

Improvement of the seismic performance of double-layer dome space structures using a force limiting device

Hossein Najafi¹, Seyed Arash Mousavi Ghasemi^{2*}, Ashkan KhodaBandehLou³

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

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran

ABSTRACT

Space structures are often used to cover large-span areas and are primarily supported by steel or concrete columns. Given the benefits of using space frame walls in improving seismic performance, this paper examines the seismic behavior of double-layer dome-shaped space structures placed on space frame walls. Considering the importance of the buckling behavior of compression members in failure mechanisms, critical buckling-prone members were replaced with tubular force limiting device (FLD) to prevent sudden strength loss, and the effect of this replacement on failure behavior was studied. Finally, the effect of using these tools on the behavior factor was investigated. For this purpose, 12 structural models were selected and designed, then analyzed using 16 earthquake records based on FEMA-P695 guidelines using incremental dynamic analysis. Fragility curves were extracted based on collapse acceleration derived from incremental dynamic curves, and the effect of geometric parameters on the failure behavior of structures was examined. The analysis results indicated that the structures initially exhibited linear behavior, and after reaching load-bearing capacity, sudden buckling of members led to an abrupt decline in capacity curves, indicating the brittle behavior of space structure members. Critical compression members were then identified and replaced with force limiting device. To assess the impact of these tools on the seismic behavior of space structures, collapse acceleration and behavior factors were studied. The results showed that by incorporating this tool, the collapse acceleration in space structures with dome height-to-span ratios of 0.2 and 0.4 increased by 13% and 7%, respectively suggesting the effectiveness of the force limiting device tool in delaying the overall collapse of space structures. Furthermore, the results demonstrated a significant impact on the behavior factor of space structures, with an increase of 32% to 130% according to the Newmark-Hall method and 15% to 130% according to the Miranda-Bertero method.

ARTICLE INFO

Receive Date: 04 August 2024

Revise Date: 08 November 2024

Accept Date: 18 December 2024

Keywords:

Double-layer space structures
Incremental Dynamic analysis
FEMA P695
Fragility curves
Collapse Margin Ratio
Behavior Factor

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.470789.3483](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.470789.3483)

*Corresponding author: Seyed Arash Mousavi Ghasemi

Email address: amousavi2000@iaut.ac.ir

بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فضاکار گنبدی دولایه با استفاده از ابزار محدودگر نیرو

حسین نجفی^۱، سید آرش موسوی قاسمی^{۲*}، اشکان خدابنده لو^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران سازه، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

چکیده

از سازه‌های فضاکار اغلب برای پوشش فضاهای با دهانه بزرگ استفاده گردیده و عمدتاً روی ستون‌های فولادی یا بتنی استفاده شده‌اند. با توجه به مزایای استفاده از دیوارهای فضاکار در بهبود عملکرد لرزه‌ای، در این مقاله به بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌های فضاکار گنبدی دو لایه قرار گرفته روی دیوارهای فضاکار پرداخته شده است. با توجه به اهمیت رفتار کمانشی اعضای فشاری در مکانیزم خرابی، اعضای بحرانی مستعد کمانش با ابزار محدودگر نیروی لوله‌ای جایگزین و تاثیر آن در رفتار خرابی بررسی شده است. همچنین تاثیر استفاده از این ابزار روی مقدار ضریب رفتار بررسی شده است. برای این منظور ۱۲ مدل سازه انتخاب و پس از طراحی، تحلیل دینامیکی نمودی گردیده‌اند. سپس منحنی‌های شکنندگی بر اساس شتاب فروریزش حاصل از منحنی‌های دینامیکی نمودی استخراج و تاثیر پارامترهای هندسی بر رفتار خرابی بررسی شده است. نتایج نشان داد که رفتار سازه‌ها در ابتدا خطی بوده و بعد از رسیدن به ظرفیت باربری، در اثر کمانش ناگهانی اعضا، منحنی‌های ظرفیت افت ناگهانی پیدا کردند که این امر نشان دهنده رفتار ترد اعضا بود. سپس اعضای فشاری بحرانی شناسایی و با ابزار محدودگر نیرو جایگزین و مجدداً تحلیل‌های دینامیکی نمودی انجام شد. پارامترهای شتاب فروریزش و ضریب رفتار سازه، جهت بررسی تاثیر این ابزار در رفتار لرزه‌ای بررسی شد. نتایج نشان داد که با جایگزینی این ابزار، شتاب فروریزش در سازه‌های با نسبت ارتفاع گنبد به طول دهانه برابر ۰/۲ و ۰/۴ به ترتیب ۱۳ و ۷ درصد افزایش یافته که این امر حاکی از تاثیر ابزار محدودگر نیرو در به تاخیر انداختن فروریزش کلی سازه‌ها بود. همچنین نتایج نشان دهنده تاثیر مهم این ابزار در ضریب رفتار سازه‌ها بود به طوری که ضریب رفتار براساس روش نیومارک هال به میزان ۳۲ الی ۱۳۰ درصد و براساس روش میراندا برترو به میزان ۱۵ الی ۱۳۰ درصد افزایش یافت.

کلمات کلیدی: سازه‌های فضاکار دولایه، تحلیل دینامیکی نمودی، FEMA P695، منحنی‌های شکنندگی، حاشیه ایمنی فروریزش، ضریب رفتار

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2024.470789.3483					
	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.470789.3483	۱۴۰۴/۰۱/۳۱	۱۴۰۳/۰۹/۲۸	۱۴۰۳/۰۹/۲۸	۱۴۰۳/۰۸/۱۸	۱۴۰۳/۰۵/۱۴
			سید آرش موسوی قاسمی amousavi2000@iaut.ac.ir		*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

سازه‌های فضاکار دولایه به طور گسترده برای پوشش فضاهای وسیع مانند ژیمنازیوم‌ها، سالن‌ها، پابانه‌های فرودگاه‌ها و کارخانجات صنعتی بکار گرفته می‌شوند. همچنین سازه‌های فضاکار می‌توانند به عنوان سیستم باربر جانبی در سازه‌های بلند مرتبه مورد استفاده قرار گیرند [۱، ۲]. در دهه‌های گذشته، تحقیقات آزمایشگاهی و عددی در خصوص بررسی پایداری سازه‌های فضاکار صورت گرفته است. محققین مختلف در خصوص پایداری لرزه‌ای سقف‌های فضاکار دولایه مطالعات مختلفی انجام داده‌اند [۳-۸]. مطالعات مشابهی نیز برای بررسی رفتار پایداری استاتیکی سقف‌های فضاکار تک لایه انجام شده است [۹]. به طور کلی سازه‌های فضاکار صرفنظر از تاشه و شکل کلی (تخت، قوسی و غیره) متکی بر قاب‌هایی می‌باشند که زیر سازه نامیده می‌شوند. در هنگام وقوع زلزله، نیروهای وارده از زیر سازه به سازه فضاکار اصلی وارد می‌گردند. بنابراین برای بررسی دقیق و جامع پاسخ دینامیکی سازه، لازم است تا سقف و زیر سازه به صورت یکپارچه مورد بررسی قرار گیرند [۱۰]. تحقیقات مختلفی در این رابطه انجام شده است و می‌توان به کار مقدم اشاره نمود که مشخصات دینامیکی گنبد چلیکی دولایه با زیر سازه را مورد بررسی قرار داد [۱۱]. ایشیکاوا^۱ و همکاران [۱۲] رفتار خرابی دینامیکی سازه فضاکار تخت دولایه متکی بر زیر سازه را تحت بارهای لرزه‌ای مورد بررسی قرار دادند. همچنین در سال ۲۰۱۶ ایشیکاوا و همکاران ظرفیت لرزه‌ای نهایی و مکانیزم خرابی دیوارهای مشبک دولایه را مورد بررسی قرار دادند. نی^۲ و همکاران [۱۳] مکانیزم خرابی گنبد مشبک تک لایه با نسبت‌های مختلف ارتفاع به طول دهانه را با استفاده از تحلیل دینامیکی نمودی مورد بررسی قرار دادند. همچنین عملکرد لرزه‌ای گنبد‌های مورد بررسی را با استفاده از تحلیل‌های شکنندگی مورد ارزیابی قرار دادند. یانگ^۳ و همکاران [۱۴] رفتار لرزه‌ای گنبد مشبک تک لایه را در دو حالت با و بدون خستگی مصالح با استفاده از تحلیل دینامیکی نمودی مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحلیل نشان دهنده اهمیت در نظر گیری مصالح با خستگی پایین برای تحلیل لرزه‌ای گنبد‌های مشبک تک لایه بود. ناکازاوا^۴ و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۵، عملکرد لرزه‌ای سقف مشبک چلیکی با آرایش اعضای متقاطع مورب را مورد مطالعه قرار دادند. تاکوچی^۵ و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۸ مکانیزم فروریزش در دو ژیمنازیوم آسیب دیده در زلزله کوماموتو^۶ سال ۲۰۱۶ ژاپن را مورد بررسی قرار دادند. کوراتا^۷ و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۸ مقاوم سازی سقف سازه ژیمنازیوم را با استفاده از میراگر اصطکاکی بررسی کردند. این روش مقاوم سازی اقتصادی بوده و علاوه بر آنکه از وقوع فروریزش سقف ژیمنازیوم جلوگیری کرد، تغییر مکان بیرون صفحه‌ای سقف را به میزان قابل توجهی کاهش داد. حاجی نیا و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۶ کاربرد روش زمان - دوام را در تحلیل دینامیکی چلیک‌های دولایه مورد مطالعه قرار دادند. بدین منظور چلیک‌های دولایه با نسبت‌های مختلف ارتفاع به طول دهانه را انتخاب نموده و سپس با استفاده از روش مذکور مورد تحلیل قرار دادند. نتایج تحلیل نشان داد که روش زمان - دوام یک روش موثر و سریع با تلاش‌های محاسباتی کم بوده و نتایج بدست آمده از روش مذکور تطابق قابل قبولی با نتایج تحلیل تاریخچه زمانی داشت. میازو^۸ و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۶ تاثیر زیرسازه‌ها در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌های فضاکار را مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور توپولوژی و سطح مقطع اعضای سازه فضاکار با استفاده از حل معادلات غیرخطی بهینه سازی گردید. نتایج نشان داد که زیرسازه انعطاف پذیر باعث می‌شود تا سقف قوسی و سقف گنبدی فضاکار در جهت مماسی حرکت کرده و پاسخ شتاب قائم در سقف سازه کاهش یابد. ماهانتش و ناوین^۹ [۱۹] در سال ۲۰۲۰ رفتار دینامیکی شبکه دولایه تخت را مورد بررسی قرار دادند. در سازه‌های فضاکار متداول، وظیفه تحمل بارهای جانبی بر عهده المان‌های فولادی قطری از قبیل مهاربند یا ستون‌های بتنی می‌باشد. اخیراً روش

¹ Ishikawa et al.

² Nie et al.

³ Yang et al.

⁴ Nakazawa et al.

⁵ Takeuchi et al.

⁶ Kumamoto

⁷ Kurata et al.

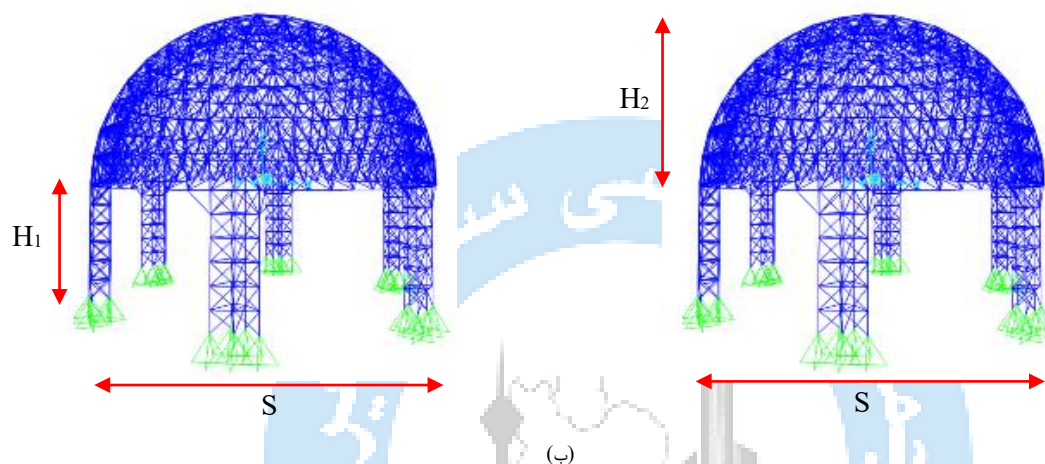
⁸ Miyazu et al.

⁹ Mahanthesh and Naveen

جدیدی بر اساس استفاده از سازه‌های مشبک دولایه ارائه گردیده است. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، سازه مشبک به عنوان نوعی سیستم تکیه گاهی خرابایی مانند می‌باشد که بارهای جانبی را تحمل می‌کند.



(الف)



(ب)

شکل ۱- نمونه‌هایی از سازه‌های فضاکار دولایه

خرابی در سازه‌های فضاکار دولایه ناشی از کمناش اعضای فشاری بوده و دارای رفتاری ترد و شکننده می‌باشند لذا راهکارهایی برای بهبود رفتار این نوع از سازه‌ها ارائه گردیده است. یکی از این راهکارها استفاده از ابزارهای محدودگر نیرو می‌باشد. تحقیقاتی در خصوص استفاده از این ابزارها برای بهبود رفتار سازه‌های فضاکار صورت گرفته است. اولین تحقیق مربوط به اشمیت^{۱۰} و همکاران [۲۰] می‌باشد که در آن ابزار محدودگر نیرو را به عنوان روشی برای افزایش ظرفیت بار نهایی و شکل‌پذیری سازه پیشنهاد کردند و سپس در سال ۱۹۸۰ مطالعاتی را به صورت تجربی به منظور درک رفتار سازه‌های فضاکار دولایه با و بدون استفاده از ابزار محدودگر نیرو انجام داده و در نهایت تاثیر آن را در ظرفیت نهایی و شکل‌پذیری سازه‌ها بررسی نمودند. پارک^{۱۱} و همکاران [۲۱] در سال ۱۹۸۹ مطالعاتی را به منظور اصلاح رفتار سازه‌های فضاکار دولایه انجام دادند. نتایج نشان داد که بین نتایج نظری و تجربی سازگاری خوبی برقرار بوده و ظرفیت باربری کلی به دلیل کاهش ظرفیت عضو در نتیجه بکارگیری ابزار محدودگر نیرو افزایش نمی‌یابد، ولی منجر به افزایش شکل‌پذیری می‌شود. پارک [۲۲] در سال ۱۹۹۳ مطالعاتی بر روی تاثیر ابزار محدودگر نیرو چند لوله‌ای در سازه فضاکار دولایه انجام داد. بررسی‌های تجربی به منظور ارزیابی رفتار عضو به همراه ابزار محدودگر نیرو در فشار و کشش انجام گرفت. رابطه بار-تغییر مکان برای برخی از مدل‌های مجهز به ابزار محدودگر نیرو و تعداد محدودی از اعضای مجهز به ابزار محدودگر نیرو بصورت تمام مقیاس تعیین گردید. ال شیخ^{۱۲} [۲۳] در سال ۲۰۰۰ تاثیر ابزارهای محدودگر نیرو بر روی رفتار سازه‌های فضاکار دو لایه را بر اساس موقعیت مناسب قرارگیری این ابزارها مورد بررسی قرار داد. برای این منظور، چهار سازه فضاکار با تاشه‌های مختلف در نظر گرفته شده و تاثیر پارامترهای مختلف نظیر نسبت‌های طول به

¹⁰ Schmidt¹¹ Parke¹² EL Sheikh

عرض و شرایط مرزی مختلف بر روی رفتار تاشه‌های مورد نظر در دو حالت با و بدون استفاده از ابزار محدودگر نیرو مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از ابزار محدودگر نیرو در همه حالات تکیه‌گاهی، باعث بهبود شکل پذیری و مقاومت سازه می‌شود.

