

ارزیابی مقاومسازی گنبد ارچین امامزاده جعفر بروجرد با اندود بتن مسلح (شاتکریت) داخلی تحت زلزله ۱۳۸۵ سیلاخور

محمد مهدی صداقت^۱، رضا رازانی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، گروه عمران، پردیس علوم و تحقیقات فارس، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران
۲- استاد، دانشکده فنی مهندسی، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز، شیراز، ایران

چکیده

با توجه به اینکه ایران بر روی کمربند زلزله آلپ- هیمالیا واقع گردیده است، هر از چند گاهی زلزله‌های مخربی در مناطق مختلف ایران اتفاق می‌افتد که خسارات جانی و مالی فراوانی را به بار می‌آورند. به همین دلیل مقاومسازی جهت حفظ بناهای تاریخی و مذهبی به دلیل قدمت زیاد تاریخی و میراثی آن‌ها بسیار ضروری می‌باشد. هدف از این پژوهش بررسی رفتار گنبد ارچین امامزاده جعفر بروجرد به عنوان نمونه‌ای از چند گنبد ارچین موجود در جهان تحت زلزله ۱۳۸۵ دشت سیلاخور و ارائه طرح مقاومسازی این گنبد با استفاده از یک لایه اندود بتن مسلح (شاتکریت) در سطح داخلی گنبد می‌باشد. در این پژوهش جهت مدل‌سازی و آنالیز از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS استفاده شده است. پس از انجام مطالعات میدانی سازه، گنبد با دقت در این نرم‌افزار مدل گردیده است. این مدل تحت آنالیز فرکانسی و تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی قرار گرفته و رفتار لرزه‌ای گنبد قبل و بعد از مقاومسازی مدل با یکدیگر مقایسه گردیده‌اند. در نهایت با توجه به تحلیل‌های انجام‌شده و نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش علت خرابی گنبد در زلزله ۱۳۸۵ دشت سیلاخور شتاب زیاد قسمت فوقانی گنبد و ضعف و تردشکنی مصالح بنایی در برابر نیروهای برشی شناخته شد. پس از مقاومسازی گنبد با اندود بتن مسلح در سطوح داخلی این ضعف و آسیب‌پذیری به‌خوبی برطرف خواهد گردید.

کلمات کلیدی: گنبد ارچین، بتن مسلح، شاتکریت، زلزله، بروجرد

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/JSCE.2017.83843.1163	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/JSCE.2017.83843.1163	۱۳۹۸/۰۴/۰۱	۱۳۹۶/۰۴/۳۱	۱۳۹۶/۰۴/۳۱	۱۳۹۶/۰۴/۰۷	۱۳۹۶/۰۲/۱۳
رضا رازانی			*نویسنده مسئول:		
razani.brj@gmail.com			پست الکترونیکی:		

Evaluation of strengthening of Orchin dome of Imamzadeh Ja'far in Borujerd by using interior shotcrete layer under 2006 Silakhor earthquake

M.Mehdi Sedaghat¹, Reza Razani^{2*}

1-MS.c , Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Fars Science and Research branch, Islamic Azad university, Marvdasht, Iran

2- Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Shiraz branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

ABSTRACT

Iran is located on Alpine-himalayan earthquake belt. Every few years destructive earthquakes happen in Various region of Iran which causes significant amount of material and human losses. Therefore seismic strengthening of buildings especially historical and old religious building, because of their cultural, historical, heritage and touristic values are of great national importance. The objective of this paper is to study the seismic behavior of a special method of retrofit of Urchin domes. This type of semi-conical masonry dome which are found in southern regions of Iran has not been structurally investigated before. As a model for this study the damaged Urchin dome of Imamzade Jafar shrine in Borujird under 2006 A.D (1385 A.H) Silakhor-Lorestan earthquake was investigated. The strengthening method used is by applying a layer of reinforced concrete (Shot-Crete) to the interior surface of the Urchin dome which was evaluated in this study. After sufficient field studies and measurement, the composite structure of the: Urchin dome, lower double layer spherical dome and the masonry supporting walls and pears were modeled using ABAQUS FEM software. The models were analysed and their frequency and dynamic behavior using time-history analysis (THA) were obtained and compared before and after the application of strengthening Shot-Crete layer. Finally by evaluating the results obtained from these studies, the causes of the failure of the tip of this dome was found to be the excessive acceleration at the tip of the dome and weakness and brittleness of the masonry material due to shearing forces. After strengthening the interior of the dome by a Shot-Crete layer the weakness and vulnerability of the dome under the applied earthquake will be significantly reduced.

ARTICLE INFO

Received: 03/05/2017

Revised: 28/06/2017

Accepted: 22/07/2017

Keywords:

Orchin dome,
Reinforced concrete,
Shotcrete,
earthquake,
boroojerd

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2017.83843.1163

*Corresponding author: Reza Razani

Email address: razani.brj@gmail.com

۱- مقدمه

در سپیده دم یازدهم فروردین ۱۳۸۵ زلزله‌ای به بزرگی ۵/۹ ریشتر در دشت سیلاخور حدفاصل شهرستان بروجرد و دورود، در استان لرستان به وقوع پیوست. در این زلزله ۷۰ نفر کشته و ۲۰۰۰ نفر زخمی شدند و به بیش از ۳۰۰ روستا آسیب جدی وارد گردید. [۱] در اثر این زلزله گنبد ارچین امامزاده جعفر بروجرد نیز در محلی نزدیک به نوک گنبد دچار آسیب جدی شد و تخریب گردید. در این پژوهش بعد از انجام مطالعات میدانی، گنبد با دقت در نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS مدل گردید و تحت آنالیز فرکانسی قرار گرفت و فرکانس‌های طبیعی آن به دست آمد. سپس تحت تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی زلزله ۱۳۸۵ قرار گرفت و علت خرابی گنبد بررسی شد. پس از آن با طراحی یک مدل مقاوم‌سازی با اندود بتن مسلح (شاتکریت) در جداره داخلی گنبد، مجدداً سازه گنبد تحت تحلیل دینامیکی قرار گرفت و رفتار آن قبل و بعد از ارائه مدل مقاوم‌سازی با یکدیگر مقایسه گردید.

۱-۱- معرفی گنبد ارچین

یکی از انواع گنبدهای موجود در جهان گنبد ارچین می‌باشد. شکل این گنبد به صورت مخروطی است و جداره بیرونی آن به صورت پلکانی می‌باشد. هر پله نسبت به پله زیرین خود ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متر عقب‌نشینی دارد. بر روی هر پله، تعدادی گوشه به شکل مثلث موجود می‌باشد که تعداد آن در گنبدها متفاوت است. تعداد پله‌ها به قطر دهانه پایین گنبد، ارتفاع پله‌ها و میزان عقب‌نشینی هر پله نسبت به پله زیرین خود، بستگی دارد. تعداد این گنبدها بسیار کم می‌باشد و بیشتر آن‌ها در قسمت جنوب غربی ایران واقع شده است. از معروف‌ترین این گنبدها می‌توان به مقبره دانیال نبی در شوش، امامزاده عبدالله در شوشتر، امامزاده جعفر در بروجرد، گنبد سلطان زبیده و مزار شیخ عمر سهروردی در بغداد اشاره کرد (شکل ۱).



