

# بررسی پایداری سازه‌های فضاکار فرم آزاد سه گنبدی شبکه‌ای تک‌لایه با نوانش مثلی

مژگان ولی‌نژاد<sup>۱</sup>، کریم عابدی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

(دریافت: ۹۷/۷/۱۶، پذیرش: ۹۹/۱۰/۸، نشر آنلاین: ۹۹/۱۰/۸)

## چکیده

برای پوشش فضاهای بزرگ و عمومی، سازه‌های بسیاری با فرم‌های ابتکاری با عنوان "فرم آزاد" طراحی شده‌اند و از طریق تعامل بین ملاحظات فنی سازه‌ها و حس هنری طراحان ایجاد شده‌اند. فرم‌های آزاد افقی از خلاقیت و نوآوری را برای طراحان فراهم کرده‌اند، لذا امروزه کاربرد این نوع سازه‌ها افزایش یافته است. ناپایداری یک مسئله مهم و محدودکننده میزان بارگذاری و تغییرشکل سازه‌های با دهانه وسیع و تعداد اعضای زیاد است که نقش اساسی در طراحی سازه‌های فرم آزاد دارد. در این پژوهش رفتار پایداری سازه‌های فضاکار فرم آزاد سه گنبدی تک‌لایه با نوانش (Novational) مثلی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. جهت صحت‌سنجی مدل‌سازی عناصر محدود در نرم‌افزار ABAQUS، نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی و عددی با نتایج مدل عناصر محدود مورد مقایسه قرار گرفته است. مدل‌های این مطالعه پس از تاشه پردازی و بارگذاری، طراحی و سپس جهت تحلیل پایداری با در نظر گرفتن غیرخطی‌های هندسی و مصالح به نرم‌افزار ABAQUS منتقل شده و تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی قرار گرفته‌اند. در مدل‌هایی که در تحلیل پایداری آن‌ها ناپایداری نقطه دوشاخگی مشاهده شد، جهت به دست آوردن مسیر صحیح تعادل از اعمال ناکاملی هندسی اولیه با روش مود ناکاملی انطباق‌پذیر تعمیم‌یافته به‌عنوان یک روش مناسب استفاده شده است. نتایج تحلیل پایداری مدل‌های مورد بررسی در این پژوهش نشان می‌دهند که مودهای پایین کم‌انرژی تأثیر اندکی در کاهش بار حده دارند، همچنین در تمامی مدل‌ها مکانیزم خرابی از نوع خرابی کلی و بارگذاری نامتوازن در جهت محور  $Y$  بحرانی‌ترین الگوی بارگذاری می‌باشد.

**کلیدواژه‌ها:** سازه فضاکار، فرم آزاد، سه گنبدی، تحلیل پایداری، ناکاملی هندسی، مود ناکاملی انطباق‌پذیر تعمیم‌یافته.

(Bagnéris و Rene Motro, ۲۰۰۷).

## ۱- مقدمه

امروزه به دلایل مختلفی از جمله مباحث سازه‌ای و عملکردی، زیباشناسی، اقتصادی، انرژی و ... تمایل طراحان به استفاده از فرم‌های آزاد و نامنظم افزایش پیدا کرده است. از جمله دلایل سازه‌ای گرایش به سمت فرم‌های آزاد می‌توان به بهینه کردن فرم سازه (متناسب با محدوده‌های مرزی سازه) و مقاطع سازه‌ای اشاره کرد که در نتیجه آن وزن سازه کاهش پیدا می‌کند. این کاهش وزن سازه علاوه بر اقتصادی‌تر شدن طرح باعث کاهش نیروهای جانبی وارد بر سازه و در نهایت بهبود عملکرد سازه می‌شود. همچنین استفاده از فرم آزاد و نامنظم به دلیل خارج شدن از فرم منظم و راست‌گوشه به سمت فرم‌های منحنی و کروی باعث صرفه‌جویی در مصرف مصالح و اقتصادی شدن آن می‌گردد (توری و همکاران،

در گذشته بشر فرم‌های متنوعی را برای سازه‌های خود تصور می‌کرد اما همواره قادر به تجزیه و تحلیل و ساخت آن‌ها نبوده است. کامپیوترها این محدودیت‌ها را شکستند و آزادی گسترده‌ای به طراحان برای تجسم کردن نسل جدید فرم‌ها دادند که این فرم‌های جدید فرم‌های آزاد<sup>۱</sup> نامیده شدند (ANDRÉS, ۲۰۰۹). از ویژگی‌های منحصربه‌فرد این نوع سازه‌ها آزادی در طراحی فرم، زیبایی، سبکی و همچنین توانایی هماهنگی آن با معماری بدون تحمیل عنصری اضافی به آن است (اخلاصی و امیر، ۱۳۹۰). در حالت کلی سطوح فرم آزاد به ترکیبی از سطوح با انحنا مضاعف گفته می‌شوند که لزوماً ترکیبی از فرم‌های هندسی رایج نظیر فرم‌های مکعبی، کروی، بیضی و ترکیبی از آن‌ها نمی‌باشند

## 1. Free form

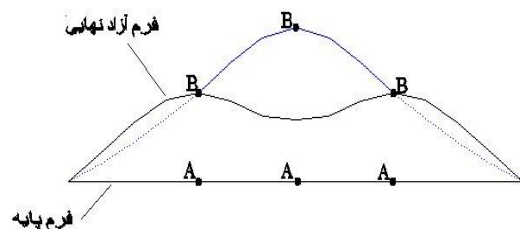
\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۳۴۵۹۳۲۹

می‌شود. جابه‌جایی نوانش نوع خاصی از انتقال هندسی است که به‌وسیله یک یا چند قسمت بر روی فرم پایه موجب اصلاح یک فرم و ایجاد فرم‌های متنوع می‌شود.

جبر فرمکسی یک سیستم ریاضی است که ابزار مناسبی برای پردازش تاشه ایجاد می‌کند. FORMIAN نرم‌افزاری کاربردی برای استفاده از جبر فرمکسی می‌باشد. در این زبان برنامه‌نویسی می‌توان با استفاده از دستورات مختلف برنامه‌نویسی و به‌کارگرفتن پارامترهای مختلف به فرم‌های متنوعی دست پیدا کرد. دو پارامتر فرمکسی وجود دارد که در این زمینه بسیار با ارزش هستند. این مفاهیم "فرازش" و "نوانش" هستند (Moghimi و Nooshin، ۲۰۰۷). در این‌جا از تابع نوانش<sup>۱</sup> برای ایجاد هندسه فرم آزاد سه گنبدی استفاده می‌شود. تابع نوانش به‌صورت رابطه (۱) در FORMIAN نوشته می‌شود:

$$G=NOV(m, c, L1, L2) / E \quad (1)$$

که در آن  $E$  فرم پایه (فرم اولیه)،  $G$  فرم نهایی،  $m$  مد نوانش (نوانش تیز یا ملایم)،  $C$  محدوده نوانش، (مقدار پارامتر  $C$  بین عدد صفر و بیست می‌باشد، مقدار  $C=20$  اثر محلی داشته و مقدار استاندارد  $C$  برابر یک می‌باشد) و  $L1$  و  $L2$  به‌ترتیب نقاط ابتدایی و نقاط هدف را نشان می‌دهند. جابه‌جایی‌های تابع نوانش با توجه به شماره مد می‌تواند به‌صورت تیز یا ملایم باشد. نوانش مد اول به‌صورت نوانش تیز و نوانش مد دوم و سوم به‌صورت نوانش ملایم می‌باشد. با استفاده از اعمال نوانش مد سوم بر روی فرم‌های پایه می‌توان فرم‌های آزاد متنوعی به‌دست آورد (Moghimi و Nooshin، ۲۰۰۷). نقاط ابتدایی و نقاط نهایی تابع نوانش در شکل (۱) و همچنین نمونه نهایی تاشه فرم آزاد سه گنبدی با نوانش مثلثی و شبکه سه‌راهه در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت نقاط در ایجاد تاشه فرم آزاد سه گنبدی

۱۳۹۰). از جمله سازه‌های فرم آزاد می‌توان به گلخانه جزیره Heixiazi در چین (Jun و همکاران، ۲۰۱۴)، پروژه باغ وحش و باغ گیاه‌شناسی بوداپست در مجارستان (Botzheim و همکاران، ۲۰۱۶) و سازه مجتمع تجاری MyZeil در فرانکفورت آلمان (Knippers و HELBIG، ۲۰۱۰) اشاره کرد.