کیم و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۱۴ به توسعه ابزار محدودگر نیرو جهت جلوگیری از کمناش ارتجاعی عضو لاغر پرداختند. بدین منظور صفحات تاشو برای تحریک تسلیم شدگی قبل از وقوع کمناش ارتجاعی پیشنهاد گردید. نتایج نشان داد که عضو پیشنهادی قادر به جذب انرژی زیاد بوده و قادر است از کمناش ارتجاعی عضو فشاری جلوگیری نماید. قلعه جوقی و همکاران [۲۵] در سال ۲۰۲۰ به مطالعه عددی و آزمایشگاهی ابزار محدودگر نیروی لوله در لوله پرداختند. بدین منظور رفتار عضو محدودگر نیرو را براساس پارامترهای مختلف از قبیل فاصله بین لوله داخلی و خارجی، نسبت لاغری عضو اصلی، نسبت طول عضو خارجی به طول داخلی مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحلیل نشان دهنده افزایش ظرفیت باربری و شکل پذیری اعضای فشاری با نسبت‌های لاغری مختلف می‌باشد. قلعه جوقی و همکاران [۲۶] در سال ۲۰۲۲ به بهبود رفتار خرابی گنبد‌های فضاکار صدفی با استفاده از ابزار محدودگر نیروی لوله در لوله پرداختند. بدین منظور ابتدا با استفاده از تحلیل‌های غیرخطی اعضای بحرانی شناسایی گردیده و سپس ابزار محدودگر نیرو جایگزین اعضای بحرانی شده و رفتار سازه مجدداً مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل نشان دهنده افزایش ظرفیت باربری و شکل پذیری گنبد دولایه صدفی بوده است.

پور شریفی و همکاران [۲۷] در سال ۲۰۱۶ تاثیر ابزار محدودگر نیروی آکاردیونی را در رفتار پایداری شبکه‌های دولایه مورد بررسی قرار دادند. علاوه بر آن، مطالعات پارامتری در رابطه با تاثیر ابزار محدودگر نیروی آکاردیونی با در نظر گرفتن الگوی بارگذاری، ابعاد شبکه دولایه و نسبت طول به ارتفاع شبکه انجام گرفت. نتایج نشان داد که ابزار محدودگر نیروی آکاردیونی ظرفیت باربری سازه را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. همچنین با کاهش نسبت طول به عمق شبکه دولایه، مقاومت سازه مجهز به ابزار محدودگر نیرو افزایش می‌یابد.

شیدایی و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۱۷ مطالعاتی در مورد استفاده از ابزار محدودگر نیرو در رفتار فروریزش سازه‌ها و تاثیر آن در شبکه‌های دولایه فضاکار با شرایط مختلف تکیه‌گاهی، ناکاملی هندسی، ارتفاع و شکل هندسی مختلف انجام دادند. نتایج نشان داد که در نتیجه استفاده از ابزار محدودگر نیرو، ظرفیت باربری مدل‌ها به مقدار ۲۰ تا ۴۲ درصد افزایش یافت لیکن با توجه به هزینه زیاد ابزار محدودگر نیرو، این ابزار می‌بایست صرفاً در اعضای فشاری بحرانی بکار گرفته شود. فاتحی و همکاران [۲۹] در سال ۲۰۲۱ به بررسی رفتار لرزه‌ای مخازن تحت رکوردهای حوزه نزدیک گسل پرداختند. نتایج نشان دهنده نیاز به مقاوم سازی لرزه‌ای مخازن پر و نیمه پر برای حالتی که سطح آب داخل مخزن ۱۰ درصد پایین‌تر از ارتفاع مخزن باشد، است. عابدی و روشندل [۳۰] در سال ۲۰۱۸ رفتار سازه‌های فضاکار چلیکی دولایه در برابر فروریزش پیش رونده و نیز تاثیر ابزار محدودگر نیرو در رفتار سازه را بررسی کردند. نتایج نشان دهنده کارایی ابزار محدودگر نیرو در جلوگیری از فروریزش پیش رونده سازه‌های مورد مطالعه بود. شکسته‌بند [۳۱] در سال ۲۰۱۸ تاثیر ابزار محدودگر نیرو و کابل‌های با سختی بالا را در رفتار سازه‌های کش بستی^{۱۳} مورد مطالعه قرار داد. استفاده از ابزارهای محدودگر نیرو در تعدادی از دستک‌های بحرانی، مقاومت سازه را به میزان ۵۲٪ افزایش داد، همچنین نتایج نشان داد که با صرف نظر از سختی کابل‌ها، ابزار محدودگر نیرو تاثیر زیادی در تغییر مکانیزم فروریزش سازه‌ها دارد. حمید و همکاران [۳۲] در سال ۲۰۱۸ از عضو نرم جدیدی برای کاهش فروریزش پیش رونده خرپای فضاکار دولایه استفاده کردند. در ابزار محدودگر نیروی پیشنهادی، لوله میانی بین لوله داخلی و خارجی در دو انتها بوسیله جوش وصل می‌گردند. نتایج نشان دادند که ترکیب سه لوله مدور به طور قابل توجه رفتار شکل‌پذیر عضو را افزایش می‌دهد. همچنین نتایج آزمایش نشان دادند که زمانی که لوله‌های داخلی و خارجی تحت نیروی فشاری قرار می‌گیرند، نیروی لوله میانی به طور خطی افزایش می‌یابد، لذا رفتار فروریزش خرپای فضاکار را می‌توان با استفاده از عضو نرم جدید بهبود داد. اصغری و همکاران [۳۳] در سال ۲۰۲۳ به مقاوم سازی گنبد‌های کابلی ترکیبی در برابر خرابی پیش رونده پرداختند. بدین منظور در ابتدا با استفاده از تحلیل مسیر جایگزین دینامیکی و استاتیکی، خرابی پیش رونده سازه در نتیجه از بین رفتن ظرفیت باربری اعضا را مورد بررسی قرار داده و سپس با استفاده از ابزارهای محدودگر نیرو به مقاوم سازی گنبد‌های مورد بررسی پرداختند. نتایج تحلیل نشان دهنده تاثیر ابزار محدودگر نیرو در کاهش خرابی پیش رونده در گنبد‌های کابلی ترکیبی و مرسوم بوده است. عابدی و همکاران [۳۴] در سال ۲۰۲۴ خرابی پیش رونده در سازه‌های فضاکار دولایه

¹³ Tensegrity

متکی بر دیوارهای عمودی دولایه را با استفاده از روش مسیر جایگزین بررسی کردند. نتایج تحلیل نشان دهنده کارایی روش مسیر جایگزین در خرابی پیش رونده در این نوع سازه‌ها بود.

با توجه پیچیدگی هندسی سازه‌های فضاکار دولایه اکثر مطالعات لرزه‌ای در سازه‌های فضاکار مربوط به سقف‌های تک لایه بوده است، همچنین مطالعات انجام شده عمدتاً در مورد سقف‌های فضاکار بدون زیرسازه یا قرار گرفته روی ستون‌های فولادی یا بتنی بوده، لذا با توجه به مزایای متنوع استفاده از دیوارهای فضاکار به عنوان زیرسازه، در این مقاله به بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌های فضاکار گنبدی شکل دو لایه قرار گرفته روی دیوارهای فضاکار پرداخته شده است و اندرکنش لرزه‌ای دیوار فضاکار در رفتار لرزه‌ای سقف‌های فضاکار بررسی شده است. پس از بررسی تاثیر پارامترهای هندسی در رفتار خرابی این نوع سازه‌ها، با توجه به اهمیت رفتار کمانشی اعضای فشاری در مکانیزم خرابی و برای جلوگیری از افت ناگهانی مقاومت، اعضای بحرانی مستعد کمانش با ابزار محدودگر نیروی لوله ای جایگزین و تاثیر آن در رفتار خرابی بررسی شده است. نتایج این بررسی می‌تواند منجر به ارائه راهکارهای مناسب در طراحی لرزه ای از ابتدا و نیز بهسازی لرزه ای سازه‌های فضاکار گردد. در خصوص استخراج ضریب رفتار سازه‌های فضاکار متکی بر دیوارهای فضاکار دولایه نیز تاکنون مطالعه‌ای صورت نگرفته است.

۲- مدل‌های عددی

در این مطالعه تعدادی مدل با نسبت‌های مختلف ارتفاع دیوار به طول دهانه (H_1/S) و نسبت‌های مختلف ارتفاع گنبد به طول دهانه (H_2/S) در نظر گرفته شده است (شکل ۱-ب). سپس ظرفیت خرابی سازه‌ها از طریق تحلیل دینامیکی نمودی محاسبه شده است. علاوه بر آن پارامترهای پاسخ غیرخطی سازه‌ها تحلیل شده است. در مرحله بعد با استفاده از نتایج تحلیل دینامیکی نمودی، احتمال خرابی سازه‌ها با بکارگیری منحنی‌های شکنندگی ارزیابی شده است. سپس رفتار لرزه‌ای سازه‌های فضاکار با استفاده از ابزار محدودگر نیرو بررسی گردیده است. در نهایت ضریب رفتار هر یک از سازه‌ها در دو حالت با و بدون ابزار محدودگر نیرو مورد بررسی قرار گرفته است.

روند طراحی سازه‌های فضاکار مورد مطالعه تحت بارهای ضریب‌دار از قبیل بارهای مرده، برف، زلزله و اثرات دمایی می‌باشد. بارهای مرده و زنده اختصاص یافته به هر یک از سازه‌ها به ترتیب برابر ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع بوده است. این بارها به صورت بار متمرکز و براساس سطح بارگیر به هر گره اعمال گردیده است. بار برف به دو صورت متقارن و نامتقارن براساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان محاسبه گردیده و به سازه اعمال شده است. بار زلزله نیز براساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران ویرایش چهارم محاسبه شده است. پارامترهای زلزله محاسبه گردیده به شرح جدول ۱ می‌باشد:

جدول ۱- مشخصات پارامترهای زلزله

سایت پروژه	نوع خاک	شتاب مبنای طرح (A)	ضریب اهمیت (I)	ضریب رفتار (R)
تبریز	III	۰/۳۵	۱/۲	۳/۵

در تحلیل‌های سازه‌های مورد مطالعه، از ترکیب مربعات کامل برای ترکیب مودهای ارتعاشی سازه و جذر مجموع مربعات کامل برای ترکیب مودها در راستاهای مختلف استفاده شده است. در روند طراحی مدل‌ها، ترکیبات بارگذاری شامل بارهای لرزه‌ای، حرارتی، برف و مرده می‌باشد که براساس استاندارد *AISC-LRFD 360* [۳۵] در نظر گرفته است (جدول ۲). در طراحی اعضای سازه‌های فضاکار مورد مطالعه از مقطع لوله‌ای استفاده شده و لاغری اعضا بین ۱۰۰ الی ۱۲۰ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر می‌باشد طراحی به نحوی صورت گرفته است که نسبت تقاضا به ظرفیت کمتر از ۰/۹ باشد. در جدول ۳، سازه‌های فضاکار مورد بررسی براساس پارامترهای هندسی یعنی نسبت‌های مختلف ارتفاع دیوار به طول دهانه و نیز ارتفاع گنبد به طول دهانه دسته بندی شده است. با توجه به جدول ۳، دو گروه سازه فضاکار در نظر گرفته شده است: گروه ۱ شامل نسبت ارتفاع دیوار فضاکار به طول دهانه متغیر با نسبت ارتفاع گنبد به طول دهانه ثابت و گروه ۲ شامل نسبت ارتفاع دیوار فضاکار به طول دهانه ثابت با نسبت ارتفاع گنبد به طول دهانه متغیر. در ضمن مشخصات هندسی مقاطع دایره‌ای استفاده شده در مدل‌های مورد مطالعه، در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۲- ترکیبات بارگذاری برای طراحی سازه‌های فضاکار مورد مطالعه [۳۶]

$1.4Dead$	$1.2Dead+1.6Snow+0.7Wind$
$1.2Dead+0.5Snow$	$1.2Dead+1.4Wind+0.5Snow$
$1.2Dead+0.2Snow\pm Spect_X\pm 0.3 (Spect_Y + Spect_Z)$	$1.2Dead+0.2Snow\pm Spect_Y\pm 0.3 (Spect_X + Spect_Z)$
$1.2Dead+0.2Snow\pm Spect_Z\pm 0.3 (Spect_X + Spect_Y)$	$0.9Dead\pm Spect_X\pm 0.3 (Spect_Y + Spect_Z)$
$0.9Dead\pm Spect_Y\pm 0.3(Spect_X + Spect_Z)$	$0.9Dead\pm Spect_Z\pm 0.3(Spect_X + Spect_Y)$
$0.9Dead+1(1.4Wind)$	$1.2Dead+0.5Snow+1.2Temperature$
$1.2Dead+1.6Snow+1.0Temperature$	-

جدول ۳- مشخصات هندسی سازه های فضاکار مورد مطالعه

گروه	شماره مدل	H_1/S	H_2/S	T(m)
۱	۱	۰	۰/۵	۱/۵
	۲	۰/۱		
	۳	۰/۲		
	۴	۰/۳		
	۵	۰/۴		
	۶	۰/۵		
۲	۷	۰	۰/۵	۱/۵
	۸	۰/۱		
	۹	۰/۲		
	۱۰	۰/۳		
	۱۱	۰/۴		
	۱۲	۰/۵		

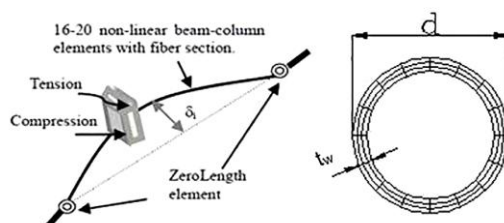
H_1 (ارتفاع دیوار فضاکار)، H_2 (ارتفاع گنبد فضاکار)، S (طول دهانه)، T (ضخامت گنبد فضاکار)

جدول ۴- خصوصیات اعضای سازه‌ها

مقطع	قطر (mm)	سطح مقطع (mm^2)	ضخامت (mm)
S1	۴۲/۴	۳/۲۵	۲/۶
S2	۴۸/۳	۵/۵۶	۴
S3	۶۰/۳	۹/۳۱	۵/۴
S4	۷۶/۱	۱۰/۱۲	۴/۵
S5	۸۸/۹	۱۵/۳۸	۵/۹

