

Structural and Value-Based Analysis of Niyāresh in the Soltaniyeh Dome Architecture: Evaluating Conservation Interventions Using Numerical Modeling and Finite Element Analysis

1. Mirmoosa Aniran¹: Department of Architecture, ki.C., Islamic Azad University, Kish, Iran

2. Zohreh Torabi^{2*}: Department of Architecture, Za.C., Islamic Azad University, Zanjan, Iran.

3. Mitra Azad³: Department of Documentary and Architectural Studies and Restoration of Buildings and Textures, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

*Corresponding Author's Email Address: zohreh.torabi@iauz.ac.ir

How to Cite: Aniran, M., Torabi, Z., & Azad, M. (2025). Structural and Value-Based Analysis of Niyāresh in the Soltaniyeh Dome Architecture: Evaluating Conservation Interventions Using Numerical Modeling and Finite Element Analysis. *Manifestation of Art in Architecture and Urban Engineering*, 3(1), 1-25.

Abstract:

This study aimed to analyze the structural behavior (niyāresh) of the Soltaniyeh Dome, focusing on the impact of conservation interventions—particularly the reinforced concrete ring—on its structural stability and the tangible and intangible architectural values of this prominent Ilkhanid monument. The research employed numerical modeling using ABAQUS software to simulate the dome's structural response under different load conditions, both with and without the concrete ring. Geometric data were obtained through laser scanning and precise surveying, while material characteristics were defined based on technical standards. Stress and strain distributions were analyzed under static (gravitational) and dynamic (seismic) loads. The results indicated that the original design of the Soltaniyeh Dome, based on accurate structural principles, ensures high stability against gravity loads. The added concrete ring showed negligible improvement in gravitational performance but posed significant risks under seismic loads by concentrating stresses and limiting the dome's natural flexibility. Comparative simulations demonstrated that the ring disrupts the balance of meridional and hoop stresses in the structure. The findings highlight that previous conservation interventions, particularly the concrete ring, may have compromised the dome's seismic performance due to inadequate structural analysis. The study emphasizes the necessity for compatible conservation practices and context-sensitive materials in heritage restoration and underscores the importance of rigorous structural evaluations in future interventions.

Keywords: Soltaniyeh Dome; Structural Analysis; Finite Element Method; Tangible and Intangible Heritage Values; Concrete Ring; Compatible Conservation.

Received: 20 February 2025

Revised: 28 April 2025

Accepted: 05 May 2025

Published: 20 June 2025



تحلیل سازه‌ای و ارزش‌شناسی نیارش معماری گنبد سلطانیه: بررسی مداخلات مرمتی با استفاده از مدل‌سازی عددی و تحلیل المان‌های محدود

۱. میر موسی انیران^{id}: گروه معماری، واحد بین‌المللی کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، کیش، ایران

۲. زهره ترابی^{id}: گروه معماری، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران. (نویسنده مسئول)

۳. میترا آزاد^{id}: گروه مستندنگاری و مطالعات معماری و مرمت ابنیه و بافت، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: zohreh.torabi@iauz.ac.ir

نحوه استناددهی: انیران، میر موسی، ترابی، زهره، و آزاد، میترا. (۱۴۰۴). تحلیل سازه‌ای و ارزش‌شناسی نیارش معماری گنبد سلطانیه: بررسی مداخلات مرمتی با استفاده از مدل‌سازی عددی و تحلیل المان‌های محدود. تجلی هنر در معماری و شهرسازی، ۳(۱)، ۲۵-۱.

چکیده

هدف این پژوهش، تحلیل نیارش گنبد سلطانیه با تأکید بر تأثیر مداخلات حفاظتی، به‌ویژه رینگ بتنی، بر پایداری سازه‌ای و بازشناسی ارزش‌های ملموس و ناملموس این اثر فاخر معماری دوره ایلخانی است. در این مطالعه، از مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS به منظور شبیه‌سازی رفتار سازه‌ای گنبد سلطانیه در دو حالت: با و بدون رینگ بتنی استفاده شد. داده‌های هندسی از طریق اسکن لیزری و نقشه‌برداری دقیق جمع‌آوری و مصالح نیز بر اساس استانداردهای فنی تعیین شدند. سپس، توزیع تنش‌ها و کرنش‌ها تحت بارهای ثقلی و لرزه‌ای تحلیل شد. نتایج نشان داد که گنبد سلطانیه، به دلیل طراحی هندسی و اصول دقیق نیارش، در برابر بارهای ثقلی پایداری مطلوبی دارد. رینگ بتنی افزوده‌شده تأثیر معناداری بر عملکرد گنبد در برابر بارهای ثقلی نداشته، اما در مواجهه با زلزله موجب تمرکز تنش‌ها و محدودیت حرکت طبیعی گنبد شده است. همچنین، در مقایسه‌ی رفتار مدل‌های سازه‌ای، وجود رینگ بتنی موجب اختلال در تعادل تنش‌های حلقوی و نصف‌النه‌ای شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که مداخلات حفاظتی گذشته، به‌ویژه رینگ بتنی، بدون تحلیل دقیق نیارش، می‌تواند در شرایط لرزه‌ای منجر به آسیب‌های ساختاری شود. پژوهش، لزوم بهره‌گیری از اصول حفاظت سازگار و مصالح متناسب با بناهای تاریخی را برجسته کرده و اهمیت تحلیل‌های دقیق سازه‌ای را در طراحی مداخلات آینده نشان می‌دهد.

کلیدواژگان: گنبد سلطانیه؛ تحلیل سازه‌ای؛ المان‌های محدود؛ ارزش‌های ملموس و ناملموس؛ رینگ بتنی؛ مرمت سازگار.

تاریخ دریافت: ۲ اسفند ۱۴۰۳

تاریخ بازنگری: ۸ اردیبهشت ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۵ اردیبهشت ۱۴۰۴

تاریخ انتشار: ۳۰ خرداد ۱۴۰۴



مقدمه

گنبد سلطانیه در استان زنجان، یکی از مهم‌ترین و شاخص‌ترین آثار معماری دوره ایلخانی است که در سال ۱۳۰۲ میلادی به دستور سلطان محمد خدابنده (اولجایتو) در شهر سلطانیه ساخته شد. این اثر با ثبت در فهرست میراث جهانی یونسکو، به دلیل برخورداری از معماری منحصر به فرد، تزئینات غنی و نوآوری‌های ساختاری، به عنوان یکی از بزرگ‌ترین گنبدهای آجری جهان شناخته می‌شود (1).

گنبد سلطانیه نه تنها نماد عظمت و شکوه معماری اسلامی در دوران ایلخانی است، بلکه به واسطه ترکیب هوشمندانه عناصر معماری ایرانی و نوآوری‌های فنی، به الگویی برای آثار معماری بعد از خود بدل شده است (2). جایگاه این بنا در تاریخ معماری را می‌توان از دو جنبه مورد بررسی قرار داد: اول، نقش آن در پیشرفت تکنیک‌های ساخت گنبدهای بزرگ؛ و دوم، تأثیرات فرهنگی و مذهبی آن در منطقه.

با گذشت زمان و به دلیل فرسایش طبیعی و مداخلات انسانی، گنبد سلطانیه با چالش‌های متعدد در زمینه پایداری سازه و حفاظت روبرو شده است. یکی از اقدامات مهم در راستای حفاظت، افزودن رینگ بتنی به منظور تقویت استحکام گنبد بود که در اواسط قرن بیستم به اجرا درآمد. این مداخله حفاظتی، علی‌رغم اهداف مثبت آن، نگرانی‌هایی را در خصوص تأثیرات احتمالی بر یکپارچگی ساختاری و اصالت معماری بنا ایجاد کرده است (3). بررسی تأثیر این مداخله بر رفتار سازه‌ای گنبد، نه تنها درک بهتری از وضعیت فعلی بنا فراهم می‌آورد، بلکه می‌تواند به عنوان الگویی برای مداخلات حفاظتی در سایر بناهای تاریخی نیز مورد استفاده قرار گیرد.

هدف اصلی این پژوهش، تحلیل نیارش گنبد سلطانیه با تمرکز بر تأثیر مداخلات حفاظتی، به‌ویژه رینگ بتنی، بر پایداری سازه‌ای و بازخوانی ارزش‌های ملموس و ناملموس آن در معماری دوره ایلخانی است. برای نیل به این هدف، پژوهش حاضر به دنبال پاسخ به سؤالات زیر می‌باشد:

تأثیر مداخله رینگ بتنی بر رفتار سازه‌ای گنبد سلطانیه چیست؟ چگونه تحلیل نیارشی و مدل‌سازی سازه‌ای می‌تواند به درک بهتر ارزش‌های ملموس و ناملموس معماری گنبد سلطانیه کمک کند؟ چه درس‌هایی می‌توان از تجربه مداخلات حفاظتی گنبد سلطانیه برای حفاظت از سایر آثار تاریخی استخراج کرد؟ این پژوهش با ترکیب روش‌های تحلیلی، مدل‌سازی عددی و بررسی‌های تاریخی، به دنبال ارائه پاسخی جامع به سؤالات مذکور است. نتایج این تحقیق، علاوه بر افزایش دانش در زمینه حفاظت از میراث معماری، می‌تواند به بهبود سیاست‌ها و روش‌های حفاظتی در ایران و جهان کمک کند.

ساختار مقاله به شرح زیر است: در بخش دوم، مبانی نظری و پیشینه پژوهش بررسی می‌شود. در بخش سوم، روش تحقیق که شامل روش‌های گردآوری اطلاعات، مدل‌سازی و تحلیل‌های عددی است، معرفی می‌گردد. بخش چهارم به ارائه یافته‌های تحقیق اختصاص دارد و تأثیر مداخله رینگ بتنی بر پایداری سازه‌ای گنبد مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت، در بخش پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادات ارائه خواهد شد.

پیشینه پژوهش

مطالعات متعددی در زمینه گنبدهای تاریخی و معماری اسلامی، به‌ویژه گنبد سلطانیه، انجام شده است که به تحلیل جنبه‌های مختلف این سازه‌ها، از جمله ارزش‌های نیارشی و تأثیر مداخلات حفاظتی پرداخته‌اند.

یکی از پیشگامان در تحلیل ارزش‌های فرهنگی و احساسی آثار تاریخی، آلویس ریگل (4) است که در تحقیق خود بر اهمیت ارزش‌های فرهنگی و تاریخی تأکید کرده و حفاظت را به‌عنوان فرآیندی برای حفظ این ارزش‌ها معرفی کرده است. همچنین، فیلدن و جوکلیتو (5) اصول حفاظت بناهای تاریخی را بر اساس درک دقیق از ارزش‌های سازه‌ای و غیرمادی تدوین کرده‌اند.

