

بررسی تأثیر هندسه‌ی فرازش در بهبود عملکرد لرزه‌ی گنبد دیامتیک تک‌لایه

مریم داعی* (استادیار)

رحیما حقانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مهرداد حجازی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۵
دربی ۲، شماره ۴/۲، ص. ۹۹-۱۱۰، (پادداشت نوی)

در بین سازه‌های فضاکار، گنبدها به دلیل دوام و پایداری بالا، جایگاه ویژه‌ی دارند. از آنجا که در سازه‌های فضاکار، تغییرات هندسه، اصلی‌ترین عامل تعیین‌کننده‌ی مقادیر کنش‌ها هستند، در این نوشتار به بررسی اثر ایجاد فرازش و تغییر شرایط هندسی در عملکرد لرزه‌ی گنبد دیامتیک تک‌لایه پرداخته شده است. در این راستا، نسبت‌های هندسی خیز به دهانه در گنبدهای دیامتیک تک‌لایه‌ی ساده در یک گروه بررسی و سپس در سه گروه دیگر، به نحوی که هندسه‌های مختلف پوشش داده شوند، فرازش در گنبدهای دیامتیک تک‌لایه‌ی گروه اول اعمال شده است. با انجام آنالیز دینامیکی، تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی با استفاده از ۳ شتاب‌نگاشت مناسب و مقیاس شده براساس ضوابط استاندارد ۲۸۰۰، عملکرد لرزه‌ی مدل‌ها مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده در این نوشتار، نشان دهنده‌ی اثر مطلوب فرازش در کاهش وزن گنبدها و بهبود عملکرد سازه‌ی است، به گونه‌ی که می‌توان با ایجاد فرازش مناسب تا حدود ۱۶٪ در وزن گنبدها کاهش داشت.

واژگان کلیدی: سازه‌ی فضاکار، گنبد دیامتیک، فرازش، آنالیز تاریخچه‌ی زمانی،

نسبت‌های هندسی بهینه.

m.daei@eng.ui.ac.ir
rhaghani.2011@yahoo.com
m.hejazi @eng.ui.ac.ir

۱. مقدمه

سازه‌های فضاکار به آن دسته از سازه‌ها اطلاق می‌شوند که ماهیتاً رفتار و عملکرد مسلط سه‌بندی دارند، به نحوی که اثر هیچ‌یک از سه بُعد در رفتار سازه تحت تأثیر کنش‌های وارده قابل صرف‌نظر کردن نیست.^[۱] سازه‌های فضاکار به طریقی پیکربندی می‌شوند که مسیر انتقال بار را از طریق عناصر سازه‌ی در سه بُعد تأمین کنند. در سازه‌های مذکور، ترکیب مجموعه‌ی تاشه و فرم هندسی، بارهای خارجی، نیروهای داخلی، و تغییر مکان‌های سازه در یک صفحه قرار نگرفته و از آن فراتر رفته و به سه بُعد گسترش یافته است.

سازه‌های فضاکار به طور کلی به گروه‌هایی شامل: شبکه‌ها، چلیک‌ها، و گنبدها طبقه‌بندی می‌شوند.^[۲] در این میان، گنبدها به دلیل دوام و پایداری بیشتر نسبت به سایر فرم‌ها (به دلیل انحناء دو یا چند سو به)، جایگاه ویژه‌ی دارند و گنبدهای دیامتیک به دلیل نداشتن مهم‌ترین مشکل گنبدها، که تراکم اعضا در رأس آنهاست، کاربرد بیشتری در بین سایر انواع گنبدها دارند، که از نمونه‌های آن در پوشش دهانه‌های وسیع می‌توان به فضاهایی مانند: انواع استادیوم‌های ورزشی، فروشگاه‌ها، و سالن‌های همایش‌ها اشاره کرد.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۸/۱۷، اصلاحیه ۱۳۹۴/۳/۲، پذیرش ۱۳۹۴/۳/۹.

در سازه‌های فضاکار، پوشاننده‌ی فضاهای وسیع و فاقد ستون‌های میانی، بارهای دینامیکی مانند زلزله به‌خصوص در مناطق لرزه‌خیز نقش تعیین‌کننده‌ی در طراحی سازه دارند و نکته‌ی قابل توجه آن است که هندسه‌ی سازه و تغییرات آن، اصلی‌ترین عامل تعیین‌کننده‌ی مقادیر کنش‌ها در سازه‌های مذکور است. در این نوشتار، به بررسی اثر ایجاد فرازش و تغییر شرایط هندسی در عملکرد لرزه‌ی گنبد دیامتیک تک‌لایه پرداخته شده است.

فرازش در جبر فرم‌کسی تابعی است که انواع سازه‌های فضاکار را در جهت اهداف مختلف ترکیب می‌کند و سازه‌ی به‌وجود می‌آورد که ترکیبی از سازه‌های پیشین خود با رفتاری کاملاً متفاوت است.^[۳] گنبدهای فرازش‌یافته، گنبدهای شبکه‌ی معمولی هستند که عمل فرازش در آنها باعث تغییر رفتار سازه‌ی آنها شده است. در این نوشتار با بررسی اثر فرازش در عملکرد لرزه‌ی، هندسه‌ی بهینه‌ی فرازش برای گنبد دیامتیک تک‌لایه تعیین شده است.

در زمینه‌ی بررسی عملکرد سازه‌ی انواع سازه‌های فضاکار تحت بارگذاری‌های مختلف در دو دهه‌ی اخیر، توجه فزاینده‌ی در سطح جهان شده است. به عنوان مثال، رفتار تعدادی از سازه‌های فضاکار در زلزله‌ی ۷/۲ ریشتری کوبه (۱۹۹۵) در ژاپن گزارش شده است.^[۴] ساختمان‌های مذکور شامل نمونه‌های دولایه و تک‌لایه در ناحیه‌ی مرکزی زلزله بوده‌اند. نکته‌ی جالب توجه در گزارش اخیر^[۴] آن است که هیچ

ایران بوده، پرداخته شده است. در مورد سازه‌های مذکور انتظار می‌رود که به دلیل سبکی و درجات نامعینی زیاد، رفتار مناسبی در برابر زلزله مشاهده شود و از این رو کاربرد آن‌ها در چنین شرایطی با داشتن ویژگی‌های ممتاز ذکر شده، معقولانه و مطلوب است. بدین منظور با انجام آنالیز دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی برای گروه‌ها تعریف شده، که در آنها فرازش اعمال شده است، رفتار گنبد‌ها بررسی و هندسه‌ی بهینه در هر گروه مشخص شده است. جزئیات نحوه‌ی کار در ادامه شرح داده شده است.

۲. تاشه‌پردازی گنبد‌ها و فرازش

به ترکیب گره‌ها و المان‌ها، که شکل هندسی سازه را ایجاد می‌کنند، تاشه و به فرایند انجام این کار، تاشه‌پردازی اطلاق می‌شود.^[۱] با توجه به آنکه در بیشتر سازه‌های فضاکار، تعداد زیادی گره و عضو وجود دارد، ساخت تاشه‌ی سازه به دقت بالایی نیاز دارد؛ لذا در این نوشتار از نرم‌افزار فرمین برای این کار استفاده شده است، که با بهره‌گیری از جبر فرمکسی، وسیله‌ی برای ساده‌تر کردن این منظور فراهم ساخته است. در جبر فرمکسی برای سهولت نشان دادن موقعیت المان‌ها و گره‌ها از دستگاه‌های مختصات یا برماره‌های مختلفی استفاده می‌شود، که برای ایجادشان بدون نیاز به تکرار مختصات آن‌ها، توابعی تعریف می‌شود.

در این نوشتار به دلیل استفاده از گنبد‌های دیامتیک از برماره‌ی دیامتیک استفاده و بافتار لانه‌زنبوری به دلیل سختی بیشتر شبکه‌های قطری نسبت به شبکه‌های راست انتخاب شده است.

تکیه‌گاه‌های گنبد‌ها از نوع گیردار و اتصالات صلب فرض شده و برای مدل‌سازی آنها از المان‌های فازی ۳۷-st لوله‌ی شکل با مقاطعی بین ۱۰ تا ۴۵ سانتی‌متر و به ضخامت ۵/۵ تا ۱ سانتی‌متر استفاده شده است.

فرازش در لغت به معنای ایجاد فراز یا برآمدگی در یک سطح است و گنبد دیامتیک فرازش‌یافته گنبدی است که عمل فرازش در آن انجام شده است.^[۲] فرازش در جبر فرمکسی تابعی است که به کمک آن می‌توان انواع تاشه‌های سازه‌های فضاکار را در جهت اهداف مختلف با هم ترکیب کرد و سازه‌ی به وجود آورد که ترکیبی از سازه‌های پیشین با رفتاری کاملاً متفاوت باشد. از انواع فرازش می‌توان به فرازش کروی، استوانه‌ای، سهموی، بیضوی، حلقوی، و مخروطی اشاره کرد. در این پژوهش از فرازش چلیک‌گونه‌ی سهموی به دلیل هماهنگی هندسی بیشتر این نوع فرازش در ادغام با گنبد کروی استفاده شده است. مراحل ابتدایی تاشه‌پردازی این گروه از گنبد‌ها مطابق شکل ۱ است، که در آن عناصر فرازش که چلیک‌های سهموی و گنبد پایه هستند، در سمت راست و نتیجه‌ی این ادغام که گنبد فرازش‌یافته است، در سمت چپ نشان داده شده است. برای تاشه‌پردازی فرازش در این نوشتار از تابع Baple (که مخفف Barrel Pellevation است) استفاده شده است (شکل ۲). براساس این تابع دو فرازش چلیک‌گونه، به صورت دو خط موازی (مطابق ستون دوم شکل ۲) با سطح مقطع فرازش (مطابق ستون اول شکل ۲) در گنبد پایه ایجاد می‌شود. اولین

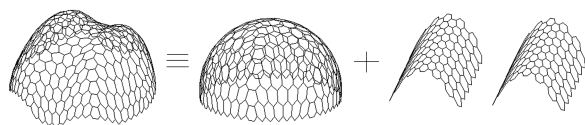
موردی از تخریب سازه‌های فضاکار در زلزله‌ی سنگین ذکر شده مشاهده نشده و این تأکیدی بر استقامت و پایداری چشم‌گیر سازه‌های فضاکار در برابر زلزله است. فقط مواردی به عنوان حالت شکست سازه‌های مذکور عنوان شده است، که عبارت از بروز خرابی در محل اتصال سازه به تکیه‌گاه، ترک در اتصالات، و کماتش خمیری برخی از اعضا در مجاورت تکیه‌گاه‌هاست.^[۳] تأثیر انعطاف تکیه‌گاه‌ها در پاسخ لرزه‌ی و شکست زنجیره‌ی در طی مطالعاتی (۱۹۹۳)،^[۴] بررسی شده و علت شکست‌های مشاهده شده، برآورد اشتباه نیروهای زلزله در هنگام طراحی عنوان شده است.