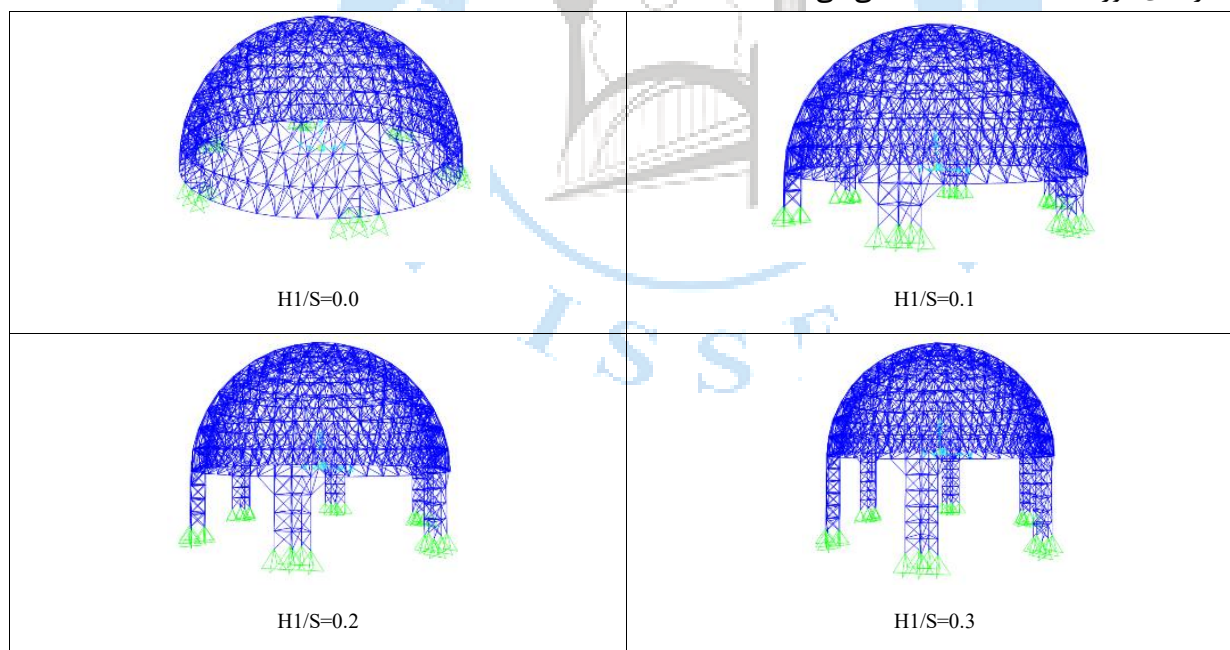
در این مطالعه، مدل‌های عددی با استفاده از نرم افزار OpenSees ساخته و تحلیل شده اند [۳۷]. در سازه‌های مورد مطالعه، اعضای سازه‌ها تحت بارهای لرزه‌ای قرار گرفته و می‌توانند کمانش، تسلیم شدگی و گسیختگی را در طول زلزله تجربه کنند. بنابراین مدل‌سازی دقیق پاسخ‌های هیستریزیس اعضا تحت بارگذاری چرخه‌ای ضروری می‌باشد. بدین منظور، از روش مبتنی بر فایبر برای تعیین

رفتار چرخه‌ای اعضای سازه‌های فضاکار استفاده شده است. از روش انتگرال گیری عددی گاوس-لوباتو^{۱۴} برای توزیع رفتار غیرخطی در سراسر عضو استفاده شده است. برای مدلسازی اعضای سازه‌های فضاکار از المان تیر-ستون غیرخطی در نرم افزار OpenSees استفاده شده است. برای تعیین رفتار هیستریزیس عضو سازه فضاکار هر عضو به دو المان تقسیم شده و ناکاملی به اندازه $0/001$ طول عضو در وسط المان اعمال شده است (شکل ۲).



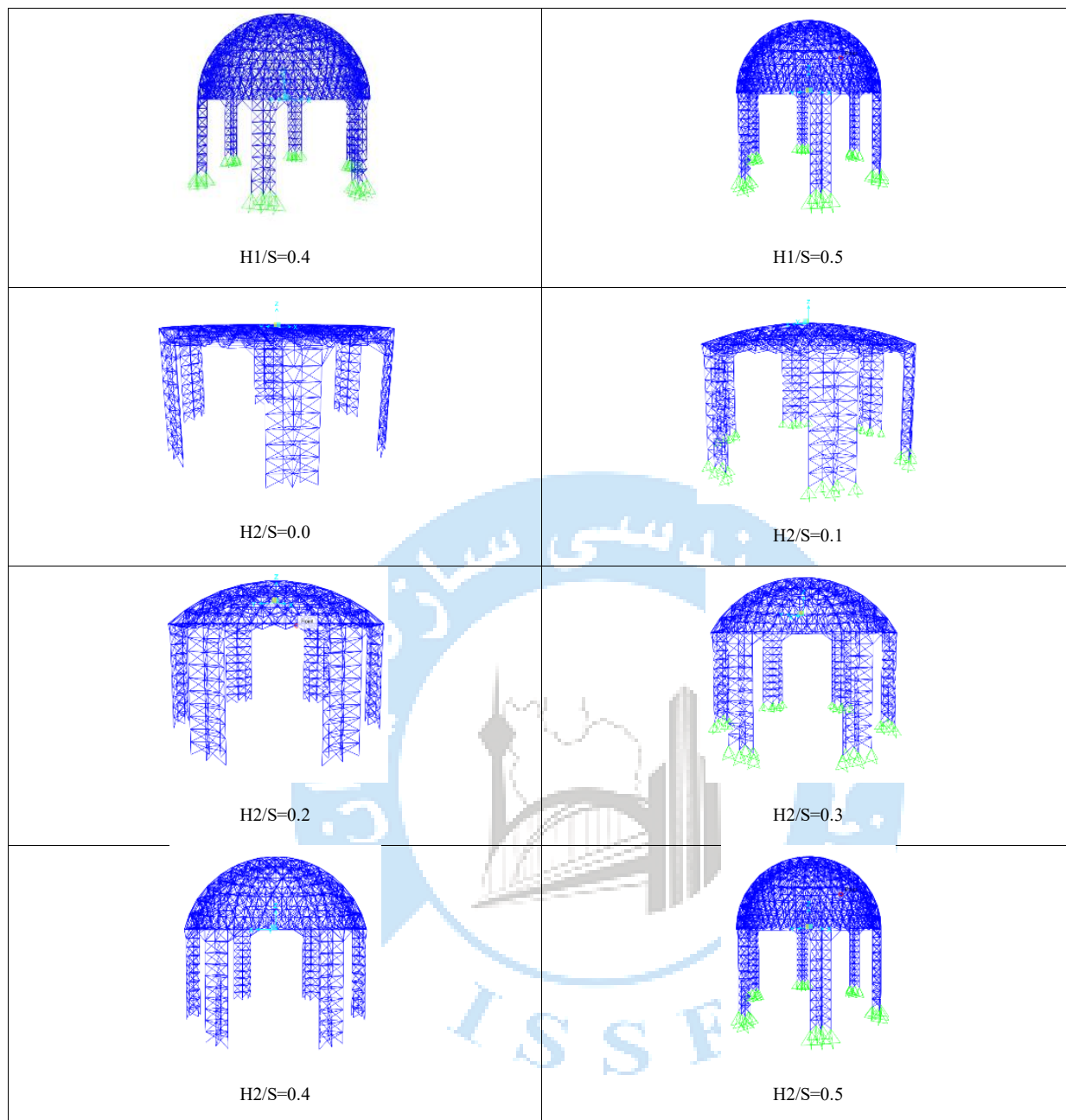
شکل ۲- تقسیم‌بندی و اعمال ناکاملی اولیه به عضو سازه فضاکار [۳۸]

این ناکاملی برای اعمال کمانش عضو تحت بارهای فشاری می‌باشد. مقطع عضو به ۳ لایه شعاعی و ۱۶ مقطع در راستای طولی تقسیم‌بندی شده است. روابط تنش-کرنش مصالح فولادی با استفاده از مدل مصالح تک محوری *Steel02* [۳۹] که در نرم افزار OpenSees موجود بوده و براساس مدل منگوتو-پینتو^{۱۵} می‌باشد، تعریف شده است. برای تعریف رفتار پس از تسلیم مصالح فولادی از سخت شدگی کینماتیک ۳ درصد استفاده شده است. در اتصالات عضو سازه‌های فضاکار از المان‌های با طول صفر برای شبیه سازی اتصال مفصلی استفاده شده است. بدین منظور درجات آزادی دورانی آزاد و درجات آزادی انتقالی بسته شده است، لذا با این راهکار اتصال مفصلی در اعضای سازه-های فضاکار دولایه ایجاد گردیده است. مدل‌های انجام شده در نرم افزار OpenSees در شکل ۳ نشان داده شده است. لازم به ذکر می‌باشد شرایط مرزی سازه‌های مورد مطالعه تکیه گاه مفصلی می‌باشد.



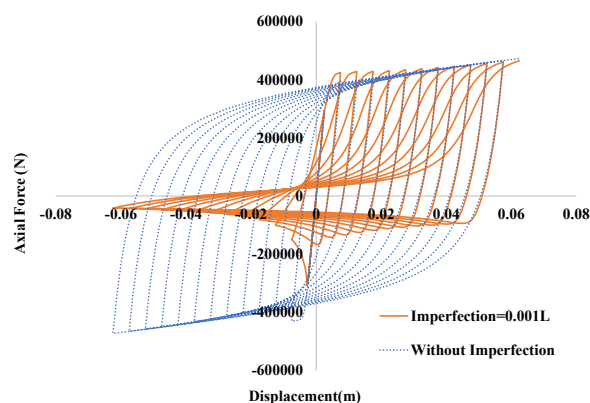
¹⁴ Gauss-Lobatto

¹⁵ Menegotto-Pinto



شکل ۳- مدل‌های شبیه‌سازی شده در نرم افزار OpenSees

شکل ۴ پاسخ جابجایی محوری- بار محوری عضو با نسبت لاغری برابر ۸۵ را در دو حالت با و بدون اعمال ناکاملی نشان داده شده است.



۳

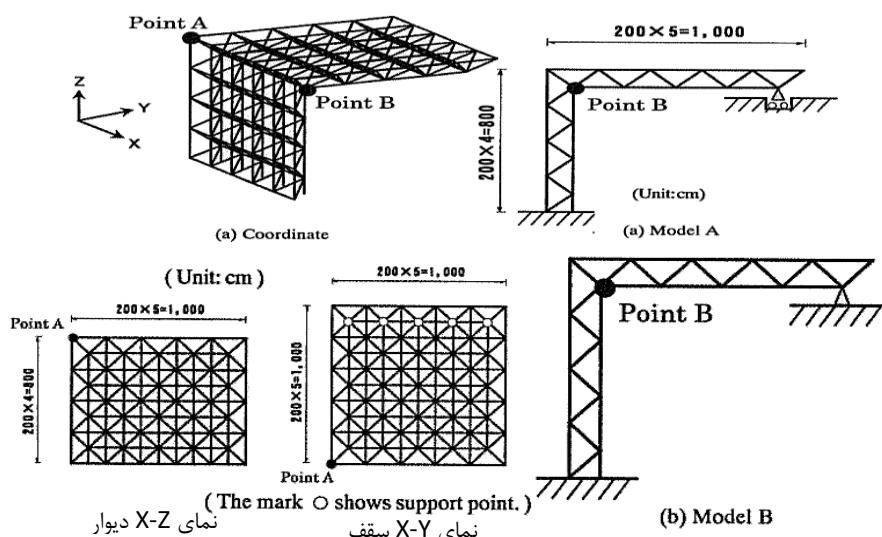
شکل ۴- جابجایی محوری - بار محوری عضو سازه فضاکار

۳- صحت سنجی مدل

در این بخش به صحت سنجی روش مدل‌سازی بکار گرفته شده در نرم افزار OpenSees پرداخته می‌شود. بدین منظور از کار عددی انجام شده توسط ایشیکاوا [۴۰] استفاده گردیده است که به شرح زیر می‌باشد:

ایشیکاوا^{۱۶} و همکاران [۴۰] در سال ۲۰۰۱ رفتار لرزه‌ای سازه‌های فضاکار دولایه متکی بر دیوارهای عمودی دولایه را مورد مطالعه قرار داده و روشی را برای ارزیابی فروریزش دینامیکی سقف مشبک دولایه آلومینیومی متکی بر دیوارهای دولایه ارائه دادند. بدین منظور دو مدل A و B مطابق شکل ۵ انتخاب و مورد تحلیل قرار گرفت. مشخصات هندسی مدل‌های مورد بررسی به شرح ذیل می‌باشد:

- ۱- ارتفاع، طول و ضخامت دیوار برابر ۸، ۱۰ و ۱ متر می‌باشد؛
- ۲- پلان سازه مورد بررسی، مربع ۱۰×۱۰ متر و به ضخامت ۱ متر می‌باشد؛
- ۳- در مدل‌های A و B از ۵ تکیه‌گاه در سقف سازه به عنوان شرایط مرزی استفاده گردیده است که در مدل A ، تکیه‌گاه‌ها در تمامی جهات به جز جهت X و در مدل B تمامی جهات مقید گردیده‌اند.



شکل ۵- نما و شرایط مرزی مدل‌های مورد بررسی [۴۰]

مقطع اعضای سقف و دیوار سازه فضاکار، لوله‌ای شکل می‌باشد که مشخصات آن در جدول ۵ نشان داده شده است. در مدل‌سازی اعضا فرض گردیده است که اتصالات اعضای سازه فضاکار بصورت مفصلی می‌باشد. تنش تسلیم و مدول الاستیسته اعضا به ترتیب برابر با 210 MPa و 70 GPa در نظر گرفته شده است.

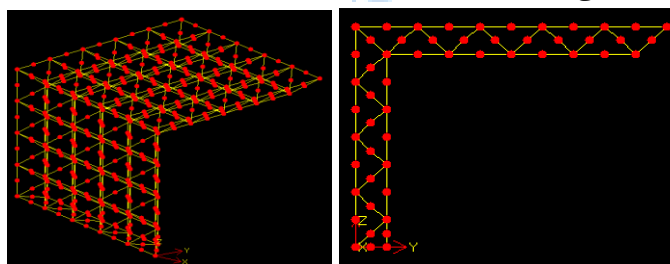
جدول ۵- مشخصات اعضای سازه فضاکار [۴۰]

عضو	ابعاد میله (mm)	A (cm ²)	i (cm)	L (cm)	λ	$\frac{\lambda}{\lambda}$
اعضای فوقانی و تحتانی سقف	۱۰/۱۱۴×۱۶/۳	۳۳/۲	۳/۷	۲۰۰	۵۴	۰/۷
اعضای جان سقف	۷/۶۳×۶۲/۵	۳۳/۴	۲	۱۷۳/۲	۸۷	۱/۱
اعضای جان دیوار	۵/۶۳×۸/۵	۹/۳	۲/۱	۱۷۳/۲	۸۴	۱

A (سطح مقطع اعضا)، i (شعاع ژیراسیون)، L (طول اعضا)، λ (نسبت لاغری اعضا)، λ/λ (نسبت لاغری اعضا).

۳-۱- روش پیشنهادی برای مدل‌سازی سازه‌های فضاکار دولایه

جهت مدل‌سازی سازه‌های فضاکار و بررسی رفتار لرزه‌ای آنها از نرم افزار OpenSees [۳۹] استفاده شده است. بعد از ترسیم تاشه هر یک از سازه‌های مورد مطالعه در نرم افزار Formian، مدل‌ها به نرم افزار SAP2000 انتقال یافته و پس از تحلیل و طراحی اعضا، مختصات هر یک از گره‌ها و المان‌ها به نرم افزار OpenSees [۳۹] انتقال داده شده است. به منظور تحلیل سازه‌های فضاکار، مدل‌سازی رابطه بار- تغییرمکان محوری اعضای سازه‌های فضاکار ضروری می‌باشد. بنابراین رفتار پس بحرانی اعضای سازه با توجه به شکل و ابعاد مقطع می‌بایستی تعیین گردد. برای مدل‌سازی اعضای سازه فضاکار در نرم افزار OpenSees از مقطع فایبر^{۱۷} و عنصر تیر - ستون غیرخطی استفاده گردیده است. در این روش مدل‌سازی، جهت در نظر گرفتن اثرات رفتار پس کمانشی، ناکاملی هندسی به اندازه $0/001$ طول عضو در میانه هر عضو در نظر گرفته می‌شود. بدین منظور هر المان به دو قسمت تقسیم شده و مختصات گره وسطی هر المان به اندازه $0/001$ طول المان در فضای سه بعدی تغییر داده شده است. با این راهکار اثرات ناکاملی هندسی در اعضای سازه‌های فضاکار اعمال شده است. با توجه به آنکه اعضای سازه فضاکار به صورت اعضایی با انتهای مفصلی می‌باشد، لذا جهت آزادسازی لنگر در دو انتهای اعضای تیری، از عنصر با طول صفر^{۱۸} استفاده شده است. از آنجایی که هر گره دارای شش درجه آزادی در فضای سه بعدی می‌باشد، لذا ۳ درجه آزادی دورانی آزاد گردیده و بدین صورت اعضای سازه‌های فضاکار دو سر مفصل شده‌اند. نمونه‌ای از روش مدل‌سازی در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به آنکه تمامی مراحل مذکور می‌بایستی قبل از انتقال تاشه فضاکار از نرم افزار SAP2000 به نرم افزار OpenSees صورت گیرد، لذا از بستر نرم افزاری Matlab استفاده شده است. لازم به ذکر می‌باشد با استفاده از این روش مدل‌سازی اثرات زوال در طی سیکل‌های بارگذاری به ویژه تحت بارهای لرزه‌ای در نظر گرفته می‌شوند.