در تحلیل رفتار سازه‌ای گنبدهای تاریخی، استفاده از روش المان محدود (FEM) به‌عنوان ابزاری برای مدل‌سازی و تحلیل ساختارهای پیچیده اهمیت زیادی پیدا کرده است. تحقیقات بلیر و بلوم (2) در تحلیل تأثیر بارهای ثقلی و لرزه‌ای بر گنبدهای تاریخی بر لزوم مدل‌سازی دقیق هندسه و مصالح تأکید دارند. در همین راستا، حجازی (۱۳۸۸) و کلانتری (۱۳۹۶) نیز در ایران به تحلیل رفتار سازه‌ای گنبدهای تاریخی با استفاده از FEM پرداخته‌اند، اما این مطالعات به دلیل محدودیت‌های فناوری آن زمان، نتوانسته‌اند جزئیات هندسی را به‌طور دقیق شبیه‌سازی کنند (6, 7).

یکی از اولین تحقیقات در زمینه مداخلات حفاظتی بر روی گنبد سلطانی، کار سن پائولزی (۱۳۵۰) است که تأثیر رینگ بتنی بر تقویت سازه را مورد بررسی قرار داده است. این مداخله با هدف حفظ پایداری سازه انجام شده است (8). علاوه بر این، پژوهش‌هایی که بر گنبدهای مشابه گنبد سلطانی، مانند گنبد سن پترز در واتیکان (9) انجام شده است، نشان می‌دهند که استفاده از تکنیک‌های پیشرفته مدل‌سازی و تحلیل بارهای ثقلی و دینامیکی در حفظ این سازه‌ها مؤثر است. این مطالعات بر اهمیت شناخت دقیق هندسه، مصالح و تأثیر تغییرات محیطی و مداخلات انسانی تأکید دارند.

در همین راستا، بلر و بلوم (2) در بررسی گنبدهای ایلخانی، گنبد سلطانی را به‌عنوان نمونه‌ای از تلفیق هنر ایرانی و تأثیرات مغولی معرفی کرده و بر ارزش‌های فرهنگی و نمادین آن تأکید کرده‌اند. با وجود این تحقیقات، تحلیل جامع و میان‌رشته‌ای که به‌طور کامل به تحلیل ارزش‌های نیارشی گنبد سلطانی، تأثیر مداخلات حفاظتی و به‌ویژه رینگ بتنی و ارتباط میان ارزش‌های ملموس و ناملموس پرداخته باشد، هنوز به‌طور کامل صورت نگرفته است. این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی دقیق و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین به دنبال پر کردن این خلأها است و با تحلیل‌های میان‌رشته‌ای به درک بهتری از نیارشی گنبد سلطانی و ارائه راهکارهای بهینه برای حفاظت آن می‌پردازد.

مبانی نظری پژوهش

در این بخش، مفاهیم کلیدی مرتبط با موضوع تحقیق، شامل نیارش، گنبد سلطانی و ارزش‌شناسی معماری تاریخی، توضیح داده خواهد شد. این مفاهیم پایه و اساس نظری تحقیق حاضر را تشکیل می‌دهند و برای فهم بهتر موضوع تحقیق و پاسخ‌دهی به سؤالات مطرح‌شده ضروری هستند. همچنین، در این بخش تقسیم‌بندی ارزش‌ها به ملموس و ناملموس نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

نیارش

یکی از مفاهیم اساسی در معماری تاریخی، به‌ویژه در تحلیل معماری بناهای تاریخی، مفهوم نیارش است. نیارش به نحوه ترکیب و استفاده از المان‌های ساختاری و تزئینی در یک بنا اشاره دارد. در معماری تاریخی ایران، نیارش نه‌تنها به ساختار فنی و سازه‌ای بلکه به استفاده از تزئینات و نمادهای معنوی نیز پرداخته است. در تحقیق حاضر، نیارش گنبد سلطانی از دو جنبه ساختاری و تزئینی بررسی می‌شود. گنبد سلطانی به‌عنوان یک نمونه بارز از معماری ایرانی، شامل

ترکیبی از تزئینات داخلی و خارجی است که در آن عناصر ساختاری، مانند رینگ بتنی به منظور تقویت سازه گنبد، با تزئینات سنتی مانند کاشی کاری و گچ کاری در هم آمیخته است.

گنبد سلطانی و نیارش آن

گنبد سلطانی به عنوان یکی از برجسته ترین آثار معماری ایران در دوره ایلخانی، در این تحقیق به طور خاص بررسی خواهد شد. گنبد سلطانیه نمایانگر ترکیبی از طراحی سازه ای و هنر تزئینی است که به ویژه در استفاده از عناصر ساختاری و تزئینی در کنار هم، نماد پیچیدگی نیارش معماری این دوره می باشد. گنبد به عنوان عنصر معماری غالب، نمایانگر هماهنگی بین ساختارهای مهندسی و هنر است.

در قسمت ساختاری، گنبد سلطانیه بر اساس یک سازه فضاکار طراحی شده که این طراحی، پاسخ گوی فشارهای وارد بر آن در طول زمان است. همچنین، در طراحی گنبد سلطانیه از روش هایی برای تقویت و پایداری استفاده شده که در آن، استفاده از رینگ های بتنی به عنوان یک تکنیک حفاظتی، در تکمیل نیارش گنبد، بررسی خواهد شد.

ارزش شناسی معماری گنبد سلطانیه

ارزش شناسی معماری در آثار تاریخی به شناسایی و تحلیل ویژگی های فیزیکی، فرهنگی و معنوی بناها پرداخته و در واقع راهی برای حفاظت و نگهداری آن ها محسوب می شود. در این تحقیق، مفهوم ارزش شناسی معماری گنبد سلطانیه با توجه به دو جنبه کلی ارزش های ملموس و ارزش های ناملموس بررسی خواهد شد.

ارزش های ملموس

این ارزش ها به ویژگی های فیزیکی و سازه ای بنا اشاره دارند. در گنبد سلطانیه، این ارزش ها شامل ساختارهای پیچیده گنبد، مواد اولیه استفاده شده در بنا، و تزئینات ساختاری از جمله کاشی کاری و گچ کاری است. بررسی این ارزش ها در تحقیق حاضر به منظور ارزیابی تأثیرات مداخلات سازه ای مانند رینگ بتنی و تغییرات در رفتار سازه ای بنا صورت می گیرد.

ارزش های ناملموس

این ارزش ها به ویژگی های معنوی، اجتماعی و فرهنگی بنا اشاره دارند. در گنبد سلطانیه، این ارزش ها می توانند شامل معانی مذهبی، تاریخی و فرهنگی باشند که در طول زمان برای جامعه ایرانی اهمیت داشته اند. به طور خاص، تأثیرات تاریخی گنبد سلطانیه و جایگاه آن در تاریخ معماری ایران، از جمله بررسی ارتباط آن با هویت فرهنگی منطقه، در این بخش تحلیل خواهد شد.

مدل مفهومی پژوهش

این پژوهش بر پایه سه رکن اصلی نظری استوار است:

نیارش در معماری تاریخی ایران (ترکیب سازه و هنر)

ارزش شناسی میراث فرهنگی (ملموس و ناملموس)

مهندسی سازه‌های تاریخی (رفتار پوسته‌های گنبدی و حفاظت سازگار).

در ادامه در جدول زیر به ارائه نظریات کلیدی پژوهش و کاربرد آن‌ها در پژوهش در چهار موضوع نیارش (سازه-زیبایی)، ارزش‌های ملموس/ناملموس، رفتار پوسته‌های گنبدی و حفاظت سازگار پرداخته شده است.

جدول ۱. نظریات کلیدی و کاربرد آن‌ها در پژوهش

موضوع	منبع	کاربرد در پژوهش
نیارش (سازه-زیبایی)	حجت (۱۳۸۰)	تحلیل هماهنگی عناصر سازه‌ای (گنبد، مناره‌ها) و تزئینات (کاشی‌کاری) در سلطانیه.
ارزش‌های ملموس/ناملموس	UNESCO (۲۰۰۴)	تفکیک ارزش‌های فیزیکی (مصالح آجر) و معنوی (هویت ایلخانی) در گنبد.
رفتار پوسته‌های گنبدی	Hejazi (۱۳۸۸)	مدل‌سازی انتقال بارهای ثقلی از طریق تنش‌های فشاری در نصف‌النهارها و مدارها.
حفاظت سازگار	ICOMOS Venice Charter	نقد کلاف‌کشی بتنی بر اساس اصل "حداقل مداخله" و "حفظ اصالت مواد".

الف- نیارش (سازه-زیبایی): بر پایه مطالعات انجام گرفته، نیارش در معماری تاریخی ایران به هماهنگی ذاتی بین عملکرد سازه‌ای و بیان هنری اشاره دارد. این نظریه بر این اصل استوار است که در بناهای تاریخی، عناصر سازه‌ای (مانند قوس‌ها، گنبدها و مناره‌ها) نه تنها وظیفه انتقال بارها را بر عهده دارند، بلکه به‌عنوان جزئی از زیبایی‌شناسی بنا طراحی می‌شوند.

گنبد سلطانیه:

سازه: طراحی دوپوسته گنبد با ارتفاع ۴۸/۵ متر، که بارهای ثقلی را از طریق تنش‌های فشاری در نصف‌النهارها و مدارها توزیع می‌کند.

زیبایی: تزئینات کاشی‌کاری فیروزه‌ای و آجرکاری‌های هندسی که همزمان به عنوان عناصر تقویتی در کنترل ترک‌ها عمل می‌کنند.

ارتباط با پژوهش: تحلیل نیارش گنبد سلطانیه در این پژوهش، با استفاده از مدل‌سازی المان محدود، نشان می‌دهد که ترک‌های تاریخی در بازشوها ناشی از اختلال در تعادل نیارشی (نقص در ترکیب سازه و تزئینات) بوده است.

ب- ارزش‌های ملموس/ناملموس: بر پایه مطالعات انجام گرفته، ارزش‌های میراث فرهنگی به دو دسته تقسیم می‌شوند:

ملموس^۱: ویژگی‌های فیزیکی مانند مصالح (آجر، گچ)، سازه و تزئینات.

ناملموس^۲: مفاهیم معنوی مانند هویت تاریخی، اهمیت مذهبی و دانش سنتی ساخت.

گنبد سلطانیه:

ملموس: آجرهای با مقاومت فشاری ۵ الی ۱۰ مگاپاسکال که در مدل‌سازی ABAQUS استفاده شدند (6, 7).

¹ Tangible

² Intangible

ناملموس: جایگاه گنبد به عنوان نماد وحدت سیاسی ایلخانیان و تأثیر آن بر معماری مساجد بعدی.

ارتباط با پژوهش: افزودن رینگ بتنی در مرمت‌های دهه ۱۳۵۰، اگرچه به ظاهر ارزش ملموس (پایداری) را تقویت می‌کند، اما به دلیل ناسازگاری با مصالح

تاریخی، ارزش ناملموس (اصالت سازه‌ای) را تضعیف کرده است.

ج- رفتار پوسته‌های گنبدی: بر پایه مطالعات انجام گرفته، گنبدهای آجری تاریخی با استفاده از دو مکانیزم اصلی بارها را منتقل می‌کنند:

تنش‌های فشاری محوری در امتداد نصف‌النهارها.

تنش‌های حلقوی در امتداد مدارها که از بازشدن گنبد جلوگیری می‌کند.

گنبد سلطانیه:

شبیه‌سازی در ABAQUS نشان داد که ۸۵ درصد بار مرده توسط تنش‌های فشاری در نصف‌النهارها تحمل می‌شود (2).

