

Improving the failure behavior of scallop space double layer domes using tube in tube force limiting device

Jafar Ghalejoughi¹, Mohammad Reza Sheidaii^{1,2*}, Saeed Tariverdilo^{1,2}

1- Department of Civil Engineering, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran

2- Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

ABSTRACT

Double-layer scallop space domes is one of the new types of domes whose geometric shape is a function of parameters such as height to span ratio, amplitude to span ratio, arc style of sectors and style of variation in meridional direction. In these structures, the buckling behavior of the compression member has a determinative role in the collapse behavior of the structure and it is necessary to use an appropriate solution to deal with the failure of the compression member and consequently the collapse of scallop domes. One of the solutions is to replace the compression members with FLD, which can prevent collapse. In the present study, a TTFLD has been used, which has efficiency in eliminating the buckling of the compression member. First, the effect of geometric parameters on the collapse behavior of domes was investigated using the FEM and nonlinear analysis, and critical members prone to collapse in scallop domes with different geometric shapes were identified. The critical compression members were then replaced with TTFLDs, and the reinforced scallop domes were re-analyzed. By comparing the collapse behavior of domes in two cases with and without the use of FLDs, the results showed that by replacing the critical compression members with FLDs, a significant improvement in the collapse behavior of the models is achieved. The improvement is directly related to the number of devices. With increasing the ratio of amplitude to span, the ductility and bearing capacity of the domes increase. In addition, by changing the style variation from linear to parabolic in the direction of the meridian lines, the ductility and bearing capacity of the dome increase. In the change of arc style from sinusoidal to parabolic, with increasing the ratio of height to span, the bearing capacity and ductility of the scallop dome increase.

ARTICLE INFO

Receive Date: 21 October 2020

Revise Date: 21 November 2020

Accept Date: 28 May 2021

Keywords:

Space structure
Scallop double-layer dome
Tube in tube force limiting device (TTFLD)
Finite element
Collapse behavior

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.252976.2264>

*Corresponding author: Mohammad Reza Sheidaii
Email address: m.sheidaii@urmia.ac.ir

بهبود رفتار خرابی گنبد‌های دولایه فضاکار صدفی با استفاده از ابزار محدودکننده

نیروی لوله در لوله

جعفر قلعه جوقی^۱، محمدرضا شیدائی^{۲*}، سعید تارپوردیلو^۲

۱- گروه عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران.

۲- گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

چکیده

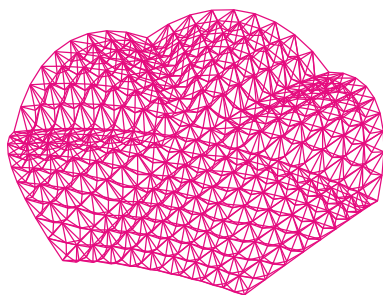
گنبد دولایه فضاکار صدفی یکی از انواع جدید گنبد‌های فضاکار است که شکل هندسی آن تابع پارامترهایی نظیر نسبت ارتفاع به دهانه، نسبت برآمدگی به دهانه، سبک قوسی قاچ‌ها و سبک تغییرات در جهت خطوط نصف‌النهار می‌باشد. در این سازه‌ها، رفتار کمانش عضو فشاری نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار خرابی سازه دارد و ضروری است از راهکارهای مناسب جهت مقابله با خرابی اعضای فشاری و به تبع آن خرابی گنبد‌های دولایه فضاکار صدفی استفاده نمود. یکی از راهکارهای مقبول، جایگزینی اعضای فشاری سازه فضاکار با ابزار محدودکننده نیرو است که بدین طریق، می‌توان از کمانش و افت ظرفیت ناگهانی عضو فشاری و به تبع آن خرابی ترد سازه جلوگیری کرد. برای این منظور در تحقیق حاضر از ابزار محدودکننده نیروی لوله در لوله که کارایی لازم در حذف کمانش عضو فشاری را دارد، استفاده شده است. ابتدا تاثیر پارامترهای هندسی بر رفتار خرابی گنبد‌های دولایه صدفی با استفاده از روش عناصر محدود و انجام تحلیل غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته و اعضای بحرانی مستعد ایجاد خرابی در گنبد‌های دولایه فضاکار صدفی با اشکال هندسی مختلف شناسایی شده‌اند. سپس اعضای فشاری بحرانی با ابزار محدودکننده نیروی لوله در لوله جایگزین شده و گنبد‌های دولایه فضاکار تقویت شده مجدداً تحت تحلیل غیرخطی قرار گرفته‌اند. با بررسی و مقایسه رفتار خرابی گنبد‌های صدفی در دو حالت با و بدون استفاده از ابزار محدودکننده نیرو، نتایج نشان داد که با جایگزینی اعضای فشاری بحرانی با ابزار محدودکننده نیرو، بهبود قابل ملاحظه در رفتار خرابی مدل‌ها حاصل می‌شود که میزان بهبود با تعداد این ابزار رابطه مستقیم دارد. با افزایش نسبت برآمدگی به دهانه، شکل پذیری و ظرفیت باربری گنبد دولایه صدفی افزایش می‌یابد. همچنین با تغییر سبک تغییرات از خطی به سهمی‌وار در جهت خطوط نصف‌النهاری گنبد‌ها، شکل پذیری و ظرفیت باربری گنبد افزایش می‌یابند. در تغییر سبک قوس از سینوسی به سهمی‌وار، با افزایش نسبت ارتفاع به دهانه، ظرفیت باربری و شکل پذیری گنبد دولایه صدفی افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: سازه فضاکار، گنبد دولایه صدفی، ابزار محدودکننده نیروی لوله در لوله، عناصر محدود، رفتار خرابی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.252976.2264	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/jsce.2021.252976.2264	۱۴۰۰/۱۱/۳۰	۱۴۰۰/۰۳/۰۷	۱۴۰۰/۰۳/۰۷	۱۳۹۹/۰۹/۰۱	۱۳۹۹/۰۷/۳۰
محمدرضا شیدائی m.sheidaii@urmia.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

سازه‌های فضاکار برای پوشش فضاهای وسیع نظیر سالن‌های اجتماعات، فضاها و استادیوم‌های ورزشی و بسیاری اهداف دیگر در دنیا بکار می‌روند [۱]. سازه‌های فضاکار در مقایسه با سایر سیستم‌های سازه‌ای دارای مزایای فراوانی هستند که یکی از این مزایا سبکی آن‌ها است. سبکی سازه بیشتر به این دلیل است که مصالح توزیع فضایی مناسبی دارند، به گونه‌ای که مکانیزم انتقال بار عمدتاً محوری و از نوع کششی یا فشاری است. در سازه‌های فضاکار کمانش عضو فشاری نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار خرابی سازه دارد. خرابی این سازه‌ها مستقیماً از طریق مشخصات اعضاء و نیز با رفتار مشخصات اتصالات کنترل می‌شود. اگر سازه توانایی تحمل نیروهای وارده را نداشته باشند، خرابی‌هایی در آن رخ می‌دهد که از آن جمله می‌توان به خرابی پیشرونده اشاره نمود که با خرابی متوالی اعضا همراه است [۲]. این سازه‌ها براساس نوع و شکل طبقه‌بندی می‌شوند که از آن جمله سازه‌های فضاکار مشبک با چهار پیکربندی شبکه، چلیک، گنبد و فرم آزاد می‌باشند. گنبد مشبک شامل یک یا چندلایه می‌باشد که در تمامی جهات به فرم قوسی درآمده است [۳]. توسعه گنبدها بطور کلی از توسعه مصالح تبعیت می‌کند و از دیرباز در معماری به کار گرفته شده است [۴]. یکی از انواع متعارف گنبدهای فضاکار، گنبد دیاماتیک است که دارای نقش و الگوی مثلثی شکل می‌باشد، با تقسیم این گنبد به چند قاچ مساوی، وقتی که هر قاچ، انحنای مجدد پیدا کند، گنبد صدفی بدست می‌آید [۵]، که از پوسته صدف دریایی به همین نام انتخاب شده است (شکل ۱).



ب- گنبد دولایه صدفی



الف- پوسته صدف دریایی

شکل ۱: گنبد فضاکار صدفی

در سال ۲۰۱۲ بابایی و شیدائی [۶] مطالعه‌ای به منظور بدست آوردن طرح بهینه سازه و هندسه گنبدهای فضاکار مشبک دولایه با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی انجام دادند. گنبد دولایه اسکالپ مورد مطالعه دارای پلان هشت‌ضلعی و دهانه ۵۰ متر بود. در واقع هدف از این تحقیق، بهینه‌سازی همزمان هندسه و سازه‌های گنبدهای دولایه بزرگ مقیاس بود به نحوی که بتوان وزن سازه‌ای این گنبدها را تا حدود زیادی کاهش داد و طرح نهایی گنبدهای دو لایه اسکالپ را بهبود بخشید، بطوریکه الگوریتم‌های ارائه شده، قابلیت اعمال به سایر گنبدها با تعداد بیشتر گره‌ها و اعضا را هم داشته باشد [۶].

در سال ۲۰۱۳ کامیاب و سلاجقه [۷] مطالعه‌ای به منظور بهینه‌سازی وزنی گنبدهای اسکالپ با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات^۱ انجام دادند. نتایج عددی نشان می‌دهد که در تمام موارد، فرآیند بهینه‌سازی غیرخطی نسبت به فرآیند بهینه‌سازی خطی به راحتی همگرا می‌شود. این بدان معنی است که با توجه به رفتار غیرخطی گنبد اسکالپ، می‌توان طرح‌های مطلوب با ضرایب ایمنی بزرگتر و وزن سبک‌تر را در مقایسه با طرح‌های بهینه خطی بدست آورد [۷].

در سال ۲۰۱۳ کامیاب و همکاران [۸] اثر سبک قوسی گنبدهای دو لایه اسکالپ را روی وزن آن‌ها مورد بررسی قرار دادند. مدل‌های مورد مطالعه با بافتار دیاماتیک با دو نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۱ و ۰/۲ و دو نسبت برآمدگی قاچ به دهانه ۰/۰۵ و ۰/۱۵، با دو سبک قوسی سینوسی و سهمی‌وار بودند. نتیجه مطالعه نشان می‌دهد که گنبدهای با سبک قوسی سهمی‌وار دارای وزن کمتری هستند. همچنین

1- Particle Swarm Optimization (PSO)

نوع سبک قوسی تاثیری در رفتار گنبد از لحاظ تعداد بهینه قاچ‌ها یا میزان بهینه برآمدگی قاچ نداشته و این دو پارامتر هندسی به مقدار نسبت ارتفاع به دهانه بستگی دارند [۸].

در سال ۱۳۹۵ اخوان معصومی و همکاران [۹]، پایداری گنبدهای دو لایه اسکالپ را با در نظر گرفتن پارامتر نسبت ارتفاع به دهانه و نوع بارگذاری بررسی نمودند. در این مطالعه، گنبدهایی با طول دهانه ۵۰ متر و نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ تحت دو نوع بارگذاری مورد بررسی قرار گرفته است. در اثر بارگذاری نموی گسترده، در هر سه مدل، مکانیزم خرابی به صورت گسیختگی فشاری و ناپایداری از نوع حدی بوده است. در اثر بارگذاری نموی در ناحیه مرکزی گنبد، نوع مکانیزم خرابی به صورت خرابی موضعی بدون فروجهش بوده و وزن گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۲ در مقایسه با سایر نسبت‌ها کمتر است [۹]. در سال ۲۰۱۷ صادقی و همکاران [۱۰]، تاثیر برخی پارامترهای هندسی گنبد اسکالپ بر روی توزیع ضریب باد را به صورت عددی بررسی نمودند. در این تحقیق با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی^۲ تغییرات ضریب فشار باد بر روی گنبدها تعیین گردید و سپس ضریب فشار باد با نسبت‌های ارتفاع به دهانه مختلف تعیین شدند. در ادامه با ایجاد شیارهایی بر روی گنبدها و تغییر زاویه این شیارها نسبت به جهت باد، ضرایب فشار باد به دست آمده است. با مقایسه نتایج این دو روش، روشی مناسب برای بدست آوردن ضرایب فشار باد برای گنبدهای شیاردار و اسکالپ ارائه شده است [۱۰].

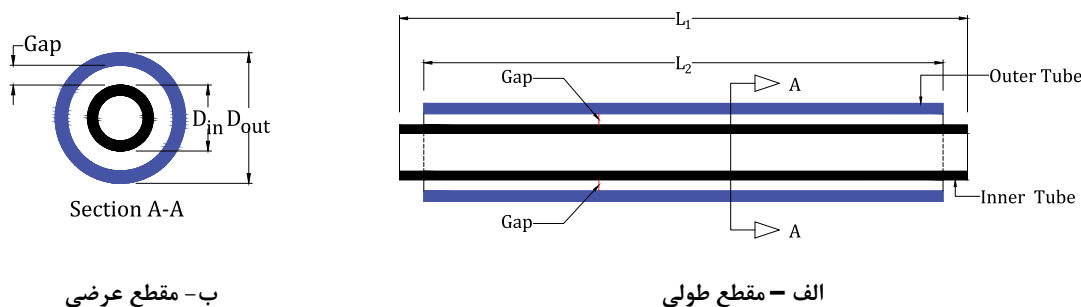
در سال ۱۳۹۸ امین‌خانی و همکاران [۱۱]، اثر احتمالاتی ناکاملی‌های مکانیکی را بر روی رفتار پایداری گنبدهای دو لایه اسکالپ با قوس سینوسی تحت بارگذاری خارجی متوازن و نامتوازن برف بررسی نمودند. برای مطالعه موردی گنبد دو لایه، تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی و دینامیکی انجام شد و سپس رفتار سازه با اعضای دارای ناکاملی تصادفی با سازه با ساختار ایده‌آل مقایسه شد. بر اساس این تحقیق ناکاملی‌ها باعث کاهش قابل توجهی در ظرفیت باربری گنبد دو لایه می‌شود [۱۱].

گنبدهای صدفی به خاطر شکل هندسی و انحنای خاصی که دارند بطور معمول از سختی بالاتری نسبت به گنبدهای معمولی برخوردارند و علی‌رغم گرایش طراحان به این نوع از گنبدها، به دلیل پیچیدگی هندسی آن‌ها، مطالعات کمی در این زمینه صورت گرفته است که اکثراً محدود به بحث بهینه‌سازی هندسی و وزنی بوده است و به مطالعات در زمینه بهبود رفتار خرابی و پایداری به خوبی پرداخته نشده است. لذا در مطالعه حاضر به بهبود رفتار خرابی گنبدهای دولایه صدفی با بکارگیری ابزار محدودکننده نیروی لوله در لوله که بهبود دهنده رفتار کمانش اعضای فشاری است، پرداخته شده است. همچنین در بررسی بهبود رفتار خرابی گنبد دو لایه صدفی، تاثیر پارامترهای مختلف هندسی نظیر نسبت ارتفاع به دهانه، نسبت برآمدگی به دهانه، سبک قوسی قاچ‌ها و سبک تغییرات در جهت خطوط نصف‌النهاری مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- ابزار محدودکننده نیروی لوله در لوله^۲

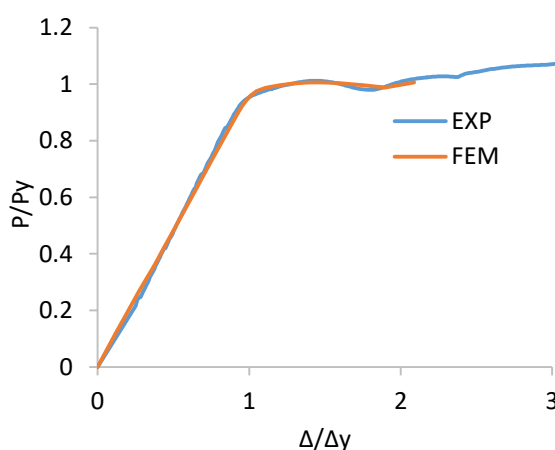
ابزار محدودکننده نیروی لوله در لوله، با اعمال واکنشی شکل‌پذیر به عضو فشاری از کمانش آن جلوگیری می‌نماید. این ابزار شامل یک عضو داخلی تحت نیروی محوری وارده و یک لوله خارجی است که به‌عنوان غلافی برای عضو داخلی عمل می‌نماید. مقاومت خمشی لوله خارجی، مقیدکننده حرکت جانبی و به تبع آن افزایش ظرفیت کمانش لوله داخلی تحت اثر نیروی محوری فشاری وارده می‌باشد [۱۲]. در این سیستم به واسطه ایجاد قیود جانبی توسط لوله خارجی، شکل مد کمانش عضو فشاری از شکل مد اول به شکل مدهای بالاتر ارتقا می‌یابد و امکان وقوع پدیده تسلیم صورت می‌گیرد. لوله خارجی به‌صورتی طراحی می‌شود که بار کمانش اولر لوله خارجی بیشتر از بار تسلیم لوله داخلی باشد [۱۳]. شمای کلی از ابزار محدودکننده نیروی لوله در لوله و جزئیات آن در شکل ۲ نشان داده شده است، که در آن L_1 و L_2 به ترتیب طول لوله خارجی و لوله داخلی و D_{in} و D_{out} به ترتیب قطر لوله خارجی و لوله داخلی می‌باشد.

