بار بحرانی تحلیل خطی‌سازی شده‌ی کمانش تحت بارگذاری متوازن و نامتوازن برف (LPF)								
SLAH-H/S(0.6)-A/B(2:1)	SLAH-H/S(0.4)-A/B(2:1)	SLAH-H/S(0.2)-A/B(2:1)	SLAH-H/S(0.0)-A/B(2:1)	SLAH-H/S(0.6)-A/B(1:1)	SLAH-H/S(0.4)-A/B(1:1)	SLAH-H/S(0.2)-A/B(1:1)	SLAH-H/S(0.0)-A/B(1:1)	نام مدل / نوع بارگذاری
2882.6	3676.8	2170	-126.6	4764	5204	6608	-142.8	برف متوازن
3804.4	4307.6	2294	-	5965	5966	7396	-	برف نامتوازن در جهت X
3495.5	4328.2	2727	-	5965	5966	7396	-	برف نامتوازن در جهت Y

با توجه به اینکه در سازه‌های فضاکار تک لایه مود غالب مود اول می‌باشد لذا برای انجام آنالیز پایداری به روش طول کمان با توجه به بار افزایشی برف، ناکاملی را (در صورت نیاز به اعمال ناکاملی) به مود اول اعمال می‌کنیم. شکل‌های شکل ۹، شکل ۱۰ و شکل ۱۱ به ترتیب شکل مودهای کمانشی را تحت بارگذاری‌های متوازن برف، نامتوازن برف در جهت X و نامتوازن برف در جهت Y نشان می‌دهد.



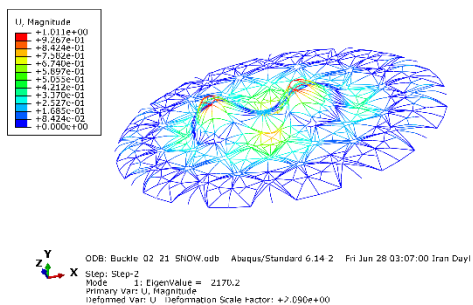
ORR: Buckle_00_11_SNOW.odb Abaqus/Standard 6.14.2 Fri Jun 28 02:09:36 Iran Daylight 11
Step: Step 2
Mode: 1: EigenValue = -126.66
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +7.090e+00

ب) مدل SLAH-H/S(0.0)-A/B(2:1)

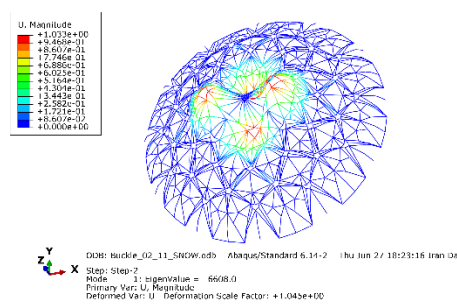


ODB: Buckle_00_11_SNOW.odb Abaqus/Standard 6.14.2 Thu Jun 27 20:38:03 Iran Daylight
Step: Step 2
Mode: 1: EigenValue = -142.81
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.045e+00

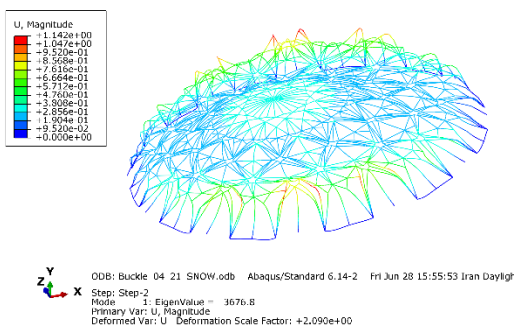
الف) مدل SLAH-H/S(0.0)-A/B(1:1)



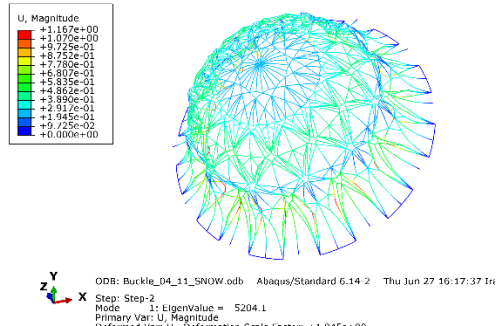
د) مدل SLAH-H/S(0.2)-A/B(2:1)



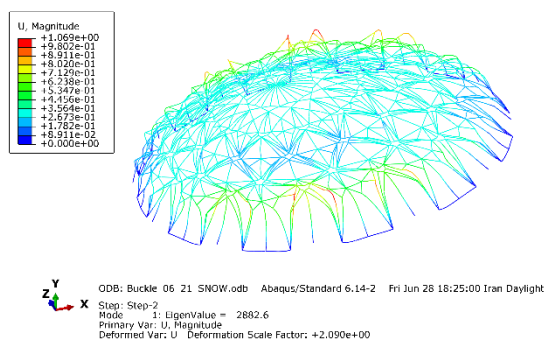
ج) مدل SLAH-H/S(0.2)-A/B(1:1)



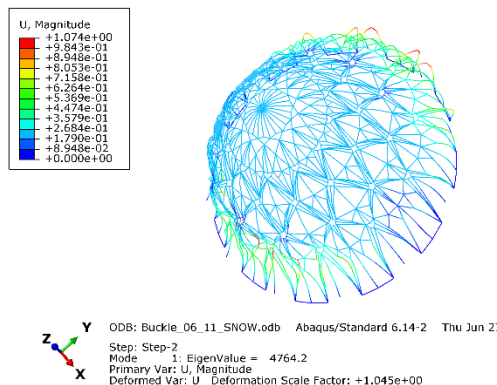
و) مدل SLAH-H/S(0.4)-A/B(2:1)



ه) مدل SLAH-H/S(0.4)-A/B(1:1)

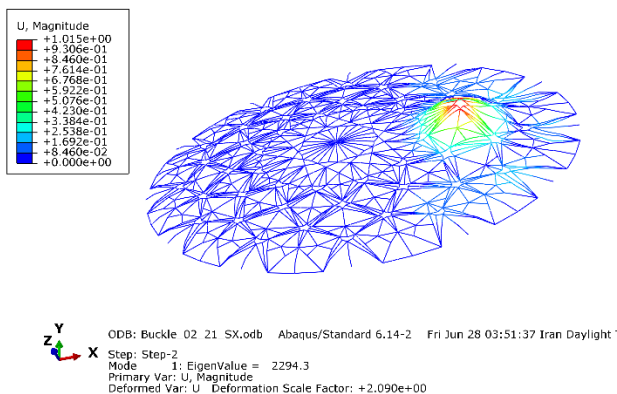


ح) مدل SLAH-H/S(0.6)-A/B(2:1)

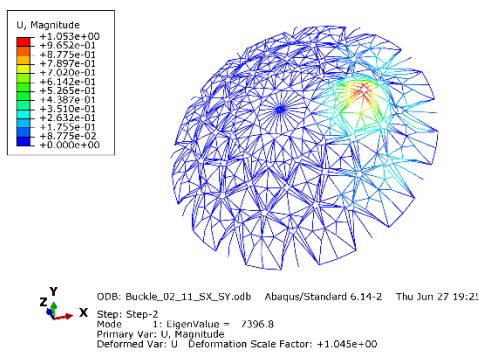


ز) مدل SLAH-H/S(0.6)-A/B(1:1)

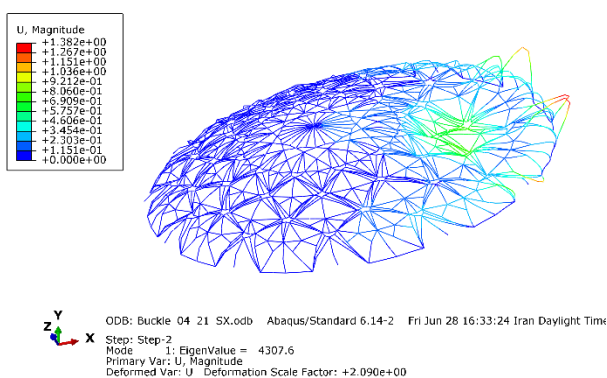
شکل ۹: مودهای کمانشی اول مدل‌ها تحت بارگذاری متوازن برف



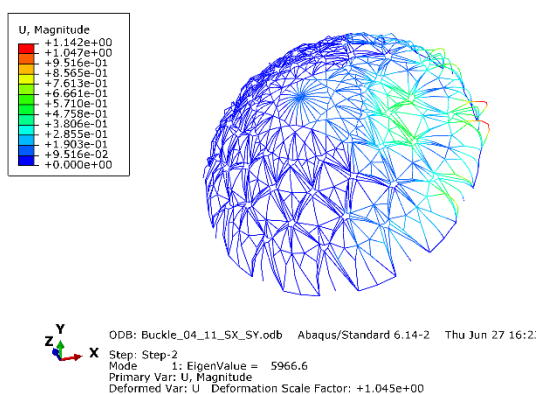
د) مدل SLAH-H/S(0.2)-A/B(2:1)



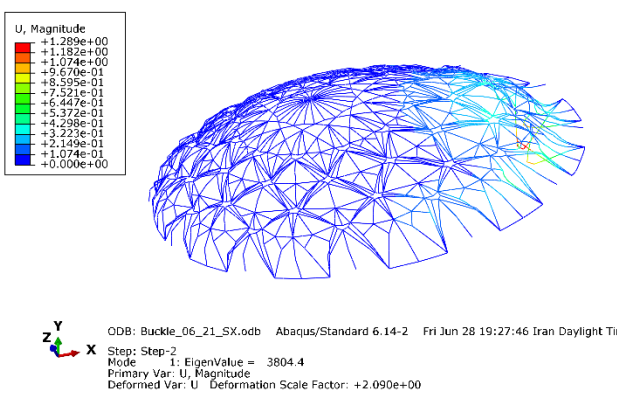
ج) مدل SLAH-H/S(0.2)-A/B(1:1)



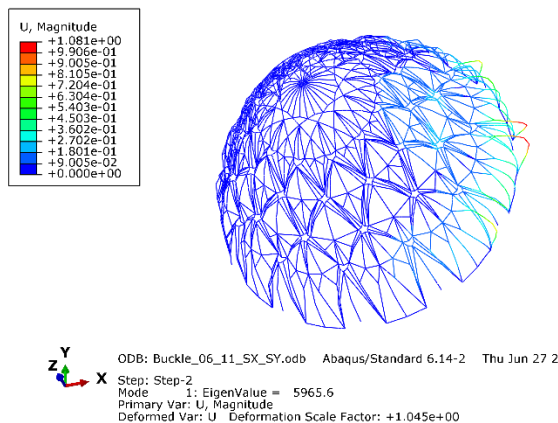
و) مدل SLAH-H/S(0.4)-A/B(2:1)



ه) مدل SLAH-H/S(0.4)-A/B(1:1)