¹⁷ Fiber section

¹⁸ ZeroLength

شکل ۶- نمونه ای از مدل سازی سازه فضاکار در نرم افزار OpenSees

۳-۲- دوره تناوب و مودهای ارتعاشی سازه فضاکار

قبل از انجام تحلیل های غیرخطی و صحت سنجی روش بکار گرفته شده جهت مدل سازی سازه فضاکار، مقایسه ای بین نتایج تحلیل مقادیر ویژه با استفاده از نرم افزار OpenSees و تحقیق انجام شده صورت گرفته است. مشخصات دینامیکی (دوره تناوب و مودهای ارتعاشی) سازه مورد مطالعه در جدول ۶ نشان داده شده است که به منظور اطمینان از صحت مدل سازی با نرم افزارهای ABAQUS 16.0.0 [۴۱] و SAP2000.V.16.0.0 نیز مقایسه گردیده است.

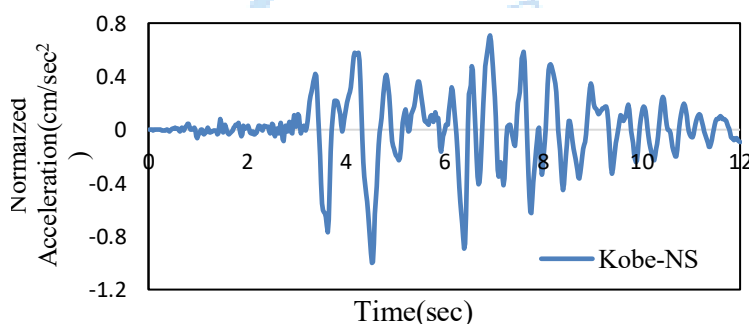
جدول ۶- دوره تناوب طبیعی مدل های A و B

مدل A							
شماره مود	مطالعه Ishikawa و همکاران [۴۰]	SAP2000	درصد خطا	ABAQUS	درصد خطا	OpenSees	درصد خطا
۱	۰/۳۰۱	۰/۳۱۱	۳/۳۲	۰/۳۰۷	۱/۹۹	۰/۳۰۸	۲/۳۲
۲	۰/۱۱۲	۰/۱۲۶	۱۲/۵	۰/۱۲۲	۸/۹۲	۰/۱۲۵	۱۱/۶
۳	۰/۱۰۶	۰/۱۰۹	۲/۸۳	۰/۱۰۶	۰	۰/۱۰۸	۱/۸۹

مدل B							
شماره مود	مطالعه Ishikawa و همکاران [۴۰]	SAP2000	درصد خطا	ABAQUS	درصد خطا	OpenSees	درصد خطا
۱	۰/۱۳	۰/۱۵	۱۵/۳	۰/۱۴۷	۱۳/۱	۰/۱۴۸	۱۳/۸
۲	۰/۱۰۸	۰/۱۰۹	۰/۹۲۵	۰/۱۰۶	-۱/۸۵	۰/۱۰۸	۰
۳	۰/۱۰۶	۰/۱۰۸	۱/۸۸	۰/۱۰۴	-۱/۸۸	۰/۱۰۷	۰/۹۴

۳-۳- تحلیل دینامیکی غیرخطی مدل های A و B

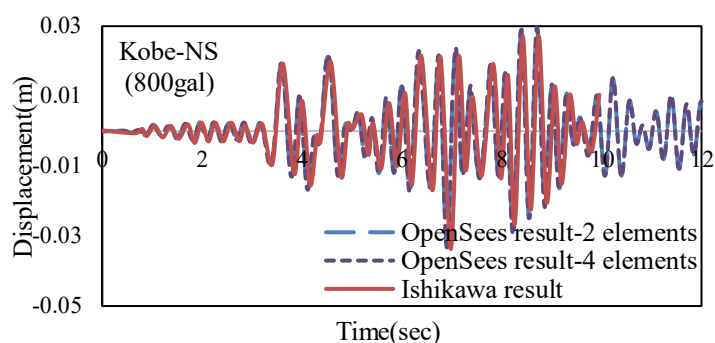
برای بررسی رفتار لرزه ای مدل های A و B از تحلیل دینامیکی غیرخطی استفاده گردیده است. رکورد مورد استفاده جهت انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی، مولفه افقی زلزله کوبه (Kobe-NS)، ثبت شده در آژانس زلزله شناسی ژاپن در سال ۱۹۹۵ می باشد. از روش نیومارک بتا^{۱۹} جهت انتگرال گیری عددی استفاده گردیده است. با توجه به آنکه به ازای β برابر ۰/۲۵ تحلیل پایدار غیر مشروط بوده و در بیشتر تحلیل های غیرخطی استفاده می گردد، لذا β برابر ۰/۲۵ در نظر گرفته شده است. همچنین میرایی رایلی برای مود اول و دوم، ۰/۰۲ در نظر گرفته شده است. در شکل ۷، رکورد زلزله مقیاس شده به PGA نشان داده شده است.



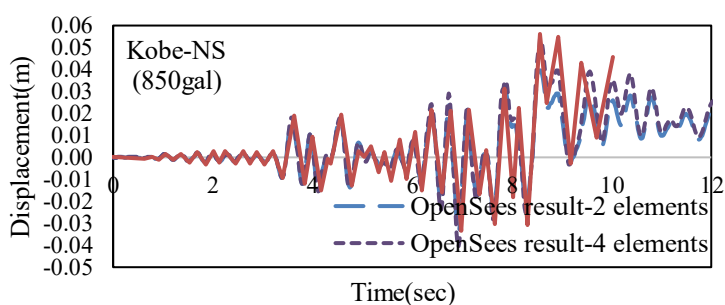
شکل ۷- رکورد زلزله مقیاس شده Kobe [۴۰].

هریک از مدل های A و B بر اساس روش توضیح داده شده مدل سازی شده و تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار گرفته است که در شکل ۸ تا ۱۱ نتایج مقایسه نشان داده شده است. لازم به ذکر می باشد که هر یک از مدل ها در دو حالت دو عنصری و چهار عنصری مدل سازی شده است. مقایسه نتایج بدست آمده تطابق خوبی بین نتایج کار ایشیکاوا و همکاران و مدل سازی غیرخطی انجام شده توسط نرم افزار OpenSees را نشان می دهد.

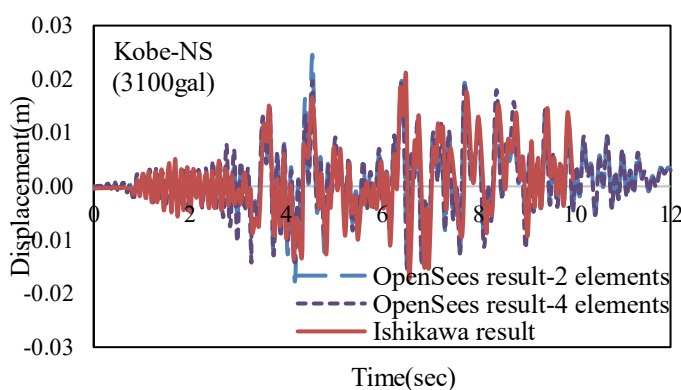
¹⁹ Newmark β



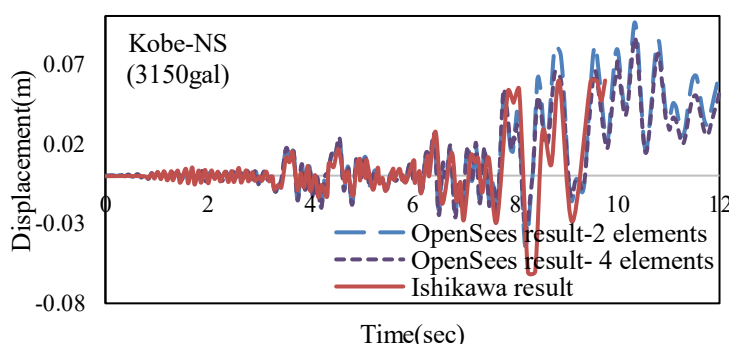
شکل ۸- نمودار تاریخچه تغییر مکان سازه در نقطه A تحت زلزله Kobe برای مدل A



شکل ۹- نمودار تاریخچه تغییر مکان سازه در نقطه A تحت زلزله Kobe برای مدل A



شکل ۱۰- نمودار تاریخچه تغییر مکان سازه در نقطه A تحت زلزله Kobe برای مدل B



شکل ۱۱- نمودار تاریخچه تغییر مکان سازه در نقطه A تحت زلزله Kobe برای مدل B

با توجه به صحت سنجی‌های صورت گرفته، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدل‌سازی با استفاده از دو عنصر تیر-ستون غیرخطی با ناکاملی اولیه برابر $0/001$ طول عضو قادر به نشان دادن کمانش دینامیکی و رفتار پس‌کمانشی سازه مورد مطالعه می‌باشد. مدل‌سازی با

استفاده از چهار عنصر نیز نشان می‌دهد که نتایج در مقایسه با دو عنصر به طور جزئی بهبود می‌یابد. با توجه به آنکه استفاده از چهار عنصر برای هر عضو سازه فضاکار به دلیل وجود تعداد زیاد اعضای سازه فضاکار زمانبر می‌باشد، لذا از مدل دو عنصر برای مدل‌سازی سازه‌های فضاکار استفاده خواهد شد.

۴- ارزیابی لرزه‌ای

۴-۱- تحلیل دینامیکی نموی

تحلیل دینامیکی نموی [۴۲] روشی جامع در طراحی لرزه‌ای مبتنی بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها می‌باشد. در این تحلیل، سازه تحت تاثیر یک سری از تحلیل‌های تاریخچه زمانی قرار می‌گیرد که شدت این تاریخچه زمانی‌ها به تدریج افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، در این روش مقدار شتاب بیشینه به صورت افزایشی از یک مقدار بسیار کم که در طی آن پاسخ سازه ارتجاعی است مقیاس شده و به تدریج افزایش می‌یابد تا به نقطه حالت حدی هدف پس از تسلیم برسد.

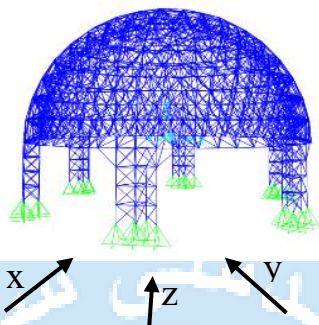
در انجام تحلیل‌های دینامیکی نموی سازه‌های فضاکار مورد مطالعه، شتاب طیفی سازه در پرپود اول به عنوان شاخص شدت (IM) در نظر گرفته شده است. پارامترهای مختلفی مانند بیشینه شتاب زمین (PGA) را می‌توان به عنوان شاخص شدت در نظر گرفت ولی به دلیل پراکندگی زیاد منحنی‌های IDA مورد استفاده قرار نگرفته است [۴۲]. پارامتر دیگری که در رسم منحنی‌های IDA می‌بایست در نظر گرفت شاخص خسارت (DM) می‌باشد که در سازه‌های فضاکار مورد مطالعه، حداکثر تغییرمکان گرهی به عنوان شاخص خسارت در نظر گرفته شده است. در انجام تحلیل‌های غیرخطی دینامیکی از ۱۶ رکورد زلزله مطابق با جدول ۷ استفاده شده است.

جدول ۷- جزئیات رکوردهای زلزله [۴۳]

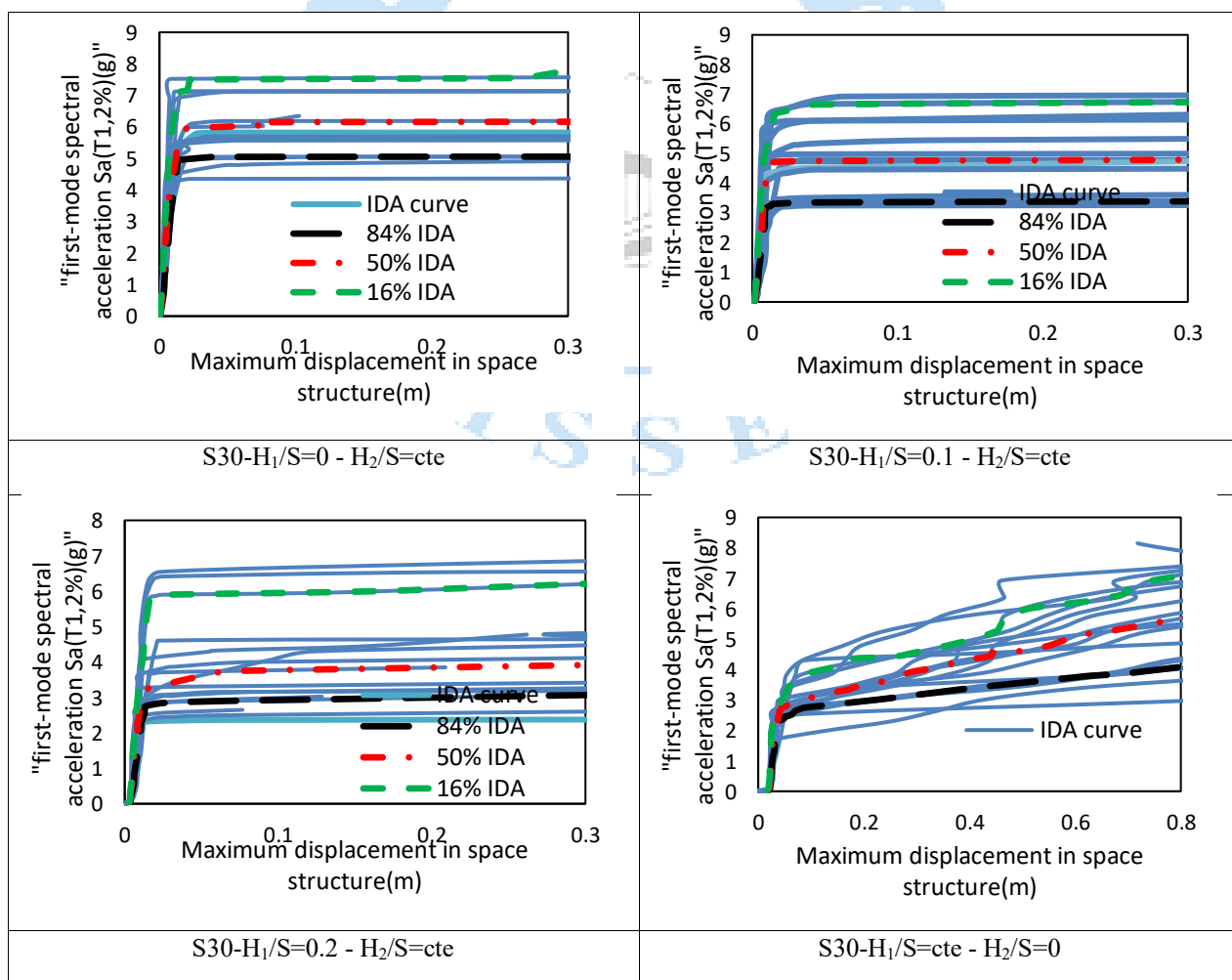
Record No.	Record Specifications				
	RSN	Horizontal Components		Vertical Component	PGA (g)
		Component 1	Component 2	Component 3	
1	953	NORTHR/MUL009	NORTHR/MUL279	NORTHR/MUL_UP	0.52
2	960	NORTHR/LOS000	NORTHR/LOS270	NORTHR/LOS_UP	0.48
3	1602	DUZCE/BOL000	DUZCE/BOL090	DUZCE/BOL_UP	0.82
4	169	IMPVALL/H-DLT262	IMPVALL/H-DLT352	IMPVALL/H-DLT_UP	0.35
5	174	IMPVALL/H-E11140	IMPVALL/H-E11230	IMPVALL/H-E11_UP	0.38
6	1116	KOBE/SHI000	KOBE/SHI090	KOBE/SHI_UP	0.24
7	1158	KOCAELI/DZC180	KOCAELI/DZC270	KOCAELI/DZC_UP	0.36
8	900	LANDERS/YER270	LANDERS/YER360	LANDERS/YER_UP	0.24
9	848	LANDERS/CLW-LN	LANDERS/CLW-TR	LANDERS/CLW-UP	0.28
10	752	LOMAP/CAP000	LOMAP/CAP090	LOMAP/CAP_UP	0.53
11	767	LOMAP/G03000	LOMAP/G03090	LOMAP/G_UP	0.56
12	721	SUPERST/B-ICC000	SUPERST/B-ICC090	SUPERST/B-ICC_UP	0.36
13	725	SUPERST/B-POE270	SUPERST/B-POE360	SUPERST/B-POE_UP	0.45
14	829	CAPEMEND/RIO270	CAPEMEND/RIO360	CAPEMEND/RIO_UP	0.55
15	1244	CHICHI/CHY101-E	CHICHI/CHY101-N	CHICHI/CHY101-UP	0.44
16	68	SFERN/PEL090	SFERN/PEL180	SFERN/PEL_UP	0.21

