مطالعات باستان‌شناسی، دورهٔ ۱۲، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۹
(از ص ۲۳ تا ص ۳۹)
10.22059/jarcs.2020.201806.142585
Print ISSN: 2676-4288- Online ISSN: 2251-9297
https://jarcs.ut.ac.ir

An Analysis of Structural Reasons for the Use of Bulbous Domes and their Prevalence in Iran: A Case Study of Shah Mosque in Mashhad

Zeinab Akbari
PhD Student of Archaeology, Tarbiat Modares University
Javad Neyestani
Associate Professor, Department of Archaeology, University of Tarbiat Modares
Mohammadreza Nasiri
Professor, Department of History, Payame Noor university of Tehran
Received: 12 June, 2018; Accepted: 21 September, 2020

Abstract
Bulbous domes are among discontinuous double-shell domes and has been developed in Iran since the middle of the 9th century AH/ the 15th century AD, concurrent with Timurid period. In this shape of domes, the dome profile was changed so that it began a return below the base of the arch, producing thereby a slight bulge that. The terminology for bulge in Iranian architecture is Avgun. Bulbous dome is considered as a part of Iranian architectural culture and the architects of this land have used this complex structure in a way that has been developing ever since its formation. It seems that this shape of dome requires a precise assessment in terms of design, mechanism of power transmission, and features of structural elements. The main purpose of this paper is to show the role of Avgun as an architectural structure in the bulbous domes, which supposed to have just an aesthetic function. In this study, the bulbous dome of Shah Mosque was simulated using Abaqus software. Then, its responses to the static and dynamic loads were tested. In order to show the Avgun role, this dome was compared with another dome, without Avgun, that possessed all similar architectural characteristics. The analysis revealed that Avgun is not just an aesthetic feature and that its prevalence had a structural reason too; So that Avgun reduces the amount of the dome's weight pressure on the dome chamber bases.

Keywords: *bulbous dome, Avgun ,Shah mosque, weight load, seismic load*

دلایل سازه‌ای استفاده و رواج گنبدهای شلجمی شکل در ایران: مطالعه موردی مسجد شاه مشهد

زینب اکبری
دانشجوی دکتری باستان‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس
جواد نیستانی*
دانشیار گروه باستان‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس
محمدرضا نصیری
استاد گروه تاریخ، دانشگاه پیام نور تهران
تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۳۱

چکیده
گنبدهای شلجمی‌شکل ازجمله گنبدهای دوپوسته گسسته به شمار می‌روند که از اواسط قرن نهم هجری قمری/ پانزدهم میلادی و هم‌زمان با دوره تیموری در ایران رواج می‌یابند. در این شکل از گنبدها، پوسته خارجی در زیرِ قاعده قوس از خط مستقیم منحرف می‌شود و بدین‌وسیله تولید شکم‌دادگی مختصری می‌کند که در اصطلاح معماری به آن، آوگون گفته می‌شود. گنبد شلجمی به‌عنوان بخشی از فرهنگ معماری ایرانی محسوب می‌شود و معماران این سرزمین این سازه پیچیده را به‌گونه‌ای شایسته تا به دوران معاصر مورداستفاده قرار داده‌اند. درنتیجه به نظر می‌رسد که این شکل از گنبد، نیازمند یک ارزیابی دقیق پیرامون طراحی، مکانیسم انتقال نیرو و ویژگی‌های عناصر سازه‌ای آن باشد. در این مقاله هدف اصلی، نشان دادن نقش آوگون به‌عنوان عنصری معمارانه در گنبدهای شلجمی شکل است که پیش‌ازاین، تنها کارکردی زیبایی‌شناسانه برای آن متصور بوده‌اند. در پژوهش حاضر، گنبد شلجمی شکل مسجد شاه مشهد، به‌عنوان نمونه موردی انتخاب‌شده است. این گنبد در نرم‌افزار *Abaqus* شبیه‌سازی گردید و سپس واکنش آن در برابر بارهای استاتیکی (بار وزن) و دینامیکی (بار زلزله) مورد آزمایش قرار گرفت. به‌منظور نشان دادن نقش آوگون، مقایسه‌ای میان این گنبد و گنبدی با تمامِ ویژگی‌های معمارانه مشابه، اما بدون آوگون، انجام گرفت. تحلیل موردنظر نشان داد که آوگون، تنها عنصری زیبایی‌شناسانه نبوده و رواج این شکل از گنبد دلیل سازه‌ای نیز داشته است. به این صورت که آوگون، از میزان فشاری که نیروی وزن به پایه‌های گنبدخانه وارد می‌کند می‌کاهد.

واژه‌های کلیدی: گنبد شلجمی، آوگون، مسجد شاه، بار وزن، بار زلزله.

*رایانامه‌ی نویسنده مسئول: *jneyestani@modares.ac.ir*

۱.مقدمه

ساخت گنبد، به عوامل متعددی از قبیل شرایط زیست‌محیطی، کیفیت مواد در دسترس و تکنیک‌های مورداستفاده در منطقه و مرتبط با این نوع بناها، بستگی دارد. در فلات ایران که دارای آب‌وهوای گرم و خشک است، ایرانیان به‌ندرت از پوشش‌های مسطح استفاده کرده‌اند؛ چراکه فلات ایران دارای خاک فراوان و مناسب-ترین ماده برای ساخت گنبدها به شمار می‌رود. درنتیجه عناصر طاقی و گنبدها، نقش مهمی در مناطق گرم و خشکی چون ایران ایفاء می‌کنند.

گنبد در دوره‌های مختلف تاریخی، ازجمله اختراعات بشری بود که برای پوشاندن فضاهایی با دهانه وسیع به کار می‌رفت. این سازهٔ کهن، در اشکال متنوع و با کمک روش‌های مختلف در طول قرن‌ها ساخته شد. بنا به تعریف غیاث‌الدین جمشید کاشانی، گنبد طاقی است که حول محور قائم چرخانده شود و با توجه به دورهای مختلف، اشکال گوناگونی را به وجود آورد (کاشانی، ۱۳۹۲: ۷۴). درواقع گنبد پوششی است که بر روی زمینه‌ای دایره‌ای شکل برپا می‌شود و بر سه بخش استوار است: ۱. گنبد خانه: فضایی مکعب شکل که گنبد روی آن زده می‌شود؛ ۲. بشن: قسمتی از بنا که از روی زمینه تهرنگ به‌صورت مکعب بالا می‌آید و گنبد روی آن قرار می‌گیرد (پیرنیا، ۱۳۷۰: ۱۴۲)؛ ۳. چپیره: اندامی که با استفاده از آن طرح مکعبی به زمینه‌ای دایره‌ای شکل تبدیل و پس‌ازآن گنبد بر روی آن ساخته می‌شود (پیرنیا، ۱۳۷۰: ۸). ما در ایران با تنوع گسترده‌ای از گنبدها مواجه هستیم. در این میان گنبدهای شلجمی شکل، نمونه‌ای از گنبدهای دوپوسته گسسته در فرهنگ معماری ایران به شمار می‌روند که در اوایل قرن نهم هجری‌قمری/ پانزدهم میلادی و هم‌زمان با دوره تیموری رواج می‌یابند. در این میان نمونه موردی ما یعنی گنبد مسجد شاه مشهد (۱۴۵۱م/ ۸۵۵ه.ق) یکی از نخستین و کامل‌ترین نمونه گنبدهای شلجمی شکل با کمترین دخل و تصرف در داخل مرزهای کنونی ایران محسوب می‌شود.

در پژوهش حاضر، کوشیده‌ایم که انتقال نیروها در این شکل از گنبدها مورد ارزیابی و تحلیل قرار گیرد و به این سؤال پاسخی در خور توجه داده شود که چرا گنبدهای شلجمی‌شکل یا همان گنبدهای آوگون‌دار جایگزین گنبدهای دوپوسته پیشین شدند؟

۲.پیشینه پژوهش

در ارتباط با انتقال نیرو در گنبدهای دوره اسلامی می‌توان به مقاله مهرداد حجازی با عنوان «تحلیل لرزه‌ای گنبدهای ایرانی»[۱] اشاره کرد که در آن سیستم سازه‌ای تعدادی از گنبدهای تاریخی ایران با مصالح بنّایی و مقاومت و پایداری آن‌ها در برابر اثرات دینامیکی زلزله با استفاده از نرم‌افزار *NISA-II* موردبررسی و تحلیل قرارگرفته است. در مقاله دیگری با عنوان «نگاهی به مرمت گنبد در ایران»[۲]، علی زمانی‌فرد و مهرداد حجازی بار دیگر با استفاده از روش المان‌های محدود و نرم‌افزار *NISA-II* به آنالیز تعدادی از گنبدهای آجری پرداخته‌اند. همچنین قاسم-آبادی، محمودآبادی، بهار و مهدوی نژاد در مقاله‌ای با عنوان *"Assessment of behavior of two-shelled domes in Iranian traditional architecture: The Charbagh School, Isfahan, Iran"*[3] به بررسی مقاومت گنبد مدرسه چهارباغ اصفهان تحت بارگذاری‌های مختلف با استفاده از برنامه *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2011* پرداخته‌اند.