در مطالعات دیگری درخصوص رفتار لرزه‌ی شبکه‌های دولایه‌ی فضاکار از روش کنترل براساس عملکرد استفاده و با در نظر گرفتن تغییر مکان‌های عمودی و مکانیسم شکست به عنوان معیار کنترل‌کننده و با در نظر گرفتن بیشترین ظرفیت تغییر شکل خمیری، به طراحی این نوع از سازه‌های فضاکار پرداخته شده است.^[۵] همچنین پاسخ دینامیکی - ارتجاعی سازه‌های پوسته‌ی گنبدی شکل تحت شتاب افقی و قائم زلزله‌ی کوبه‌ی (۱۹۹۵) بررسی شده و این نتیجه به دست آمده است که در سازه‌های ذکر شده برخلاف سازه‌های عادی، مدهای بالاتر و نیز مدهای قائم نقش تعیین‌کننده‌ی در پاسخ دینامیکی سازه ایفا می‌کنند.^[۶] بهینه‌یابی سازه‌های فضاکار براساس رفتار لرزه‌ی در سال ۲۰۱۱،^[۷] مورد مطالعه قرار گرفته و روشی پیشنهاد شده است که با استفاده از آن، وزن سازه‌های طراحی شده در حدود ۶۰٪ کمتر از سایر روش‌ها مانند روش‌های طراحی براساس عملکرد به دست خواهد آمد. اما به طور خاص در مورد رفتار سازه‌های گنبدی شکل، در مطالعات دیگری این نتیجه به دست آمده است که وقتی سازه‌ی فضاکار از حالت مسطح دورتر می‌شوند، در این صورت مد غالب مد اول بوده و تأثیر مدهای بالاتر کمتر است.^[۸]

در مطالعات دیگری نیز به بررسی لرزه‌ی گنبد‌های سازه‌های فضاکار با تغییر نسبت‌های هندسی مانند تغییرات نسبت‌های خیز به دهانه پرداخته شده و با در نظر گرفتن محدودیت‌های تغییر مکان و لاغری اعضا و انجام آنالیز المان محدود، این نتیجه به دست آمده است که با افزایش نسبت خیز به دهانه در گنبد‌های سازه‌های فضاکار، پارامتری که به صورت مقادیر شتاب بحرانی در ظرفیت دینامیکی در گنبد‌ها تعریف شده است، کاهش می‌یابد.^[۹] همچنین با در نظر گرفتن نسبت‌های هندسی در شبکه‌های تخت دولایه‌ی فضاکار مانند نسبت عمق به دهانه، به بررسی لرزه‌ی شبکه‌های مذکور پرداخته شده و با انجام آنالیز تاریخچه‌ی زمانی به صورت غیرخطی، این نتیجه به دست آمده است که کاهش ضخامت یا عمق شبکه‌های مذکور باعث افزایش دوره‌ی تناوب اصلی و تغییر مکان‌های سازه به صورت هم‌زمان می‌شود.^[۱۰] در مطالعه‌ی عملکرد لرزه‌ی سازه‌های فضاکار شبکه‌ی نیز با استفاده از آنالیز دینامیکی، روشی جهت بهبود آن پیشنهاد شده است که در مرحله‌ی نخست آن، برخی از المان‌های سازه با میراگرهای معرفی شده جایگزین و در مرحله‌ی بعد، بهترین چیدمان میراگرهای مذکور تعیین شده است.^[۱۱] همچنین به منظور ساده‌سازی محاسبات لرزه‌ی، با بررسی مؤلفه‌های عمودی و قائم زلزله بر روی سازه‌ی فضاکار دولایه، معادلاتی برای محاسبه‌ی نیروهای استاتیکی زلزله سازه‌های مذکور پیشنهاد شده است.^[۱۲]

با نگاهی به پیشینه‌ی پژوهش، که در این بخش به آن اشاره‌ی کوتاهی شده است، می‌توان گفت که تاکنون بیشتر مطالعات انجام شده، منطبق با فرم‌های ساده و رایج گنبد‌های شبکه‌ی بوده‌اند، در حالی که با ایجاد فرازش و اعمال تغییرات هندسی می‌توان به میزان قابل توجهی عملکرد سازه را ارتقا داد.

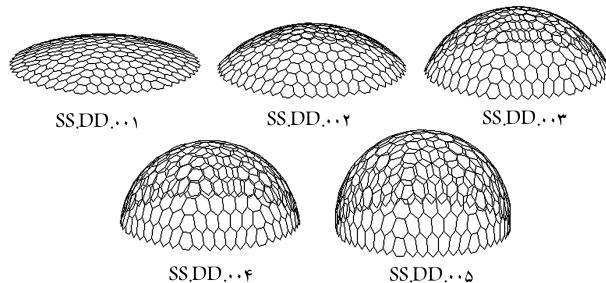
در این نوشتار به رفتارشناسی گنبد‌های تک‌لایه‌ی دیامتیک فرازیده تحت کنش‌های دینامیکی، که کنش‌های زلزله به منزله‌ی مهم‌ترین آنها به لحاظ زلزله‌خیز بودن کشور



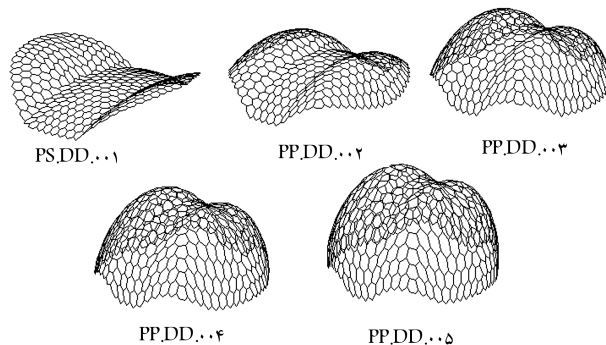
شکل ۱. مراحل اولیه‌ی فرازش چلیک‌گونه (به ترتیب از راست: عناصر فرازش شامل چلیک‌های سهموی و گنبد پایه و نتیجه‌ی ترکیب به صورت گنبد فرازش‌یافته).

جدول ۱. نام‌گذاری و مشخصات هندسی گنبد‌های گروه ۱.

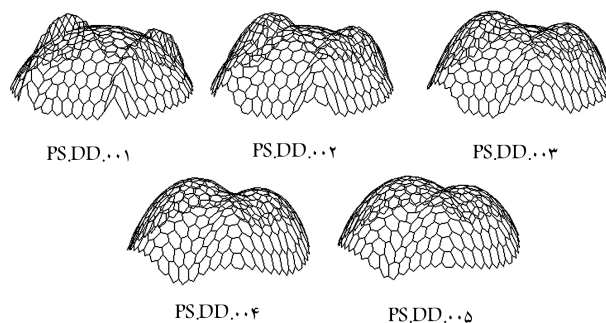
شماره مدل	H (m)	A (°)	R (m)	S (m)	H/S
SS.DD.۰۰۱	۳/۶	۲۲/۶۰	۴۶/۸	۳۶	۰/۱
SS.DD.۰۰۲	۷/۲	۴۳/۶۰	۲۶/۱	۳۶	۰/۲
SS.DD.۰۰۳	۱۰/۸	۶۲/۱۰	۲۰/۴۲	۳۶	۰/۳
SS.DD.۰۰۴	۱۴/۴	۷۷/۵۰	۱۸/۴۴	۳۶	۰/۴
SS.DD.۰۰۵	۱۸	۹۰/۰۰	۱۸	۳۶	۰/۵



شکل ۳. گروه اول: گنبد‌های دیامتیک تک‌لایه بدون ایجاد فرازش با نسبت‌های خیز به دهانه به ترتیب از چپ و بالا: ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵.



شکل ۴. تاشه‌های مربوط به گنبد‌های گروه ۲.



شکل ۵. تاشه‌های مربوط به گنبد‌های گروه ۳.

۳.۳. گنبد‌های گروه ۳: گنبد‌های دیامتیک تک‌لایه‌ی فرازش‌یافته با

خیز ثابت و دهانه‌ی متغیر در فرازش چلیکی

این گروه از گنبد‌ها، جهت بررسی اثرات تغییر هندسه‌ی فرازش ساخته شده‌اند. بدین منظور برای کلیه‌ی مدل‌های گروه ۳، گنبد پایه‌ی ثابت و یکسان در نظر گرفته شده و در حالی که خیز فرازش ثابت است، دهانه‌ی فرازش متغیر فرض شده است (شکل ۵). برای کلیه‌ی مدل‌ها در گروه ۳، گنبد پایه‌ی ۳ SS.DD.۰۰۳، که گنبد بهینه از

فرم عمومی تابع	پایه فرازش	مقطع فرازش
$baple(+3, cx1, cy1, cx2, cy2, s, h)$	مستطیلی	سه‌موی

شکل ۲. تابع استفاده‌شده در فرازش چلیک‌گونه [۲]

مؤلفه از این تابع بیان‌گر دگرگند سطح مقطع فرازش است. در این تابع $cx1$ ، $cy1$ و $cx2$ نشان دهنده‌ی ۴ نقطه و مشخص‌کننده‌ی دو راستای موازی فرازش‌ها، s پارامتر دهانه‌ی فرازش، و h خیز فرازش است.

