

نوع مقاله: یادداشت فنی

چکیده

طراحی لرزه‌ای سازه‌های فضاکار به دلیل تفاوت رفتار دینامیکی آنها با سازه‌های معمول، اهمیت بالایی دارد. میرایی به‌عنوان یکی از شاخص‌های اصلی تحلیل دینامیکی می‌تواند نقش مهمی در پاسخ لرزه‌ای سازه داشته باشد. در این پژوهش قصد بر آن است که نتایج طراحی لرزه‌ای گنبد‌های فضاکار تک‌لایه با طیف‌های طراحی دارای میرایی‌های ۲ و ۵ درصد مقایسه گردد. به دلیل تأثیر چینش گوناگون اعضا در رفتار دینامیکی این سازه‌ها، سه گنبد دیامتیک، اشودلر و لملا در این پژوهش بررسی می‌شوند. طراحی لرزه‌ای گنبد‌ها با استفاده از تحلیل دینامیکی طیفی و بر اساس آیین‌نامه ASCE7-16 انجام شده است. نیروی قائم زلزله تأثیر قابل توجهی در رفتار لرزه‌ای گنبد‌ها دارد؛ بنابراین در این پژوهش مؤلفه قائم زلزله نیز لحاظ شده است. نتایج نشان می‌دهد هنگامی که از میرایی ۲ درصد استفاده می‌شود، در مقایسه با استفاده از میرایی ۵ درصد، مقادیر نسبی کاهش جابه‌جایی نوک گنبد و مقدار تنش بحرانی برای سه گنبد بررسی شده ثابت نبوده و بر اساس نوع گنبد این مقادیر می‌توانند متفاوت باشند. نتایج این پژوهش می‌تواند نکات ارزشمندی را در اختیار طراح سازه برای انتخاب میرایی گنبد‌ها قرار دهد، چراکه میرایی طیف طرح در اغلب آیین‌نامه‌های طراحی مرسوم ۵ درصد است که بیشتر برای سازه‌های معمول به کار می‌رود.

واژگان کلیدی: گنبد فضاکار، میرایی، طراحی لرزه‌ای، تحلیل دینامیکی طیفی.

بررسی اثر میرایی طیف در طراحی لرزه‌ای گنبد‌های فضاکار تک‌لایه با استفاده از تحلیل دینامیکی طیفی

فاطمه داودی جم

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران،
دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

پویا زکیان (نویسنده مسئول)

دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی،
دانشگاه اراک، اراک، ایران، p-zakian@araku.ac.ir

علی کمیزی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران،
دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

۱- مقدمه

ساخت گنبد‌ها به‌عنوان نوع خاصی از این سازه‌ها به‌دوران باستان بازمی‌گردد. در سال‌های اخیر استفاده از این نوع سازه‌ها در ساخت اماکن عمومی مانند استادیوم‌ها، نمایشگاه‌ها، مراکز خرید و ایستگاه‌های راه‌آهن افزایش یافته است. گنبد‌های فضاکار به دلیل سبک بودن، نیاز به مصالح کمتری دارند که این عامل خود موجب بهبود صرفه اقتصادی آنها شده است. افزون بر این، سختی و نامعینی بالای این نوع از سازه‌ها، علاقه و توجه مهندسیین طراح را به خود جلب کرده است (Carbas & Artar, 2022). مهندسیین گاهی به‌منظور سهولت مدل دو بعدی سازه‌ها را بررسی می‌کنند. این فرضیه تنها برای برخی از سازه‌ها که رفتار صفحه‌ای دارند، صادق است اما در گنبد‌های فضاکار، به دلیل عملکرد کاملاً سه‌بعدی، قابل قبول نیست.

سازه‌های فضاکار، سازه‌هایی مناسب به‌منظور پوشش فضاهای بزرگ بدون استفاده از ستون‌های داخلی هستند. این سازه‌ها انواع مختلفی مانند مشبک، غشایی و کابلی دارند که گنبد‌ها از سازه‌های فضاکار مشبک به‌شمار می‌آیند. این سازه‌ها می‌توانند به دو روش پیش‌ساخته و ساخت درجا، اجرا شوند. سازه‌های فضاکار دارای فرم منحنی در فضا هستند و از اعضای تکرار شونده و شبیه به هم تشکیل شده‌اند. این نوع از سازه‌ها از مصالح مختلفی از جمله چوب، فولاد، آلومینیوم و... تشکیل شده‌اند که از کاربردی‌ترین آنها می‌توان به فولاد، به‌عنوان مصالح سازه‌ای، اشاره کرد. همچنین طیف وسیعی از مصالح غیرسازه‌ای وجود دارد که به‌عنوان پوشش سقف گنبد‌ها از آنها استفاده می‌شود (Jalalvandi et al., 2024).