۳.روش بررسی

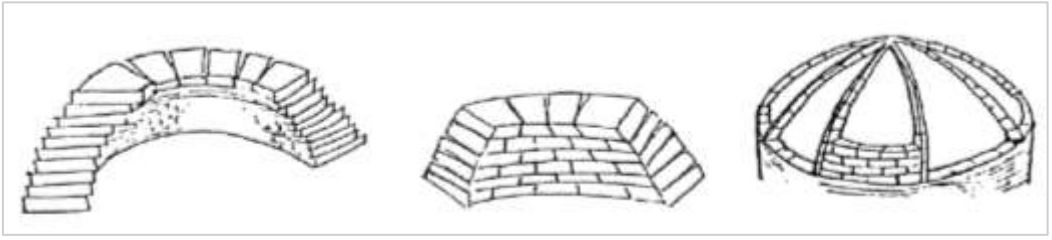
برای رسیدن به هدف موردنظر در این پژوهش اقدام به مدل‌سازی و آنالیز استاتیکی و دینامیکی به‌صورت مقایسه‌ای میان دو گنبد آوگون‌دار و فاقد آوگون کردیم. برای انجام این آنالیز از روش المان‌های محدود که یکی از قوی‌ترین روش‌ها برای آنالیز سازه‌های با مصالح بنّایی می‌باشد استفاده شده است. روش موردنظر روشی عددی برای آنالیز سازه‌ها، تحلیل تنش‌ها و حل مسائل مهندسی است. در این میان برای تخمین میزان تخریب اجزاء سازه موردنظر از نرم‌افزار *Abaqus 6.14-4* استفاده شد.

۴.مبانی نظری پژوهش

۴-۱.روش ساخت گنبد و زمینه تاریخی پیدایش گنبدهای شلجمی شکل

ساخت یک گنبد، تنها یک عمل فنی ساده نیست؛ بلکه به معنی حل مسائل ایستایی آن با استفاده از مصالح موجود و در نظر گرفتن حدود عملکرد درخواست شده و همینطور در نظر گرفتن شکلی است که مشخص‌کننده الحاق آن با محیط اطراف خود است. بنابراین مستعد کردن یک سیستم ایستایی عملی پیچیده محسوب می‌شود که ارتباط و شرایط دو جانبه‌ای با دیگر عناصر معماری مانند مصالح، روش ساخت و اجزاء و عناصر اصلی گنبد دارد. در ارتباط با اصول ساختمانی و شیوه‌های اجرا، نخستین فعالیت صورت‌گرفته، انتخاب مصالح است که همیشه پیش از انتخاب سازه و در ارتباط با طبیعت اطراف صورت می‌گیرد. فراوانی نوع خاصی از مصالح در منطقه‌ای، تأثیر به‌سزایی در استفاده از آن مصالح با حجم زیاد و رونق یک نوع خاص از سیستم ایستایی در آن محل دارد. معماران این سازه‌ها، در زمان ساخت علاوه بر حل مسائل ایستایی می‌بایست به مواردی نظیر گرما یا سرمای زیاد منطقه نیز توجه می‌کرده‌اند. راهکارهایی نظیر دو پوسته‌سازی این سازه‌ها علاوه بر آنکه منجر به کاهش وزن و نیروی وارده و عملکرد سازه‌ای بهتر می‌شد، بلکه تا میزان زیادی تبادل حرارتی داخل با خارج بنا را نیز کاهش می‌داد (معماریان، ۱۳۶۷: ۲-۳). در این میان آجر به عنوان ماده اصلی در ساخت گنبدها، از ویژگی‌های مکانیکی با اهمیتی برخوردار است و در مواجهه با فشارهای وارده، مقاومت بهتری داشته و امکانات فنی-هنری معماری را افزایش می‌دهد. همچنین مقاومت خوب آجر در مقابل فرسایش، آن را به صورت ماده‌ای حفاظتی در مقابل کشش‌های مکانیکی درآورده است. استفاده از آجر نیاز به استفاده از ملاتی با همان کیفیات مکانیکی (مانند گچ و آهک) دارد (بزنوال، ۱۳۷۹: ۳۱؛ فرشاد، ۱۳۵۶: ۲۸۹). در واقع یکی از رموز اجرای سریع گنبدهای ایرانی، کاربرد ملات گچ و خاک بوده است. این ماده با گیرایی سریع، باعث می‌شد تا بتوان ردیف‌های آجری را به سرعت بر روی ردیف‌های زیرین اجرا کرد (معماریان، ج۲، ۱۳۹۱: ۴۲۶).

روش‌های معمول اجرای گنبد، رگ‌چین، گردچین و ترکین بوده است. در روش رگ‌چین، رگ‌های آجر یا خشت، موازی با خط افق چیده می‌شود؛ اما در روش گردچین، رگ‌های آجر متمایل به مرکز گنبد است و به صورت شعاعی چیده می‌شود (پیرنیا، ۱۳۷۰: ۱۱۳). در روش ترکین، نخست باریکه‌طاق‌هایی برپا می‌شود، سپس آجرها بین آنها و برای کامل کردن گنبد، قرار می‌گیرند (*Hejazi. 1997: 54*). (تصویر ۱).



تصویر ۱: روش‌های ساخت گنبد (Hejazi. 1997: 54)

مطالعات تاریخی نشان می‌دهد، معماران ایرانی برای رسیدن به سازه‌ای پایدار با آگاهی از مسائل ایستایی گنبد، در طول چندین قرن با بهره‌گیری از انواع قوس‌ها، به گنبدها تنوعی گسترده بخشیده‌اند؛ تنوعی ناشی از اختلاف دوره‌های تاریخی، تغییر دهانه فضاها، نحوه انتقال مربع به دایره (گوشه‌سازی)، تغییر ضخامت و استفاه از دو پوشش داخلی و خارجی و ... که در یک روند تاریخی به سمت بهینه‌سازی شکل سازه حرکت کرده‌اند.

با توجه به موارد ذکر شده، در ساخت گنبدهای ایرانی پوسته‌ها به سه روش اصلی در کنار هم قرار می‌گیرند. معماران معاصر تقسیم‌بندی‌های مختلفی را در این زمینه ارائه می‌دهند. با وجود این، تمامی آنها تقریبا به یک تقسیم‌بندی کلی و مشابه رسیده‌اند. این تقسیم‌بندی شامل گنبدهای یک‌پوسته، دوپوسته (پیوسته و گسسته) و سه‌پوسته هستند. گنبد یک‌پوسته، قدیمی‌ترین نوع گنبد محسوب می‌شود که دارای یک پوسته باربر است (معماریان، ج۲، ۱۳۹۱: ۴۱۸؛ زمرشیدی، ۱۳۸۹: ۳۱۹؛ پیرنیا، ۱۳۷۰: ۶۴). در قرن هفتم و هشتم هجری به دلیل رواج گنبدهای دوپوسته، از گنبدهای یک‌پوسته کمتر استفاده شده است. گنبدهای دوپوسته نتیجه تکامل تکنیکی معماری ایران در ساخت گنبدهای عادی هستند. در گنبدهای دوپوسته پیوسته، معمولا فاصله قابل توجه‌ای بین پوسته‌ها وجود ندارد و پوسته‌ها توسط بست‌های آجری به یکدیگر متصل شده‌اند. گاهی نیز هیچ فاصله‌ای بین پوسته‌ها به چشم نمی‌خورد (*Hejazi. 1997: 54*؛ معماریان، ج۲، ۱۳۹۱: ۴۵۸؛ زمرشیدی، ۱۳۸۹: ۳۲۲؛ پیرنیا، ۱۳۷۰: ۶۴) ؛ اما در گنبدهای دوپوسته گسسته، فاصله قابل توجه‌ای بین پوسته‌ها وجود دارد. فاصله و جدایی دو پوسته ممکن است از بخش بالایی گنبد یا از پایه (بالای گریو) آغاز شود. به اعتقاد دکتر زمانی، «در ایجاد گنبدهای دو پوش، منظورهای تزئینی و زیبایی‌خواهی نیز موثر بوده است چراکه ایجاد پوش دوم عظمت بیشتری به بنا می‌بخشد و عظمت از عوامل مهم زیبایی است» (زمانی، ۱۳۵۲: ۵۱). این شکل از گنبد بیش از سایر انواع گنبدها موردتوجه بوده است. پوسته داخلی در بیشتر موارد مدور است؛ اما پوسته خارجی می‌تواند اشکال مختلفی داشته باشد (*Hejazi. 1997: 54*؛ زمانی، ۱۳۵۲: ۵۰) ؛ و در نهایت گنبدهای سه‌پوسته که نمونه‌های کمی از این گونه شناسایی شده است.