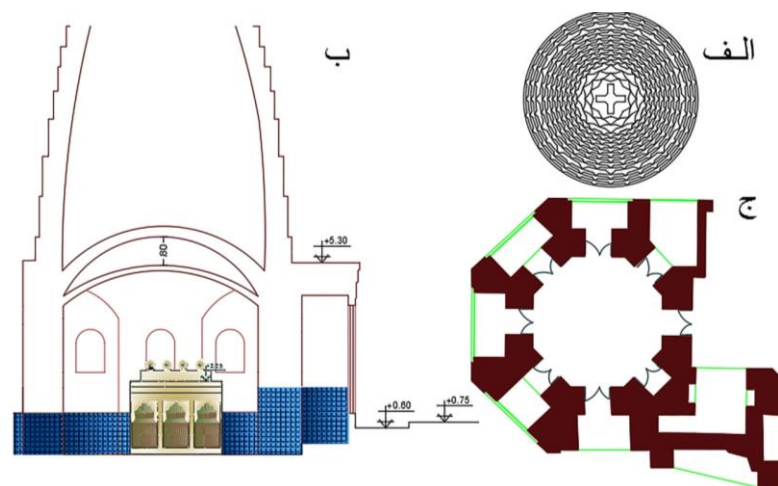
ب)

الف)

شکل ۱: الف) گنبد مقبره دانیال نبی در شوش، ب) گنبد مقبره امامزاده جعفر در بروجرد

۱-۲- مشخصات هندسی گنبد امامزاده جعفر بروجرد

بنای مقبره امامزاده جعفر در بروجرد از توابع استان لرستان بنا گردیده است. تاریخ ساخت آن احتمالاً به دوران سلجوقیان بازمی‌گردد. ولی در دوره‌های مختلف تغییراتی بر روی بنا ایجاد شده است. با توجه به کتیبه موجود در این بنا احتمالاً ساختمان امامزاده در سال ۹۰۰ ه.ق در اثر زلزله دچار آسیب جدی گشته و تا سال ۹۱۷ ه.ق کار مرمت آن به پایان رسیده است. [۲] گنبد ارچین امامزاده جعفر بروجرد از ۲۷ پله تشکیل شده است. هر پله در حدود ۱۰ تا ۱۷ سانتی‌متر نسبت به پله زیرین خود عقب‌نشینی دارد. سطح خارجی پله اول کاملاً دایره شکل و بدون گوشه است ولی بقیه پله‌ها دارای گوشه‌های مثلثی شکل می‌باشند. تعداد این گوشه‌ها در پله‌های ابتدایی ۱۶ عدد بوده و با افزایش ارتفاع تعداد آن‌ها کم می‌شود. ضخامت جداره دیواره گنبد به ۷۶ سانتی‌متر می‌رسد. ارتفاع گنبد ۱۳/۶۳ متر است. قطر خارجی حلقه ابتدایی گنبد ۷/۱۹ متر می‌باشد. جداره داخلی گنبد به صورت مخروطی شکل است. در ساخت بنای گنبد و ملحقات آن از آجر به ابعاد ۵×۲۰×۲۰ و ۵×۱۰×۲۰ سانتی‌متر استفاده شده است. نوع ملات استفاده شده در این گنبد، گل آهک می‌باشد. گنبد ارچین این بنا، بر روی ۸ پایه قرار گرفته که دو پایه آن به یکدیگر کاملاً متصل می‌باشد. ارتفاع این پایه‌ها از تراز ایوان تا پایین گنبد به ۵/۳۰ متر می‌رسد. فرم پایه‌ها به گونه‌ای می‌باشند که سطح داخلی مجموع پایه‌ها محیط دایره‌ای شکل را تشکیل می‌دهند. قطر داخلی پایه‌ها مساوی با قطر داخلی حلقه ابتدایی گنبد و برابر ۵/۶۷ متر است. در محل تلاقی گنبد و پایه‌های زیرین آن، یک گنبد دوپوسته ساخته شده است. ضخامت پوسته اول از پایین در کمترین مکان که مرکز گنبد می‌باشد ۱۵ سانتی‌متر و در گوشه‌ها به ۲۵ سانتی‌متر می‌رسد. این پوسته علاوه بر کاربرد سازه‌ای، کاربرد زینتی (به دلیل اجرای گچ‌بری‌ها و آینه‌کاری در زیر آن) نیز دارد. ضخامت پوسته دوم از پایین و در مرکز خود ۳۰ سانتی‌متر و در گوشه‌ها به صورت ماهیچه‌ای شکل و دارای ضخامت ۷۰ سانتی‌متر است. فاصله خالی بین این دو پوسته در مرکز به ۸۰ سانتی‌متر می‌رسد (شکل ۲).



شکل ۲: (الف) نمایی از مقطع افقی گنبد امامزاده جعفر بروجرد، (ب) مقطع قائم گنبد امامزاده جعفر بروجرد، (ج) پایه‌های زیرین گنبد

۲- پیشینه تحقیق

با توجه به بررسی‌های انجام شده به نظر می‌رسد که تاکنون گنبد‌های ارچین از نظر رفتار سازه‌ای و همچنین ارائه طرح مقاوم‌سازی مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند و بررسی‌های انجام شده از منظر معماری بوده است. لذا مختصری از مطالعاتی که در ایران و جهان در زمینه کارهای مشابه در حیطه آثار باستانی و ساختمان‌های گنبدی با سازه آجری انجام شده، در زیر ارائه می‌گردد.

دانیالی و همکاران (۲۰۱۴)، در مقاله خود به شرح واقعی ترمیم و مقاوم‌سازی ساختمان‌های تاریخی در مناطق کوهستانی قفقاز در گرجستان پرداخته‌اند. معبد نیکورت اسمیندا^۱ از قرن ۱۱ میلادی و کنیسه قرن ۱۹ در اونی^۲ که هر دو در زلزله ۱۹۹۱ آسیب دیده‌اند، بررسی شده است. در این مقاله به مقاوم‌سازی مسجد آخال‌تسیخه^۳ مربوط به قرن ۱۸ نیز اشاره شده است. جهت مقاوم‌سازی هر سه بنا از کامپوزیت (سنگ و بتن مسلح) استفاده گردیده است. در این روش از یک پوسته نازک بتن مسلح در بالای گنبد استفاده گردیده که باعث پیوستگی بتن و سنگ می‌شود. نتایج تجزیه و تحلیل استاتیکی غیرخطی در اطراف نقاط اتصال بررسی گردیده و در انجام تحلیل از روش‌های اجزاء محدود استفاده شده است. معبد نیکورت ایمیندا و کنیسه در اونی پس از مقاوم‌سازی زلزله ۶/۲ ریشتری را در تاریخ ۸ سپتامبر ۲۰۰۹ بدون هیچ‌گونه آسیب قابل توجهی تحمل کردند [۳].

کمال، حمدی و سلکاوای (۲۰۱۴)^۴، به تحلیل غیرخطی ساختمان‌های بنایی طاقی شکل تاریخی و معاصر پرداخته‌اند. مقاله آن‌ها شامل تحقیقات تحلیلی و آزمایشگاهی از رفتار غیرخطی ساختمان‌های با مصالح بنایی منحنی شکل و گنبد‌ها می‌باشد. به نظر آن‌ها معمولاً از آنالیز خطی برای ساده کردن تجزیه و تحلیل سازه‌های بنایی استفاده می‌شود. ولی این ساده‌سازی ممکن است باعث گردد که ظرفیت سازه‌ای در بسیاری از موارد دست کم گرفته شود، بنابراین تحلیل غیرخطی نتایج بهتری برای رفتار واقعی و ظرفیت سازه به دست می‌دهد. آن‌ها یک مطالعه تئوری با استفاده از مدل‌سازی مصالح در نرم‌افزار ANSYS برای به دست آوردن مشخصات مصالح و رفتار سازه مدل و سپس یک مطالعه تجربی به منظور اعتباربخشی به این نتایج تحلیلی انجام داده‌اند. سپس به تجزیه و تحلیل سازه‌های واقعی تاریخی با روش گفته شده پرداخته‌اند [۴].