گنبدهای خرپایی دولایه را در معرض حرکات زلزله بررسی کرد. همچنین این گنبدها با اشکال متقارن و نامتقارن تحت بار لرزه‌ای عمودی و افقی نیز بررسی شدند. او روشی برای محاسبه بار لرزه‌ای با استفاده از روش طیف پاسخ پیشنهاد داد و اعتبار آن را در مقایسه با تحلیل تاریخچه زمانی بررسی نمود و به دقت مطلوبی در مقایسه با تحلیل تاریخچه زمانی رسید. سان و همکارانش (Sun et al., 2014) رفتار دینامیکی یک پوسته مشبک تک‌لایه را ارزیابی کردند. آنها برای نزدیک کردن شرایط به واقعیت، اتصالات را به صورت نیمه‌صلب در نظر گرفتند تا سختی اتصال وابسته به سختی خمشی آن باشد. آنها ابتدا تحلیل فرکانس‌های طبیعی گنبد را بر اساس چندین پارامتر مختلف از جمله سختی اتصال، نسبت افزایش ارتفاع به دهانه و نقص هندسی اولیه، انجام دادند و در نهایت، ضرایب نیروی داخلی لرزه‌ای را برای پوسته‌های مشبک تک‌لایه کروی با اتصالات نیمه‌صلب تحت یک زلزله معمولی به دست آوردند. پیلارسکا و مالسکا (Pilarska & Maleska, 2021) دو گنبد ژئودزیک را تحت بارهای لرزه‌ای به کمک تحلیل تاریخچه زمانی و روش المان محدود تحلیل و طراحی کردند.

در طی این مطالعه، بیشینه جابه‌جایی، نیروی محوری، سرعت و شتاب گنبدهای طراحی شده بررسی شد. ژانگ و همکارانش (Zhang et al., 2021) به کمی‌سازی عدم قطعیت‌ها در سازه‌های با مقیاس بزرگ و هندسه پیچیده پرداختند. آنها یک روش احتمالاتی مبنی بر روش المان محدود را توسعه دادند که نتیجه آن برای دستیابی به پاسخ لرزه‌ای سازه با دقت بالاتر، تحت زلزله‌های با سطح شدت مختلف، کاربردی است. کاتو و همکاران (Kato et al., 1997) پارامترها و مشخصه‌های دینامیکی گنبد مشبک تک‌لایه را در معرض شتاب‌نگاشت‌های افقی بررسی کردند. آنها چگونگی اندازه‌گیری نیروی لرزه‌ای استاتیکی سازه فضاکار گنبدی با ارتفاع‌های متفاوت و همچنین شتاب فروریزش آن را مشخص کردند. بر اساس نتایج، شتاب فروریزش به‌عنوان تابعی از ضریب ایمنی برای گنبدهای تحت وزن خود بیان شد.

فضای مربوط به این سازه‌ها اغلب محل حضور و تجمع افراد زیادی است؛ بنابراین آسیب چنین سازه‌هایی در برابر زلزله ممکن است خسارات جبران‌ناپذیری را در پی داشته باشد. افزون بر این، سازه‌های فضاکار از نظر رفتار لرزه‌ای با سازه‌های معمول متفاوت هستند. سبکی وزن، هندسه خاص، قابلیت انتقال بار در سه راستا و درجه نامعینی بالا، از جمله دلایل این تفاوت رفتاری است؛ بنابراین طراحی لرزه‌ای سازه‌های فضاکار، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از مزیت‌های قابل توجه این نوع از سازه‌ها در برابر زلزله، می‌توان به سهولت تعمیر پس از آسیب، اشاره داشت. عوامل متعددی مانند شکل هندسی، نسبت هندسی (ارتفاع به دهانه)، تعداد لایه، نوع اتصال، میرایی^۳ و شکل‌پذیری، می‌تواند بر رفتار دینامیکی سازه‌های فضاکار تأثیر بسزایی بگذارد. یکی از نکات حائز اهمیت در رفتار لرزه‌ای سازه‌های فضاکار، نوع اتصالات اعضا در آنهاست. به‌طور کلی نوع اتصال می‌تواند در انعطاف‌پذیری، تغییر شکل و میرایی یک سازه تأثیرگذار باشد. اتصالات انواع مختلف صلب، نیمه‌صلب و مفصلی دارند. میزان صلبیت علاوه بر نوع اتصال و مصالح، به نوع سازه و ابعاد آن نیز بستگی دارد. اتصالات در سازه‌های فضاکار تک‌لایه معمولاً صلب فرض می‌شوند اما در نوع چندلایه، می‌توان اتصال را به صورت مفصلی در نظر گرفت.