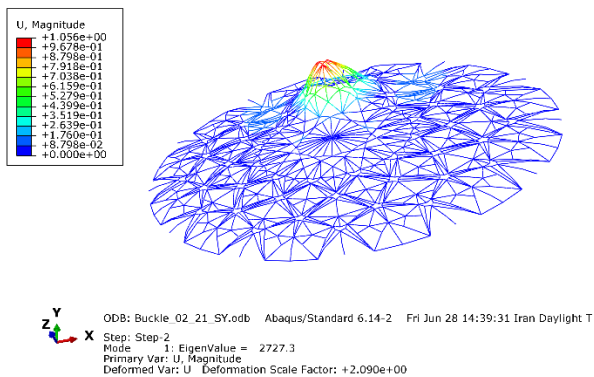


ح) مدل SLAH-H/S(0.6)-A/B(2:1)

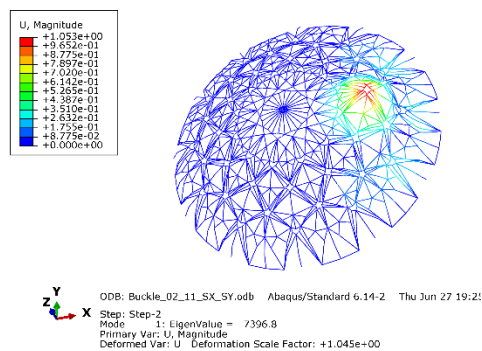


ز) مدل SLAH-H/S(0.6)-A/B(1:1)

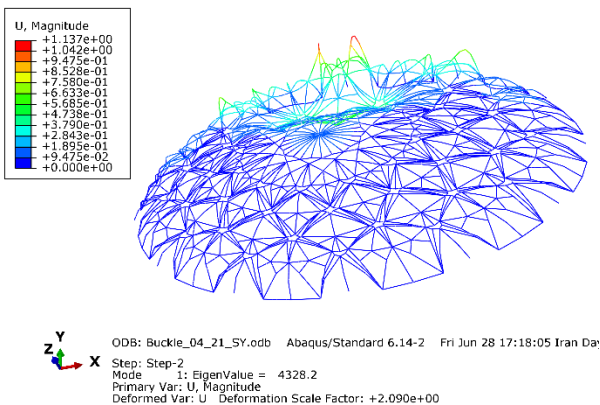
شکل ۱۰: مودهای کمانشی اول مدل‌ها تحت بارگذاری نامتوازن برف در جهت X



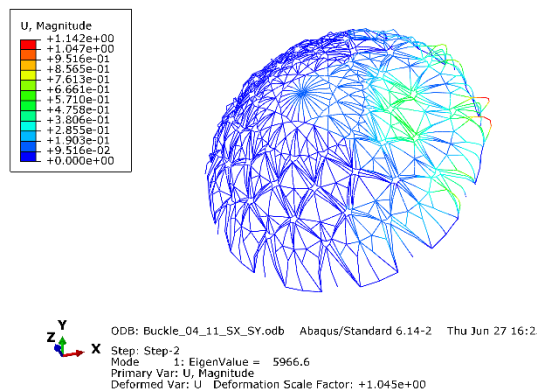
د) مدل SLAH-H/S(0.2)-A/B(2:1)



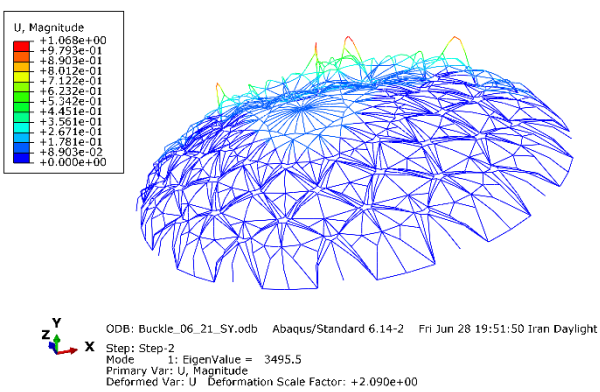
ج) مدل SLAH-H/S(0.2)-A/B(1:1)



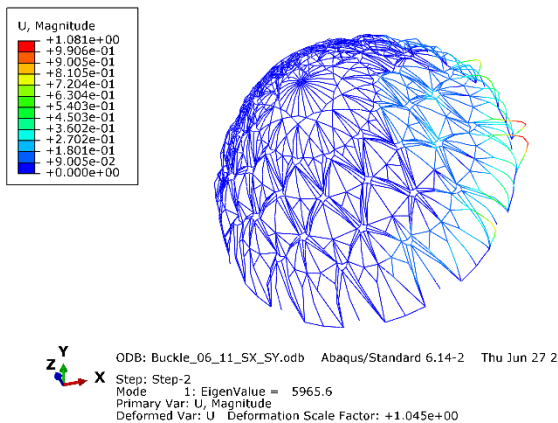
و) مدل SLAH-H/S(0.4)-A/B(2:1)



ه) مدل SLAH-H/S(0.4)-A/B(1:1)



ح) مدل SLAH-H/S(0.6)-A/B(2:1)



ز) مدل SLAH-H/S(0.6)-A/B(1:1)

شکل ۱۱: مودهای کمانشی اول مدل‌ها تحت بارگذاری نامتوازن برف در جهت Y

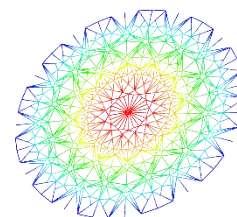
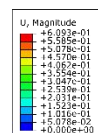
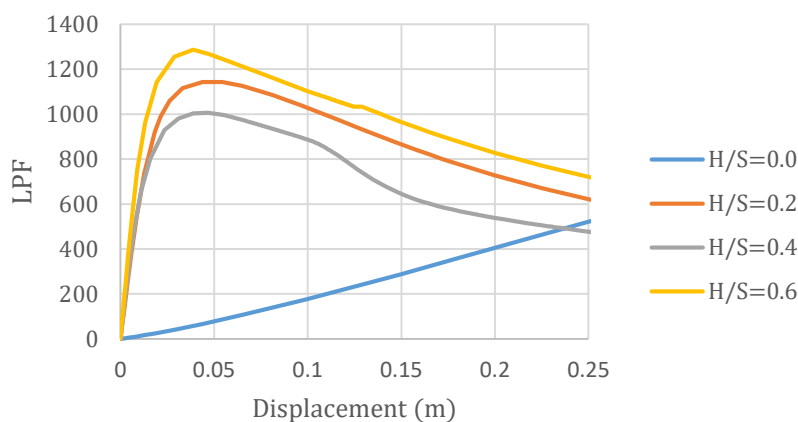
۱۰- نتایج تحلیل پایداری مدل‌ها

با توجه به پارامترهای مورد تحلیل، برای تک تک پارامترها می‌توان به طور جداگانه نمودارهایی را معرفی کرد که به صورت زیر می‌توان نشان داد:

- اثر نسبت ارتفاع به دهانه (H/S)

برای کنترل این اثر همانطور که پیش تر نیز گفته شد چهار نسبت $0/0$ ، $0/2$ ، $0/4$ و $0/6$ تحت سه نوع بارگذاری متوازن برف، نامتوازن برف در جهت X و نامتوازن برف در جهت Y تحت بررسی قرار گرفتند. در تمامی مدل ها ناپایداری از نوع حدی است و نقطه‌ی دوشاخگی و یا پدیده‌ی فروجهش دینامیکی مشاهده نمی‌شود بنابراین نیازی به انجام تحلیل‌های دینامیکی جهت تعیین مسیر پس‌گمانشی نیست. طبق مطالعات انجام‌شده بر روی گنبد‌های تک‌لایه‌ی فضاکار با تاشه‌ی دیاماتیک، مشخص شده‌است که با افزایش نسبت ارتفاع به دهانه ظرفیت باربری سازه نیز افزایش پیدا می‌کند [۳]. شکل‌های ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵ و شکل ۱۶ اثر نسبت ارتفاع به دهانه را تحت بارگذاری‌های مختلف نشان می‌دهد. همچنین برای نسبت $A/B = 1:1$ بارگذاری نامتوازن برف در هر دو جهت نامتوازن یکسان می‌باشد. همچنین برای نسبت $H/S = 0.0$ مطابق با آیین نامه بارگذاری مبحث ششم مقررات ملی ساختمان (بارهای وارد بر ساختمان) بارگذاری نامتوازن برف تعریف نمی‌شود.

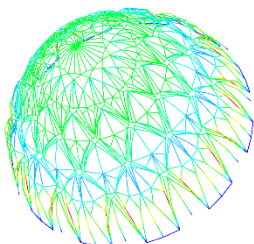
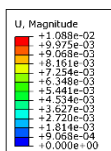
SNOW LOADING - A/B = 1:1



ODB: Riks_00_11_SNOW.odb Abaqus/Standard 6.14-2 Thu Jun 27 21:00
Step: Step-2
Increment: 59; Arc Length = 473.1
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

ب) نمودار بار-تغییر مکان مدل‌های با نسبت $H/S = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6$ و $A/B = 1:1$ تحت بارگذاری متوازن برف

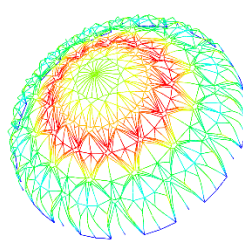
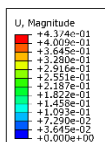
الف) تغییر شکل سازه‌ی SLAH-H/S(0.0)-A/B(1:1)-SNOW



ODB: Riks_06_11_SNOW.odb Abaqus/Standard 6.14-2 Sat Jun 29
Step: Step-2
Increment: 14; Arc Length = 388.2
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

ه) تغییر شکل سازه‌ی

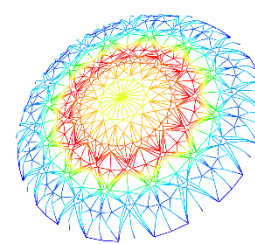
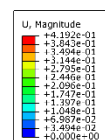
SLAH-H/S(0.6)-A/B(1:1)-SNOW



ODB: Riks_04_11_SNOW.odb Abaqus/Standard 6.14-2 Fri Jun 21
Step: Step-2
Increment: 53; Arc Length = 1.9634E+04
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