2- Computational Fluid Dynamics (CFD)
3- Force Limiting Device (FLD)



شکل ۲: جزئیات سیستم لوله در لوله [۱۲]

رفتار بار- تغییر شکل محوری ابزار محدود کننده نیروی لوله در لوله به پارامترهای موثر نظیر گپ بین دو لوله داخلی و لوله خارجی (Gap) و نسبت طول لوله خارجی به طول لوله داخلی ($\frac{L_2}{L_1}$) بستگی دارد. جهت بررسی تاثیر این پارامترها، نمونه‌های مختلف سیستم لوله در لوله انتخاب گردیدند [۱۲]. هرچه گپ بین دو لوله کاهش و نسبت طول لوله خارجی به طول لوله داخلی در نمونه‌ها افزایش می‌یابد، کارایی لوله خارجی به عنوان غلاف برای لوله داخلی در سیستم بیشتر می‌شود. ظرفیت باربری ابزار محدود کننده نیروی لوله در لوله با پارامتر فاصله بین لوله داخلی و لوله خارجی رابطه معکوس و با پارامتر نسبت طول لوله خارجی به طول لوله داخلی رابطه مستقیم دارد. زمانی که نسبت گپ (نسبت اندازه گپ بر شعاع ژیراسیون لوله داخلی) کاهش و در حدود ۴۳ درصد یا کمتر از آن و نسبت طول لوله خارجی به طول لوله داخلی بیش از ۵۵ درصد است، ظرفیت باربری سیستم با افزایش چشمگیری مواجه بوده و از عملکرد مطلوب در کنترل کمانش عضو فشاری برخوردار است [۱۲]. رفتار بار- تغییر شکل محوری ابزار محدود کننده نیروی لوله در لوله با گپ کم و نسبت طول زیاد در شکل ۳ نشان داده شده است. Δ_y و P_y به ترتیب نیرو و تغییر شکل محوری حالت تسلیم شدگی لوله داخلی است.

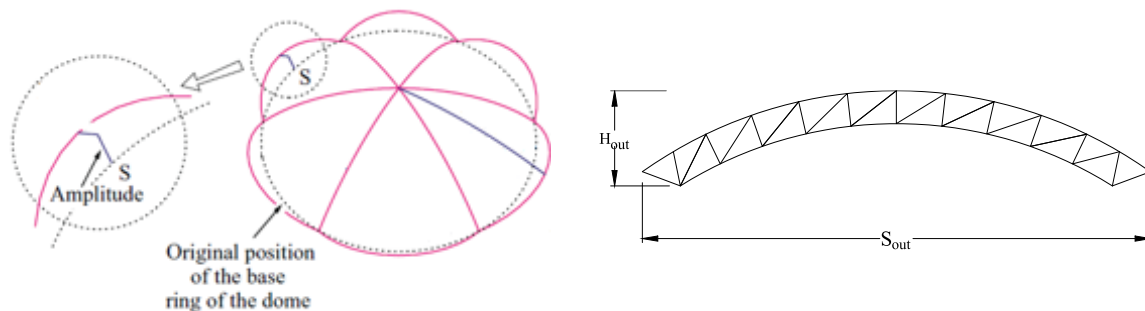


شکل ۳: منحنی بار- تغییر شکل محوری سیستم لوله در لوله (آزمایشگاهی و عددی) [۱۲].

۳- تاشه پردازی، تحلیل و طراحی مدل‌ها

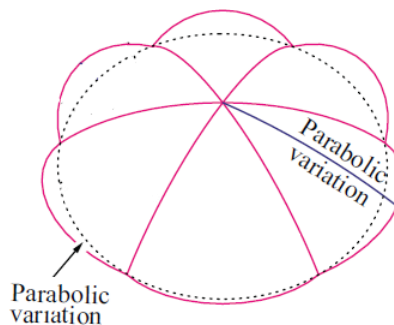
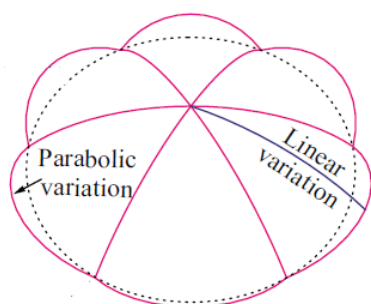
در این تحقیق، ۱۲ مدل با دهانه ۵۰ متر از گنبد‌های دولایه صدفی با بافتار دیاماتیک و با مشخصات هندسی مطابق جدول ۳، تحت اثر پارامترهای هندسی نظیر نسبت ارتفاع به دهانه، نسبت برآمدگی به دهانه، سبک قوس کلی قاچ‌ها و سبک تغییر در جهت خطوط نصف النهاری، مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۴). منظور از نسبت ارتفاع به دهانه، نسبت ارتفاع خارجی به دهانه خارجی گنبد، و

منظور از نسبت برآمدگی به دهانه، نسبت برآمدگی لایه بالایی به دهانه خارجی گنبد است (شکل ۴-الف و ب). گنبد در جهت خطوط نصف‌النهاری، دارای دو نوع تغییر هندسی خطی و سهمی وار (شکل ۴-پ) و در جهت هر قاچ، دارای دو نوع سبک قوسی سینوسی و سهمی وار می‌باشد (شکل ۴-ت). به منظور سهولت در نام‌گذاری از نماد اختصاری مطابق شکل ۵ استفاده شده است. به عنوان مثال SD1-HS0.2-AS0.01-M3 نام اختصاری مدل شماره یک با نسبت ارتفاع به دهانه $0/2$ و نسبت برآمدگی به دهانه $0/01$ و شکل گنبد صدفی با تغییرات سهمی وار در راستای قوس قاچ‌ها و تغییرات خطی در راستای نصف‌النهاری است.

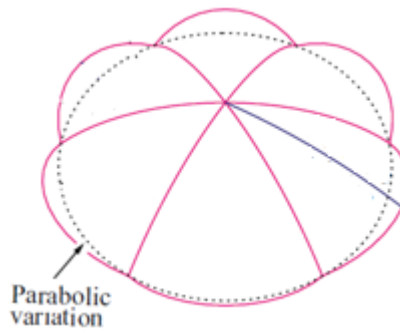
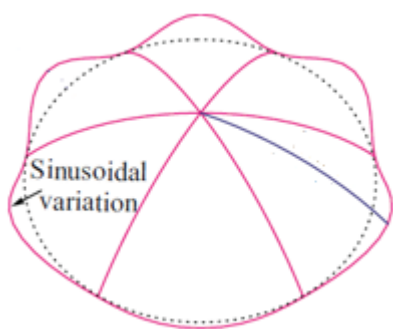


ب- برآمدگی در گنبد دولایه صدفی [۱۴]

الف- ارتفاع و دهانه خارجی گنبد

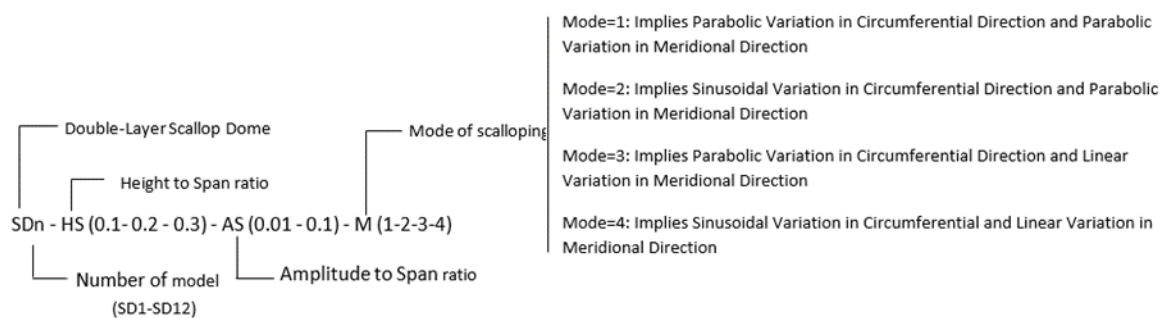


پ- سبک تغییرات سهمی وار و خطی در راستای خطوط نصف‌النهاری [۱۴]



ت- سبک تغییرات سهمی وار و سینوسی در راستای قوسی کلی قاچ [۱۴]

شکل ۴: پارامترهای هندسی در گنبد دولایه صدفی فضاکار



شکل ۵: نماد اختصاری مدل‌ها

جدول ۱: مشخصات هندسی مدل‌ها.

Model	H_{out} (m)	A (m)	M	Model	H_{out} (m)	A (m)	M
SD1 - HS0.1 - AS 0.1 - M1	5	5	1	SD7 - HS0.1 - AS 0.1 - M3	5	5	3
SD2 - HS0.2 - AS 0.1 - M1	10	5	1	SD8 - HS0.2 - AS 0.1 - M3	10	5	3
SD3 - HS0.3 - AS 0.1 - M1	15	5	1	SD9 - HS0.3 - AS 0.1 - M3	15	5	3
SD4 - HS0.1 - AS 0.01 - M1	5	0.5	1	SD10 - HS0.1 - AS 0.1 - M4	5	5	4
SD5 - HS0.2 - AS 0.01 - M1	10	0.5	1	SD11 - HS0.2 - AS 0.1 - M4	10	5	4
SD6 - HS0.3 - AS 0.01 - M1	15	0.5	1	SD12 - HS0.3 - AS 0.1 - M4	15	5	4

برای ایجاد تاشه گنبدها، از قابلیت‌های متنوع توابع استاندارد نرم‌افزار تاشه‌پردازی Formian بویژه تابع sbs استفاده شده است [۱۵]. در این تحقیق، گنبدها در نرم‌افزار Formian [۱۶] مدل‌سازی شده و سپس به نرم‌افزار AUTOCAD و SAP2000 انتقال یافته و تحت الزامات و ترکیبات بارگذاری مبحث ششم مقررات ملی ساختمان [۱۷]، آئین‌نامه سازه‌های فضاکار [۱] و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۱۸] فرایند تحلیل و طراحی بر روی مدل‌ها انجام شده است. اعضای گنبدها تحت ترکیب بارهای مرده معادل ۵۰ کیلوگرم بر متر مربع، برف ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع، بار حرارتی با تغییرات دمایی ± 25 درجه سانتی‌گراد، بار قائم زلزله و باد [۱۹ و ۲۰]، از مقاطع لوله‌ای فولادی استاندارد طبق آئین‌نامه AISC360-10 طراحی شده‌اند. مصالح از فولاد ST37 با مدول الاستیسیته 2×10^5 مگاپاسکال، ضریب پواسن 0.3 ، وزن مخصوص $78/5$ کیلونیوتن بر مترمکعب، تنش تسلیم 240 مگاپاسکال و تنش نهایی 370 مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. مشخصات مقاطع مدل‌های سازه‌ای در جدول ۲ آورده شده است، در نامگذاری مقاطع لوله‌ای از قطر خارجی (D) و ضخامت (t) استفاده شده است.

جدول ۲: مشخصات مقاطع مورد استفاده در مدل‌ها [۲۱]

Section	D (mm)	t (mm)	A (cm^2)	R (cm)
D101.6T5.0	101.6	5.0	15.2	3.42
D101.6T6.3	101.6	6.3	18.9	3.38
D114.3T5.0	114.3	5.0	17.2	3.87
D114.3T6.3	114.3	6.3	21.4	3.82
D139.7T5.0	139.7	5.0	21.2	4.77
D139.7T6.3	139.7	6.3	26.4	4.72
D139.7T8.0	139.7	8.0	33.1	4.66

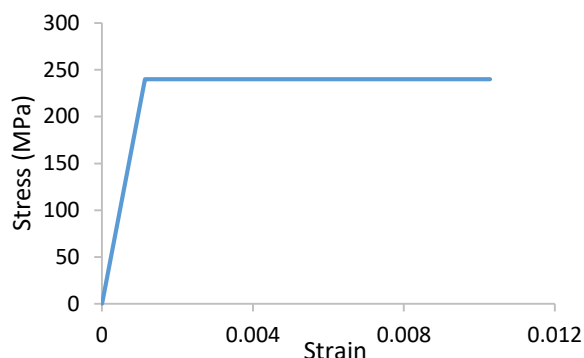
وزن اعضای مدل‌های مورد بررسی در جدول ۳ با هم مقایسه شده است. مدل SD2-HS0.2-AS0.1-M1 دارای کمترین وزن و مدل SD10-HS0.1-AS0.1-M4 دارای بیشترین وزن می‌باشد.