تا به امروز پژوهش‌های متعددی در زمینه سازه‌های فضاکار و عملکرد لرزه‌ای آنها انجام شده است که در ادامه خلاصه‌ای از آنها بیان می‌گردد. یو و همکاران (Yu et al., 2011) به بررسی اثرات زیرسازه در رفتار شکست گنبد مشبک تک‌لایه تحت زلزله‌های شدید پرداختند و دریافتند تغییر شکل پلاستیک بیشتر بر روی اعضای بیرونی رخ می‌دهد. همچنین میزان مقاومت با کاهش نسبت ارتفاع به دهانه، افزایش می‌یابد. عبدالپور و همکاران (Abdolpour et al., 2009) رفتار دینامیکی گنبدهای مشبک تک‌لایه را تحت زلزله‌های نزدیک گسل بررسی کردند. آنها همچنین نیروی برش پایه و نیروهای لرزه‌ای را در گنبدهای مختلف، بدون نیاز به تحلیل‌های دینامیکی، تخمین زدند. ایشیکاوا (Ishikawa, 2020)، به کمک تحلیل طیف پاسخ، رفتار

۳- تحلیل دینامیکی طیفی^۸

تحلیل دینامیکی برای سازه‌های فضاکار می‌تواند عملکرد بهتری نسبت به تحلیل استاتیکی داشته باشد، زیرا تحلیل استاتیکی متداول تنها رفتاری معادل با رفتار سازه در مد اول را لحاظ می‌کند. این در حالی است که در سازه‌های فضاکار آثار مدهای بالا بیشتر است و منجر به آن می‌شود که تحلیل استاتیکی به دلیل مذکور قابل قبول نباشد. تحلیل دینامیکی طیفی امکان تحلیل لرزه‌ای با دقت بالا در سازه‌های با ابعاد بزرگ را فراهم می‌سازد. همچنین این تحلیل برتری سرعت محاسبات را نسبت به تحلیل تاریخچه زمانی داراست (Zhang et al., 2021).

همان‌طور که اشاره شد، تحلیل دینامیکی طیفی برخلاف تحلیل استاتیکی معادل که رفتار دینامیکی را لحاظ نمی‌کند، آثار مدهای تأثیرگذار در پاسخ دینامیکی سازه را بررسی می‌کند. این موضوع سبب آن می‌شود که توزیع مناسب‌تری از نیروی لرزله در سازه صورت گیرد و نواقص تحلیل استاتیکی تا حدی جبران گردد. مطابق آیین‌نامه بارگذاری آمریکا (ASCE7-16, 2017)، برای این نوع تحلیل لازم به بررسی تأثیر تمامی مدهای سازه نیست و تنها تعدادی از مدها که تأثیر آنها بر پاسخ بیش از ۹۰ درصد است، در تحلیل لحاظ می‌شوند. در فرآیند تحلیل دینامیکی طیفی، نخست مسئله مقدار ویژه بر اساس جرم و سختی سازه حل می‌شود. با حل مسئله مقدار ویژه، مشخصات مدهای طبیعی نوسان تعیین می‌گردد. بیشینه پاسخ مختص هر مد بر اساس زمان تناوب آن مد و طیف طرح آیین‌نامه به دست می‌آید. سپس با ترکیب پاسخ‌های مربوط به مدهای لحاظ شده به کمک یکی از روش‌های CQC یا SRSS پاسخ کلی سازه به دست می‌آید.

برای دستیابی به طیف طرح لازم در تحلیل دینامیکی طیفی، باید بر اساس فصل یازدهم آیین‌نامه ASCE7-16، مشخصه‌های پاسخ شتاب طیفی در دوره تناوب یک ثانیه و دوره تناوب کوتاه (S_1 و S_s) را بر اساس نوع منطقه به دست آورد. سپس با توجه به پارامترهای به‌دست‌آمده و نوع خاک، بر اساس جداول آیین‌نامه، ضرایب منطقه‌ای F_a و F_v به دست می‌آید. به

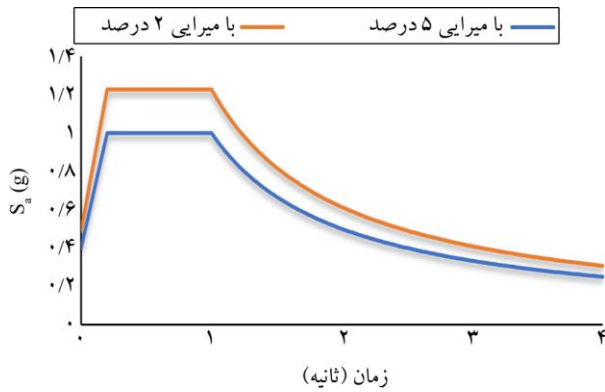
همان‌طور که مشاهده شد، تاکنون مطالعات و پژوهش‌هایی در زمینه‌های مختلف سازه فضاکار انجام شده است اما مطالعات اندکی در زمینه تأثیر میرایی در طراحی لرزه‌ای^۴ آنها صورت گرفته است؛ بنابراین در این پژوهش با توجه به مفهوم میرایی و اهمیت آن در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها، بر مبنای پژوهش اخیر (Davodijam et al., 2024)، قصد بر آن است که به مقایسه و بررسی میرایی‌های ۲ و ۵ درصد طیف طرح زلزله در تحلیل و طراحی سه نوع گنبد دیامتیک^۵، لملا^۶ و اشودلر^۷ پرداخته شود.