د) تغییر شکل سازه‌ی

SLAH-H/S(0.4)-A/B(1:1)-SNOW



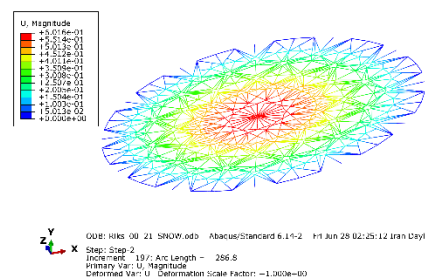
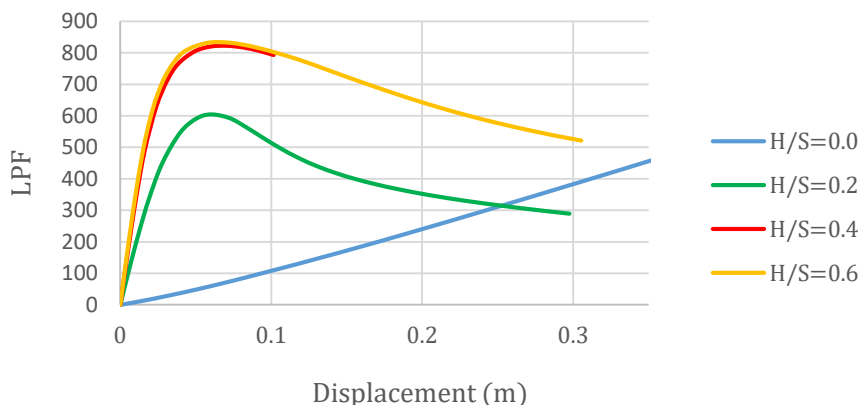
ODB: Riks_02_11_SNOW.odb Abaqus/Standard 6.14-2 Fri Jun 28 21:25
Step: Step-2
Increment: 43; Arc Length = 1.0734E+04
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e-00

ج) تغییر شکل سازه‌ی

SLAH-H/S(0.2)-A/B(1:1)-SNOW

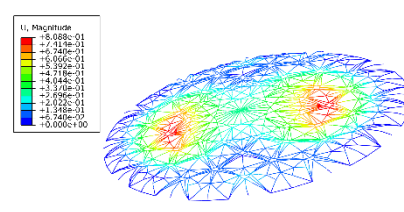
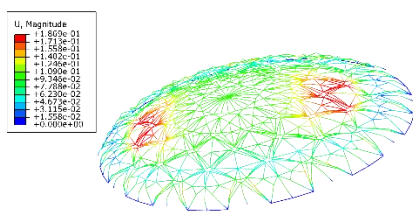
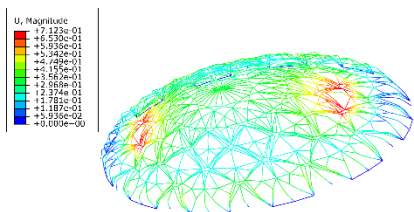
شکل ۱۲: مقایسه‌ی نحوه‌ی تغییر شکل و نمودار بار-تغییر مکان مدل‌های با نسبت $H/S = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6$ و $A/B = 1:1$ تحت بارگذاری متوازن برف

SNOW LOADING - A/B=2:1



ب) نمودار بار-تغییر مکان مدل‌های با نسبت $H/S = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6$ و $A/B = 2:1$ تحت بارگذاری متوازن برف

الف) تغییر شکل سازه
SLAH-H/S(0.0)-A/B(2:1)-SNOW



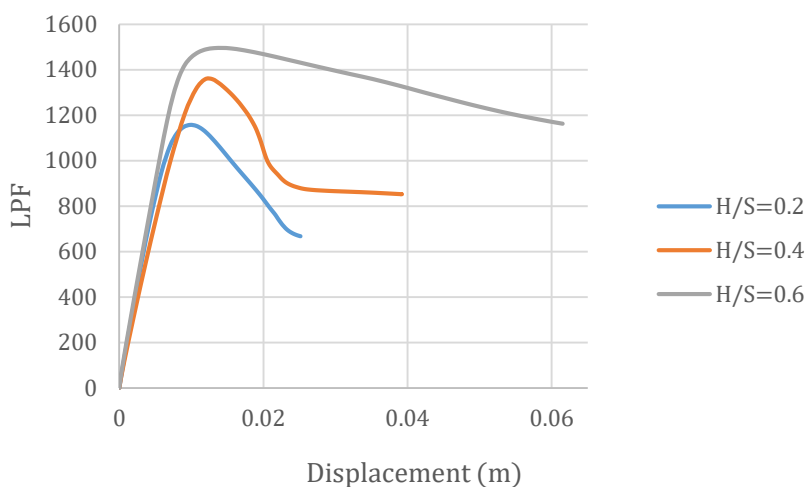
ه) تغییر شکل سازه
SLAH-H/S(0.6)-A/B(2:1)-SNOW

د) تغییر شکل سازه
SLAH-H/S(0.4)-A/B(2:1)-SNOW

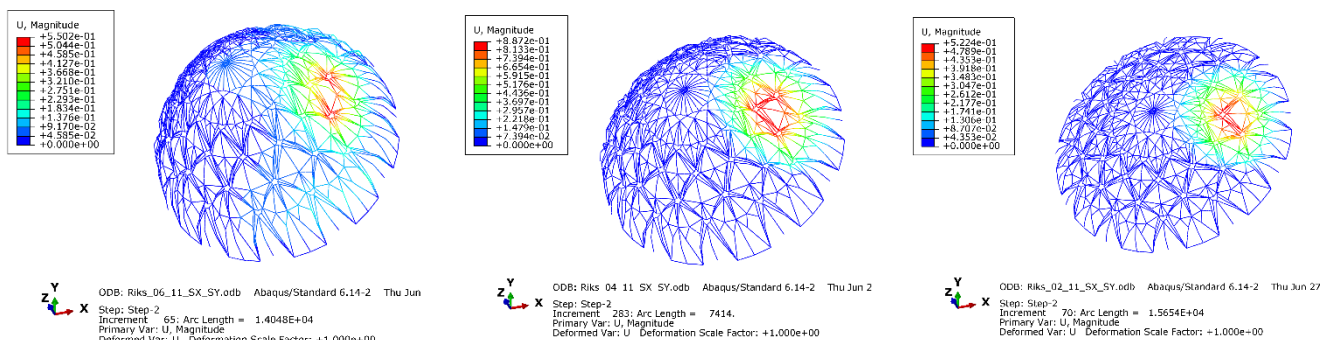
ج) تغییر شکل سازه
SLAH-H/S(0.2)-A/B(2:1)-SNOW

شکل ۱۳: مقایسه‌ی نحوه‌ی تغییر شکل و نمودار بار-تغییر مکان مدل‌های با نسبت $H/S = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6$ و $A/B = 2:1$ تحت بارگذاری متوازن برف

SX & SY LOADING - A/B=1:1



ب) نمودار بار-تغییر مکان مدل‌های با نسبت $A/B = 1:1$ و $H/S = 0.2, 0.4, 0.6$ تحت بارگذاری نامتوازن برف در جهت‌های X و Y



ه) تغییر شکل سازه‌ی

SLAH-H/S(0.6)-A/B(1:1)-SX-SY

د) تغییر شکل سازه‌ی

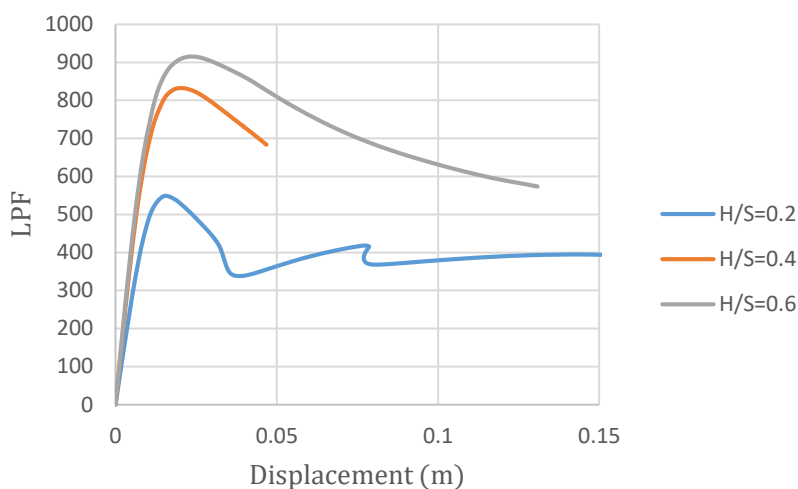
SLAH-H/S(0.4)-A/B(1:1)-SX-SY

ج) تغییر شکل سازه‌ی

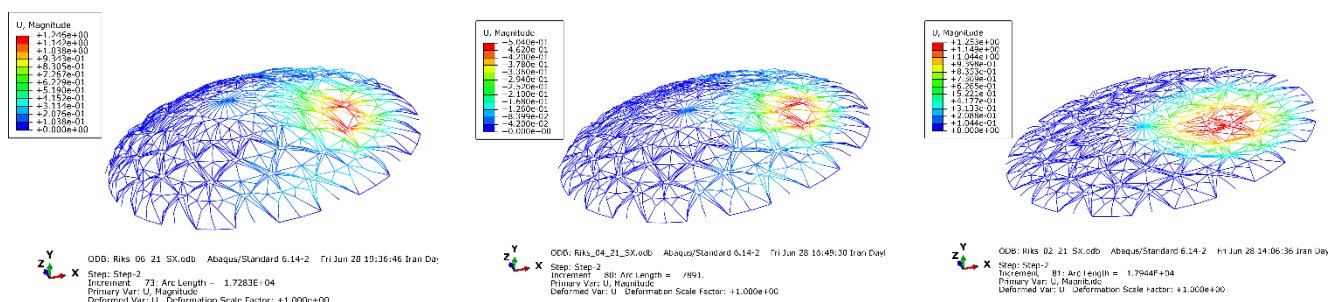
SLAH-H/S(0.2)-A/B(1:1)-SX-SY

شکل ۱۴: مقایسه‌ی نحوه‌ی تغییر شکل و نمودار بار-تغییر مکان مدل‌های با نسبت $A/B = 1:1$ و $H/S = 0.2, 0.4, 0.6$ تحت بارگذاری نامتوازن برف در جهت‌های X و Y

SX LOADING - A/B=2:1



ب) نمودار بار-تغییر مکان مدل‌های با نسبت $A/B = 2:1$ و $H/S = 0.2, 0.4, 0.6$ تحت بارگذاری نامتوازن برف در جهت X



ه) تغییر شکل سازه‌ی

SLAH-H/S(0.6)-A/B(2:1)-SX

د) تغییر شکل سازه‌ی

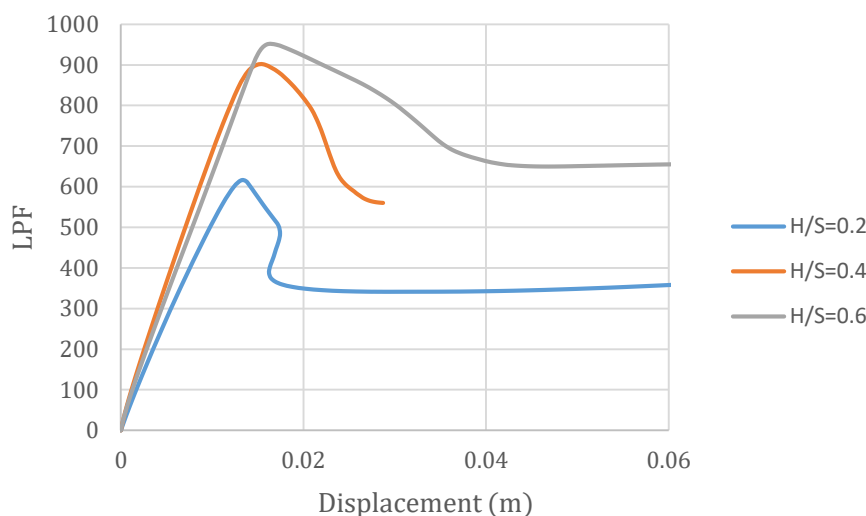
SLAH-H/S(0.4)-A/B(2:1)-SX

ج) تغییر شکل سازه‌ی

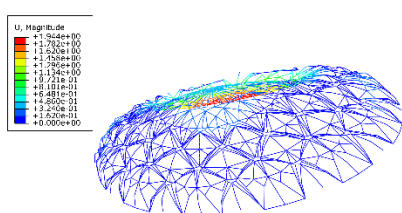
SLAH-H/S(0.2)-A/B(2:1)-SX

شکل ۱۵: مقایسه‌ی نحوه‌ی تغییر شکل و نمودار بار-تغییر مکان مدل‌های با نسبت $A/B = 2:1$ و $H/S = 0.2, 0.4, 0.6$ تحت بارگذاری نامتوازن برف در جهت X