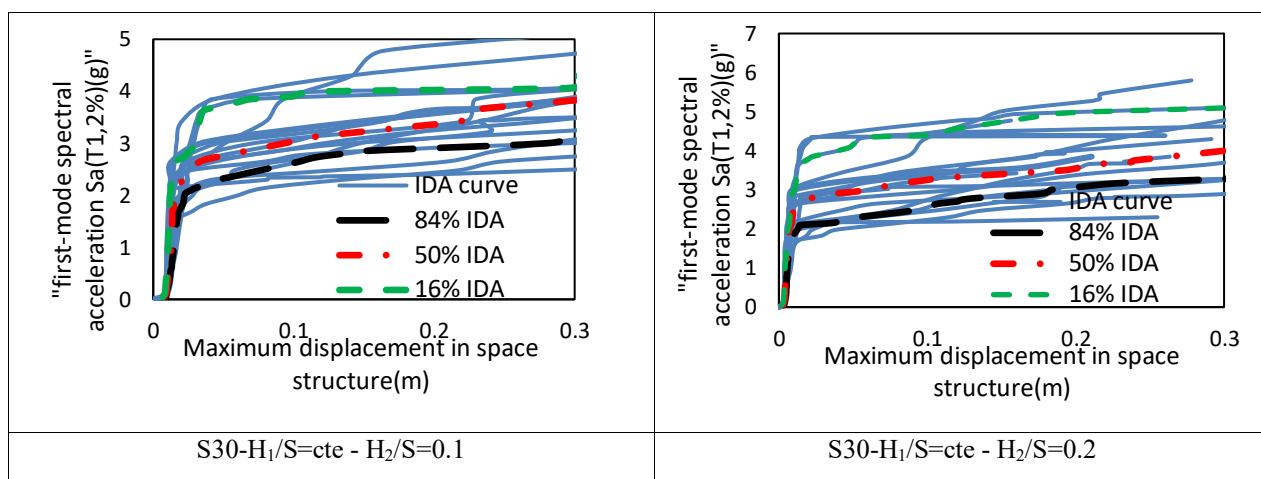
تحلیل دینامیکی غیرخطی نموی، می‌بایست با اعمال ضرایب مقیاس مناسب و افزایش نموی ضرایب تا رسیدن سازه به مرحله فروریزش، ادامه داشته باشد. در این مقاله برای انجام تحلیل‌های دینامیکی نموی از روش $Hunt \& Fill$ استفاده گردیده است. همچنین فروریزش را می‌توان به این صورت تعریف نمود که افزایش اندک در ضریب مقیاس منجر به افزایش قابل توجه تغییرمکان در سازه گردد و یا به عبارتی دیگر منحنی متمایل به افق شود. شاخص دیگر که نشان دهنده فروریزش در سازه می‌باشد، عدم همگرایی در تحلیل می‌باشد که باعث قطع ادامه تحلیل در ضرایب مقیاس بالاتر می‌گردد. همچنین با توجه به وجود دو معیار دررفت ۱۰٪ و شیب برابر ۲۰٪ شیب ناحیه ارتجاعی برای تعیین نقطه آستانه فروریزش (CP)، در سازه‌های فضاکار مورد مطالعه از معیار دوم استفاده شده است. نتایج تحلیل دینامیکی نموی به دو صورت ارائه خواهد گردید. نوع اول که عبارت است از منحنی‌های اصلی که شامل مجموعه منحنی‌های حاصل از تحلیل‌های دینامیکی نموی برای هر رکورد انتخاب شده می‌باشد و نوع دوم عبارتست از خلاصه منحنی‌های IDA که به صورت صدک‌های ۱۶٪، ۵۰٪ و

۸۴٪ می‌باشد که صدک ۵۰٪ معادل با میانه داده‌ها است و برای ارزیابی هر سازه فضاکار مورد مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۱۳). نکته‌ای که در روند انجام تحلیل‌های دینامیکی نموی سازه‌های فضاکار مورد مطالعه باید در نظر گرفته شود در نظر گرفتن اثرات همزمانی مولفه‌های زلزله مطابق بند ۶-۴-۵ دستور العمل FEMA-P695 [۴۳] می‌باشد. بر اساس این دستورالعمل در صورتی که سازه‌ها به صورت سه بعدی باشند تمامی تحلیل‌های دینامیکی نموی می‌بایست به صورت همزمان انجام گیرد. برخلاف سازه‌های متداول، در سازه‌های فضاکار علاوه بر دو مولفه افقی زلزله، مولفه قائم زلزله نیز تاثیر زیادی در رفتار لرزه‌ای این نوع سازه‌ها دارد. لذا در تمامی سازه‌های مورد بررسی، تحلیل‌های دینامیکی نموی با در نظر گرفتن اثرات همزمانی هر سه مولفه زلزله انجام می‌گیرد. در شکل ۱۲ راستاهای مولفه‌های زلزله نشان داده شده است که جهات x و y مربوطه به مولفه‌های افقی زلزله و جهت z مربوط به مولفه قائم زلزله می‌باشد.



شکل ۱۲- مولفه‌های زلزله وارده به سازه‌های مورد مطالعه





شکل ۱۳- منحنی های تحلیل دینامیکی نموی سازه های مورد مطالعه

با توجه به نتایج تحلیل های دینامیکی نموی مشاهده می گردد که در سازه های فضاکار مورد مطالعه، زیرسازه نقشی مهم در پایداری لرزه ای سازه ها دارد به طوری که در مدل سازه فضاکار با نسبت $\frac{H_1}{S} = 0$ و $\frac{H_2}{S} = cte$ شتاب فروریزش برای صدک ۵۰٪ تقریباً برابر با ۶g می باشد. در صورتی که با افزایش ارتفاع زیرسازه شتاب فروریزش سازه به طور قابل توجهی کاهش می یابد که این امر حاکی از اهمیت زیرسازه در پایداری لرزه ای سازه های مورد مطالعه می باشد. همچنین نتایج نشان می دهد که با افزایش شتاب زلزله میزان جابجایی در ابتدا به صورت خطی تغییر پیدا کرده و بعد از رسیدن به شتاب فروریزش به صورت ناگهانی جابجایی افزایش می یابد که نشان دهنده رفتار ترد این نوع از سازه ها به دلیل کمانش ناگهانی اعضا است.

۲-۴- منحنی های شکنندگی

منحنی های شکنندگی^{۲۰} احتمال فروریزش سازه ها در اثر زلزله را به صورت تابعی از شاخص حرکت زمین بیان می کنند. منحنی های شکنندگی را می توان برحسب شتاب طیفی، جابجایی طیفی و حداکثر شتاب زمین بیان نمود. برای بیان منحنی های شکنندگی از دو نوع توزیع آماری متداول یعنی توزیع های نرمال و لوگ نرمال^{۲۱} استفاده می شود که در ادامه به شرح هر یک از توزیع های آماری پرداخته می شود.

۲-۴-۱- توزیع نرمال

توزیع متداولی که برای تمامی داده ها می تواند اعمال شود، توزیع نرمال می باشد. در این توزیع مقادیر x بین $-\infty$ و $+\infty$ بوده و تابع چگالی احتمالی^{۲۲} بر اساس رابطه ۱ تعیین می گردد:

$$f_x(X) = N(\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]} \quad (1)$$

که در آن $N(\mu, \sigma)$ توزیع نرمال، μ میانگین و σ انحراف معیار داده ها می باشد.

۲-۴-۲- توزیع لوگ نرمال

²⁰ Fragility curves

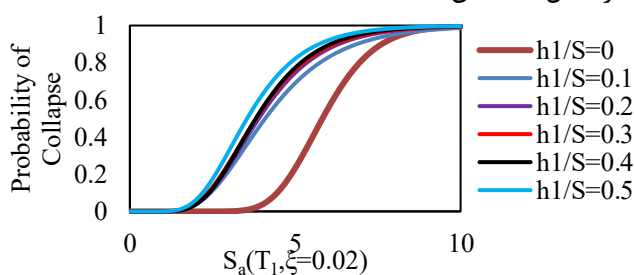
²¹ Log-normal

²² Probability Density Functions (PDF)

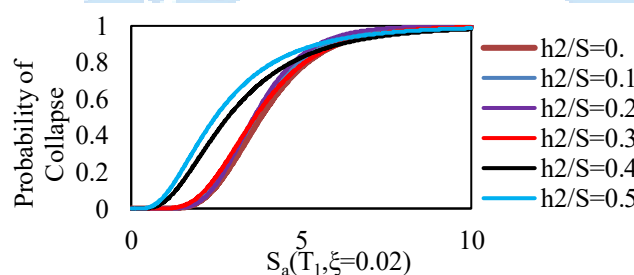
تابع توزیع دیگر، توزیع لوگ نرمال است که از توزیع نرمال متفاوت بوده و در آن مقادیر x بین 0 و $+\infty$ قرار دارند. تابع چگالی احتمالی این توزیع مطابق رابطه ۲ می‌باشد:

$$f_x(X) = N(\lambda, \xi) = \frac{1}{\xi \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x) - \lambda}{\xi} \right)^2} \quad (2)$$

که در آن $N(\lambda, \xi)$ توزیع نرمال، λ میانگین و ξ انحراف معیار داده‌ها می‌باشد. در این مقاله از تابع توزیع لوگ نرمال با توجه به مطالعات قبلی انجام شده، برای استخراج منحنی‌های شکنندگی استفاده شده است. همچنین از شتاب طیفی به عنوان شاخص شدت حرکت زمین برای تعیین منحنی‌های شکنندگی استفاده شده است. منحنی‌های شکنندگی برای سازه‌های فضاکار مورد مطالعه در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



الف) نسبت ارتفاع دیوار به طول دهانه.



ب) نسبت ارتفاع گنبد به طول دهانه.

شکل ۱۴- منحنی‌های شکنندگی برای مدل‌های سازه‌های فضاکار مورد مطالعه

نتایج تحلیل برای گروه اول سازه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش نسبت ارتفاع دیوار به طول دهانه، شتاب فروریزش کاهش می‌یابد به گونه‌ای که بیشترین شتاب فروریزش سازه مربوط به مدل با نسبت $H_1/S=0$ می‌باشد که علت آن را می‌توان به دلیل عدم وجود زیرسازه دانست که منجر گردیده است تا سیستم سازه‌ای مذکور رفتار لرزه‌ای مناسبی را از خود نشان بدهد. علاوه بر آن، نتایج نشان می‌دهد وقتی که نسبت $H_1/S > 0$ می‌باشد، با افزایش ارتفاع دیوار شتاب فروریزش سازه به طور قابل توجه کاهش می‌یابد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که زیرسازه تاثیر قابل توجهی در پایداری لرزه‌ای سازه‌های فضاکار دارد. همچنین با توجه به نتایج مشاهده می‌گردد که برای نسبت‌های مختلف ارتفاع به طول دهانه بین $0/1$ الی $0/5$ نرخ کاهش شتاب ناچیز بوده و با افزایش ارتفاع زیر سازه شتاب فروریزش کاهش می‌یابد.

نتایج تحلیل برای گروه دوم سازه‌های مورد مطالعه نیز حاکی از آن است که با افزایش نسبت ارتفاع گنبد به طول دهانه، نرخ کاهش شتاب فروریزش سازه تا نسبت برابر $0/3$ ثابت بوده و برای نسبت‌های بیشتر از $0/3$ قابل توجه می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج تحلیل مشاهده می‌گردد که در حالتی که سقف تخت می‌باشد ($H_2/S=0$) فروریزش سازه در شتاب کمتری نسبت به گروه اول رخ داده است که این امر نیز اهمیت قابل توجه زیرسازه را نشان می‌دهد.

