مدل‌سازی و تحلیل ارتعاشی بنای تاریخی گنبد سبز

رضا رهگذر، مهدی مقدس
۱- استادیار بخش مهندسی عمران دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه شهید باهنر کرمان،کرمان

moghaddas_mahdi@yahoo.com

چکیده:

هدف از این مقاله بررسی لرزه‌ای بنای تاریخی گنبد سبز، مدفن شیخ مؤمن عارف استرآبادی از عرفای سلسله ذهبیه است. بنا در زمان شاه عباس اول صفوی و از آجر پخته و مصالح سنتی در مشهد ساخته شده است. ابتدا از سازه گنبد سبز مدلی سه بعدی در محیط نرم‌افزار Solid Works تهیه شده و سپس تحلیل بر روی آن به کمک نرم‌افزار ANSYS انجام شده است. نتایج به دست آمده مورد بررسی قرار گرفته و نقاط آسیب‌پذیر بنا شناسایی گردیده‌اند. در نهایت، روش‌هایی جهت مقاوم‌سازی و حفاظت بنا ارائه شده است.

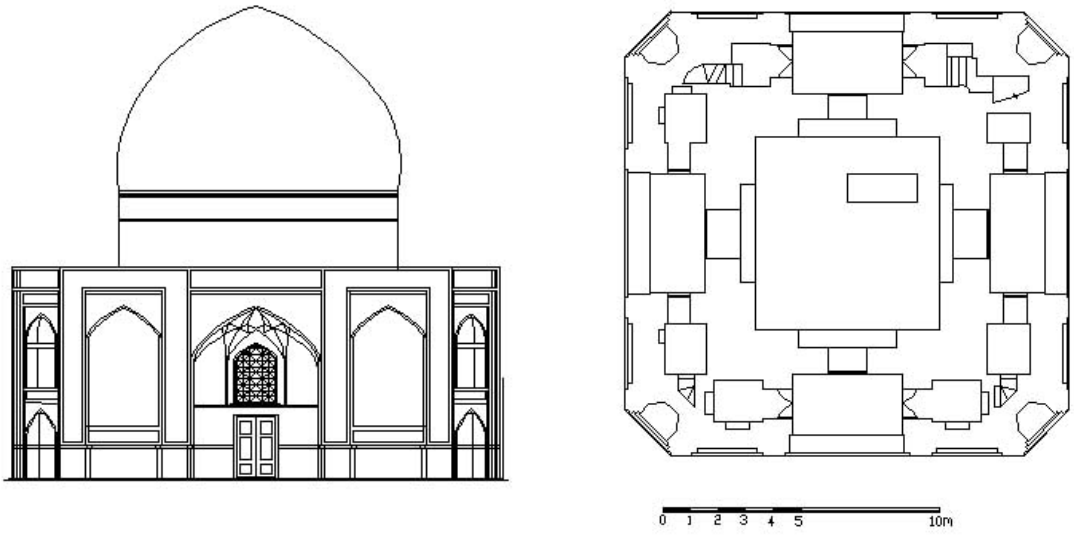
کلمات کلیدی: گنبد سبز، بنای تاریخی، تحلیل مودال، مصالح بنایی، مقاوم‌سازی

مقدمه

با توجه به اهمیت خاص بنای گنبد سبز به لحاظ فرهنگی، تاریخی، اجتماعی، اعتقادات، معماری خاص و تزئینات زیبا ضرورت دارد که جهت حفظ، مرمت و نگهداری این بنا تلاش بیشتری صورت گیرد و از علوم و فنون جدید بهره گرفته شود تا همان گونه که این میراث گرانبها از گذشتگان برای ما به ارث گذاشته شده است، برای آیندگان نیز باقی بماند. این گنبد در شهر مشهد مقدس و در خیابان آخوند خراسانی معروف به خیابان خاکی واقع شده است. مرحوم دکتر زرین‌کوب گنبد را منسوب به شیخ محمد، بیست و نهمین قطب سلسله ذهبیه دانسته است. بنای مزبور به دستور شاه عباس اول در سال ۱۰۱۱ هـ . ق. ساخته شده است. نامگذاری بنا به دلیل رنگ فیروزه‌ای گنبدش می‌باشد (شکل۱) [۱]. بنای گنبد سبز در دوره‌های مختلف توسط سازمان میراث فرهنگی و گردشگری مورد تعمیر قرار گرفته است که همگی آنها غیر سازه‌ای و بیشتر در حد بازسازی و تعمیر تزیینات آن بوده است و تغییرات بسیار جزئی در ساختار اصلی بنا و کالبد آن صورت پذیرفته است. این بنا به شماره ۳/۱۳۷۰ در فهرست آثار ملی کشور به ثبت رسیده است[۳]. مصالح به کار رفته در گنبد سبز شامل سنگ، آجر، گچ، آهک، کاشی و چوب می‌باشد که همگی جزء مصالح بومی منطقه است. بنای گنبد سبز در دو طبقه ساخته شده است. پوشش سقف به صورت گنبد و از نوع دو پوسته‌ای است. به منظور ایستایی و استحکام شالوده اصلی گنبدخانه در برابر فشارهای وارده ناشی از گنبدها، تعدادی فضا در اطراف آن احداث شده است که در ساخت آنها به زیبایی و منظر بنا توجه خاصی شده است [۲].