در این میان گنبدهای شلجمی شکل، نمونه‌ای از گنبدهای دوپوسته گسسته در فرهنگ معماری ایران به شمار می‌روند که چنین نامی به واسطه شکل ظاهر و شباهت آن‌ها به شلغم یا شلجم اطلاق شده است. گنبد شلجمی شکل در اوایل قرن نهم هجری و همزمان با دوره تیموری در ایران رواج می‌یابد. در این دوره گنبد از تکامل‌یافته‌ترین عناصر معماری به شمار می‌رود. در واقع این معماران تیموری بودند که تغییراتی را در نیمرخ گنبد به وجود آوردند. به این شکل که گنبد در زیر قاعده قوس از خط مستقیم منحرف می‌شود و بدین وسیله تولید شکم‌دادگی مختصری می‌کند (گلمبک و ویلبر، ۱۳۷۴: ۱۶۳). در اصطلاح معماری به این برجستگی، «آوگون» گفته می‌شود. این گنبدها در ابتدا دارای ساختاری خربزه‌ای شکل (کلاهخودی) و بلند بودند (*Peterson. 2002: 283*). *Born* معتقد است که شکل ظاهری این گنبدها را نمی‌توان تنها به واسطه پیشرفت‌های تکنیکی شرح

داد. به نظر نمی‌رسد که گنبدهای نیم‌دایره‌ای صرفا به واسطه تکامل سبک‌ها به گنبدهای شلجمی شکل تبدیل شده باشند (*Born. 1943: 32*).

تعداد بناهای با گنبد شلجمی شکل، پراکندگی آنها در ایران بزرگ از سمرقند و بخارا، بلخ و هرات تا شمال غرب ایران، ایروان، اردبیل، شیراز، اصفهان، یزد، کرمان، کاشان و حتی آبادی‌های نه چندان بزرگ مانند افوشته نطنز و کاخک گناباد، نشان از رواج این نوع گنبد دارد. گنبدی که به عنوان بخشی از فرهنگ معماری ایرانی محسوب شده و معماران این سرزمین این سازه پیچیده را به گونه‌ای که می‌خواستند می‌ساختند (معماریان، ج۲، ۱۳۹۱: ۵۹۰). تجارب تکنیکی و طراحی‌های اصلی توسط صنعتگرانی از ملیت‌های مختلف به اشتراک و تبادل گذاشته شد. تلاش‌ها و فعالیت‌های بی‌وقفه آنها بود که الهام‌بخش توسعه شکل‌های جدید در معماری گردید؛ به گونه‌ای که با نابودی حکومت‌های سیاسی و نظامی، این تلاش‌ها همچنان ادامه یافت.

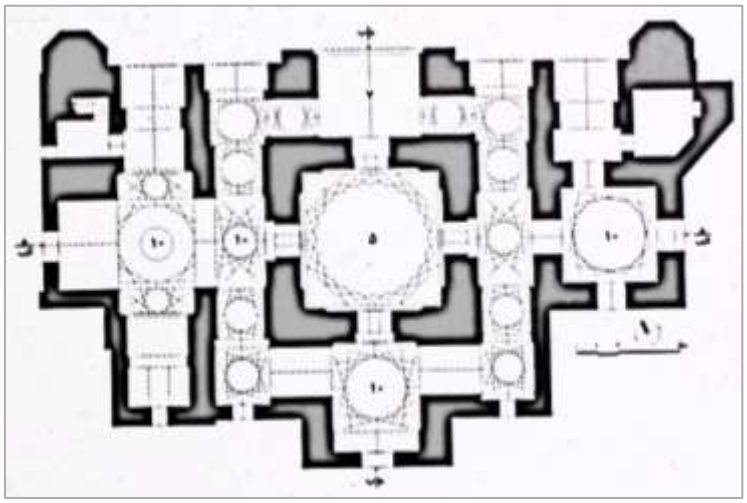
مسجد گوهرشاد مشهد (۱۴۱۶-۱۴۱۸م / ۸۲۱-۸۱۹ه.ق) نخستین بنایی به شمار می‌رود که با گنبدی شلجمی شکل در ایران و به شکلی شایسته پابرجاست. در این زمان، نمونه‌هایی از این شکل جدید در آسیای مرکزی ایجاد شد. گنبدهای ایرانی، در تقلید شکمِ مستقیم گنبدهای خربزه‌ای شکل ناموفق بودند و گنبدهایی با شکمی بزرگ‌تر ایجاد کردند. در سال ۱۴۵۱م/ ۸۵۵ه.ق، امیر ملک شاه، مسجد شاه مشهد را ساخت و گنبدی شبیه به گنبد مسجد گوهرشاد بر فراز آن ایجاد کرد. از این تاریخ، این شکل جدید، یعنی گنبدی آوگون‌دار در معماری ایرانی رواج یافت. در قرن یازدهم هجری/ هفدهم میلادی، گونه ایرانی گنبد شلجمی شکل به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفت. در سال (۱۶۱۱م/ ۱۰۲۰ه.ق) و در زمان حکومت شاه عباس، مسجد شاه اصفهان با گنبد شلجمی باشکوهی ساخته شد.

باستان‌شناسان و معماران تا به امروز تنها دلایل زیبایی‌شناسانه را برای ساخت، استفاده و رواج گنبدهای شلجمی شکل مطرح نموده‌اند. *Wolfgang Born* آلمانی، متخصص تاریخ هنر، معتقد است: «گنبدهای شلجمی شکل، پوسته‌هایی تزئینی هستند که بر روی گنبدهای کوتاه‌تر قرار گرفته‌اند» (*33 :1943*). پوگاچنکوا، باستان شناس روسی نیز درباره نخستین نمونه‌های گنبد شلجمی با گریو بلند در آسیای مرکزی، بر این باور است که، «گنبد بیرونی محافظ بنا در مقابل ناملایمات جوی است اما با انتقال به مرکز ثقل بنا به سمت بالا، موجب افزایش خطر در صورت وقوع زلزله می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که کارکرد آن اساسا جنبه زیبایی شناختی دارد» (۴۱: ۱۳۸۷).

۵.گنبد مسجد شاه مشهد

در شرق ایران، رسم برپایی گنبدهای شلجمی شکل و رفیع تقریبا همزمان با آسیای مرکزی رواج یافت. مسجد شاه (هفتاد و دو تن) در سال ۸۵۵ه.ق (۱۴۵۱م) به فرمان امیر ملک شاه و به دست استادِ معمار، شمس‌الدین تبریزی، در نزدیکی حرم امام رضا (ع) بنا شد (پوگاچنکوا، ۱۳۸۷: ۲۲۰). (تصویر ۲). این بنا دارای گنبدخانه چهارگوشی است که در میان راهروها و اتاق‌های کوچک‌تر محصور است (اوکین، ۱۳۸۶: ۴۰۵). گنبدخانه دارای ابعاد ۶/۷۰×۶/۸۶ متر است و گوشه‌سازی گنبد تا زیر منطقه انتقالی گنبد با سکنج‌های کشیده انجام و از قسمت اصلی عرقچین گنبد به وسیله کاربندی اجرا شده است. همچنین مصالح به‌کار رفته در بنا، آجر به اضافه گچ نیم‌کوب است. در مرمت‌های اخیر بنا، از ماسه‌سیمان و گچ نیز استفاده شده است (حسینی، ج۱، ۱۳۹۳، ۱۳۷). (تصویر ۳).

تصویر ۲: نمای غربی مسجد شاه مشهد (عکس از نگارندگان)



تصویر ۳: برش افقی مسجد شاه مشهد (حاجی‌قاسمی، ۱۳۸۹، ج۱۳: ۱۱۸)

اجزای اصلی این گنبد تقریبا همانند سایر گنبدهای شلجمی شکل عبارت است از: **پوسته داخلی یا آهیانه** که پوشاننده گنبدخانه است و شکل هندسی ساده‌ای نسبت به پوسته خارجی دارد. اندازه دهانه پوسته داخلی در حدود ۶ متر با افرازی در حدود ۱/۴۰ متر است. بلندای آن تا کف حدود ۱۰ متر می‌باشد (معماریان، ج۲، ۱۳۹۱: ۵۸۰). روی پوسته داخلی گنبد، **باریکه‌طاق‌های** منظمی دیده می‌شود که یک اندام سازه‌ای به شمار می‌رود؛ این عنصر معمارانه در واقع جزئی از پوسته داخلی است که در مواردی به خشخاشی‌ها متصل می‌شود و گونه‌ای یکپارچه در اندام‌های سازه‌ای این نوع گنبد را به وجود می‌آورد (پیرنیا، ۱۳۷۰: ۷۹). چنانچه دیوارهای

خشخاشی مستقیما روی آهیانه واقع شود خطر شکستن پوسته داخلی به وجود می‌آید. در نتیجه پس از پوشش آهیانه، باریکه‌طاق‌هایی را برای باربری دیوارهای خشخاشی روی آن اجرا می‌کنند. اجرای این قوس‌بندی، وزن دیوارهای خشخاشی را به قسمت‌های زیرین و در نتیجه به دیوارها و ستون‌های بنا منتقل می‌سازد (زمرشیدی، ۱۳۸۹: ۳۳۰-۳۲۹). این سامانه در کم کردن نیروی رانش پایه موثر است (معماریان، ج۲، ۱۳۹۱: ۵۸۲).