۳. معرفی گنبد‌های مورد مطالعه

مدل‌سازی ریاضی، یک مدل مجازی از سازه‌ی واقعی است که رابطه‌ی بین اجزاء سازه، مشخصات مکانیکی، هندسه‌ی سازه، بارهای مؤثر و پاسخ سازه را تعیین می‌کند. در این نوشتار جهت بررسی اثر فرازش و تغییرات در هندسه‌ی گنبد‌های دیامتیک تک‌لایه، ۲۰ گنبد در ۴ گروه مختلف با استفاده از نرم‌افزار FORMIAN تاشه‌پردازی شده و سپس با استفاده از نرم‌افزار SAP۲۰۰۰ (Version ۱۴/۲) مورد تحلیل و طراحی قرار گرفته است. طبقه‌بندی و تعریف این گروه‌ها به نحوی بوده است که شرایط هندسی مختلف ممکن برای فرازش گنبد دیامتیک تک‌لایه پوشش داده شود. در ادامه، به معرفی گروه‌های مورد مطالعه پرداخته شده است.

۱.۳. گنبد‌های گروه ۱: گنبد‌های دیامتیک ساده

گروه اول شامل گنبد‌های دیامتیک ساده (بدون فرازش) است. منظور از مدل‌سازی این گروه بررسی گنبد‌های دیامتیک ساده به منظور انتخاب گنبد پایه برای اعمال فرازش و همچنین مقایسه‌ی نتایج پاسخ لرزه‌یی پس از اعمال فرازش و ایجاد تغییرات هندسی است. در گروه اول، دهانه‌ی گنبد‌ها به صورت ثابت ۳۶ متر بوده و سپس ۵ مدل با در نظر گرفتن نسبت‌های خیز به دهانه‌های ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ ساخته شده است (شکل ۳)، که پارامترهای هندسی آن‌ها در جدول ۱ موجود است (که در آن: H خیز، S طول دهانه، A زاویه‌ی روبش یا داخلی گنبد، و R شعاع گنبد است).

۲.۳. گنبد‌های گروه ۲: گنبد‌های تک‌لایه‌ی دیامتیک فرازش‌یافته با

نسبت‌های مختلف هندسی در گنبد پایه

در این گروه، از گنبد‌های گروه ۱ به عنوان گنبد پایه استفاده شده است، بدین صورت که دو فرازش با ابعاد ثابت برگنبد‌های گروه اعمال شده است. مشخصات هندسی گنبد‌های پایه و فرازش‌های ایجادشده در آنها در جدول ۲ ذکر شده است. هدف از تعریف گروه ۲، بررسی تأثیر هندسه‌ی گنبد پایه در پاسخ لرزه‌یی گنبد‌های تک‌لایه‌ی دیامتیک فرازش‌یافته با فرازش ثابت و یکسان است. در واقع، در گروه ۲، اثر افزایش خیز گنبد پایه در رفتار گنبد‌های فرازش یافته بررسی شده است (شکل ۴).

جدول ۲. نام‌گذاری و مشخصات هندسی گنبد‌های پایه و فرازش ایجاد شده در گنبد‌های گروه ۲.

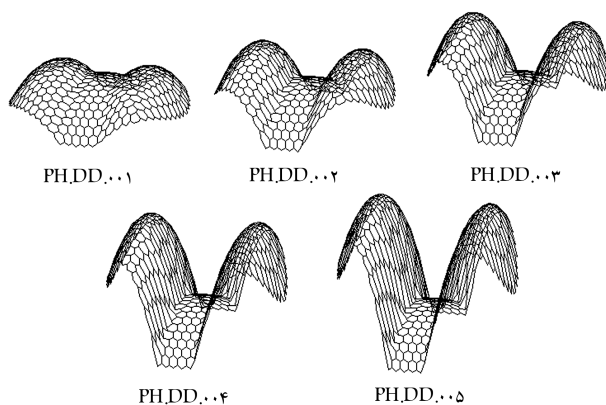
مشخصات فرازش		مشخصات گنبد پایه					شماره مدل
H(m)	S(m)	H/S	S(m)	R(m)	A (°)	H(m)	
۰٫۲R	۰٫۷R	۰٫۱	۳۶	۴۶٫۸	۲۲٫۵۰	۳٫۶	PP.DD.۰۰۱
۰٫۲R	۰٫۷R	۰٫۲	۳۶	۲۶٫۱	۴۳٫۶۰	۷٫۲	PP.DD.۰۰۲
۰٫۲R	۰٫۷R	۰٫۳	۳۶	۲۰٫۴	۶۲٫۱۰	۱۰٫۸	PP.DD.۰۰۳
۰٫۲R	۰٫۷R	۰٫۴	۳۶	۱۸٫۴	۷۷٫۵۰	۱۴٫۴	PP.DD.۰۰۴
۰٫۲R	۰٫۷R	۰٫۵	۳۶	۱۸	۹۰٫۰۰	۱۸	PP.DD.۰۰۵

جدول ۳. نام‌گذاری و مشخصات هندسی گنبد‌های پایه و فرازش ایجاد شده در گنبد‌های گروه ۳.

مشخصات فرازش			مشخصات گنبد پایه					شماره مدل
s/h	h(m)	s(m)	H/S	S(m)	R(m)	A (°)	H(m)	
۱	۰٫۲R	۰٫۲R	۰٫۳	۳۶	۲۰٫۴	۶۲٫۱۰	۱۰٫۸	PS.DD.۰۰۱
۲	۰٫۲R	۰٫۴R	۰٫۳	۳۶	۲۰٫۴	۶۲٫۱۰	۱۰٫۸	PS.DD.۰۰۲
۳	۰٫۲R	۰٫۶R	۰٫۳	۳۶	۲۰٫۴	۶۲٫۱۰	۱۰٫۸	PS.DD.۰۰۳
۴	۰٫۲R	۰٫۸R	۰٫۳	۳۶	۲۰٫۴	۶۲٫۱۰	۱۰٫۸	PS.DD.۰۰۴
۵	۰٫۲R	۱R	۰٫۳	۳۶	۲۰٫۴	۶۲٫۱۰	۱۰٫۸	PS.DD.۰۰۵

جدول ۴. نام‌گذاری و مشخصات هندسی گنبد‌های پایه و فرازش ایجاد شده در گنبد‌های گروه ۴.

مشخصات فرازش			مشخصات گنبد پایه					شماره مدل
h/s	H(m)	s(m)	H/S	S(m)	R(m)	A (°)	H(m)	
۱	۰٫۲R	۰٫۲R	۰٫۳	۳۶	۲۰٫۴۲	۶۲٫۱۰	۱۰٫۸	PH.DD.۰۰۱
۲	۰٫۴R	۰٫۲R	۰٫۳	۳۶	۲۰٫۴۲	۶۲٫۱۰	۱۰٫۸	PH.DD.۰۰۲
۳	۰٫۶R	۰٫۲R	۰٫۳	۳۶	۲۰٫۴۲	۶۲٫۱۰	۱۰٫۸	PH.DD.۰۰۳
۴	۰٫۸R	۰٫۲R	۰٫۳	۳۶	۲۰٫۴۲	۶۲٫۱۰	۱۰٫۸	PH.DD.۰۰۴
۵	۱R	۰٫۲R	۰٫۳	۳۶	۲۰٫۴۲	۶۲٫۱۰	۱۰٫۸	PH.DD.۰۰۵



شکل ۶. تاشه‌های مربوط به گنبد‌های گروه ۴.

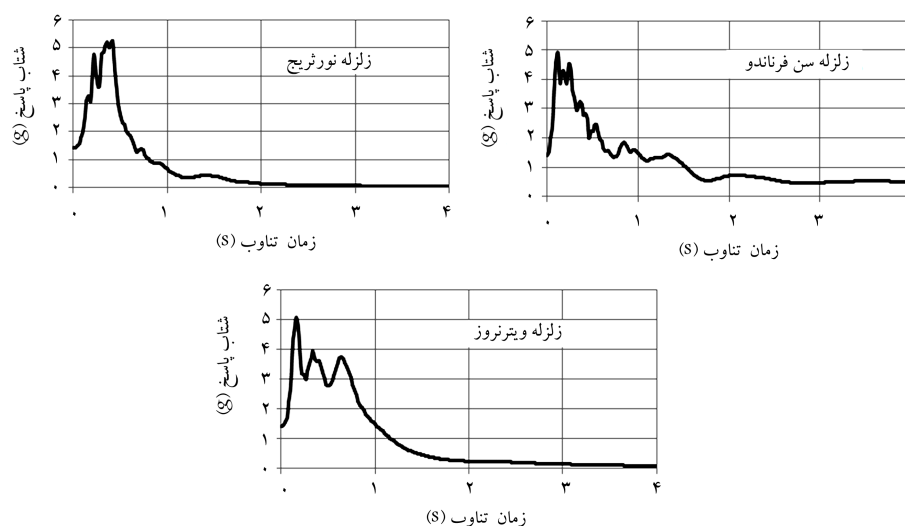
لحاظ وزنی در بین گنبد‌های گروه ۱ است، انتخاب شده است. نسبت‌های هندسی در فرازش چلیک‌گونه‌ی ایجاد شده متفاوت است، بدین صورت که اندازه‌ی خیز در فرازش ایجاد شده، ثابت و برابر ۰٫۲R است و دهانه‌ی فرازش با نسبت‌های ۰٫۲R، ۰٫۲R، ۰٫۶R، ۰٫۸R و ۱R در مدل‌ها افزایش می‌یابد. R شعاع گنبد پایه است. مشخصات هندسی این گروه از گنبد‌ها در جدول ۳ خلاصه شده است.