SY LOADING - A/B=2:1



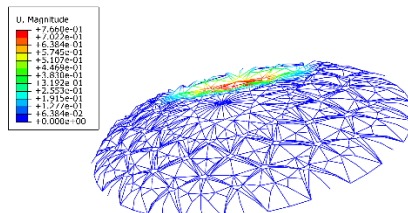
ب) نمودار بار-تغییر مکان مدل‌های با نسبت $H/S = 0.2, 0.4, 0.6$ و $A/B = 2:1$ تحت بارگذاری نامتوازن برف در جهت Y



ODB: Riks 06 21 SY.odb Abaqus/Standard 6.14.2 Fri Jun 28 20:01:07 Iran Daylight
Step: Step 2
Increment: 164; Arc Length = 1.0871E+04
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00

ه) تغییر شکل سازه‌ی

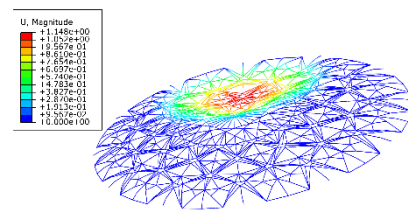
SLAH-H/S(0.6)-A/B(2:1)-SY



ODB: Riks 04 21 SY.odb Abaqus/Standard 6.14.2 Fri Jun 28 17:24:01 Iran Daylight
Step: Step 2
Increment: 47; Arc Length = 8927.
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: 1.000e+00

د) تغییر شکل سازه‌ی

SLAH-H/S(0.4)-A/B(2:1)-SY



ODB: Riks 02 21 SY.odb Abaqus/Standard 6.14.2 Fri Jun 28 15:00:33 Iran Daylight
Step: Step 2
Increment: 96; Arc Length = 1.0510E+04
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: 1.000e+00

ج) تغییر شکل سازه‌ی

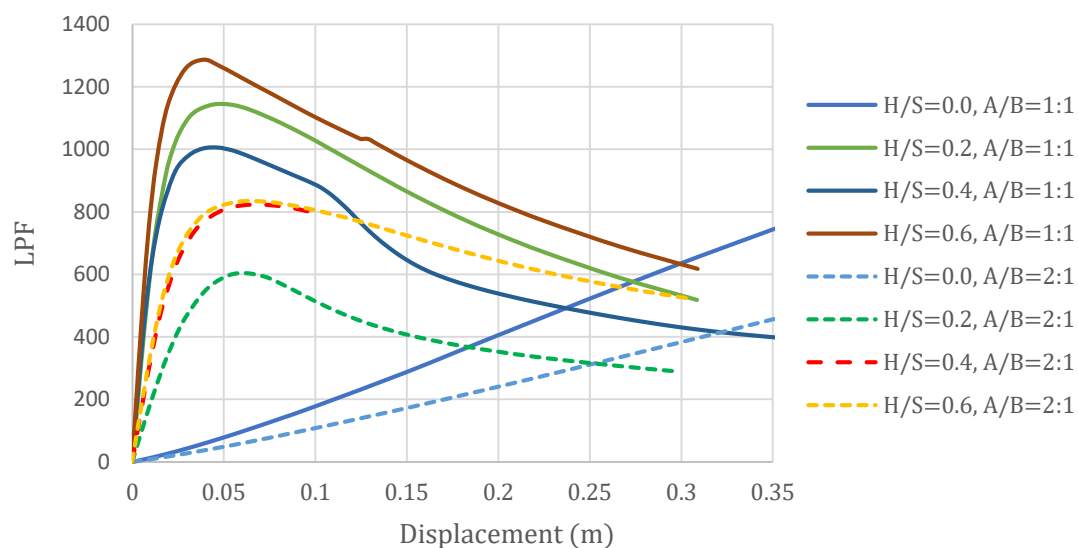
SLAH-H/S(0.2)-A/B(2:1)-SY

شکل ۱۶: مقایسه‌ی نحوه‌ی تغییر شکل و نمودار بار-تغییر مکان مدل‌های با نسبت $H/S = 0.2, 0.4, 0.6$ و $A/B = 2:1$ تحت بارگذاری نامتوازن برف در جهت Y

• اثر نسبت طول به عرض (A/B)

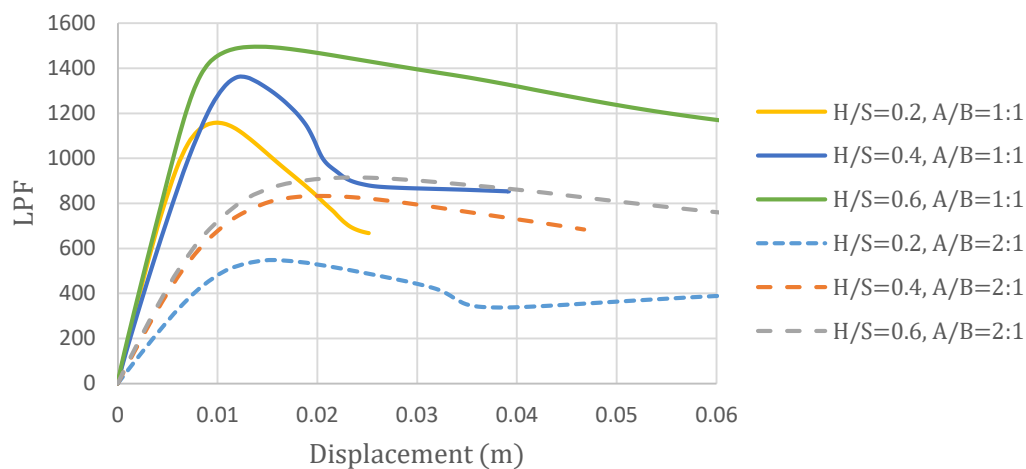
جهت بررسی اثر نسبت طول به عرض همانطور که پیش‌تر نیز گفته شد دو نسبت ۱:۱ و ۲:۱ تحت سه نوع بارگذاری متوازن برف، نامتوازن برف در جهت X و نامتوازن برف در جهت Y تحت بررسی قرار گرفتند. در تمامی مدل‌ها ناپایداری از نوع حدی است و نقطه‌ی دوشاخگی و یا پدیده‌ی فروجهش دینامیکی مشاهده نمی‌شود بنابراین نیازی به انجام تحلیل‌های دینامیکی جهت تعیین مسیر پس‌کمانشی نیست. شکل‌های شکل ۱۷، شکل ۱۸ و شکل ۱۹ اثر نسبت طول به عرض را تحت بارگذاری‌های مختلف نشان می‌دهد.

SNOW LOADING

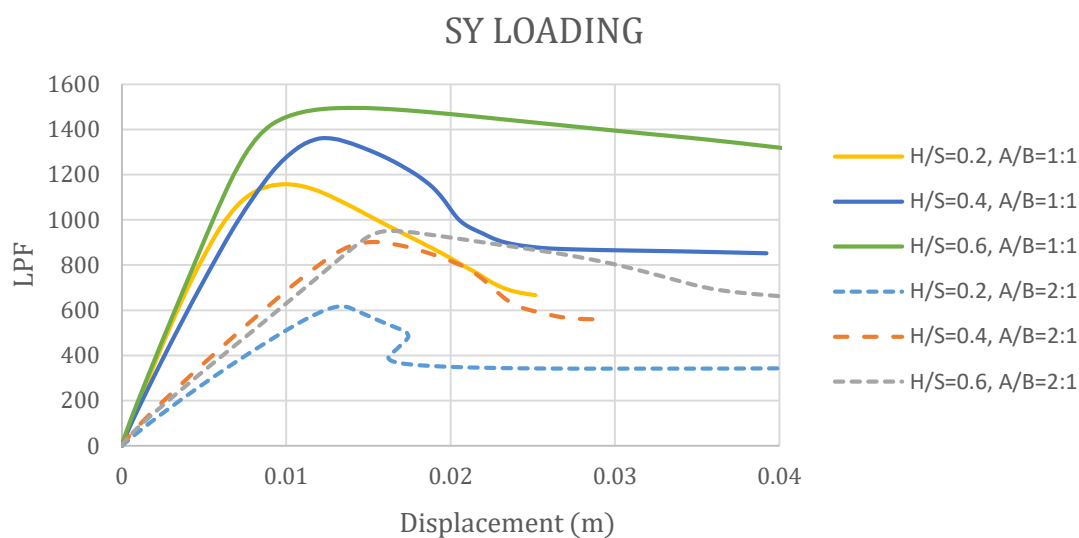


شکل ۱۷: مقایسه‌ی نمودار بار-تغییر مکان مدل‌ها با نسبت $H/S = 0.1, 0.2, 0.4, 0.6$ و $A/B = 1:1, 2:1$ با بارگذاری متوازن برف

SX LOADING



شکل ۱۸: مقایسه‌ی نمودار بار-تغییر مکان مدل‌ها با نسبت $H/S = 0.2, 0.4, 0.6$ و $A/B = 1:1, 2:1$ با بارگذاری نامتوازن برف در جهت X

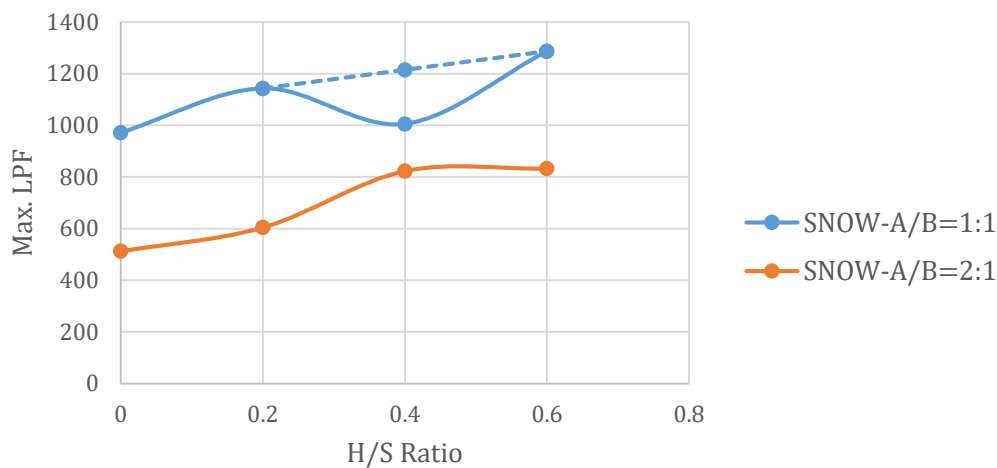


شکل ۱۹: مقایسه‌ی نمودار بار-تغییر مکان مدل‌ها با نسبت $H/S = 0.2, 0.4, 0.6$ و $A/B = 1:1, 2:1$ با بارگذاری نامتوازن برف در جهت Y