۲- ضریب میرایی

نسبت میرایی یا استهلاک به‌عنوان کمیتی بدون بُعد شناخته می‌شود که در استهلاک ارتعاش سیستم نقش دارد. در اثر میرایی، انرژی جنبشی ارتعاشی سیستم بنا به مکانیسم‌های مختلف مستهلک می‌گردد. میرایی به‌عنوان یک شاخص تأثیرگذار در پدیده ارتعاش، نقش مهمی در طراحی سازه دارد. تعیین نسبت میرایی بر اساس اصول نظری دشوار است، زیرا عوامل بسیار زیادی بر این شاخص تأثیرگذارند. نسبت میرایی سازه‌های معمول بر اساس داده‌های تجربی محاسبه شده است و روش‌های گوناگونی مبتنی بر ارتعاش آزاد یا ارتعاش اجباری برای محاسبه میرایی وجود دارد. از سویی دیگر، شناخت رفتار سازه‌های فضاکار برای انجام آزمایش تجربی و ارزیابی میرایی آنها کمتر از سازه‌های معمول است. ارزیابی نسبت میرایی، موجب درک رفتار دینامیکی سازه می‌شود که با استفاده از آن می‌توان نیروهای وارده به اعضای سازه را کاهش داد و در نتیجه به طراحی اقتصادی‌تری دست یافت (Shingu et al., 2004). طبق پژوهش‌های انجام شده، میرایی سازه فضاکار کمتر از میرایی سازه‌های معمول است.

نتایج آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد که نسبت میرایی این سازه‌ها تقریباً برابر ۲ درصد است. همچنین نسبت میرایی طیف طرح در اغلب آیین‌نامه‌های طراحی سازه ۵ درصد تعریف شده است؛ اما آیین‌نامه سازه‌های فضاکار به تأثیر میزان این میرایی نپرداخته است (Kang et al., 2003; Nie et al., 2019; Sun et al., 2014).

این نیرو، مطابق با آیین‌نامه ASCE7-16، از مقدار 0.2SDS استفاده شده است.



شکل (۱): طیف طرح با میرایی‌های ۲ و ۵ درصد.

۴- مشخصات گنبدها

گنبدهای مشبک ساختار هندسی متفاوتی دارند و معمولاً بر همین اساس نام‌گذاری می‌شوند، مانند دنده‌ای، اشودلر، دیامتیک، ژئودزیک و... که هر یک از آنها رفتار سازه‌ای متفاوتی در شرایط مختلف دارند.

در این پژوهش از سه نوع گنبد فضاکار تک‌لایه به نام‌های دیامتیک، لملا و اشودلر استفاده شده است. گنبد اشودلر در سال ۱۸۶۳ توسط یک مهندس آلمانی معرفی شد. این گنبد یکی از معروف‌ترین گنبدهای مهاربندی‌شده، به شمار می‌آید. برای بالای بردن استحکام سازه در این نوع از گنبدها، هر دوزنقه‌ی حاصل از تلاقی اعضای شعاعی و محیطی توسط اعضای قطری به دو مثلث تقسیم می‌شود.

طرح هندسی گنبد لملا، به‌عنوان دومین گنبد مورد بررسی در این پژوهش، در سال ۱۹۵۵ بر اساس سیستم استفاده شده در سقف لملا به ثبت رسید. یک گنبد لملا از تقاطع اعضا به صورت مورب، برای تشکیل یک الگوی شبکه‌ای با ساختار لوزی حاصل می‌شود.

دیگر گنبد مورد بررسی، گنبد دیامتیک است که از تقاطع اعضای قطری و محیطی برای تشکیل الگوی تکرارشونده مثلثی تشکیل شده است. در شکل‌های (۲)، تا (۴) تصاویر این سه گنبد قابل مشاهده است.

کمک ضرایب به‌دست‌آمده، پاسخ‌های شتاب طیفی در دوره تناوب‌های کوتاه و یک ثانیه بر اساس نوع منطقه با استفاده از رابطه‌های (۱) و (۲) محاسبه می‌شود:

$$S_{MS} = F_a S_s \quad (1)$$

$$S_{MI} = F_v S_1 \quad (2)$$

با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده در مرحله قبل و روابط

آیین‌نامه، می‌توان نوشت:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (3)$$

$$S_{DI} = \frac{2}{3} S_{MI} \quad (4)$$

جزئیات مربوط به طیف مفروض بر اساس آیین‌نامه

ASCE7-16 در جدول (۱) قابل مشاهده است.

