

# ارزیابی وضع موجود بقعه تاریخی شیخ شهاب الدین اهری و مشخصه های اصلی طرح مقاوم سازی

عادل فردوسی

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز، ایران

ferdousi@iaut.ac.ir

## چکیده

بقعه شیخ شهاب الدین اهری در شهر اهر استان آذربایجان شرقی واقع می‌باشد. این مجموعه شامل خانقاه، مسجد، ایوانی، مناره‌ها و غرفه‌های متعدد دارای ویژگی‌های خاص معماری می‌باشد و در سال ۱۳۱۱ ه. ش به شماره ۱۷۹ در فهرست آثار ملی ایران به ثبت رسیده است. عمدتاً این ابنیه از مصالح بنایی (آجری، خشتی و سنگی) ساخته شده و در زلزله ۲۱ مرداد ۱۳۹۲ بخش‌هایی از این بقعه دچار آسیب شده است. در مطالعه حاضر سعی گردیده تا گزینه مناسب برای بازسازی بخش اصلی مقبره بررسی گردد. از آنجائیکه با تحلیل سازه توسط نرم افزارهای قوی امکان مطالعه پدیده‌های زیادی از رفتار آن وجود دارد و نیز نسبت به آزمایش هزینه و وقت کمتری طلب می‌کند، لذا از نرم افزار **Ansys** با قابلیت‌های بالا استفاده شده و نتایج تحلیلی مورد بررسی و تفسیر قرار می‌گیرد. در مجموع بارگذاری ثانویه گنبد و وجود ترک‌های متعدد، خطر آسیب جدی بخش‌های مهم بقعه را نشان داده و از اینرو گزینه مناسب مقاوم سازی مورد ارزیابی قرار گرفته است. علی‌رغم وجود محدودیت‌های زیاد برای اعمال کمترین تغییرات بصری و جایگزینی مصالح، نتایج تحلیلی طرح پیشنهادی مقاوم سازی بیانگر افزایش مشخصه‌های رفتاری بنا به میزان قابل توجه می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** بقعه تاریخی شیخ شهاب الدین اهری، روش اجزای محدود، نرم افزار Ansys، مقاوم سازی.

## Investigation into the current condition of the Sheikh Shahabuddin Ahari historical tomb and main characteristics of the retrofitting plan

Adel Ferdousi

Assistant professor, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

### ABSTRACT

The tomb of SheTheikh Shahabuddin Ahri is located in Ahar city of East Azerbaijan province. This monument includes a monastery, a mosque, a high porch, minarets and numerous pavilions. The old building has special architectural features and was registered in the list of national monuments of Iran in 1952. This type of building is mainly made of building materials (brick, adobe and stone) and parts of this tomb were damaged in the earthquake of August 12, 2013. In the present study, an attempt has been made to consider an appropriate choice for the retrofitting of the main part of the tomb. Since with structural analysis by powerful software, it is possible to study many phenomena of its behavior and also requires less time and cost than testing, so Ansys finite element software is used with high capabilities and analytical results are evaluated and interpreted. In general, the secondary loading of the dome and the presence of multiple cracks indicate the risk of serious damage to important parts of the tomb, and therefore the proper selection of retrofitting has been evaluated. Despite the many limitations for applying the least visual changes and material replacement, the analytical results of the proposed retrofitting scheme indicate a significant increase in behavioral characteristics.

### KEYWORDS

Historical tomb of Sheikh Shahabuddin Ahri, Finite Element Method, Ansys Software, Retrofitting.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۸

تاریخ آخرین اصلاحات: ۱۴۰۰/۱۲/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۲۰

۱- مقدمه

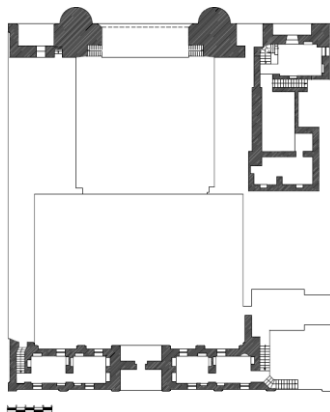
عمیق موجود در بخش‌های مختلف، بار اضافه شده ناشی از گنبد ثانویه روی گنبد اولیه می باشد که جرم زیادی در تراز فوقانی وارد نموده و مخصوصاً در بارگذاری لرزه ای احتمال آسیب و خرابی را به شدت بالا برده است.