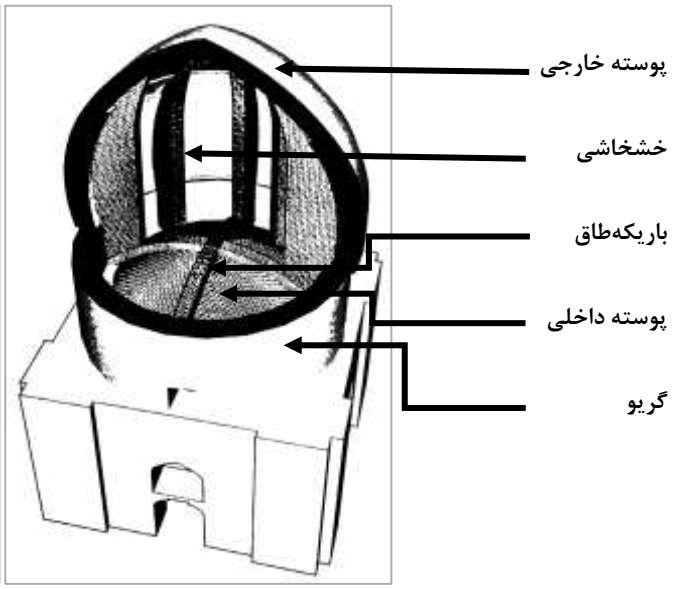
در حدفاصل بین آهیانه و پوسته خارجی، ساقه گنبد قرار دارد که در صورت ارتفاع زیاد، **گریو** نامیده می‌شود. گریو مخروطی ناقص نزدیک به استوانه است (پیرنیا، ۱۳۷۰: ۸۶). این بخش از گنبد یا تمامِ پوسته داخلی یا بخشی از آن را در درون خود پنهان می‌کند. گنبد مسجد شاه نیز بر روی ساقه گنبدی مرتفع در پشت ایوان کاملا آشکار است. این ترکیب یکی از ترکیبات نادر صور معماری ایرانی است که گنبد شلجمی شکل و ساقه گنبد آن توازنی عالی دارند. آرتور اپهام پوپ، به شایستگی مسجد شاه را توصیف کرده است و توجیح او برای ترجیح آن بر مسجد گوهرشاد، افزایش ارتفاع ساقه گنبد آن است که سبب می‌شد برآمدگی گنبد چندان زننده جلوه نکند (پوپ، ۱۳۹۳: ۲۰۳). تلاش‌های ارزشمندی اغلب توسط طراحان برای ساخت بنایی هرچه بلندتر با استفاده از گریو بلند صورت می‌گرفت. در واقع همزمان با دوره تیموری است که گریوهای بلند رواج پیدا می‌کنند که برخی از محققان دلیل آن را مطابقت آن با خواسته قدرت‌نمایی حاکمان می‌دانند (معماریان، ج۲، ۱۳۹۱: ۵۶۹). ضخامت گریو نیز بایستی به منظور انتقال و خنثی کردن نیروهای عمودی پوسته خارجی به بخش‌های پایینی مخصوصا پوسته داخلی نسبتا زیاد باشد (*Ashkan & Ahmad. 2010: 301*). بلندای گریو تحت‌تأثیر دوره و مکان ساخت آن بوده است. در دوره تیموری ساخت گریوهای بلند رواج می‌یابد تا جایی که نسبت دهانه گنبد به بلندای آن ۱ به ۹ می‌شود. منطقه رواج گریوهای بلند سمرقند، بخارا و بخش‌هایی از افغانستان بوده است. ارتفاع گریو در جنوب خراسان بزرگ و مناطق مرکزی به خصوص اصفهان تعدیل می‌یابد و دهانه گنبد دو برابر ارتفاع گریو می‌شود (معماریان، ج۲، ۱۳۹۱: ۵۳۷-۵۳۸).

تعداد هشت **خشخاشی** آجری (چهار خشخاشی اصلی و چهار خشخاشی کوچک) در حدفاصل بین دو پوسته گنبد به‌چشم می‌خورد. چهار خشخاشی بزرگتر بر روی یک جفت باریکه‌طاق‌های متقاطع قرار گرفته‌اند. این اندام یک تیغه آجری عمودی است که در تعدادی مشخص در هنگام اجرای گریو با آن ساخته می‌شود و معمولا تا حدود ½ افراز گنبد بلندا دارد (معماریان، ج۲، ۱۳۹۱: ۵۱۴). خشخاشی میان دو پوسته به صورت نصف‌النهاری تعبیه می‌شود تا بار را تقسیم و ثبات گنبد را تضمین کند (پوگاچنکوا، ۱۳۸۷: ۴۱). نام خشخاشی برگرفته از ساختمان گیاه خشخاش است که در بدنه پوسته آن از داخل، تیغه‌های متعدد وجود دارد که احتمالا باعث استحکام پوسته نازک آن می‌شود. برای خشخاشی کارکردهای گوناگونی می‌توان برشمرد. تعادل پوسته خارجی یکی از کارکردهای آن است. کارکرد دوم خشخاشی ایجاد یک انسجام ساختمانی بین پوسته زیرین، گریو و پوسته خارجی است. این انسجام هنگامی که سازه تحت‌تأثیر نیروهای افقی مانند زلزله و باد است به استحکام گنبد کمک می‌کند. خشخاشی‌ها چند ضلع دارند و معمولا به تعداد زوج مانند ۴، ۸، ۱۶ و ۲۰ عدد است که دو به دو، روبه‌روی هم قرار می‌گیرند. بلندای خشخاشی نسبت به ارتفاع گنبد تغییر می‌کند (معماریان، ج۲، ۱۳۹۱: ۵۳۹-۵۴۱) و محل قرارگیری و اندازه آنها تا حد زیادی وابسته به اندازه دهانه است (*Ashkan & Ahmad. 2010: 303*). در برخی از بناها خشخاشی‌ها با باریکه‌طاق‌ها به‌هم پیوند داده شده‌اند. این کار می‌تواند یک انسجام درونی بین پوسته داخلی و خارجی ایجاد کند. همچنین یک کارکرد ایستایی جالب نیز دارد. باریکه‌طاق‌های پوسته

درونی مانند یک چفد باربر عمل می‌کنند. آنها نیروی مایلی را به پاکار خود انتقال می‌دهند. در این قسمت حداکثر نیروی رانش ایجاد می‌شود. وجود خشخاشی‌ها به معنای ایجاد وزن روی پاکار باریکه‌طاق است. به زبان ساده، برآیند نیروهای باریکه‌طاق با نیروی حاصله از وزن خشخاشی ترکیب می‌شود و برآیند دیگری را به وجود می‌آورد که به داخل جرز یا تبره (ضخامت) گریو وارد می‌شود (معماریان، ج۲، ۱۳۹۱: ۵۴۱-۵۴۳).

پوسته خارجی این گنبد از نوع تیزه‌دار و با آوگون است. به پوسته بیرونی گنبد، خود گفته می‌شود. شکل این پوسته از دَوران چفدی باربر حول محور قائم‌اش به وجود می‌آید (پیرنیا، ۱۳۷۰: ۱۲۱). فاصله بین دو پوسته داخلی و خارجی گنبد مسجد شاه مشهد، در حدود ۷ متر است. هنگامی که دهانه گنبد بر اساس اندازه گنبدخانه انتخاب می‌شود، بلندای گنبد نیز متناسب با آن مشخص می‌گردد و با افزودن به ضخامت گنبد، اندازه و شکل پوسته بیرونی آن نیز معین می‌شود (معماریان، ج۲، ۱۳۹۱: ۵۳۲ و ۵۸۲). در واقع هنگامی که گریو به اتمام می‌رسد، چفد موردنظر روی آن قرار می‌گیرد. همانگونه که اشاره شد پوسته خارجی گنبدهای شلجمی شکل در محل اتصال بین قوس و ساقه، دارای بیرون‌زدگی منحنی شکل است که آن را آوگون می‌نامند. آوگون از لحاظ ساختمانی و ایستایی مشکلاتی را دربردارد (معماریان، ۱۳۶۷: ۲۳۹) (تصویر ۴ و ۵).