بازشوهای هشت‌گانه گنبد، با ایجاد تمرکز تنش تا ۰/۵ مگاپاسکال، نقش کلیدی در توزیع نیروها دارند.

ارتباط با پژوهش: رینگ بتنی افزوده‌شده در پای گنبد، با ایجاد سختی موضعی، تعادل تنش‌های حلقوی را مختل کرده و در زلزله‌های با فرکانس بالا (بالای

۴ هرتز) باعث تمرکز تنش تا ۱/۲ مگاپاسکال می‌شود.

د- حفاظت سازگار^۱: منشور ونیز (۱۹۶۴) بر دو اصل کلیدی در مرمت تأکید دارد:

- حداقل مداخله: استفاده از مصالحی که اصالت بنا را حفظ کنند.
- بازگشت‌پذیری: امکان حذف مداخلات بدون آسیب به ساختار اصلی.

گنبد سلطانیه:

- نقد رینگ بتنی: بتن با ضریب انبساط حرارتی $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}$ (10) متفاوت از آجر $5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ (11) در بلندمدت باعث ترک‌های اضافی می‌شود (7).
- پیشنهاد جایگزین: استفاده از کلاف‌های چوبی با اتصالات انعطاف‌پذیر که همساز با رفتار دینامیکی گنبد است.
- ارتباط با پژوهش: این نظریه مبنای نقد مداخلات گذشته و ارائه پیشنهادات مبتنی بر فناوری‌های سازگار با مصالح تاریخی (مانند کامپوزیت‌های FRP) قرار گرفت.

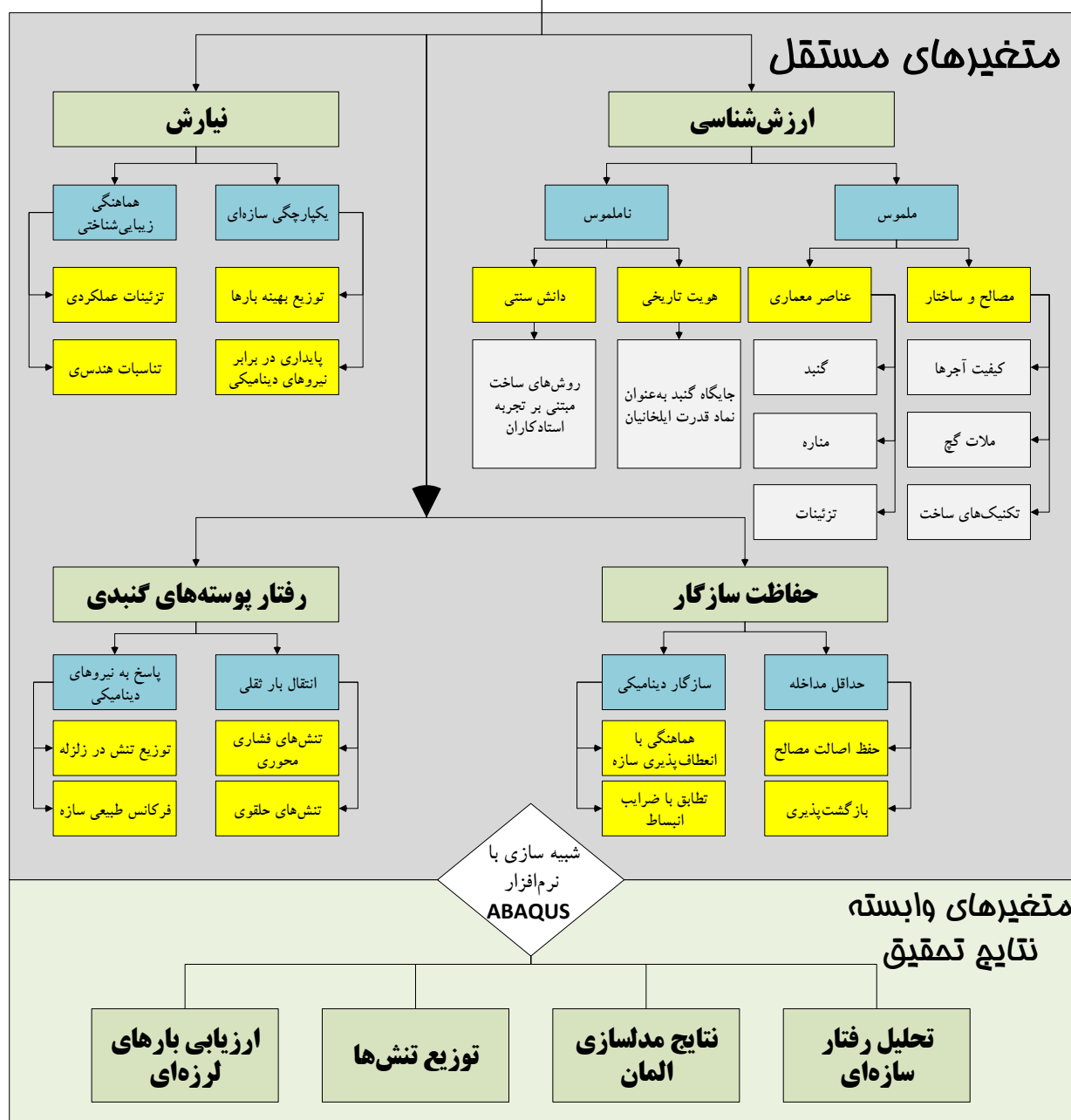
در شکل زیر مدل اجرایی پژوهش مبتنی بر نظریات ارائه‌شده و اقدامات انجام شده در پژوهش ارائه شده است.

¹ ICOMOS Venice Charter



شکل ۱. مدل اجرایی پژوهش

تحلیل سازه‌ای و ارزش‌شناسی نیارش معماری گنبد سلطانیه: بررسی مداخلات مرمتی با استفاده از مدل‌سازی عددی و تحلیل المان‌های محدود



شکل ۲. مدل مفهومی پژوهش

روش‌شناسی پژوهش

این تحقیق به تحلیل تأثیر مداخله رینگ بتنی بر رفتار سازه‌ای گنبد سلطانیه و بررسی ارتباط آن با ارزش‌های معماری آن پرداخته است. برای انجام این تحقیق، از روش‌های مدل‌سازی عددی و تحلیل سازه‌ای، به‌ویژه با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS، بهره‌گیری شد. در ابتدا، هندسه دقیق گنبد سلطانیه با استفاده از داده‌های

به دست آمده از نقشه برداری دقیق بنا از طریق پویشگرهای لیزری (لیزر اسکن) و دوربین های توتال استیشن برداشت شد. این روش ها امکان برداشت ابعادی دقیق از اجزای مختلف گنبد را فراهم ساخت و نقشه ای دقیق و کامل از گنبد به دست آمد.

پس از جمع آوری داده های هندسی، مدل سازی عددی گنبد در نرم افزار ABAQUS انجام شد. در این مدل سازی، گنبد به طور دقیق به اجزای مختلف تقسیم شد تا رفتار هر بخش به طور مجزا شبیه سازی گردد. ویژگی های مصالح گنبد، شامل بتن و گچ، بر اساس داده های تجربی و استانداردهای موجود تعریف و وارد نرم افزار شدند. سپس، بارهای استاتیکی و دینامیکی مختلف به مدل اعمال گردید و نتایج آن شامل توزیع تنش ها، کرنش ها، تغییر شکل ها و نیروهای داخلی تحلیل شد. این شبیه سازی ها به منظور بررسی رفتار گنبد تحت بارهای مختلف مانند بارهای زلزله و فشارهای استاتیکی انجام شدند.

در این تحقیق، گنبد با لحاظ رینگ بتنی و بدون آن شبیه سازی و رفتار سازه ای آن ها تحلیل گردید. مدل های مختلفی از گنبد با در نظر گرفتن رینگ بتنی و مدل هایی بدون این مداخله ایجاد شدند. در این فرآیند، تأثیر رینگ بتنی بر پایداری سازه ای گنبد، به ویژه در پاسخ به نیروهای وارد بر آن، ارزیابی شد. نتایج حاصل از شبیه سازی ها بر اساس مقایسه رفتار گنبد در این دو حالت به ویژه از منظر توزیع تنش ها و تغییرات کرنش ها مورد تحلیل قرار گرفت.

تمامی داده های مورد استفاده در این تحقیق، شامل نقشه های معماری و گزارش های فنی، از طریق مستندات موجود و بازدیدهای میدانی جمع آوری شد. بازدیدهای میدانی شامل اندازه گیری های دقیق ابعاد گنبد، ثبت وضعیت کنونی اجزای سازه ای، و ثبت تصاویر از بنا بود. همچنین، برای انجام تحلیل های عددی و مدل سازی، از نرم افزار ABAQUS استفاده شد که به طور تخصصی برای شبیه سازی رفتار سازه ای و تحلیل های عددی پیچیده مناسب است.

در این تحقیق، مدل سازی عددی گنبد سلطانیه در برابر بارهای مختلف با استفاده از نرم افزار ABAQUS به منظور بررسی رفتار سازه ای آن و تأثیر مداخله رینگ بتنی صورت گرفت. نتایج حاصل از این تحلیل ها، شامل تأثیر این مداخله بر توزیع تنش ها و تغییرات کرنش ها، به طور ویژه بررسی شدند. این نتایج بر اساس داده های میدانی و مستندات تاریخی با یکدیگر مقایسه شدند و تأثیرات مداخله رینگ بتنی بر پایداری سازه ای گنبد سلطانیه مورد ارزیابی قرار گرفت. این پژوهش، به ویژه در زمینه تحلیل سازه ای و تأثیر مداخله حفاظتی بر رفتار سازه ای بناهای تاریخی، می تواند مبنای مناسبی برای مداخلات حفاظتی در سایر بناهای مشابه باشد. در ادامه روش ها، ابزارها و فرایندهای بکار گرفته شده در این تحقیق به طور دقیق در ذیل تشریح شده اند تا امکان تکرار پژوهش فراهم گردد:

طرح تحقیق (آزمایش)^۱

مشابه آزمایش بر روی پدیده های طبیعی، از آنجا که در این رساله نیز یکی از اهداف پژوهشگر، آزمایش واکنش یا اثر خاص، مداخلات انجام یافته برای حفاظت از ایستایی گنبد سلطانیه (رینگ بتنی به دور گنبد) بوده است بنابراین طرح آزمایش به شرح زیر طراحی گردید:

برای سنجش اثر این مداخله کالبدی (رینگ بتنی) موردی ایستایی گنبد سلطانیه و تنش های شکل گرفته نیاز به دو دسته آزمایش وجود داشت یکی بر روی وضعیت فعلی گنبد سلطانیه (گروه آزمایش) و دیگری بر روی گنبد سلطانیه که قبلاً در پنجاه سال گذشته که رینگ بتنی بر دور گنبد آن شکل نگرفته بود؛ (به عنوان گروه شاهد یا کنترل) مطابق استانداردهای روش تحقیق تجربی، پژوهشگر باید از بین رخدادهای جاری بر گنبد سلطانیه داده های خود را برای مشاهده و آزمایش جمع آوری کند و یا اینکه رخدادهای و مشاهدات را خود خلق کند؛ از آنجا که متأسفانه هیچ گونه سامانه پایشی^۲ اعم از لرزه نگار دائمی یا حسگر دائمی

^۱ Research Design

^۲ Monitoring

ارتعاشات بر روی گنبد سلطانیه جهت پایش وضعیت ایستایی آن در برابر محرک‌های خارجی (اعم از نشست‌های احتمالی، نیروهای جانبی اعم از وزش بادهای تند، جابجایی گردشگران در طبقات گنبد، زمین لرزه‌های کوچک رخ داده در سال‌های اخیر و...) وجود ندارد، پژوهشگر به منظور طرح‌ریزی آزمایش با کمک اساتید سازه، تصمیم به مدل سازی سازه گنبد به روش المان‌های محدود و سپس شبیه سازی رفتار سازه قبل از ایجاد طوقه (رینگ) بتنی (نمونه شاهد) و پس از ایجاد طوقه مذکور (نمونه مورد آزمایش) گرفت تا بتواند فرضیات خود را در خصوص نیارش گنبد و همچنین مداخله غیر اصولی صورت گرفته را به بوته آزمایش بسپارد.