شکل ۱- نمایی از بنای گنبد سبز

ابعاد بنا در پلان گنبدخانه ۱۶/۰۸×۱۶/۰۸ متر است. چهار ایوان در اضلاع مختلف بنا با ابعاد ۲/۶۰×۴/۰ متر ساخته شده که در انتهای هر ایوان دربی برای دسترسی به فضای داخل گنبدخانه نصب گردیده است. کل ارتفاع بنـا ۱۵/۶۸ متر می‌باشد که شامل ارتفاع ساختمان از کف تا تراز بام برابر ۶/۶۱ متر و ارتفاع گنبدخارجی ۸/۹۸ متر با بزرگ‌ترین قطری معادل ۹/۳۴ متر است [۴]. بنا در نمای خارجی دارای پلانی هشت و نیم‌هشت و در فضای داخلی دارای پلانی چلیپایی است (شکل۲).

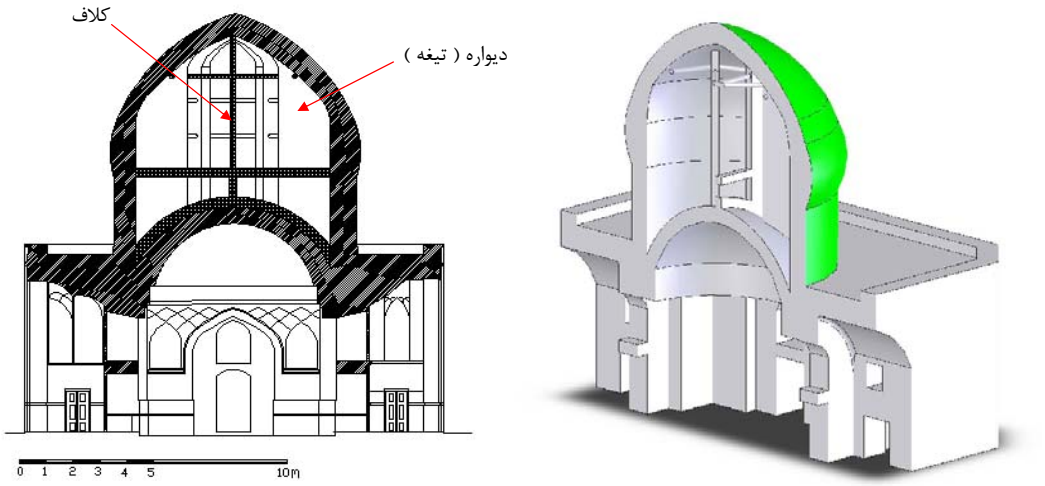


شکل ۲- نما و پلان گنبد سبز

در ساخت سازه بنا از آجر cm ۵/۵×۲۵×۲۵ با ملات گچ و ماسه و در ساخت پی نیز از سنگ لاشه با شفته آهکی استفاده شده است. گنبد به صورت دو پوسته‌ای ساخته شده؛ یعنی دو گنبد بر روی یکدیگر ساخته شده‌اند (گنبد داخلی یا به اصطلاح "آهیانه" و گنبد خارجی یا "خود"). برای پایداری بیشتر و مطمئن‌تر گنبد خارجی هشت دیواره (تیغه) درون آن ساخته شده است علاوه بر آنها تیرها و کلافهایی نیز درون فضای گنبد به کار رفته است (شکل۳) [۴].

در ابتدا اطلاعات ساختمان با بررسی مدارک و نقشه‌های موجود و همچنین برداشت‌های محلی جمع‌آوری شده و سپس خطر زلزله منطقه، مورد بررسی قرار گرفته است و اطلاعات لازم جهت گسل‌ها، تاریخچه زلزله‌های منطقه، طیف شتاب افقی و قائم برای دوره‌های بازگشت سال‌های مختلف و . . . جمع‌آوری گردیده است. ساخت مدل در محیط نرم‌افزاری Solid Works انجام شده

و با انتقال مدل به نرم‌افزار ANSYS، تحلیل‌های لرزه‌ای بنا به کمک این نرم‌افزار صورت گرفته است. با پردازش نتایج تحلیل، نقاطی که ساختمان دچار شکست و یا ترک خوردگی می‌گردند مشخص شده‌اند که به کمک این اطلاعات، راهکارهایی جهت مقاوم‌سازی بنا پیشنهاد گردیده است.