جدول ۳: وزن مدل‌های مورد بررسی

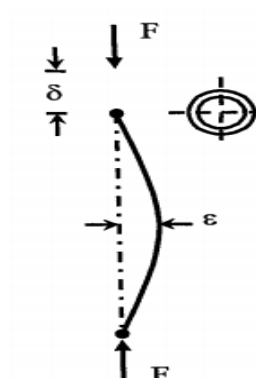
Model	Weight (KN)	Model	Weight (KN)
SD1 - HS0.1 - AS 0.1 - M1	1122.40	SD7 - HS0.1 - AS 0.1 - M3	1132.41
SD2 - HS0.2 - AS 0.1 - M1	915.45	SD8 - HS0.2 - AS 0.1 - M3	926.39
SD3 - HS0.3 - AS 0.1 - M1	952.74	SD9 - HS0.3 - AS 0.1 - M3	966.80
SD4 - HS0.1 - AS 0.01 - M1	1121.06	SD10 - HS0.1 - AS 0.1 - M4	1141.86
SD5 - HS0.2 - AS 0.01 - M1	930.05	SD11 - HS0.2 - AS 0.1 - M4	940.42
SD6 - HS0.3 - AS 0.01 - M1	983.08	SD12 - HS0.3 - AS 0.1 - M4	1103.76

۴- مدل‌سازی و تحلیل غیرخطی استاتیکی

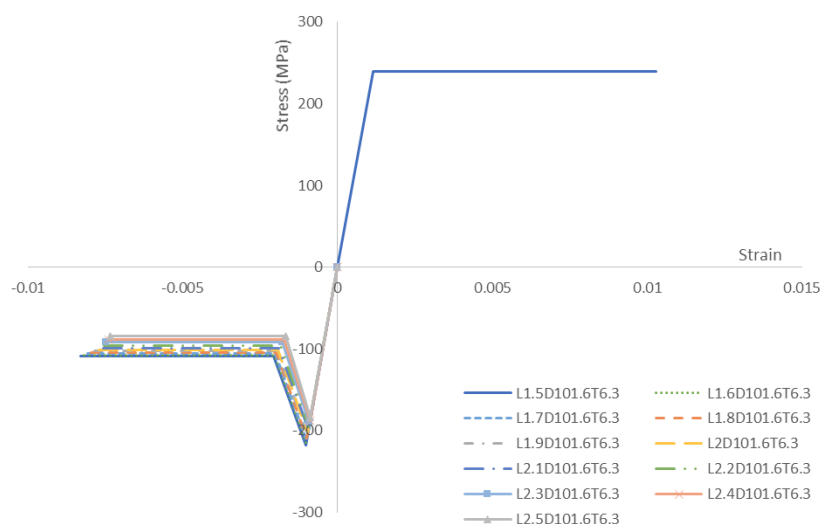
در یک سازه فضاکار دولایه، امکان خرابی عضو یا اعضای سازه در اثر کمانش عضو فشاری و یا تسلیم عضو کششی وجود دارد. پس از وقوع خرابی عضو یا اعضای از سازه، تعیین رفتار سازه امکان‌پذیر خواهد بود و می‌توان حداکثر باری را که سازه پیش از خرابی کلی می‌تواند تحمل نماید تعیین کرد [۲۲]. سازه‌های فضاکار علی‌رغم نقاط قوت و مزایای فراوانی که دارند، معمولاً به علت دارا بودن رفتار ترد از وجود خرابی‌های گسترده و پیشرونده دچار آسیب هستند و عملکرد و کارایی آنها را تحت تاثیر خود قرار می‌دهند. پایداری در سازه‌های فضاکار عمدتاً تحت تاثیر رفتار کمانش و پس‌کمانش اعضای فشاری قرار دارد [۲۳]. در بررسی رفتار سازه‌های فضاکار دو لایه سه نوع مکانیزم گسیختگی کششی، فشاری و اتصالات قابل تشخیص است. بطور کلی اثرات رفتار اعضای فشاری در سازه‌های فضاکار را می‌توان به سه دسته شامل خرابی کلی، خرابی موضعی با و بدون فروجهش دینامیکی تقسیم بندی نمود [۲۴]. در سازه‌های فضاکار دولایه، رفتار فشاری اعضا نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار خرابی دارد و در واقع پاسخ سازه تابعی از پاسخ عضو است [۲۳]. برای تحلیل واکنش خرابی سازه، ابتدا بایستی مدل رفتار غیرخطی هر یک از اعضای معمولی سازه و اعضای با سیستم لوله در لوله تعیین شود. در این تحقیق رفتار بار محوری-تغییر مکان محوری اعضا در کشش به صورت الاستو-پلاستیک کامل در نظر گرفته شده است و برای تعیین رفتار اعضا در فشار فرض شده است که عضو دوسر مفصلی خرابی از انحنای اولیه کوچکی که از آن به عنوان ناکاملی اولیه تعبیر می‌شود، برخوردار باشد. حداکثر انحراف اولیه از تار وسط دهانه برابر با مقدار متداول $\epsilon=0.001L$ مطابق شکل ۶ در نظر گرفته شده است (L طول عضو است) [۲۵]. با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS CAE-v6.13 و با انجام تحلیل غیرخطی هندسی و مصالح، واکنش بار محوری-تغییر شکل محوری برای تیپ‌بندی‌های اعضای مختلف سازه تحت اثر نیروی محوری فشاری بدست می‌آید. در نهایت با استفاده از روش خطی سازی تکه‌ای-خطی، رابطه ایده‌آلی تنش-کرنش محوری اعضا تعیین گردیده که به عنوان نمونه رفتار تنش-کرنش ایده‌آلی دسته اعضای D101.6T6.3 با طول‌های ۱/۶ تا ۲/۴ متر مدل SD1-HS0.1-AS0.1-M1 در شکل ۸ نشان داده شده است. در این مطالعه رفتار تنش-کرنش محوری اعضا در کشش مطابق شکل ۷ در نظر گرفته شده است.



شکل ۷: رفتار تنش-کرنش مصالح در کشش [۲۶]



شکل ۶: عضو فشاری دو سر مفصل با انحناى اولیه کوچک [۲۵]



شکل ۸: رفتار تنش-کرنش ایده‌آلی دسته اعضا D101.6T6.3 با طول‌های ۱/۶ تا ۲/۴ متر

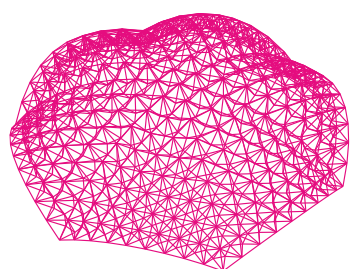
در ادامه برای تحلیل غیرخطی واکنش خرابی سازه کافی است هر عضو سازه در نرم‌افزار عناصر محدود توسط تنها یک المان خرپایی (Truss) که رفتار بار محوری-تغییر مکان محوری آن بر اساس مدل ایده‌آلی شکل ۸ مشخص می‌شود، مدل‌سازی شود. در این تحقیق برای تعیین رفتار بار محوری-تغییر مکان محوری اعضا با سیستم لوله در لوله قسمت کمانش یافته مدل ایده‌آلی در نظر گرفته نشده است [۱۲]. در این مدل‌سازی رفتار اعضای فشاری و کششی باید به صورت جداگانه به اعضا اختصاص داده شود که برای این منظور از ویژگی‌های قسمت Concrete Damage Plasticity در نرم‌افزار عناصر محدود استفاده شده است. برای تعیین پارامترهای این قسمت، با مقایسه نمودار ضریب بار-تغییر مکان محوری یک عضو فولادی با ناکاملی اولیه معادل یک هزارم طول اولیه با المان تیری B22 و همان عضو با المان Truss و چند آزمون و خطا، مقادیر پارامترها بدست می‌آیند که همگی برابر یک و فقط پارامتر Viscosity Parameter برابر ۰/۰۱ است. برای حل معادلات عناصر محدود از روش تکراری نیوتن-رافسون استفاده شده است. برای حل مشکل غیرموثر بودن این روش در مجاورت نقطه بحرانی و دنبال نمودن مسیر تعادل و گذر از نقطه بحرانی به محدوده پس‌بحرانی از روش Riks اصلاح شده بر اساس روش طول کمان (Arc-Length) استفاده شده است [۲۷].

۵- بررسی رفتار خرابی گنبدها

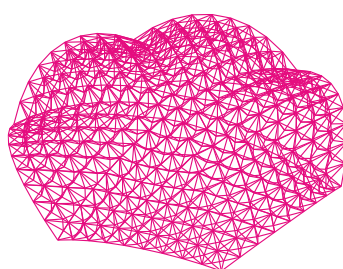
به منظور بررسی رفتار خرابی گنبدها، دو نوع تحلیل استاتیکی غیرخطی متوالی به ترتیب برای بار مرده و نموی برای بار برف رفتار خرابی بر روی مدل‌ها انجام می‌گیرد. بعد از شناسایی اعضای بحرانی و استخراج نتایج، مدل‌ها با هم مقایسه می‌شوند. باید توجه نمود تعیین معیاری برای بارگذاری در سازه‌های فضاکار با سازه‌های متداول ساختمانی متفاوت بوده و این موضوع جای بحث دارد و در این مطالعه از الگوی بارگذاری بارهای مرده و برف استفاده شده است. در این تحقیق رفتار خرابی مدل‌ها نسبت به پارامترهای مختلف هندسی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۵-۱- نسبت ارتفاع به دهانه^۴

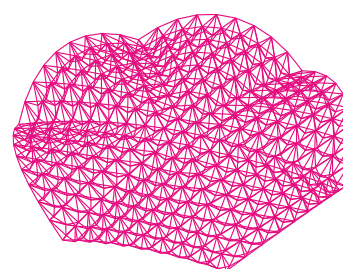
برای بررسی اثر نسبت ارتفاع به دهانه، با فرض اینکه سایر پارامترها ثابت می‌باشند، رفتار خرابی مدل‌های با سه نسبت مختلف ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ مطابق شکل ۹ مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته و پس از تحلیل مدل‌ها، نمودار ضریب بار^۵- تغییر مکان گره تاج^۶ گنبد در شکل ۱۰ آورده شده است. با مقایسه رفتار خرابی این مدل‌ها، نتیجه می‌شود که با افزایش نسبت ارتفاع به دهانه گنبد، سختی افزایش و در اولین خرابی با افزایش نسبت ارتفاع به دهانه از ۰/۱ به ۰/۲ ظرفیت باربری و شکل‌پذیری سازه کاهش و با افزایش نسبت ارتفاع به دهانه از ۰/۲ به ۰/۳ ظرفیت باربری افزایش ولی شکل‌پذیری سازه کاهش می‌یابد.



پ- SD3-HS0.3- AS0.1-M1

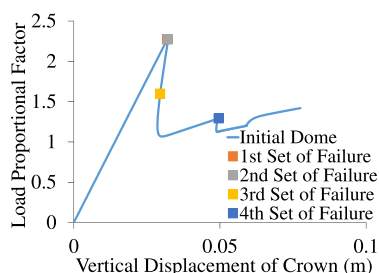


ب- SD2-HS0.2- AS0.1-M1

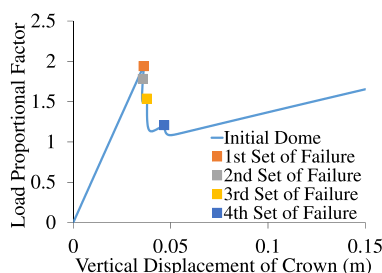


الف- SD1-HS0.1- AS0.1-M1

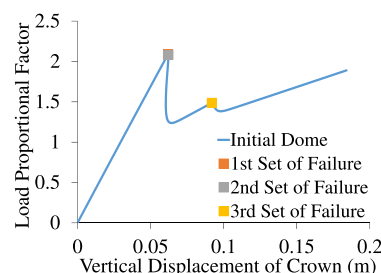
شکل ۹: مدل‌های با سه نسبت ارتفاع به دهانه



پ- SD3-HS0.3- AS0.1-M1



ب- SD2-HS0.2- AS0.1-M1



الف- SD1-HS0.1- AS0.1-M1

شکل ۱۰: نمودار ضریب بار-تغییر مکان مدل‌ها با سه نسبت ارتفاع به دهانه

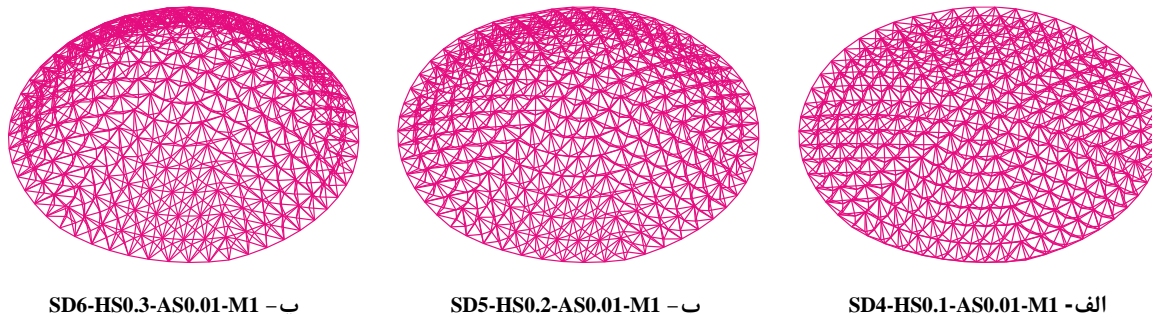
4- Height to Span (HS)

5- Load Proportionality Factor

6- Crown

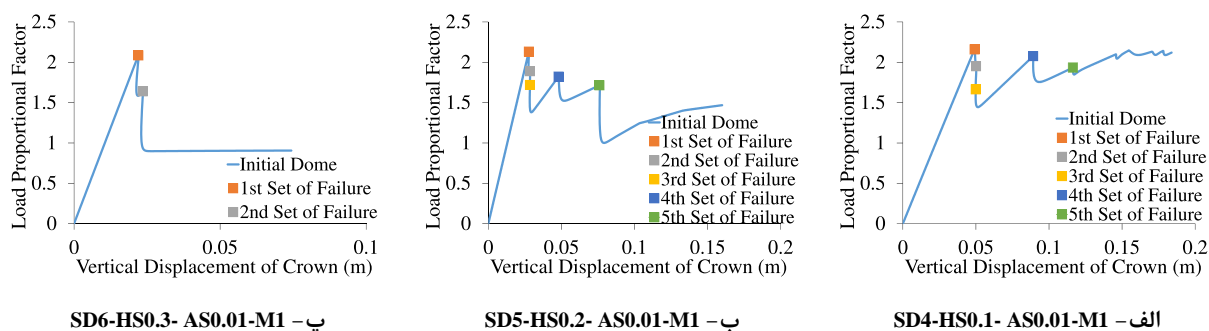
۵-۲- نسبت برآمدگی به دهانه^۷

اثر نسبت برآمدگی به دهانه، با فرض ثابت بودن سایر پارامترها، با دو نسبت ۰/۰ و ۰/۱ در مدل‌ها، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند. در شکل ۱۱ مدل‌های با نسبت برآمدگی به دهانه ۰/۰۱ با سه نسبت مختلف ارتفاع به دهانه نشان داده شده است.



شکل ۱۱: مدل‌های با تغییرات نسبت برآمدگی به دهانه

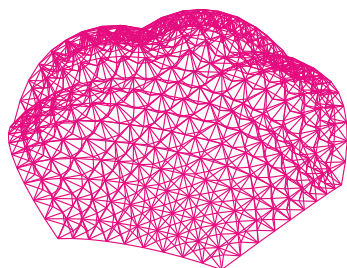
نمودار ضریب بار-تغییر مکان گره تاج گنبدها، پس از تحلیل مدل‌ها در شکل ۱۲ آورده شده است. با مقایسه رفتار خرابی این مدل‌ها، نتیجه می‌شود که با افزایش نسبت برآمدگی به دهانه، شکل‌پذیری گنبد افزایش می‌یابد ولی ظرفیت باربری در نسبت‌های ارتفاع به دهانه ۰/۱ و ۰/۲ کاهش یافته و در نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۳ افزایش می‌یابد.



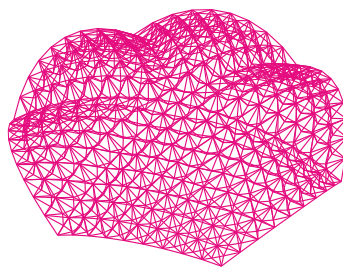
شکل ۱۲: نمودار ضریب بار-تغییر مکان مدل‌ها با نسبت برآمدگی به دهانه ۰/۰۱

۵-۳- اثر تغییرات در جهت خطوط نصف‌النهاری

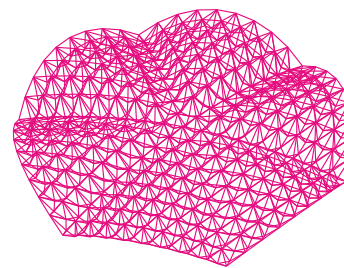
در جهت خطوط نصف‌النهاری، دو نوع سبک تغییر سهمی‌وار و خطی وجود دارد. با فرض ثابت بودن سایر پارامترها، اثر آن‌ها در رفتار خرابی گنبدها که در شکل ۱۳ نشان داده شده‌اند، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.