ایوب و همکاران (۲۰۱۳)^۵، حفاظت از ساختمان کالج اسلامی پیشاور که از ساختمان‌های تاریخی با سازه بنایی می‌باشد، بررسی کرده‌اند. آن‌ها به بازسازی گنبد، مرمت ترک خوردگی قوس تالار و دیوارهای جان‌پناه با استفاده از آهک هیدراته، آجر سرخی و کف مطالعه نموده‌اند و از این مصالح جهت تقویت ساختمان و بهبود ظاهر بنا استفاده کرده‌اند [۵].

معینی و سحاب (۲۰۱۳)، در مقاله خود، رفتار سازه گنبد‌های تاریخی با مصالح بنایی را مورد بررسی قرار داده‌اند و به ضعف رفتار کششی گنبد و پایداری گنبد در برابر نیروهای ثقلی پرداخته‌اند. در این مقاله مقاوم‌سازی گنبد‌های آجری با روش ابداعی گسترش ملات در بین بندهای آجر و ایجاد یک نیرو، مشابه خیز منفی جهت ایجاد پیش تنش، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است [۶].

فراپسچی (۲۰۱۳)، بهسازی لرزه‌ای و بازسازی کلیسای سانجولیانو تحت زلزله اکتبر ۲۰۰۲ کامپوباسو، ایتالیا بررسی نموده است. در مقاوم‌سازی بنا از روش‌های نوین استفاده کرده که بعد از آن در زلزله‌های ۳/۱ سال ۲۰۰۷ و ۳/۷ ریشتری سال ۲۰۱۱ تست گردید [۷].

¹. Nikortsmina Cathedral

². Oni

³. Akhaltsikhe

⁴. Kamal, O.A. Hamdy, G.A. El-Salakawy, T.S.

⁵. Ayub, M

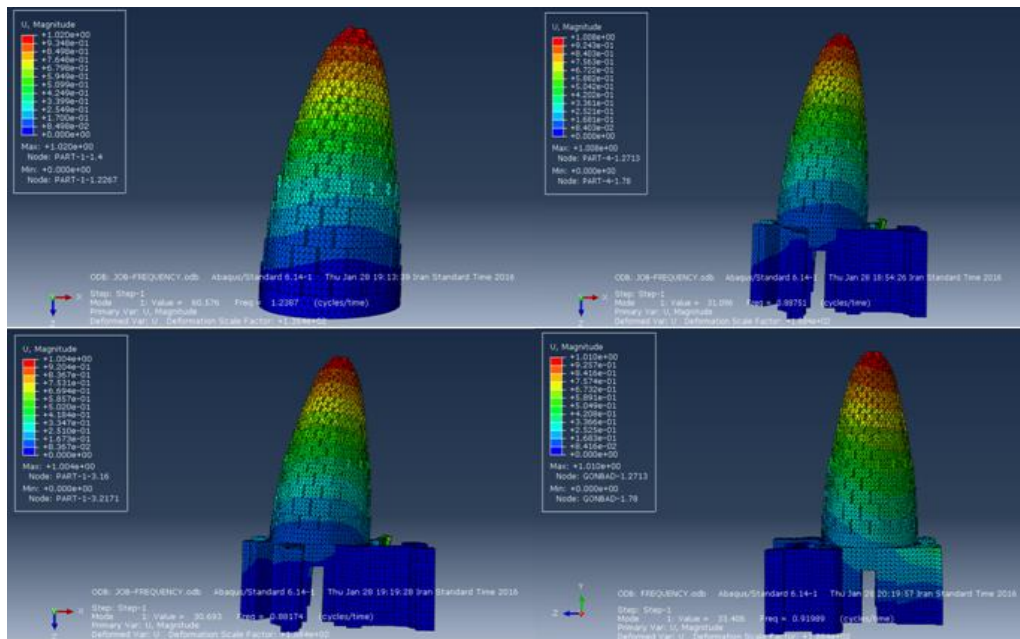
کلیک و همکاران (۲۰۰۸)، در پژوهش خود به بررسی موردی رفتار گنبد سلیم یاووز که متعلق به قرن ۱۶ میلادی و در شهر استانبول است، پرداختند. در مدل سازی و تحلیل رفتار گنبد از نرم افزار SAP2000 استفاده شده است. جهت مقاوم سازی گنبد از حلقه های فولادی گالوانیزه در سطح بیرونی و از ورق های CFRP در ناحیه کششی گنبد استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که تنش های اصلی و جابجایی کاهش یافته است [۹].

مرتضایی و خیرالدین (۱۳۸۷)، مسجد جامع سمنان را مورد بررسی قرار داده اند. این مسجد از مصالح بنایی ساخته شده و مربوط به قرون اولیه هجری قمری می باشد. در مدل سازی بنا از نرم افزارهای SAP2000 و DIANA و از طیف زلزله السنترو استفاده شده است. آن ها جهت مقاوم سازی بنا از الیاف GFRP استفاده کردند که باعث افزایش شکل پذیری و اتلاف انرژی و تأخیر در گسیختگی شده است [۱۰].

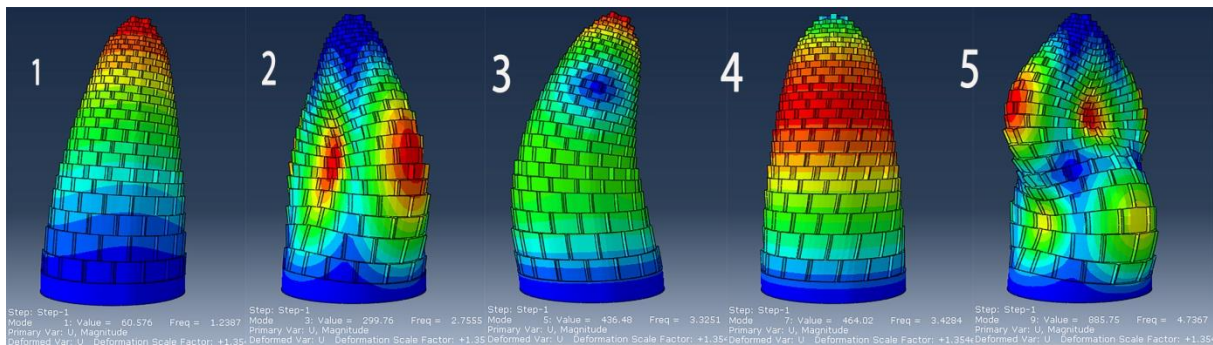
۳- روش تحقیق

در این پژوهش از نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS V.6.14.1 استفاده شده است. المان مورد استفاده جهت مدل سازی گنبد و اجزاء آن در محیط سه بعدی، Solid می باشد و المان مورد استفاده جهت مدل سازی میلگردها در محیط دوبعدی، Wire می باشد. به دلیل پیچیدگی شکل گنبد و چیدمان نامنظم آجرها از روش مدل سازی ماکرو استفاده گردید. در این نوع مدل سازی شکل موجود گنبد و پایه های زیرین آن دقیقاً مطابق وضع موجود بنا و با رعایت کامل جزییات مدل سازی شده ولی مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح به صورت ترکیبی از آجر و ملات به روش ماکرو اعمال شده است. جهت مش بندی از تکنیک Free و مش بندی نوع Tet برای گنبد و اجزاء آن و از نوع Tri برای میلگردها استفاده شده است.