شکل ۳- برش عمودی (از محل محور تقارن)

مروری بر تحقیقات انجام شده

متداول‌ترین روش مطالعه لرزه‌ای بناهای تاریخی، تحلیل سازه به کمک رایانه و استفاده از روش‌های اجزاء محدود می‌باشد. مطالعه دقیق رفتار لرزه‌ای این چنین بناهایی مستلزم انجام تحلیل‌های دینامیکی می‌باشد که باید علاوه بر رفتار غیرخطی مصالح، ترک خوردن مصالح، گسترش و باز و بسته شدن ترک‌ها در آنها لحاظ گردد [۶،۵]. در عمل انجام این نوع تحلیل‌ها بسیار پیچیده می‌باشد و با توجه به محدودیت‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری تا کنون در مورد بناهای تاریخی به کار گرفته نشده است. از جمله بناهای تاریخی موجود در دنیا که تحلیل اجزاء محدود برای آنها انجام شده است می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

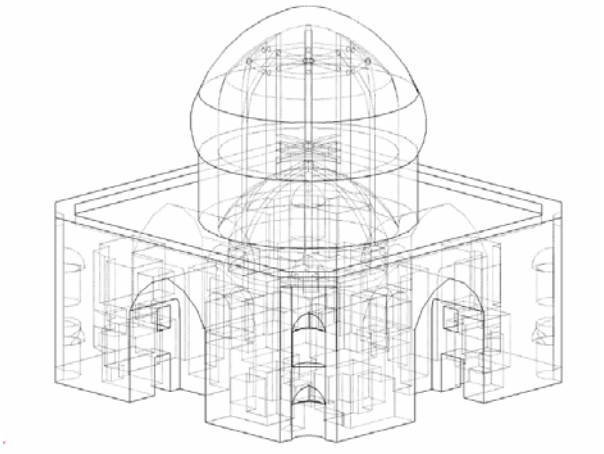
- گنبد سلطانیه
- بادگیر باغ دولت آباد یزد
- گنبد مسجد ایاصوفیه در ترکیه
- ساختمان کلیسای St. Maria Vieja در اسپانیا
- بناهای Pantheon، Colosseum، St. Ignation Loyola و St. Peter در ایتالیا.

در تحلیل بناهای Pantheon، St. Ignation Loyola و St. Peter در ایتالیا، کلیسای St. Maria Vieja اسپانیا، گنبد سلطانیه و بادگیر باغ دولت آباد یزد از روش استاتیکی خطی و در بنای Colosseum از روش دینامیکی خطی استفاده شده است [۸،۷]. در تحلیل بناهای فوق، مصالح به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شده‌اند و لذا ترک خوردگی و شکست فشاری اجزاء ساختمان در تحلیل‌ها لحاظ نشده‌اند. البته رفتار و استقامت بنا و همچنین محل ایجاد ترک در بنا با پردازش نتایج تحلیل و مقایسه آن با معیارهای شکست مصالح مورد ارزیابی قرار گرفته است [۷].

تحلیل گنبد عظیم ایاصوفیه ترکیه به روش گام به گام و با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح انجام گرفته است. در تحلیل گنبد ایاصوفیه ترک خوردن اجزاء ساختمان مستقیماً از نتایج تحلیل استخراج شده است [۸].

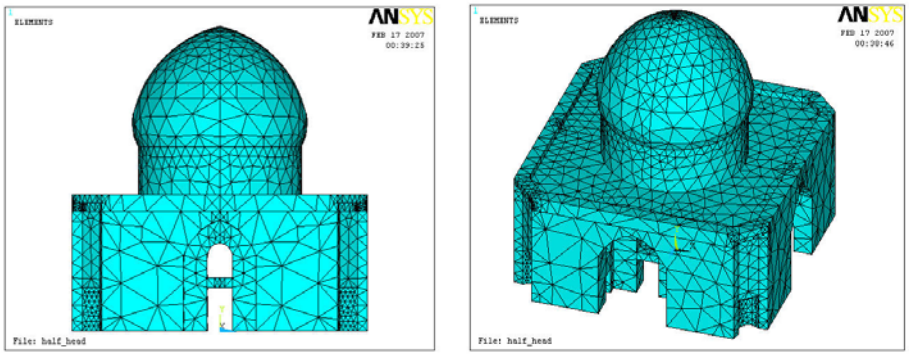
تعیین پارامترها و مدل‌سازی در محیط نرم‌افزار