ابزارهای مورد استفاده در این پژوهش

دوربین پوششگر لیزری: برای برداشت دقیق هندسه و جزئیات سازه گنبد سلطانیه استفاده شده است. این دستگاه با ارسال اشعه لیزری، اطلاعات انبوهی از ابر نقاط را برداشت کرده و مدل سه‌بعدی دقیقی از بنا ایجاد می‌کند.

نرم افزار ABAQUS: برای مدل سازی و شبیه سازی سازه گنبد سلطانیه به روش اجزای محدود استفاده شده است. این نرم افزار قابلیت های تحلیلی گسترده ای را در اختیار کاربران قرار می‌دهد و برای تحلیل های غیرخطی مواد تحت شرایط استاتیکی، شبه استاتیکی و دینامیک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نرم افزار HyperMesh: برای تبدیل ابر نقاط به مش های هر می چهار گرهی استفاده شده است. این نرم افزار به دلیل توانایی در مش بندی هندسه های پیچیده، برای مدل سازی گنبد سلطانیه مناسب بوده است.

فرایند مدل سازی و شبیه سازی به روش اجزای محدود

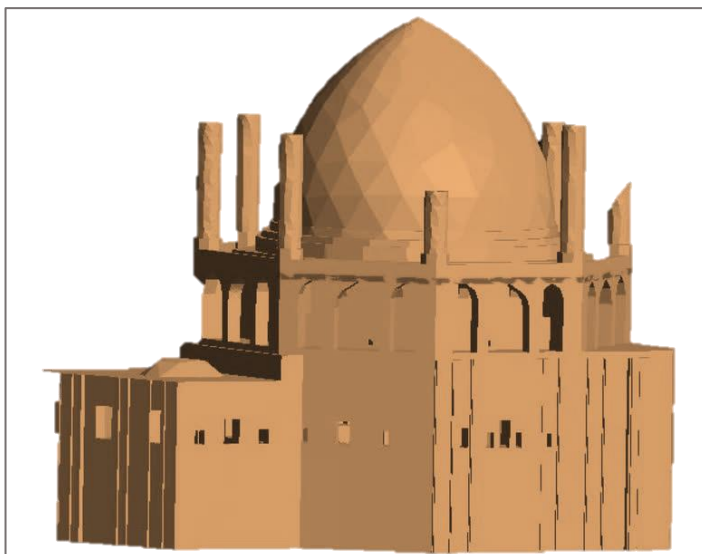
در این پژوهش، گنبد سلطانیه به روش اجزای محدود مدل سازی شده است. این روش شامل تقسیم سیستم بزرگ به بخش های کوچک تر و ساده تر به نام المان های محدود است. این گسسته سازی مکانی مستلزم تعریف جسم یا محیط مسئله به صورت یک شبکه یا مش است. شبکه از مجموعه ای از نقاط گسسته تشکیل شده که جسم یا محیط مسئله را به محدوده ای عددی برای حل مسئله تبدیل می‌کند. معادلات ساده ای که هر المان را مدل سازی می‌کنند، در قالب یک سیستم بزرگتر از معادلات که کل محدوده مسئله را در بر می‌گیرد، سرهم بندی می‌شوند. در نهایت، با استفاده از حساب تغییرات، جوابی برای مسئله با به حداقل رساندن یک تابع خطا یافته می‌شود.

الف) برداشت هندسه: هندسه دقیق گنبد سلطانیه با استفاده از دوربین پوششگر لیزری و دوربین نقشه برداری توتال استیشن برداشت شده و مدل سه بعدی آن در نرم افزار AutoCAD ترسیم شده است. برای مدل سازی گنبد سلطانیه در نرم افزار ABAQUS، لازم بود که در ابتدا هندسه دقیق و کامل بنای سازه (بر خلاف پژوهش های پیشین) به دقت برداشت و مدل سازی هندسی انجام می‌شد؛ به همین دلیل به کمک ابزارهایی چون دوربین پوششگر لیزری و دوربین نقشه برداری توتال استیشن کلیه اجزا و عناصر هندسه داخلی و بیرونی گنبد مشتمل بر ابعاد و اندازه های هندسه آن ها برداشت گردید. (بادقت ۵PPM)^۲ برای شناسایی دقیق مواد و مصالح از مصالح دور ریخته شده مرمت های قبلی بنا برای شناخت و اندازه گیری ماهیت مواد (اعم از مقاومت فشاری آجرها و ...) استفاده شد. سپس هندسه گنبد برداشت شده به شکل سه بعدی در نرم افزار Autocad ترسیم گردید.

¹ Sensors

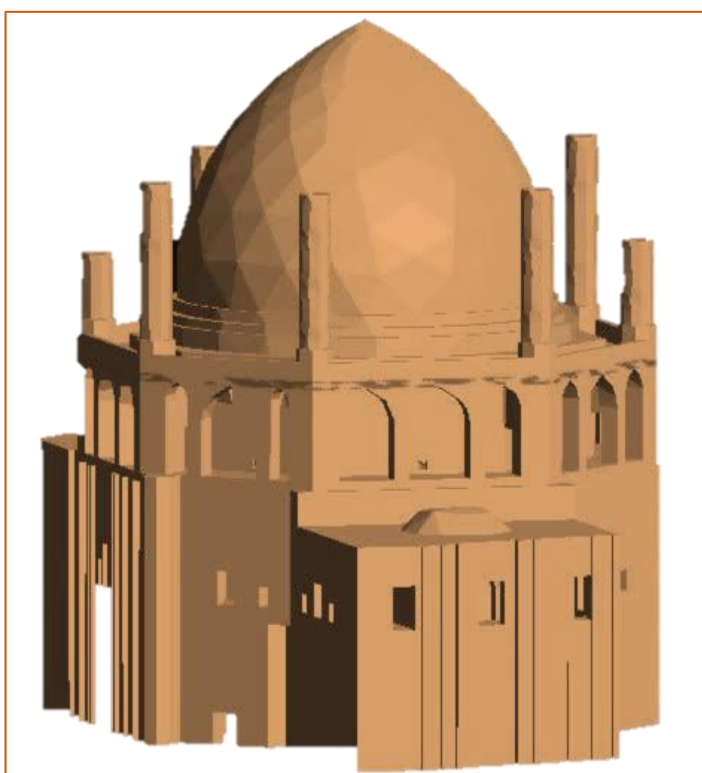
² PPM: Per Part Million

پس از برداشت داده‌های لیزر اسکن، مدل هندسی بسیار دقیق مشتمل بر تمام قوس‌ها و سازه پنهان به شکل زیر استخراج شد (شکل‌های شماره ۳، ۴ و ۵).



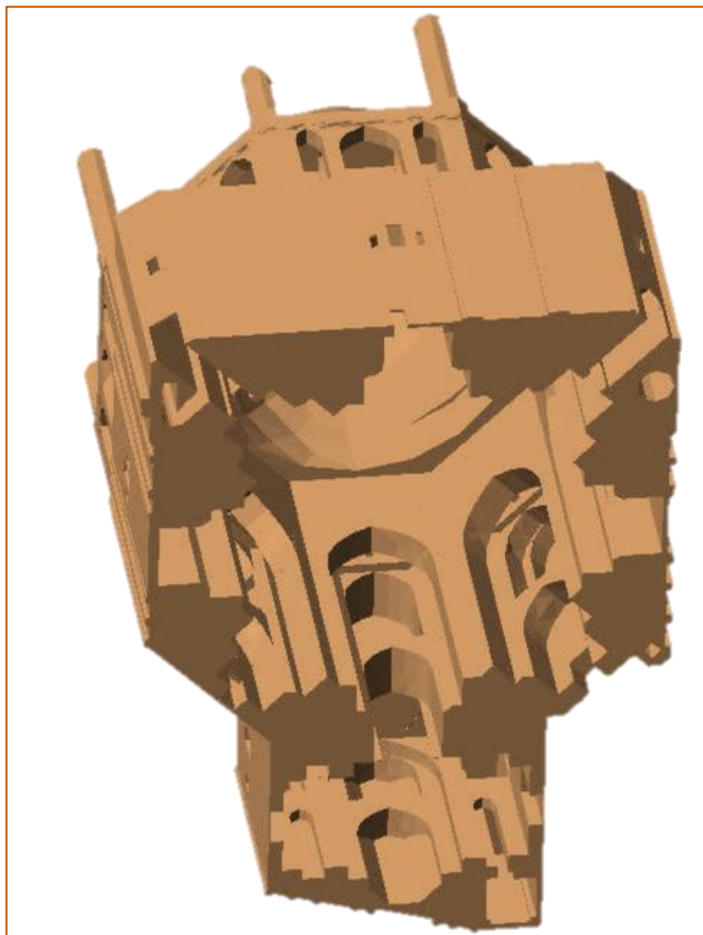
شکل ۳. تصویر از بخش‌های خارجی مدل سازی هندسی انجام شده (پوشگری لیزری) که کلیه اجزا مشتمل بر گنبد و مناره‌ها برای نخستین بار از گنبد