۴.۳. گنبد‌های گروه ۴: گنبد‌های دیامتیک تک‌لایه‌ی فرازش یافته با دهانه‌ی ثابت و خیز متغیر در فرازش چلیکی

این گروه از گنبد‌ها نیز جهت بررسی اثرات تغییر هندسه‌ی فرازش در رفتار سازه‌ی گنبد فرازش یافته مدل‌سازی شده‌اند. بدین صورت که اندازه دهانه‌ی فرازش ثابت، ولی خیز آن متغیر در نظر گرفته شده است. در گنبد‌های گروه ۴، نیز مطابق توضیحات ارائه شده در مورد گروه ۳، از گنبد SS.DD.۰۰۳ به عنوان گنبد پایه استفاده و نسبت‌های هندسی در گنبد پایه ثابت در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۶، در حالی که اندازه‌ی دهانه در فرازش ایجاد شده ثابت و برابر ۰٫۲R است، خیز فرازش با نسبت‌های ۰٫۲R، ۰٫۲R، ۰٫۶R، ۰٫۸R و ۱R در مدل‌ها افزایش می‌یابد (R شعاع گنبد پایه است). مشخصات هندسی این گروه از گنبد‌ها در جدول ۴ خلاصه شده است.

۴. روش آنالیز و فرضیات

به منظور بررسی عملکرد لرزه‌ی گنبد‌های معرفی شده، پاسخ سازه تحت آنالیز دینامیکی تاریخی‌چهی زمانی و به صورت غیرخطی مورد مطالعه قرار گرفته است. تحلیل دینامیکی تاریخی‌چهی زمانی با اثر دادن شتاب زمین به صورت تابعی از زمان در تراز پایه‌ی سازه و به کارگیری محاسبات متعارف دینامیک سازه‌ها انجام شده است.



شکل ۷. طیف ترکیبی پاسخ مؤلفه‌های افقی زلزله‌های استفاده‌شده.

- این تابع به صورت زوج‌های مرتب است، که یکی از درایه‌های آن زمان و دیگری معرف مقدار تابع تاریخچه‌ی زمانی است. هر زوج شتاب‌نگاشت، هم‌زمان در دو جهت عمود بر هم و در امتدادهای اصلی سازه و همچنین در جهت قائم اثر داده شده و بازتاب‌های سازه به صورت تابعی از زمان تعیین شده است. بازتاب نهایی سازه در هر لحظه‌ی زمانی برابر با بیشینه‌ی بازتاب‌های به دست آمده از تحلیل با ۳ زوج شتاب‌نگاشت مورد نظر است. تأثیر هندسه در بارگذاری بارهای ثقلی مفصلاً در پژوهشی بررسی^[۱۵] و از نتایج آن در نوشتار حاضر استفاده شده است.
- مشخصات زلزله‌های مورد استفاده در جدول ۵ عنوان شده است. جهت مقیاس‌کردن شتاب‌نگاشت‌ها براساس استاندارد ۲۸۰۰، سه زوج شتاب‌نگاشت معرفی شده به مقدار بیشینه‌ی خود مقیاس شده و سپس طیف پاسخ شتاب هر یک از زوج شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده با منظورکردن نسبت میرایی ۵٪ تعیین و طیف‌های پاسخ هر زوج شتاب‌نگاشت با استفاده از روش جذر مجموع مربعات با یکدیگر ترکیب و یک طیف ترکیبی واحد برای هر زوج ساخته شده است (شکل ۷). در ادامه، طیف پاسخ ترکیبی سه زوج شتاب‌نگاشت، متوسط‌گیری و در محدوده‌ی زمان‌های تناوب ۰/۲T و ۱/۵T با طیف طرح استاندارد که از حاصل ضرب مقادیر ضریب بازتاب ساختمان در پارامترهای نسبت شتاب مبنا و ضریب اهمیت ساختمان با فرض نسبت میرایی ۵٪ به دست می‌آید، مقایسه و ضریب مقیاس آن‌چنان تعیین شده است که در محدوده‌ی مذکور، مقادیر متوسط‌ها در هیچ حالت کمتر از ۱/۴ برابر مقدار نظیر آن در طیف استاندارد نباشد. ضریب مقیاس تعیین شده، در شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده (به مقدار بیشینه‌ی خود) ضرب شده و در تحلیل دینامیکی مورد استفاده قرار گرفته است.

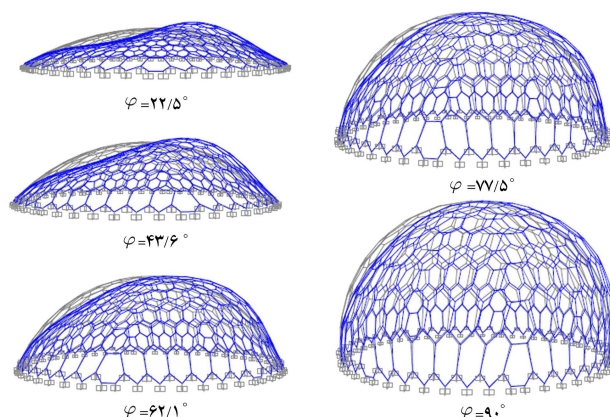
فرضیات در نظر گرفته‌شده در انجام آنالیزها به این شرح است:

جدول ۵. مشخصات زلزله‌های انتخاب‌شده.

شماره	نام زلزله	تاریخ	بزرگا (M)	بیشینه‌ی شتاب زمین (g)
۱	نورتریج	۱۹۹۴/۱/۱۷	۶/۷	۰/۲۴۵
۲	سن فرناندو	۱۹۷۱/۹/۲	۶/۶	۰/۲۱
۳	ویترنوز	۱۹۸۷/۱/۱۰	۶	۰/۲۴۳

۵. بررسی زمان تناوب و شکل مدی گنبدها

براساس نتایج حاصل از انجام آنالیز تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی به بررسی مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در رفتار دینامیکی گنبدهای معرفی شده یعنی زمان تناوب و شکل مدی پرداخته شده است. در شکل‌های ۸ الی ۱۱، شکل مدل‌های گروه گنبدهای مورد مطالعه نشان داده شده است، که در آن‌ها منظور از مد افقی آن است که سازه در جهت افقی، نرمی بیشتری دارد و در هنگام زلزله، عمده‌ی حرکت سازه در جهت افقی است. نتایج حاصل در هر گروه به این شرح است.



شکل ۸. مدل اول مدل‌های گنبدی گروه ۱.

۱.۵. گنبد‌های گروه ۱

مد اول گروه ۱ از گنبد‌ها در شکل ۸ و زمان تناوب اصلی آنها در جدول ۶ منعکس شده است، که مطابق آن، کمترین و بیشترین زمان تناوب گنبد‌ها به ترتیب مربوط به گنبد‌های SS.DD.۰۰۲ و SS.DD.۰۰۵ است. در مورد شکل مدی (مطابق شکل ۸)، حرکت مد اول برای مدل با زاویه‌ی پوشش $\varphi = 77/5^\circ$ و $\varphi = 90^\circ$ تقریباً به صورت افقی است، در حالی که برای $\varphi = 22/5^\circ$ و $\varphi = 43/6^\circ$ و $\varphi = 62/1^\circ$ یک حرکت دورانی راست‌گرد است، به طوری که هنگامی که رأس سازه به سمت راست می‌رود، سمت چپ آن به پایین و سمت راست به بالا حرکت می‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که خیز سازه یا زاویه‌ی پوشش آن نقش تعیین‌کننده‌ی در شکل حرکت مدی آن دارد و با بیشتر شدن H/S، حرکت از حالت دورانی به افقی تبدیل می‌شود.

۲.۵. گنبد‌های گروه ۲

نتایج مربوط به گنبد‌های گروه ۲ در شکل ۹ و جدول ۷ منعکس شده است، که مطابق آن کمترین و بیشترین زمان تناوب گنبد‌ها به ترتیب مربوط به گنبد‌های PP.DD.۰۰۳ و PP.DD.۰۰۵ است و با مقایسه‌ی گنبد‌های گروه ۱ و ۲ می‌توان چنین نتیجه گرفت که با ایجاد فرازش با ابعاد ثابت، همچنان بیشترین زمان تناوب مربوط به نسبت H/S برابر ۵/۰ است، ولی کمترین زمان تناوب مربوط به نسبت H/S برابر ۳/۰ است و همچنین می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که ایجاد فرازش در نسبت‌های پایین خیز به دهانه، نتیجه‌ی مطلوبی به صورت کمتر شدن زمان تناوب دارد.