ابتدا برداشت‌های اولیه از بنا صورت گرفته و اطلاعات به دست آمده با نقشه‌های موجود که از مرکز اسناد سازمان میراث فرهنگی تهیه شده بود، تطبیق داده شد. سپس بر اساس نقشه‌های موجود از بنای گنبد سبز، مدلی با جزئیات نسبتاً کامل و دقیق در محیط نرم‌افزاری Solid Works ساخته شد (شکل ۵). علت به کارگیری این نرم‌افزار توانایی ترسیم و ساخت مدل‌های پیچیده با امکاناتی مشابه نرم‌افزار CAD و همچنین قابلیت تبدیل و انتقال مستقیم مدل از Solid Works به محیط نرم‌افزار ANSYS می‌باشد. در این تحلیل‌ها رفتار ساختمان تحت اثر بارهای ثقلی و بارهای ناشی از زلزله مورد مطالعه قرار گرفته است.



شکل۵- نمایی از مدل گنبد در نرم‌افزار Solid Works

المانی که در ساخت مدل به کار رفته است، Solid45 می‌باشدکه یک المان ۸ گرهی است و می‌تواند به صورت تتراهدرال (۴گرهی)، مکعبی (۸ گرهی) و یا به شکل هرم (۶ گرهی) به کار رود.(شکل۶). البته المان‌های مناسب‌تری جهت تحلیل موجود است، ولی در صورت استفاده از این گونه المان‌ها حجم مدل و تعداد محاسبات افزایش یافته و تحلیل دچار مشکل می‌گردد. سعی شده در ساخت مدل بنا جزئیات سازه‌ای تا حد امکان لحاظ شوند.



شکل۶- المان‌بندی مدل گنبد سبز در نرم‌افزار ANSYS

تعریف مشخصات و رفتار مصالح با توجه به ناهمگنی و غیر ایزوتروپیک بودن مصالح و رفتار پیچیده دیوارهای آجری، اعمال ساده‌سازی ضروری به نظر می‌رسد. زیرا افزایش پیچیدگی در تعریف مشخصات مصالح و در نظر گرفتن آن به صورت غیرخطی، به همان اندازه که می‌تواند دقت را افزایش دهد، امکان فاصله گرفتن از حقایق را نیز در پی دارد [۹].

فرضیات زیر در تحلیل و کنترل رفتار مصالح در مدل‌سازی رایانه‌ای مد نظر قرار گرفته‌اند:

- اندرکنش خاک و سازه در نظر گرفته نشده است.
- رفتار مصالح، ایزوتروپیک و همگن فرض شده است.
- گره‌های موجود در تراز پی به صورت گیردار مدل گشته و درجات آزادی این گره‌ها مقید شده‌اند.
- کنترل بروز ترک پس از تحلیل انجام می‌شود و نه در حین تحلیل. این ساده‌سازی تنها می‌تواند وقوع ترک در سازه را نشان دهد و از تعیین سرنوشت ترک‌های به وجود آمده پس از به وقوع پیوستن ترک‌ها ناتوان است. اما همین معیار توانایی شناسایی نقاط ضعف سازه را دارد [۱۰].

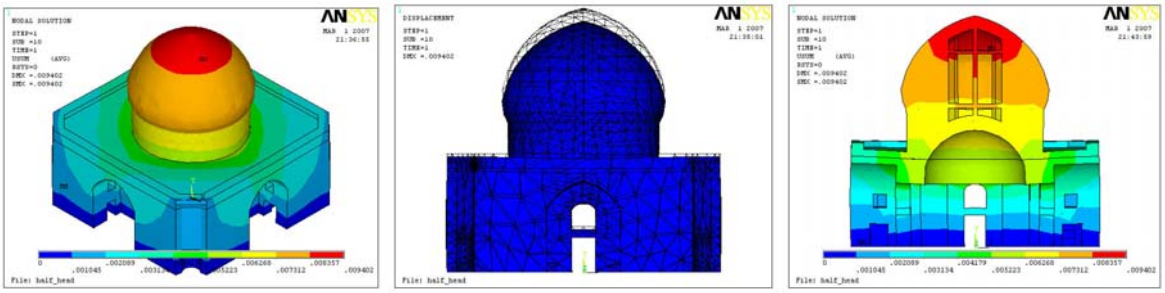
با توجه به حجم مدل و نیز مشکلات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری، رفتار مصالح به صورت الاستیک خطی فرض شده و سایر پارامترهای به کار رفته در فرایند تحلیل بر اساس جدول (۱) می‌باشند[۱۱].