در این پژوهش گنبد ارچین امامزاده جعفر بروجرد در چهار گام تحت تحلیل فرکانسی قرار گرفت و فرکانس طبیعی ۱۰ مود اول آن ها به دست آمد. در گام اول گنبد ارچین بدون در نظر گرفتن پایه های زیرین و گنبد دوپوسته میانی مورد تحلیل فرکانسی قرار گرفت. در گام دوم پایه های زیرین گنبد امامزاده جعفر بروجرد دقیقاً مدل سازی شد و مورد آنالیز قرار گرفت. در گام سوم جهت بررسی اثر گنبد دوپوسته میانی بر رفتار مجموع گنبد، گنبد دوپوسته میانی به دقت مدل سازی گردید و تحت آنالیز قرار گرفت. در گام چهارم از یک اندود بتن مسلح (شاتکریت) جهت مقاوم سازی گنبد در جداره داخلی گنبد استفاده شد و گنبد مقاوم سازی شده تحت تحلیل فرکانسی قرار گرفت. جدول (۱) مقادیر فرکانس طبیعی و زمان پریود طبیعی ۱۰ مود اول گنبد برای چهار گام بالا را نشان می دهد. همچنین در شکل (۳)، مودهای اول گنبد برای چهار حالت فوق را می توانیم مشاهده کنیم. همچنین در شکل (۴) تصویر پنج مود اول فرد گنبد گام یک (بدون پایه) به عنوان نمونه نشان داده شده است.



شکل ۳: تصاویر مربوط به مود اول برای چهار گنبد بعد از تحلیل فرکانسی



شکل ۴: تصاویر مربوط به پنج مود اول فرد گنبد بدون در نظر گرفتن پایه‌ها

جدول ۱: مقادیر فرکانس طبیعی و زمان پریود طبیعی ۱۰ مود اول برای چهار گام گنبد تحت آنالیز فرکانسی

شماره مد	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
فرکانس طبیعی گنبد بدون پایه	۱/۲۳۸	۱/۲۳۸	۲/۷۵۵	۲/۷۵۹	۳/۳۲۵	۳/۳۲۵	۳/۴۲۸	۳/۶۷۸	۴/۷۳۶	۴/۷۴۳
گنبد بدون پایه period Time	۰/۸۰۷	۰/۸۰۷	۰/۳۶۲	۰/۳۶۲	۰/۳	۰/۳	۰/۲۹۱	۰/۲۷۱	۰/۲۱۱	۰/۲۱۰
فرکانس طبیعی گنبد با پایه	۰/۸۸۱	۰/۹۵	۱/۱۵	۱/۵۶۹	۱/۷۸۲	۱/۹۷۵	۲/۰۶۶	۲/۱۰۲	۲/۱۱۵	۲/۵۹۱
گنبد با پایه period Time	۱/۱۳۵	۱/۰۵۲	۰/۸۶۹	۰/۶۳۷	۰/۵۶۱	۰/۵۰۶	۰/۴۸۴	۰/۴۷۵	۰/۴۷۲	۰/۳۸۵
فرکانس طبیعی گنبد با گنبد میانی و پایه‌ها	۰/۸۸۷	۰/۹۵۶	۱/۱۵۴	۱/۵۴۸	۱/۸۰۹	۱/۹۵۷	۲/۰۶۶	۲/۲۸۷	۲/۲۹۶	۲/۶۱۱
گنبد با گنبد میانی و پایه‌ها period Time	۱/۱۲۷	۱/۰۴۶	۰/۸۶۶	۰/۶۴۵	۰/۵۵۲	۰/۵۱۰	۰/۴۸۴	۰/۴۳۷	۰/۴۳۵	۰/۳۸۲
فرکانس طبیعی گنبد با اندود شاتکریت داخلی	۰/۹۱۹	۰/۰۱۰	۱/۵۷۳	۱/۸۰۱	۱/۸۹۷	۲/۰۵۲	۲/۲۳۸	۲/۷۷۱	۲/۹۱۷	۳
گنبد با اندود شاتکریت داخلی period Time	۱/۰۸۸	۰/۹۹	۰/۶۳۵	۰/۵۵۵	۰/۵۲۷	۰/۴۸۷	۰/۴۴۶	۰/۳۶	۰/۳۴۲	۰/۳۳۳

بعد از ساخت مدل مقاومسازی (شاتکریت) جرم گنبد افزایش یافته است. افزایش این جرم به دلیل قطر بیشتر گنبد در پایین، زیادتر بوده و با افزایش ارتفاع کاهش میابد. همچنین استفاده از شاتکریت باعث افزایش سختی برشی و خمشی سازه گنبد شده است. با بررسی مقادیر مد اول در جدول (۱) مشاهده می‌شود که حساسیت زمان پریود مدهای سازه نسبت به افزایش وزن بیشتر از افزایش سختی می‌باشد. لذا با اعمال شاتکریت رفتار سازه گنبد نرم‌تر شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود فرکانس طبیعی مد اول گنبد در حالت بعد از مقاومسازی ۳/۶ درصد بیشتر از حالت قبل از مقاومسازی می‌باشد.

۴- معرفی روش مقاومسازی

در این پژوهش به دلیل رفتار ترد مصالح بنایی مورداستفاده در گنبد ارچین و در راستای افزایش مقاومت برشی و کششی مصالح گنبد، جهت مقاومسازی از یک اندود بتن مسلح (شاتکریت) در جداره توخالی و مخروطی شکل داخل گنبد استفاده گردید. برای این کار چند ضخامت برای شاتکریت مدل‌سازی شد که از میان آن‌ها از لایه شاتکریت با ضخامت ۱۵ سانتی‌متر به دلیل به دست آمدن نتایج بهتر استفاده گردید. جهت مسلح کردن بتن از یک شبکه میلگرد شماره ۱۰ استفاده شده است. فاصله میلگرد این شبکه در پایین گنبد ۲۵ سانتی‌متر است که به دلیل شکل مخروطی داخل گنبد با افزایش ارتفاع گنبد، فاصله میلگردها کمتر می‌شود.

در این قسمت از پژوهش فرض گردید که میلگردهای شبکه شده کاملاً در میان بتن دفن گردیده‌اند و یک رفتار تماسی بین بتن و فولاد مدل‌سازی گردید. برای تعریف میلگردهای مدفون در بتن از قید Embedded region در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. همچنین فرض گردیده که سطح بیرونی بتن (شاتکریت) کاملاً به جداره داخلی گنبد چسبیده است و این کار با تعریف رفتار Normal Behavior و Tangential Behavior برای قیود انجام شده است.

در تعریف مشخصات مصالح به دلیل پیچیده بودن رفتار دیوارهای آجری و با توجه به ناهماهنگی و غیر ایزوتروپیک بودن مصالح، ساده‌سازی انجام گرفت. در انجام این پژوهش فرضیات زیر در تحلیل و کنترل رفتار مصالح گنبد به کار گرفته شد.

✓ در گام اول سطح زیر گنبد به‌صورت کاملاً گیردار مدل گردید.

✓ در گام دوم، سوم و چهارم سطح زیر پایه‌های زیرین گنبد کاملاً گیردار مدل شده و درجات آزادی گره‌ها مقید شده‌اند.