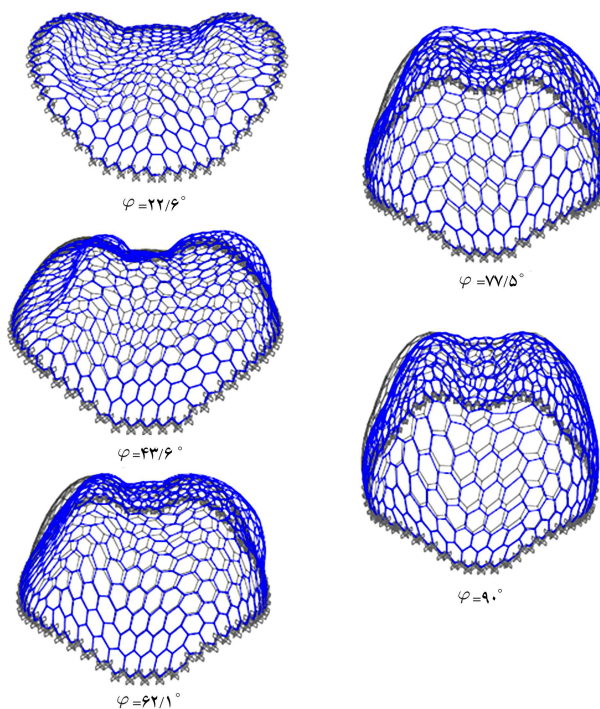
تأثیر فرازش ایجاد شده در شکل اول مدی در شکل ۹ نشان داده شده است، که مطابق آن حرکت مد اول برای مدل با زاویه‌ی پوشش $\varphi = 90^\circ$ در گنبد پایه، تقریباً به صورت افقی است؛ در حالی که برای $\varphi = 43/6^\circ$ و $\varphi = 62/1^\circ$ یک حرکت دورانی راست‌گرد است، به طوری که هنگامی که رأس سازه به سمت راست می‌رود، سمت چپ آن به پایین و سمت راست به بالا حرکت می‌کند و نهایتاً برای

جدول ۶. تناوب پایه‌ی گنبد‌های گروه ۱.

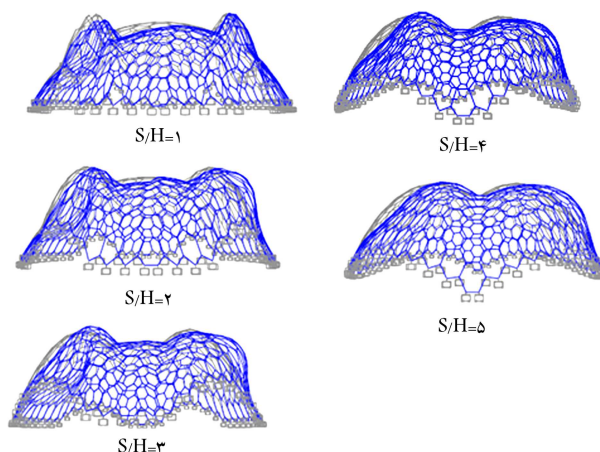
شماره مدل	$\varphi (^\circ)$	H/S (m)	T (s)
SS.DD.۰۰۱	۲۲/۶۰	۰/۱	۲/۴۸
SS.DD.۰۰۲	۴۳/۶۰	۰/۲	۲/۰۹
SS.DD.۰۰۳	۶۲/۱۰	۰/۳	۲/۲۳
SS.DD.۰۰۴	۷۷/۵۰	۰/۴	۲/۴۱
SS.DD.۰۰۵	۹۰/۰۰	۰/۵	۲/۷۹

جدول ۷. تناوب پایه‌ی گنبد‌های گروه ۲.

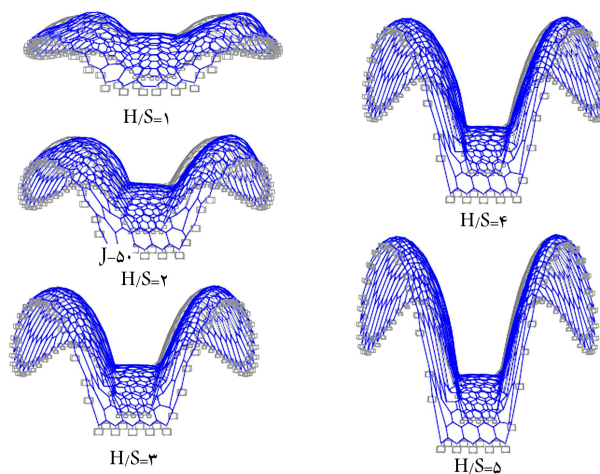
شماره مدل	$\varphi (^\circ)$	H/S (m)	T (s)
PP.DD.۰۰۱	۲۲/۶۰	۰/۱	۱/۹۳
PP.DD.۰۰۲	۴۳/۶۰	۰/۲	۱/۶۶
PP.DD.۰۰۳	۶۲/۱۰	۰/۳	۱/۳۶
PP.DD.۰۰۴	۷۷/۵۰	۰/۴	۲/۵۶
PP.DD.۰۰۵	۹۰/۰۰	۰/۵	۲/۹۶



شکل ۹. مد اول مدل‌های گنبدی گروه ۲.



شکل ۱۰. مد اول مدل‌های گنبدی گروه ۳.



شکل ۱۱. مد اول مدل‌های گنبدی گروه ۴.

می‌توان چنین گفت که در این گروه از گنبد‌ها با افزایش نسبت خیز به دهانه در فرازش، زمان تناوب نیز افزایش می‌یابد. تأثیر تغییر نسبت خیز به دهانه‌ی فرازش در گنبد در شکل‌های مدی را می‌توان در شکل ۱۱ ملاحظه کرد.

مطابق شکل ۱۱، حرکت مد اول برای مدل با نسبت خیز به دهانه‌ی ۱ و ۲ در فرازش، یک حرکت دورانی راست‌گرد است، در حالی که برای نسبت‌های ۳، ۴ و ۵ شکل مدی اول یک حرکت افقی است.

۶. تعیین مد مؤثر

مشارکت جرمی در دینامیک سازه بیان‌گر میزان دخالت جرم در یک مد بخصوص است. در سازه‌های معمولی، مد اول سازه غالباً بیشترین انرژی را به خود اختصاص می‌دهد و مشارکت مدهای دیگر بسیار اندک است. درصد وزن مد اول ساختمان‌های تا 10° طبقه بیش از 85% ، و وزن مد دوم حدود 9% است. پس میزان مشارکت دو مد اول ساختمان‌های مذکور در ارتعاش سازه جمعاً 94% و سهم همه‌ی مدهای دیگر روی هم کمتر از 6% بوده است. برعکس در سازه‌های فضاکار، گاهی مدهای بالاتر نیز سهم مؤثری در پاسخ دینامیکی سازه دارند. میزان این تأثیر به هندسه‌ی سازه بستگی دارد. به عنوان مثال در پژوهشی در سال ۱۹۹۷، در بررسی رفتار گنبد‌های دولا به این نتیجه به دست آمده است که مد مؤثر سازه‌های مذکور به نسبت خیز به دهانه و یا زاویه‌ی پوشش گنبد بستگی دارد، و مد مؤثر گنبد‌های با زوایای پوشش 30° ، 45° و 60° برابر مد 37^{Am} ، 30^{Am} و 18^{Am} است. بنابراین چنین نتیجه شده است که میزان تأثیر مد اول مانند سازه‌های معمولی نبوده است و مدهای بالا نیز سهم قابل توجهی در پاسخ دینامیکی داشته‌اند.^[۱۶]

مقادیر اشتراک جرمی در مدهای مختلف برای گنبد‌های مورد مطالعه در این پژوهش که از طریق نرم‌افزار محاسبه شده است، در شکل‌های ۱۲ الی ۱۵ نشان داده شده است. این مدها بر حسب بزرگی دوره‌ی تناوب ارتعاشی مرتب و مدهایی که درصد اشتراک جرمی آنها کمتر از 1% بوده است، کنار گذاشته شده‌اند.

با توجه به درصد اشتراک مدها در یک گنبد می‌توان در مورد اینکه مدهای حاکم، مدهای افقی و یا مدهای قائم هستند، نتیجه‌گیری کرد و بدین مفهوم می‌توان بررسی کرد که در گنبد مذکور، سختی محوری یا سختی خمشی اعضا وارد عمل می‌شود. دلیل دیگر بررسی درصد اشتراک مدها این است که به طور مثال در مناطقی که مؤلفه‌ی قائم زلزله در آنجا اهمیت دارد، از گنبدی استفاده شود که در مؤلفه‌ی قائم زلزله مقاوم‌تر باشد و یا به عبارت بهتر، از فرازش و هندسه‌ی استفاده شود که در هنگام ارتعاش، درصد اشتراک مدهای قائم آن بیشتر باشد.

۱.۶. گنبد‌های گروه ۱

با توجه به شکل ۱۲ و گنبد $SS.DD.001$ می‌توان چنین نتیجه گرفت که اگرچه مدهای ابتدایی به صورت افقی هستند و بیشترین مقدار درصد اشتراک را دارند، ولی شرکت مدهای قائم و همچنین مدهای بالاتر قابل توجه است. این موضوع را می‌توان به دلیل خیز کم و مسطح بودن گنبد‌های گروه ۱ دانست و همچنین در ادامه، با توجه به روند تغییرات خیز و دیاگرام درصد اشتراک مدها می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که با افزایش خیز گنبد از درصد اشتراک مدهای قائم و همچنین مدهای بالاتر کاسته شده و درصد اشتراک مدهای افقی و پایین‌تر افزایش یافته است.

$\varphi = 77.5^\circ$ ، حرکتی بینابین میان دورانی افقی است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که خیز گنبد پایه یا زاویه‌ی پوشش آن در این گروه از گنبد‌ها نیز نقش تعیین‌کننده‌ی در شکل حرکت مدی آنها دارد.

۳.۵. گنبد‌های گروه ۳

در گنبد‌های گروه ۳، تأثیر تغییر دهانه‌ی فرازش با خیز ثابت در خواص دینامیکی سازه بررسی شده است، که نتایج آن در شکل 10° و جدول ۸ منعکس شده است. مطابق جدول مذکور، کمترین و بیشترین زمان تناوب گنبد‌ها به ترتیب مربوط به گنبد‌های $PS.DD.001$ و $PS.DD.005$ است و با توجه با این موضوع می‌توان چنین گفت که با افزایش نسبت s/h در فرازش ایجاد شده، زمان تناوب سازه کاهش می‌یابد.