تحلیل و بررسی سازه‌های فضاکار براساس روش‌های مختلفی از جمله روش‌های تحلیلی، روش‌های عددی و روش‌های آزمایشگاهی انجام می‌گیرد. هرکدام از این روش‌ها دارای مزایا و معایبی هستند که بسته به شرایط و امکانات و دقت موردنظر انتخاب می‌شوند. بهترین و کارآمدترین روش، روش آزمایشگاهی می‌باشد، اما این روش هزینه و زمان زیادی می‌طلبد. در روش تحلیلی با توجه به حل پیچیده معادلات دیفرانسیل نیاز به زمان بسیار و همچنین ساده‌سازی در بسیاری موارد خواهد بود. در فرم‌های متداول سازه‌های فضاکار تک‌لایه اغلب مودهای اولیه به‌عنوان مودهای حساس شناخته می‌شوند اما در سازه‌های فضاکار فرم آزاد این مودهای حساس بسته به نوع تاشه و شرایط هندسی سازه متفاوت است و می‌بایست به‌صورت خاص بررسی شوند. در مورد سازه‌های فضاکار فرم آزاد سه گنبدی<sup>۲</sup> تاکنون مطالعه‌ای صورت نگرفته، لذا در این مقاله از روش اجزای محدود<sup>۳</sup> برای تحلیل و بررسی سازه فضاکار مشبک فرم آزاد سه گنبدی تک‌لایه استفاده می‌گردد. دو نوع ناپایداری در سازه‌های فضاکار می‌تواند اتفاق بیفتد: ناپایداری نقطه حدی<sup>۴</sup> و ناپایداری نقطه دوشاخگی<sup>۵</sup>. سازه‌هایی که در تحلیل غیرخطی ناپایداری با انشعاب دوشاخگی از خود بروز می‌دهند حساسیت بیشتری نسبت به ناکاملی هندسی (به‌ویژه از نوع انحراف گره‌ها) در مقایسه با حالت ناپایداری نقطه حدی دارند. لذا حساسیت‌سنجی نسبت به ناکاملی در این‌گونه سازه‌های فضاکار مخصوصاً سازه‌های شبکه‌ای تک‌لایه گنبد الزامی است. در این مطالعه جهت اعمال ناکاملی از روش تقریبی اختلال یافته<sup>۶</sup> و روش مود ناکاملی انطباق‌پذیر تعمیم یافته<sup>۷</sup> استفاده شده است.

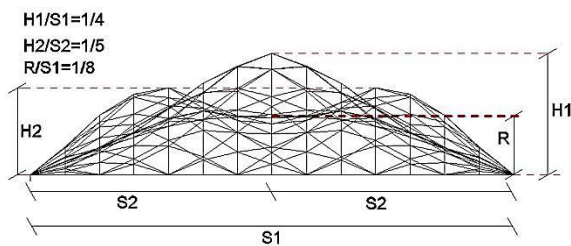
## ۲- تاشه‌پردازی و بارگذاری مدل‌ها

هندسه سازه که بیانگر مختصات گره‌ها، نحوه اتصال آن‌ها و توپولوژی سازه می‌باشد به‌نحوی مناسب و با دقت کافی بایستی مدل شود. از آنجاکه هندسه سازه‌های فضاکار غالباً پیچیده و تعداد اعضای آن‌ها زیاد می‌باشد، استفاده از جبر فرمکسی<sup>۸</sup> و نرم‌افزار مربوط به آن FORMIAN می‌تواند بسیار مؤثر و کارآمد باشد. برای هندسه فرم آزاد از تابع نوانش این نرم‌افزار بهره گرفته

6. Approximate-perturbed method  
7. Generalized conformable imperfection mode  
8. Formex  
9. Novational Function

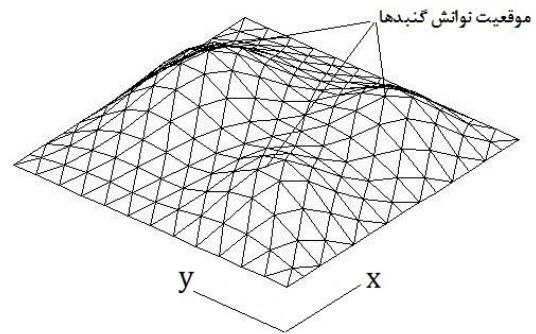
2. Triple domes  
3. Finite Element Method  
4. Limit point instability  
5. Bifurcation point instability

لازم به ذکر است که برای بررسی پارامتر ارتفاع به دهانه بر روی رفتار سازه، در خیز ثابت در نظر گرفته شده، سه نسبت ارتفاع به دهانه  $1/4$ ،  $1/5$  و  $1/7$  مورد بررسی قرار می‌گیرند که برای هر مدل دو نسبت ارتفاع به دهانه در نظر گرفته شده است، لذا نسبت‌های ارتفاع به دهانه در نظر گرفته شده به صورت  $1/4$ ،  $1/5$  و  $1/7$  و همچنین  $1/5$  و  $1/7$  برای هر مدل می‌باشد. نمونه‌ای از تخصیص نسبت‌های ارتفاع به دهانه متفاوت  $1/4$ ،  $1/5$  و خیز  $1/8$  در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴- تصویر شماتیک تخصیص نسبت‌های ارتفاع (H1) و (H2) به دهانه (S) و خیز (R) به دهانه

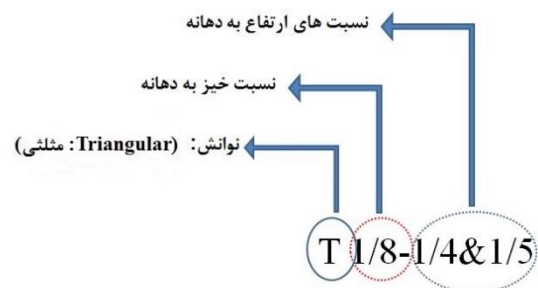
در طراحی مدل‌ها سه حالت بار مرده، بار زنده برف، بار لرزه‌ای و بار حرارتی در نظر گرفته شده است. در این مطالعه بار مرده با مقدار  $0.5$  کیلو نیوتون بر مترمربع به صورت گرهی به مدل‌ها اعمال شد و همچنین بار برف در منطقه با برف زیاد (منطقه ۴) با مقدار  $P_g = 1/5 \text{ kn/m}^2$  فرض شده است و با توجه به روابط آیین‌نامه به دلیل شیب متفاوت شبکه‌ها، بار برف برای هر شبکه به صورت مجزا محاسبه و اعمال شد. بار برف نامتوازن نیز در دو راستا برای مدل‌ها اعمال شد، که در این مدل‌ها با توجه به موقعیت قرارگیری گنبدها، توزیع بار برف نامتوازن در نواحی مختلف سازه متفاوت می‌باشد. در مورد بار لرزه‌ای نیز سازه‌های فرم آزاد بنا بر آیین‌نامه سازه‌های فضاکار (نشریه ۴۰۰، ۱۳۸۹) لازم است با حداقل سه شتاب نگاشت، تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی انجام شود. در این مطالعه با توجه به معیارهای مفروض سه شتاب‌نگاشت Parkfield و Imperial valley و Chalfant valley استخراج و پس از مقیاس شدن، اعمال شدند. ترکیبات بار با در نظر گرفتن بار مرده، برف، زلزله و بار حرارتی اعمال شدند. در طراحی مدل‌ها از مقاطع لوله‌ای توخالی با اتصالات صلب و تکیه‌گاه‌های گیردار در نقاط پیرامونی استفاده می‌شود. همچنین مشخصات فولاد به کار رفته در مدل‌سازی به صورت فولاد ST52 با تنش تسلیم  $360$  مگاپاسکال و مدول الاستیسیته  $210$  گیگاپاسکال و نسبت پواسون  $0.3$  می‌باشد. در طراحی مدل‌ها، از یک نوع تیپ‌بندی با اعمال چهار نوع مقطع لوله‌ای با قطر خارجی و ضخامت  $110$  و  $8/5$ ،  $150$  و  $12$ ،  $180$  و  $20$  و نیز  $250$  و  $25$  استفاده شد (ابعاد به میلی‌متر).



شکل ۲- نمونه تاشه سازه فرم آزاد سه گنبدی

### ۳- پارامترهای مورد مطالعه

در این پژوهش سعی شده است با بررسی رفتار کلی سازه فرم آزاد شبکه‌ای سه گنبدی تک‌لایه اثر برخی از مهم‌ترین پارامترهای این نوع سازه، از جمله نسبت ارتفاع به دهانه، نسبت خیز به دهانه و نوع بارگذاری بر رفتار پایداری آن مورد بررسی قرار گیرد. در این مطالعه مدل‌های با تاشه سه راهه، نوانش مثلثی، تکیه‌گاه‌های پیرامونی گیردار، نسبت ارتفاع به دهانه  $1/4$ ،  $1/5$  و  $1/7$ ، خیز میانی  $1/8$  و  $1/10$  و بارگذاری متقارن و نامتقارن در دو راستا، مورد بررسی قرار گرفتند. نحوه نام‌گذاری مدل‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است و همچنین مشخصات مدل‌های مورد مطالعه در جدول (۱) آورده شده است.