پ - SD9-HS0.3- AS0.1-M3



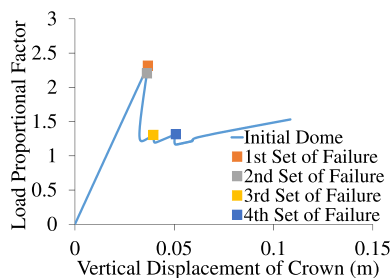
ب - SD8-HS0.2- AS0.1-M3



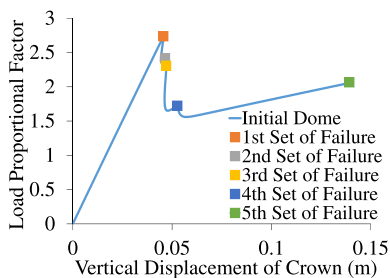
الف - SD7-HS0.1- AS0.1-M3

شکل ۱۳: مدل‌های با سبک تغییرات خطی و سهمی وار

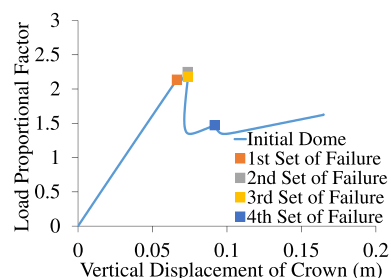
نمودار ضریب بار- تغییر مکان گره تاج گنبد با سبک تغییرات سهمی وار در بخش بررسی پارامتر نسبت ارتفاع به دهانه آورده شده و در این قسمت فقط نمودار ضریب بار- تغییر مکان گره تاج گنبد با سبک تغییرات خطی در شکل ۱۴ آورده شده است. با مقایسه رفتار خرابی این مدل‌ها، نتیجه می‌شود که با تغییر سبک تغییرات در جهت خطوط نصف النهاری از سهمی وار به خطی، ظرفیت باربری و شکل- پذیری سازه افزایش می‌یابد.



پ - SD9-HS0.3- AS0.1-M3



ب - SD8-HS0.2- AS0.1-M3

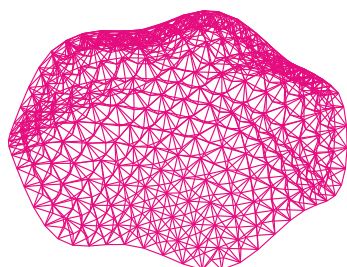


الف - SD7-HS0.1- AS0.1-M3

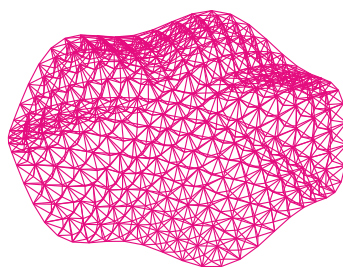
شکل ۱۴: نمودار ضریب بار- تغییر مکان مدل‌ها با سبک تغییرات خطی

۵-۴- اثر سبک قوس کلی

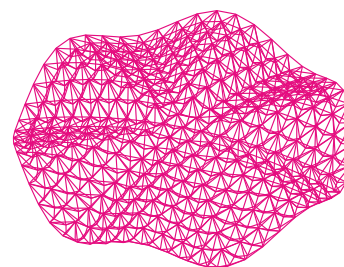
دو نوع سبک تغییر هندسی سهمی وار و سینوسی وجود دارد که با فرض ثابت بودن سایر پارامترها، اثر آن‌ها در رفتار خرابی گنبدها مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است، این مدل‌ها در شکل ۱۵ نشان داده شده‌اند.



پ - SD12-HS0.3- AS0.1-M4



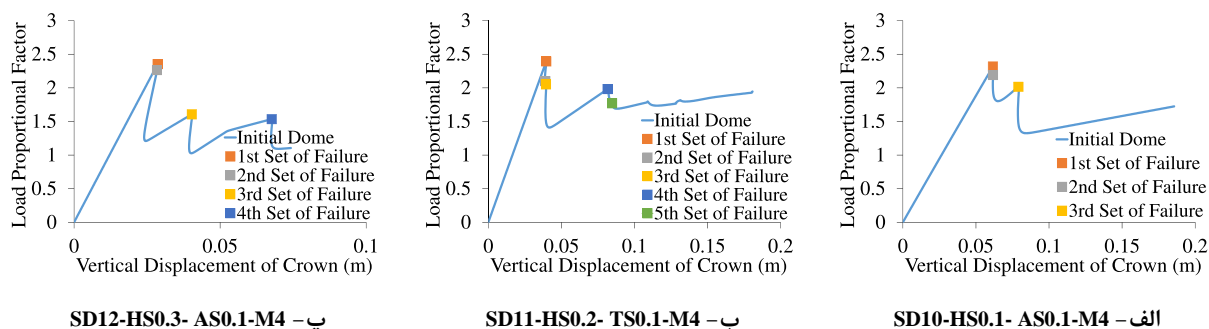
ب - SD11-HS0.2- AS0.1-M4



الف - SD10-HS0.1- AS0.1-M4

شکل ۱۵: مدل‌های با سبک تغییرات سینوسی و سهمی وار

پس از تحلیل مدل‌ها، نمودار ضریب بار- تغییر مکان گره تاج گنبد دو لایه صدفی با سبک تغییرات سهمی‌وار در بخش بررسی پارامتر نسبت ارتفاع به دهانه آورده شده و در این قسمت فقط نمودار ضریب بار- تغییر مکان گره تاج گنبد با سبک تغییرات سینوسی در شکل ۱۶ آورده شده است. با مقایسه رفتار خرابی این مدل‌ها، نتیجه می‌شود که با تغییر سبک قوسی کلی قاچ‌ها از سهمی‌وار به سینوسی، در نسبت ارتفاع به دهانه گنبد ۰/۱ و ۰/۲، ظرفیت باربری و شکل‌پذیری سازه کاهش ولی در نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۳ ظرفیت باربری افزایش و شکل‌پذیری سازه کاهش می‌یابد.



شکل ۱۶: نمودار ضریب بار-تغییر مکان مدل‌ها با سبک تغییرات خطی

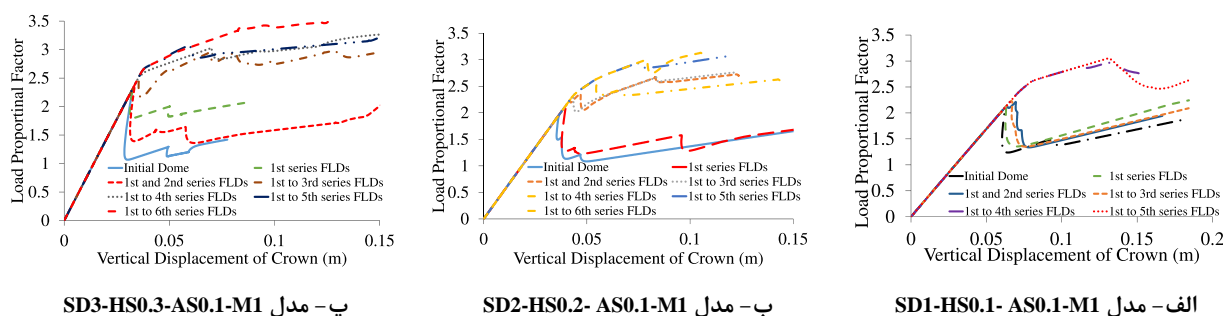
۶- بهبود رفتار خرابی گنبدها با ابزار محدودکننده نیروی لوله در لوله

در این تحقیق به‌عنوان یکی از راهکارهای مقابله با کمناش اعضای فشاری و جلوگیری از خرابی آن‌ها در گنبد دولایه صدفی، اعضای فشاری بحرانی که در مدل‌های مورد بررسی دچار کمناش شده‌اند با ابزار محدود کننده نیروی لوله در لوله جایگزین می‌شوند. با جایگزین نمودن این ابزار در اعضای فشاری کمناش یافته، مدل‌ها مجدداً در نرم‌افزار عناصر محدود تحلیل می‌شوند و به این ترتیب نحوه خرابی و چگونگی رشد و انتشار آن در مدل‌ها به‌ویژه اعضای جدید و همچنین نواحی خراب شده شناسایی می‌گردد. در صورتی که اعضای جدید توانایی لازم جهت جلوگیری از انتشار خرابی را داشته باشند و سازه از مقاومت لازم در برابر گسترش خرابی‌ها برخوردار باشد، فرآیند مقابله با اعضای کمناش یافته در مدل به اتمام می‌رسد، در غیر این صورت یعنی در صورتی که اعضای دیگری در اثر پیشرفت خرابی دچار کمناش شوند، ابزار محدود کننده نیروی لوله در لوله به اعضای جدید نیز اختصاص یافته و تحلیل مجدد رفتار خرابی سازه صورت می‌گیرد. در این تحقیق صرفاً به تاثیر بکارگیری این ابزار در مدل‌ها و مقایسه آن‌ها در دو حالت با و بدون ابزار محدود کننده نیروی لوله در لوله پرداخته شده است. با اعمال رفتار تنش-کرنش این ابزار در مدل‌ها، رفتار خرابی گنبدها تحت پارامترهای مختلف هندسی به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفته است.

۶-۱- پارامتر نسبت ارتفاع به دهانه

به منظور بررسی اثر پارامتر نسبت ارتفاع به دهانه در مدل‌های با سه نسبت ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ و با فرض ثابت بودن سایر پارامترها، بعد از جایگزین نمودن ابزار محدود کننده نیروی لوله در لوله در اعضای فشاری کمناش یافته، تحلیل غیر خطی خرابی مدل‌ها در نرم‌افزار عناصر محدود انجام گرفته است. با بکارگیری ابزار محدود کننده نیروی لوله در لوله در حالات مختلف در اعضای کمناش یافته مدل‌های SD1-HS0.1- AS0.1-M1، SD2-HS0.2- AS0.1-M1 و SD3-HS0.3- AS0.1-M1، مقایسه کلی نمودار ضریب بار-تغییر مکان و همچنین مدل اولیه در شکل ۱۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، با بکارگیری سیستم لوله در لوله، ظرفیت باربری و شکل‌پذیری گنبد اعم از تغییر مکانی و انرژی نسبت به مدل اولیه تغییر قابل توجهی می‌نمایند. شکل‌پذیری تغییر مکانی برابر با نسبت تغییر مکان نهایی به تغییر مکان تسلیم و شکل‌پذیری انرژی، سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان است. نتایج عددی تغییرات ظرفیت باربری و شکل‌پذیری تغییر مکانی تحت تاثیر تعداد ابزار محدود کننده نیروی لوله در لوله در جدول ۴ و همچنین شکل ۱۸ آورده شده است. در جدول ۴ ستون FLD درصد جایگزینی

اعضای معمولی سازه با سیستم لوله در لوله را نشان می‌دهد. به عنوان مثال منظور از FLD به میزان ۰/۴۱ درصد به این معنی است که در مدل با تعداد عضو کل برابر ۲۹۱۶، تعداد ۱۲ عضو با سیستم لوله در لوله جایگزین شده است.

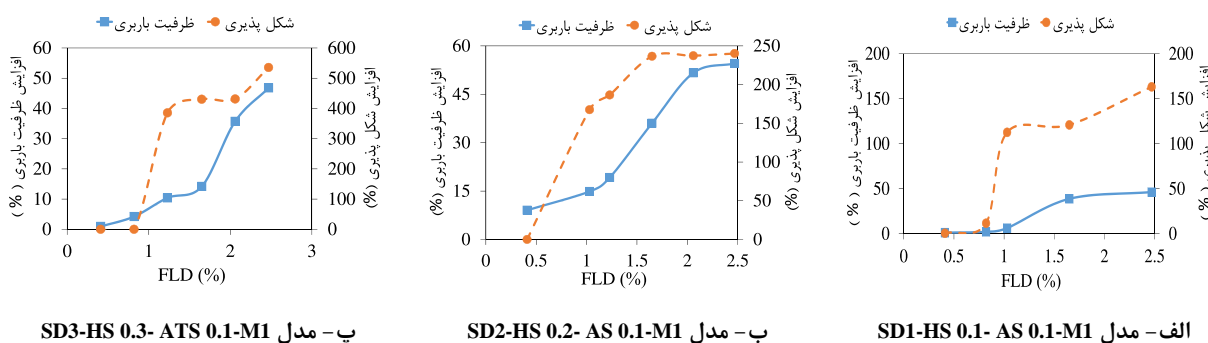


شکل ۱۷: مقایسه نمودار ضریب بار-تغییر مکان حالات مختلف بکارگیری سیستم لوله در لوله در اعضای کمانش یافته

جدول ۴: تاثیر تعداد ابزار محدودکننده نیرو در ظرفیت باربری و شکل پذیری مدل‌های SD3 و SD2، SD1

SD3-HS0.3- AS0.1-M1			SD2-HS0.2- AS0.1-M1			SD1-HS0.1- AS0.1-M1			FLD (%)
افزایش شکل پذیری (%)	افزایش ظرفیت باربری (%)	تغییر مکانی	افزایش شکل پذیری (%)	افزایش ظرفیت باربری (%)	تغییر مکانی	افزایش شکل پذیری (%)	افزایش ظرفیت باربری (%)	تغییر مکانی	
6	0.00	انرژی	17.80	0.00	انرژی	6.37	0.48	1.09	0.41
1494*	430*	14.17	781*	237*	36.03	406*	121*	38.74	1.65
1126*	535*	46.78	877*	240*	54.56	524	163	46.24	2.47

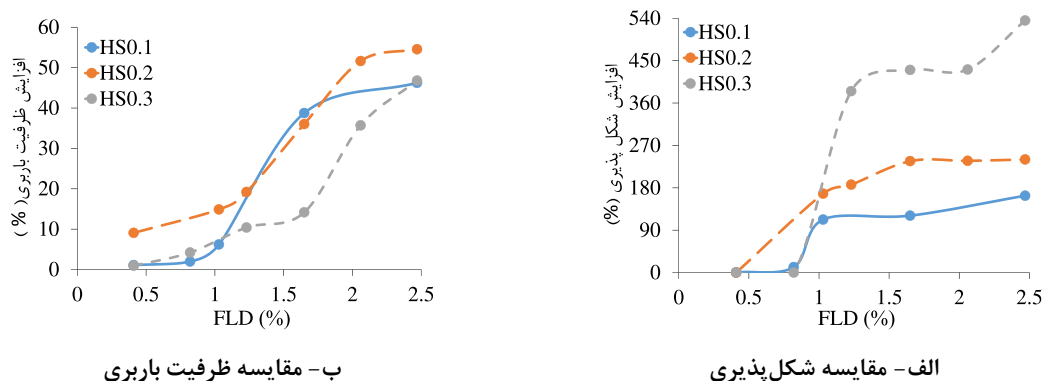
* مقدار حداقل



شکل ۱۸: مقایسه ظرفیت باربری و شکل پذیری در درصدهای مختلف بکارگیری سیستم لوله در لوله در اعضای کمانش یافته

با توجه به شکل ۱۷ و ۱۸، استفاده از سیستم لوله در لوله در اعضای کمانش یافته باعث افزایش در میزان ظرفیت باربری و شکل-پذیری سازه شده است. بدین طریق تا حدی از اثرات ترد خرابی کاسته شده و خرابی به اعضای جدید انتشار می‌یابد. تغییر در میزان ظرفیت باربری و شکل‌پذیری به تعداد ابزار محدودکننده نیروی مورد استفاده بستگی دارد. در این مدل‌ها هنگامی که به تعداد اعضای که در آن‌ها از ابزار محدودکننده نیرو استفاده شده، اضافه می‌شود، ظرفیت باربری و شکل‌پذیری سازه افزایش می‌یابد ولی شیب افزایش در میزان شکل‌پذیری در مقایسه با ظرفیت باربری بیشتر می‌باشد. با اختصاص ابزار محدودکننده نیرو به اعضای که دچار کمانش شده‌اند، در

مرحله‌ای بکارگیری این ابزار تسلیم‌شدگی اعضا را به دنبال دارد و موجب افزایش قابل توجهی در شکل‌پذیری در مقایسه با ظرفیت باربری گنبد دولایه صدفی با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۱ شده است. مقایسه ظرفیت باربری و شکل‌پذیری در درصدهای مختلف بکارگیری سیستم لوله در لوله در اعضای کمانش‌یافته در سه مدل SD(1,2,3)-HS(0.1, 0.2, 0.3) - AS 0.1- M1 در شکل ۱۹ نشان داده شده است.