سلطانیه مدل سازی شده است - مأخذ: نگارندگان



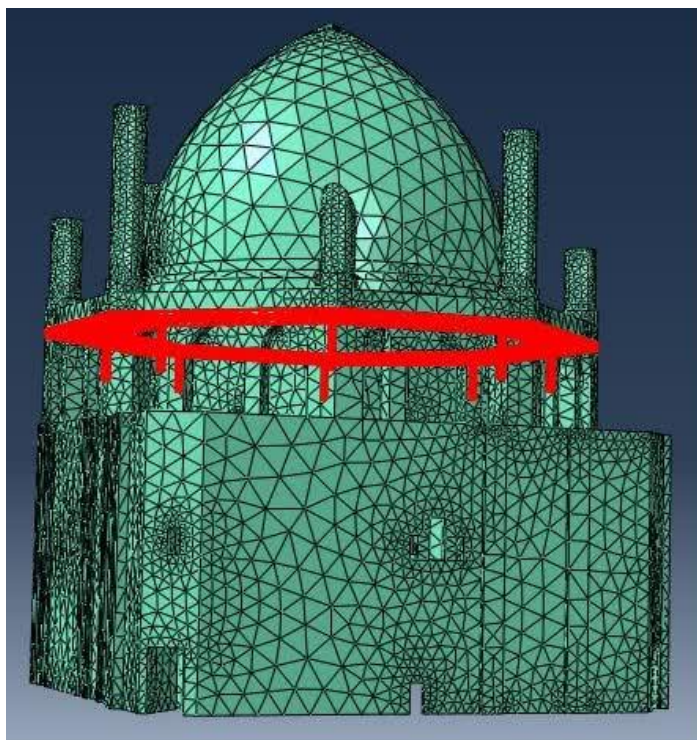
شکل ۴. تصویر از بخش‌های خارجی مدل سازی هندسی انجام شده (پوشگری لیزری) که کلیه اجزا مشتمل بر گنبد و مناره‌ها، در وضع موجود (حتی

گلدسته‌هایی که بخشهایی از آن‌ها فرو ریخته برای نخستین بار از گنبد سلطانیه مدل سازی شده است - مأخذ: نگارندگان



شکل ۵. تصویر از بخش‌های داخلی مدل سازی هندسی شده (پوشگری لیزری) که کلیه اجزا مشتمل بر همه عناصر و ۳۰۶ قوس و... برای نخستین بار از گنبد سلطانیه مدل سازی شده است - مأخذ: نگارندگان

ب) مش‌بندی: فایل مدل هندسی وارد نرم‌افزار Hyper Mesh شده و ابر نقاط تبدیل به مش‌های هرمی چهار گرهی شد. این نوع مش‌های سه بعدی متشکل از سه مثلث فضایی به هم چسبیده هستند که کمک می‌کنند هندسه پیچیده گنبد را بتوان به فرم مش در آورد. لازم به ذکر است به دلیل همین هندسه پیچیده، امکان استفاده از مش به صورت هشت گرهی (آجری) وجود نداشت. (شکل ۶).



شکل ۶. تصویر مدل سازی شده هندسه گنبد سلطانیه به صورت مش هرمی ۴ گرهی در نرم افزار Hyper Mesh ماخذ: نگارندگان

ج) انتقال مش به آباکوس و تعریف مصالح: در ادامه این مش به نرم افزار ABQUS انتقال داده شد و مشخصات آن‌ها (اعم از آجرهای گنبد، رینگ بتنی و ...) در نرم افزار مذکور تعریف گردید؛ سپس به منظور تشخیص و جدا سازی اجزای سازه‌ای گنبد یک عملیات میدانی تحت عنوان "آزمون ارتعاش" بر روی بخش‌های مختلف سازه انجام و نتایج این تست، نشان داد که سازه "تربت خانه" رفتار سازه‌ای مستقل از گنبد دارد (تاریخ ساخت گنبد خانه و مقایسه آن با تاریخ ساخت گنبد نیز موید این موضوع است که آن دو بنا به لحاظ سازه‌ای کاملاً دو سازه مستقل هستند) لذا بر خلاف پژوهشهای پیشین این جزء (تربت خانه) از سایر اجزای سازه گنبد در مدل سازی‌ها تفکیک گردید؛ این موضوع در مود شیپ نیز تأیید شده است. و آنالیز فرکانس‌ها نیز این موضوع را تأیید کرده و به این دلیل تربت خانه در مدل شبیه سازی شده گنجانده نشد.

د) تحلیل سازه‌ای گنبد: در ادامه مدل ساخته شده در نرم افزار تحت بار ثقلی قرار گرفته و رفتار آن به صورت خطی شبیه‌سازی شد. تجزیه و تحلیل بر روی مدل ایجاد شده گنبد سلطانیه در نرم افزار آباکوس، در چهار بخش اصلی انجام شده است:

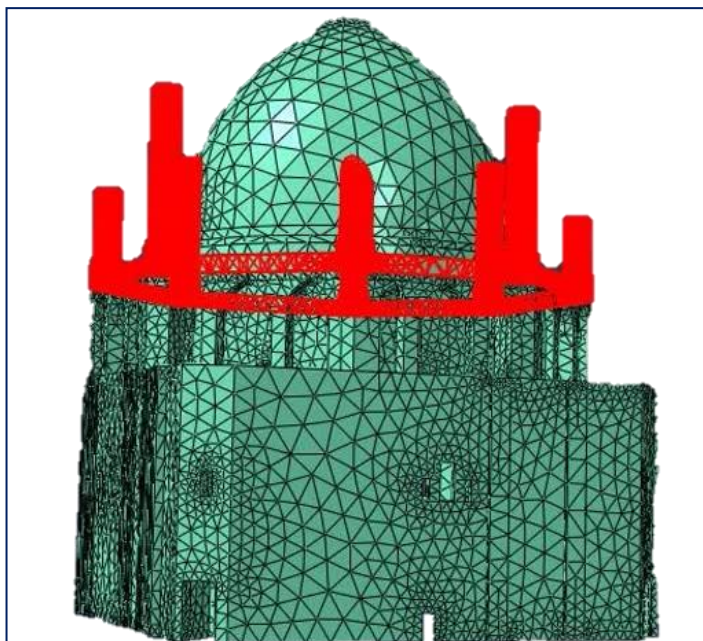
المان مناره‌ها.

المان گنبد.

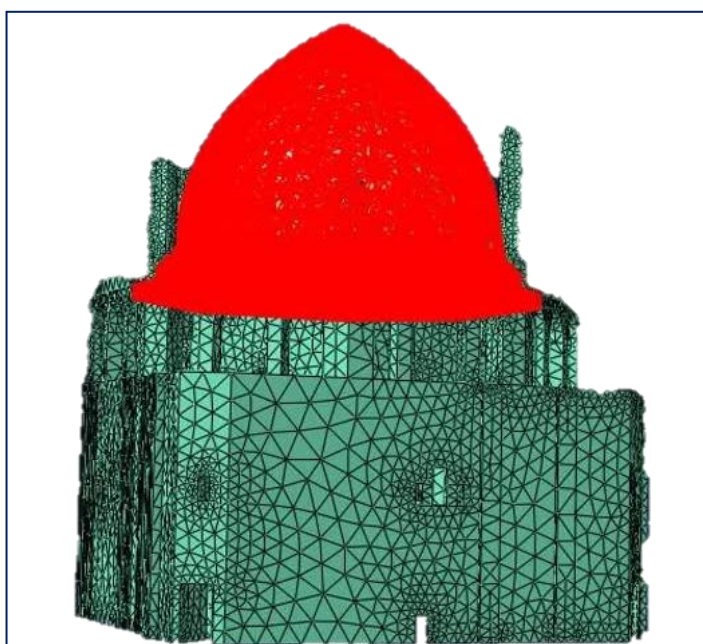
المان سازه رینگ (طوقه) بتنی (مداخله حفاظتی سن پالوئری).

¹ Vibration Test

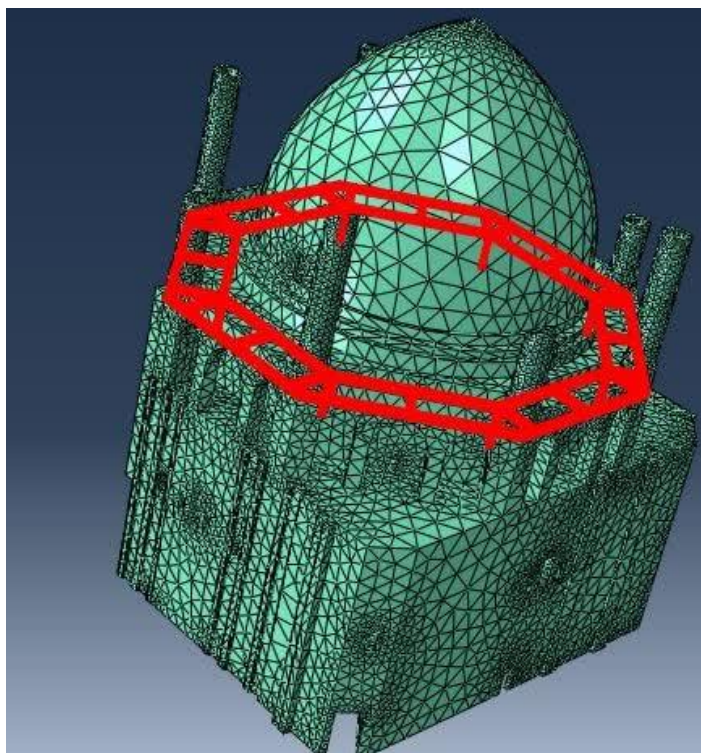
المان هیكل گنبد.



شكل ۷. تصوير مش بندي شده سازه گنبد سلطانيه در نرم افزار ABAQUS و تفكيك المان مناره ها -

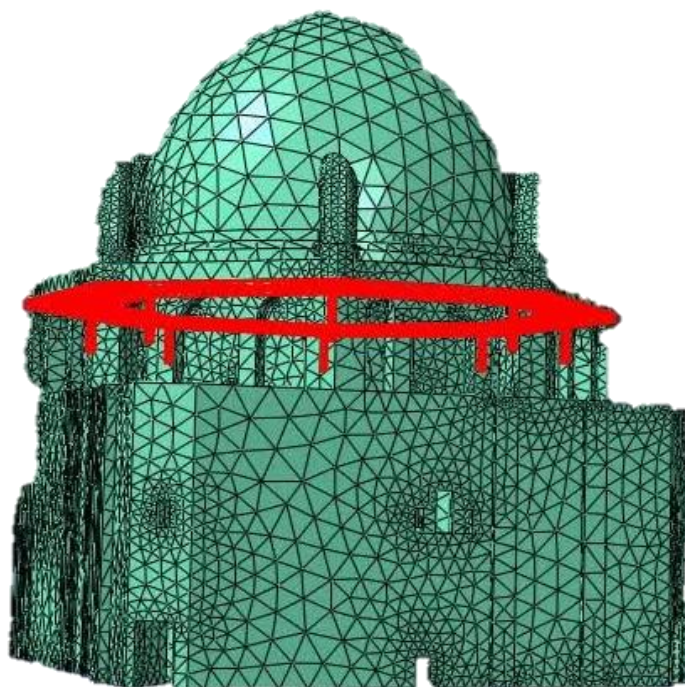


شكل ۸. تصوير مش بندي شده سازه گنبد سلطانيه در نرم افزار ABAQUS و تفكيك المان گنبد



شکل ۹. تصویر مش بندی شده سازه گنبد سلطانیه در نرم افزار ABAQUS و تفکیک سازه طوقه (رینگ) بتنی استحکام بخشی مداخله سن پالوئزی ۱۳۵۱