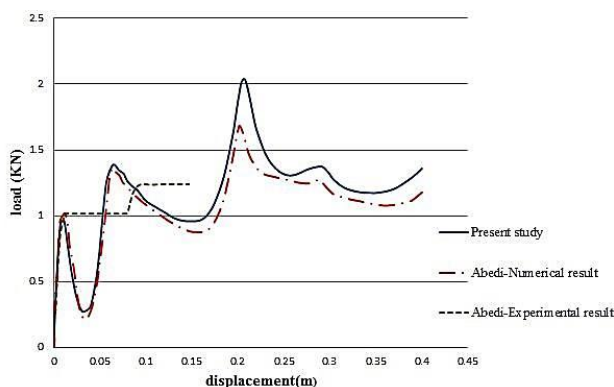


شکل ۳- نحوه نام‌گذاری مدل‌ها

جدول ۱- مشخصات مدل‌های مورد مطالعه

تیپ مدل	نوع پلان و ابعاد	نوع نوانش و نسبت ارتفاع به دهانه	نوع و مقدار خیز
T1/8-1/4&1/5	مربعی ۳۶/۳۷ X ۳۶ متر	مثلثی 1/4&1/5	دوطرفه 1/8
T1/8-1/4&1/7	مربعی ۳۶/۳۷ X ۳۶ متر	مثلثی 1/4&1/7	دوطرفه 1/8
T1/8-1/5&1/7	مربعی ۳۶/۳۷ X ۳۶ متر	مثلثی 1/5&1/7	دوطرفه 1/8
T1/10-1/4&1/5	مربعی ۳۶/۳۷ X ۳۶ متر	مثلثی 1/4&1/5	دوطرفه 1/10
T1/10-1/4&1/7	مربعی ۳۶/۳۷ X ۳۶ متر	مثلثی 1/4&1/7	دوطرفه 1/10
T1/10-1/5&1/7	مربعی ۳۶/۳۷ X ۳۶ متر	مثلثی 1/5&1/7	دوطرفه 1/10

مدل‌سازی معیار فون میزس<sup>۱۱</sup> می‌باشد. این نمونه با استفاده از حلگر ABAQUS/Standard و اعمال ناکاملی هندسی به روش تحلیل استاتیکی غیرخطی با استفاده از روش اصلاح شده Riks مورد تحلیل قرار گرفته است. با اعمال بارگذاری در گره مرکزی، تحلیل استاتیکی بر روی این مدل انجام شده و پاسخ بار تغییر مکان گره مرکزی به همراه نتایج عددی و آزمایشگاهی در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶- پاسخ بار- تغییر مکان گره مرکزی المان محدود مطالعه حاضر همراه با نتایج عددی و آزمایشگاهی

به دلیل این که تحقیقات آزمایشگاهی به روش کنترل بار انجام می‌شد بخش ناپایدار مسیر تعادل قابل ترسیم نبوده و بنابراین در روش آزمایشگاهی پاسخ بار- تغییر مکان مدل در بخش ناپایدار مسیر تعادل نشان داده نمی‌شود. با توجه به مطلب ذکر شده بین نتایج آزمایشگاهی و عددی تا قبل از اولین فروجهش تطابق خوبی برقرار است. با توجه به مطلب ذکر شده و همچنین شکل (۶)، مشاهده می‌شود که بین نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی اجزای محدود با روش عددی و آزمایشگاهی تطابق خوبی وجود دارد. لذا از مدل‌سازی اجزای محدود می‌توان با اطمینان برای بررسی رفتار پایداری سازه‌های فضاکار فرم آزاد شبکه‌ای سه گنبدی تک‌لایه بهره جست.

#### ۵- تحلیل پایداری مدل‌ها

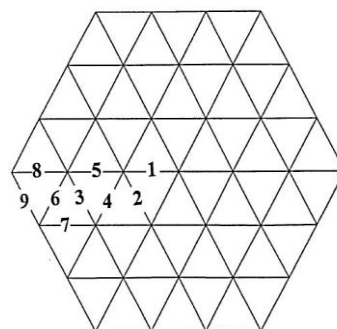
پس از صحت‌سنجی نرم‌افزار مدل‌ها با مشخصات ذکر شده در محیط ABAQUS مدل‌سازی می‌شوند. همان‌گونه که ذکر شد دو نوع ناپایداری در سازه‌های فضاکار می‌تواند اتفاق بیفتد: ناپایداری نقطه حدی و ناپایداری نقطه دوشاخگی. اگر قبل از رسیدن به بار حدی یک درایه منفی در ماتریس سختی مشاهده شود ناپایداری نقطه دوشاخگی اتفاق می‌افتد و برای تغییر مسیر تعادل دوشاخگی به مسیر تعادل حدی نیاز به اعمال ناکاملی است. در این مطالعه

#### ۴- صحت‌سنجی<sup>۱۰</sup> و مدل‌سازی اجزای محدود

در این مطالعه برای بررسی پایداری مدل‌ها از نرم‌افزار ABAQUS جهت بررسی رفتار سازه استفاده می‌شود. نرم‌افزار ABAQUS مجموعه‌ای بسیار توانمند از برنامه‌های مدل‌سازی است که بر پایه روش اجزاء محدود شکل گرفته است. یکی از معیارهای مناسب جهت ارزیابی دقت نرم‌افزار، استفاده از مطالعات آزمایشگاهی و تطبیق نتایج آن با نتایج نرم‌افزار می‌باشد. در مش-بندی و مدل‌سازی اعضای سازه فضاکار از المان beam (B31) المان تیری مرتبه اول سه‌بعدی استفاده شده است. در مدل‌سازی میزان مش‌بندی به نحوی اعمال می‌شود که اختلاف جواب‌ها به حداقل برسد. با اعمال بارگذاری و ناکاملی هندسی، تحلیل استاتیکی غیرخطی هندسی و مصالح بر روی این نمونه‌ها انجام می‌گیرد و در نهایت نتایج حاصل با نتایج به دست آمده از روش عددی و آزمایشگاهی توسط محققین مقایسه می‌شوند.

جهت انجام صحت‌سنجی نمونه‌ای استفاده شده است که براساس تحقیقات آزمایشگاهی توسط عابدی و همکاران در دانشگاه Surrey انگلستان مورد بررسی قرار گرفته است. این مدل یک گنبد شبکه‌ای تک‌لایه می‌باشد با طول دهانه ۲۴۰۰ میلی‌متر و نسبت ارتفاع به دهانه  $1/10$ ، که شامل ۹۰ عضو با ۹ طول مختلف و ۳۷ پیونده با ۷ نوع متفاوت است که همه اعضای آن از لوله‌های فولادی نرم به قطر خارجی ۹/۵۲ میلی‌متر و ضخامت جداره ۰/۷۱ میلی‌متر ساخته شده‌اند و دارای اتصالات صلب می‌باشند. این مدل در ۶ گوشه به‌طور کاملاً صلب مقید شده است. پلان و طول اعضای این سازه در شکل (۵) نشان داده شده است (Abedi, ۱۹۹۷).

Member type	Length (mm)
1	400.8
2	400.0
3	400.9
4	403.4
5	407.6
6	408.1
7	414.1
8	422.4
9	403.8



شکل ۵- پلان و طول اعضای گنبد شبکه‌ای تک‌لایه (Abedi, ۱۹۹۷)

بارگذاری به صورت بار متمرکز در گره مرکزی اعمال شده است. از المان beam (B31) المان تیری مرتبه اول سه‌بعدی استفاده و مدل‌ها مش‌بندی می‌شوند. معیار تسلیم در این

جدول ۲- نتایج اعمال ۸۰ مود کمانش به‌عنوان ناکاملی بر روی

مدل T1/10-1/4&1/5

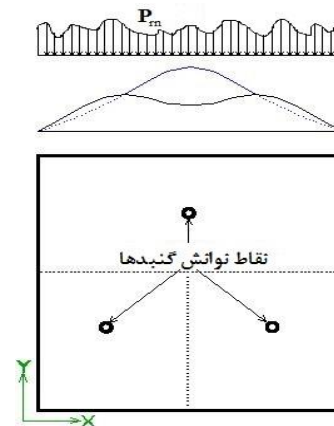
مود کمانش	ضریب بار مود کمانش	ضریب بار مود کمانش	ضریب بار مود کمانش	ضریب بار مود کمانش
۱	۱۰/۰۱	۲۸	۱۰/۶	۵۵
۲	۹/۹۲	۲۹	۱۰/۰۶	۵۶
۳	۹/۸۳	۳۰	۱۰/۰۵	۵۷
۴	۱۰/۶۸	۳۱	۱۰/۵۸	۵۸
۵	۱۰/۶۸	۳۲	۱۰/۶۸	۵۹
۶	۹/۹۷	۳۳	۱۰/۶۸	۶۰
۷	۹/۹۵	۳۴	۱۰/۵۴	۶۱
۸	۱۰/۶۹	۳۵	۱۰/۶۸	۶۲
۹	۱۰/۶۸	۳۶	۱۰/۶۸	۶۳
۱۰	۱۰/۶۱	۳۷	۱۰/۴۵	۶۴
۱۱	۹/۸۴	۳۸	۱۰/۷	۶۵
۱۲	۱۰/۵۶	۳۹	۱۰/۴۹	۶۶
۱۳	۱۰/۴۶	۴۰	۱۰/۶۹	۶۷
۱۴	۱۰/۱۶	۴۱	۱۰/۶۹	۶۸
۱۵	۱۰/۱۲	۴۲	۱۰/۶۸	۶۹
۱۶	۱۰/۶۵	۴۳	۱۰/۵۲	۷۰
۱۷	۱۰/۶۸	۴۴	۱۰/۶۸	۷۱
۱۸	۱۰/۶۵	۴۵	۱۰/۴۹	۷۲
۱۹	۱۰/۶۸	۴۶	۱۰/۶۸	۷۳
۲۰	۱۰/۶۳	۴۷	۱۰/۶۹	۷۴
۲۱	۱۰/۳۱	۴۸	۱۰/۷	۷۵
۲۲	۱۰/۰۴	۴۹	۱۰/۶۸	۷۶
۲۳	۱۰/۶۹	۵۰	۱۰/۵۴	۷۷
۲۴	۱۰/۶۸	۵۱	۱۰/۵۹	۷۸
۲۵	۱۰/۵۵	۵۲	۱۰/۶۴	۷۹
۲۶	۱۰/۵	۵۳	۱۰/۶۸	۸۰
۲۷	۱۰/۶۶	۵۴	۱۰/۶۸	-

همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود مودهای پایین کمانش تأثیر ناچیزی در کاهش بار ماکزیمم دارند و مودهای غیرحساس تلقی می‌شوند. در میان مودهای اعمال شده مود ۱۱م به‌دلیل بیش‌ترین کاهش در بار حدی، حساس‌ترین مود محسوب می‌شود. با در نظر گرفتن این مود به‌عنوان ناکاملی اولیه، با مقدار ناکاملی  $S/150$  (طول دهانه سازه) بار ماکزیمم به  $۸/۶۹$  کاهش پیدا می‌کند و می‌توان مسیر صحیح تعادل را به‌دست آورد. لازم به‌ذکر است که مودهای قبل از مود ۱۱م، با این مقدار ناکاملی به‌عنوان ناکاملی اولیه منجر به ترسیم مسیر صحیح تعادل نشدند. روش بعدی برای به‌دست آوردن مسیر صحیح تعادل، روش مود ناکاملی انطباق‌پذیر تعمیم‌یافته (موسوی، ۱۳۹۴) می‌باشد، در این روش پس از آن‌که تحلیل استاتیکی غیرخطی هندسی و مصالح بر روی مدل انجام گرفت، تغییر شکل‌های کلی سازه در هر سه جهت، قبل و بعد از کمانش استخراج شده و تفاضل آن‌ها به‌عنوان فرم مود کمانش برای اعمال ناکاملی با ضریب مشخص،

اعمال ناکاملی با روش تقریبی اختلال یافته و روش مود ناکاملی انطباق‌پذیر تعمیم‌یافته انجام می‌شود. پس از مدل‌سازی، اعمال بارگذاری و شرایط مرزی، تحلیل غیرخطی بر روی مدل‌ها انجام شد و وجود نقطه دوشاخگی قبل از نقطه حدی برای تعیین نوع ناپایداری نیز بررسی شد.

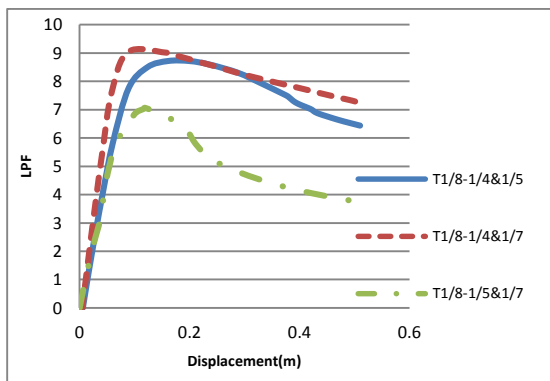
### ۵-۱- تحلیل پایداری در حالت بارگذاری متوازن

در این حالت، بارگذاری نموی به‌صورت گسترده (بار برف) در تمام گره‌های مدل‌ها مطابق شکل (۷) اعمال شده و برای تحلیل مورد استفاده قرار می‌گیرد.

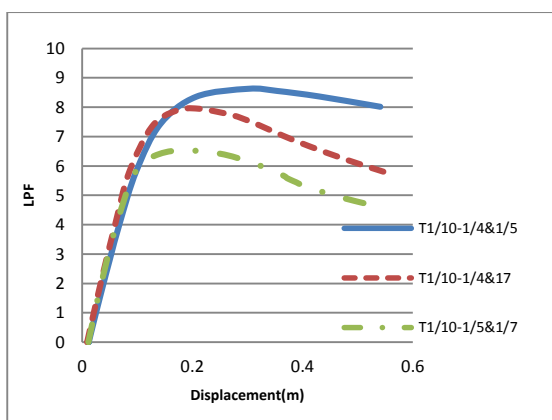


شکل ۷- توزیع بارگذاری متوازن بر روی مدل‌ها

با توجه به وقوع ناپایداری نقطه دوشاخگی در مدل T1/10-1/4&1/5 در حالت بارگذاری متوازن، جهت دست‌یابی به مسیر صحیح تعادل نیاز به اعمال ناکاملی هندسی اولیه می‌باشد. برای اعمال ناکاملی اولیه به این مدل، از دو روش تقریبی اختلال یافته و مود ناکاملی انطباق‌پذیر تعمیم‌یافته استفاده شده و نتایج به‌شرح زیر می‌باشد. برای انجام تحلیل ناکاملی با استفاده از روش تقریبی- اختلال یافته، ابتدا بایستی تحلیل خطی‌سازی شده کمانش انجام گیرد و مودهای کمانشی استخراج گردند. سپس این مودهای کمانشی به‌عنوان ناکاملی اولیه هندسی به مدل اعمال می‌شوند و مدل تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی قرار می‌گیرد. با توجه به این‌که در فرم‌های آزاد مودهای پایین کمانش تأثیر چندانی در کاهش بار حدی ندارند، لذا در این مطالعه ۸۰ مود اول کمانش به‌عنوان ناکاملی با مقدار  $S/500$  (طول دهانه سازه) به مدل اعمال می‌شوند. نتایج تأثیر اعمال این مودهای کمانش در بار حدی در جدول (۲) آورده شده است.

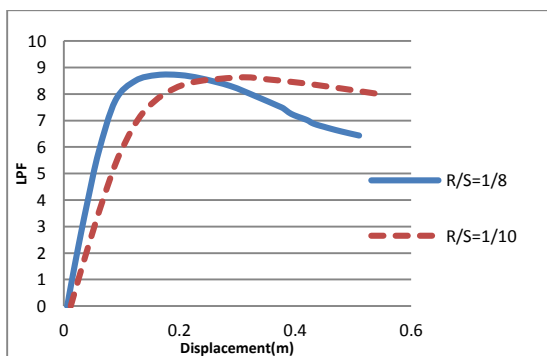


شکل ۹- نمودار بار- تغییر مکان مدل‌های با خیز  $1/8$  و بارگذاری متوازن



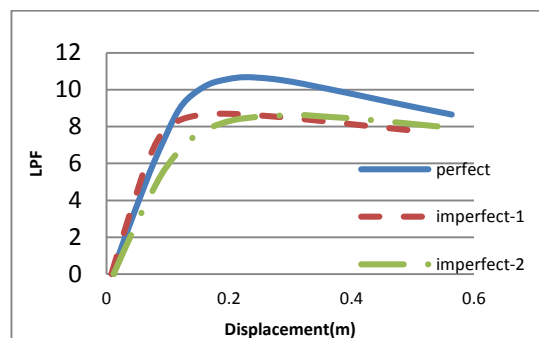
شکل ۱۰- نمودار بار- تغییر مکان مدل‌های با خیز  $1/10$  و بارگذاری متوازن

۵-۱-۲- تأثیر پارامتر نسبت خیز میانی به دهانه  
تأثیر پارامتر خیز به دهانه برای نسبت ارتفاع به دهانه  $1/4$  و  $1/5$  در مدل‌های  $T1/10-1/4&1/5$  و  $T1/8-1/4&1/5$  در شکل (۱۱) نشان داده شده است. مطابق شکل مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت خیز به دهانه ضریب بار افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱- تأثیر پارامتر خیز در نسبت ارتفاع به دهانه  $1/4$  و  $1/5$  و بارگذاری متوازن

به سازه اعمال می‌شود. مقدار صحیح این ناکاملی جهت دستیابی به مسیر صحیح تعادل،  $S/220$  می‌باشد و بار حدی را به مقدار  $8/66$  کاهش می‌دهد. نمودار بار- تغییر مکان این مدل برای حالت کامل و ناکامل به دو روش، به صورت مقایسه‌ای در شکل (۸) نشان داده شده است. در این نمودار ملاحظه می‌شود که مطابقت بیشتری بین رفتار مدل کامل و مدل ناکامل با روش مود ناکاملی انطباق‌پذیر تعمیم‌یافته وجود دارد که بیانگر این است که مود کمانشی اعمال شده در روش مود ناکاملی انطباق‌پذیر تعمیم‌یافته، منجر به رفتار واقعی‌تر سازه می‌شود.



شکل ۸- نمودار بار- تغییر مکان مدل کامل و ناکامل  $T1/10-1/4&1/5$ : (۱) روش تقریبی اختلال یافته، (۲) روش مود ناکاملی انطباق‌پذیر تعمیم‌یافته

با توجه به نتایج روش تقریبی اختلال یافته و مود ناکاملی انطباق‌پذیر تعمیم‌یافته جهت اعمال ناکاملی هندسی اولیه بر روی مدل  $T1/10-1/4&1/5$ ، می‌توان نتیجه گرفت که روش مود ناکاملی انطباق‌پذیر تعمیم‌یافته به مقدار ناکاملی اولیه کم‌تری نسبت به روش اختلال یافته نیاز دارد و با توجه به در نظر گرفتن تغییر مکان‌های سازه در حالت غیرخطی، رفتار واقع‌بینانه‌تری از سازه به دست می‌دهد. بدین ترتیب روش مناسب‌تری جهت به دست آوردن مسیر صحیح تعادل در سازه فرم آزاد سه گنبدی تک‌لایه می‌باشد. بنابراین در سایر مدل‌های مورد بررسی در این مطالعه در شرایط مختلف بارگذاری، در صورت مشاهده ناپایداری نقطه دوشاخگی، برای اعمال ناکاملی از روش مود ناکاملی انطباق‌پذیر تعمیم‌یافته استفاده می‌شود. در ادامه پایداری مدل‌ها تحت تأثیر پارامترهای متفاوت ارائه شده است.