شکل ۱۹: مقایسه ظرفیت باربری و شکل‌پذیری در درصدهای مختلف بکارگیری سیستم لوله در لوله در اعضای کمانش‌یافته سه مدل SD(1,2,3)-HS (0.1, 0.2, 0.3) - AS 0.1-M1

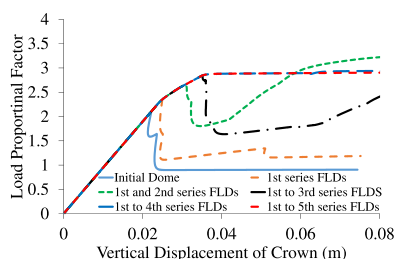
با بررسی نتایج حاصل از بکارگیری ابزار محدود کننده نیروی لوله در لوله در گنبدهای با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ مطابق شکل ۱۷ تا ۱۹ و جدول ۴ می‌توان به نتایج مهم زیر اشاره کرد:

- جایگزینی اعضای فشاری بحرانی با ابزار محدود کننده نیروی لوله در لوله تاثیر مهمی در افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری گنبدهای دولایه صدفی دارد.
 - با افزایش تعداد ابزار محدود کننده نیرو در گنبدها، ظرفیت باربری گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۲ در مقایسه با دو گنبد دیگر افزایش بیشتری دارد.
 - با بررسی شکل‌پذیری گنبدها، نتایج بیانگر آن است که با افزایش تعداد ابزار محدود کننده نیرو در گنبدها، شکل‌پذیری جایجایی گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۳ در مقایسه با دو گنبد دیگر افزایش بیشتری می‌یابد.
- با اضافه نمودن ابزار محدود کننده نیرو، خرابی مدل‌ها از حالت خرابی ناگهانی و فروجهش عضوی خارج می‌شود و ضمن اینکه سازه می‌تواند قابلیت باربری خود را حفظ کند، افزایش قابل توجهی در شکل‌پذیری و بهبود در رفتار خرابی مدل حاصل می‌شود.

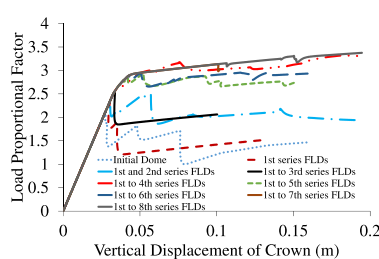
۶-۲- پارامتر نسبت برآمدگی به دهانه

یکی دیگر از پارامترهای تاثیر گذار در رفتار خرابی و پایداری گنبدهای دو لایه صدفی، پارامتر نسبت برآمدگی به دهانه گنبد است. به منظور بررسی اثر این پارامتر بر رفتار خرابی مدل‌ها با دو نسبت برآمدگی به دهانه ۰/۱ و ۰/۱ مد نظر قرار گرفته و با جایگزین نمودن ابزار محدود کننده نیروی لوله در لوله در اعضای فشاری کمانش یافته، تحلیل غیر خطی خرابی این مدل‌ها مجددا انجام گرفته است. نمودار ضریب بار-تغییر مکان در حالات مختلف در مدل‌های SD4-HS0.1- AS0.01-M1، SD5-HS0.2- AS0.01-M1 و SD6-HS0.3- AS0.01-M1 در شکل ۲۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲۰ مشاهده می‌شود، با بکارگیری سیستم لوله در لوله، ظرفیت باربری و شکل‌پذیری گنبد اعم از تغییر مکانی و انرژی نسبت به مدل اولیه تغییر قابل توجهی می‌نمایند. شکل‌پذیری تغییر مکانی برابر با نسبت تغییر مکان نهایی به تغییر مکان تسلیم و شکل‌پذیری انرژی، سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان است. نتایج عددی تغییرات ظرفیت باربری و شکل‌پذیری تغییر مکانی تحت تاثیر تعداد ابزار محدود کننده نیروی لوله در لوله در جدول ۵ و همچنین شکل ۲۱ آورده شده است. در

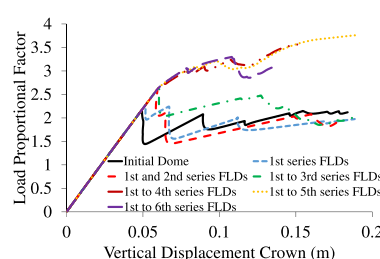
جدول ۵ ستون FLD درصد جایگزینی اعضای معمولی سازه با سیستم لوله در لوله را نشان می‌دهد. به عنوان مثال منظور از FLD به میزان ۰/۴۱ درصد به این معنی است که در مدل با تعداد عضو کل برابر ۲۹۱۶، تعداد ۱۲ عضو با سیستم لوله در لوله جایگزین شده است.



پ- مدل SD6-HS0.3-AS0.01-M1



ب- مدل SD5-HS0.2-AS0.01-M1



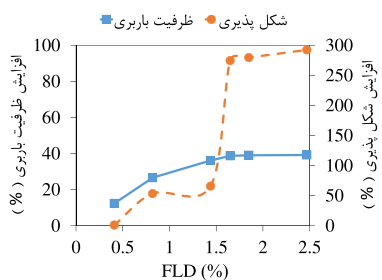
الف- مدل SD4-HS0.1-AS0.01-M1

شکل ۲۰: مقایسه نمودار ضریب بار-تغییر مکان حالات مختلف بکارگیری سیستم لوله در لوله در اعضای کماتش یافته

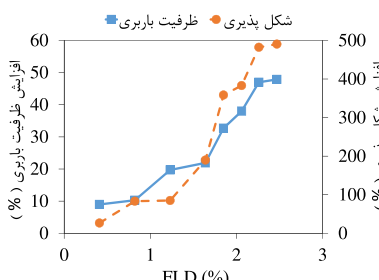
جدول ۵: تاثیر تعداد ابزار محدودکننده نیرو در ظرفیت باربری و شکل پذیری مدل های SD4, SD5, SD6

SD6-HS0.3-AS0.01-M1			SD5-HS0.2-AS0.01-M1			SD4-HS0.1-AS0.01-M1			FLD (%)
افزایش شکل پذیری (%)	افزایش ظرفیت باربری (%)	تغییر مکانی انرژی	افزایش شکل پذیری (%)	افزایش ظرفیت باربری (%)	تغییر مکانی انرژی	افزایش شکل پذیری (%)	افزایش ظرفیت باربری (%)	تغییر مکانی انرژی	
30	1.24	12.40	9.03	26.54	8.97	26.18	19.87	5.07	0.41
161	53.53	26.64	219	83.22	10.28	40.0	16.37	20.37	0.82
915*	279.6*	39.07	1082*	359*	32.71	369*	94.18*	26.79	1.85
936	292.45	39.23	1640*	491*	47.88	378	98.58	46.30	2.47

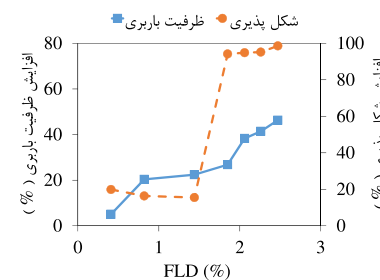
* مقدار حداقل



پ- مدل SD6-HS 0.3-ATS 0.01-M1



ب- مدل SD5-HS 0.2-AS 0.01-M1

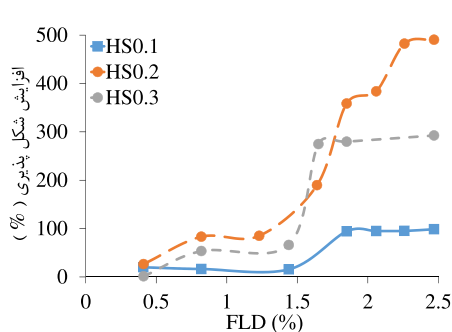


الف- مدل SD4-HS 0.1-AS 0.01-M1

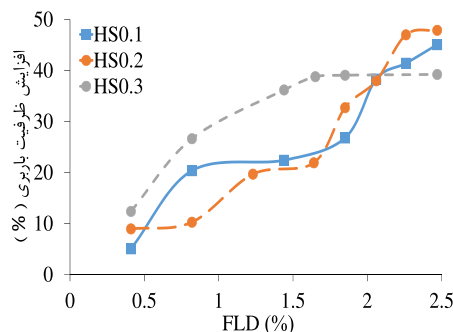
شکل ۲۱: مقایسه ظرفیت باربری و شکل پذیری در درصدهای مختلف بکارگیری سیستم لوله در لوله در اعضای کماتش یافته

با توجه به شکل ۲۰ و ۲۱، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از ابزار لوله در لوله در اعضای کماتش یافته، باعث افزایش در میزان ظرفیت باربری و شکل پذیری سازه شده است. افزایش تعداد اعضای که در آن‌ها از ابزار محدودکننده نیرو استفاده شده موجب افزایش درصد این اعضا، موجب افزایش ظرفیت باربری و افزایش شکل پذیری سازه می‌گردد ولی میزان افزایش در شکل پذیری بیشتر از ظرفیت باربری می‌باشد.

مقایسه ظرفیت باربری و شکل پذیری در درصدهای مختلف بکارگیری سیستم لوله در لوله در اعضای کمانش یافته در سه مدل SD(4,5,6)-HS(0.1, 0.2, 0.3) - AS 0.01-M1 در شکل ۲۲ نشان داده شده است. بررسی نتایج حاصل از بکارگیری ابزار محدود کننده نیرو - سیستم لوله در لوله در گنبد های با نسبت های مختلف برآمدگی به دهانه مطابق شکل ۲۱ و ۲۲ بیانگر آن است که جایگزینی اعضای فشاری بحرانی با ابزار محدود کننده نیروی پیشنهادی تاثیر مهمی در افزایش ظرفیت باربری و شکل پذیری گنبد های دو لایه صدفی دارد. با افزایش تعداد ابزار محدود کننده نیرو، ظرفیت باربری گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۲ در مقایسه با دو گنبد دیگر، افزایش بیشتری داشته است. همچنین ظرفیت باربری گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۱ در مقایسه با گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۳ افزایش بیشتری دارد. بررسی شکل پذیری گنبد های با نسبت های مختلف ارتفاع به دهانه، نتایج بیانگر آن است که با افزایش تعداد ابزار محدود کننده نیرو، شکل - پذیری گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۲ در مقایسه با دو گنبد دیگر، افزایش بیشتری دارد. همچنین شکل پذیری گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۳ در مقایسه با گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۱ افزایش بیشتری دارد. با مقایسه رفتار خرابی در گنبد های دو لایه صدفی در دو حالت با و بدون ابزار محدود کننده نیرو، پس از اضافه نمودن ابزار محدود کننده نیرو، خرابی از حالت خرابی ناگهانی و فروجهش عضوی خارج می شود، بطوریکه سازه توانسته است قابلیت باربری خود را حفظ نموده و بهبود قابل ملاحظه در رفتار خرابی حاصل می شود.



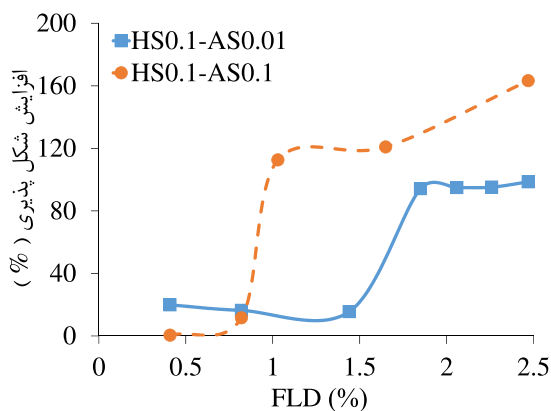
ب- مقایسه شکل پذیری



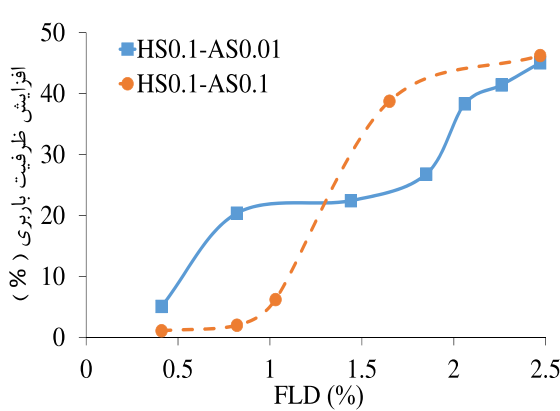
الف- مقایسه ظرفیت باربری

شکل ۲۲. مقایسه ظرفیت باربری و شکل پذیری در درصدهای مختلف بکارگیری سیستم لوله در لوله در اعضای کمانش یافته سه مدل SD(4,5,6)-HS(0.1, 0.2, 0.3) - AS 0.01-M1

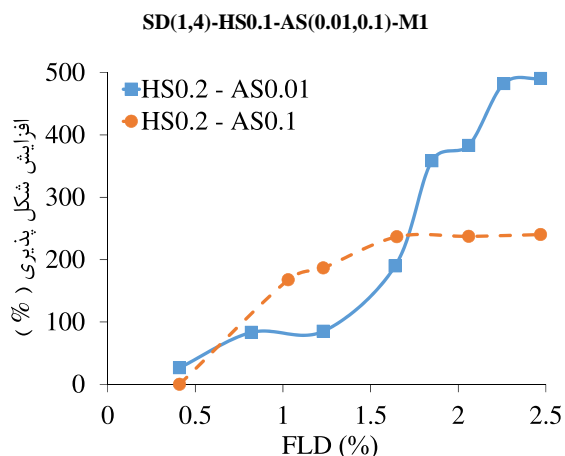
مقایسه بین اثرات پارامترهای ارتفاع به دهانه (AS) و نسبت برآمدگی به دهانه (HS) در ظرفیت باربری و شکل پذیری در درصدهای مختلف بکارگیری سیستم لوله در لوله در اعضای کمانش یافته در مدل های SDn-HS(0.1,0.2,0.3) - AS(0.01,0.1) - M1 در شکل ۲۳ نشان داده شده است.



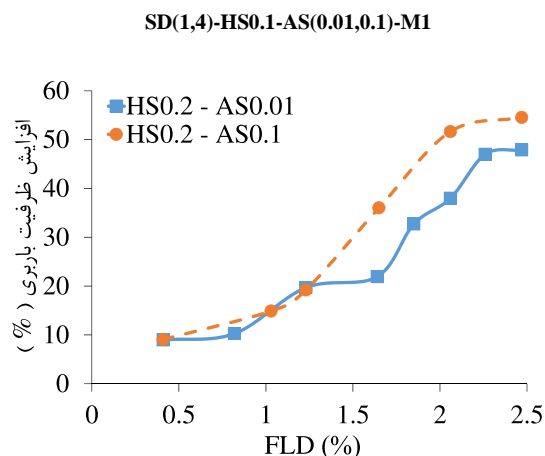
ب- مقایسه شکل پذیری در مدل های



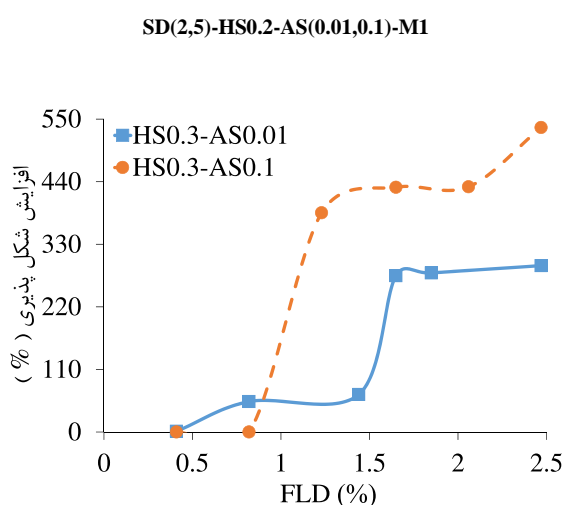
الف- مقایسه ظرفیت باربری در مدل های



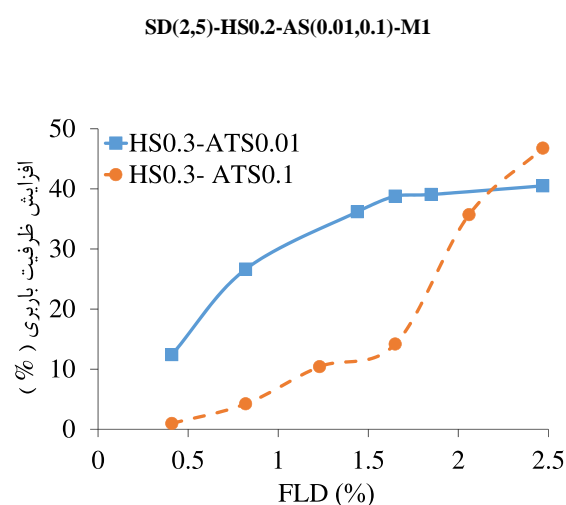
ت - مقایسه شکل پذیری در مدل های



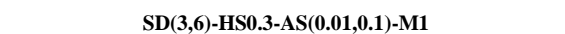
پ - مقایسه ظرفیت باربری در مدل های



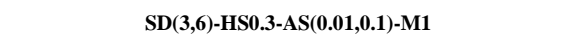
ج - مقایسه شکل پذیری در مدل های



ث - مقایسه ظرفیت باربری در مدل های



ج - مقایسه شکل پذیری در مدل های



ث - مقایسه ظرفیت باربری در مدل های

شکل ۲۳: اثرات پارامترهای AS و HS در ظرفیت باربری و شکل پذیری در درصدهای مختلف

بکارگیری سیستم لوله در لوله در اعضای کمانش یافته

با مقایسه اثرات پارامترهای AS و HS در شکل ۲۱ تا ۲۳ می توان نتایج زیر را بیان نمود:

۱- با تغییر نسبت برآمدگی از ۰/۰۱ به ۰/۱ در حالی که HS0.1 می باشد، ظرفیت باربری و شکل پذیری افزایش می یابند، بطوریکه میزان افزایش در شکل پذیری بیشتر از میزان افزایش در ظرفیت باربری می باشد.