۲- بررسی وضع موجود بنا

بی شک جهت ارائه طرح مناسب مقاوم سازی هر بنا نیاز به بررسی دلایل و میزان آسیب‌های موجود و ارائه راهکار مقابله با آنها است. در طول عمر بنا مرمت‌های متعددی انجام گرفته است که شامل مرمت‌های موضعی و ظاهری و نیز مرمت‌های اساسی می‌شود. یکی از این موارد مرمت گنبد اصلی و نیم گنبد پشت ایوان اصلی با استفاده از آجرچینی می‌باشد که در شکل (۳) نشان داده شده است. متأسفانه این مرمت که بیشتر برای ایجاد نمای ظاهری بهتر صورت گرفته باعث افزایش وزن پوشش به میزان بیش از ۹۰ تن شده که نه تنها تهدیدی جدی برای استقامت بنا حین زلزله می‌باشد، بلکه در حالت بارگذاری عادی و استاتیکی نیز سازه را به مخاطره انداخته و یکی از دلایل اصلی ترک خوردگی‌های متعدد مخصوصاً دیوارهای باربر قلمداد می‌شود. فضای بزرگی که زیر گنبد دو پوش قرار گرفته مقطعی مربعی شکل دارد که ارتفاع آن ۱۸ متر است. در طرفین خانقاه اتاق‌هایی و به قرینه هم ساخته شده‌اند. در زلزله ۲۱ مرداد ۱۳۹۲ بخش‌هایی از این بقعه دچار آسیب شده است [۱ و ۳ و ۵ و ۶].



شکل (۱): نقشه ساختمان بقعه شیخ شهاب [۱].



شکل (۲): نقشه طبقه دوم بقعه شیخ شهاب [۱].

بقعه شیخ شهاب‌الدین اهری در شهر اهر در استان آذربایجان شرقی، محل خانقاه و مقبره شیخ شهاب‌الدین اهری می‌باشد. ساخت بنای شیخ شهاب را به دوران حیاط خود شیخ شهاب نسبت می‌دهند که در این مکان خانقاهی ترتیب داده و به تربیت علما و تدریس علوم فقهی پرداخته است. شیخ شهاب‌الدین در قرن ۶ ه. می‌زیسته است که در قرن ۷ ه. وفات یافته است. بنای اصلی بقعه به شکلی که امروز مشاهده می‌شود از قبیل احداث مساجد، گنبد، ایوان، سردرب و ... مربوط به دوره صفویه است [۱]. قدمت این بقعه بر اساس برخی اظهار نظرها به عصر شاه عباس اول می‌رسد ولی با توجه به کیفیت ساخت بنا و توجه به پارامترهایی مانند بلندسازی ارتفاع بنا، تبدیل مقطع ۴ ضلعی به ۸ ضلعی به وسیله فیل گوش‌ها در نقطه شروع گنبد، گنبد دو پوش، حجاری‌های سنگی موجود در ورودی شرقی بقعه و نیز حصار سنگی موجود در صحن بقعه و توجه به تاریخ ولادت و وفات شیخ، تاریخ ساخت بقعه به دوره ایلخانی می‌رسد که در دوران حکومت سلسله صفوی الحاقات و تعمیراتی بر روی بقعه انجام گرفته است [۲]. بنای اصلی بقعه شیخ شهاب‌الدین تقریباً در وسط یک محوطه وسیع در جنوب اهر، انتهای خیابان شیخ شهاب‌الدین بر روی یک بلندی که مشرف به شهر است، قرار گرفته است. طول این محوطه تقریباً ۳۱۰ متر (شمالی جنوبی) و عرض آن ۲۸۰ متر (شرقی غربی) و در مجموع مساحت تقریبی آن نزدیک ۹ هکتار می‌باشد [۱]. در اشکال (۱) و (۲) نقشه ساختمان بقعه نشان داده شده است.

بررسی مرمت‌های صورت گرفته در بقعه شیخ عمداً در چهار دوره صفوی، قاجاریه و پهلوی و بعد از انقلاب صورت گرفته است. معماران صفوی با ارائه طرحی جامع، ضمن سامان‌دهی به محیط معماری مجموعه، ابنیه پراکنده قبلی را تحت نظام معماری واحد، نظم بخشیدند. در اوایل دوره قاجاریه و به خصوص در دوره حکمرانی عباس میرزا بر منطقه آذربایجان، به عمران بقعه شیخ شهاب‌الدین اهری توجه شد. هر چند تحولات کالبدی مجموعه در دوران قاجاریه چندان چشمگیر نیست و به خصوص آنکه در اواخر قاجار مجدداً مورد غفلت واقع شد. در دوران پهلوی نیز بیشتر مرمت مربوط به سال ۱۳۵۴ و کارهای جزئی و آجر چینی می باشد. مرمت‌های بعد از انقلاب نیز بیشتر مربوط به سالهای ۱۳۶۲ به بعد می شود که عمده آن شامل تعمیر لچکی‌های ریزش کرده طاق‌های نمای ضلع شرقی و جنوبی است [۱].