- ✓ برای تعریف خرابی مصالح از مدل Concrete damage plasticity که دو فرض گسیختگی (ترک خوردگی و خردشدگی فشاری) را در نظر می‌گیرد، استفاده شده است.
- ✓ در انجام آنالیز دینامیکی رفتار مصالح به دلیل مشکلات نرم‌افزاری و حجم مدل به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شده است.

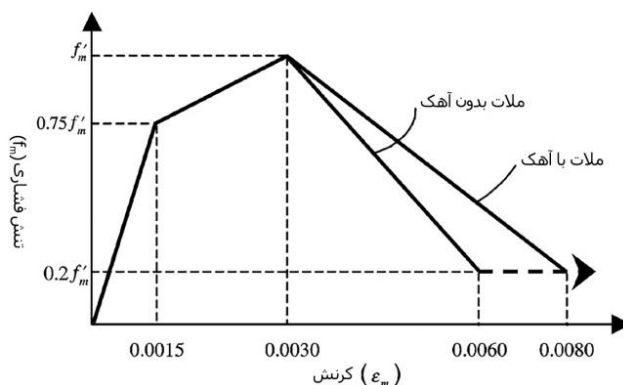
۵- خصوصیات مکانیکی مصالح

میزان مدول الاستیسیته مصالح بنایی را معمولاً بر اساس مقاومت فشاری آن تعیین می‌کنند. در این پژوهش از استاندارد FEMA-356 استفاده شده است که رابطه زیر را برای به دست آوردن این پارامتر پیشنهاد می‌دهد [۱۱].

$$E = 550 \times f'_m \quad (1)$$

f'_m : مقاومت فشاری مصالح بنایی

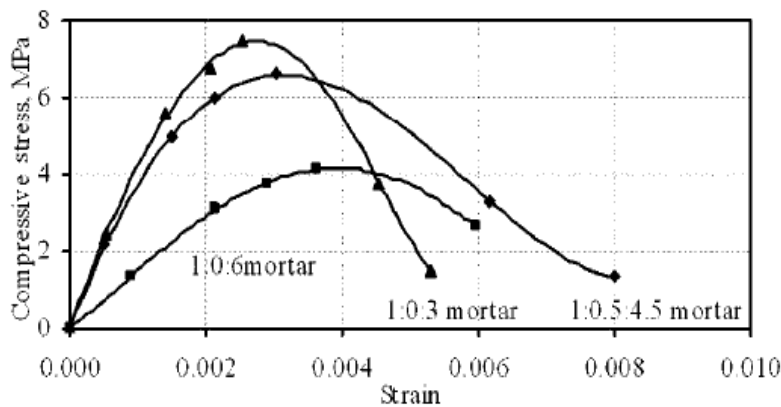
همان و همکاران (۲۰۰۷)^۶، مصالح بنایی را که در سازه‌های ساختمانی هند استفاده گردیده، مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها با ساخت ۸۴ نمونه آزمایشگاهی از مصالح بنایی مختلف که از کوره‌های مختلف هند به دست آمده بودند و ساخت مدل دیوار با چند نمونه ملات که از نظر مقاومتی با یکدیگر متفاوت بودند، نتایج زیر را به دست آوردند. آن‌ها توانستند یک نمودار تنش - کرنش برای نمونه‌های آزمایشگاهی تحت مقاومت فشاری ترسیم کنند که در شکل شماره (۵) نمودار ساده شده آن برای ملات‌های مختلف ارائه شده است. در مورد ملات‌های بدون سیمان (با آهک و بدون آهک) نمودار شکل (۶) ارائه گردیده است. چون نمودار دقیقی برای مشخصات مصالح بنایی به کار رفته در سازه گنبد ارچین امامزاده جعفر بروجرد به دست نیامد، از نمودار ساده شده (ملات با آهک) ارائه گردیده در شکل (۶)، در مدل‌سازی این پژوهش استفاده شده است.



شکل ۵: نمودار تنش فشاری - کرنش مصالح بنایی با ملات‌ها با عیارهای (سیمان-آهک - ماسه) مختلف [۱۲]

⁶. Hemant et al.

آن‌ها توانستند نمودار خطی ساده‌شده برای رفتار مصالح بنایی بر حسب مقاومت فشاری مصالح ارائه دهند.



شکل ۶: نمودار ساده‌شده برای بیان رفتار فشاری مصالح بنایی بر حسب مقاومت فشاری [۱۲]

مقاومت فشاری بتن شاتکریت با توجه به موقعیت قرارگیری در جداره منحنی شکل داخلی گنبد ارچین و عدم امکان نگهداری بتن به روش‌های معمولی مانند آبیاشی و همچنین ماهیت شاتکریت که امکان عملیات ویریه بر روی آن نمی‌باشد در این پژوهش ۱۳ مگا پاسکال در نظر گرفته شده است. سایر مشخصات مکانیکی بتن و مشخصات مکانیکی میلگرد مطابق با مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران می‌باشد [۱۳ و ۱۴].

مدول الاستیسیته بتن مطابق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران از معادله (۲) به دست آمده است [۱۴].

$$E_c = (3300\sqrt{f_c} + 6900) \left(\frac{\gamma_c}{23}\right)^{1.5} \quad (2)$$

f_c : مقاومت فشاری بتن بر حسب مگا پاسکال

E_c : مدول الاستیسیته بتن بر حسب مگا پاسکال

γ_c : جرم مخصوص بتن بر حسب کیلو نیوتن بر متر مکعب

مشخصات مکانیکی مصالح مورداستفاده در این پژوهش به اختصار در جدول (۲) ارائه گردیده است.

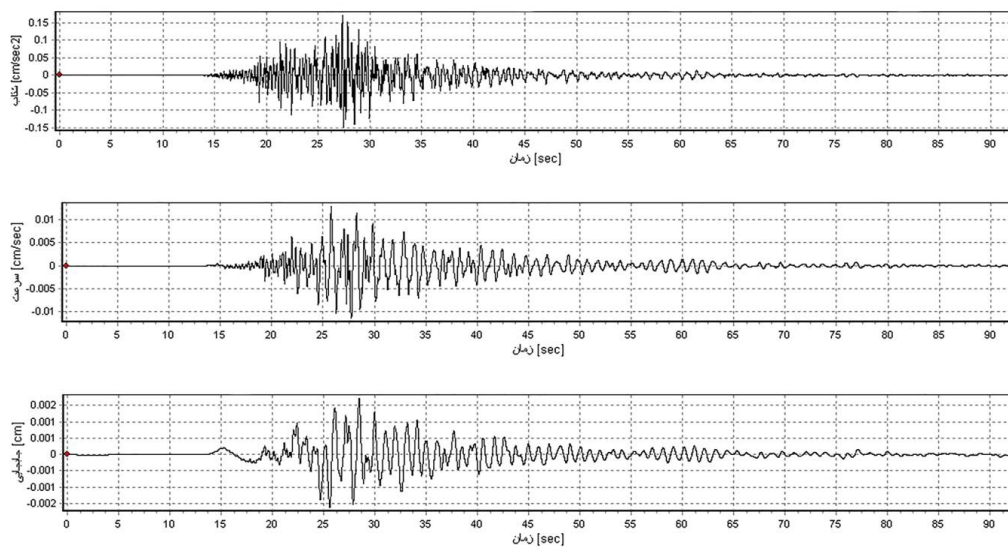
جدول ۲: مشخصات مکانیکی مصالح [۱۳] و [۱۴]