جدول (۱): جزئیات طیف طرح.

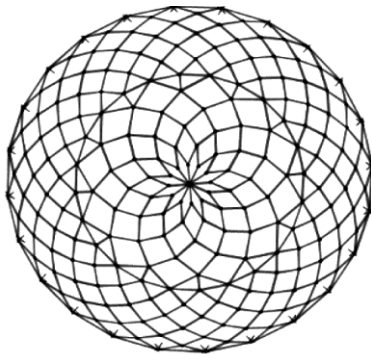
S_s	S_1	Site Class	F_a	F_v	S_{DS}	S_{DI}
۱/۵	۰/۶	D	۱	۱/۷	۱	۰/۶۸

به کمک مقادیر محاسبه شده در مراحل قبل، طیف طرح قابل رسم است؛ اما نکته قابل توجه آن است که آیین‌نامه طیف‌ها را برای میرایی ۵ درصد محاسبه کرده در نتیجه میرایی طیف فوق نیز ۵ درصد خواهد بود. از آنجایی که در این پژوهش قصد بر مقایسه میرایی‌های ۲ و ۵ درصد است. برای محاسبه طیف طرح با میرایی ۲ درصد لازم است تا از رابطه (۵) برای تبدیل میرایی طیف از ۵ به ۲ درصد استفاده شود (Newmark & Hall, 1982).

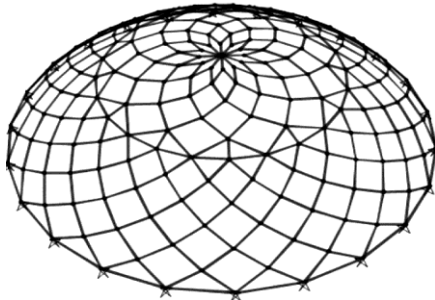
$$A_2 = A_1 \times \frac{2.31 - 0.41 \log D_2}{2.31 - 0.41 \log D_1} \quad (5)$$

که در این رابطه، A_1 : شتاب مربوط به نسبت میرایی اولیه، A_2 : شتاب مربوط به نسبت میرایی ثانویه، D_1 : نسبت میرایی اولیه و D_2 : نسبت میرایی ثانویه.

به‌منظور مقایسه طیف‌های طرح با میرایی‌های ۲ و ۵ درصد، هر دو طیف در شکل (۱) قابل مشاهده است. قابل ذکر است در سازه‌های با هندسه خاص و در مناطقی که لرزه‌خیزی بالایی دارند، لازم است علاوه بر نیروی افقی، نیروی قائم زلزله نیز لحاظ شود. در تحلیل دینامیکی طیفی مورد استفاده در این پژوهش برای لحاظ

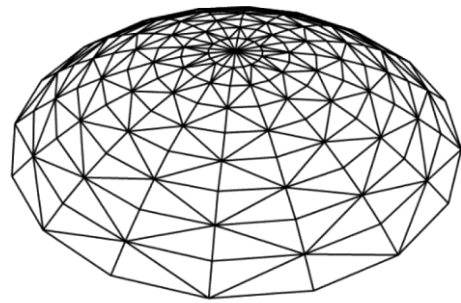


(الف) نمای بالایی

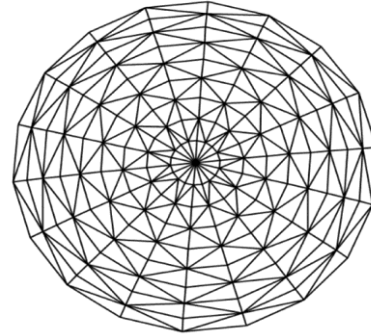


(ب) نمای سه‌بعدی

شکل (۴): گنبد اشودلر.



(الف) نمای بالایی

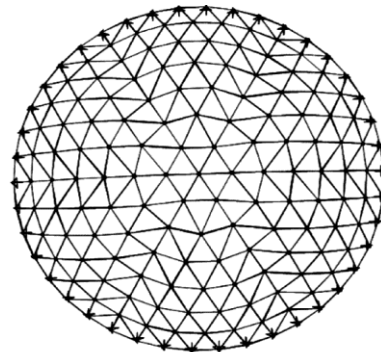


(ب) نمای سه‌بعدی

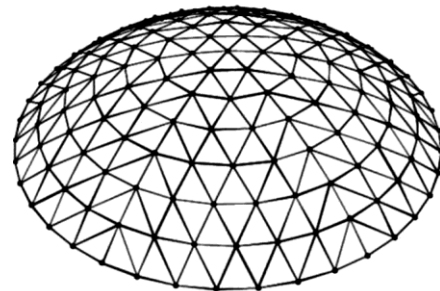
شکل (۲): گنبد دیامتیک.