۵- بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فضاکار با استفاده از ابزار محدودگر نیرو

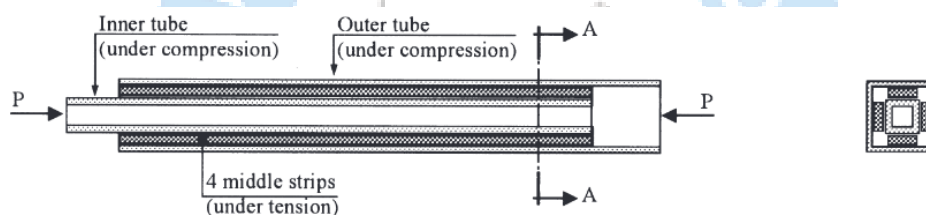
ابزار محدودگر نیرو یکی از روش‌های افزایش شکل پذیری بوده که در سازه‌های فضاکار مطرح شده است. با استفاده از این ابزار در اعضای فشاری، شکل پذیری مصنوعی به پاسخ بار-تغییر مکان سازه فضاکار تحمیل می‌گردد. با توجه به اینکه بسیاری از خصوصیات ابزارهای محدودگر نیرو با جذب کننده‌های انرژی یکسان است، لذا پیشرفت‌هایی در حوزه جذب کننده‌های انرژی و ارائه نوع جدیدی از ابزار محدودگر نیرو توسط محققین مختلف ارائه گردیده است. ابزار محدودگر نیرو باید دارای مشخصات زیر باشد:

(الف) نیروی حدی ثابتی را تامین کند و ناحیه پلاستیک دارای طول کافی باشد طوری که در سازه باز توزیع نیروهای اعضا رخ دهد؛

(ب) به حداقل عملیات نگهداری نیاز داشته و بتواند در طولانی مدت به طور مداوم عمل کند؛

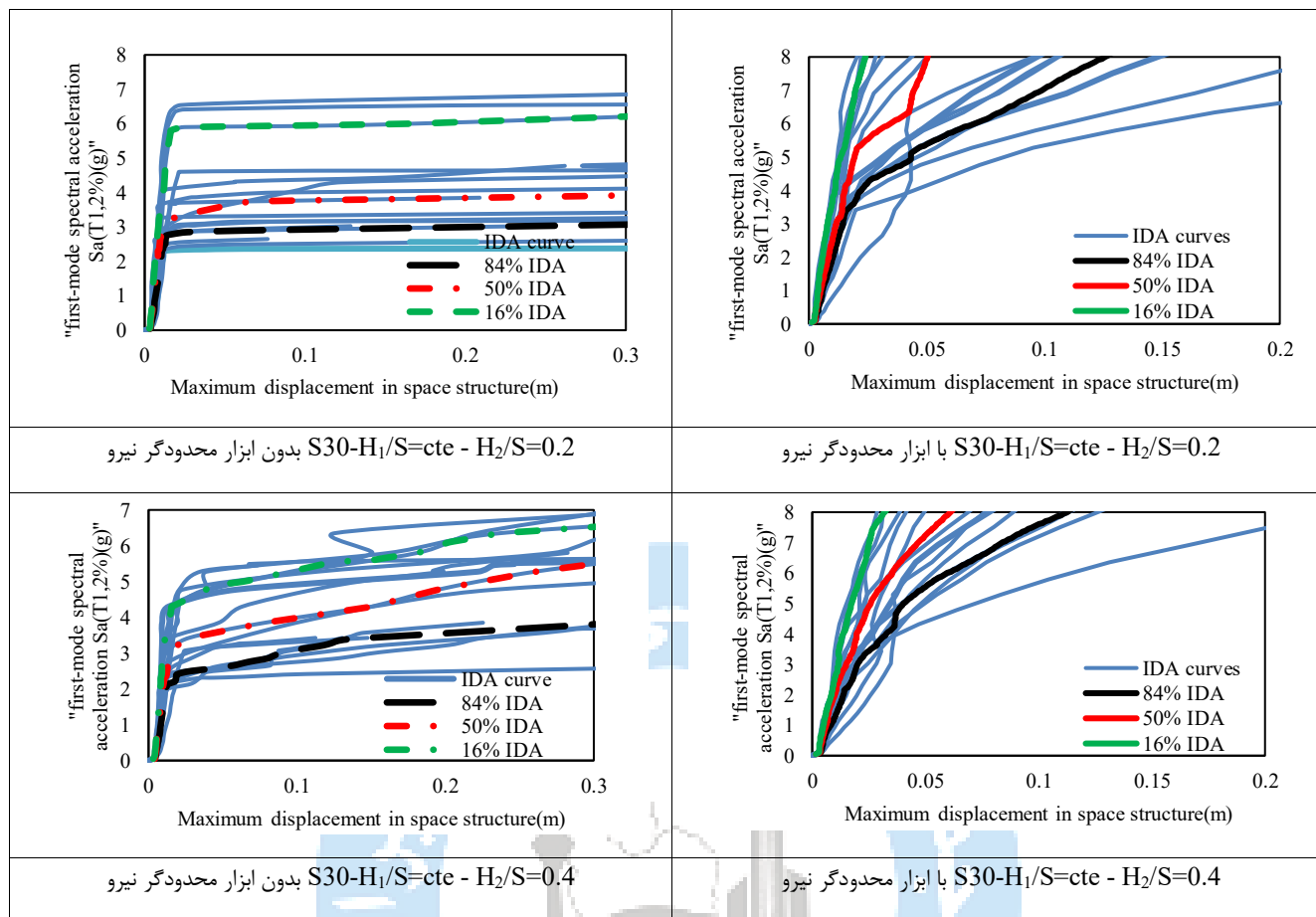
(پ) مشخصات رفتاری آن مستقل از ترتیب و زمان بارگذاری باشد.

ابزارهای محدودگر نیروی مختلفی توسط محققین ارائه گردیده است. ابزار جدید محدودگر نیروی آکاردیونی که توسط پور شریفی و همکاران معرفی گردید از هسته مرکزی، غلاف ضد کمانش و اتصال Mero تشکیل یافته است. یک ابزار محدودگر نیرو با ترکیب سه لوله مدور در عضو جهت تحمل بار فشاری توسط حمید و همکاران معرفی گردید. نوع دیگر ابزار محدودگر نیرو که از ترکیب ۲ لوله مربعی با ۴ نوار فولادی بوده است توسط پارک و همکاران ارائه گردید. نوع دیگر ابزار محدودگر نیرو که از ترکیب هسته فولادی با مهره‌های قابل تنظیم و غلاف فولادی تشکیل یافته و قابلیت کنترل طول پله پلاستیک را دارا می‌باشد توسط خیرالهی و همکاران ارائه گردید. در تمامی موارد مذکور، ابزار محدودگر نیرو منجر به بهبود رفتار سازه‌های فضاکار شده است لذا در این مطالعه به منظور بررسی دقیق تر تاثیر این ابزار در رفتار لرزه‌ای سازه‌های فضاکار از نوع لوله‌ای که از ترکیب دو لوله تشکیل شده، استفاده گردیده است (شکل ۱۵)

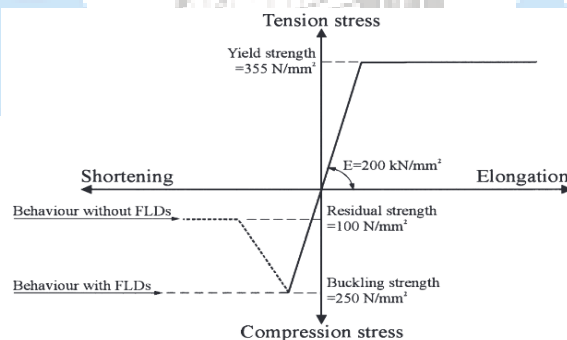


شکل ۱۵- ابزار محدودگر نیروی مورد استفاده در سازه‌های فضاکار مورد بررسی

جهت بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌های فضاکار با استفاده از ابزار محدودگر نیرو لازم بود تا اعضای بحرانی سازه‌های فضاکار شناسایی گردند. پس از شناسایی اعضای بحرانی، ابزار محدودگر نیرو جایگزین گردیده و تحلیل دینامیکی نمودی مجدداً بر روی سازه‌ها انجام شد. نتایج تحلیل‌های دینامیکی نمودی با نتایج قبل از جایگزینی این ابزار مقایسه گردید که نتایج در شکل ۱۶ نشان داده شده است. رفتار ابزار محدودگر نیرو براساس تحقیقات انجام شده توسط ال شیخ و همکاران به صورت شکل ۱۷ می‌باشد. لذا این رفتار به اعضای بحرانی در سازه‌های مورد مطالعه اختصاص داده شده و رفتار سازه‌ها بعد از اختصاص، مورد بررسی قرار گرفته است. برای تعریف رفتار ابزار محدودگر نیرو در نرم افزار *OpenSees* از المان خریایی با مصالح *Pinching4* [۳۹] استفاده شده است. لازم به ذکر می‌باشد اختصاص ابزار محدودگر نیرو در چند مرحله و به صورت تدریجی صورت گرفته است به صورتی که با کمترین تعداد ابزار محدودگر نیرو بتوان رفتار مناسب و پایداری از سازه‌های فضاکار را نتیجه گرفت.



شکل ۱۶- نتایج تحلیل های دینامیکی نموی با و بدون اعمال ابزار محدودگر نیرو

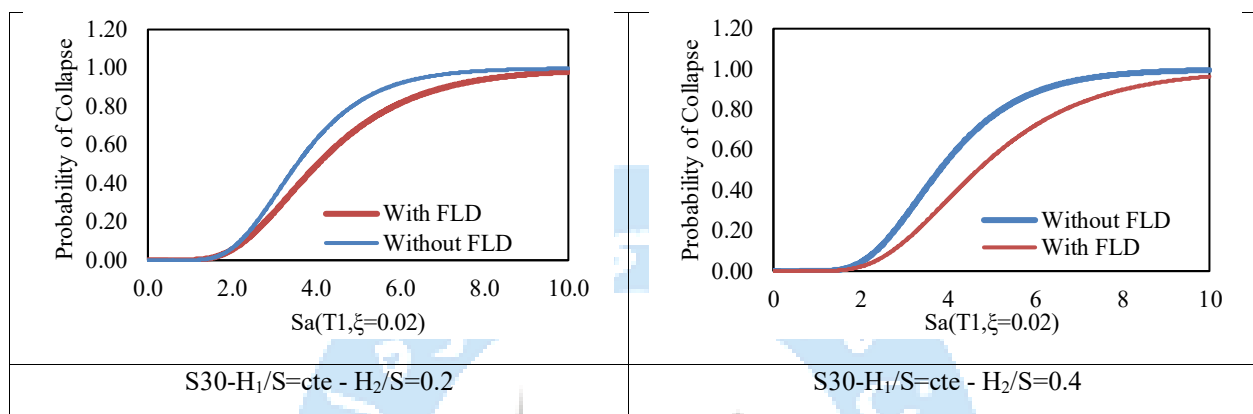


شکل ۱۷- منحنی رفتار ابزار محدودگر نیرو [۲۳]

با توجه به نتایج مشاهده می‌گردد که با اضافه نمودن ابزار محدودگر نیرو به مدل‌های مورد مطالعه، میزان شتاب فروریزش سازه افزایش می‌یابد. به عبارتی فروریزش در سازه را به تاخیر می‌اندازد. به عنوان نمونه در سازه فضاکار با نسبت ارتفاع گنبد به طول دهانه برابر با ۰/۲، میزان شتاب فروریزش در صدک ۵۰ درصد برای حالت بدون ابزار محدودگر نیرو برابر تقریباً ۳/۲۵g می‌باشد در صورتی که با جایگزینی ابزار محدودگر نیرو به ۵/۱۵g افزایش می‌یابد که این مسئله نشان دهنده تاثیر قابل توجه ابزار محدودگر نیرو در رفتار لرزه‌ای سازه‌های فضاکار دولایه می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با اعمال ابزار محدودگر نیرو رفتار ترد سازه‌های فضاکار به رفتار شکل پذیر تبدیل می‌گردد به صورتی که در حالت بدون وجود این ابزار، سازه پس از رسیدن به شتاب فروریزش به صورت ناگهانی دچار فروریزش کلی گردیده و در حالت با ابزار محدودگر نیرو فروریزش ناگهانی در سازه فضاکار اتفاق نیفتاده است. در ضمن با اضافه نمودن ابزار محدودگر

نیرو به سازه‌های فضاکار مورد مطالعه مشاهده می‌گردد که تمامی منحنی‌های دینامیکی نمودی به حالت صعودی تبدیل شده اند که نشان دهنده بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌ها می‌باشد.

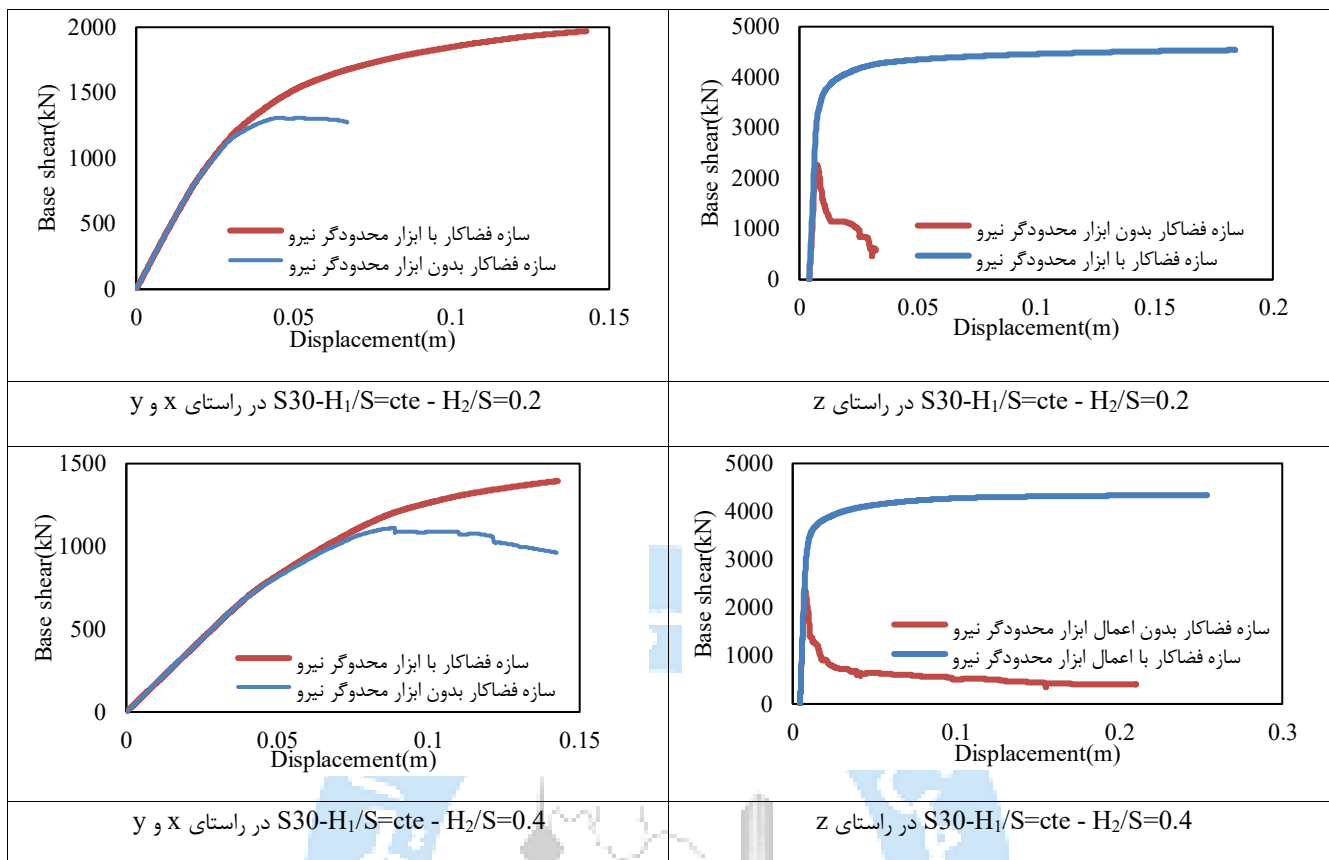
در شکل ۱۸ نیز تاثیر ابزار محدودگر نیرو در منحنی‌های شکنندگی برای دو نمونه از سازه‌های فضاکار مورد مطالعه نشان داده شده است. با مقایسه نتایج مشاهده می‌گردد که با اضافه نمودن ابزار محدودگر نیرو میزان شتاب متناظر با فروریزش سازه افزایش می‌یابد. به طوری که در سازه فضاکار با نسبت ارتفاع گنبد به طول دهانه برابر 0.2 شتاب فروریزش با احتمال وقوع 50% درصد برای حالت‌های با و بدون ابزار محدودگر نیرو به ترتیب برابر $4/1g$ و $3/52g$ و برای سازه فضاکار با نسبت ارتفاع گنبد به طول دهانه برابر 0.4 به ترتیب برابر $3/77g$ و $4/64g$ می‌باشد که این امر حاکی از تاثیر قابل توجه ابزار محدودگر نیرو در به تاخیر انداختن فروریزش کلی در سازه‌های فضاکار می‌باشد.