جرم واحد حجم kg/m^3	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته MPa	نوع مصالح
۱۸۰۰	۰/۱۵	۴۴۰۰	مصالح بنایی آجر و ملات
۷۸۵۰	۰/۳	۲۰۰۰۰۰	میلگرد
۲۴۰۰	۰/۲	۱۹۹۲۶/۲۱	بتن

۶- مشخصات شتاب زلزله

در زمان وقوع زلزله ۱۳۸۵ دشت سیلاخور تعداد زیادی شتاب‌نگاشت رکوردهای زلزله را ثبت کرده‌اند که در این پژوهش از بین آن‌ها سه شتاب‌نگاشت چالان چولان، توشک آب سرد و چغالوندی انتخاب گردیدند و رکوردهای آن‌ها از مرکز لرزه‌نگاری کشوری (مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران) دریافت شد [۱۵]. به دلیل خام بودن مقادیر رکوردهای ثبت‌شده، جهت اصلاح آن‌ها از نرم‌افزار Seismosignal V.5.1.0 و از فیلترهای Base line correction و Apply base line استفاده شد. برای محاسبه ضریب مقیاس زلزله از میان روش‌های موجود از روش مقیاس سازی بیشینه مطلق شتاب زمین (PGA) استفاده گردید [۱۶]. خاک محل ساخت امامزاده جعفر بروجرد از نوع III می‌باشد [۲]. همچنین شهرستان بروجرد در پهنه‌بندی با خطرپذیری بسیار بالا در زلزله قرار دارد؛ بنابراین مطابق توصیه آئین‌نامه ۲۸۰۰ این مقدار برابر $g/35$ می‌باشد [۱۷].

به دلیل طولانی بودن مدت‌زمان رکوردها از تعریفی به نام طول زمان قوی رکورد استفاده گردید. از بین روش‌های موجود از روش Trifunac & Bardy [۱۸] که شتابی در محدوده ۵ تا ۹۵ درصد مقدار Arias در نرم‌افزار سیسموسیگنال را انتخاب می‌کند استفاده شد. همچنین از بین شتاب‌نگاشت‌های انتخاب‌شده به دلیل وجود طول زمان ثبت مناسب‌تر و نزدیک‌تر بودن طیف غالب آن به پرپود طبیعی سازه از رکوردهای شتاب‌نگاشت چغالوندی استفاده گردید (شکل ۷) [۱۵].

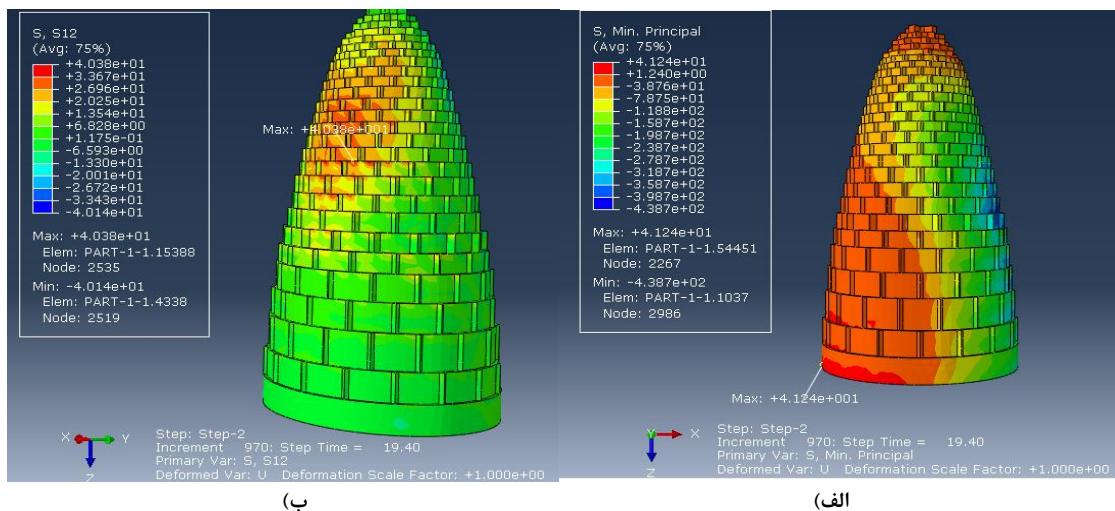


شکل ۷: نمودار شتاب، سرعت و جابجایی شتاب‌نگاشت چغالوندی بعد از فیلترینگ و اصلاح

۷- تحلیل دینامیکی

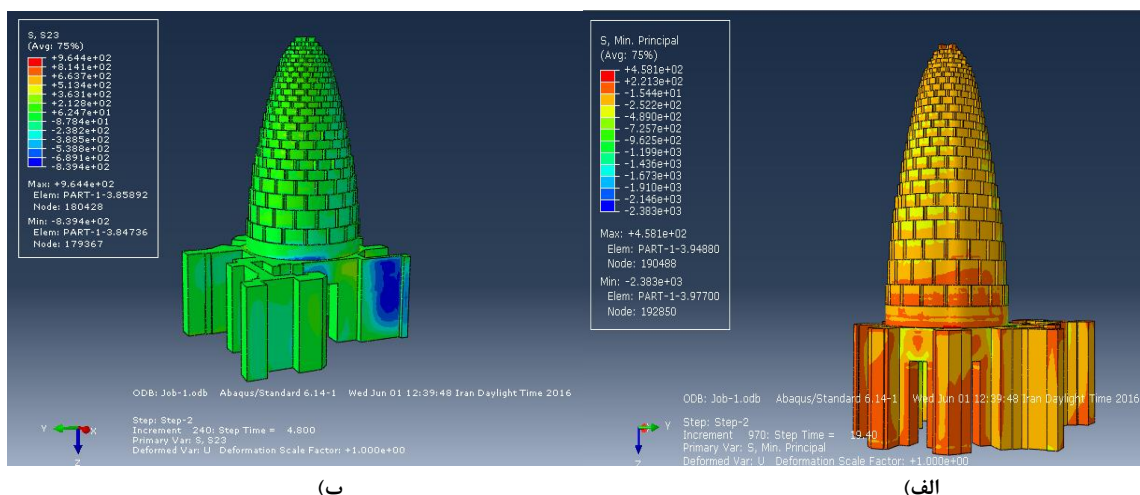
پس از انجام آنالیز فرکانسی، گنبد ارچین امامزاده جعفر بروجرد مطابق با چهار گام گفته شده و با استفاده از مؤلفه x شتاب زلزله به دست آمده از شتابنگاشت چغالوندی که توسط نرم افزار سیموسینگنال اصلاح گردید تحت آنالیز دینامیکی تاریخچه زمانی زلزله قرار گرفت.

در گام اول گنبد ارچین مورد آنالیز دینامیکی تاریخچه زمانی شتاب زلزله ۱۳۸۵ دشت سیلاخور قرار گرفت که در شکل (۸) تنش برشی و تنش اصلی کششی گنبد مشاهده می شود.



شکل ۸: الف) تنش کششی گنبد ب) تنش برشی گنبد در گام اول، تحت تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی شتاب زلزله ۱۳۸۵ سیلاخور

در گام دوم پایه های زیرین به گنبد اضافه گردید و با اعمال شتاب زلزله، تحت آنالیز دینامیکی قرار گرفت (شکل ۹).