جدول۱- مشخصات مصالح جهت استفاده در تحلیل

مقاومت فشاری (f_c) KN/m²	مقاومت کششی (f_t) KN/m²	مدول الاستیسیته (E) MPa	ضریب پواسون (ν)	چگالی جرم (ρ) ton/m³
۳۵۰۰	۱۷۵	۱۹۶	۰/۱۵	۱/۶۰

تغییر شکل سازه ناشی از بارهای ثقلی

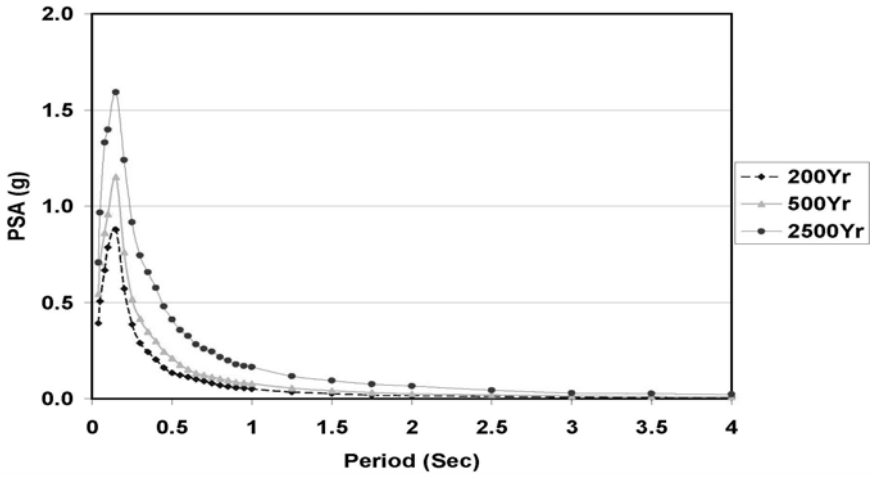
ابتدا تحلیل ثقلی بر روی سازه انجام گرفته است. بررسی نتایج مشخص می‌کند که ماکزیمم تغییر شکل قائم گنبد به حدود ۹/۴ mm می‌رسد (شکل۷). تنش‌های فشاری در پای گنبد و در کل بنا و با در نظر گرفتن تقارن سازه گنبد، تقریباً به صورت یکنواخت توزیع شده است و حداکثر تنش‌های فشاری از مقاومت فشاری مصالح، ۳۵۰۰ KN/m² کمتر می‌باشد.



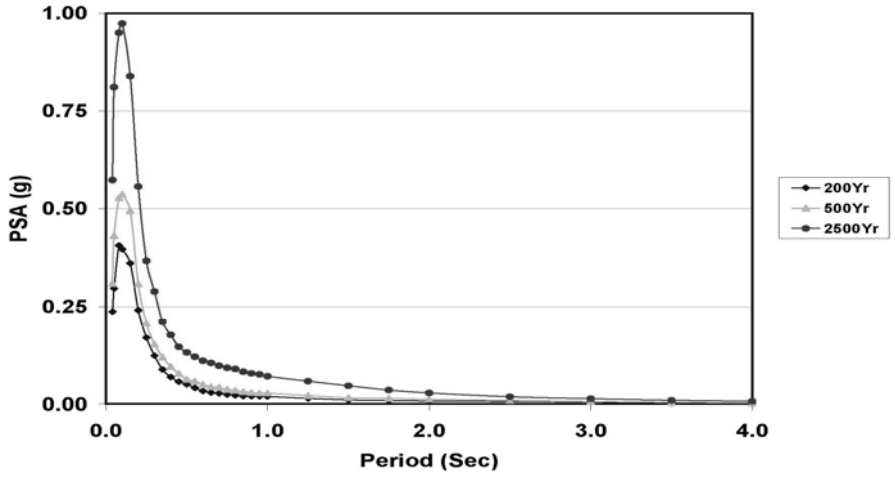
شکل۷- تغییر شکل بر اثر نیروهای ثقلی (تحلیل ثقلی)

بررسی پارامترهای لرزه‌ای منطقه

تا کنون در مشهد زمین‌لرزه‌های بزرگ و متعددی روی داده است که مهم‌ترین آن زمین‌لرزه ۱۶۷۳ در مشهد با بزرگایی برابر با Ms=6.6 است [۱۲]. با در نظر گرفتن زمین لرزه‌های تاریخی و بررسی گسل‌های منطقه، شهر مشهد از نظر پتانسیل لرزه‌خیز در گروه مناطق با خطر بالا قرار می‌گیرد و در آیین نامه ۲۸۰۰، جزء مناطق با خطر نسبی زیاد و شتاب مبنا ۰/۳g طبقه‌بندی شده است [۱۴،۱۳].در اشکال ۸ و ۹ طیف‌های به کار رفته در تحلیل طیفی مطابق با شرایط رسوبات آبرفتی منطقه دشت مشهد با دوره بازگشت‌های ۲۰۰، ۵۰۰ و ۲۵۰۰ سال رسم شده است[۱۵].