شمسی

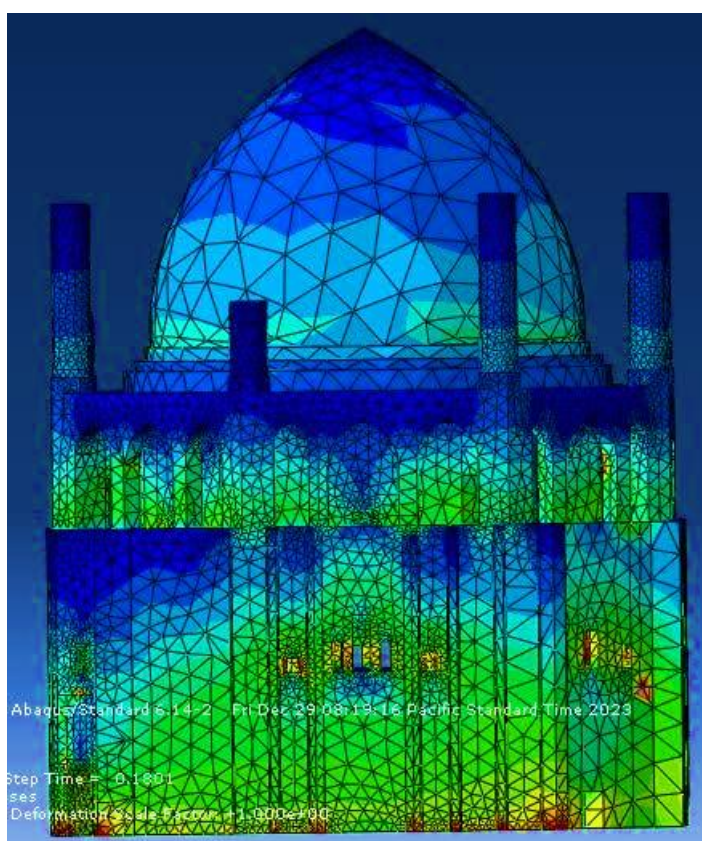


شکل ۱۰. تصویر مش بندی شده سازه گنبد سلطانیه در نرم افزار ABAQUS و تفکیک سازه طوقه (رینگ) بتنی استحکام بخشی مداخله سن پالوئزی ۱۳۵۱

شمسی که ساختار سه بعدی و عمقی آن مشخص است

المان‌های فوق (همانگونه که در تصاویر فوق نشان داده شده است) به صورت مستقل و به هم پیوسته در نرم افزار آباکوس مدل سازی و شبیه سازی شده تا بتوان سازه را به صورت جداگانه و هم به صورت یکپارچه در قالب گزینه‌ها (آلترناتیوهای) مختلف شبیه سازی کرد. بدین مفهوم که بتوان نقش وجود / عدم وجود سازه طوقه بتنی را در رفتار سازه سنتی گنبد آزمون کرد.

مطابق با «طرح آزمایش»، نتایج شبیه سازی شده رفتار سازه‌ای گنبد در دو وضعیت (نمونه مورد آزمون، نمونه شاهد) انجام شد؛ به دیگر سخن ابتدا خود گنبد (بدون در نظر گرفتن رینگ بتنی ایجاد شده در پنجاه سال پیش به عنوان نمونه شاهد) تحت فشار بارهای ثقلی شبیه سازی شده و تحلیل تنش به صورت کانتورهای رنگی استخراج شد. (شکل ۱۱)

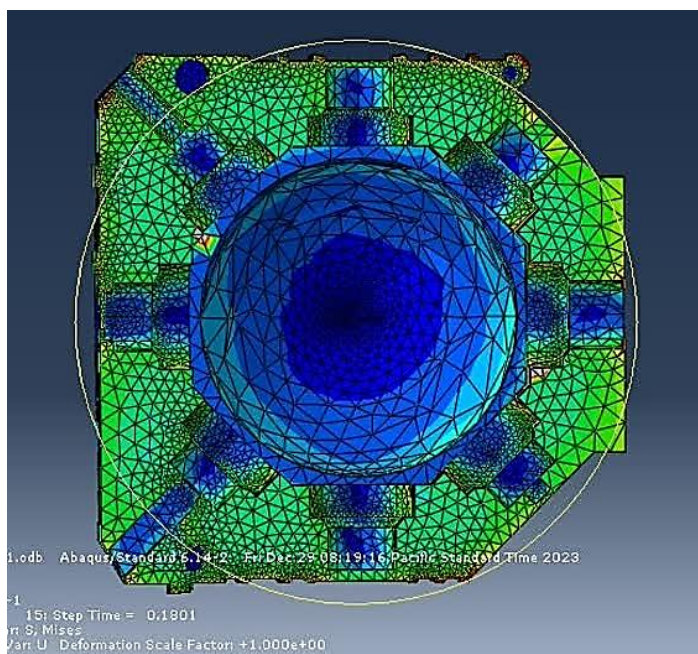


شکل ۱۱. تصویر خروجی شبیه سازی تنش‌ها در گنبد سلطانیه بدون رینگ بتنی به صورت کانتورهای رنگی (مطابق لژاندر: تمرکز تنش بر روی مرزهای

بازشوهاست) - مأخذ: نگارندگان

همانگونه که در شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود تمرکز تنش‌ها در مجاورت بازشوها (ایوان‌ها، طاق‌ها و لبه‌های آنها) می‌باشد که مقادیر کمی نقش بسیار کمتر از مقاومت فشاری حداکثری مصالح (حتی آجر) می‌باشد.

در آلترناتیو بعدی (نمونه مورد آزمون) یعنی در نظر گرفتن سازه گنبد با طوقه بتنی مورد شبیه سازی و تست تنش نیروی ثقلی قرار گرفت. همانگونه که در شکل ۱۲ مشاهده می شود به زعم تصور مرمت گر (سن پالوئزی) این رینگ بتنی محافظ گنبد برای جلوگیری از رانش حاصل از بار ثقلی، این طوقه تغییری ملموس در تنش های حاصل از بار ثقلی ایجاد نمی کند.



شکل ۱۲. تصویر خروجی شبیه سازی تنش ها در گنبد سلطانیه با لحاظ المان رینگ بتنی به صورت کانتورهای رنگی-دید پلانیمتریک (مطابق لژاندر : تمرکز تنش تغییری نیافته است!) - مأخذ: نگارندگان

نتایج نشان می دهد که ایجاد طوقه (رینگ بتنی) در دور گنبد هیچ نقش استحکامی برای کم کردن نیروی ثقلی به دلیل توانمند بودن هیکل گنبد نداشته است. اما این رینگ بتنی می تواند آسیب جدی در زمان وقوع زلزله به دلیل جلوگیری از نوسان آزاد (بدون درگیری) سازه های بنایی داشته باشد.

بحث و نتیجه گیری

این پژوهش با هدف بررسی رفتار سازه ای گنبد سلطانیه و تأثیر مداخلات حفاظتی بر پایداری آن انجام شد. با استفاده از روش تحلیل المان محدود (FEM) و بررسی تأثیر عوامل مختلف، یافته های مهمی در مورد استحکام سازه ای این اثر تاریخی به دست آمد. بررسی ها نشان داد که طراحی اولیه گنبد بر اساس اصول دقیق نیارش، پایداری مطلوبی در برابر بارهای ثقلی دارد. همچنین، تحلیل اثر مداخله حفاظتی رینگ بتنی، چالش هایی را در مواجهه با نیروهای لرزه ای آشکار ساخت.

نتایج تحلیل ها نشان داد که رفتار سازه ای گنبد سلطانیه که در تمام مرز خود دارای تکیه گاه است و تحت تأثیر نیروهای عمودی قرینه نسبت به محور خود قرار دارد (مانند بار مرده) متأثر از خصوصیات هندسی گنبد است. در این نوع پوسته ها که نسبت به محورشان قرینه اند مقاطع نصف النهاری و مقاطعی که بر نصف النهارها عمودند در واقع مقاطع اصلی برای تنشهای اصلی (فشاری و کششی) می باشند. قوس ها صرفاً برای یک سری از بارها بصورت طنابی عمل می کنند. در

عوض نصف‌النهارهای یک گنبد برای هر گروه از بارهای متقارن بصورت طنابی عمل می‌کنند. این اختلاف اساسی در رفتار سازه‌ای نتیجه‌ی این اصل است که قوس‌های منفرد تکیه‌گاه جانبی ندارد، در عوض نصف‌النهارهای گنبد توسط مدارها نگه داشته می‌شوند و با ایجاد تنش‌های حلقه‌ای از جابجایی آن‌ها جلوگیری می‌کنند.

در گنبد سلطانیه تنش‌های فشاری هم در جهت نصف‌النهارها و هم در جهت مدارها ایجاد می‌شوند در این حالت می‌توان این قبیل سازه‌ها را از موادی که قابلیت تحمل تنش‌های کششی ندارند مانند آجر و یا مصالح بنایی ساخت. در این گنبد پوسته‌ای فشار می‌تواند ایجاد شود و علاوه بر آن اگر تنش‌های مستقیم در طول مدارها و نصف‌النهارها نتوانند کل بار را تحمل کنند مکانیزم سومی برای ایجاد تعادل وجود دارد. این مکانیزم سوم مکانیزم برشی است. در صورتی که تنش‌ها از میزان مجاز فراتر نروند تنش‌های مستقیم (فشاری و کششی) از یک طرف و برش درون پوسته‌ای از طرف دیگر همواره در تحمل کل بار و ایجاد تعادل در یک گنبد شرکت می‌کنند. با در نظر گرفتن مکانیزم برشی می‌توان تحت هر بارگذاری گنبد را سازه‌ای طنابی بشمار آورد و بنابراین گنبد سلطانیه در هر موقعیتی یک سازه ی پایدار است.

بر اساس نتایج تحلیل سازه، به روش المان‌های محدود مشخص شد که سازه گنبد سلطانیه می‌تواند بار مرده، بار باد و بار برف را به تنش فشاری تبدیل کرده و آنرا تحمل کند. این تنش فشاری از بالای گنبد به آجر و مصالح پرکننده منتقل می‌گردد و بتدریج به پایین گنبد می‌رسد. فشار در پای گنبد بصورت مایل است یعنی عکس‌العمل تکیه‌گاهی در پای گنبد دارای دو مولفه ی افقی و قائم است. عکس‌العمل قائم فشاری گنبد بدلیل قرارگیری آن روی سازه ی مقبره به دیوارهای باربر و بعد از آن به شالوده و از آنجا به زمین منتقل می‌گردد. این گنبد که بر فراز بنای هشت گوشه‌ای قرار گرفته است که در هر گوشه ی آن مناره‌ای تعبیه شده است. وزن هر یک از مناره‌ها در هر گوشه باعث ایجاد نیروی عکس‌العمل قائم بزرگی می‌گردد. زیاد بودن این نیرو (وزن مناره‌ها) باعث نزدیک شدن برآیند نیروهای فشاری افقی ناشی از گنبد و عکس‌العمل ناشی از وزن مناره به خط قائم می‌گردد. انتقال بار در این وضعیت نیز همانند حالت قبل صورت می‌گیرد و بدین ترتیب پایداری تکیه‌گاهی گنبد تامین می‌شود. بر اساس نتایج این پژوهش، نکات زیر قابل تأمل است:

الف) پایداری در برابر بارهای ثقلی: گنبد سلطانیه به‌دلیل طراحی هندسی خاص خود، در برابر نیروهای ثقلی مانند بار مرده، باد و برف عملکردی مطلوب داشته و بارها را به‌صورت متوازن به پایه‌های خود منتقل می‌کند.