تصویر ۴: نمایی از گنبد شلجمی مسجد شاه مشهد (عکس از نگارندگان)



تصویر ۵: اجزای اصلی گنبد مسجد شاه مشهد (معماریان، ج۲، ۱۳۹۱: ۵۸۲)

۶.شرح رفتار گنبدهای شلجمی شکل

پایداری در سازه‌های گنبدی بسیار مهم است. همان‌گونه که ذکر شد، شکل گنبد از دوَران منحنی حول محور قائم خود حاصل می‌گردد. اگر گنبد تحت فشار بارهای عمودی یا افقی واقع شود نیروهایی در امتداد قوس به پایه‌ها منتقل می‌گردد. بار افقی همان نیروی رانش و بار عمودی نیز نیروی وزن در سازه موردنظر ما است. بارهای عمودی توسط نصف‌النهارهایی از تیزه گنبد به پاکار منتقل می‌شود. افزون بر نیروی نصف‌النهاری، نیروهای مداری نیز وجود دارند. مدارهای افقی که در مقاطع دایره‌ای عمل می‌کنند به طورضمنی باعث

پیشگیری از فعال شدن نیروهای رانشی موجود در نصف‌النهارها می‌گردد که این طرز رفتار نصف‌النهارها و مدارها یک شکل بسته و متعادل در پوسته گنبدی ایجاد می‌نماید. لذا گنبد جهت تحمل بارهای وارده تغییر شکل نمی‌دهد و سازه‌ای پایدار و استوار باقی می‌ماند. طراحی گنبد با توجه به بارگذاری و تنش‌ها تعیین می‌شود و ضخامت (تبره) با توجه به دهانه و افراز انتخاب و در مقاطع مختلف سبک‌تر می‌گردد (محمد مرادی و محبعلی، ۱۳۸۷: ۱۹۷-۱۹۴).

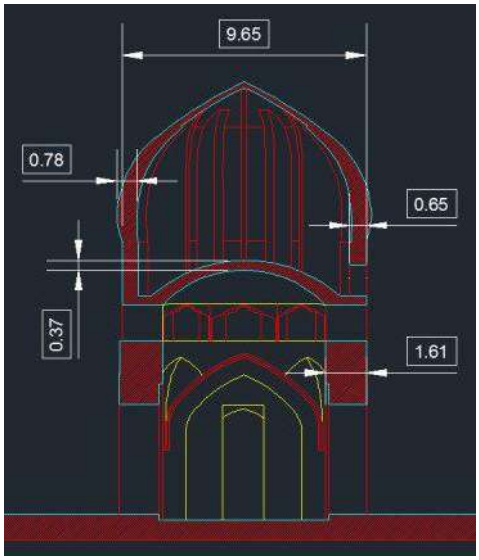
لازم به ذکر است تمام انواع آجر، از نظر تحمل نیروهای فشاری بسیار مقاوم‌تر از قابلیت تحمل نیروهای کششی بوده و مقاومت کششی آنها آنقدر پایین است که نمی‌توان از آنها برای تحمل نیروهایی که کشش به وجود می‌آورند، استفاده کرد. تعیین مقاومت آجرها در برابر فشار به وسیله آزمایش چند نمونه تا حد گسیختگی مقدور نیست، زیرا کیفیت ملات‌ها، مرغوبیت آنها و سایر عوامل تأثیر زیادی بر مقاومت آجر دارند (مورگان، ۱۳۶۲: ۲۳).

۷.ارزیابی و آنالیز سازه‌ای

آنالیز سازه‌های با مصالح بنّایی، مسئله‌ای پیچیده در حوزه مهندسی سازه است. روش المان‌های محدود یکی از قوی‌ترین روش‌ها برای آنالیز سازه‌های با مصالح بنّایی است. روش موردنظر، روشی عددی برای حل مسائل مهندسی، نظیر آنالیز سازه‌ها و تحلیل تنش‌ها است.

این روش شامل قطعه‌قطعه کردن سازه به المان‌های متعدد (اجزای سازه)، توصیف رفتار هر کدام از المان‌ها با روش ساده و سپس چسباندن مجدد آنها در گره‌هاست؛ به طوری که گره‌ها به مثابه لولا یا قطرات چسبی در نظر گرفته می‌شوند که المان‌ها را به یکدیگر متصل می‌کنند (کوک، ۱۳۸۷: ۲).

به طور خلاصه، این روش در ارتباط با مسائل سازه‌ای تبدیل به تعیین تغییر مکان‌ها در هر گره و تعیین تنش در هر المان سازه‌ای می‌شود که تحت بارگذاری است. در نتیجه پژوهش حاضر مربوط به مدل‌سازی و آنالیز استاتیکی تحت بار وزن و همچنین آنالیز دینامیکی تحت بار زلزله به صورت مقایسه میان گنبد آوگون‌دار مسجد شاه مشهد و گنبدی با تمام ویژگی‌های گنبد قبلی ولی بدون آوگون است. برای انجام این آنالیز از نرم‌افزار *Abaqus 6.14-4* استفاده شده است. قابلیت‌های کلیدی این نرم‌افزار، حل مسائل استاتیکی و دینامیکی، مدل کردن تغییرشکل‌های بزرگ در حالت‌های دوبعدی و سه‌بعدی و همچنین تخمین میزان تخریب اجزاء یک سازه است. لازم به ذکر است که ترسیم اولیه گنبدهای مورد بررسی به کمک نرم افزار *Auto CAD* انجام شده است (تصویر ۶).



تصویر ۶: تصویر *Auto CAD* گنبد و گنبدخانه مسجد شاه

در این آنالیز، چند فرضیه اصلی برای شروع کار مورد توجه بوده است: ۱. تمام مواد مورد استفاده در این شکل از گنبدها، بنّایی هستند؛ ۲. به منظور آسان‌تر کردن محاسبات، مصالح سازه همگن، و رفتار آنها نیز خطی در نظر گرفته شده است. مصالح و تنش‌های مجاز در نظر گرفته شده برای مصالح آجری براساس آیین‌نامه بارگذاری ایران[۴]، در جدول شماره ۱ آمده است. تنش‌های مجاز براساس اطلاعات مربوط به مقاومت نهایی یا گسیختگی مصالح تنظیم شده است که از آزمایشات مختلف کششی، فشاری، برشی و ... و نیز بر مبنای تحقیقات مربوط به ماهیت، خواص و رفتار مصالح به دست می‌آید؛ ۳. پایه‌های گنبد بر روی زمینی سخت و محکم در نظر گرفته شده است؛ ۴. گنبد در ترکیب با سازه تحتانی، آنالیز و عکس‌العمل نیروهای حاصل از آنالیز در محل اتصال گنبد به گنبدخانه و همچنین در پایه‌ها قرار دارد.

جدول شماره ۱: خصوصیات مصالح برای گنبدهای با مصالح بنّایی آجری (حجازی و میرقادری، ۱۳۸۳: ۷۵۱)

مدول الاستیسیته E N/mm^2	ضریب پواسون ν	دانسیته وزنی γ kN/m^3	تنش مجاز فشاری f_c N/mm^2	تنش مجاز کششی f_t N/mm^2	تنش مجاز برشی f_v N/mm^2	تنش مجاز لهیدگی f_b N/mm^2
7.358×10^3	۰/۱	۱۸/۵۴۱†	۰/۷	۰/۲	۰/۱	۰/۷

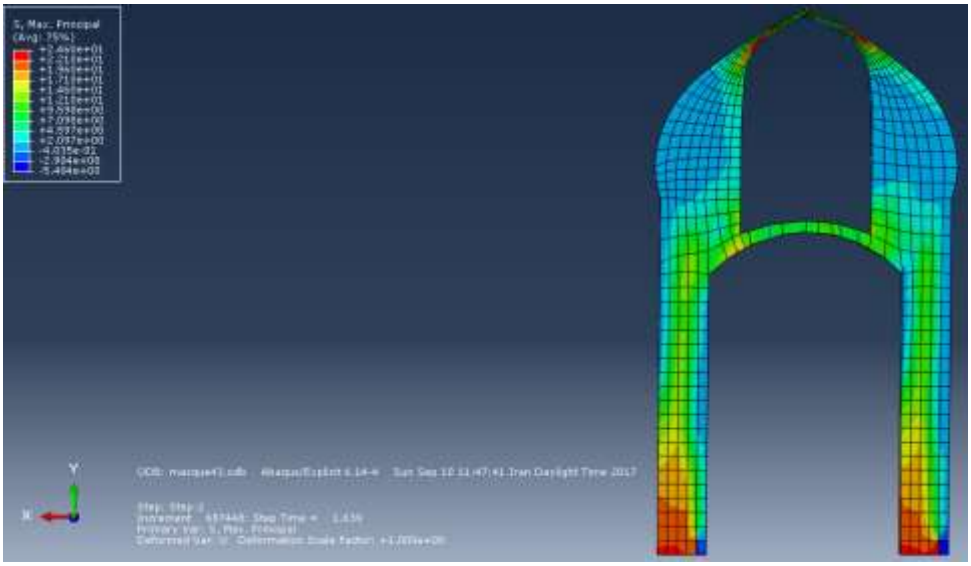
دو نوع بارهای سازه‌ای معمول، یعنی بار استاتیکی و دینامیکی یا بار وزن و بار زلزله برپایه ساختار و ویژگی‌های منطقه جغرافیایی موردنظر مشخص شده‌اند. نیروهای ناشی از باد و زلزله به صورت افقی بر سازه وارد می‌شوند که در حقیقت جزء بارهای جانبی می‌باشند؛ در حالیکه بار مرده یا همان بار وزن در جهت قائم اعمال می‌شود و جزء بارهای ثقلی است. بار ناشی از زلزله مدت زمان کوتاهی به سازه وارد می‌شود که مقدار آن بستگی به عوامل متعددی از جمله شدت زلزله و وزن سازه و دیگر عوامل دارد. بار وزن در هنگام اعمال بار جانبی بر سازه وجود داشته و بر سازه اعمال می‌شود. این بار، به عنوان یک بار ثابت و همیشگی با مقداری معین در طول عمر سازه در نظر گرفته می‌شود (مسلمان یزدی، ۱۳۹۰: ۱۵-۱۶).