شکل ۱۸- مقایسه منحنی‌های شکنندگی در سازه‌های فضاکار مورد مطالعه برای دو حالت با و بدون ابزار محدودگر نیرو

۶- تاثیر ابزار محدودگر نیرو در پارامترهای لرزه‌ای سازه‌های فضاکار

در این قسمت به بررسی تاثیر ابزار محدودگر نیرو در پارامترهای لرزه‌ای سازه‌های فضاکار مورد مطالعه پرداخته شده است. بدین منظور هر یک از سازه‌ها در دو حالت با و بدون ابزار محدودگر نیرو مورد بررسی قرار گرفته اند. لذا در ابتدا تحلیل استاتیکی غیرخطی برای هر مدل سازه‌ای در هر سه راستا صورت گرفته و سپس پارامترهای لرزه‌ای برای هر یک از سازه‌ها استخراج گردیده است. لازم به ذکر می‌باشد که تحلیل استاتیکی غیرخطی تحت الگوی بار جانبی متناسب با مود اول سازه انجام گرفته است. نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی برای هر دو مدل $H_2/S=0.2, 0.4$ در شکل ۱۹ نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده گردید با اضافه کردن ابزار محدودگر نیرو به اعضای بحرانی سازه‌های فضاکار، رفتار ترد و شکننده به رفتار شکل پذیر تبدیل گردیده و سازه قابلیت تغییر شکل‌های زیاد داشته است. همچنین نتایج نشان داد که تاثیر ابزار محدودگر نیرو برای سازه‌های فضاکار در راستای قائم نسبت به دو راستای افقی قابل توجه می‌باشد. به صورتی که در راستای قائم که منحنی ظرفیت سازه در حالت بدون ابزار محدودگر نیرو به صورت ناگهانی افت مقاومت نشان داده است با اضافه نمودن این ابزار، رفتار ترد به رفتار شکل پذیر تبدیل شده است. علاوه بر آن میزان مقاومت نهایی سازه برای نسبت‌های $H_2/S=0.2, 0.4$ از 2082 و 2332 کیلونیوتن به ترتیب به 4199 و 4162 کیلونیوتن افزایش یافته است که نشان دهنده تاثیر قابل توجه ابزار محدودگر نیرو در رفتار سازه‌های مورد بررسی بوده است. همچنین نتایج نشان دهنده استهلاک انرژی قابل توجه در سازه‌های فضاکار مورد مطالعه به دلیل اضافه شدن ابزار محدودگر نیرو می‌باشد به طوری که در راستای افقی میزان استهلاک انرژی به میزان $1/14$ برابر و در راستای قائم به میزان 8 الی 25 برابر افزایش یافته است. لذا می‌توان نتیجه گرفت تاثیر ابزار محدودگر نیرو در راستای قائم نسبت به راستای افقی قابل توجه بوده است.



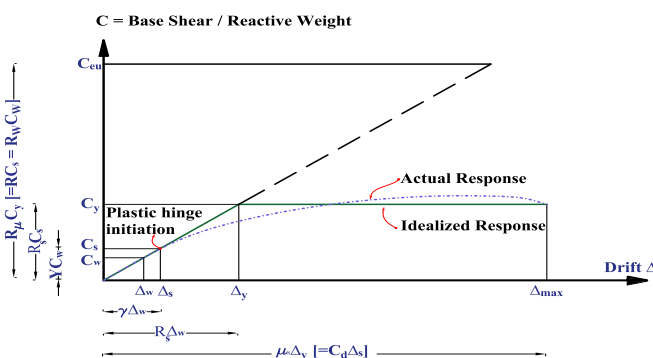
شکل ۱۹- مقایسه منحنی‌های ظرفیت سازه با و بدون اعمال ابزار محدودگر نیرو.

۱-۶- روند تعیین ضریب رفتار سازه‌های فضاکار

ضریب رفتار پارامتری است که برای افزایش طیف پاسخ الاستیک سیستم‌های سازه‌ای مختلف در طراحی مبتنی بر نیرو به کار گرفته می‌شود. این ضریب از حاصلضرب ضریب شکل پذیری ($R\mu$) و ضریب اضافه مقاومت (R_s) تعیین می‌گردد (رابطه ۳) [44, 45]:

$$R = R_\mu \times R_s \quad (3)$$

در مطالعه کنونی از روش Uang برای تعیین ضریب رفتار سازه استفاده گردیده است. مطابق این روش بعد از تعیین پاسخ سازه، منحنی ظرفیت سازه دوخطی می‌گردد به صورتی که بیانگر حالت ایده‌آل سازی شده از منحنی باشد (شکل ۲۰).



شکل ۲۰- شکل گرافیکی تعیین ضریب رفتار سازه [۴۵]

سپس پارامترهای ضریب رفتاری (R_s و R_μ) و ضریب تشدید تغییر مکانی سازه (R_μ و μ) محاسبه می‌گردد. R_s ، R_μ و μ به ترتیب ضریب اضافه مقاومت، ضریب کاهش شکل پذیری و ضریب شکل پذیری می‌باشند. ضریب اضافه مقاومت با نماد R_{s0} نشان داده شده است که برابر با نسبت مقاومت سازه در اولین محل تشکیل مفصل پلاستیک به مقاومت تسلیم سازه می‌باشد. این پارامتر از رابطه ۴ تعیین می‌گردد:

$$R_{s0} = \frac{V_y}{V_s} \quad (4)$$

برای در نظرگیری عواملی از قبیل اختلاف بین تنش تسلیم واقعی و اسمی مصالح (F_1)، نرخ تغییر شکل در طول ارتعاش زلزله (F_2) و تاثیر اعضای غیر سازه‌ای، ضریب اضافه مقاومت از رابطه ۵ تعیین می‌شود:

$$R_s = R_{s0} \times F_1 \times F_2 \times F_3 \times \dots \times F_n \quad (5)$$

مطالعات گذشته نشان داده است که در صورتی که سازه از فولاد ساخته شده باشد، مقدار F_1 برابر ۱/۰۵ می‌باشد. مقدار F_2 عبارت از افزایش تنش تسلیم در هنگام وقوع زلزله است که تحقیقات نشان داده است عدد ۱/۱ می‌تواند مقدار مناسبی برای آن باشد. علاوه بر آن تاثیر پارامترهای دیگر از جمله اعضای غیرسازه‌ای و توزیع بار جانبی می‌تواند در نظر گرفته شود. در این مطالعه، همه اعضای تشکیل دهنده سازه‌های فضاکار از جنس فولاد نرمه (ST37) بوده است و مقادیر ۱/۰۵ و ۱/۱ برای پارامترهای F_1 و F_2 در نظر گرفته شده است. ضریب اضافه مقاومت نیز برابر ۱/۱۵۵ در نظر گرفته شده است. ضریب شکل پذیری نیز از تقسیم نمودن جابجایی ماکزیمم به جابجایی تسلیم محاسبه می‌شود که از رابطه ۶ تعیین می‌گردد:

$$\mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (6)$$

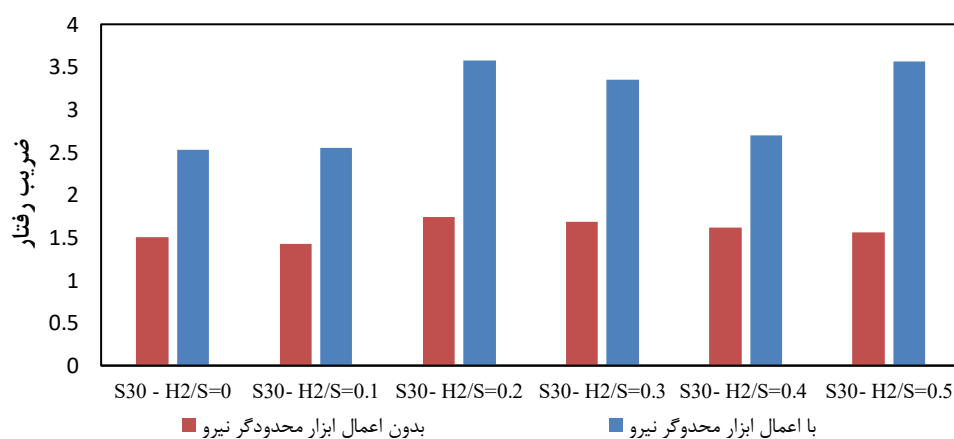
برای محاسبه پارامترهای استفاده شده در تعیین ضریب رفتار سازه از روابط نیومارک-هال و میراندا-برترو که در جدول ۸ ارائه شده است، استفاده گردیده است.

جدول ۸- روابط استفاده شده در تعیین ضریب رفتار سازه [۴۴].

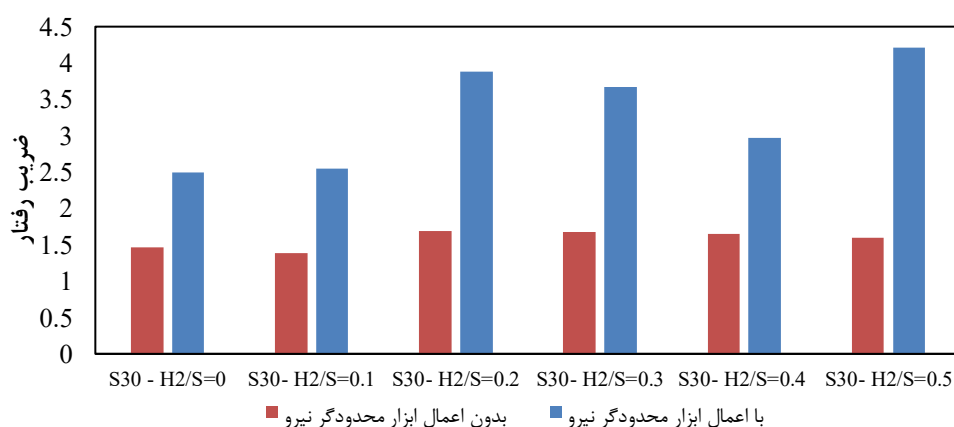
روابط	تعریف
$R_\mu = 1, T < 0.05S$ $R_\mu = \sqrt{2\mu - 1}, 0.05S \leq T \leq 0.12S$ $R_\mu = \mu, T > 1.0S$	برای مقادیر میانی از درون یایی خطی استفاده شده است.
میراندا-برترو	
نیومارک-هال	$\varphi = 1 + \frac{T_g}{3T} - \frac{3T_g}{4T} \times \exp(-3(\ln(\frac{T}{T_g}) - 0.25)^2)$, Soft soil $\varphi = 1 + \frac{1}{10T - \mu T} - \frac{1}{2T} \times \exp(-1.5(\ln(T) - 0.6)^2)$, Rock $\varphi = 1 + \frac{1}{12T - \mu T} - \frac{2}{5T} \times \exp(-2(\ln(T) - 0.2)^2)$, Alluvium

پارامتر لرزه‌ای که در هر یک از مدل‌ها تعیین گردیده است، ضریب رفتار سازه می‌باشد. بدین منظور ضریب رفتار سازه با استفاده از روابط میراندا-برترو و نیومارک-هال برای دو حالت با و بدون ابزار محدودگر نیرو تعیین شده است. در شکل ۲۱ ضرایب رفتار هر یک از

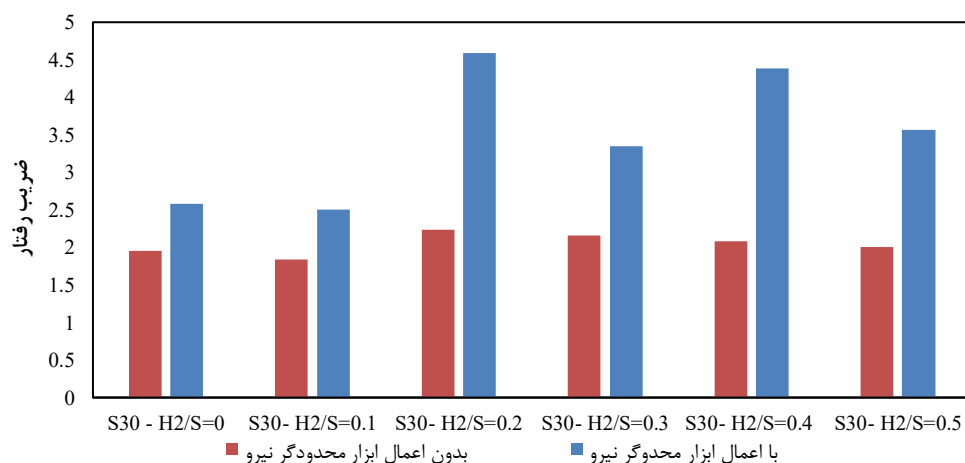
مدل‌ها نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌گردد که در حالت بدون ابزار محدودگر نیرو ضریب رفتار سازه‌های فضاکار در راستای افقی در محدوده ۱/۴ الی ۱/۷ و در راستای قائم در محدوده ۱/۷ الی ۲/۳۴ می‌باشد که پایین بودن ضریب رفتار در سازه‌های فضاکار نشان دهنده رفتار ترد و شکننده سازه‌ها بدلیل کماتش اعضای بحرانی می‌باشد. با اعمال ابزار محدودگر نیرو در اعضای بحرانی مدل‌های مورد مطالعه مشاهده می‌گردد که ضریب رفتار سازه افزایش می‌یابد، به طوری که با افزایش ارتفاع گنبد فضاکار ضریب رفتار سازه با استفاده از روابط میراندا-برترو در دو راستای افقی از ۲/۴۹ به ۴/۲۱ و در راستای قائم از ۱/۹۶ به ۳/۹۶ و با استفاده از روابط نیومارک-هال در دو راستای افقی از ۲/۵۳ به ۳/۵۷ و در راستای قائم از ۲/۵۸ به ۳/۵۷ افزایش یافته است.



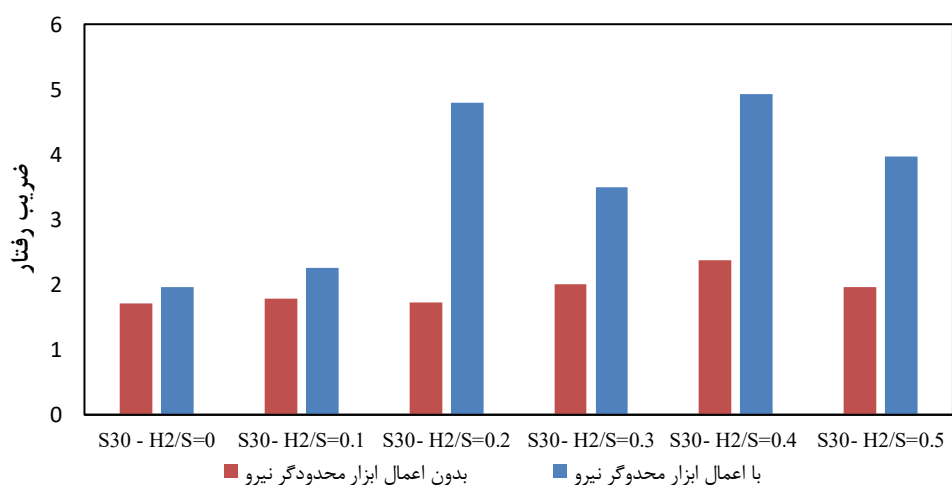
ضریب رفتار سازه‌های فضاکار مورد بررسی در راستای افقی با استفاده از روش Newmark Hall



ضریب رفتار سازه‌های فضاکار مورد بررسی در راستای افقی با استفاده از روش Miranda-Bertero



ضریب رفتار سازه‌های فضاکار مورد بررسی در راستای قائم با استفاده از روش Newmark Hall



ضریب رفتار سازه‌های فضاکار مورد بررسی در راستای قائم با استفاده از روش Miranda-Bertero

شکل ۲۱- تاثیر ابزار محدودگر نیرو در ضریب رفتار سازه‌های فضاکار در راستای افقی و قائم