مطابق شکل 10° ، حرکت مد اول برای مدل با نسبت دهانه‌ی به خیز برابر ۱ در فرازش، یک حرکت دورانی راست‌گرد است، به طوری که هنگامی که رأس سازه به سمت راست می‌رود، سمت چپ آن به پایین و سمت راست به بالا حرکت می‌کند، در حالی که برای نسبت‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ شکل مدی اول یک حرکت افقی است. با توجه به این موضوع می‌توان چنین گفت که نسبت فرازش برابر ۱، تأثیری در شکل مدی گنبد ندارد و این شکل مطابق همان شکل مدی گنبد پایه است، ولی با افزایش این نسبت شکل مدی دچار تغییرات می‌شود.

در این گروه از گنبد‌ها در حالی که خیز فرازش ثابت است، دهانه‌ی آن در مدل‌ها افزایش می‌یابد، که می‌توان آثار این تغییر را چنین تفسیر کرد که با افزایش s/h در فرازش، انحنای تغییر مکان افقی آنها کمتر شده است.

۴.۵. گنبد‌های گروه ۴

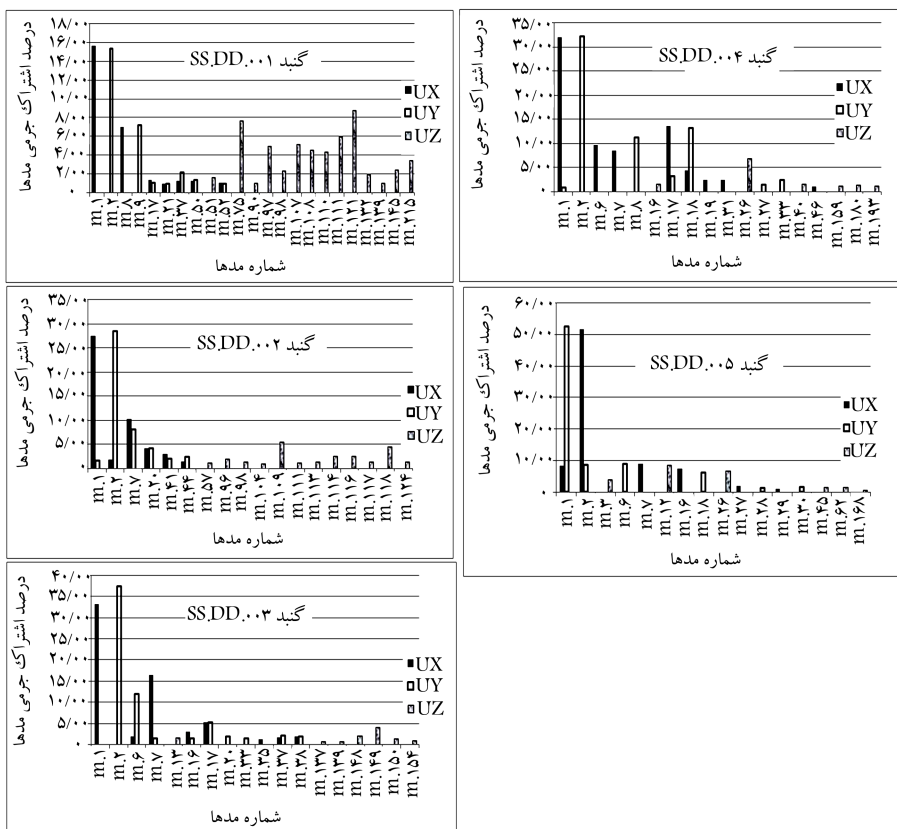
تأثیر تغییر خیز فرازش در خواص دینامیکی، در حالی که دهانه‌ی آن ثابت است، در گنبد‌های گروه ۴ بررسی شده است، که نتایج آن در شکل ۱۱ و جدول ۹ منعکس شده است. مطابق جدول مذکور، کمترین و بیشترین زمان تناوب گنبد‌ها به ترتیب مربوط به گنبد‌های $PH.DD.001$ و $PH.DD.005$ است و با توجه به این موضوع

جدول ۸. تناوب پایه‌ی گنبد‌های گروه ۳.

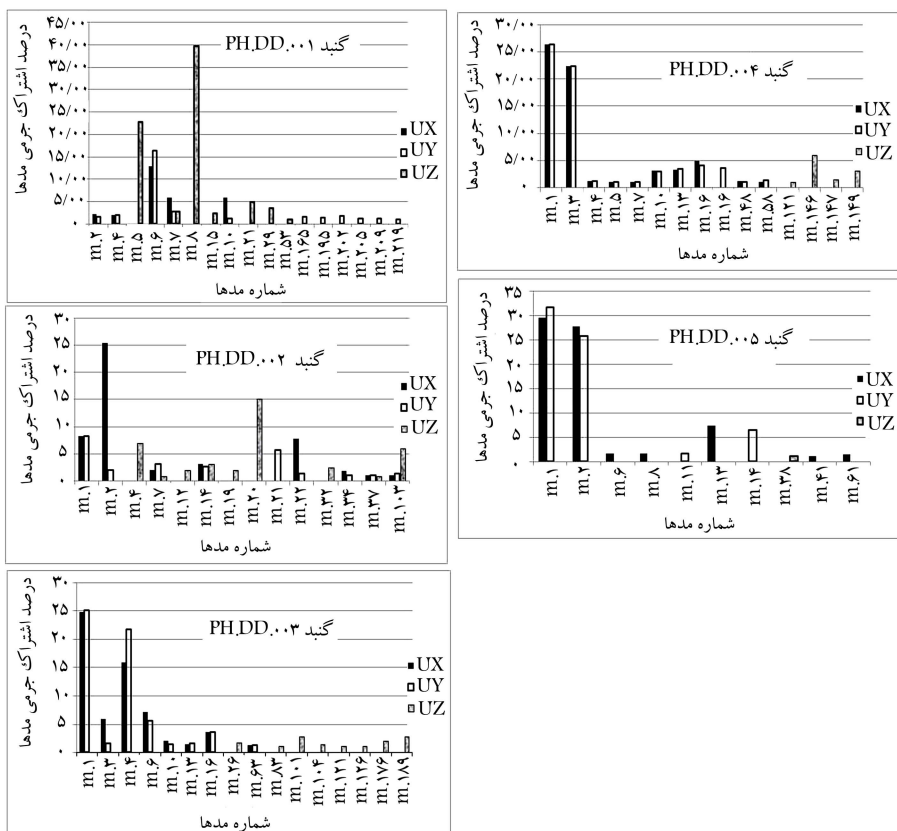
شماره مدل	$\varphi (^\circ)$	$s/h (m)$	$T (s)$
PS.DD.001	62.10°	۱	۲/۱
PS.DD.002	62.10°	۲	۱/۸
PS.DD.003	62.10°	۳	۱/۷۳
PS.DD.004	62.10°	۴	۱/۲۸
PS.DD.005	62.10°	۵	۱/۲۱

جدول ۹. تناوب پایه‌ی گنبد‌های گروه ۴.

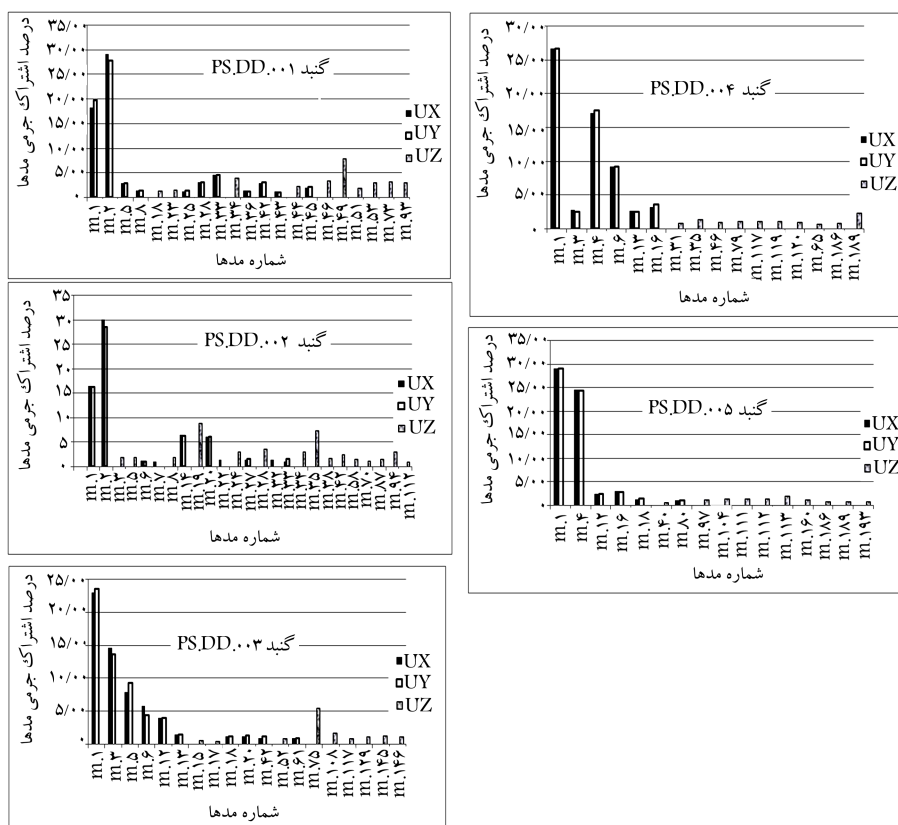
شماره مدل	$\varphi (^\circ)$	$s/h (m)$	$T (s)$
PH.DD.001	62.10°	۱	۱/۵
PH.DD.002	62.10°	۲	۱/۷۳
PH.DD.003	62.10°	۳	۲/۲۷
PH.DD.004	62.10°	۴	۲/۴۹
PH.DD.005	62.10°	۵	۲/۵۴