به منظور مقایسه رفتار هر دو نوع گنبد آوگون‌دار و بدون آوگون، نتایج حداکثر مقادیر تغییرشکل‌ها و فشارهای اصلی با جزئیات مورد شناسایی، توجه و بحث قرار گرفته‌اند.

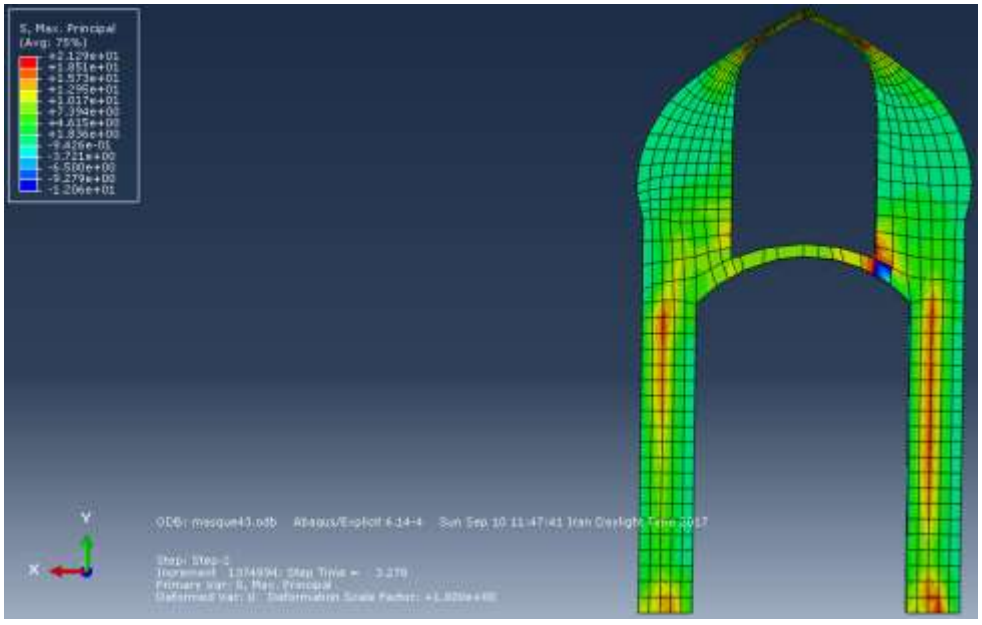
۸.تحلیل گنبد با مصالح بنّایی تحت بار وزن و زلزله

به منظور ساده‌سازی تحلیل، یک برش به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر از گنبد در نظر گرفته شد. مدل‌های سازه‌ای در دو حالت، مورد بررسی قرار گرفت. در حالت اول، گنبد با آوگون به همراه خشخاشی‌ها و در حالت دوم، گنبدی با ارتفاع گنبد اول و با تمام ویژگی‌های معمارانه مشابه گنبد قبلی، ولی بدون آوگون به همراه خشخاشی-ها مورد بررسی قرار گرفت. در واقع هدف از انجام این مقایسه بررسی اثر سازه‌ای آوگون در ساخت گنبد با مصالح بنّایی است. به منظور اعمال بار زلزله از رِکورد زلزله طبس استفاده گردید.

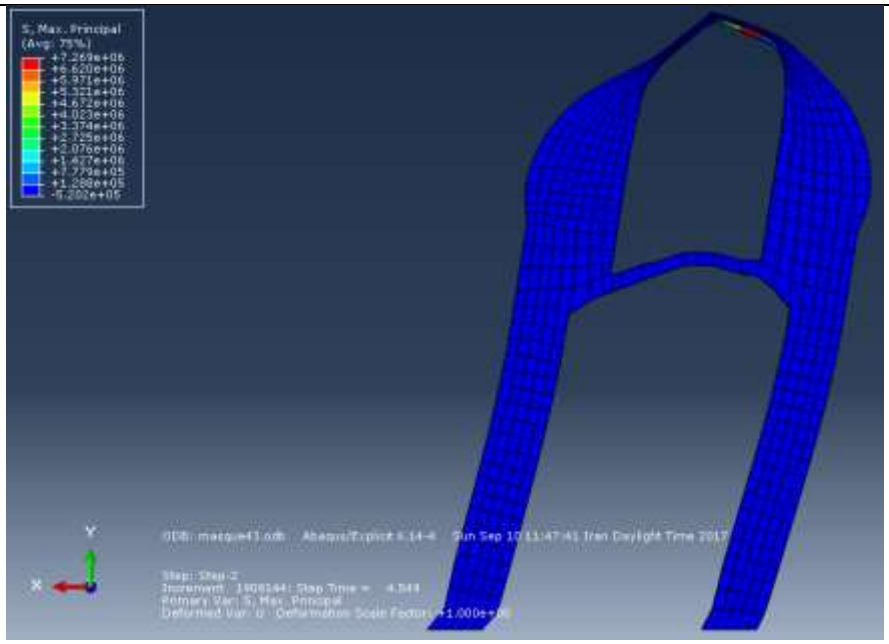
برای تحلیل گنبدهای موردنظر، مقایسه‌ای میان تنش‌های اصلی در زمان‌های مختلف بارگذاری زلزله انجام گرفت. در نمونه نخست، یعنی گنبد آوگون‌دار مسجد شاه مشهد، پس از اعمال نیروی زلزله، خرابی در لحظه ۴/۵ ثانیه از پایه‌ها شروع می‌گردد. در تصاویر ۷، ۸ و ۹ تنش اصلی در زمان‌های مختلف بارگذاری زلزله (به ترتیب در ثانیه ۱/۶، ۳/۲ و ۴/۵) مشاهده می‌شود. در ارتباط با خود گنبد نیز، خرابی در قسمت بالا رخ می‌دهد. در واقع به نظر می‌رسد که خشخاشی مانع ایجاد تنش کششی و خرابی در قسمت آوگون می‌شود که به لحاظ تئوری هم چون سختی این قسمت بیشتر بوده این امر درست است.



تصویر ۷: تغییر شکل و حداکثر تنش در گنبد مسجد شاه در ثانیه ۱/۶، تحت بار وزن و زلزله

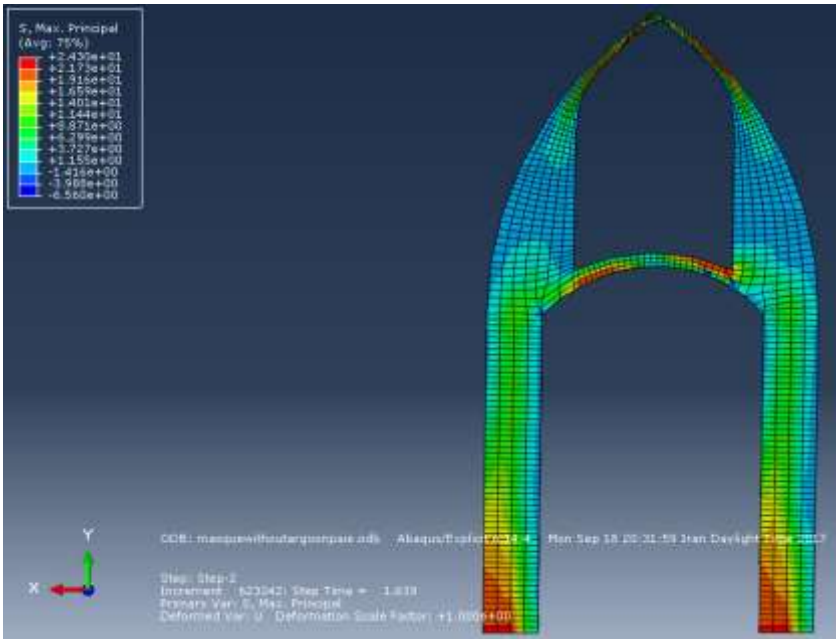


تصویر ۸: تغییر شکل و حداکثر تنش در گنبد مسجد شاه در ثانیه ۳/۲، تحت بار وزن و زلزله