جدول (۲): مشخصات مقاطع گنبد‌ها (میلی‌متر)

گنبد دیامتیک	$\phi 355/6 \times 10$
گنبد لملا	$\phi 114/3 \times 5/6$
گنبد اشودلر	$\phi 244/5 \times 8$



(الف) نمای بالایی

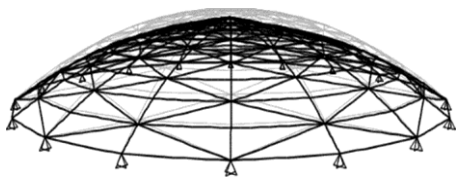


(ب) نمای سه‌بعدی

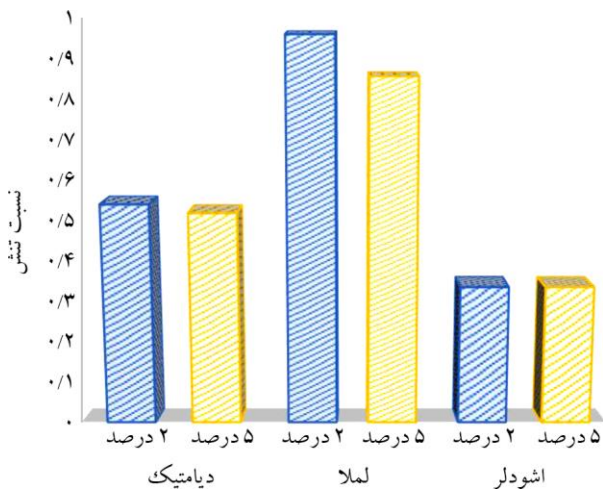
شکل (۳): گنبد لملا.

از آن‌سو که در این پژوهش از تحلیل دینامیکی خطی (دینامیکی طیفی) استفاده می‌شود، مصالح رفتار خطی ارتجاعی دارند. مصالح مورد استفاده این گنبد‌ها از نوع فولاد St37 با ضریب الاستیسیته 2×10^8 کیلونیوتن بر مترمربع و تنش تسلیم ۲۴۰ مگاپاسکال است. همچنین مقطع مورد استفاده در این گنبد‌ها از میان مقاطع لوله‌ای جدار نازک متداول انتخاب شده است. لازم به ذکر است که اتصالات اعضا در این گنبد‌ها به شکل صلب و اتصال تکیه‌گاه‌ها به زمین، به شکل مفصلی مدل شده است. بارهایی که سازه فضاکار تحمل می‌کند شامل بار وزن اعضا و پوسته رویی (بار مرده)، بار برف و بار زلزله است. تأثیر بار برف برای سازه‌های فضاکار حائز اهمیت است، زیرا وزن بار برف موجود روی سازه در برابر وزن سبک آن، قابل توجه است و افزایش بار برف منجر به افزایش زمان تناوب سازه می‌شود؛ زیرا بخشی از بارهای گرانشی در محاسبه جرم سازه

مشخصات مقاطع استفاده‌شده در هر گنبد در جدول (۲) به اختصار آمده است. قابل ذکر است در گنبد فضاکار دیامتیک، به دلیل هندسه خاص تر نسبت به دو گنبد دیگر، از مقاطع سنگین‌تری استفاده شده است.



شکل (۷): تغییر شکل گنبد اشودلر بر اثر ترکیب بار بحرانی.



شکل (۸): نسبت تنش در سه گنبد لملا، دیامتیک و اشودلر تحت میرایی های ۲ و ۵ درصد.



شکل (۹): جابه‌جایی در سه گنبد لملا، دیامتیک و اشودلر تحت میرایی های ۲ و ۵ درصد.

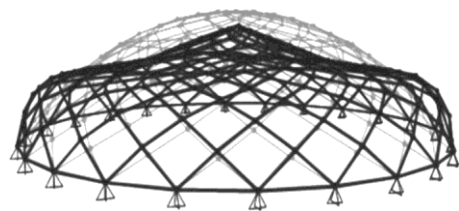
نتایج زیر از طراحی لرزه‌ای گنبد‌های فضاکار دیامتیک، لملا و اشودلر با استفاده از تحلیل دینامیکی طیفی به دست آمده است:

- تعداد مد ارتعاشی لازم به منظور دستیابی به مشارکت بالای ۹۰ درصد برای گنبد دیامتیک ۱۴۲ مد، برای گنبد لملا ۲۳۶ مد و برای گنبد اشودلر ۱۲۲ مد است که با توجه به هندسه خاص این نوع از سازه‌ها این تعداد بالای مد ارتعاشی در آنها، قابل پیش‌بینی بود. همین‌طور می‌توان دریافت که با

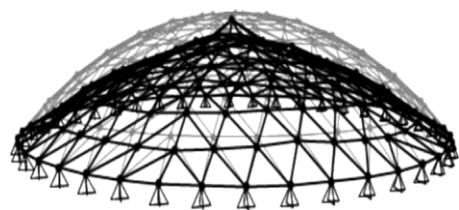
لحاظ می‌شود. بارهای وارده اعم از بار مرده و بار برف به ترتیب معادل ۰/۵ و ۱ کیلونیوتن بر متر مربع فرض شده است. برای توزیع مناسب بارهای گرانشی، در این گنبد‌ها پوسته‌ی بدون وزنی تعریف شده است که بارهای سطحی وارده را تحمل می‌کند اما این پوسته در سختی و جرم سازه بی‌تأثیر است.