• روند تغییر با در نظرگیری همزمان پارامترهای بارگذاری، A/B و H/S

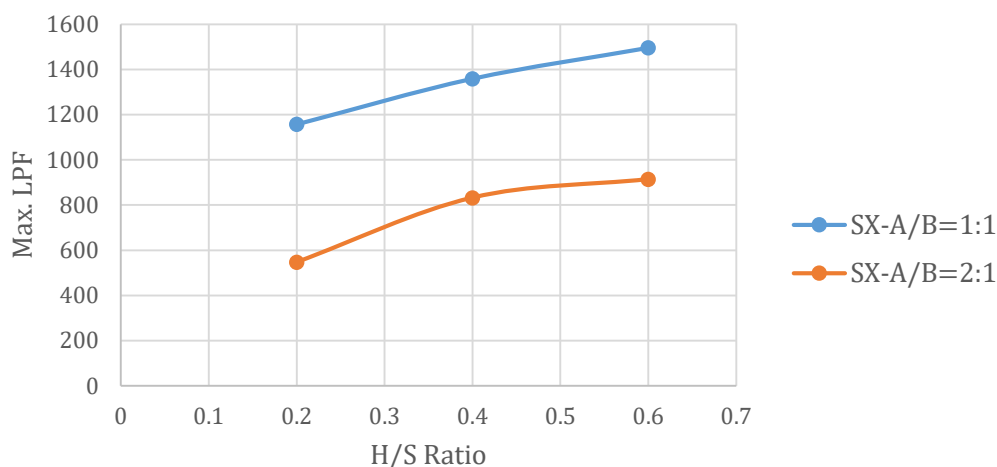
برای نمایش بهتری روند تاثیر پارامترها بر ظرفیت باربری سازه از نمودارهای روند کاهش و افزایشی مطابق شکل‌های شکل ۲۰، شکل ۲۱ و شکل ۲۲ استفاده می‌شود.

Trends of Max LRFs - Snow Loading



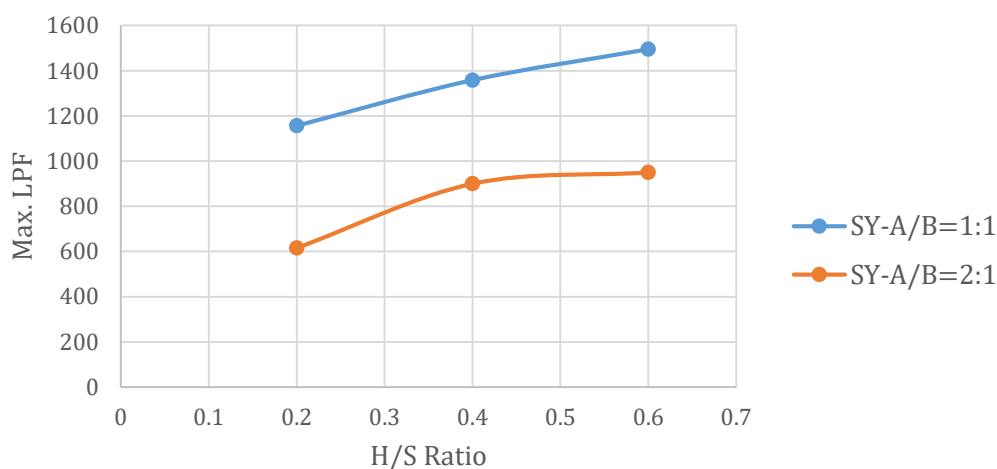
شکل ۲۰: مقایسه‌ی روند افزایشی ماکزیمم LRF در بارگذاری متوازن برف با در نظرگیری پارامترهای A/B و H/S

Trends of Max LPFs - SX Loading



شکل ۲۱: مقایسه‌ی روند افزایشی ماکزیمم LPF در بارگذاری نامتوازن برف در جهت X با در نظرگیری پارامترهای H/S و A/B

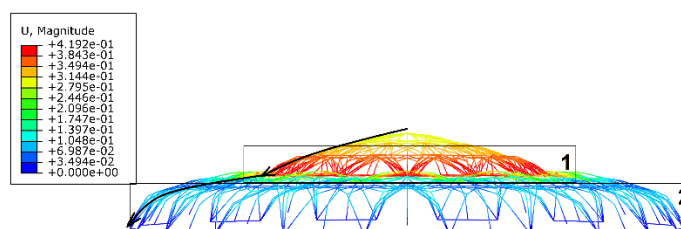
Trends of Max LPFs - SY Loading



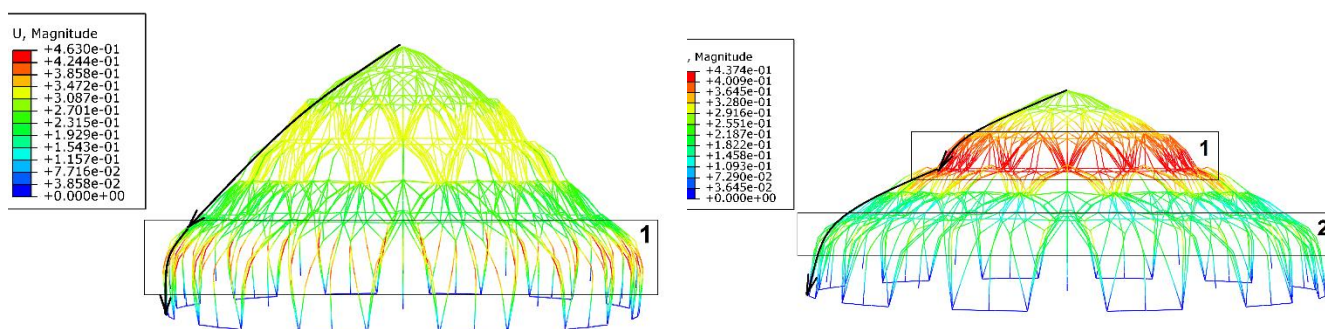
شکل ۲۲: مقایسه‌ی روند افزایشی ماکزیمم LPF در بارگذاری نامتوازن برف در جهت Y با در نظرگیری پارامترهای H/S و A/B

شکل‌های شکل ۲۰، شکل ۲۱ و شکل ۲۲ روند تدریجی ماکزیمم LPF را در سازه‌های تحت مطالعه نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای این اشکال مشخص می‌شود که سازه با نسبت $A/B=1:1$ نسبت به سازه با نسبت $A/B=2:1$ در هر نوع بارگذاری برف ظرفیت باربری بیشتری دارد. همچنین در هر دو نوع نسبت A/B ، نسبت $H/S=0.6$ ظرفیت باربری بیشتری دارد. به عبارتی می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش نسبت H/S و در نسبت $A/B=1:1$ بیشترین ظرفیت باربری مشاهده می‌شود. تنها در نسبت $H/S=0.4$ و $A/B=1:1$ ظرفیت باربری سازه از روند صعودی (مطابق نمودار خط‌چین در شکل ۲۰) پیروی نکرده و کاهش ظرفیت باربری مشاهده می‌شود. علت این امر را می‌توان به هندسه‌ی خاص سازه ربط داد. مسیرهای انتقال نیرو به تکیه‌گاه‌ها و تعداد اعضایی که انتقال نیرو را انجام می‌دهند نقش موثری در تعیین ظرفیت باربری اعضای سازه دارند. با توجه به هندسه‌ی خاص سازه‌ی مورد بررسی و وجود اعضای

ستاره شکل در تاشه ی گنبد، مسیرهای انتقال نیرو را دچار تغییراتی می کند. همانطور که در شکل ۲۳ (ب) مشخص است مسیر انتقال نیرو در این حالت به دلیل وجود اعضای ستاره ای شکل افقی دچار تغییراتی شده و به طور کامل از طریق تمامی اعضا به تکیه گاه ها منتقل نمی شود و برخی از اعضا در ناحیه ی کادر مستطیلی ۱ به سمت قسمت زیرین گنبد منحرف می شوند؛ در ادامه ی این عمل، به دلیل نیاز به فضای بیشتر در قسمت زیرین گنبد، اعضای منحرف شده نیروی رانشی به سمت بیرون به اعضای موجود در کادر مستطیلی ۲ وارد می کنند. پیامد این عمل، جابجایی بیش از حد اعضای سازه ای و عدم انتقال مناسب بار به تکیه گاه هاست که ظرفیت سازه را در نسبت $H/S=0.4$ کاهش می دهد. فرآیندی که ذکر شد در شکل ۲۳ (الف) در نسبت $H/S=0.2$ برای مسیر انتقال نیرو و کادر مستطیلی ۱ رخ می دهد ولی شدت آن کم تر است و نیز در کادر مستطیلی ۲ جابجایی اعضای سازه ای به دلیل محصورشدگی زیاد توسط تکیه گاه ها کم تر است که این امر اجازه ی تغییر شکل های زیاد را به اعضای سازه نمی دهد که پیامد آن تحمل زیاد نیرو توسط این نسبت ارتفاع به دهانه است. در شکل ۲۳ (ج) در نسبت ارتفاع به دهانه ی $H/S=0.6$ مسیر انتقال نیرو از وضعیت بهتری برخوردار است و در کادر مستطیلی ۱ همگی اعضا در انتقال نیرو به تکیه گاه ها شرکت می کنند.