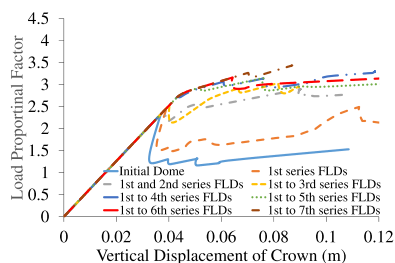
۲- با تغییر نسبت برآمدگی از ۰/۰۱ به ۰/۱ در حالی که HS0.2 می باشد، ظرفیت باربری افزایش و شکل پذیری کاهش می یابد.

۳- با تغییر نسبت برآمدگی از ۰/۰۱ به ۰/۱ در حالی که HS0.3 می باشد، ظرفیت باربری و شکل پذیری افزایش می یابد.

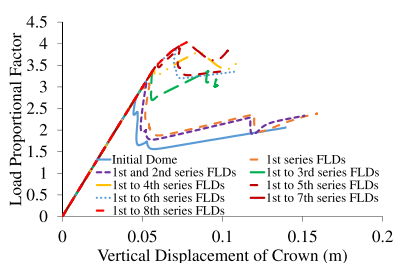
بنابراین می توان گفت که با افزایش نسبت برآمدگی، ظرفیت باربری افزایش، ولی شکل پذیری به نسبت ارتفاع به دهانه گنبد بستگی دارد.

۳-۶ پارامتر سبک تغییرات در جهت خطوط نصف النهاری

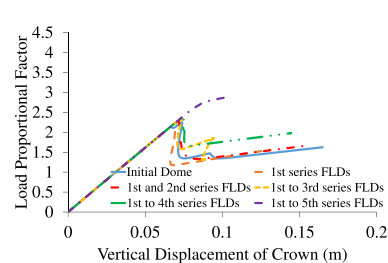
از پارامترهای موثر دیگر، پارامتر سبک تغییرات سهمی وار و خطی در جهت خطوط نصف النهاری گنبد دولایه صدفی است. به منظور بررسی اثر این پارامتر در رفتار خرابی مدل‌ها، با جایگزین نمودن ابزار محدود کننده نیروی لوله در لوله در اعضای فشاری کماتش یافته، تحلیل غیر خطی خرابی انجام گرفته و نمودار ضریب بار-تغییر مکان گنبد در حالات مختلف (مدل‌های SD7-HS0.1- AS0. 1-M1، SD8-HS0.2- AS0. 1-M1 و SD9-HS0.3- AS0. 1-M1) در شکل ۲۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲۴ مشاهده می‌شود، با بکارگیری سیستم لوله در لوله، ظرفیت باربری و شکل پذیری گنبد اعم از تغییر مکانی و انرژی نسبت به مدل اولیه تغییر قابل توجهی می‌نمایند. شکل پذیری تغییر مکانی برابر با نسبت تغییر مکان نهایی به تغییر مکان تسلیم و شکل پذیری انرژی، سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان است. نتایج عددی تغییرات ظرفیت باربری و شکل پذیری تغییر مکانی تحت تاثیر تعداد ابزار محدود کننده در جدول ۶ و همچنین شکل ۲۵ آورده شده است. در جدول ۶ ستون FLD درصد جایگزینی اعضای معمولی سازه با سیستم لوله در لوله را نشان می‌دهد. به عنوان مثال منظور از FLD به میزان ۰/۲۱ درصد به این معنی است که در مدل با تعداد عضو کل برابر ۲۹۱۶، تعداد ۶ عضو با سیستم لوله در لوله جایگزین شده است



ب- مدل SD9-HS0.3-AS0.1-M3



ب- مدل SD8-HS0.2-AS0.1-M3



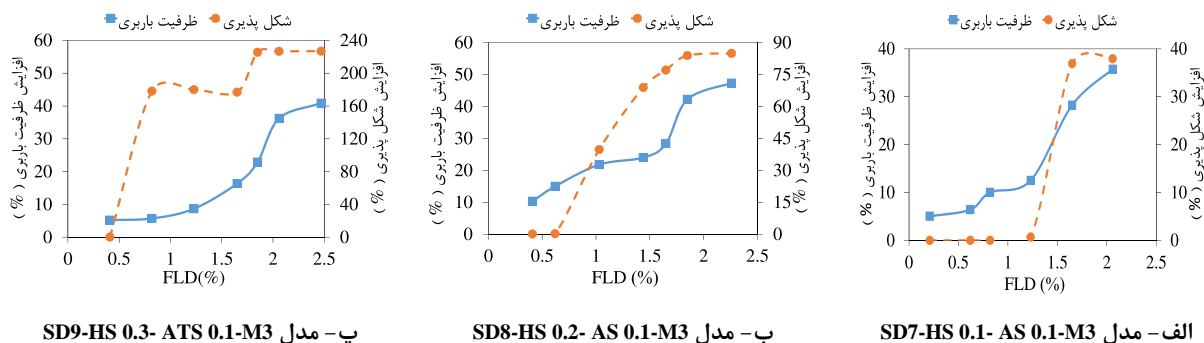
الف- مدل SD7-HS0.1-AS0.1-M3

شکل ۲۴: مقایسه نمودار ضریب بار-تغییر مکان حالات مختلف بکارگیری سیستم لوله در لوله در اعضای کماتش یافته

جدول ۶: تاثیر تعداد ابزار محدود کننده نیرو در ظرفیت باربری و شکل پذیری مدل‌های SD7، SD8 و SD9

SD9-HS0.3- AS0.1-M3				SD8-HS0.2- AS0.1-M3				SD7-HS0.1- AS0.1-M3			
افزایش شکل پذیری (%)		افزایش ظرفیت باربری (%)	FLD (%)	افزایش شکل پذیری (%)		افزایش ظرفیت باربری (%)	FLD (%)	افزایش شکل پذیری (%)		افزایش ظرفیت باربری (%)	FLD (%)
انرژی	تغییر مکانی			انرژی	تغییر مکانی			انرژی	تغییر مکانی		
12	0.20	5.23	0.41	23.56	0.14	10.34	0.41	0.00	0.00	5.02	0.21
512	178	5.72	0.82	30.93	0.26	15.00	0.62	0.00	0.00	6.42	0.62
653	180	8.69	1.23	151	39.77	21.81	1.03	0.00	0.00	10.02	0.82
663*	177*	16.37	1.65	274*	68.92*	24.01	1.44	9.46	0.67	12.51	1.23
811*	225*	22.91	1.85	286*	77.09*	28.38	1.65	111*	36.90*	28.25	1.65
823*	227*	36.21	2.06	311	83.93	42.23	1.85	112*	37.94*	35.73	2.06

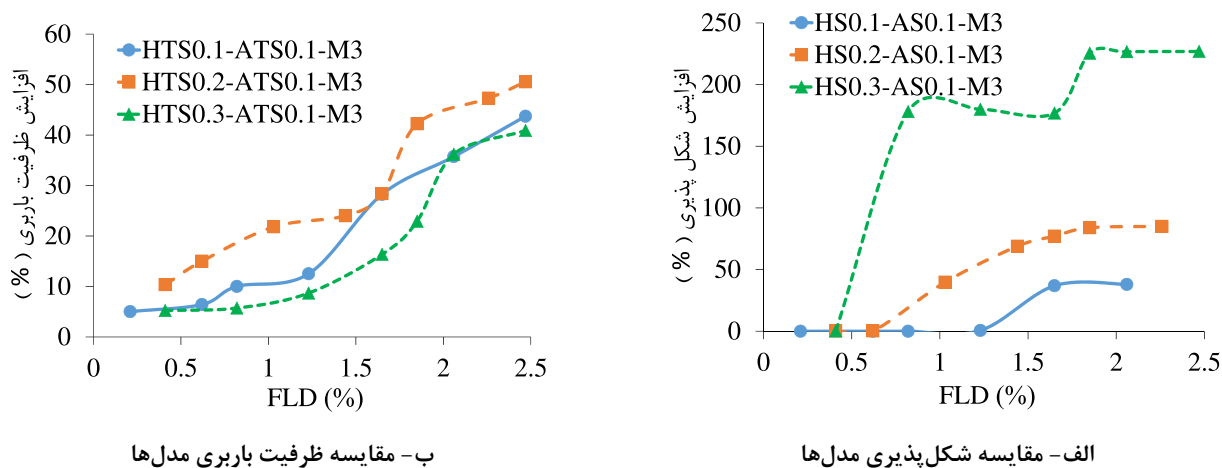
* مقدار حداقل



شکل ۲۵: مقایسه ظرفیت باربری و شکل پذیری در درصدهای مختلف بکارگیری سیستم لوله در لوله در اعضای کمناش یافته

با توجه به شکل ۲۴ و ۲۵ و همچنین جدول ۶ می توان نتیجه گرفت که استفاده از سیستم لوله در لوله در اعضای کمناش یافته باعث افزایش در میزان ظرفیت باربری و شکل پذیری شده است. مقایسه نتایج، نشان می دهد که تغییر در میزان ظرفیت باربری و شکل-پذیری به تعداد ابزار محدودکننده نیرو بستگی دارد که در مدل استفاده شده است. در مدل SD7-HS0.1- AS0.1-M3 تا ۰/۸۲ درصد اعضایی که در آنها از ابزار محدودکننده نیرو استفاده شده، تاثیری در شکل پذیری نداشته است. با افزایش درصد این اعضا، افزایش ظرفیت باربری و افزایش شکل پذیری حاصل می گردد، ضمناً میزان افزایش در شکل پذیری بیشتر از ظرفیت باربری است. قابل ذکر است که با اختصاص ابزار محدودکننده نیرو به اعضایی که دچار کمناش شده اند، در مرحله ای این ابزار موجب تسلیم برخی از اعضا شده و موجب افزایش قابل توجهی در ظرفیت باربری و شکل پذیری مدل می شود.

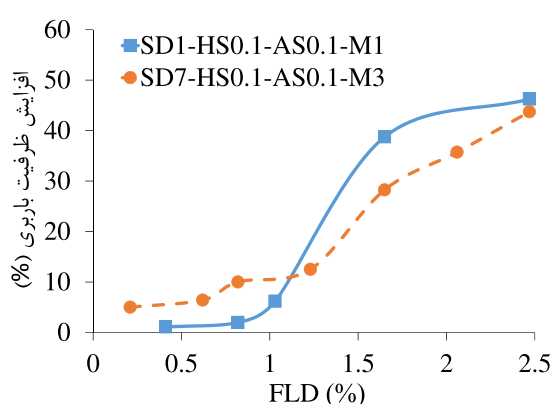
مقایسه ظرفیت باربری و شکل پذیری در درصدهای مختلف بکارگیری سیستم لوله در لوله در اعضای کمناش یافته در سه مدل SD(7,8,9)-HS(0.1, 0.2, 0.3) - AS 0.1-M3 در شکل ۲۶ نشان داده شده است.



شکل ۲۶: مقایسه ظرفیت باربری و شکل پذیری در درصدهای مختلف بکارگیری سیستم لوله در لوله

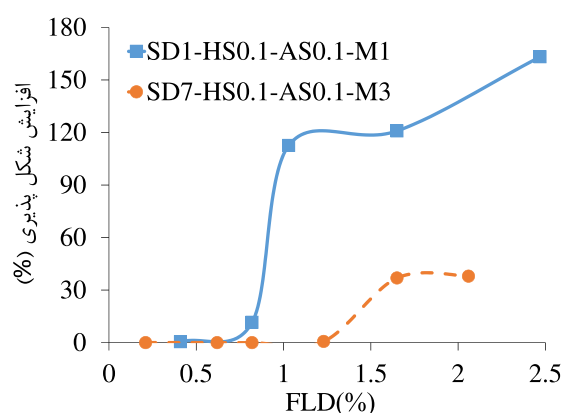
در اعضای کمناش یافته سه مدل SDn-HS(0.1, 0.2, 0.3) - AS 0.1-M3

بررسی نتایج حاصل از بکارگیری ابزار محدود کننده نیروی لوله در لوله در این مدل‌ها مطابق شکل ۲۴ تا ۲۶ بیانگر آن است که ظرفیت باربری گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۲ در مقایسه با دو گنبد دیگر، افزایش بیشتری دارد. همچنین ظرفیت باربری گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۱ در مقایسه با گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۳ افزایش بیشتری دارد. با بررسی شکل‌پذیری گنبدهای با نسبت‌های مختلف ارتفاع به دهانه، نتایج بیانگر آن است که با افزایش تعداد ابزار محدود کننده نیرو در گنبدهای با نسبت‌های مختلف ارتفاع به دهانه، شکل‌پذیری گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۳ در مقایسه با دو گنبد دیگر، افزایش بیشتری دارد. همچنین شکل‌پذیری گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۲ در مقایسه با گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۱ افزایش بیشتری دارد. با مقایسه رفتار خرابی در گنبدها، با اضافه نمودن ابزار محدود کننده نیرو، بهبود قابل ملاحظه در رفتار خرابی حاصل می‌شود. بنابراین در سبک تغییرات خطی در جهت خطوط نصف‌النهاری، ظرفیت باربری در حالت HS0.2 و شکل‌پذیری در حالت HS0.3 بیشتر می‌باشد. مقایسه بین تاثیر پارامتر تغییرات سهمی‌وار و خطی در جهت خطوط نصف‌النهاری در ظرفیت باربری و شکل‌پذیری در درصدهای مختلف بکارگیری ابزار محدود کننده نیروی لوله در لوله در اعضای کمانش یافته در مدل‌های SDn-HS(0.1,0.2,0.3) - AS0.1 - M(1,3) در شکل ۲۷ نشان داده شده است.