شکل ۸- منحنی طیف شتاب، مؤلفه افقی برای دوره بازگشت‌های متفاوت



شکل ۹- منحنی طیف شتاب، مؤلفه قائم برای دوره بازگشت‌های متفاوت

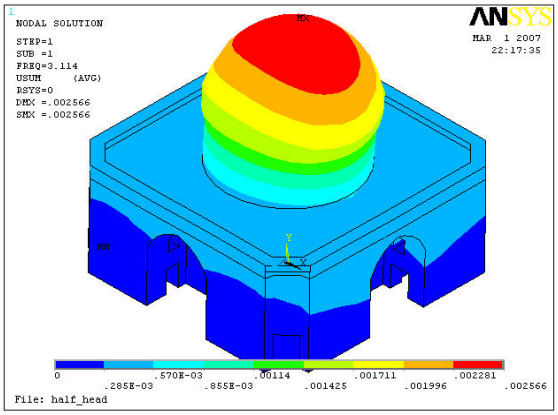
تعیین مودهای ارتعاشی بنا

پس از مدل سازی، تحلیل مودال انجام گرفته و فرکانس‌های طبیعی ارتعاش سازه به دست آمده که در جدول ۳ دیده می‌شوند.

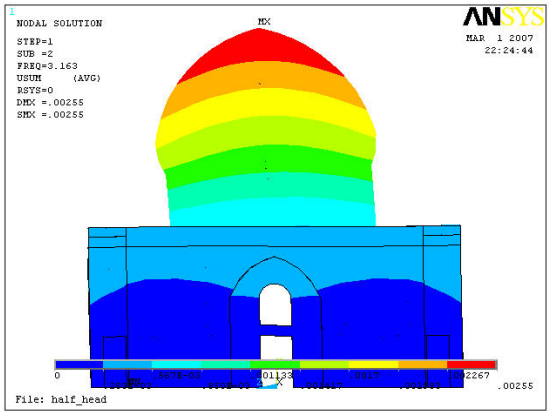
جدول ۳- فرکانس‌های طبیعی ارتعاش سازه

شماره مود	فرکانس(Hz)
مود اول	۳/۱۱۴
مود دوم	۳/۱۶۳
مود سوم	۴/۹۹۰
مود چهارم	۴/۹۹۱
مود پنجم	۵/۲۳۶
مود ششم	۶/۵۰۰

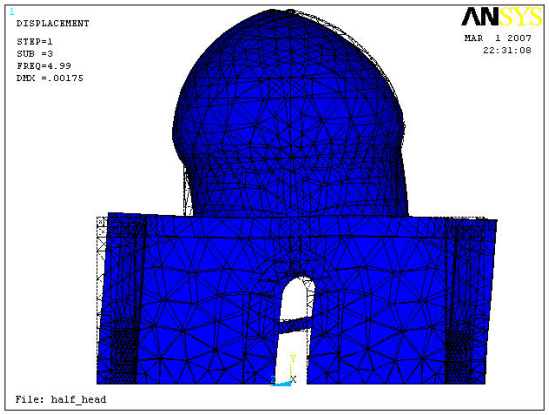
در اشکال ۹ الی ۱۴ تغییرشکل و تغییر فرم سازه در مودهای اول تا پنجم ارائه شده‌اند.