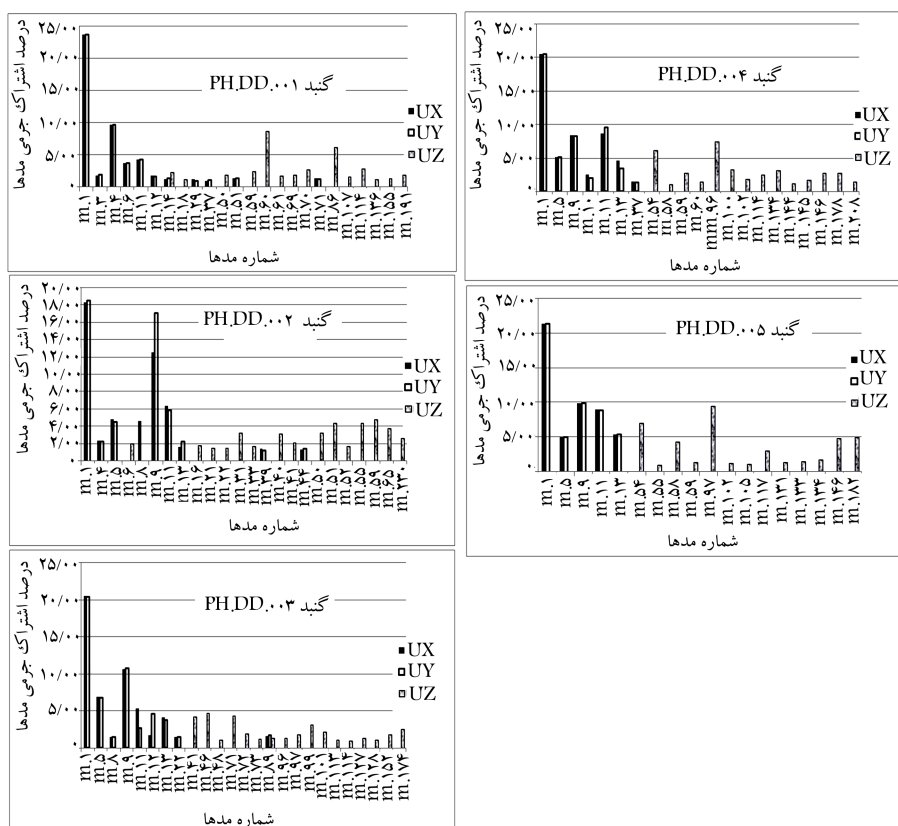
شکل ۱۲. درصد اشتراک جرمی گنبد‌های گروه ۱.



شکل ۱۳. درصد اشتراک جرمی گنبد‌های گروه ۲.



شکل ۱۴. درصد اشتراک جرمی گنبد های گروه ۳.



شکل ۱۵. درصد اشتراک جرمی گنبد های گروه ۴.

۲.۶. گنبدهای گروه ۲

با توجه به شکل ۱۳ و نتیجه‌ی عنوان‌شده در مورد گنبد SS.DD.۰۰۱ در گروه ۱، می‌توان در این گروه نیز در گنبد PP.DD.۰۰۱ مشاهده کرد که به دلیل خیز کم و تقریباً مسطح بودن، مدهای قائم نسبت اشتراک بیشتری دارند و درصد اشتراک مدهای افقی کمتر از مدهای قائم است و همچنین می‌توان به اشتراک مدهای قائم در مدهای پایین‌تر اشاره کرد، که دلیل آن ایجاد فرازش در گنبدهای گروه ۲ است. در ادامه، با توجه به روند تغییرات خیز و درصد اشتراک مدها می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که با افزایش خیز گنبد از درصد اشتراک مدهای قائم و همچنین مدهای بالاتر کاسته شده و درصد اشتراک مدهای افقی و پایین‌تر افزایش یافته است.

۳.۶. گنبدهای گروه ۳

گنبدهای این گروه با ایجاد فرازش در گنبد SS.DD.۰۰۳ به وجود آمده است. با توجه به این موضوع و همچنین با در نظر گرفتن شکل ۱۴ و گنبد PS.DD.۰۰۱ می‌توان چنین گفت که با ایجاد فرازش از درصد اشتراک مدهای افقی کاسته و به درصد اشتراک مدهای قائم افزوده شده است. در ادامه، با افزایش دهانه‌ی فرازش ایجاد شده به تدریج درصد اشتراک مدهای افقی افزایش و درصد اشتراک مدهای قائم کاهش یافته است. همچنین می‌توان به گسترش بیشتر دامنه‌ی مدها پس از اعمال فرازش اشاره کرد.

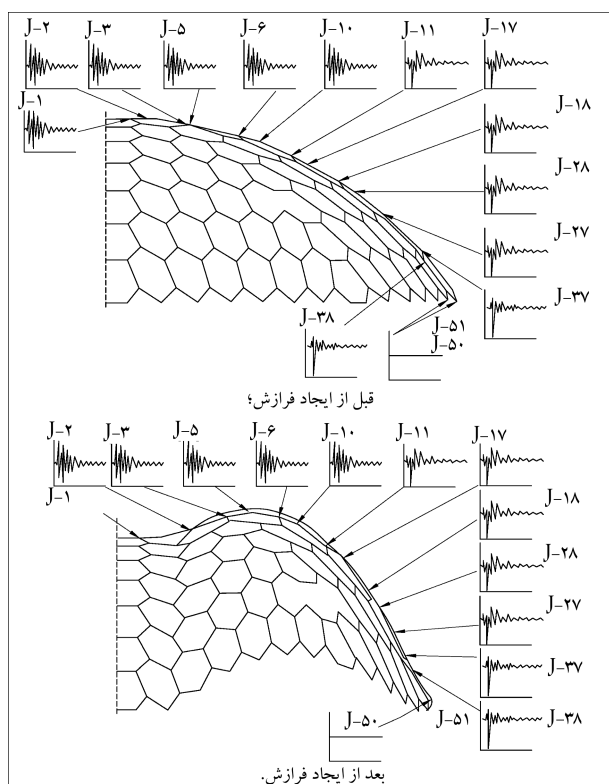
۴.۶. گنبدهای گروه ۴

گنبدهای این گروه با ایجاد فرازش در گنبد SS.DD.۰۰۳ به وجود آمده‌اند. با توجه به این موضوع و همچنین با در نظر گرفتن شکل ۱۵ و گنبد PH.DD.۰۰۱ می‌توان چنین گفت که با ایجاد فرازش در این گنبدها از درصد اشتراک مدهای افقی کاسته و به درصد اشتراک مدهای قائم افزوده شده است. اما در ادامه، با افزایش ارتفاع فرازش ایجاد شده، به تدریج درصد اشتراک مدهای افقی افزایش و درصد اشتراک مدهای قائم کاهش یافته است و همچنین می‌توان به گسترش بیشتر دامنه‌ی مدها اشاره کرد.

۷. بررسی تغییر مکان‌های جانبی

ناپایداری یکی از مهم‌ترین عواملی است که ظرفیت باربری و تغییر شکل سازه را محدود می‌کند و نقش بنیادی در طراحی سازه دارد. علی‌رغم این واقعیت که امروزه هزاران سازه‌ی فضاکار مهم در جهان ساخته می‌شود، مسئله‌ی ناپایداری در سازه‌های فضاکار هنوز به طور رضایت‌بخشی حل نشده است و اکنون نیز کارهای پژوهشی فراوانی در ارتباط با ناپایداری و تحلیل خرابی سازه‌های فضاکار انجام می‌شود. [۱۷-۱۹]

با توجه به حساسیت مسئله‌ی ناپایداری گره‌ی سازه‌های فضاکار، برای بررسی اینکه ایجاد فرازش چه اثری در تغییر مکان‌های گره‌ی دارد و کدام نقطه از گنبد از لحاظ ناپایداری بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد، یک مقطع از گنبد مربوط به محل ایجاد فرازش انتخاب شده و مورد بررسی قرار گرفته است. این مقطع در گنبد قبل و پس از ایجاد فرازش در شکل ۱۶ نشان داده شده است، که در آن نقاط اتصال گره‌ی و شماره‌ی نقاط مذکور، که در بررسی تغییر شکل‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند، نشان داده شده است. همچنین برای



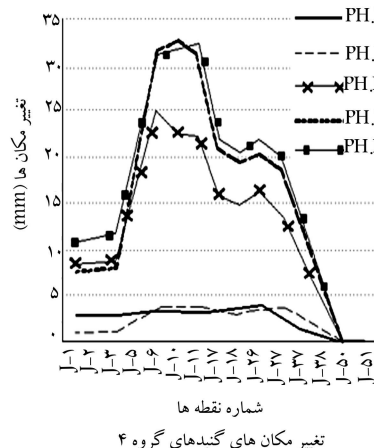
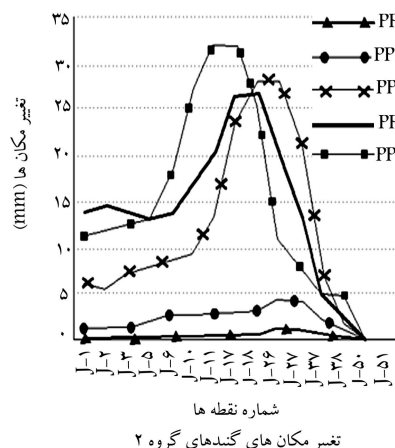
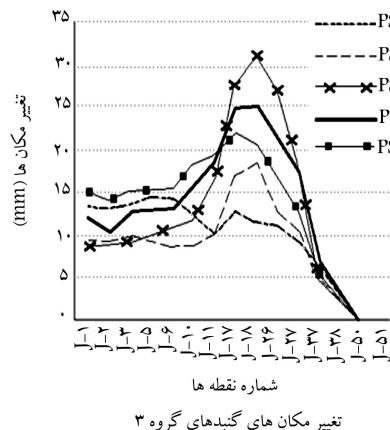
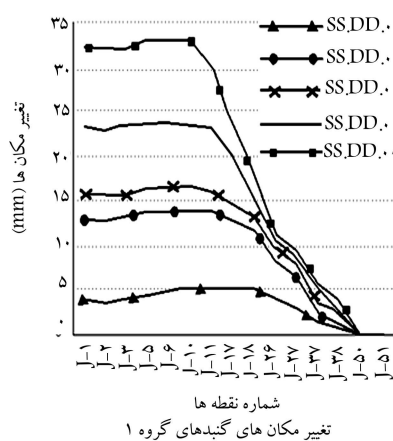
شکل ۱۶. محل قرارگیری نقاط در ارتفاع گنبدها.