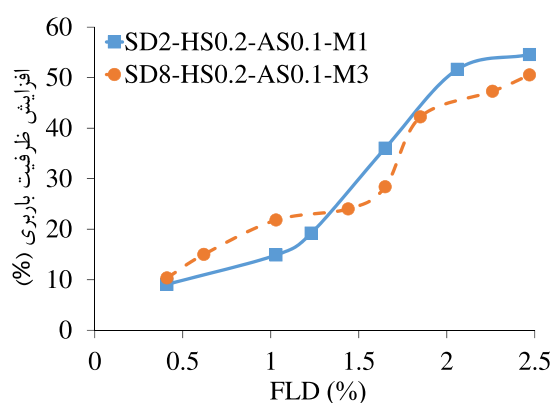
ب - مقایسه شکل‌پذیری در مدل‌های

SD(1,7)-HS 0.1-AS0.1-M(1,3)



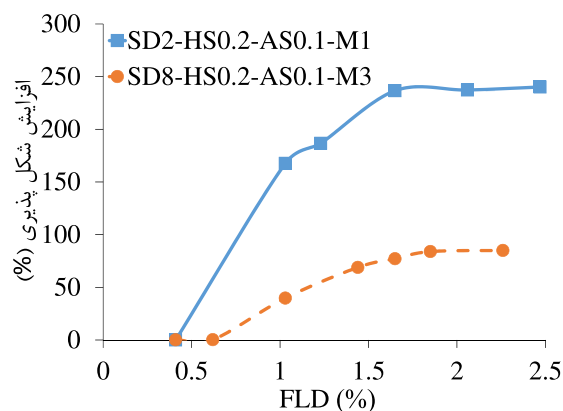
الف - مقایسه ظرفیت باربری در مدل‌های

SD(1,7)-HS 0.1-AS0.1-M(1,3)



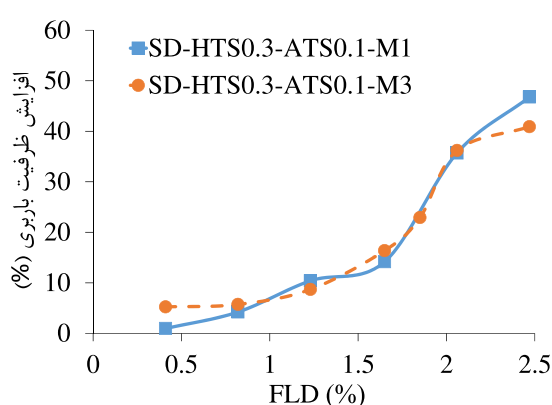
ت - مقایسه شکل‌پذیری در مدل‌های

SD(2,8)-HS 0.2-AS0.1-M(1,3)



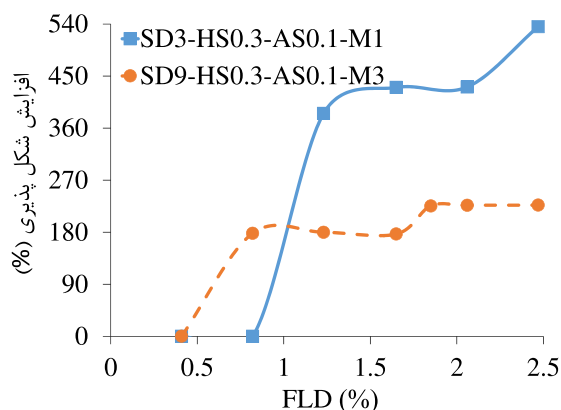
پ - مقایسه ظرفیت باربری در مدل‌های

SD(2,8)-HS 0.2-AS0.1-M(1,3)



ج- مقایسه شکل پذیری در مدل های

SD(3,9)-HS 0.3-AS0.1-M(1,3)



ث- مقایسه ظرفیت باربری در مدل های

SD(3,9)-HS 0.3-AS0.1-M(1,3)

شکل ۲۷: اثرات پارامتر تغییرات سهمی وار و خطی در جهت خطوط نصف النهاری در ظرفیت باربری و شکل پذیری

در درصدهای مختلف بکارگیری سیستم لوله در لوله در اعضای کمانش یافته مدل ها

با مقایسه تاثیر پارامتر تغییرات سهمی وار و خطی در جهت خطوط نصف النهاری در شکل ۲۴ تا ۲۷ و تاثیر مقدار FLD می توان به نتایج زیر رسید:

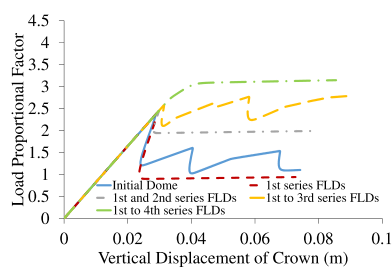
- ۱- با تغییر سبک تغییرات از سهمی وار به خطی در جهت خطوط نصف النهاری در حالتی که HS0.1 می باشد، ظرفیت باربری و شکل پذیری کاهش می یابند، بطوریکه میزان کاهش در شکل پذیری بیشتر از میزان کاهش در ظرفیت باربری می باشد.
 - ۲- با تغییر سبک تغییرات از سهمی وار به خطی در جهت خطوط نصف النهاری در حالتی که HS0.2 می باشد، مقدار ظرفیت باربری و شکل پذیری کاهش می یابند، بطوریکه میزان کاهش در شکل پذیری بیشتر از میزان کاهش در ظرفیت باربری است.
 - ۳- با تغییر سبک تغییرات از سهمی وار به خطی در جهت خطوط نصف النهاری در حالتی که HS0.3 می باشد، مقدار ظرفیت باربری و شکل پذیری کاهش می یابند، بطوریکه میزان کاهش در شکل پذیری بیشتر از میزان کاهش ظرفیت باربری می باشد.
- بنابراین می توان گفت که با تغییر سبک تغییرات از خطی به سهمی وار در جهت خطوط نصف النهاری مدل ها، ظرفیت باربری و شکل پذیری افزایش می یابند.

۴-۶- پارامتر سبک قوس کلی

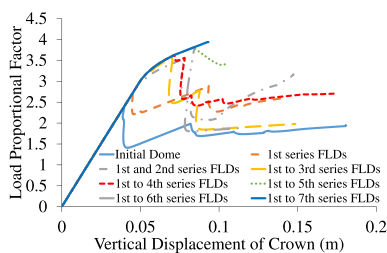
از پارامترهای موثر دیگر، پارامتر سبک تغییرات سهمی وار و سینوسی در جهت قوس کلی قاچ گنبد دولایه صدفی است. به منظور بررسی اثر این پارامتر در رفتار خرابی مدل ها، با جایگزین نمودن ابزار محدود کننده نیروی لوله در لوله در اعضای فشاری کمانش یافته، تحلیل غیر خطی خرابی مدل ها انجام گرفته و نمودار ضریب بار-تغییر مکان گنبد در حالات مختلف (مدل های SD10-HS0.1- AS0. 1- M4، SD11-HS0.2- AS0. 1- M4 و SD12-HS0.3- AS0. 1- M4)، در شکل ۲۸ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۲۸ مشاهده می شود، با بکارگیری سیستم لوله در لوله، ظرفیت باربری و شکل پذیری گنبد اعم از تغییر مکانی و انرژی نسبت به مدل اولیه تغییر قابل توجهی می نمایند. شکل پذیری تغییر مکانی برابر با نسبت تغییر مکان نهایی به تغییر مکان تسلیم و شکل پذیری انرژی، سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان است. در جدول ۷ ستون FLD درصد جایگزینی اعضای معمولی سازه با سیستم لوله در لوله را نشان می دهد. به عنوان مثال منظور از FLD به میزان ۰/۴۱ درصد به این معنی است که در مدل با تعداد عضو کل برابر ۲۹۱۶،

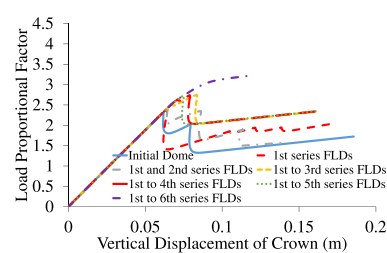
تعداد ۱۲ عضو با سیستم لوله در لوله جایگزین شده است. نتایج عددی تغییرات ظرفیت باربری و شکل پذیری تغییرمکانی تحت تاثیر تعداد ابزار محدودکننده در جدول ۷ و همچنین شکل ۲۹ آورده شده است.



پ- مدل SD12-HS0.3-AS0.1-M4



ب- مدل SD11-HS0.2-AS0.1-M4



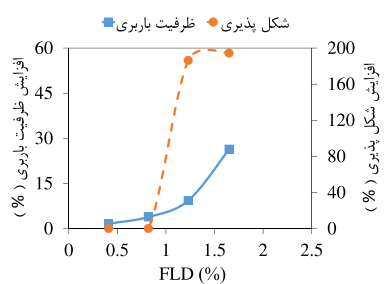
الف- مدل SD10-HS0.1-AS0.1-M4

شکل ۲۸: مقایسه نمودار ضریب بار-تغییرمکان حالات مختلف بکارگیری سیستم لوله در لوله در اعضای کمانش یافته

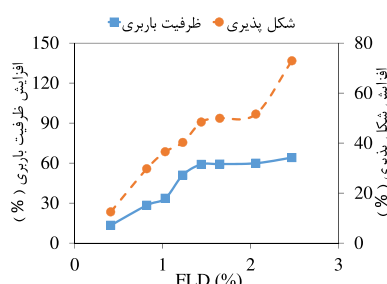
جدول ۷: تاثیر تعداد ابزار محدودکننده نیرو در ظرفیت باربری و شکل پذیری مدل های SD10، SD11 و SD12

SD12-HS0.3- AS0.1-M4				SD11-HS0.2- AS0.1-M4				S10-HS0.1- AS0.1-M4			
افزایش شکل پذیری (%)		افزایش ظرفیت باربری (%)	FLD (%)	افزایش شکل پذیری (%)		افزایش ظرفیت باربری (%)	FLD (%)	افزایش شکل پذیری (%)		افزایش ظرفیت باربری (%)	FLD (%)
انرژی	تغییر مکانی			انرژی	تغییر مکانی			انرژی	تغییر مکانی		
6	0.00	1.65	0.41	227	12.47	13.33	0.41	0.41	0.00	3.41	0.41
16	0.10	3.86	0.82	247	29.74	28.37	0.82	68.48	7.31	4.28	0.82
549	186	9.31	1.23	263	40.26	51.04	1.23	70.52	8.67	8.79	1.23
612*	194*	26.36	1.65	285*	48.42*	59.01	1.44	74.59	13.06	13.82	1.44

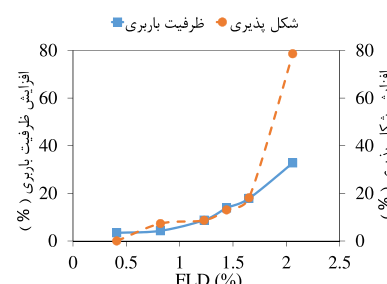
* مقدار حداقل



پ- مدل SD12-HS 0.3- ATS 0.1-M4



ب- مدل SD11-HS 0.2- AS 0.1-M4

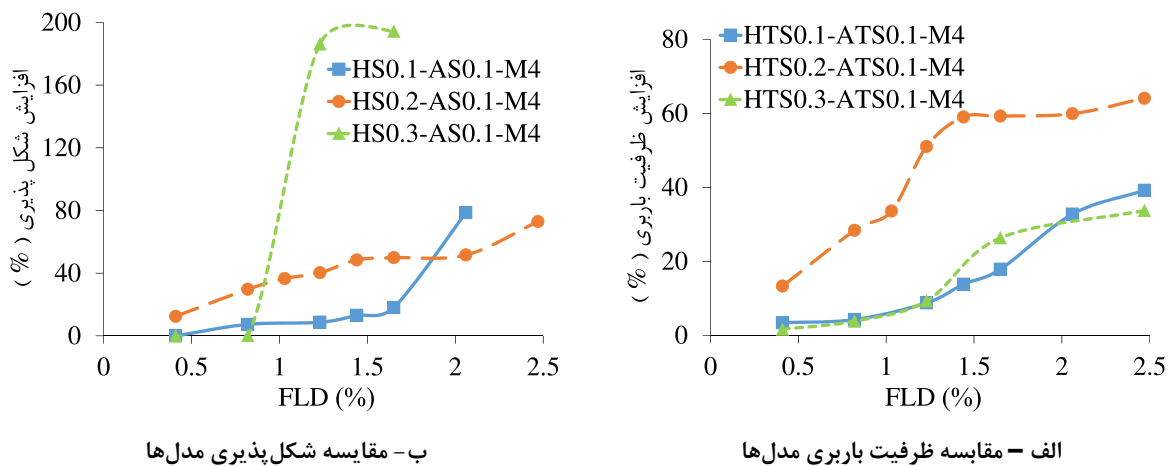


الف- مدل SD10-HS 0.1- AS 0.1-M4

شکل ۲۹: مقایسه ظرفیت باربری و شکل پذیری در درصدهای مختلف بکارگیری سیستم لوله در لوله در اعضای کمانش یافته

با توجه به شکل ۲۸ و ۲۹، می توان نتیجه گرفت که استفاده از سیستم لوله در لوله در اعضای کمانش یافته باعث افزایش در میزان ظرفیت باربری و شکل پذیری شده است. افزایش در میزان ظرفیت باربری و شکل پذیری به افزایش تعداد ابزار محدودکننده نیرو بستگی دارد که در مدل استفاده شده است. هنگامی که به تعداد اعضای که در آن ها از ابزار محدودکننده نیرو استفاده شده، اضافه می شود، افزایش درصد این اعضا، موجب افزایش ظرفیت باربری و افزایش شکل پذیری می گردد.

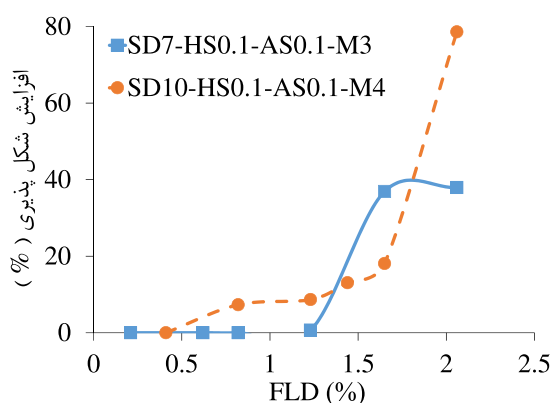
در شکل ۳۰ مقایسه ظرفیت باربری و شکل پذیری در درصدهای مختلف بکارگیری سیستم لوله در لوله در اعضای کمانش یافته مدل های SD(10, 11, 12)-HS(0.1, 0.2, 0.3) - AS 0.1-M4 نشان داده شده است.



شکل ۳۰: مقایسه ظرفیت باربری و شکل پذیری در درصدهای مختلف بکارگیری سیستم لوله در لوله

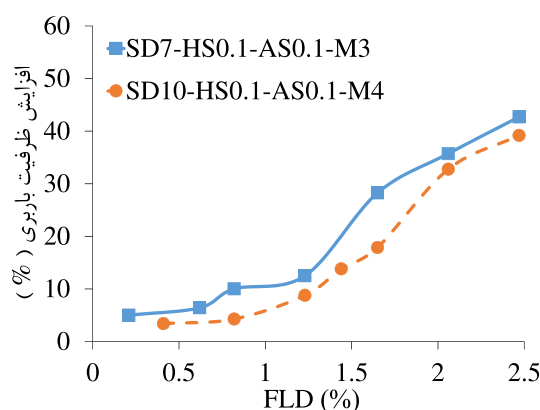
در اعضای کمانش یافته مدل های SD(10, 11, 12)-HS(0.1, 0.2, 0.3) - AS 0.1-M4

بررسی نتایج حاصل از بکارگیری ابزار محدودکننده نیرو - سیستم لوله در لوله در گنبد های با نسبت های ارتفاع به دهانه ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ مطابق شکل ۲۸ تا ۳۰ بیانگر آن است که جایگزینی اعضای فشاری بحرانی با ابزار محدودکننده نیروی پیشنهادی تاثیر مهمی در افزایش ظرفیت باربری و شکل پذیری گنبد های دولایه صدفی دارد. با افزایش تعداد ابزار محدودکننده نیرو در گنبد های با نسبت های مختلف ارتفاع به دهانه، ظرفیت باربری گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۲ در مقایسه با دو گنبد دیگر، افزایش بیشتری دارد. همچنین ظرفیت باربری گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۱ در مقایسه با گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۳ افزایش بیشتری دارد. با بررسی شکل - نسبت های گنبد های با نسبت های مختلف ارتفاع به دهانه، نتایج بیانگر آن است که با افزایش تعداد ابزار محدودکننده نیرو در گنبد های با نسبت های مختلف ارتفاع به دهانه، شکل پذیری گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۳ در مقایسه با دو گنبد دیگر، افزایش بیشتری دارد. همچنین شکل پذیری گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۱ در مقایسه با گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۲ افزایش بیشتری دارد. با مقایسه رفتار خرابی در گنبد های دولایه صدفی در دو حالت با و بدون ابزار محدودکننده نیرو، بهبود قابل ملاحظه در رفتار خرابی به واسطه بکارگیری ابزار محدود کننده نیرو حاصل می شود. مقایسه تاثیر پارامتر سبک قوسی سهمی وار و سینوسی در ظرفیت باربری و شکل پذیری در درصدهای مختلف بکارگیری سیستم لوله در لوله در مدل های SDn-HS(0.1,0.2,0.3) - AS0.1 - M(3,4) در شکل ۳۱ نشان داده شده است.