۵- نتیجه‌گیری

همان‌طور که اشاره شد، به‌طور معمول میرایی در سازه‌های فضاکار ۲ درصد در نظر گرفته می‌شود؛ اما از آنجایی که طیف طرح برای این میرایی در آیین‌نامه طراحی بیان نشده است، در این پژوهش به تحلیل لرزه‌ای سه گنبد فضاکار با دو میرایی ۲ و ۵ درصد پرداخته شده است تا نتایج آنها با یکدیگر مقایسه گردد. سه گنبد دیامتیک، لملا و اشودلر با استفاده از تحلیل دینامیکی طیفی در منطقه‌ای با لرزه‌خیزی بالا و خاک نرم، تحلیل و طراحی شدند. تغییر مکان گره بالایی گنبد و نسبت تنش بحرانی اعضا مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش میرایی، به دلیل استهلاك بیشتر، مقادیر تنش بحرانی و جابه‌جایی گره‌ی کاهش یافت. تغییر شکل هر سه گنبد تحت ترکیب بار بحرانی در شکل‌های (۵) تا (۷) نشان داده شده است. نسبت تنش بحرانی هر سه گنبد در میرایی‌های ۲ و ۵ درصد و همچنین جابه‌جایی گره بالایی آنها به ترتیب در نمودار شکل‌های (۸) و (۹) قابل مشاهده است.



شکل (۵): تغییر شکل گنبد لملا بر اثر ترکیب بار بحرانی.



شکل (۶): تغییر شکل گنبد دیامتیک بر اثر ترکیب بار بحرانی.

layer truss domes subjected to earthquake motions. *11th International Conference on Computational Methods*.

Jalalvandi, F., Zakian, P., & Badamaki, M. (2024). Critical natural frequencies for seismic design of latticed domes under multi-component earthquake excitations. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 48, 909-921.

Kang, W., Chen, Z., Lam, H.-F., & Zuo, C. (2003). Analysis and design of the general and outmost-ring stiffened suspen-dome structures. *Engineering Structures*, 25(13), 1685-1695.

Kato, S., Ueki, T., & Mukaiyama, Y. (1997). Study of dynamic collapse of single layer reticular domes subjected to earthquake motion and the estimation of statically equivalent seismic forces. *International Journal of Space Structures*, 12(3-4), 191-203.

Newmark, N. M., & Hall, W. J. (1982). Earthquake spectra and design. *Engineering Monographs on Earthquake Criteria*.

Nie, G., Zhang, C., Zhi, X., Liu, K., & Ma, H. (2019). A damage constitutive model of Q345B steel in circular tubes based on cyclic experiments and its application on structure. *International Journal of Steel Structures*, 19, 469-477.

Pilarska, D., & Maleska, T. (2021). Numerical analysis of steel geodesic dome under seismic excitations. *Materials*, 14(16), 4493.

Shingu, K., Aoki, Y., Irie, T., Mitsui, K., Ogawa, K., & Nanaumi, F. (2004). A study on damping characteristics of shell and spatial structures-damping ratios of a cylindrical shell. *13th World Conference on Earthquake Engineering*.

Sun, J., Li, H., Nooshin, H., & Parke, G. A. (2014). Dynamic stability behaviour of lattice domes with substructures. *International Journal of Space Structures*, 29(1), 1-7.

Yu, Z.-W., Zhi, X.-D., Fan, F., & Lu, C. (2011). Effect of substructures upon failure behavior of steel reticulated domes subjected to the severe earthquake. *Thin-Walled Structures*, 49(9), 1160-1170.

Zhang, H., Zhu, X., Liang, X., & Guo, F. (2021). Stochastic uncertainty quantification of seismic performance of complex large-scale structures using response spectrum method. *Engineering Structures*, 235, 112096.

تفاوت هندسه در هر گنبد، تعداد مد لازم نیز تغییر می‌کند.

- در گنبد دیامتیک نسبت کاهش جابه‌جایی نوک گنبد با لحاظ میرایی ۵ درصد نسبت به میرایی ۲ درصد برای طیف طرح، حدود ۸ درصد است، اما این مقدار در گنبد لملا برابر ۱۷ درصد و در گنبد اشودلر ۱۸ درصد است.