ب) تأثیر رینگ بتنی: بررسی‌های عددی نشان داد که رینگ بتنی افزوده‌شده در مرمت‌های دهه ۱۳۵۰ تأثیر چشمگیری بر کاهش تنش‌های ناشی از بارهای ثقلی ندارد. با این حال، در شرایط لرزه‌ای می‌تواند منجر به ایجاد تنش‌های متمرکز و محدودیت حرکت طبیعی گنبد شود که به آسیب‌پذیری آن می‌افزاید.

ج) رفتار لرزه‌ای: تحلیل‌های دینامیکی نشان دادند که گنبد سلطانیه، در شرایط طبیعی، انعطاف‌پذیری لازم برای توزیع نیروهای زلزله را دارد، اما مداخلات نامناسب، مانند رینگ بتنی، ممکن است این قابلیت را کاهش دهد و به گسترش ترک‌ها و آسیب‌های سازه‌ای منجر شود.

جدول ۲. نتایج و یافته‌های پژوهش

نتایج	توضیحات
نتایج تحلیل رفتار سازه‌ای گنبد	* رفتار سازه‌ای گنبد سلطانیه تحت تأثیر هندسه قرینه و طراحی دقیق
	* واکنش در برابر نیروهای عمودی با توزیع نیروهای فشاری در جهت‌های نصف‌النهار و مدارها

*قوس‌ها در این سازه تنها بخش کوچکی از بارها را تحمل می‌کنند و بیشتر به‌عنوان طناب عمل می‌کنند.

*مدل سازی در نرم‌افزار آباکوس نشان داد که گنبد قادر به تبدیل بارهای مرده، باد و برف به تنش‌های فشاری است که به مصالح آجر و پرکننده منتقل شده و به تدریج به پایین گنبد منتقل می‌شوند.

*همچنین، این تحلیل‌ها نشان داد که نیروهای عکس‌العمل در پایه گنبد به‌صورت مایل هستند و به دیوارهای باربر منتقل می‌شوند.

*وجود مناره‌ها در چهارگوشه گنبد باعث افزایش نیروهای عمودی در هر گوشه شده و به پایداری کلی سازه کمک می‌کند.

*بدون لحاظ طوقه (رینگ) بتنی: نتایج نشان داد که در مدل اولیه، تمرکز تنش‌ها در اطراف بازشوها و لبه‌های قوس‌ها مشاهده می‌شود. این نتایج بیانگر این است که مصالح استفاده‌شده، خصوصاً آجر، قادرند تنش‌های وارد شده را به‌خوبی تحمل کنند

*با لحاظ طوقه (رینگ) بتنی: با لحاظ این رینگ بتنی که در مرمت‌های دهه ۱۳۵۰ شمسی به گنبد اضافه شد هیچ تغییری در الگوی توزیع تنش‌ها مشاهده نشد. بنابراین، رینگ بتنی تأثیر قابل‌توجهی بر پایداری گنبد در برابر بارهای ثقلی ندارد، اما در صورت وقوع زلزله ممکن است مانع حرکت آزاد سازه و موجب وارد آمدن آسیب‌های بیشتر شود.

نتایج نشان داد که گنبد سلطانیه در شرایط بارگذاری لرزه‌ای، علی‌رغم طراحی مناسب در برابر بارهای ثقلی، ممکن است در صورت حضور رینگ بتنی دچار آسیب‌هایی شود. رینگ بتنی در این شرایط می‌تواند حرکت آزاد سازه را محدود کرده و منجر به ایجاد تنش‌های متمرکز در قسمت‌های مختلف گنبد شود.

نتایج مدل‌سازی المان محدود و شبیه‌سازی‌ها

نتایج بررسی توزیع تنش‌ها

ارزیابی پاسخ گنبد به بارهای لرزه‌ای

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که طراحی اولیه گنبد سلطانیه، به‌دلیل بهره‌گیری از اصول دقیق نیارش، از پایداری بالایی برخوردار است. مداخلات حفاظتی گذشته، به‌ویژه استفاده از رینگ بتنی، در شرایط ثقلی تأثیر چندانی بر بهبود عملکرد سازه‌ای نداشته، اما در مواجهه با نیروهای لرزه‌ای می‌تواند منجر به ایجاد آسیب‌های جدید شود. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که در مداخلات مرمتی بناهای تاریخی، باید تحلیل‌های سازه‌ای دقیق‌تری انجام شود و از روش‌هایی بهره گرفته شود که کمترین تأثیر منفی را بر پایداری و اصالت بنا داشته باشند. مطالعات آینده می‌توانند درک عمیق‌تری از چالش‌های سازه‌ای و مرمتی گنبد سلطانیه ارائه دهند و به بهینه‌سازی روش‌های حفاظتی برای این میراث جهانی کمک کنند.

نتایج این تحقیق به‌طور کامل فرضیات مطرح‌شده در آغاز تحقیق را تأیید می‌کند. گنبد سلطانیه با توجه به طراحی هندسی و ویژگی‌های مصالح خود، تحت بارهای ثقلی معمولی به‌خوبی قادر به تحمل بارها و توزیع آن‌ها است. همچنین فرضیه‌ای که در آن تأکید بر عدم تأثیر قابل‌توجه رینگ بتنی بر عملکرد گنبد در برابر بارهای ثقلی بود، تأیید شد.

در زمینه بارهای لرزه‌ای، تحلیل‌ها نشان دادند که حضور رینگ بتنی می‌تواند در شرایط لرزه‌ای اثر منفی داشته باشد و مانع از انعطاف طبیعی گنبد شود. این امر بر اهمیت طراحی مداخلات حفاظتی مناسب در برابر بارهای دینامیکی تأکید دارد.

در مجموع، تفسیر یافته‌های این پژوهش به وضوح نشان می‌دهد که گنبد سلطانیه به‌عنوان یک شاهکار معماری اسلامی، در پاسخ به بارهای ثقلی عملکرد خوبی دارد، اما در برابر نیروهای لرزه‌ای به‌ویژه با حضور مداخلات مرمتی غیرمؤثر همچون کلاف کشی بتنی، دچار مشکلاتی می‌شود. این یافته‌ها علاوه بر ارائه اطلاعات دقیق‌تر در مورد رفتار سازه‌ای گنبد، گامی مهم در جهت ارزیابی و نقد رویکردهای مرمتی در گذشته به شمار می‌روند.

یکی از مهم‌ترین نوآوری‌های این تحقیق، استفاده از شبیه‌سازی‌های پیشرفته برای مدل‌سازی رفتار گنبد در شرایط مختلف و ارائه تحلیل‌های دقیق‌تر از اثرات مداخلات مرمتی است. این تحلیل‌ها به پژوهشگران و متخصصان مرمت کمک می‌کند که در آینده مداخلات حفاظتی و مقاوم‌سازی را با دقت بیشتری انجام دهند و از آسیب‌های احتمالی جلوگیری کنند.

پژوهش‌های پیشین در مورد گنبد سلطانیه، به‌ویژه در زمینه ساختار سازه‌ای و مرمت‌های انجام‌شده، تاکنون در دو بخش عمده متمرکز بوده‌اند: یکی تحلیل‌های سازه‌ای و دیگری مداخلات مرمتی. این تحقیق به‌ویژه در زمینه شبیه‌سازی‌های المان محدود (FEM) برای تحلیل رفتار سازه‌ای گنبد و مقایسه رفتار آن تحت بارهای مختلف، با استفاده از مدل‌های پیچیده‌تر و دقیق‌تر پیشرفته‌تر از مطالعات پیشین انجام شده است.

پژوهش‌های سازه‌ای قبلی: تحلیل‌های پیشین گنبد سلطانیه، عمدتاً بر مبنای بررسی‌های تاریخی و بررسی‌های دستی انجام شده‌اند. بسیاری از این پژوهش‌ها نتایج خود را بر اساس بازسازی‌های اولیه و فرضیات قدیمی درباره نحوه انتقال نیروها ارائه کرده‌اند (2, 6, 7, 9) اما این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی و مدل‌های پیشرفته المان محدود، درک دقیق‌تری از رفتار گنبد در شرایط مختلف فراهم کرده است.

مداخلات مرمتی: همچنین در مطالعات مرمتی قبلی، توجه زیادی به تغییرات در ساختار داخلی و استفاده از مصالح جدید نظیر گچ و کلاف بتنی شده است. در این تحقیق، به‌ویژه در بخش مربوط به مداخلات مرمتی (از جمله ایجاد کلاف کشی بتنی)، نقدهایی وارد شده است که با استفاده از مدل‌سازی‌های دینامیکی و شبیه‌سازی‌های پیچیده‌تر نتایج آن به‌طور علمی و دقیق‌تری ارزیابی شده است.

از این رو، این پژوهش در واقع به‌طور شفاف‌تری نشان می‌دهد که مداخلات مرمتی در گذشته می‌تواند منجر به محدودیت‌هایی در عملکرد طبیعی گنبد شده و در مقابل زلزله به‌ویژه مشکلات ساختاری ایجاد کند. همچنین، یافته‌های این تحقیق با شبیه‌سازی‌های پیشرفته‌تر از یافته‌های گذشته حمایت می‌کند و درک دقیقی از نحوه انتقال نیروها و اثرات مداخلات حفاظتی را به دست می‌دهد.

با وجود اینکه بسیاری از پژوهش‌های پیشین در زمینه مرمت گنبد سلطانیه از جمله مرمت‌های انجام‌شده توسط سن پائولزی و دریکو به‌طور کلی به‌عنوان مبنای اصلی در نگهداری این اثر مورد استفاده قرار گرفته‌اند، برخی از این نظریات به‌ویژه در مورد مداخلات سازه‌ای و مقاوم‌سازی‌ها فاقد دقت لازم و تحلیل‌های علمی کافی بوده‌اند.

نقد نظریات مرمتی پیشین: مداخلات انجام‌شده، از جمله نصب کلاف کشی بتنی در اطراف گنبد به‌ویژه در بخش‌های پاتاق و گریو گنبد، نقدهایی را به همراه دارد. به‌ویژه در زمانی که ترک‌هایی در گنبد مشاهده شد، مداخلات به‌طور سریع و بدون تحلیل دقیق علت ترک‌ها انجام شد. این اقدام، که به‌طور عمده بر اساس تجربه‌های گذشته و بدون توجه به ویژگی‌های ساختاری گنبد صورت گرفته، موجب شده است که کلاف‌های بتنی با سختی متفاوت از مصالح اصلی گنبد به‌کار رود و بنابراین خطرات جدی در برابر نیروهای لرزه‌ای ایجاد کند. مطالعات نشان داده‌اند که کلاف کشی بتنی که بدون ارزیابی دقیق از ساختار اصلی گنبد انجام شده، می‌تواند باعث ایجاد موانعی برای حرکت طبیعی گنبد در برابر نیروهای زلزله و حتی در طول زمان منجر به بروز مشکلات جدید در سازه شود.