نمونه در شکل ۱۶، تغییر مکان گره‌های منتخب در طول زلزله نشان داده شده است. لذا با داشتن نقاط مذکور و تغییر مکان‌های پیشینه‌ی گره‌ی آنها، که از تحلیل گنبدها تحت زلزله‌های مختلف به دست آمده‌اند، نمودارهای شکل ۱۷ به دست آمده است، که با توجه به آن‌ها و مقایسه‌ی آن‌ها، این موارد قابل بیان هستند:

در گنبدهای گروه ۱ می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که با حرکت از تکیه‌گاه‌های گنبد به سمت رأس آن تغییر مکان‌ها افزایش می‌یابد و نهایتاً در رأس گنبد دوباره ثابت می‌شود. همچنین با افزایش نسبت خیز به دهانه، تغییر مکان‌ها افزایش می‌یابد. در گروه گنبدهای ۱، گنبد SS.DD.۰۰۱ کمترین و گنبد SS.DD.۰۰۵، بیشترین تغییر مکان‌ها را داشته‌اند.

با مقایسه‌ی گنبدهای گروه ۱ و ۲ می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که ایجاد فرازش باعث افزایش تغییر مکان‌ها به صورت موضعی و در محل ایجاد فرازش در گنبدهای ۴ و ۵، و SS.DD.۰۰۳ و باعث کاهش کلی تغییر مکان‌ها در گنبدهای ۱ و ۲، گنبد SS.DD.۰۰۱ شده است. در این گروه از گنبدها نیز PP.DD.۰۰۱، کمترین و گنبد PP.DD.۰۰۵، بیشترین تغییر مکان را داشته‌اند. در گنبدهای گروه ۳ می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که افزایش دهانه در فرازش ایجاد شده باعث افزایش تغییر مکان‌ها تا نسبت $s/h = 3$ و پس از آن باعث کاهش تغییر مکان‌ها شده است. در این گروه از گنبدها، گنبد PS.DD.۰۰۳ بیشترین و گنبد PS.DD.۰۰۱ کمترین تغییر مکان در محل فرازش را داشته‌اند.

در گنبدهای گروه ۴ می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که افزایش خیز در فرازش ایجاد شده باعث افزایش تغییر مکان‌ها به صورت موضعی (محل ایجاد فرازش) در گنبدهای ۴ و ۵، گنبد SS.DD.۰۰۳ و باعث کاهش کلی تغییر مکان‌ها در گنبدهای ۱ و ۲، گنبد SS.DD.۰۰۱ شده است.



شکل ۱۷. تغییر مکان های گنبد های گروه ۱ الی ۴.

۵ گنبد گروه ۳، نسبت خیز به ارتفاع مربوط به مدل ۵، منجر به کمترین وزن شده است.

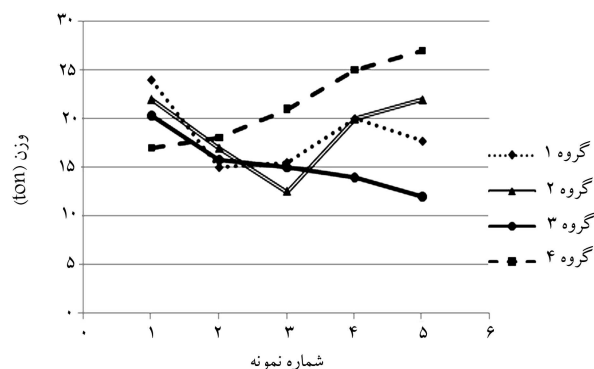
۹. نتیجه گیری

در این نوشتار رفتار گنبد های دیامتیک فرازیده ی تک لایه تحت بارگذاری لرزه یی مورد بررسی قرار گرفته است. این بررسی شامل مدل سازی ۲۰ نمونه ی گنبد دیامتیک تک لایه در ۴ گروه بوده است، که شامل ۱ گروه گنبد های ساده و ۳ گروه گنبد های فرازش یافته است. فرازش در نظر گرفته شده از نوع فرازش چلیک گونه ی سهموی شکل بوده است، که بهترین تطابق را با فرم گنبد های تک لایه ی دیامتیک دارد.

به منظور بررسی پارامترهای مؤثر در رفتار دینامیکی گنبد های معرفی شده تحت بار دینامیکی زلزله، از آنالیز تاریخچه ی زمانی غیرخطی استفاده و نتایج حاصل در قالب شکل های مدی و درصد اشتراک مد ها بررسی شده است.

به عنوان مهم ترین نتایج حاصل، می توان به اختصار به این موارد اشاره کرد: تغییر شکل های به دست آمده تحت بار زلزله نشان می دهد که کنترل ناپایداری، معیار اصلی طراحی گنبد ها است و با انتخاب فرازش مناسب می توان وضعیت تغییر شکل ها را بهبود داد.

به طور کلی نوشتار حاضر بیان گر موضوع هندسه و اهمیت آن در بهینه یابی وزنی گنبد ها است و در این رابطه می توان چنین نتیجه گیری کرد که از عامل فرازش جهت کاهش وزن و بهینه یابی وزنی گنبد ها به خصوص در مناطقی با خطر لرزه خیزی زیاد می توان استفاده ی مطلوبی داشت.



شکل ۱۸. رفتار گروه های مختلف گنبد ها تحت بارگذاری زلزله.

۸. بررسی رفتار وزنی گنبد ها

رفتار وزنی ۲۰ گنبد مورد مطالعه در این پژوهش در بارگذاری $D + L + E$ (ترکیب بار مرده، زنده، و زلزله) در شکل ۱۸ نشان داده شده است، که محور قائم آن، وزن گنبد و محور افقی آن، شماری مدل های مختلف را نشان می دهد. با توجه به شکل مذکور می توان چنین نتیجه گیری کرد که در بین ۲۰ گنبد ذکر شده در بارگذاری زلزله، گنبد های گروه ۳ از لحاظ وزنی رفتار بهتری نسبت به سایر گروه ها داشته و در بین

منابع (References)

1. Technology Performance Adjutancy, *Design of Space Frame Structures Code*, Publication 400, President Planning Adjutancy (2004).
2. Nooshin, H., *Formex Configuration Processing in Structural Engineering*, Spon Press, London (1990).
3. Nooshin, H. and Moghimi, M. "Formax formulation of freeform structural surfaces", *Asian Journal of Civil Engineering*, **8**(4), pp. 459-469 (2007).
4. Saka, M.P. "Dynamic effects of member failure on response of space frame", *International Journal of Space Structures*, **8**, pp. 189-901 (1997).
5. Karamanos, A.S. "Seismic design of double-layer space grids and their supports", *Proceeding of Space Structures*, **4**, Guildford, pp. 476-484 (1993).
6. Grigorian, M. "Performance control for efficient design of double-layer grids under uniform loading", *International Journal of Advanced Structural Engineering*, **6**(1), pp. 1-13 (April 2014).
7. Kunieda, H. "Earthquake response of roof shells", *International Journal of Space Structures*, **12**(3-4), pp. 149-159 (1997).
8. Hajirasouliha, I., Pilakoutas, K. and Moghaddam, H. "Topology optimization for the seismic design of truss-like structures", *Computers and Structures*, **89**(7-8), pp. 702-711 (2011).
9. Kato, S. and Murata, M. "Dynamic elastoplastic buckling simulation system for single layer reticular domes with semi-rigid connection under multiple loadings", *International Journal of Space Structures*, **12**(3-4), pp. 161-172 (1997).
10. Kato, S. and Mukaiyama, T. "Study of dynamic collapse of single layer reticular domes subjected to earthquake motion and estimation of equivalent seismic forces", *International Journal of Space Structures*, **12**(3-4), pp. 191-203 (1997).
11. Fan, F. and Shen, S.Z. "Study of the dynamic strength of reticulate domes under severe earthquake loading", *International Journal of Space Structures*, **20**, pp. 235-244 (2009).
12. Valipour, M. and Sadeghi, A. "Investigation on the effects of depth-to-span ratio of tensegrity flat grids on their seismic behavior", *International Journal of Space Structures*, **26**, pp. 59-70 (2011).
13. Yang, Y., Spenser, B. and Li, Y. "Seismic performance of double layer spherical reticulated bar type dampers", *International Journal of Space Structures*, **26**(1), pp. 31-44 (2011).
14. Sedighian, T. "Providing a model for assessment of horizontal and vertical earthquake effects on the double-layer barrel vaults in space structures", *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, **5**(01), pp. 1-5 (2013).
15. Haghani, R. "Parametric study on structural behavior of pellevated diamatic domes for determination of optimum geometry", Master Thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Chapter 5 (2014).
16. Saka, M.P. and Kameshki, E.S. "Optimum design of non-linear elastic framed domes", *Advances in Engineering Software*, **29**(7-9), pp. 519-528 (1997).
17. Davies, G. and Neal, B. "An experimental examination the dynamical behavior of a strut in a rigidly-jointed truss framework", *Proceeding of Royal Society*, **A274**(1357), pp. 225-238 (1963).
18. Collins, I.M. "An investigation into the collapse behavior of double layer grids", *In Proceeding of the Third International Conference on Space Structures*, pp. 400-405 (1984).
19. Gioncu, V. and Lenza, P. "Propagation of local buckling in reticulated shells", *In Proceedings of the Fourth International Conference on Space Structure*, pp. 147-155 (1993).