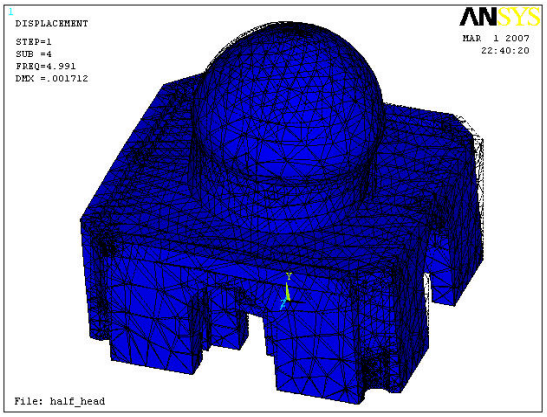
شکل ۹-تغییر مکان مود ۱



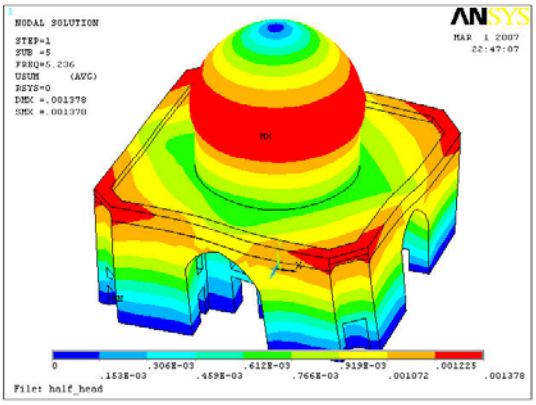
شکل ۱۰- تغییر مکان مود ۲



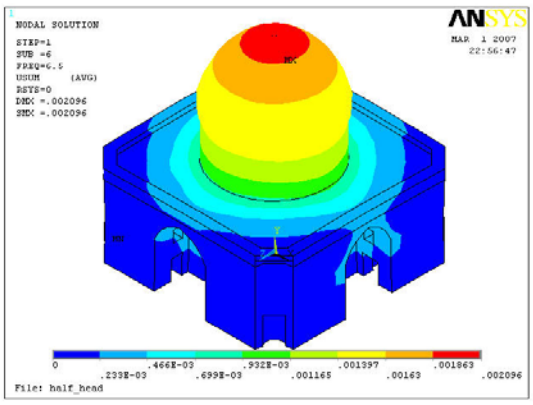
شکل ۱۱- تغییر فرم مود ۳



شکل ۱۲- تغییر فرم مود ۴



شکل ۱۴- تغییر مکان مود ۵



شکل ۱۴- تغییرمکان مود ۶

نتایج تحلیل طیفی

در تحلیل طیفی برای دوره بازگشت ۲۰۰ سال تنش‌های فشاری کمتر از حد شکست مصالح است و می‌توان نتیجه گرفت با وجود ایجاد ترک‌های موضعی در قسمتهایی از سازه، ساختمان همچنان پایدار باقی می‌ماند. ولی با وقوع زلزله با دوره ۵۰۰ سال، در

نقاط بسیاری از سازه مانند کنج‌ها، نوک ایوان‌ها و بخش زیادی از گنبد، مقادیر تنش‌ها، بیشتر از میزان تحمل مصالح می‌گردد که این نشان دهنده تخریب بنا است. با توجه به این که تیغه‌ها و تیرهای نصب شده در درون گنبد خارجی، سختی (K) آن را افزایش داده است ولی باز هم سختی سازه بیشتر از سختی گنبد بوده و گنبد به صورت یک طبقه نرم عمل می‌کند و در محل اتصال گنبد به بام ساختمان، تنش‌های بزرگی روی می‌دهد که باعث ایجاد ترک و تخریب گنبدها می‌گردد.

نتیجه‌گیری

در صورتی که زلزله‌ای با دوره ۲۰۰ سال به وقوع بپیوندد، گنبد به نسبت سالم می‌ماند. لذا با انجام مرمت‌ها و مقاوم‌سازی‌های معمول و متعارف و تا حدودی اقتصادی، میزان خسارات تا حد زیادی کاهش می‌یابد. ولی با وقوع زلزله‌ای با دوره بازگشت ۵۰۰ سال، خسارات سنگین و مرمت ناپذیری، به سازه وارد می‌گردد. در واقع سازه و دیوارها به شدت آسیب دیده و گنبدهای آن فرو می‌ریزند. چون گنبد سبز جزء بناهای تاریخی کشور است و در مورد آن مشکلات قانونی، فرهنگی، مالی و نیز حفظ اصالت بنا وجود دارد، به کارگیری روش‌های مقاوم‌سازی مفصل و بنیادی امکان‌پذیر نمی‌باشد. با صرف هزینه و انجام مقاوم‌سازی‌های جزئی و مقطعی نیز بنا را در برابر زلزله ۵۰۰ ساله ایمن نخواهد کرد.