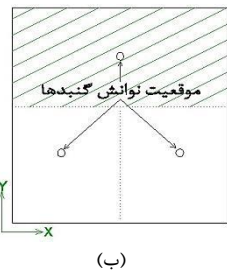
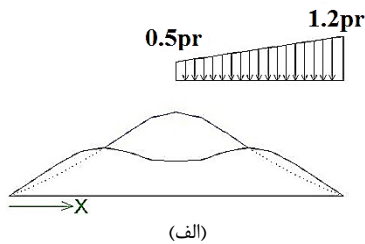
### ۵-۱-۱- اثر پارامتر ارتفاع به دهانه

تأثیر پارامتر ارتفاع به دهانه در نمودارهای بار- تغییر مکان مدل‌های با نسبت خیز به دهانه  $1/8$  و  $1/10$  در حالت بارگذاری متوازن، در شکل (۹) و (۱۰) نشان داده شده است.

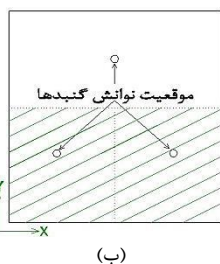
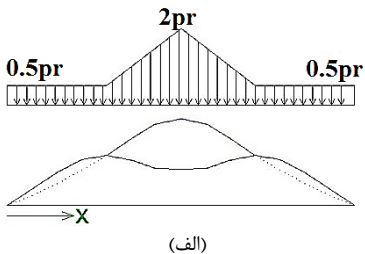


۵-۲- تحلیل پایداری در حالت بارگذاری نامتوازن در راستای محور X

توزیع بار نامتوازن در مدل‌های نوانش مثلثی در راستای محور x، مطابق شکل‌های (۱۵) و (۱۶) به دلیل هندسه نامتوازن آن در نواحی مختلف، متفاوت می‌باشد.



شکل ۱۵- توزیع بار برف نامتوازن در راستای محور x برای نواحی مشخص شده با خط چین: الف) نمای روبه‌رو، ب) پلان

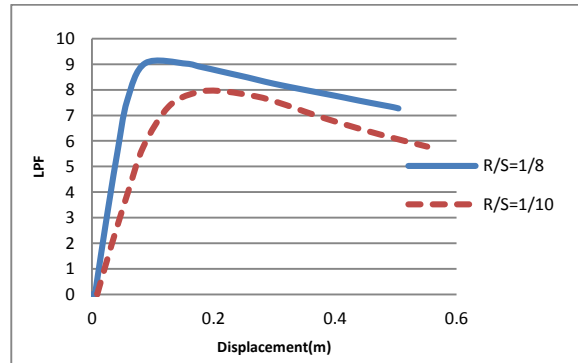


شکل ۱۶- توزیع بار برف نامتوازن در راستای محور x برای نواحی مشخص شده با خط چین: الف) نمای روبه‌رو، ب) پلان

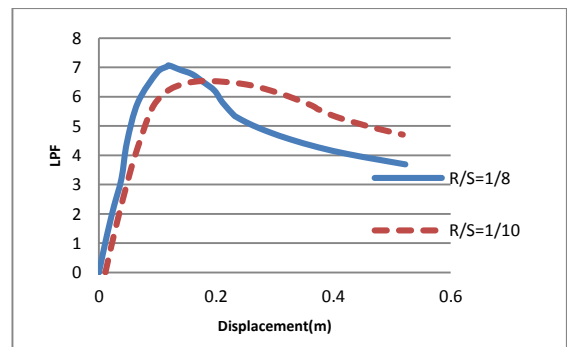
۵-۲-۱ اثر پارامتر ارتفاع به دهانه

تأثیر پارامتر نسبت ارتفاع به دهانه در مدل‌های با نسبت خیز به دهانه ثابت در حالت بارگذاری نامتوازن در راستای محور x، در اشکال (۱۷) و (۱۸) نشان داده شده است.

همچنین تأثیر پارامتر خیز به دهانه برای نسبت ارتفاع به دهانه  $1/4$  و  $1/7$  و  $1/5$  و  $1/7$  در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است.

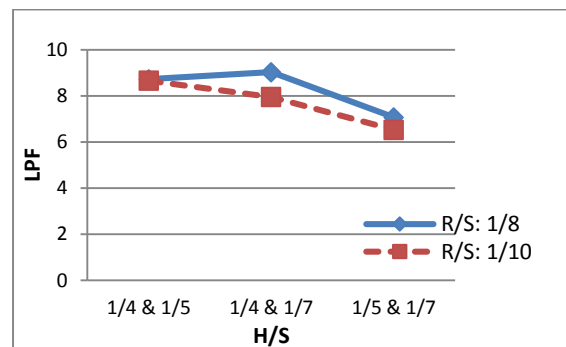


شکل ۱۲- تأثیر پارامتر خیز در نسبت ارتفاع به دهانه  $1/4$  و  $1/7$  و بارگذاری متوازن

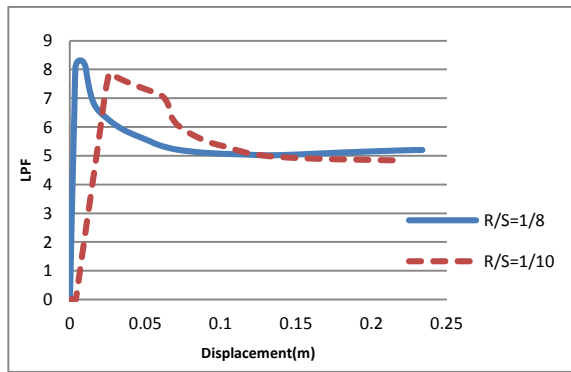


شکل ۱۳- تأثیر پارامتر خیز در نسبت ارتفاع به دهانه  $1/5$  و  $1/7$  و بارگذاری متوازن

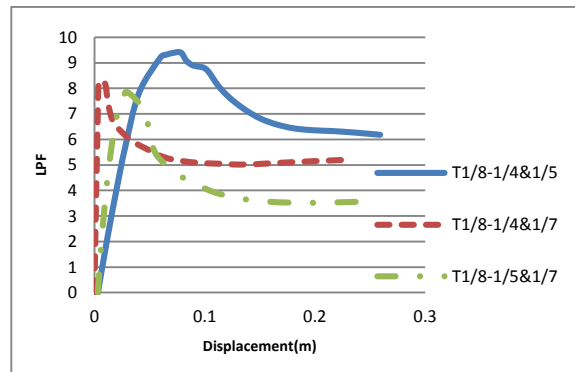
نمودار شکل (۱۴)، نتایج مقایسه‌ای مقادیر بار حدى مدل‌ها را در حالت بارگذاری متوازن را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در حالت کلی مدل‌های با نسبت خیز به دهانه  $1/8$  ضریب بار بیشتری نسبت به مدل‌های با نسبت خیز به دهانه  $1/10$  دارند.



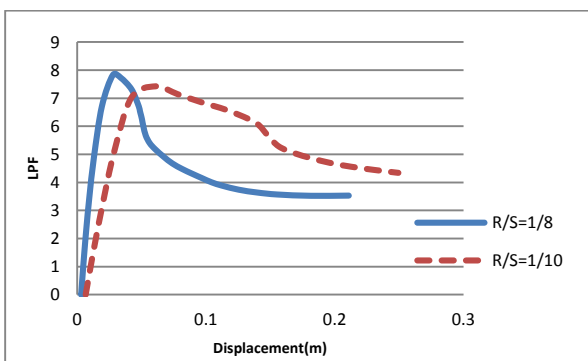
شکل ۱۴- نتایج مقایسه‌ای بار حدى در مدل‌ها در حالت بارگذاری متوازن



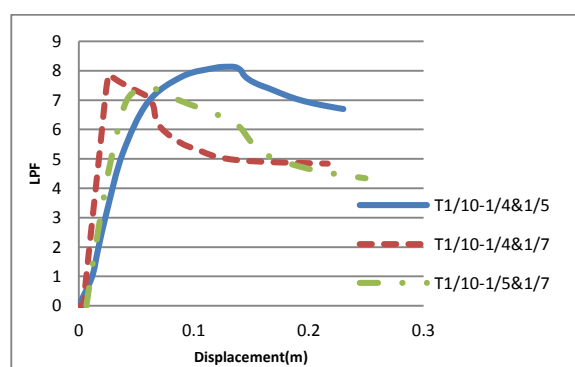
شکل ۲۰- تأثیر پارامتر خیز در نسبت ارتفاع به دهانه  $1/4$  و  $1/7$  و بارگذاری نامتوازن در جهت محور x



شکل ۱۷- نمودار بار- تغییرمکان مدل‌های با خیز  $1/8$  و بارگذاری نامتوازن در جهت محور x



شکل ۲۱- تأثیر پارامتر خیز در نسبت ارتفاع به دهانه  $1/5$  و  $1/7$  و بارگذاری نامتوازن در جهت محور x