یکی از تفاسیر یافته‌های این پژوهش، نقد مداخلات مرمتی و مقاوم‌سازی‌هایی است که در طول زمان بر گنبد سلطانیه انجام شده‌اند. در مطالعات پیشین، مداخلات مختلف مرمتی بر روی گنبد سلطانیه بررسی شده است، اما در این پژوهش به‌ویژه به نقد کلاف‌کشی‌های بتنی که در اطراف گنبد ایجاد شده است،

پرداخته شده است. این اقدامات که عمدتاً بر اساس نیاز فوری برای مقاومسازی گنبد در برابر خطرات طبیعی انجام شد، نه تنها باعث بهبود سازه نشد، بلکه ممکن است خطرات جدیدی را ایجاد کند.

نقدی که این تحقیق به این مداخلات وارد می‌آورد، نشان می‌دهد که در هنگام انجام مقاومسازی، باید توجه ویژه‌ای به ویژگی‌های ساختاری و مصالح به‌کاررفته در بنا صورت گیرد. به‌ویژه در مورد گنبد سلطانی، به‌عنوان یک اثر تاریخی با ارزش، این امر اهمیت ویژه‌ای دارد. استفاده از مصالح غیرمتناسب، مانند بتن در کنار مصالح اصلی گنبد، می‌تواند باعث بروز مشکلات جدی در عملکرد سازه و حتی تخریب بخش‌هایی از آن شود.

یافته‌های این پژوهش با برخی مطالعات پیشین هم‌خوانی دارد و درعین‌حال، تفاوت‌هایی نیز مشاهده شد:

- پژوهش‌های قبلی عمدتاً بر بررسی‌های تاریخی و آزمایش‌های سنتی استوار بودند، درحالی‌که این مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی‌های پیشرفته عددی، دیدگاه جامع‌تری از رفتار سازه‌ای گنبد ارائه داده است.
- تحلیل‌های انجام‌شده نشان داد که برخی مداخلات حفاظتی قبلی، به‌ویژه استفاده از بتن مسلح، بدون بررسی کافی از اثرات سازه‌ای آن انجام شده و در شرایط لرزه‌ای، ممکن است مشکلاتی ایجاد کند.

هرچند این پژوهش جنبه‌های متعددی از رفتار سازه‌ای گنبد سلطانی را بررسی کرده است، اما محدودیت‌هایی نیز وجود دارد که می‌تواند در مطالعات آینده مدنظر قرار گیرد:

تحلیل دقیق‌تر نیروهای دینامیکی: بررسی بیشتر اثرات بارهای دینامیکی مانند زلزله‌های شدید و اثرات لرزه‌ای احتمالی بر دیگر اجزای سازه‌ای مجموعه سلطانی ضروری است.

بررسی مصالح و روش‌های جایگزین در مداخلات مرمتی: استفاده از مواد انعطاف‌پذیر و متناسب با ماهیت سازه‌های تاریخی، به‌جای مصالح مدرن همچون بتن، نیازمند مطالعات جامع‌تری است.

مدل‌سازی دقیق‌تر جزئیات سازه‌ای: پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، تحلیل‌های جامع‌تری با درنظرگرفتن سایر بخش‌های این بنای تاریخی، ازجمله تربت‌خانه انجام شود تا تأثیر متقابل این اجزا بر یکدیگر مشخص گردد.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

تشکر و قدردانی

از تمامی کسانی که در طی مراحل این پژوهش به ما یاری رساندند تشکر و قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ گونه تضاد منافی وجود ندارد.

حمایت مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

موازن اخلاقی

در انجام این پژوهش تمامی موازن و اصول اخلاقی رعایت گردیده است.

خلاصه مبسوط

Extended Abstract

The Soltaniyeh Dome, one of the most significant architectural achievements of the Ilkhanid period in Iran, serves as a compelling case study for examining the intricate interplay between structural integrity and cultural value in historical conservation. Built in 1302 CE under the order of Sultan Mohammad Khodabandeh (Öljaitü), the dome stands as a monumental representation of Islamic architectural prowess, showcasing a harmonious fusion of Iranian architectural traditions and Mongol influences. Its registration as a UNESCO World Heritage site underscores its global cultural and historical significance (1). The dome's architectural sophistication lies not only in its structural design but also in the spiritual and symbolic meanings embedded within its form and decoration (2). Over the centuries, natural decay and various human interventions have necessitated conservation efforts, the most prominent of which is the addition of a reinforced concrete ring in the mid-20th century. Although intended to bolster structural stability, this intervention has raised substantial debate regarding its actual effect on the dome's integrity and on its tangible and intangible heritage values (3). This study aims to provide a comprehensive structural and value-based assessment of the Soltaniyeh Dome, focusing specifically on the concept of "niyāresh"—a term rooted in Persian architecture denoting the integration of engineering and aesthetic function. By utilizing numerical modeling and finite element analysis (FEM), the research investigates the structural behavior of the dome both with and without the concrete ring, thereby addressing critical concerns about compatible conservation, material authenticity, and seismic resilience.

The methodology for this study was designed to replicate an experimental approach, where the dome in its current state (with the concrete ring) was compared against a digitally reconstructed model representing its state prior to intervention. The research began with high-resolution geometric data collection through 3D laser scanning and total station surveying, ensuring an accurate digital representation of the structure. These data were imported into ABAQUS software, where the dome was modeled using tetrahedral mesh elements generated via HyperMesh. Detailed material properties were assigned based on technical standards and on-site sampling of historical materials. Notably, the research isolated various structural components, including the main dome, minarets, and the concrete ring, allowing for both segmented and integrated simulations. Modal analysis and frequency response assessments confirmed the structural independence of some auxiliary sections, like the tomb chamber, which were excluded from the final structural model. The simulations involved gravitational and seismic load applications, enabling a comparative evaluation of stress distribution, strain accumulation, and overall deformation. The

resulting models yielded stress contour plots, frequency shifts, and nodal displacement data that were crucial in interpreting the impact of past conservation actions on the dome's performance.

The findings from the finite element analysis indicated that the dome, in its original design, exhibits high stability under gravitational loads. The geometry of the dome distributes dead load forces through meridional and hoop compressive stresses, which are well accommodated by the brickwork and internal shell structure. This efficiency is reinforced by the presence of peripheral minarets, which help stabilize the load transfer system and minimize eccentricity. However, the simulations also revealed that the insertion of the concrete ring had minimal to no impact on improving the dome's gravitational load-bearing performance. On the contrary, under seismic loading conditions, the concrete ring introduced localized stiffness discontinuities that led to stress concentrations, particularly around the base of the dome and at interface zones. These stress concentrations may act as initiation points for structural failure during dynamic events. Moreover, the presence of the ring disrupted the dome's natural vibration modes, hindering its ability to respond flexibly to seismic excitations. This misalignment between the traditional construction logic and modern interventions underscores the necessity for adopting conservation strategies that respect the original structural logic and material behavior of historic buildings.

The discussion of results within the framework of theoretical and historical studies confirms the multidimensional implications of conservation decisions. Drawing from Riegl's emphasis on the duality of tangible and intangible values (4), the research situates the structural assessment within a broader heritage value context. Tangible values refer to the physical integrity of the dome, which includes the geometry, materials, and construction techniques. Intangible values, on the other hand, encompass the cultural, religious, and symbolic meanings associated with the monument. The addition of the concrete ring, while physically inert under static loading, was found to compromise both categories of value. Structurally, it fails to provide the intended reinforcement under gravitational stress. Culturally, it undermines the authenticity of the original construction, violating principles of material compatibility and reversibility championed in the Venice Charter (3). From a theoretical standpoint, the dome exemplifies the principle of *niyāresh*, where structure and aesthetics are co-constitutive. The brick dome, with its turquoise tilework and structural arches, functions not just as a shelter but as a semiotic system communicating metaphysical ideals. Interventions such as the concrete ring introduce an alien material logic that disturbs this coherence. In comparison with similar domes like St. Peter's in the Vatican, studies emphasize the importance of respecting traditional load distribution systems and avoiding over-stiffening, which inhibits the dome's natural seismic performance (9).

The contribution of this study extends beyond a technical evaluation; it offers actionable insights for future conservation policy and practice. Firstly, the research underscores the importance of conducting detailed numerical modeling and FEM analysis before undertaking any structural interventions in heritage buildings. The insights gained through the ABAQUS simulations demonstrate that assumptions made without empirical analysis can lead to unintended consequences. Secondly, the study recommends prioritizing reversible and compatible materials in heritage conservation. Historical materials like wood or modern alternatives such as fiber-reinforced polymers (FRP), which possess greater ductility and thermal compatibility, could be considered in future conservation initiatives. Thirdly, the study suggests that conservation must be guided not solely by engineering expediency but by a holistic appreciation of architectural heritage, incorporating insights from history, art, material science, and structural engineering. These recommendations align with the UNESCO and ICOMOS frameworks, which advocate for minimal intervention and maximum respect for original materials and structural logic. The use of concrete in the mid-20th century reflects a now outdated paradigm that prioritized immediate physical preservation over long-term cultural integrity. This research calls for a paradigmatic shift toward multidisciplinary conservation strategies that balance engineering requirements with cultural and historical sensibilities.

In conclusion, this study validates the hypothesis that the Soltaniyeh Dome, through its original geometric design and material configuration, possesses high structural resilience under static loads. The addition of the concrete ring, despite its intended role in reinforcement, does not contribute positively to gravitational load resistance and introduces risks under seismic conditions. These findings are significant not only for the Soltaniyeh Dome but also for the broader field of heritage conservation. They illustrate the need for structural compatibility, historical sensitivity, and empirical rigor in preservation efforts. Future research could expand on this study by incorporating real-time monitoring technologies to assess dynamic responses and by exploring bio-compatible materials for restoration. Ultimately, the study reaffirms the importance of *niyāresh* as both a structural and cultural principle, offering a model for integrated conservation that honors the legacy of historical architecture while ensuring its resilience for generations to come.

References

1. UNESCO. Soltaniyeh Dome: World Heritage Site. 2004.
2. Blair S, Bloom J. The Art and Architecture of Islam 1250–1800. New Haven: Yale University Press; 1995.
3. ICOMOS. International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites (Venice Charter). 2007.
4. Riegl A. The Modern Cult of Monuments: Its Character and Its Origin. Los Angeles: Getty Publications; 1996.
5. Fielden BM, Jokilehto J. Conservation of Historic Buildings. Oxford: Elsevier; 2003.
6. Hejazi F. Structural Behavior Analysis in Traditional Iranian Architecture. Tehran: Scientific and Research Publishing; 2009.
7. Kalantari H. Numerical Modeling of the Soltaniyeh Dome Using the Finite Element Method. Journal of Architectural Research. 2017;8(2):75-90.
8. San Paolzi J. Restoration of the Soltaniyeh Dome: Structural Intervention Analysis. Journal of Cultural Heritage Conservation. 1971.
9. Casparini C. Structural Behavior of St. Peter's Dome: Analysis and Historical Context. Journal of Architectural Heritage. 2015;9(2):123-40.
10. Neville AM. Properties of Concrete. Harlow: Pearson Education; 2011.
11. Hendry AW. Structural Masonry. London: Palgrave Macmillan; 1998.