الف) مسیر انتقال بار در گنبد $H/S(0.2)-A/S(1:1)-SNOW$

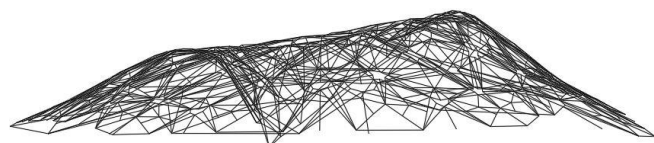


ب) مسیر انتقال بار در گنبد $H/S(0.4)-A/S(1:1)-SNOW$ ج) مسیر انتقال بار در گنبد $H/S(0.6)-A/S(1:1)-SNOW$

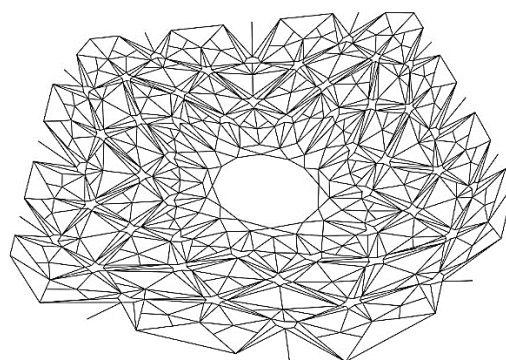
شکل ۲۳: نمایش شماتیک جابجایی و مسیر انتقال بار در گنبد های مذکور مورد مطالعه

با توجه به تفاسیر انجام شده و نتایج مشاهده شده برای سازه فضاکار تک لایه ی آسمانه چینی خانه ی مقبره ی شیخ صفی الدین اردبیلی نتیجه می شود که ظرفیت این نوع سازه ها به نسبت های H/S و A/S و نیز مسیر انتقال نیرو به تکیه گاه ها یا به عبارتی دیگر هندسه ی سازه وابسته است. برای اصلاح و بهبود هندسه ی سازه ای می توان به ایده های بر مبنای سازه های فضاکار فرم آزاد با تاشه پردازی سنتی و پیکربندی مدرن رسید که هم با ایده پردازی معماری مطابقت داشته باشد و تلفیقی از معماری سنتی و مدرن باشد و هم از نظر زیبایی و مهندسی سازه ایرادات هندسی ناشی از اجزای ستاره ای شکل را برطرف نماید. برای برطرف کردن ایرادات هندسی می توان اجزای ستاره ای شکل را به نحوی در مسیر انتقال نیرو قرار داد. هندسه ی تاشه ی فرم آزاد آسمانه چینی خانه ی مقبره ی شیخ صفی الدین اردبیلی پیشنهادی مطابق شکل ۲۴ که توسط نرم افزار Rhino ceros و افزونه ی Grasshopper به صورت پارامتریک ایجاد شده است، نشان

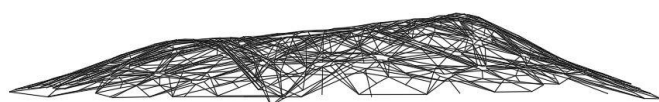
داده شده است. از مزایای سازه فرم آزاد نسبت به مدل های گنبدی، کاهش وزن سازه به دلیل کاهش طول المان ها و نیز قابلیت پوشش سطح بزرگتر است.



(ب) دید از کنار سازه فضاکار فرم آزاد پیشنهادی با $H/S=0.3$



(الف) پلان سازه فضاکار فرم آزاد پیشنهادی



(ب) دید از کنار سازه فضاکار فرم آزاد پیشنهادی با $H/S=0.2$



(ب) دید از کنار سازه فضاکار فرم آزاد پیشنهادی با $H/S=0.1$

شکل ۲۴: پلان و دید از کنار سازه فضاکار فرم آزاد پیشنهادی برای سه نسبت ارتفاع به دهانه $H/S=0.1, 0.2, 0.3$

همانطور که پیش تر نیز بیان شد برای بهینه سازی فرم سازه فضاکار تک لایه ای آسمانه چینی خانه ی مقبره ی شیخ صفی الدین اردبیلی نیاز به تغییر هندسه بود و برای حل این مشکل هموار کردن مسیرهای انتقال نیروها به تکیه گاه ها یکی از روش های پیشنهادی بود. با اصلاح زوایای المان های ستاره ای شکل در سازه فضاکار تک لایه ای آسمانه چینی خانه ی مقبره ی شیخ صفی الدین اردبیلی که در ابتدا به صورت افقی بودند می توان به بهبود ظرفیت باربری سازه فضاکار کمک شایانی کرد. همچنین با این عمل به راحتی می توان سازه ی فرم آزاد را شکل داد.

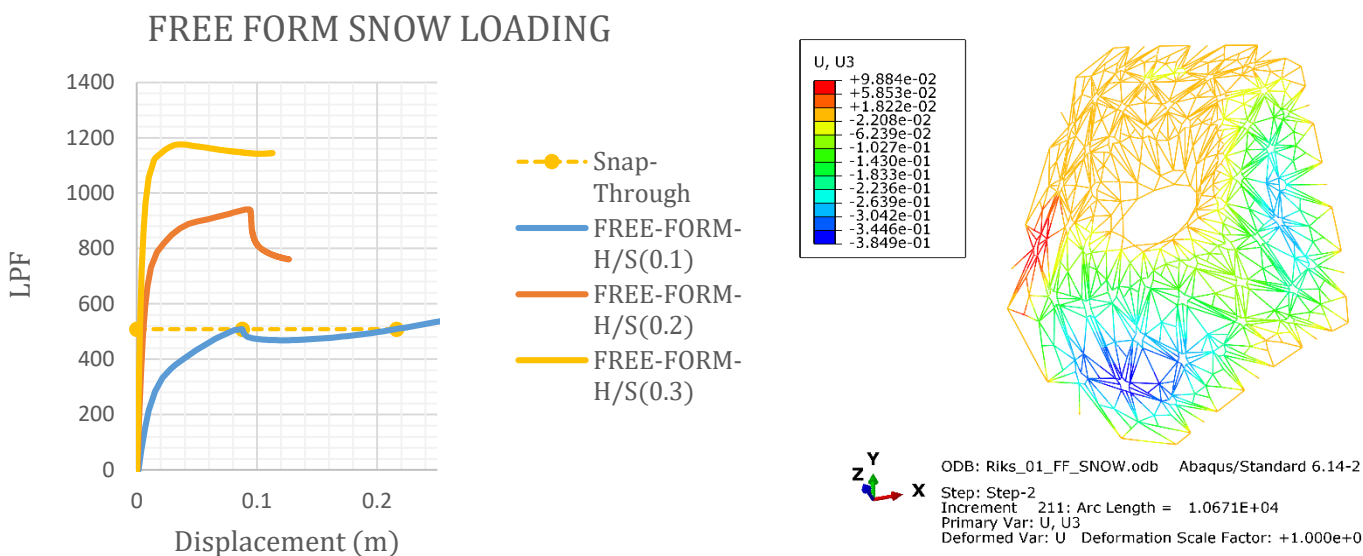
برای تحلیل پایداری سازه فضاکار فرم آزاد پیشنهادی و یافتن بهینه ترین نسبت ارتفاع به دهانه سه نسبت $0/1$ ، $0/2$ و $0/3$ پیشنهاد می شود. بارگذاری این سازه تنها به صورت بار مرده و بار افزایشی متوازن برف صورت با توجه به مبحث ششم مقررات ملی ساختمان (بارهای وارد بر ساختمان) صورت می گیرد چرا که برای بارگذاری نامتوازن برف نیاز به انجام آزمایش بر روی سازه در تونل باد برای تعیین بارهای نامتوازن برف به دلیل پیچیدگی سازه یا مدل سازی سازه با انجام تحلیل های CFD می باشد که خود هزینه ی محاسباتی بالایی را می طلبد.

سازه ی فرم آزاد پیشنهادی با تیپ بندی یکسان همانند سازه فضاکار تک لایه ای آسمانه چینی خانه ی مقبره ی شیخ صفی الدین اردبیلی طراحی شده است. با وجود اینکه طول اکثر اعضای سازه در حالت فرم آزاد کوچک تر می شود و به نسبت آن وزن سازه پایین تر می آید ولی به دلیل در فرم شدن هندسه ی سازه برخی از اعضا افزایش طول می دهند که بحث افزایش لاغری اعضا را شامل می شود که باید در حین طراحی در نظر گرفته شود. در سازه های فضاکار بهترین نسبت لاغری برای اعضای فشاری در طراحی، مابین 80 و 120 است [۱].

برای تحلیل تمامی فرضیات مطابق فرض های صورت گرفته در تحلیل سازه فضاکار تک لایه ای آسمانه چینی خانه ی مقبره ی شیخ صفی الدین اردبیلی می باشد. تنها تفاوت در نقاط تکیه گاهی است که در سازه فضاکار فرم آزادی پیشنهادی گره های پیرامونی موجود در

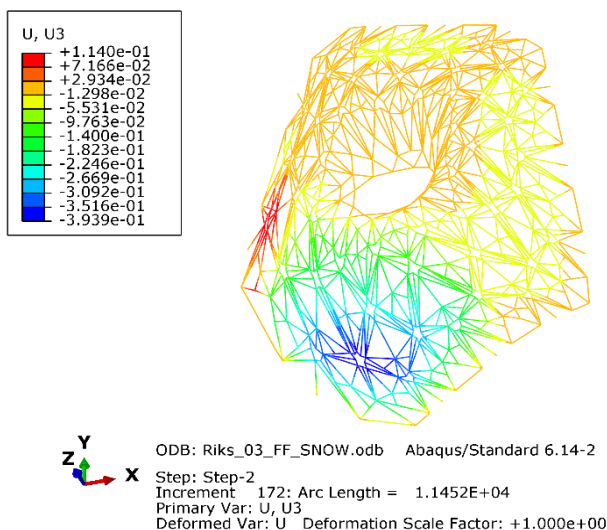
حفره‌ی میانی شکل ۲۴ (الف) نیز به عنوان تکیه‌گاه ساده در نظر گرفته شده‌اند. تکیه‌گاه‌های فرض شده در گره‌های پیرامونی حفره‌ی میانی توسط ستون درختی ایجاد خواهد شد.

شکل ۲۵ نمودار بار-تغییرمکان سازه فضاکار فرم‌آزاد پیشنهادی و نحوه‌ی تغییرشکل آن در تحلیل استاتیکی تحت بار افزایشی برف را نشان می‌دهد. در تمامی مدل‌ها ناپایداری از نوع حدی است و نقطه‌ی دوشاخگی و مشاهده نمی‌شود. در مدل FREE-FORM-H/S(0.1) در بارحدی $LPF = 508.452$ فروجهش دینامیکی مشاهده می‌شود که برای تایید یا رد کردن مسیر پس‌خرابی نیاز به انجام تحلیل دینامیکی است. باتوجه به شکل ... (ب) مشخص است که سازه با نسبت $H/S=0.3$ ظرفیت باربری بیشتری دارد.