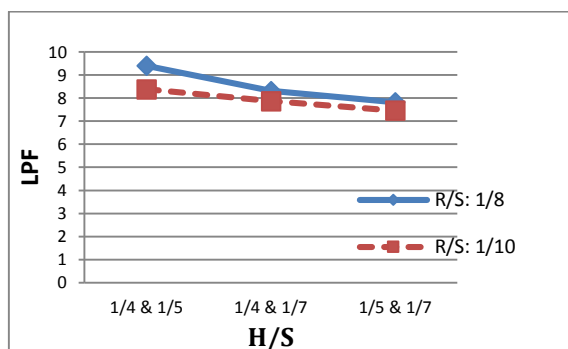


شکل ۱۸- نمودار بار- تغییرمکان مدل‌های با خیز  $1/10$  و بارگذاری نامتوازن در جهت محور x

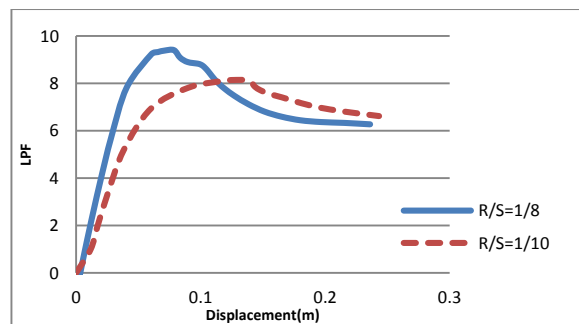
مطابق نتایج تحلیل‌های پایداری در مدل نوانش مثلثی در حالت بارگذاری نامتوازن در جهت محور x (شکل (۲۲))، برای نسبت خیز به دهانه ثابت، با کاهش نسبت ارتفاع به دهانه مقادیر بار حدی کاهش می‌یابد. در این حالت بارگذاری، کاهش نسبت ارتفاع به دهانه گنبدها، باعث درگیر شدن بیشتر المان‌های نواحی وسط گنبدها شده و در نتیجه سبب کاهش مقادیر بار بحرانی قابل تحمل سازه می‌شود.

### ۵-۲-۲- تأثیر پارامتر نسبت خیز میانی به دهانه

نمودار بار- تغییرمکان شکل‌های (۱۹)، (۲۰) و (۲۱) تأثیر تغییر نسبت خیز به دهانه در مدل‌ها را در حالت بارگذاری نامتوازن در جهت محور x را نشان می‌دهد. در این حالت بارگذاری نیز با افزایش مقدار خیز میانی، سازه بار بیشتری تحمل کرده و ضریب بار افزایش می‌یابد.

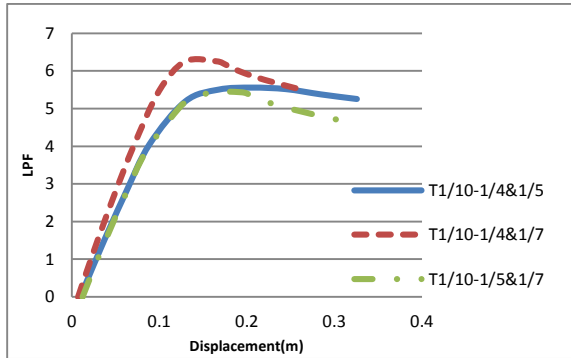


شکل ۲۲- نتایج مقایسه‌ای بارحدی در مدل‌ها در حالت بارگذاری نامتوازن در راستای محور x



شکل ۱۹- تأثیر پارامتر خیز در نسبت ارتفاع به دهانه  $1/4$  و  $1/5$  و بارگذاری نامتوازن در جهت محور x

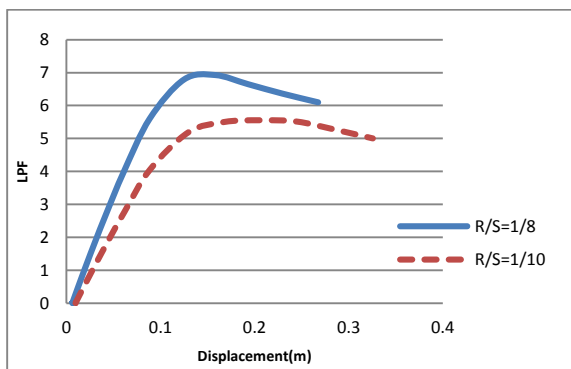




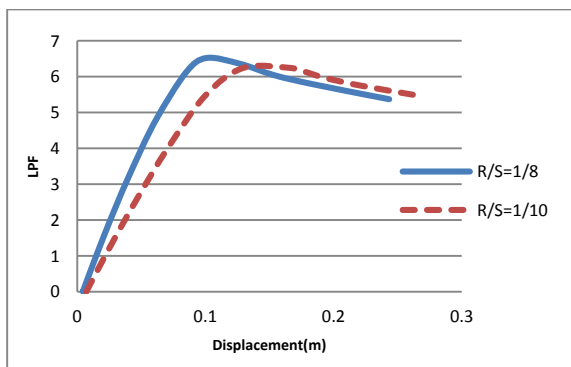
شکل ۲۵- نمودار بار- تغییرمکان مدل‌های با خیز  $1/10$  و بارگذاری نامتوازن در جهت محور  $y$

۵-۳-۲- تأثیر پارامتر نسبت خیز میانی به دهانه

شکل‌های (۲۶)، (۲۷) و (۲۸) تأثیر پارامتر خیز میانی برای مدل‌های با نسبت‌های ارتفاع به دهانه یکسان را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در این حالت بارگذاری نیز افزایش خیز منجر به افزایش ضریب بار می‌شود.



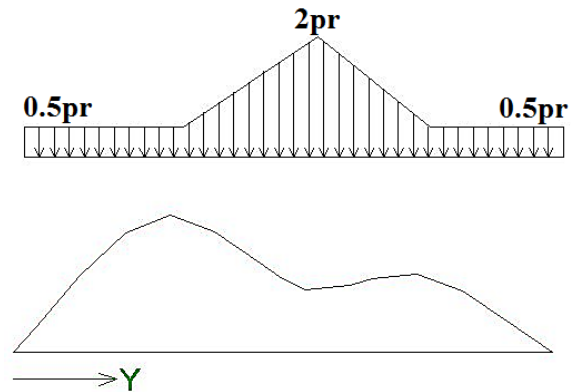
شکل ۲۶- تأثیر پارامتر خیز در نسبت ارتفاع به دهانه  $1/4$  و  $1/5$  بارگذاری نامتوازن در جهت محور  $y$



شکل ۲۷- تأثیر پارامتر خیز در نسبت ارتفاع به دهانه  $1/4$  و  $1/7$  بارگذاری نامتوازن در جهت محور  $y$

۵-۳-۳- تحلیل پایداری در حالت بارگذاری نامتوازن در راستای محور  $y$

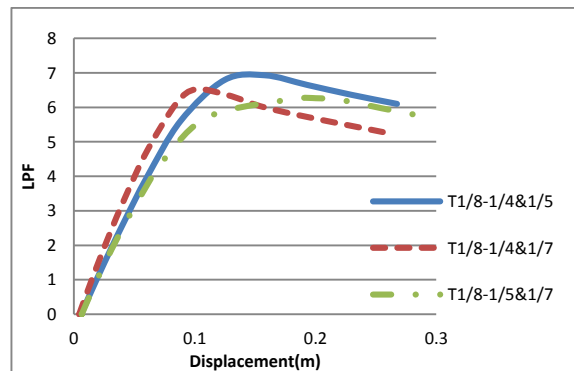
در این قسمت رفتار پایداری فرم‌های آزاد سه‌گنبدی تک‌لایه با نوانش مثلثی، با توجه به پارامترهای مختلف هندسی برای حالت بارگذاری نامتوازن در راستای محور  $y$  مورد بررسی قرار می‌گیرد. توزیع بار نامتوازن در مدل‌های نوانش مثلثی در راستای محور  $y$ ، مطابق شکل (۲۳) نشان داده شده است.



شکل ۲۳- توزیع بار برف نامتوازن در راستای محور  $y$

۵-۳-۱- اثر پارامتر ارتفاع به دهانه

نتایج تحلیل پایداری مدل‌ها در شرایط بارگذاری نامتوازن در راستای محور  $y$ ، برای نسبت خیز میانی به دهانه  $1/8$  و  $1/10$  در شکل‌های (۲۴) و (۲۵) نشان داده شده است و مشاهده می‌شود که با کاهش نسبت ارتفاع به دهانه ضریب بار کاهش می‌یابد.