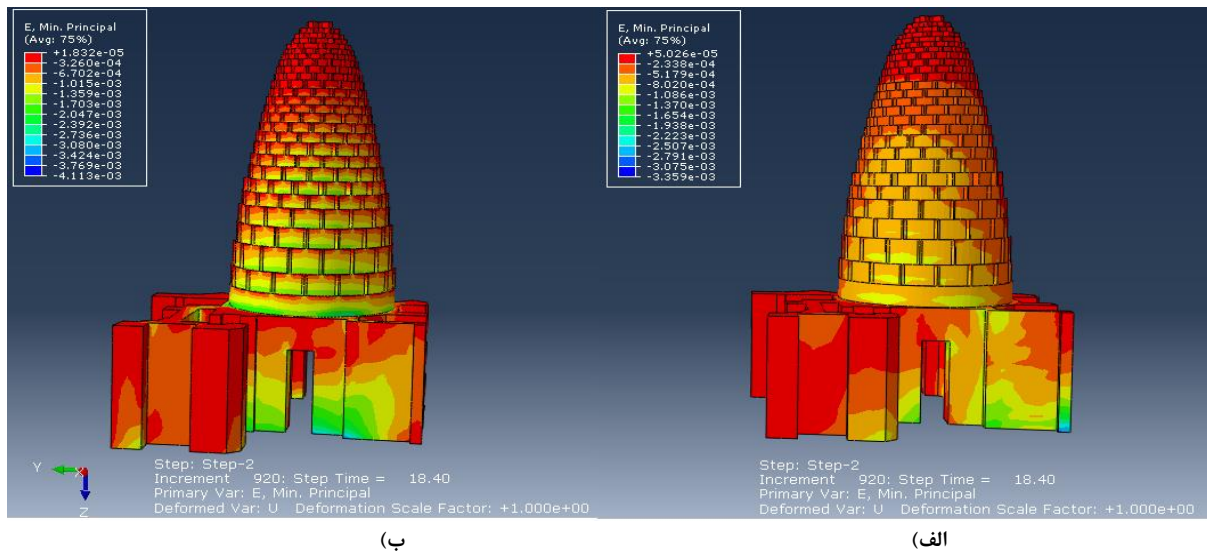
شکل ۹: الف) تنش کششی گنبد، ب) تنش برشی گنبد در گام دوم، تحت تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی شتاب زلزله ۱۳۸۵ سیلاخور

در گام بعد گنبد دپوسته میانی به مجموع گنبد و پایه های زیرین آن اضافه شد و تحت تحلیل دینامیکی قرار گرفت (شکل ۱۰)



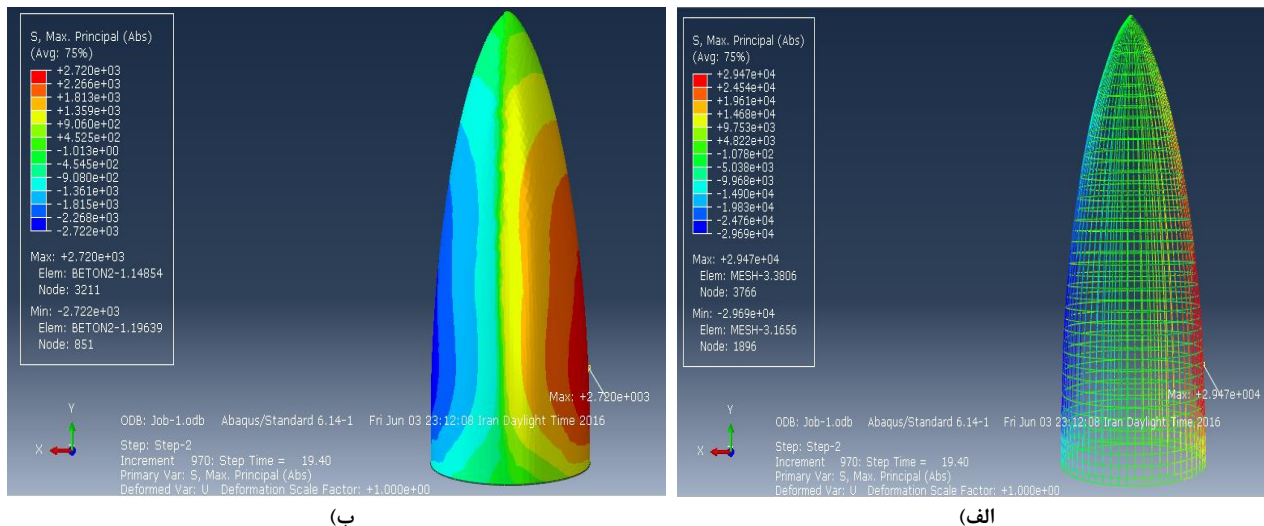
شکل ۱۰: الف) تنش برشی گنبد گام سوم تحت تحلیل دینامیکی (ب) محل خرابی گنبد در زلزله ۱۳۸۵ دشت سیلاخور

با بررسی و مقایسه کرنش‌های ترک‌خوردگی قبل و بعد از اضافه نمودن گنبد دوپوسته میانی می‌توان دریافت که ترک‌خوردگی به وجود آمده در گنبد، قبل از مدل‌سازی گنبد دوپوسته میانی از نوع لغزشی در لایه‌های افقی می‌باشد که احتمالاً به دلیل پیش‌بینی به وجود آمده در گنبد است و پس از اضافه نمودن گنبد دو پوسته ترک‌خوردگی به‌صورت قطری می‌باشد که مشابه با ترک‌خوردگی ایجادشده در دیوارهای ساختمان‌های مسکونی با مصالح بنایی است که به نظر می‌رسد گنبد دوپوسته میانی رفتار پیش‌بینی گنبد را اصلاح کرده و بهبود بخشیده است (شکل ۱۱).



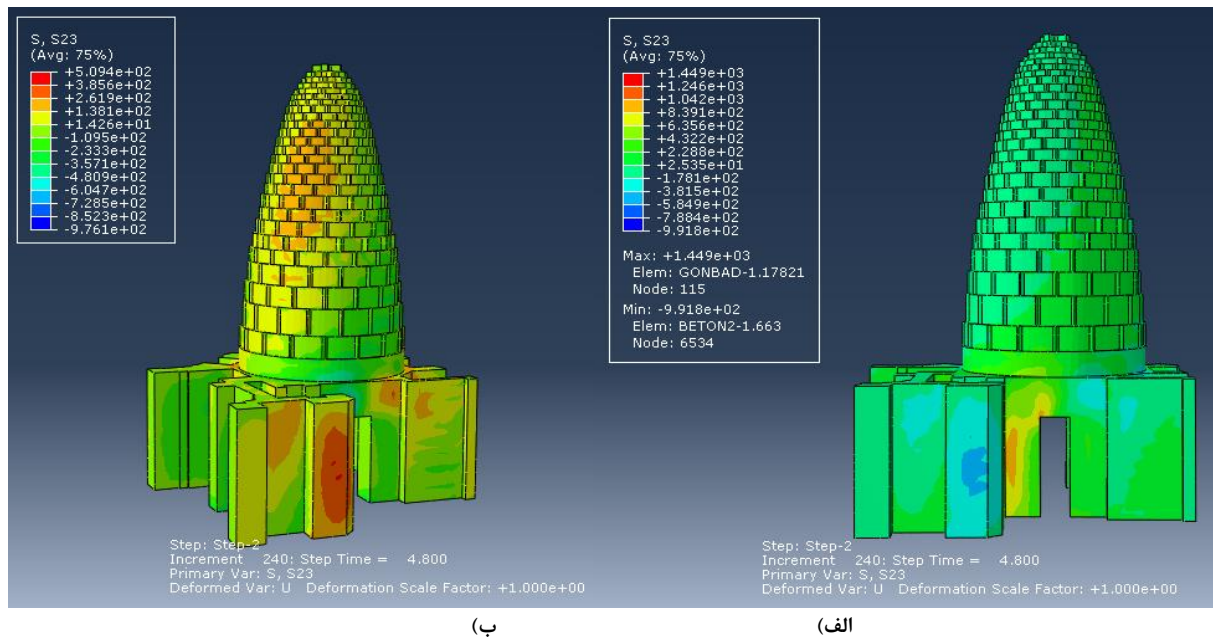
شکل ۱۱: الف) ترک‌خوردگی گنبد با در نظر گرفتن گنبد دوپوسته میانی (ب) ترک‌خوردگی گنبد، بدون گنبد میانی