در صورت وقوع زلزله با دوره بازگشت۲۰۰ سال، به علت ساخت پشت‌بندها، تیرها و کلاف‌های داخل گنبد خارجی، گنبد که آسیب‌پذیرترین نقطه بنا است در برابر نیروهای ناشی از زلزله مقاومت می‌نماید و تنها ممکن است در بخش فوقانی گنبد و محل تلاقی دو قوس ایوان‌ها، که تمرکز تنش وجود دارد، ترک‌هایی ایجاد شده و فرو ریزد. کارشناسان میراث فرهنگی جهت تقویت محل اتصال گنبد به بدنه و مقابله با نیروی رانشی گنبد از رینگ بتنی در اطراف گنبد استفاده می‌کنند که بهتر است از مواد مناسب‌تری مانند FRP که امروزه امکان به کارگیری آن برای بناهای سنتی نیز وجود دارد، استفاده شود تا با کاهش وزن بام، عملکرد سازه در برابر زلزله مناسب‌تر گردد. کارایی مناسب تیرها و تیغه‌های درون گنبد به اثبات رسیده است. در نتیجه بهتر است از مصالح مقاوم ولی سبک برای تقویت تیرها و تیغه‌ها استفاده گردد. همچنین به علت ایجاد فضای سبز در اطراف گنبد و آبیاری غیر اصولی و نیز استفاده از آسفالت برای پوشش محوطه اطراف بنا، رطوبت به دیوارهای سازه نفوذ کرده است. اگر کف‌سازی با مصالحی که قابلیت دفع آب‌های سطحی و زیر زمینی از طریق تعریق و تعرق را داشته باشد (مانند آجر فرش)، اجرا گردد رطوبت به سازه نفوذ نکرده و نیازی به زهکش نخواهد بود. برخی از پنجره‌های فضای گنبدخانه توسط آجر مسدود شده است که باعث افزایش سختی بنا گردیده است. بهتر است دیوارها به پنجره تبدیل شوند تا علاوه بر تأمین نور فضای گنبدخانه، سختی سازه نیز کاهش یابد.

مراجع

۱- زارع، ا. (۱۳۸۲) گزارش باستانشناسی گنبدسبز. معاونت حفظ و احیاء آثار تاریخی، سازمان میراث فرهنگی و گردشگری خراسان رضوی.

۲- جوادزاده، هـ. (۱۳۸۰) کتاب خراسان، راهنمای گردشگری استان خراسان. کانون آگهی ایران نوین، تهران.

۳- لباف خانیکی، ر. (۱۳۷۸) سیمای میراث فرهنگی خراسان، سازمان میراث فرهنگی، چاپ اول، تهران.

۴- جنتی‌فر، م. (۱۳۸۴) مطالعات و شناخت معماری گنبدسبز-مشهد. معاونت حفظ و احیاء آثار تاریخی، سازمان میراث فرهنگی و گردشگری خراسان رضوی.

۵- جاهد مطلق، ح. و نوبان، م. و اشراقی، م. (۱۳۸۲) اجزاء محدود **ANSYS** ، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تهران.

۶- توسلی، ا. (۱۳۸۴) نگرشی بر مقاوم سازی آثار تاریخی. اولین همایش بین‌المللی مقاوم سازی لرزه‌ای، تهران.

7- Binda, L. and Modena, C. (2006) *Structural Analysis of Historical Construction and Possibility of Numerical and Experimental Techniques*. http://www.stru.polimi.it/sum9899.html.

۸- قاسم وتر، م. و زارع پور، آ. و آژده، آ. (۱۳۸۴) بررسی آسیب‌پذیزی بلندترین بادگیر دنیا–باغ دولت آباد یزد در مقابل باد و زلزله. اولین همایش بین‌المللی مقاوم‌سازی لرزه‌ای، تهران.

۹- رضایی پژند، م. و مؤیدیان، م. (۱۳۷۸) تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها. چاپ اول، دانشگاه امام رضا، مشهد.

۱۰- طاحونی، ش. (۱۳۸۳) دینامیک سازه‌ها و تعیین نیروهای زلزله (تئوری و کاربرد در مهندسی زلزله). چاپ سوم، انتشارات علم و ادب، تهران.

11- Antania N. (2005) *Masonary Stregthening*. University of Missori-Rolla (UMR).

12- Ambraseys, N. N. and Melville, C. (1982) *A History of Persian Earthquakes.* Cambridge University Press.

13- Ambraseys, N. N. and Jackson, J. A.(1998) *Faulting Associated with Historical and Recent Earthquakes in the Eastern* Mediterranean *Region*. Geophys. J. Int, 133, 390-406.

14- Ambraseys, N.N., Douglas, J.(2003) *Near-field Horizontal and Vertical earthquake Ground Motions*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 23, 1-18

۱۵- کره‌ای، م. (۱۳۸۵) مخاطرات زمین‌شناسی برگه مشهد. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، وزارت صنایع و معادن، مشهد.

Abstract

This article aims at the seismic analysis of the historical building, called “The Green Dome”, which is the shrine of “Sheikh Astar-Abadi”, who is one of the Zahabieh Gnostics. The monument has been built with brick and other traditional materials, in Mashad in the kingdom of Shah-Abas I. The article has, first, delivered a three-dimensional model of the structure by the use of SolidWorks software. It has been, then, analyzed by ANSYS software. The results have demarcated the unstable points of the building. Finally, some methods for the seismic retrofitting and protecting the monument have been suggested.

Key words: The Green Dome, monument, modal analysis, traditional material, retrofitting