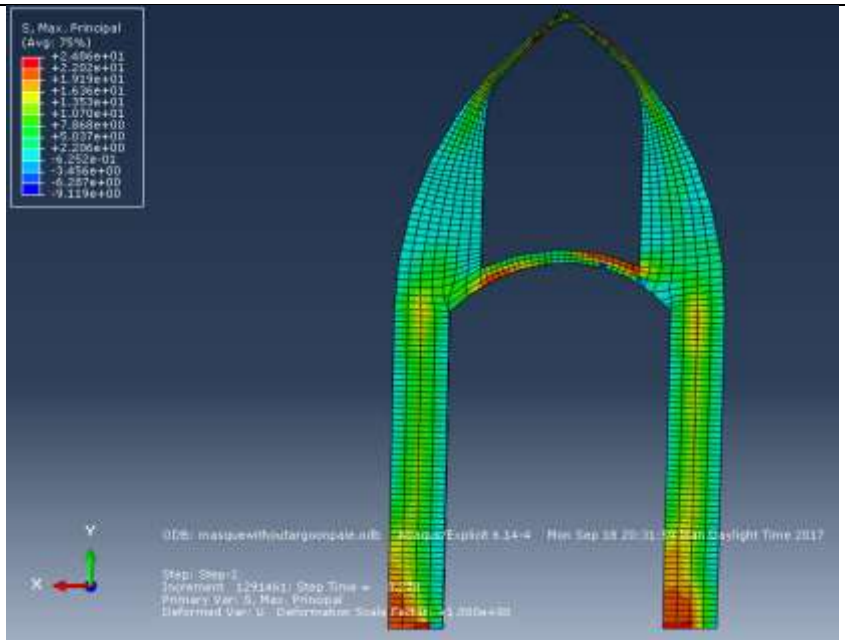


تصویر ۹: تغییر شکل و حداکثر تنش در گنبد مسجد شاه در ثانیه ۴/۵، تحت بار وزن و زلزله

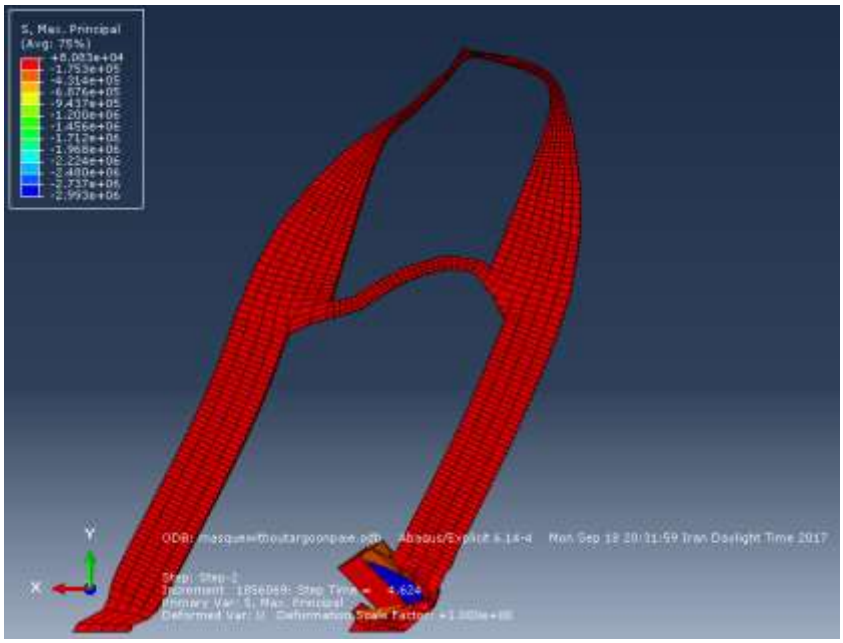
برای مقایسه، گنبدی با تمام ویژگی‌های معمارانه گنبد مسجد شاه، ولی بدون آوگون، مورد بررسی قرار گرفت (تصاویر ۱۰، ۱۱ و ۱۲). در این نمونه نیز، حضور خشخاشی‌ها مانع از ایجاد خرابی در قسمت آوگون می‌گردد. اما در تصویر شماره ۱۲ مشاهده می‌شود که میزان خرابی در پایه‌های گنبدخانه بیشتر از نمونه مشابه آوگون‌دار (تصویر ۹) است. در نتیجه در گنبد فاقد آوگون، تحت شرایط مشابه بارگذاری، میزان تغییرشکل در پایه‌های گنبدخانه بیشتر است.



تصویر ۱۰: تغییر شکل و حداکثر تنش در گنبد بدون آوگون در ثانیه ۱/۶، تحت بار وزن و زلزله



تصویر ۱۱: تغییر شکل و حداکثر تنش در گنبد بدون آوگون در ثانیه ۳/۲، تحت بار وزن و زلزله



تصویر ۱۲: تغییر شکل و حداکثر تنش در گنبد بدون آوگون و در ثانیه ۴/۵، تحت بار وزن و زلزله

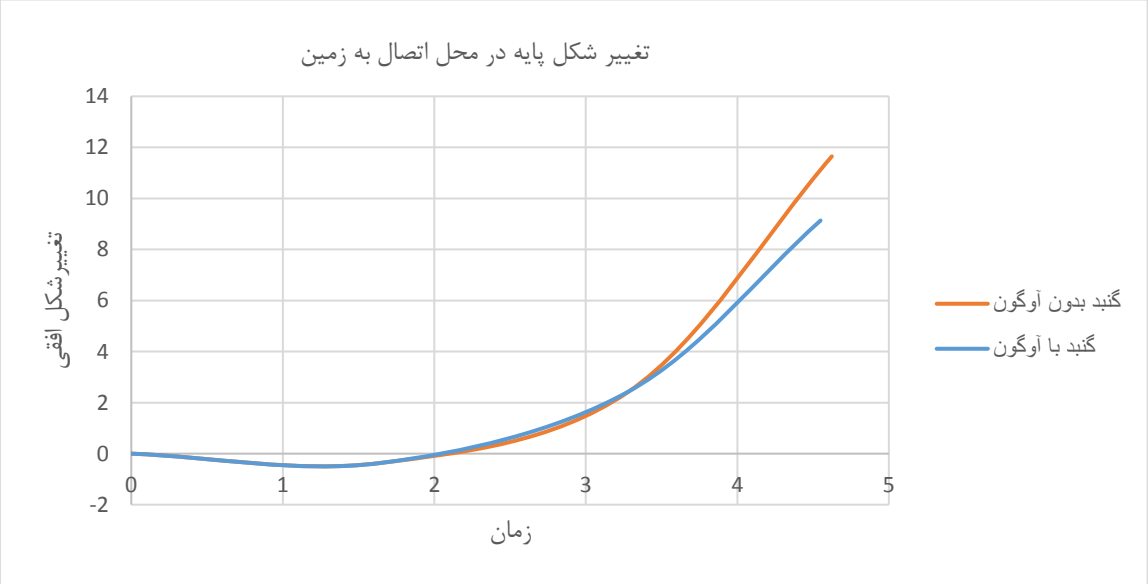
نتایج تغییر شکل و تنش حداکثر در گنبد آوگون‌دار مسجد شاه مشهد و گنبد بدون آوگون در جدول شماره۲ به صورت خلاصه آورده شده است. با نگاهی کوتاه به این جدول می‌توان مشاهده کرد که حذف آوگون باعث تغییر شکل بیشتر در پایه‌های گنبدخانه خواهد شد.

جدول شماره ۲: مقایسه تغییر شکل و تنش حداکثر در گنبد آوگون‌دار مسجد شاه و گنبد بدون آوگون تحت بار وزن و زلزله

بار مرده + زلزله	تنش حداکثر (کیلوپاسکال)		تغییرشکل (میلی‌متر)		
	فشاری	کششی	افقی	قائم	مجموع
گنبد بدون آوگون	۲,۹۹	۸,۰۸	۱۱,۹۵	۱,۵	۱۲,۰۴
گنبد با آوگون	۵,۲	۷,۲	۸,۱۵	۴,۱	۹,۱۳

به منظور روشن‌تر شدن مطلب در نمودار شماره ۱، تغییرشکل افقی دو سازه در اثر بار زلزله مقایسه گردیده است. مشخص است که آوگون تاثیر زلزله روی پایه را کمتر کرده و لذا تغییر شکل این بخش از سازه در نوع آوگون‌دار اندک است.