در مرحله چهارم جداره داخلی گنبد با اندود بتن مسلح مقاوم سازی گردید و تحت شتاب زلزله ۱۳۸۵ سیلاخور قرار گرفت. بتن مسلح در دو لایه میلگرد و بتن مدل سازی گردیده است. سهم تنش برشی برای هر لایه در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۲: الف) تنش برشی ایجاد شده در لایه شبکه میلگرد ب) تنش برشی ایجاد شده در لایه بتن (شاتکریت) داخل گنبد پس از مقاوم سازی

همان گونه که در شکل (۱۳) مشاهده می گردد پس از مقاوم سازی گنبد با اندود بتن مسلح (شاتکریت) داخلی رفتار گنبد در برابر تنش های برشی به مقدار قابل توجه ای تقلیل یافته است. همچنین حداکثر جابجایی نوک گنبد در لحظه آخر قبل از مقاوم سازی ۱۳/۳۸ سانتیمتر و بعد از مقاوم سازی ۱۰/۱۱ سانتیمتر می باشد. این جابجایی در بالای گنبد نشانگر شتاب وارد بر این ناحیه می باشد که پس از مقاوم سازی به میزان ۲۴/۴۳ درصد کاهش یافته است.



شکل ۱۳: الف) تنش برشی ایجاد شده در گنبد بعد از مقاوم سازی با شاتکریت داخلی ب) تنش برشی گنبد قبل از مقاوم سازی

۸- نتیجه گیری

با توجه به آنالیز فرکانسی انجام شده زمان پریود طبیعی سازه بعد از مدل سازی پایه های زیرین گنبد افزایش یافته است که این موضوع نشانگر شکل پذیرتر شدن سازه گنبد با وجود پایه ها نسبت به حالت قبل از آن می باشد. همچنین با اضافه نمودن گنبد دوپوسته میانی و سپس انجام مقاوم سازی با اندود بتن مسلح داخلی زمان پریود طبیعی سازه به ترتیب کاهش یافته است. این امر نشان می دهد که سختی برشی و خمشی سازه گنبد بعد از مقاوم سازی بیشتر شده است. با اضافه شدن بتن مسلح، جرم گنبد نسبت به حالت قبل از مقاوم سازی افزایش یافته است. با توجه به اینکه حساسیت پریود اول سازه در برابر افزایش وزن نسبت به افزایش سختی بیشتر می باشد، لذا رفتار سازه نرم تر شده است و نیروی زلزله کمتری را جذب می کند. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل دینامیکی گنبد به نظر می رسد که گنبد دوپوسته میانی رفتار پیچشی گنبد تحت شتاب رفت و برگشتی زلزله را تا حدودی اصلاح نموده است. در این پژوهش، علت خرابی سازه گنبد در زلزله رفتار ترد مصالح در برابر نیروهای برشی می باشد. با مدل سازی اندود بتن مسلح داخلی و به دلیل بالا بودن مقاومت کششی و برشی بتن مسلح نسبت به مصالح بنایی این ضعف سازه ای به خوبی برطرف شده است.

مراجع

- [1] Sepahvand, M., Yamini Fard, F. and Javan Doloe, Gh. (2012). Analysis of earthquake aftershocks at 31 march in Silakhor (moment magnitude 6/1) based on the recorded data in temporary local seismic network. *Journal of Geophysics*, Volume 6 (4), Pages (73-84).
- [2] The organization of Cultural Heritage in Lorestan. (2007). *Investigation and restoration project of Imamzadeh Jafar Borujerd*. Borujerd: The organization of Cultural Heritage in Lorestan, page (225).
- [3] Danieli, M. and Aronchik, A. and Bloch, J. (2014). An original method for strengthening in ancient stone domes in seismic regions and solving corresponding problems of stress strain state analysis. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, Volume 3(10), Pages (10-15).
- [4] Kamal, O.A. and Hamdy, G.A. and El-Salakawy, T.S. (2014). Nonlinear analysis of historic and contemporary vaulted masonry assemblages. *Housing and Building National Research Center HBRC Journal*, Volume (10), Pages (236-246).
- [5] Ayub, M. and Ali, Q. and Shahzada, k. and Naseer, A. and Shoaib, M. (2013). Conservation of Islamia College Building in Pakistan. In: *The 2nd International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering*. Indonesia: Elsevier, Pages (465 – 471).
- [6] Moeeni, M. and Sahab, MG. (2013). Studying Effect of Expansive Material in Retrofitting of Masonry Domes in Historical Buildings. *World Applied Sciences Journal*, Volume 26 (4), Pages (548-552).
- [7] Paolo Foraboschi, P. (2013). Church of San Giuliano di Puglia: Seismic repair and upgrading. *Engineering Failure Analysis Journal*, Volume (33), Pages (281–314).
- [8] Rashadul, I. and Climent, M. (2008). *Inventory of FRP strengthening methods in masonry structures*. Barcelona: Department of Construction technical university of Catalonia, Pages (1-131).
- [9] Celik, O.C. and Sesigur, H. and Cili, F. (2008). Seismic evaluation and retrofit of a 16th century historic brick masonry dome in Istanbul using combined steel rings and CFRP sheets. In: *The 14th Worth Conference on Earthquake Engineering*. China: Beijing, Pages (10-19).
- [10] Mortezae, A. and Kheireidin, A. (2010). Seismic retrofitting monument mosque in Semnan. In: *Fourth National Congress of Civil Engineering*. Tehran: Tehran University, pages (13-23).
- [11] Federal Emergency Management Agency. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. Reston, Virginia: American society of civil engineers, Page (7-6).
- [12] Hemant B. and Kaushik, Durgesh C. Rai. and Sudhir K. Jain. (2007). *Uniaxial compressive stress – strain model for clay brick masonry*. Kanpur: Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur, Pages(497-501)
- [13] Ministry of Road & urban Development. (2013). *National building code issues, part 6, Design Loads for Buildings*. Tehran: Tosseh iran publisher, Pages (121-26).
- [14] Ministry of Road & urban Development. (2013). *National building code issues, part 9, implementation of reinforced concrete buildings*. Tehran: Tosseh iran publisher, Page (184).
- [15] Iranian Seismological Center, (2006) *Receive earthquake information*. Available at: <http://irsc.ut.ac.ir>

- [16] Shahbazi, R. and yekrangniya, M. (2014). *Abaqus Applide Manual with Examples for Civil Engineering*. Tehran: elme omran, Page (206)
- [17] Standing Committee on the Review of Building Regulations against Earthquake. (2014). *Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings. Standard No.2800. 4th edition*. Tehran: Road, Housing & Urban Development Research Center, Page (135).
- [18] Trifunac M.D and Brady A.G. (1975). A study on the duration of strong earthquake ground motion. *Bulletin of Seismological Society of America*, volume (65), pages (581-626).