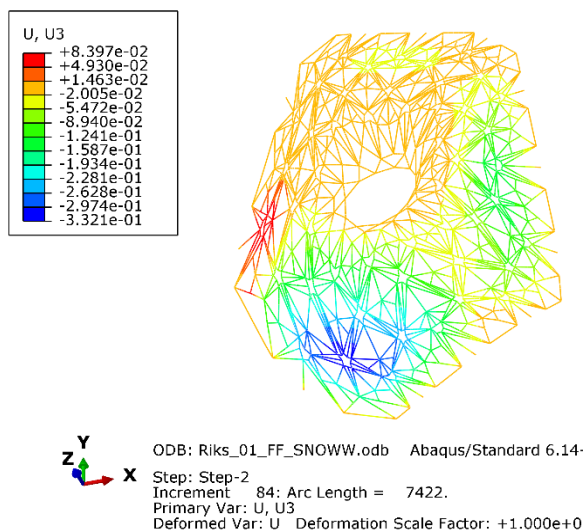


(ب) نمودار بار-تغییرمکان سازه‌های فرم‌آزاد

(الف) تغییر شکل مدل FREE-FORM-H/S(0.1)



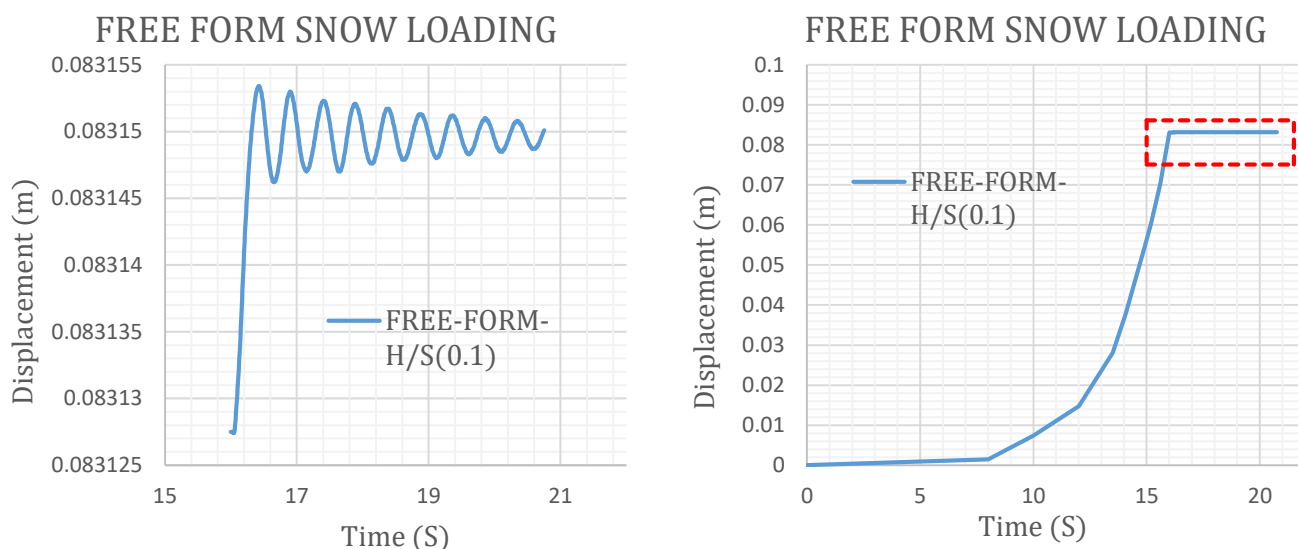
(د) تغییر شکل مدل FREE-FORM-H/S(0.3)



(ج) تغییر شکل مدل FREE-FORM-H/S(0.2)

شکل ۲۵: نمودار بار-تغییرمکان سازه فضاکار فرم‌آزاد پیشنهادی و نحوه‌ی تغییرشکل آن در تحلیل استاتیکی تحت بار افزایشی برف

برای انجام تحلیل دینامیکی و تعیین صحت مسیر پس کمانش در مدل FREE-FORM-H/S(0.1) در بارحدی $LPF = 508.452$ ، ابتدا باید یک تحلیل خطی ویژه مقدار انجام داد تا فرکانس‌های طبیعی سازه‌ی تحت کرنش به دست آید. سپس ضرایب رایلی، نمو زمانی برای تحلیل غیرخطی دینامیکی، زمان تناوب طبیعی مود اول سازه را تعیین نمود [۱]. شکل ۲۶ نمودار زمان-تغییر مکان تاج سازه‌فضاکار فرم‌آزاد پیشنهادی را نشان می‌دهد.



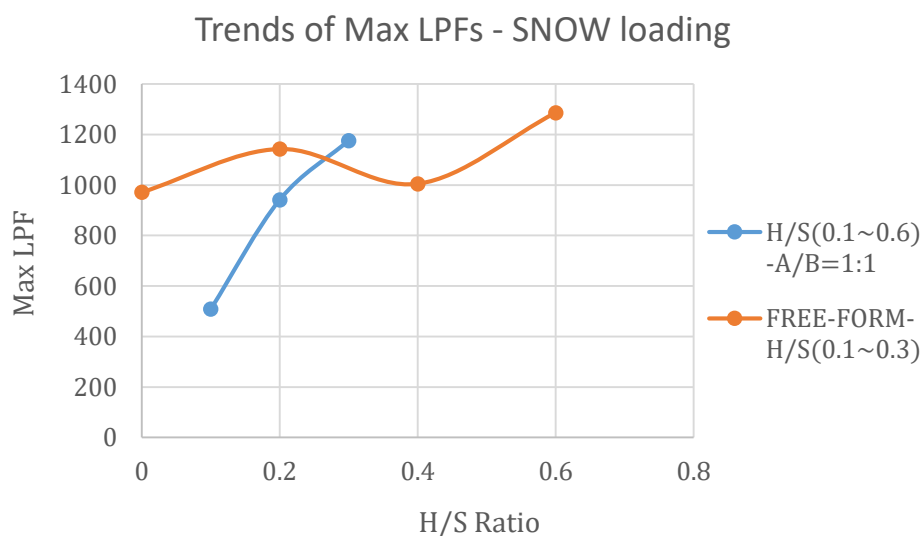
ب) بزرگنمایی قسمت داخل کادر خط چین حالت الف

الف) تحلیل دینامیکی مدل FREE-FORM-H/S(0.1)

شکل ۲۶: نمودار زمان-تغییر مکان تاج سازه‌فضاکار فرم‌آزاد پیشنهادی

با توجه به شکل ۲۶ (الف و ب) سازه بعد از فروجهش حالت پایدار خود را دوباره حفظ کرده و به تغییر مکان $0.08325/0$ متر همگرا می‌شود بنابراین مسیر پس خرابی قابل قبول است.

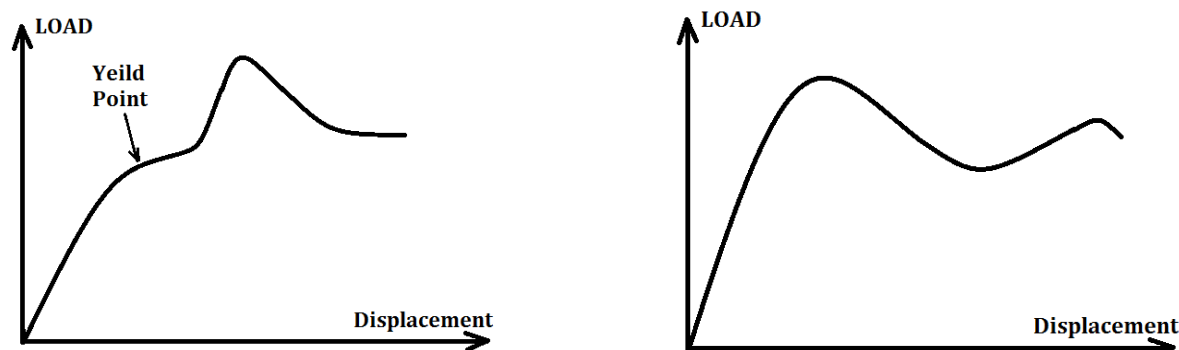
با توجه به اینکه در تحلیل سازه‌فضاکار تک‌لایه‌ی آسمانه چینی خانه‌ی مقبره‌ی شیخ صفی‌الدین اردبیلی نسبت $A:B=1:1$ از ظرفیت باربری بیشتری نسبت به $A/B=2:1$ برخوردار است، مطابق شکل ... مشاهده می‌شود که در نسبت‌های ارتفاع به دهانه‌ی کوچک-تر ظرفیت باربری سازه‌فضاکار تک‌لایه‌ی آسمانه چینی خانه‌ی مقبره‌ی شیخ صفی‌الدین اردبیلی بیشتر از سازه‌فضاکار فرم‌آزاد پیشنهادی است ولی در نسبت‌های بالاتر این روند برعکس می‌شود. همچنین قابل ذکر است که سطح پوشش فضای سازه‌فضاکار تک‌لایه‌ی آسمانه چینی خانه‌ی مقبره‌ی شیخ صفی‌الدین اردبیلی برابر با $85/88$ مترمربع و سطح پوشش سازه‌فضاکار فرم‌آزاد پیشنهادی برابر $145/24$ مترمربع می‌باشد. این در حالی است که تعداد المان‌ها برابر و تیب‌بندی اعضای سازه‌ای در هر دو سازه یکسان است. شکل ۲۷ مقایسه‌ی روند تغییرات ظرفیت باربری را در سازه‌فضاکار تک‌لایه‌ی آسمانه چینی خانه‌ی مقبره‌ی شیخ صفی‌الدین اردبیلی و سازه‌فضاکار فرم‌آزاد پیشنهادی نمایش می‌دهد.



شکل ۲۷: مقایسه‌ی روند تغییرات ظرفیت باربری در سازه‌فضاکار تک‌لایه‌ی آسمانه چینی خانه‌ی مقبره‌ی شیخ صفی‌الدین اردبیلی و سازه‌فضاکار فرم-آزاد پیشنهادی

۱۱- انواع مکانیزم‌های خرابی سازه‌فضاکار تک‌لایه‌ی آسمانه چینی خانه‌ی مقبره‌ی شیخ صفی‌الدین اردبیلی

با انجام تحلیل‌های استاتیکی خرابی بر روی انواع مدل‌های مختلف سازه‌فضاکار تک‌لایه‌ی آسمانه چینی خانه‌ی مقبره‌ی شیخ صفی‌الدین اردبیلی با لحاظ اثرات پارامترهای مختلفی از قبیل نسبت ارتفاع به دهانه، نسبت طول به عرض و شرایط بارگذاری با در نظرگیری غیرخطی‌های هندسی و مصالح، در کل دو نوع مکانیزم خرابی در این سازه‌ها مشاهده شد که این مکانیزم‌ها در شکل ۲۸ نشان داده شده‌است. حالت مکانیزم خرابی موضعی همراه با فروجهش در این سازه رخ نداده است در نتیجه نیازی به انجام تحلیل‌های دینامیکی برای بررسی امکان خرابی موضعی انتشار یافته وجود ندارد.



(ب) مکانیزم خرابی موضعی بدون فروجهش دینامیکی

(الف) مکانیزم خرابی کلی

شکل ۲۸: انواع مکانیزم‌های خرابی مشاهده‌شده در سازه‌فضاکار تک‌لایه‌ی آسمانه چینی خانه‌ی مقبره‌ی شیخ صفی‌الدین اردبیلی

۱۲- نتیجه‌گیری

رفتار گنبد‌های مورد مطالعه در این پژوهش شدیداً وابسته به هندسه و بارگذاری می‌باشد و این عوامل می‌تواند رفتار آن‌ها را تغییر دهند، بنابراین نتایج کسب شده در این پژوهش منحصر به طراحی مدل‌های مورد مطالعه در این پژوهش می‌باشد.