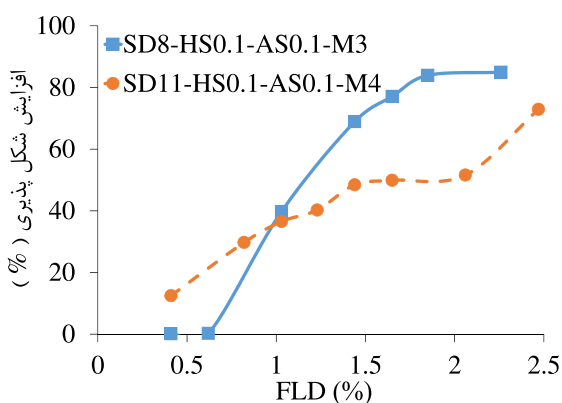
ب- مقایسه شکل پذیری در مدل‌های

SD(7,10)-HS 0.1-AS0.1- M(3,4)



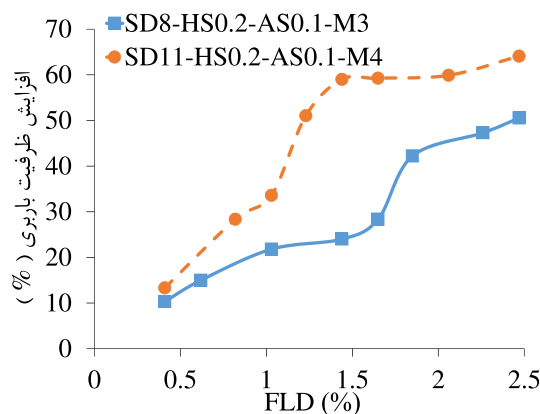
الف- مقایسه ظرفیت باربری در مدل‌های

SD(7,10)-HS 0.1-AS0.1-M(3,4)



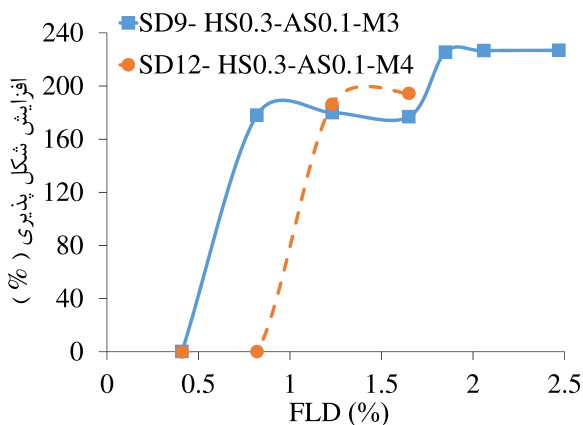
ت- مقایسه شکل پذیری در مدل‌های

SD(8,11)-HS 0.2-AS0.1- M(3,4)



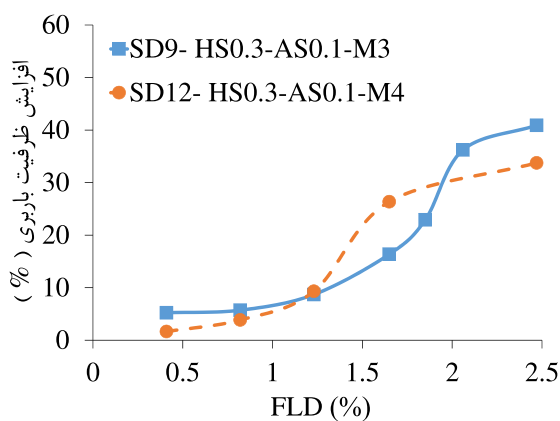
پ- مقایسه ظرفیت باربری در مدل‌های

SD(8,11)-HS 0.2-AS0.1- M(3,4)



ج- مقایسه شکل پذیری در مدل‌های

SD(9,12)-HS 0.3-AS0.1- M(3,4)



ث- مقایسه ظرفیت باربری در مدل‌های

SDn-HS 0.3-AS0.1- M(3,4)

شکل ۳۱: اثرات پارامتر تغییرات سهمی وار و خطی در جهت خطوط نصف النهاری در ظرفیت باربری و شکل پذیری

در درصد‌های مختلف بکارگیری سیستم لوله در لوله در اعضای کماتش یافته مدل‌ها

با مقایسه تاثیر پارامتر تغییرات سهمی وار و سینوسی سبک قوس کلی در شکل ۳۰ تا ۳۱ و تاثیر درصد FLD، می توان نتایج زیر بیان کرد:

۱- با تغییر سبک قوس کلی از سهمی وار به سینوسی در حالتی که HS0.1 می باشد، ظرفیت باربری کاهش و شکل پذیری افزایش می یابد.

۲- با تغییر سبک قوس کلی از سهمی وار به سینوسی در حالتی که HS0.2 می باشد، ظرفیت باربری افزایش و شکل پذیری کاهش می یابد.

۳- با تغییر سبک قوس کلی از سهمی وار به سینوسی در حالتی که HS0.3 می باشد، ظرفیت باربری و شکل پذیری کاهش می یابند.

بنابراین می توان گفت که با تغییر سبک قوس از سینوسی به سهمی وار در نسبت ارتفاع به دهانه بیشتر، شکل پذیری و ظرفیت باربری افزایش می یابد.

۷- نتیجه گیری

در این تحقیق رفتار خرابی گنبد های دو لایه فضاکار صدفی با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف هندسی و طراحی، نظیر نسبت ارتفاع به دهانه، نسبت برآمدگی به دهانه، سبک قوسی، سبک تغییرات در جهت نصف النهاری مورد مطالعه قرار گرفت. نوع و تعداد مدل ها تا حد امکان به نحوی انتخاب شده اند تا برآورد مناسبی از رفتار این سیستم ها حاصل شود. در تحقیق حاضر تاثیر ابزار محدودکننده نیروی لوله در لوله بر بهبود رفتار خرابی سازه ها مورد مطالعه قرار گرفت. این ابزار کارایی لازم در حذف کمانش عضو فشاری و تامین قیود مناسب و کافی برای ایجاد تسلیم فشاری کامل در مقطع عضو فشاری برخوردار می باشد. ابتدا با انجام تحلیل عناصر محدود رفتار خرابی دوازده مدل مختلف گنبد دو لایه صدفی با پارامترهای هندسی مختلف شامل نسبت ارتفاع به دهانه، نسبت برآمدگی به دهانه، سبک تغییرات قوسی قاچها، سبک تغییرات در جهت نصف النهاری مورد مطالعه قرار گرفت و از این طریق تحلیل حساسیت رفتار خرابی گنبد های صدفی نسبت به پارامترهای مزبور صورت گرفت. سپس ابزار محدودکننده نیرو به اعضای فشاری کمانش کرده در مدل ها اختصاص داده شد و مجدداً تحلیل استاتیکی غیرخطی بر روی این دوازده مدل انجام گرفت. در ادامه به ذکر اهم نتایج حاصل از تحلیل این نمونه ها بر روی پارامترهای هندسی در دو بخش جداگانه پرداخته می شود.

بخش اول- تحلیل حساسیت رفتار خرابی گنبد های دو لایه صدفی معمولی

۱- با افزایش نسبت ارتفاع به دهانه گنبد از ۰/۱ تا ۰/۳ شکل پذیری کاهش می یابد.

۲- در حالتی که سبک تغییرات در جهت خطوط نصف النهاری و سبک قوسی کلی سهمی وار می باشد، با افزایش نسبت ارتفاع به دهانه در اولین خرابی شکل پذیری کاهش می یابد ولی ظرفیت باربری در حالت AS0.1 کاهش و در حالت AS0.01 ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد.

۳- با افزایش نسبت برآمدگی به دهانه گنبد، شکل پذیری افزایش می یابد ولی ظرفیت باربری در حالت HS(0.1,0.2) کاهش و در حالت HS0.3 افزایش می یابد.

۴- با تغییر سبک قوسی کلی از سهمی وار به سینوسی، در نسبت ارتفاع به دهانه گنبد ۰/۱ و ۰/۲، ظرفیت باربری و شکل پذیری کاهش ولی در نسبت ارتفاع به دهانه گنبد ۰/۳، ظرفیت باربری افزایش و شکل پذیری کاهش می یابد.

بخش دوم- تحلیل حساسیت رفتار خرابی گنبد های دو لایه صدفی با استفاده از ابزار محدودکننده نیرو

- ۱- با جایگزینی اعضای فشاری بحرانی با ابزار محدودکننده نیرو در گنبدهای دولایه صدفی، بهبود قابل ملاحظه در رفتار خرابی حاصل می شود که با تعداد این ابزار رابطه مستقیم دارد.
- ۲- با افزایش نسبت برآمدگی به دهانه، شکل پذیری و ظرفیت باربری گنبد دو لایه صدفی افزایش می یابد.
- ۳- در گنبدهای با نسبت های ارتفاع به دهانه ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳، با افزایش تعداد ابزار محدودکننده نیرو، شکل پذیری گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۳ در مقایسه با دو گنبد دیگر افزایش بیشتری دارد.
- ۴- با تغییر سبک تغییرات از خطی به سهمی وار در جهت خطوط نصف النهاری مدل ها، ظرفیت باربری و شکل پذیری افزایش می یابند.
- ۵- با تغییر سبک قوس از سینوسی به سهمی وار در نسبت ارتفاع به دهانه بیشتر، شکل پذیری و ظرفیت باربری افزایش می یابد.
- ۶- افزایش در میزان شکل پذیری در مقایسه با افزایش در میزان ظرفیت باربری مدل ها بیشتر می باشد.
- ۷- با جایگزین نمودن ابزار محدودکننده نیرو در اعضای کمانش یافته گنبد، خرابی از حالت خرابی ناگهانی و فروجهش عضوی خارج می شود. همچنین ظرفیت باربری و شکل پذیری مدل ها افزایش می یابند.
- ۸- عملکرد مطلوب گنبدهای مورد مطالعه تحت پارامترهای مختلف هندسی، حاکی از اطمینان به رفتار استفاده از ابزار محدودکننده نیروی لوله در لوله در مدل ها می باشد.

مراجع

- [1] Office of Deputy for Strategic Supervision, Bureau of Technical Execution System, Code of Practice for Skeletal Steel Space Structures, No. 400, 2010.
- [2] Sheidaii, Mohammad Reza, Investigation of the behavior of double-layer space grids against progressive buckling, PhD thesis, University of Tabriz, 2001.
- [3] Nooshin H., "Space Structures and configuration processing", *Progress in Structural Engineering and Materials*, Vol. 1, Issue. 3, PP. 329-336, 1998.
- [4] Makowski, Z. S., History of the development of braced domes, PP., 169-183, 1990.
- [5] Nooshin H., Tomatsuri H., Fujimoto M., Scallop domes. In: *Processing of the IASS symposium on Shell & Spatial Structures* (ed SP Chirw), Singapore: CI-Premier Pte Ltd, November 1997, PP. 651-660.
- [6] M. Babaei and M. sheidaii, "Optimal design of double layer scallop domes using genetic algorithm", *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 37, no. 4, PP. 2127-2138, 2013.
- [7] R. Kamyab, E. Salajegheh, "Size Optimization of Nonlinear Scallop Domes by an Enhanced Particle Swarm Algorithm", *International Journal of Civil Engineering, Transaction A: Civil Engineering*, Vol. 11, No. 3, PP. 77-89, 2013.
- [8] R. Kamyab, H. Nooshin, E. Salajegheh, "The Effect of Arching Styles on the Behavior of Scallop Domes", *4th National Conference on Earthquake and Structures*, Kerman, 2013.
- [9] E. Akhavan Masoumi, K. Abedi, "Study of the stability of double-layer scallop domes", 9th National Congress of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, May 21 and 22, 2016.
- [10] H. Sadeghi, M. Heristchian, A. Aziminejad, and H. Nooshin, "Wind effect on grooved and scallop domes", *Engineering Structures*, Vol. 148, PP. 436-450, 2017
- [11] Aminokhani, S., Abedi, K. and Charkhtab Basim, M., "Probabilistic investigation of imperfection in the stability behavior of double-layer scallop domes", Master Thesis, Sahand University of Technology, Tabriz, September 2017.
- [12] Ghalejoughi, J., Sheidaii, M. R., & Tariverdilo, S. (2020). Experimental and Numerical Study of a Tube in Tube Force Limiting Device. *International Journal of Steel Structures*, 20(4), 1405-1419.
- [13] Mukai, H., Wada, A., Watanabe, A., & Iwata, M. (1993). Ductile truss structures and scaled model experiments. In *Space structures 4* (pp. 1841-1850).
- [14] Nooshin H., Kamyab R., samavati OA., "Exploring scallop forms", *International Journal of Space Structures*, PP. 1-28, 2017.
- [15] Nooshin H., and Disney P. Formex configuration processing, part C. In: *Motro R (ed) structural morphology and configuration processing of Space Structures*. Essex: Multi Science publishing Co., 2009, PP. 249-549.
- [16] Nooshin H., "Formian 2 Software", University of Surrey, 1999.

- [17] Iranian National Building Code, Part 6, Design Loads for Buildings, Ministry of Housing and Urban Development (2014).
- [18] Iranian National Building Code, Part 10, Design and Construction of Steel Structures, Ministry of Housing and Urban Development (2014).
- [19] Specifications for the Design and Construction of Space Trusses JGJ 7-91, *International Journal of Space Structures*, Vol. 16 No. 3 2001.
- [20] American Society of Civil Engineers (ASCE), ASCE Standard, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, ASCE 7-16, 2016.
- [21] Burger, Martha Schneider, Stahlbau Profile Tables, Translated by Mohammad Reza Abbasi, Farahmand University Press, Fifth Edition, 2014.
- [22] W. J. Supple, I Collins, Limit state analysis of double layer girds, *Applied Science Publishers*, London, England, 93-117 (1997).
- [23] Abedi, K., Shekasteband, B., "Stability analysis of space structures", Sahand University of Technology, Tabriz, 2009.
- [24] Abedi, K., "Instability Behaviour and Collapse Analysis of Space Structures", *Proceeding of the first National Conference on Space Structures*, Iran, Tehran, May 15-17, 2000.
- [25] Sheidaii, M.R., Abedi, K., "Study of buckling behavior of compressive members by finite element method", *The First Conference on Thin Wall Structures*, Kerman, 2005
- [26] American Society of Civil Engineers, ASCE standard, ASCE/SEI, 41-17, Seismic evaluation and retrofit of existing buildings, 2017.
- [27] Riks E., "An Incremental Approach to the Solution of Snapping and Buckling Problems", *International Journal of Solids and Structures*, 15(7), 529-551. 1979.