شکل ۲۴- نمودار بار- تغییرمکان مدل‌های با خیز  $1/8$  و بارگذاری نامتوازن در جهت محور  $y$

به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای متغیر از جمله نسبت خیز میانی به دهانه، نسبت ارتفاع به دهانه و شرایط بارگذاری متفاوت، انجام گرفت. در تعدادی از مدل‌ها ناپایداری نقطه دوشاخگی بر تحلیل حاکم شد که برای دستیابی به مسیر صحیح تعادل نیاز به اعمال ناکاملی اولیه هندسی بود. جهت اعمال ناکاملی هندسی ابتدا از روش تقریبی - اختلال یافته استفاده شد و سپس روش مود ناکاملی انطباق‌پذیر تعمیم‌یافته به‌کار گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده به‌صورت زیر می‌باشند:

۱- مودهای پایین کمانش تأثیر چندانی در کاهش بار حدى ندارند و مودهای حساس این نوع سازه‌ها مودهای بالاتر می‌باشند؛

۲- روش مود ناکاملی انطباق‌پذیر تعمیم‌یافته می‌تواند به‌عنوان روشی مناسب با دقت بیشتر جهت اعمال ناکاملی هندسی اولیه در مقایسه با روش اختلال یافته در سازه‌های فرم آزاد سه‌گنبدی تک‌لایه، مورد استفاده قرار گیرد؛

۳- ابتدا چند عضو از اعضای سازه‌ها به حداکثر ظرفیت باربری خود می‌رسند اما به‌دلیل نوع بافتار و هندسه و شرایط تکیه‌گاهی خاص سازه‌ها، مدل‌ها پایداری خود را از دست نداده، توزیع بار صورت می‌گیرد، سازه همچنان بار تحمل کرده و ظرفیت باربری افزایش پیدا می‌کند؛

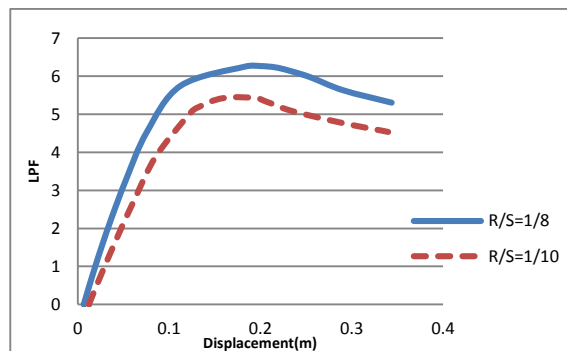
۴- در حالت بارگذاری متوازن و نامتوازن، در فرم‌های آزاد سه‌گنبدی با نوانش مثلثی در تمامی مدل‌ها با نسبت ارتفاع به دهانه ثابت، با افزایش خیز میانی ظرفیت باربری سازه افزایش پیدا می‌کند؛

۵- در بارگذاری نامتوازن در راستای محور  $x$ ، در این تیپ از فرم‌های آزاد سه‌گنبدی، نسبت ارتفاع به دهانه بهینه در نسبت‌های  $1/4$  و  $1/5$  اتفاق می‌افتد. همچنین حداکثر ظرفیت باربری در خیز میانی بیشتر و نسبت ارتفاع به دهانه بهینه اتفاق می‌افتد؛

۶- در شرایط بارگذاری نامتوازن در جهت محور  $y$ ، برای فرم‌های آزاد سه‌گنبدی مورد مطالعه در این پژوهش، در نسبت خیز میانی به دهانه کم‌تر، بیش‌ترین ظرفیت باربری در نسبت ارتفاع به دهانه  $1/4$  و  $1/7$  اتفاق می‌افتد؛

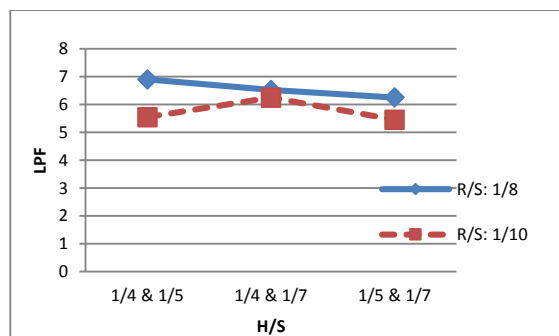
۷- بارگذاری برف نامتوازن در جهت محور  $y$ ، در فرم‌های آزاد سه‌گنبدی با نوانش مثلثی، بحرانی‌ترین الگوی بارگذاری در رفتار پایداری این سازه‌ها می‌باشد؛ بنابراین سازه‌های فضاکار فرم آزاد سه‌گنبدی تک‌لایه با نوانش مثلثی نسبت به بارگذاری نامتوازن در جهت محور  $y$  حساس بوده و ترکیبات مختلف این نوع بارگذاری در تحلیل‌های غیرخطی ضروری می‌باشد؛

۸- در فرم‌های آزاد سه‌گنبدی تک‌لایه مورد مطالعه در این پژوهش، مکانیزم خرابی مدل‌ها از نوع خرابی کلی می‌باشد.



شکل ۲۸- تأثیر پارامتر خیز در نسبت ارتفاع به دهانه  $1/5$  و  $1/7$  و بارگذاری نامتوازن در جهت محور  $y$

مطابق شکل (۲۹) در حالت بارگذاری نامتوازن در جهت محور  $y$ ، در همه نسبت‌های ارتفاع به دهانه، با کاهش مقدار خیز در نسبت ارتفاع به دهانه یکسان، ضریب بار نیز کاهش یافته است. در نسبت خیز به دهانه ثابت  $1/8$ ، با کاهش نسبت ارتفاع به دهانه ضریب بار کاهش پیدا می‌کند، اما در نسبت خیز به دهانه  $1/10$  بیش‌ترین ضریب بار در نسبت ارتفاع به دهانه  $1/4$  و  $1/7$  اتفاق می‌افتد. بهینه‌ترین مدل در حالت بارگذاری نامتوازن در جهت محور  $y$ ، مدل  $T1/8-1/4&1/5$  با نسبت ارتفاع به دهانه  $1/4$  و  $1/5$  در نسبت خیز به دهانه  $1/8$  می‌باشد. ضریب بار در تمامی مدل‌ها تحت بارگذاری بار برف نامتوازن در راستای محور  $y$ ، کم‌تر از سایر حالات بارگذاری می‌باشد.



شکل ۲۹- نتایج مقایسه‌ای بار حدى در مدل‌ها در حالت بارگذاری نامتوازن در راستای محور  $y$

## ۶- نتیجه‌گیری

در سازه‌های فضاکار ماهیت رفتار سازه‌ها اغلب به‌صورت غیرخطی بوده و مسئله پایداری تعیین‌کننده‌ترین عامل در تحلیل و طراحی این سازه‌ها است. به‌منظور درک رفتار پایداری سازه‌های فضاکار فرم آزاد سه‌گنبدی تک‌لایه، یک تیپ مدل با نوانش مثلثی از این سازه‌ها مدل‌سازی شده و در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS، تحت تحلیل پایداری قرار گرفتند. تحلیل‌های پایداری

## ۷- مراجع

- "آیین‌نامه سازه‌های فضاکار، نشریه ۴۰۰، ۱۳۸۹".
- اخلاصی ا، امیر م ح، "قابلیت سازه‌های فضایی در یکی نمودن سازه و معماری (با رویکرد به روند طراحی ساختمان‌های فرم آزاد)", سومین کنفرانس ملی سازه‌های فضاکار، ۱۳۹۰.
- توری م، ندافیان ح، مسعودی ا، شهبازی ی، چناقلو م، "مقایسه و ارزیابی فرم، ساختار و مشکلات ساخت پذیری سازه‌های فضاکار فرم آزاد پیوسته و مشبک"، چهارمین کنفرانس ملی سازه‌های فضاکار، ۱۳۹۰.
- موسوی س م ع، "بررسی رفتار پایداری سازه‌های فضاکار مشبک فرم آزاد دو گنبدی"، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، ایران، ۱۳۹۴.
- ANDRÉS OA, "About the freedom of free forms", International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia.
- Rene Motro and M.Bagnéris "Structural morphology and free form design", International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2007.
- Jun Y, Yaming L, Jiachun C, "Research on Design of structure for Heixiazi Island Greenhouse", Proceedings of the IASS-SLTE 2014 Symposium "Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints", 15 to 19 September 2014, Brasilia, Brazil, 2014.
- Botzheim B, Gidófalvy K, Kikunaga PE, Szollár A, Reith A, "Performance-oriented Design Assisted by a Parametric Toolkit-Case study", presented at the CAADence in ArchitectureAt: Budapest / Hungary, 2016.
- Knippers J, HELBIG T, "The Frankfurt ZEIL grid shell", In Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures (50th. 2009. Valencia). Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures: Proceedings, 2010.
- Nooshin H, Moghimi M, "Formex formulation of freeform structural surfaces", Asian Journal of Civil Engineering, 2007, 8, 459-469.
- Abedi K, "Propagation of local instabilities in braced domes", PHD Thesis, University of Surrey, 1997.

## EXTENDED ABSTRACT

# Investigation into the Stability Behavior of Single-Layer Triple Domes Free-Form Reticulated Space Structure (Triangular Novation)

Mozhgan Valinezhad, Karim Abedi\*

Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

Received: 08 October 2018; Accepted: 28 December 2020

### Keywords:

Free-form, Generalized conformable imperfection mode, Triple domes, Geometric imperfection, Space structure.

## 1. Introduction

Free form surfaces are referred to as a combination of double-curved surfaces, which are not necessarily a combination of common geometric shapes such as cubic, spherical and elliptic shapes or a combination of them (Tian, 2004). Two types of instability occur in space structures: limit point instability and bifurcation point instability. The structures that exhibit bifurcation point instability, have more sensitivity to geometric imperfection (in particular the type of node deviation) than limit point instability. Therefore, it is necessary to investigate the sensitivity to imperfection in these structures, particularly single layer dome structures. So far, no research has been conducted on triple domes free form space structures. Therefore, in the present paper, the numerical finite element method is used to analyze and study the instability behavior of triple domes free form single-layer space structure. In this research, the approximate-perturbed method and the method of generalized conformable imperfection mode were used to implement imperfection.