- نسبت تنش بحرانی در گنبد دیامتیک با لحاظ میرایی ۵ درصد نسبت به میرایی ۲ درصد برای طیف طرح، حدود ۴ درصد کاهش یافته است؛ که این کاهش مقدار در گنبد لملا برابر ۱۰ درصد و در گنبد اشودلر بسیار ناچیز است.

- بنابراین با توجه به اینکه تأثیر این دو مقدار میرایی در اختلاف میان نتایج تغییر مکان گرهی و نسبت تنش گاهی ناچیز است، این نتیجه دریافت می‌شود که برای طراحی گنبد فضاکار تک‌لایه با روش تحلیل دینامیکی طیفی، می‌توان از همان میرایی ۵ درصد استفاده کرد چنان‌که تأثیر آن در نتایج قابل چشم‌پوشی باشد که وابسته به نوع سازه فضاکار گنبدی است. البته روشن است که طیف طرح و سایر اطلاعات مربوط به میرایی ۵ درصد در دسترس تر از سایر میرایی‌ها است.

References

مراجع

Abdolpour, H., Zamanzadeh, Z., & Behraves, A. (2009). Estimation of statically equivalent seismic forces of single layer reticular domes. In *Challenges, Opportunities and Solutions in Structural Engineering and Construction*, 331-336, CRC Press.

American Society of Civil Engineers. (2016). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-16)*.

Carbas, S., & Artar, M. (2022). Comparative seismic design optimization of spatial steel dome structures through three recent metaheuristic algorithms. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 16, 57-74.

Davodijam, F., Komeyzi, A., & Zakian, P. (2024). The effect of spectrum damping in seismic design of single-layer domes with response spectrum analysis. *9th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*.

Ishikawa, K. (2020). Response spectrum method considering specific dominant natural modes of double

واژه‌نامه

Space Structures	۱- سازه‌های فضاکار
Domes	۲- گنبدها
Damping	۳- میرایی
Seismic Design	۴- طراحی لرزه‌ای
Diamatic	۵- دیامتیک
Lamella	۶- لملا
Schwedler	۷- اشودلر
Response Spectrum Analysis	۸- تحلیل دینامیکی طیفی

The Effect of Spectrum Damping on the Seismic Design of Single-layer Domes Using Response Spectrum Analysis

Fatemeh Davodijam¹, Pooya Zakian^{2*} and Ali Komeyzi³

1. M.Sc. Student of Earthquake Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran
2. Associate Professor of Earthquake Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran,
*Corresponding Author, email: p-zakian@araku.ac.ir
3. M.Sc. Student of Earthquake Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

The seismic design of space structures is very important due to the difference in their dynamic behavior compared to conventional structures. Damping is a dynamic characteristic of an engineering structure and plays a key role in seismic design. Based on the previous studies on the damping of space structures, the damping ratio of these structures is assumed to be 2%, which is different from that of conventional structures. This study aims to compare the results of seismic design for single-layer domes when employing 2% and 5% damping of the design spectrum. Three domes consisting of diamatic, schwedler, and lamella are examined in this study. The seismic design of these domes was carried out using response spectrum analysis according to the ASCE7-16. Due to the special geometry of the domes, the vertical seismic force is very effective in the seismic behavior of these structures; therefore, the vertical earthquake component is also considered in this study. The member connections of these domes are modeled as rigid connections, while the supports are modeled as pinned connections. The structural loads include the dead, snow, and earthquake. The dead and snow loads were taken as 0.5 and 1 kN/m², respectively. Two important structural demands, including displacement and member stress ratio, are considered in the seismic design. The results show that the reductions of the top node displacement and critical stress ratio when using the damping ratios 2% and 5% for the selected domes are different, and these reductions can vary depending on the type of dome. However, there are sometimes small differences in the displacements and stresses of the domes when considering the design spectra with damping ratios 2% and 5%. Based on the results presented, it can be concluded that to achieve a mode participation factor of 90% in the seismic design of these spatial domes, the required number of vibration modes are 142, 236, and 122 for the diamatic, lamella, and schwedler domes, respectively. The high number of vibration modes required for these structures is due to the special geometry of the space structures. Furthermore, regarding the top node displacement reduction when increasing the damping ratio from 2% to 5%, it has been shown that this reduction is approximately 8% for the diamatic dome, 17% for the lamella dome, and 18% for the schwedler dome. These results indicate that increasing the damping ratio reduces the displacements. Also, the critical stress ratio in the diamatic dome using the damping ratio of 5% compared to 2% is decreased by about 4%. This reduction is approximately 10% for the lamella dome but is negligible for the schwedler dome. These results can provide valuable insights into selecting the damping ratio of the design spectrum in seismic design of domes using the response spectrum method, because the damping ratio for the design spectrum in traditional design codes is usually selected as 5% that is more suitable for conventional structures.

Keywords: Dome Structure, Damping, Seismic Design, Response Spectrum Analysis.