۷- نتیجه گیری

در این مقاله رفتار لرزه‌ای سازه‌های فضاکار گنبدی شکل دولایه متکی بر دیوارهای عمودی دولایه بررسی شده است. بدین منظور، ۱۲ سازه فضاکار با نسبت‌های مختلف ارتفاع دیوار به طول دهانه و ارتفاع گنبد به طول دهانه انتخاب و براساس ترکیبات بارگذاری می‌ششم مقررات ملی ساختمان و استاندارد ۲۸۰۰ ایران (ویرایش چهارم) طراحی گردیده است. سپس رفتار لرزه‌ای هر یک از سازه‌ها با استفاده از تحلیل دینامیکی نمودی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از ۱۶ رکورد زلزله حوزه دور از گسل استفاده شده است. همچنین منحنی‌های شکنندگی هر یک از سازه‌ها تعیین گردیده است. در مرحله بعد از ابزار محدودگر نیرو برای بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فضاکار استفاده گردیده و در نهایت ضریب رفتار سازه‌های مورد بررسی تعیین شده است. نتایج تحلیل‌های انجام گرفته به شرح زیر می‌باشد:

۱- خرابی سازه‌های فضاکار دولایه متکی بر دیوارهای عمودی دولایه ناشی از کمانش ناگهانی اعضای سازه‌های فضاکار می‌باشد. این نوع خرابی از نوع ترد بوده و تاثیر قابل توجهی در رفتار سازه‌های مورد مطالعه دارد؛

- ۲- نتایج نشان می‌دهد زمانی که نسبت ارتفاع دیوار به طول دهانه افزایش می‌یابد، شتاب فروریزش سازه‌ها کاهش می‌یابد. علاوه بر آن نتایج تحلیل دینامیکی نموی نشان می‌دهد که رفتار سازه‌های فضاکار در مرحله اول به صورت خطی بوده و با افزایش شتاب لرزه‌ای، جابجایی به طور ناگهانی افزایش می‌یابد که دلیل آن ناشی از کمانش ناگهانی اعضای بحرانی سازه‌های فضاکار می‌باشد؛
- ۳- نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت ارتفاع دیوار به طول دهانه، شتاب فروریزش کاهش می‌یابد به صورتی که بیشترین شتاب فروریزش سازه مربوط به مدل با نسبت $H_1/S=0$ می‌باشد که علت آن را می‌توان به دلیل عدم وجود زیرسازه دانست که منجر گردیده است سازه مذکور رفتار لرزه‌ای مناسبی را از خود نشان بدهد. علاوه بر آن نتایج نشان می‌دهند وقتی که نسبت $H_1/S > 0$ می‌باشد، با افزایش ارتفاع دیوار شتاب فروریزش سازه به طور قابل توجه کاهش می‌یابد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که زیرسازه تاثیر قابل توجهی در پایداری لرزه‌ای سازه‌های فضاکار دارد. همچنین با توجه به نتایج مشاهده می‌گردد که برای نسبت‌های مختلف ارتفاع به طول دهانه بین 0.1 الی 0.5 نرخ کاهش شتاب ناچیز بوده و با افزایش ارتفاع زیر سازه شتاب فروریزش کاهش می‌یابد. نتایج تحلیل برای گروه دوم نیز حاکی از آن است که با افزایش نسبت ارتفاع گنبد به طول دهانه، نرخ کاهش شتاب فروریزش سازه تا نسبت برابر 0.3 ثابت بوده و برای نسبت‌های بیشتر از 0.3 قابل توجه می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج تحلیل مشاهده می‌گردد که در حالتی که سقف تخت می‌باشد ($H_1/S=0$) فروریزش سازه در این حالت در شتاب کمتری نسبت به حالت اول رخ داده است که این امر نیز اهمیت قابل توجه زیرسازه را نشان می‌دهد.
- ۴- با اضافه نمودن ابزار محدودگر نیرو به سازه‌های فضاکار مشاهده گردید که شتاب متناظر با فروریزش سازه به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. همچنین این ابزار قابلیت به تاخیر انداختن فروریزش ناگهانی در سازه‌های فضاکار را دارا می‌باشد. علاوه بر آن نتایج نشان داد که با جایگزینی ابزار محدودگر نیرو در اعضای بحرانی هر یک از سازه‌های مورد مطالعه، منحنی‌های دینامیکی نموی تحت رکوردهای زلزله مورد بررسی به حالت صعودی تبدیل شده است که نشان دهنده بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌ها می‌باشد. مقایسه منحنی‌های شکنندگی نشان دهنده افزایش قابل توجه شتاب فروریزش در حالت جایگزینی ابزار محدودگر نیرو بوده است؛
- ۵- نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی نشان داد که رفتار سازه‌های فضاکار در راستای قائم نسبت به راستای افقی رفتار ترد و شکننده‌ای داشته است، به صورتی که تحت الگوی بار قائم، سازه بعد از رسیدن به ظرفیت نهایی خود به صورت ناگهانی مقاومت خود را از دست می‌دهد. در اثر اضافه نمودن ابزار محدودگر نیرو به اعضای بحرانی سازه‌های مورد مطالعه، رفتار ترد منحنی ظرفیت سازه به رفتار شکل پذیر تبدیل گردیده و ظرفیت باربری سازه در راستای افقی به اندازه $1/5$ الی $1/8$ برابر و در راستای قائم به اندازه $1/3$ الی 2 برابر افزایش یافته است. همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد که با اضافه نمودن ابزار محدودگر نیرو میزان استهلاک انرژی سازه در راستای افقی به میزان $1/14$ برابر و در راستای قائم به میزان 8 الی 25 برابر افزایش می‌یابد که این امر نشان دهنده تاثیر قابل توجه ابزار محدودگر نیرو در راستای قائم زلزله می‌باشد.
- ۶- نتایج نشان داد با اضافه نمودن ابزار محدودگر نیرو در اعضای بحرانی سازه‌های فضاکار، ضریب رفتار سازه‌ها به میزان قابل توجهی افزایش یافت به طوری که ضریب رفتار سازه در دو راستای افقی و قائم از محدوده $1/51$ الی $2/3$ به محدوده $2/6$ الی 5 افزایش یافت که این امر حاکی از بهبود رفتار سازه‌های فضاکار می‌باشد، لذا می‌توان گفت که استفاده از ابزار محدودگر نیرو می‌تواند علاوه بر افزایش شکل پذیری در سازه منجر به کاهش ابعاد اعضا نیز گردد.

پیوست ۱

مقاومت فشاری اعضای فشاری لوله‌ای براساس رابطه ۱ تعیین می‌گردد:

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (1)$$

که در آن A_g سطح مقطع کلی عضو، F_{cr} تنش فشاری ناشی از کمانش خمشی که از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\text{الف) اگر } \left(\frac{F_y}{F_e} \leq 2.25\right) \frac{kL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ باشد:}$$

$$F_{cr} = (0.658 \frac{F_y}{F_e}) F_y \quad (2)$$

(ب) اگر $\frac{kL}{r} \geq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ باشد: $(\frac{F_y}{F_e} > 2.25)$

$$F_{cr} = 0.877 F_e \quad (3)$$

در روابط فوق نسبت لاغری عضو حول محور کمانش مورد نظر، F_y تنش تسلیم مشخصه فولاد، E مدول الاستیسیته فولاد، k ضریب طول موثر حول محور کمانش مورد نظر، L طول مهار نشده عضو حول محور کمانش مورد نظر، r شعاع ژیراسیون می‌باشد.

مراجع

- [1] Sutjiadi, H.Y. and A.W. Charleson, *Structural-architectural integration of double-layer space structures in tall buildings*. Journal of architectural engineering, 2013. **19**(4): p. 219-228.
- [2] Sutjiadi, H.Y. and A.W. Charleson, *Structural design and analysis of vertical double-layer space structures in super-tall buildings*. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2014. **23**(7): p. 512-525.
- [3] Fan, F., S. Shen, and G. Parke, *Study of the dynamic strength of reticulated domes under severe earthquake loading*. International journal of space structures, 2005. **20**(4): p. 235-244.
- [4] Kheirollahi, M., K. Abedi, and M.R. Chenaghloou, *Seismic collapse assessment of double-layer barrel vault roofs with double-layer vertical walls*. Advances in Structural Engineering, 2019. **22**(13): p. 2837-2852.
- [5] Nakazawa, K., et al. *Earthquake resistance of cylindrical reticulated shells of diagonally intersecting member arrangement*. in *Proceedings of IASS annual symposia*. 2015. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)., p. 280-300
- [6] Sadeghi, A., *Horizontal earthquake loading and linear/nonlinear seismic behaviour of double layer barrel vaults*. International Journal of Space Structures, 2004. **19**(1): p. 21-37.
- [7] Taniguchi, Y., P.L. Gould, and M. Kurano, *Earthquake input energy at dynamic collapse for double-layer cylindrical lattice roofs*. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, 2008. **49**(2): p. 89-96.
- [8] Taniguchi, Y., et al., *Limit state load and dynamic collapse estimation for double-layer cylindrical latticed roofs*. Extended Abstracts and CD-ROM of IASS-APCS, 2006, p. 1-10.
- [9] FU, G. and Y. HE, *W. CHEN Space Structures Research Center, Shanghai Jiaotong University, and LECO Shanghai Co. Ltd, Shanghai, China*. Space Structures 5, 20, p. 957-970.
- [10] Sun, J., et al., *Dynamic stability behaviour of lattice domes with substructures*. International Journal of Space Structures, 2014. **29**(1): p. 1-7.
- [11] Moghaddam, H.A., *Seismic behaviour of space structures*. International Journal of Space Structures, 2000. **15**(2): p. 119-135.
- [12] Ishikawa, K. and T. Ito. *Evaluation method of earthquake resistant capacity of double layer truss wall based on the dynamic collapse mechanism*. in *Proceedings of IASS annual symposia*. 2016. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), p. 1-10.

- [13] Nie, G.-b., et al., *Seismic performance evaluation of single-layer reticulated dome and its fragility analysis*. Journal of Constructional Steel Research, 2014. **100**: p. 176-182.
- [14] Yang, D.-B., et al., *Seismic analysis of single-layer latticed domes composed of welded round pipes considering low cycle fatigue*. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2017. **17**(10): p. 175-185.
- [15] Takeuchi, T., et al. *Collapse analysis of damaged space-frame gymnasiums in the 2016 Kumamoto Earthquake*. in *Proceedings of IASS Annual Symposia*. 2018. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), p. 1-12.
- [16] Kurata, T., et al. *Design of gymnasium roof structure with energy-dissipation damper bearing*. in *Proceedings of IASS Annual Symposia*. 2018. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), p. 1120-1140.
- [17] Hajinia, S., M.C. basim, and M. Chenaghlo. *Application of endurance time method in dynamic analysis of double-layer barrel vaults*. in *Proceeding of the IASS Annual Symposium 2016 "Spatial Structures in the 21st Century"*. 2016, p. 1-10.
- [18] Miyazu, Y., M. Ohsaki, and S. Tsuda. *Topology optimization of supporting structures for seismic response reduction of spatial structures*. in *Proceedings of IASS Annual Symposia*. 2016. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), p. 200-210.
- [19] Mahanthesh, K. and B. Naveen. *Dynamic Analysis of Multi-Layered Grid Space Structures*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. IOP Publishing.
- [20] Hanaor, A. and L.C. Schmidt, *Space truss studies with force limiting devices*. Journal of the Structural Division, 1980. **106**(11): p. 2313-2329.
- [21] Hanaor, A., C. Marsh, and G.A. Parke, *Modification of behavior of double-layer grids: overview*. Journal of Structural Engineering, 1989. **115**(5): p. 1021-1037.
- [22] Parke, G., *A novel soft member for space-trusses*. SPACE STRUCTURES 4, VOL 1, 1993: p. 116-126.
- [23] El-Sheikh, A., *Effect of force limiting devices on behaviour of space trusses*. Engineering structures, 1999. **21**(1): p. 34-44.
- [24] Kim, C.H. and W.T. Chae, *A Study on the Development of Force Limiting Devices of Folded Plate Type*. Journal of Korean Society of Steel Construction, 2014. **26**(6): p. 571-579.
- [25] Ghalejoughi, J., M.R. Sheidaii, and S. Tariverdilo, *Experimental and numerical study of a tube in tube force limiting device*. International Journal of Steel Structures, 2020. **20**(4): p. 1405-1419.
- [26] Ghalejoughi, J., M.R. Sheidaii, and S. Tariverdilou, *Improving the collapse behavior of double layer scallop space domes using tube in tube force limiting device*. Journal of Structural and Construction Engineering, 2022. **8**(11): p. 211-238.
- [27] Poursharifi, M., M. Chenaghlo, and K. Abedi. *Effect of Accordion Force Limiting Device on stability behavior of double layer grids*. in *Proceedings of IASS Annual Symposia*. 2016. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), p. 1-10.
- [28] Rashidian, S. and M.-R. Sheidaii, *Improving double-layer space trusses collapse behavior by strengthening compression layer and weakening tension layer members*. Advances in Structural Engineering, 2017. **20**(11): p. 1757-1767.
- [29] Tabatabaei, Z. and B. Fatehi-Nobarian, *Numerical investigation of ground tanks for storage subjected near-fault earthquakes*. Pollack Periodica, 2021, p. 1-10.
- [30] Abedi, K. and G. Parke, *Investigation into the behaviour of a ductile multi-tubular force limiting device*. 2007, p. 1-12.

- [31] Shekastehband, B., *The influences of force-limiting devices and high-stiffness cables on behavior of tensegrity structures*. Archive of Applied Mechanics, 2018. **88**(12): p. 2293-2316.
- [32] Hamid, Y.S., G. Parke, and N.F.M. Mahdi. *Novel soft members in double-layer space trusses*. in *MATEC Web of Conferences*. 2019. EDP Sciences.
- [33] Asghari, R., et al., *Retrofit strategies for mitigating progressive collapse of hybrid and traditional cable domes*. Journal of Constructional Steel Research, 2023. **204**: p. 107-117.
- [34] Abedi K, H.F., KHEIROLLAHI M., *Investigation into the progressive collapse of double-layer space structures with double-layer vertical walls using the alternative path method*. 2024., p.1-8
- [35] Committee, A.M. and A.I.o.S. Construction, *Manual of Steel Construction: Allowable Stress Design*. 1989: American Institute of Steel Construction.
- [36] Mhud, I., *National Building Code, Part 6, Loading*. 2009, Ministry of Housing and Urban Development, Tehran, Iran.
- [37] McKenna, F., G.L. Fenves, and M.H. Scott, *Open system for earthquake engineering simulation*. University of California, Berkeley, CA, 2000.
- [38] Chen, L. and L. Tirca, *Simulating the seismic response of concentrically braced frames using physical theory brace models*. 2013, p. 1-15.
- [39] McKenna, F.T., *Object-oriented finite element programming: frameworks for analysis, algorithms and parallel computing*. 1997: University of California, Berkeley.
- [40] Ishikawa, K., et al., *Evaluation method for predicting dynamic collapse of double layer latticed space truss structures due to earthquake motion*. International Journal of Space Structures, 2000. **15**(3): p. 249-257.
- [41] Manual, A.U.s., *Abaqus Version 6.12-1 Documentation*. Dassault Systemes SIMULIA Corporation, Providence, RI, USA, 2012.
- [42] Vamvatsikos, D. and C.A. Cornell, *Incremental dynamic analysis*. Earthquake engineering & structural dynamics, 2002. **31**(3): p. 491-514.
- [43] Council, A.T. , *Quantification of building seismic performance factors*. 2009: US Department of Homeland Security, FEMA.
- [44] Maheri, M.R. and R. Akbari, *Seismic behaviour factor, R, for steel X-braced and knee-braced RC buildings*. Engineering structures, 2003. **25**(12): p.1505-1513.
- [45] Uang, C.-M., *Establishing R (or R w) and C d factors for building seismic provisions*. Journal of structural Engineering, 1991. **117**(1): p. 19-28.