- با انجام تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی مشاهده شد که بحرانی‌ترین نوع مکانیزم خرابی می‌تواند در حالت بارگذاری گسترده متوازن برف صورت گیرد.
- تاثیر نسبت ارتفاع به دهانه عاملی تاثیرگذار در رفتار این نوع گنبد‌هاست و با افزایش این نسبت به طور معمول وزن (به دلیل افزایش طول اعضا)، سختی اولیه (با توجه به نمودارهای بار-تغییرمکان) و ظرفیت باربری سازه افزایش می‌یابد.
- در نسبت ارتفاع به دهانه‌ی صفر مدل سازه ای رفتاری غیر از رفتار کمانشی نشان داد. با توجه به رفتار سازه می‌توان نتیجه گرفت که نسبت ارتفاع به دهانه صفر رفتار سخت شونده‌ی است و رفتار شبیه پوسته^۱ تحت بارگذاری برون صفحه ای با تکیه‌گاه‌های کناری از خود نشان می‌دهد.
- با توجه به نمودارهای بار-تغییرمکان، هرچه نسبت ارتفاع به دهانه افزایش می‌یابد میزان تغییر شکل الاستیک سازه کاهش پیدا می‌کند و کمانش اعضا با توجه به افزایش طول و افزایش لاغری، محتمل‌تر می‌شود.
- نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۶ دارای ظرفیت باربری بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها در سازه فضاکار تک‌لایه‌ی آسمانه چینی خانه‌ی مقبره‌ی شیخ صفی‌الدین اردبیلی است و در حالی که دارای وزنی زیاد در مقایسه با نسبت‌های دیگر است، ظرفیت باربری و سختی اولیه مناسبی دارد.
- با توجه به نتایج مشاهده شده برای سازه‌های فرم آزاد پیشنهادی، می‌توان گفت که به دلیل وجود اعضای با لاغری زیاد در سازه، کمانش اعضا شکل خرابی غالب است.
- این نوع سازه‌ها و تاشه‌پردازی صرفاً جنبه معماری و زیبایی داشته و برای سازه‌های صنعتی یا مکان‌هایی با بارگذاری‌های سنگین توصیه‌توصیه نمی‌شود چرا که از نظر اقتصادی منجر به ساخت سازه‌ای پرهزینه و سنگین می‌شود.
- با توجه به نتایج می‌توان گفت که باید برای حصول نتایج بهتر و مناسب بودن سازه از لحاظ باربری، اقتصادی بودن، وزن کم، لاغری مناسب اعضای سازه‌ای باید روی تاشه‌پردازی عملیات بهینه‌سازی قوی‌تر و مناسب‌تری برای فرم سازه‌ای صورت گیرد.
- با توجه به اینکه در این پژوهش بارگذاری یکسانی بر روی تمامی سازه‌ها انجام شده‌است و با توجه به اینکه با افزایش نسبت ارتفاع به دهانه شیب گنبد‌ها افزایش پیدا کرده و در نتیجه با توجه به آیین‌نامه‌ی بارگذاری مبحث ششم مقررات ملی ساختمان با افزایش شیب ساختمان میزان بار برف روی شیب کاهش پیدا می‌کند بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بارگذاری سازه‌ها با نسبت ارتفاع به دهانه‌ی بالاتر بیش‌تر از حد طبیعی صورت گرفته‌است و در نتیجه می‌توان بیان کرد که با توجه به کم‌تر بودن میزان بارگذاری در نسبت ارتفاع به دهانه‌های بزرگ‌تر، مقاطع طراحی نیز می‌توانند کوچک‌تر طراحی شوند ولی کوچک‌تر شدن مقاطع اعضا به نوبه‌ی خود بحث‌های کنترل لاغری در اعضا را به دنبال خواهد داشت؛ با این حال با در نظر گیری مقاطع یکسان در طراحی مدل‌ها، ظرفیت باربری این سازه‌ها باز هم - با افزایش نسبت ارتفاع به دهانه افزایش می‌یابد. پس می‌توان نتیجه گرفت که حالت‌های با نسبت ارتفاع به دهانه‌ی بزرگ‌تر، مناسب‌تر هستند.

۱۳- توصیه‌های طراحی

- در طراحی سازه‌های فضاکار گنبدی تک‌لایه‌ی آسمانه چینی خانه‌ی مقبره‌ی شیخ صفی‌الدین اردبیلی نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۶ و ۰/۴ حالت هندسی مناسبی می‌باشد.

¹ Shell

- سعی شود در طراحی سازه های فضاکار تک لایه‌ی آسمانه چینی خانه‌ی مقبره‌ی شیخ صفی‌الدین اردبیلی و فرم آزاد پیشنهادی لاغری اعضای فشاری بین ۸۰ تا ۱۲۰ باشد.
- در نسبت های ارتفاع به دهانه بزرگ‌تر، بارگذاری نامتوازن برف به دلیل شیب زیاد و عدم وجود بار برف زیاد بر روی سازه‌های فضاکار تک لایه‌ی آسمانه چینی خانه‌ی مقبره‌ی شیخ صفی‌الدین اردبیلی بارگذاری حساسی نمی باشد.
- سعی شود در طراحی از سازه‌های فضاکار تک لایه‌ی آسمانه چینی خانه‌ی مقبره‌ی شیخ صفی‌الدین اردبیلی به دلیل بهینه نبودن فرم سازه‌ای، وزن و هزینه‌ی ساخت بالای آن‌ها استفاده نشود ولی در صورت نیاز به رعایت ملاحظات معماری از سازه فضاکار تک لایه‌ی آسمانه چینی خانه‌ی مقبره‌ی شیخ صفی‌الدین اردبیلی استفاده شود.

۱۴- نمادها

SLAH	سازه‌فضاکار تک لایه‌ی آسمانه چینی خانه‌ی مقبره‌ی شیخ صفی‌الدین اردبیلی	σ	تنش مصالح
H	ارتفاع سازه فضاکار	SNOW	بارگذاری متقارن برف
S	دهانه‌ی سازه فضاکار	SX	بارگذاری نامتوازن برف در جهت X
A	طول سازه فضاکار	SY	بارگذاری نامتوازن برف در جهت Y
F_y	تنش تسلیم مصالح	PGA-V	ماکزیمم شتاب رکورد زلزله‌ی قائم
E	مدول الاستیسیته	PGA-H1	ماکزیمم شتاب رکورد زلزله‌ی افقی جهت X
LPF	ضریب بار در تحلیل‌های غیرخطی	PGA-H2	ماکزیمم شتاب رکورد زلزله‌ی افقی جهت Y
ε	کرنش مصالح	B32	عنصر تیری تیموشنکو

مراجع

- [۱] ک. عابدی و ب. شکسته بند، تحلیل پایداری سازه های فضاکار، انتشارات دانشگاه صنعتی سهند تبریز، ۱۳۸۸.
- [۲] شیرزادی، طالب (۱۳۸۶)، "بررسی پایداری گنبد‌های دولایه‌ی فضاکار تحت اثر بارهای ثقیلی" ششمین کنگره‌ی ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ۶-۷ اردیبهشت، ۱۳۹۰.
- [3] Aitziber, Lopez "Numerical model and experimental tests on single-layer latticed domes with semi-rigid joints" Computer and Structure 85 (2007), pp 360-374.
- [4] Parke, G. A. R., Comparison of the Structural Behavior of Various Types of Braced Barrel Vaults, Analysis, Design and Construction of Braced Barrel Vaults, Z.S. Makowski. (Editor), Granada Publishing Ltd., London and New York, 1985, pp 90-120.
- [5] Makowski, Z S., History and Development of Various Types of Braced Barrel Vaults and Review of Recent Achievements all over the World , Analysis, Design and Construction of Braced Barrel Vaults, Makowski. Z.S. (Editor), Granada Publishing Ltd., London and New York, 1985, pp 1-35.
- [6] Gioncu, V., Bault, N., Porumb, D., Pennon, N., Instability Behavior of Triangulated Barrel Vaults, Analysis, Design and Construction of Braced Barrel Vaults, Z. S. Makowski. (Editor), Granada Publishing Ltd., London and New York, 1985, pp 159-182.
- [7] Abedi, K., Propagation of Local Instabilities in Braced Domes, PhD Thesis, University of Surrey, 1997.
- [۸] س. بیرقی، ح. ستاری ساربانقلی، ع. محدث خراسانی، "تحلیل مدل ترسیمی زبان-الگوی الگوریتمیک یزدی‌بندی آسمانه‌ی کوشک هشت‌بهشت اصفهان در راستای پایانی فرم سازه آزاد"، معماری اقلیم گرم و خشک، صص ۱۲/۲۲، ش ۶، ح ۵، ۲۰۱۷.

- [9] Rhinoceros modeling tools for designers Version 5 SR14 64-bit, SN: 4-1500-1301-100-0039351-61919, Copyright 1993-2012 Robert McNeel & Associates.
- [10] Grasshopper Version August-27, 2014, Copyright 2009 Robert McNeel & Associates.
- [11] ABAQUS/CAE 6.14.2 Software, Dassault System Simulia Corp., Providence, RI, USA, 1994-2014.
- [12] Chen, X., Shen, S. Z. Complete Load Deflection Response and Initial Imperfection Analysis of Single-Layer Lattice Dome, International Journal of Space Structures, 1993, 8 (4), 271-278.
- [13] Lazarevic, D., Uros, M., Gila, P., Post Buckling Behavior of Shallow Lattice Dome, International Association for shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, Shanghai, China, 2010.
- [14] Qing-hua, H., Xi-liang, L., Numerical Model, Buckling Analysis and Ultimate Load Capacity of the Single-Double-Layer Reticulated Dome, International Journal of Space Structures, 2003, 18(4), 257-267.
- [15] Victor, Gioncu. "Buckling of reticulated shells: state-of-the-art." Int. J. of Space Structures 10.1 (1995), pp 1-46.
- [16] SAP2000 Nonlinear Version 19.2.2, Structural Analysis Program, Computers and Structures, Inc, Berekeley, CA, 1976-2011.
- [17] "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures." ASCE Standard ASCE/SEI 7-10". Published by American Society of Civil Engineers".

[۱۸] دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، بارهای وارد بر ساختمان، مبحث ششم ۱۳۹۲.

[۱۹] مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، آیین‌نامه‌ی طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم).

[۲۰] معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور، آیین‌نامه‌ی سازه‌های فضاکار، نشریه‌ی شماره‌ی ۴۰۰، سال ۱۳۸۹.

[۲۱] دروی پور، یاسمن؛ فائزه سالمی و پرناز کریمی، ۱۳۹۴، بررسی توان لرزه‌زایی گسل‌ها و بر آورد تلفات انسانی ناشی از زلزله در مناطق شهری، اولین کنگره ملی توسعه و ترویج مهندسی کشاورزی و علوم خاک ایران، تهران، انجمن توسعه و ترویج علوم و فنون بنیادین، https://www.civilica.com/Paper-ISCONF01-ISCONF01_130.html