## 2. Methodology

### 2.1. Configuration and loading of models

Novational function of FORMIAN software is used for configuration processing of triple domes free form single layer space structure. Novational displacement is a particular type of geometric translation that modifies a form and generates various forms by means of one or more parts on the base form. Novational function equation is written as follows (Nooshin and Moghim, 2007):

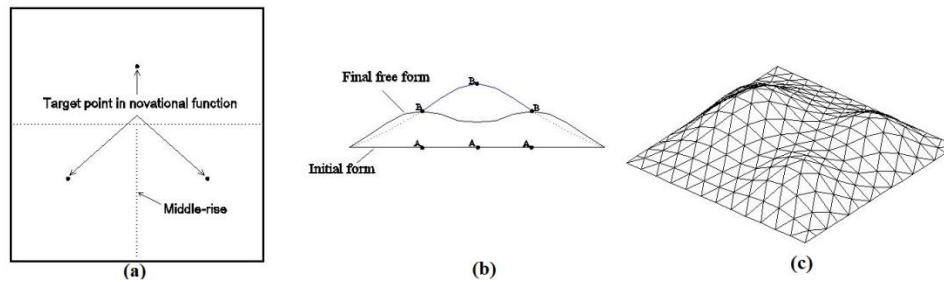
$$G = NOV(m, c, L1, L2)|E$$

The initial form in this research is three-way flat configurations with square plan. The configuration (Fig. 1-c) of triple domes free form space structure models is obtained by using notational function on the noted base form in the specified areas of plan with black dots and the implementation of two-way middle-rise as dash line, as shown in Fig. 1-a.

In this research, the models with three-way configuration, triangular novation and fixed supports are considered and the effects of height to span ratios of 1/4, 1/5 and 1/7 and middle rise to span ratios of 1/8 and 1/10 and symmetrical and asymmetrical loading in two directions were studied. In the design of the models, dead load, a live load of snow, seismic load, and thermal load were considered. In the research, dead load was applied in the models as a nodal load with the value of 0.5 Kn/m<sup>2</sup>. The snow load was assumed as P<sub>g</sub>=1.5 Kn/m<sup>2</sup>.

\* Corresponding Author

E-mail addresses: mozhgan.valinezhad@gmail.com (Mozhgan Valinezhad), k\_abedi@sut.ac.ir (Karim Abedi).



**Fig. 1.** a) The position of points in generating triple domes free-form in plan, b) The front view, c) Configuration of triple domes free form space structure models

According to the equations of code due to the different slopes of the lattices, the snow load for each lattice was calculated and applied separately. According to the space structure code regarding the seismic load, it is necessary to conduct Time History dynamic analysis with at least 3 accelerographs. In the research, according to the assumed criteria, three accelerographs of Parkfield, Imperial Valley and Chalfant Valley were extracted and applied after Scaling. The load combinations were applied by considering dead, snow, seismic and thermal loads. In the design of the models, four types of tubular sections are selected with external diameter and thickness of 8.5mm and 120mm, 10mm and 160mm, 20mm and 190mm, 30mm and 270mm.

In order to study the instability behavior of triple domes free-form space structures, nonlinear finite element analysis should be carried out. In the present study, all analyses were carried out using ABAQUS, which is a general-purpose finite element program designed specifically for advanced structural analysis. In the meshing and modeling of triple domes free-form members, a three-dimensional first-order beam (B31) element is used. The yield criterion in the modeling is the Von-Mises criterion and the models have been analyzed using Abaqus/standard Solver. To determine the equilibrium paths through limit points into the post-critical range, the 'Arc-Length-Type Method' was used which is the most efficient method for his purpose and it was now predominantly used in structural nonlinear analysis programs.

## 2.2. Stability analysis of the models

In this research, the application of imperfection is conducted by the approximate perturbed method as well as generalized conformable imperfection mode method. After modeling, the application of loading and boundary conditions, nonlinear analysis is conducted on the models and the presence of a bifurcation point before the limit point is investigated for determining the type of instability. In the research, the stability behavior of 6 models with triangular novation, height to span ratios of 1/4, 1/5 and 1/7 and middle rise to span ratios of 1/8 and 1/10 were studied.

Due to the occurrence of bifurcation point instability in the models with the rise to the span ratio of 1/10 and the height to the span ratios of 1/4 and 1/5, at first, the approximate-perturbed method is used to apply imperfection. In order to conduct an imperfection analysis of the approximate-perturbed method, a linearized buckling analysis is carried out and buckling modes are extracted. Then, these buckling modes are applied to the model as a primary geometric imperfection and the model is subjected to static nonlinear analysis. In the research, 80 primary buckling modes are applied in the model as imperfection with a value of  $S/500$  ( $S$  is the length of dome span). It was observed that lower modes of buckling have a slight effect on the reduction of limit load and are considered insensitive modes. Among the applied modes, the 11<sup>th</sup> mode is the most sensitive mode due to the greatest reduction in the limit load. Considering this mode as primary imperfection, the limit load can be reduced to 8.69 by an imperfection value of  $S/150$  and the correct path of the balance can be obtained.

The second method for imperfection application is the generalized conformable imperfection mode method that was proposed in 2015 by Mousavi (Mousavi et al., 2015). In this method, geometric deformations of the structure are calculated in each of the three directions near the critical loads, before and after the buckling of the structure, and their difference is applied to the structure as a form of buckling mode for primary imperfection with a given value. Then, the structure is subjected to nonlinear static analysis. The correct required value for primary geometric imperfection is  $S/220$  in this model. Therefore, the required imperfection value in this method is less than that of the approximate-perturbed method.

## 3. Results and discussion

In this study, it was observed that the generalized conformable imperfection mode method is a more appropriate method to obtain the correct equilibrium path in triple domes free form space structure.

The load-displacement responses of the models with the middle rise to span ratio of 1/8 and 1/10 in the

central node for global loading are shown in Fig. 2. As it is seen, the overall collapse occurs in all models, and the increase of the height to the span ratio with the same rise to span ratio increases the value of load factor of the models.

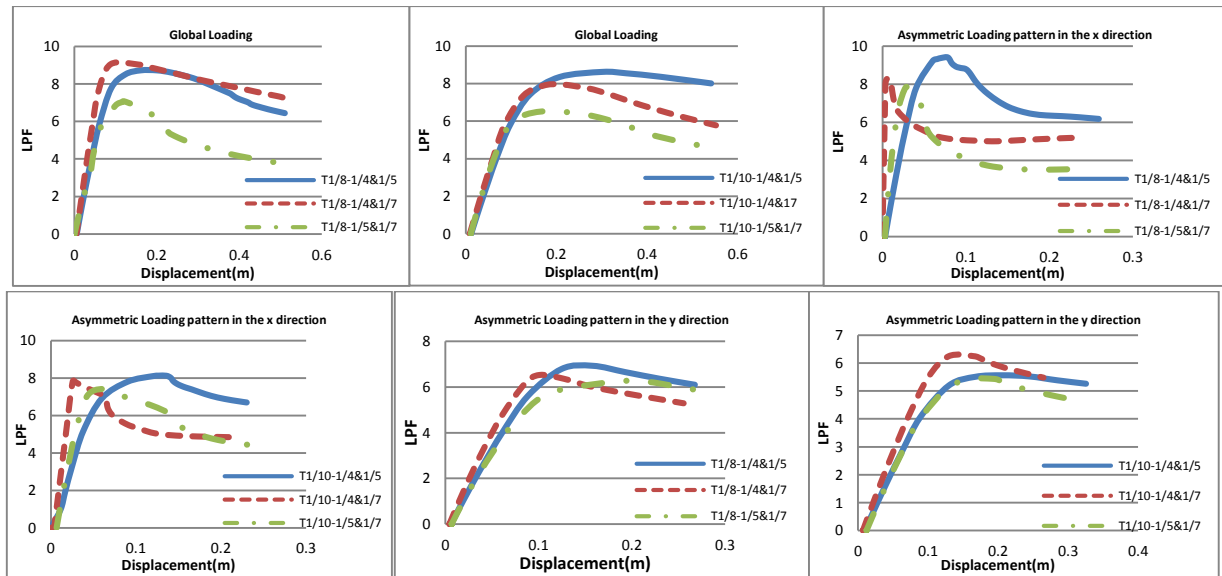


Fig. 2. Load-displacement responses of models in the different Loading patterns

#### 4. Conclusions

- Lower modes of the buckling do not have a significant effect on the reduction of limit load, and sensitive modes of these structures are upper modes.
- The comparison of the approximate-perturbed method and the generalized conformable imperfection mode method shows that the generalized conformable imperfection mode method is a more appropriate method to apply imperfection in triple domes free form single layer space structures.
- In both symmetrical and asymmetrical loading modes, overall collapse occurs in all models.
- In most of the models, the increase of the height to span ratio increases the value of the load factor.
- The increase of middle rise to span ratio increases the value of the load factor of models.
- The asymmetric loading pattern in the y direction is the most critical loading pattern in the triple domes free form.

#### 5. References

- Tian T, Handbook of space frame structure, Institute of building structures, Chinese Academy of Building Research, Beijing, China, 2004.
- Nooshin H, Moghimi M, "Formex formulation of free form structural surfaces", Asian Journal of Civil Engineering, 2007, 8 (4), 459-469.
- Mousavi MA, Abedi K, Chenaghloou M, "Imperfection sensitivity analysis of double domes free form space structures", International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2015, 15 (4), 1450067.