نمودار ۱: مقایسه تغییر شکل پایه در دو گنبد آوگون‌دار و بدون آوگون



۹.نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، رفتار سازه‌ای گنبد شلجمی شکل مسجد شاه مشهد متعلق به دوره تیموری بررسی شد. رفتار این گنبد تحت شرایط بارگذاری استاتیکی (بار وزن) و دینامیکی (بار زلزله) با گنبدی مشابه ولی بدون آوگون مقایسه گردید. گنبد شلجمی شکل یا همان گنبد آوگون‌دار مسجد شاه تحت بارهای عمودی و افقی، تغییر شکل و حداکثر تنش کمتری را نسبت به گنبد فاقد آوگون نشان می‌دهد. به این صورت که فشار کمتری به پایه‌های گنبدخانه وارد می‌شود. در نتیجه این شکل از گنبد از استحکام بیشتری در برابر بارهای افقی (بار زلزله) و بارهای عمودی (بار وزن) برخوردار است.

با توجه به تحلیل صورت گرفته، حضور آوگون میزان تغییرات و خرابی را به‌خصوص در پایه‌های گنبدخانه کاهش می‌دهد. شاید بتوان دلیل این امر را این‌گونه تحلیل کرد که در گنبد آوگون‌دار، بخشی از بار وزن در محل اتصال گنبد به گریو به سمت داخل هدایت می‌شود و فشار کمتری به پایه‌ها وارد می‌گردد. به این صورت که خرابی نرم‌تری را در پایه‌های گنبدخانه مشاهده می‌کنیم؛ این در حالی است که در گنبد فاقد آوگون، تحت شرایط مشابه، میزان خرابی در پایه‌های گنبدخانه بیشتر است.

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان این‌گونه عنوان کرد که آوگون صرفا کارکرد زیبایی‌شناسانه نداشته است؛ بلکه راه‌حلی «سازه‌ای» در جهت بهینه کردن رفتار سازه‌ای مجموعه گنبد و گنبدخانه، کاهش چشمگیر نیروی رانشی وارد بر آنها و در نهایت کم کردن حداکثر تنش و پیشگیری از تغییر شکل پایه‌های گنبدخانه، بوده است. در نتیجه می‌توان این‌گونه عنوان کرد که گنبدهای شلجمی شکل در ابتدا دارای منظورهای تزئینی و زیبایی‌شناسانه بوده‌اند که با گذشت زمان و رواج گستردهٔ این شکل از گنبدها، دلایل سازه‌ای نیز برای استفاده از این نوع گنبدها مطرح می‌گردد.

پی‌نوشت‌ها

۱.حجازی، مهرداد و رسول میرقادری، (۱۳۸۳)، " تحلیل لرزه‌ای گنبدهای ایرانی"، *دانشکده فنی*، ج ۳۸، ش۶: ۷۵۷-۷۴۷.

۲.زمانی‌فرد، علی، (۱۳۸۱)، " نگاهی به مرمت گنبد در ایران"، زیرنظر دکتر مهرداد حجازی و دکتر اکبر حاج ابراهیم زرگر، *اثر*، ش ۳۳ و ۳۴: ۲۲۷-۲۷۸.

3.Ghasempourabadi.M, V.R. Mahmoudabadi Arani, O.Bahar & Mahdavinejad., 2012. "Assessment of Behavior of Two-Shelled Domes in Iranian Traditional Architecture: The Charbagh School, Isfahan, Iran" The Sustainable City VII. Vol.2: 1223-1233.

۴.آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰، وزارت مسکن و شهرسازی، تهران: ۱۳۹۳.

منابع

اوکین، برنارد، (۱۳۸۶)، *معماری تیموری در خراسان*، ترجمه علی آخشینی، مشهد: بنیاد پژوهش‌های اسلامی.

بزنوال، رولان، (۱۳۷۹)، *فن آوری طاق در خاور کهن*، ترجمه محسن حبیبی، تهران: سازمان میراث فرهنگی کشور.

پوپ، آرتور اپهام، (۱۳۹۳)، *معماری ایران*، ترجمه غلامحسین صدری افشار، چ۲، تهران: دات.

پوگاچنکوا، گالینا آناتولینا، (۱۳۸۷)، *شاهکارهای معماری آسیای میانه (سده های چهاردهم و پانزدهم میلادی)*، مترجم: سید داود طبایی، تهران: فرهنگستان هنر.

پیرنیا، محمد کریم، (۱۳۷۰)، " گنبد در معماری ایران"، گردآورنده: زهره بزرگ مهری، *اثر*، س۹، ش۲۰: ۱۳۹-۵.

، (۱۳۷۰)، "واژه‌نامه گنبد"، *اثر*، س۹، ش ۲۰: ۱۵۶-۱۴۰.

حاجی‌قاسمی، کامبیز، (۱۳۸۹)، *فرهنگ آثار معماری اسلامی ایران (دفتر سیزدهم): امامزاده‌ها و مقابر*، تهران: مرکز اسناد و تحقیقات دانشکده معماری و شهرسازی.

حجازی، مهرداد و رسول میرقادری، (۱۳۸۳)، " تحلیل لرزه‌ای گنبدهای ایرانی"، *دانشکده فنی*، ج ۳۸، ش۶: ۷۵۷-۷۴۷.

حسینی، سید محسن، (۱۳۹۳)، *مساجد تاریخی خراسان*، ج۱، مشهد: بنیاد پژوهش‌های اسلامی.

زمانی، عباس، (۱۳۵۲)، " گنبد دوپوش تزئینی در آثار تاریخی اسلامی ایران"، *هنر و مردم*، س۱۲، ش۱۳۱: ۵۳-۴۳.

زمانی‌فرد، علی، (۱۳۸۱)، " نگاهی به مرمت گنبد در ایران"، زیرنظر دکتر مهرداد حجازی و دکتر اکبر حاج ابراهیم زرگر، *اثر*، ش ۳۳ و ۳۴: ۲۲۷-۲۷۸.

زمرشیدی، حسین، (۱۳۸۹)، *گنبد و عناصر طاقی ایران*، تهران: زمان.

فرشاد، مهدی، (۱۳۵۶)، *تاریخ مهندسی در ایران*، چ ۲، تهران: گویش.

کاشانی، غیاث‌الدین جمشید، (۱۳۹۲)، *رساله طاق و ازج*، ترجمه و تحشیه سید علیرضا جذبی، چ۲، تهران: سروش.

کوک، رابرت دیویس، (۱۳۸۷)، *مدل سازی مسائل تحلیل تنش به روش اجزاء محدود*، مترجم: اصغر مهدیان، اصفهان: کانون پژوهش.

گلمبک، لیزا؛ ویلبر، دونالد، (۱۳۷۴)، *معماری تیموری در ایران و توران*، ترجمه کرامت‌الله افسر و محمدیوسف کیانی، تهران: سازمان میراث فرهنگی کشور.

محمد مرادی، اصغر و محمدحسن محب‌علی، (۱۳۸۷)، *دوازده درس مرمت*، چ۲، تهران: مرکز مطالعاتی و تحقیقاتی شهرسازی و معماری.

مسلمان یزدی، حسنعلی، (۱۳۹۰)، *اصول و مبانی بارگذاری سازه‌ها*، تهران: فدک ایساتیس.

معماریان، غلامحسین، (۱۳۶۷)، *نیارش سازه‌های طاقی*، ج۱، تهران: جهاد دانشگاهی دانشگاه علم و صنعت ایران.

معماریان، غلامحسین، (۱۳۹۱)، *معماری ایرانی نیارش*، تدوین هادی صفایی پور، ج۲، تهران: نغمه نواندیش.

مورگان، ویلیام، (۱۳۶۲)، *رفتار اجزاء سازه‌ها*، ترجمه و تدوین: مهندس مجید بدیعی، تهران: سید ابوالفضل حسینیان.

Ashkan, Maryam & Yahya Ahmad., 2010. "Discontinuous Double-shell Domes through Islamic Eras in the Middle East and Central Asia: History, Morphology, Typologies, Geometry, Construction", Nexus Network Journal, vol. 12: 287-319.

Born, Wolfgang., 1943. "The Origin and the Distribution of the Bulbous Dome". The Journal of the American Society of Architectural Historians 3, no. 4: 32-48.

Ghasempourabadi.M, V.R. Mahmoudabadi Arani, O.Bahar & Mahdavinejad., 2012. "Assessment of Behavior of Two-Shelled Domes in Iranian Traditional Architecture: The Charbagh School, Isfahan, Iran" The Sustainable City VII. Vol.2: 1223-1233.

Hejazi, M. 1997. "Historical Buildings of Iran: Their Architecture & Structure", Southampton, UK: WIT Press.

Peterson, A. 1999. "Dictionary of Islamic Architecture", (reprint ed.) London, UK: Routledge Press.