فضای بزرگی که زیر گنبد دو پوش قرار گرفته مقطعی مربعی شکل دارد که ارتفاع آن ۱۸ متر است. در طرفین خانقاه اتاق‌هایی و به قرینه هم ساخته شده‌اند. در زلزله ۲۱ مرداد ۱۳۹۲ بخش‌هایی از این بقعه دچار آسیب شده است. در مطالعه حاضر سعی گردیده تا وضع موجود بنای آسیب دیده مورد بررسی قرار گرفته و گزینه‌های مناسب برای بازسازی، ترمیم و مقاوم سازی بخش اصلی مقبره بعد از مقایسه و انتخاب گزینه با کمترین تغییرات در ظاهر بافت تاریخی بنا، مدل‌سازی و تحلیل شود. از دغدغه‌های اصلی وضع موجود بنا علاوه بر ترک‌های

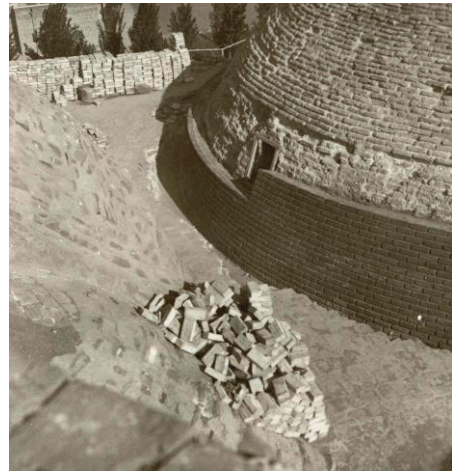
در این تحقیق سعی گردیده تا ارزیابی از وضعیت موجود بنای آسیب دیده صورت پذیرد و گزینه مناسب برای بازسازی بخش اصلی مقبره انتخاب و بررسی می‌شود. برای این منظور از مدلسازی و تحلیل به روش عناصر محدود توسط نرم افزار حرفه‌ای [7] ANSYS کمک گرفته شده است. واضح است که در انتخاب روشهای بهسازی و مقاوم سازی ساختمان های موجود پارامترهای متعددی چون هزینه، امکانات و تجهیزات در دسترس و ... دخالت دارند. در مورد بناهای تاریخی بعلت اهمیت حفظ عناصر بکار رفته در بنا هر چند هم سست باشند و نیز به حداقل رساندن تخریب حین اجرا، محدودیت های زیادی در انتخاب گزینه های بهسازی ایجاد می گردد. در تحقیقات متعدد مقاوم سازی بناهای تاریخی سعی شده است آسیب حداقل به نماهای داخلی و خارجی رسیده و حذف و جایگزینی مصالح سست به حداقل برسد [17~8].

### ۳- مدلسازی و تحلیل عناصر محدود بنای آجری مقبره

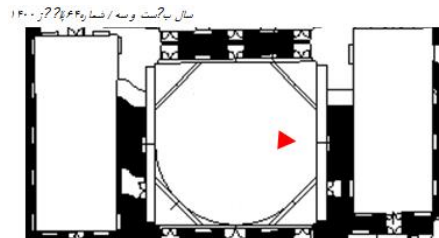
از آنجائیکه تحلیل سازه مد نظر تحت اثر بارگذاریهای استاتیکی و لرزه‌ای توسط نرم‌افزار عناصر محدود نسبت به انجام آزمایشات هزینه و وقت کمتری طلب کرده، در عین حال امکان مطالعه در پدیده‌های زیادی از رفتار کل سازه وجود دارد، لذا با توجه به قابلیت‌های مدلسازی و تحلیل نرم افزار عناصر محدود ANSYS و دقت قابل قبول نتایج، در این بخش به بررسی نتایج حاصل از تحلیل سازه موجود پرداخته شده است. شایان ذکر است در منابع معتبر کارائی بالای نرم افزار ANSYS در مدلسازی سازه‌های آجری به کرات اثبات شده است [18~22]. می‌دانیم در روش عناصر جسم مورد نظر به قطعات یا عناصری تقسیم شده که در نقاط گرهی بهم متصل بوده و با اعمال شرایط مرزی و نیروئی، ماتریس سختی کل سازه حاصل می‌شود و با حل معادلات حاکم به مجهولات مسئله پی برد. مزیت این روش دسترسی به مجهولات بیشتر از جمله چگونگی گسترش تنشها و تغییر شکل‌ها می‌باشد. این امر به ما این امکان را می‌دهد که دید مناسبی از رفتار سازه در شرایط و گام‌های مختلف بارگذاری داشته باشیم. بی شک نرم‌افزار عناصر محدود مورد استفاده باید دارای قابلیت‌های اعمال تغییرشکلهای بزرگ، رفتار غیر الاستیک مصالح و ترک و شکست در مصالح باشد. نرم افزارهای عناصر محدود متعددی چون ABAQUS، ANSYS و LUSAS می‌توانند جوابگوی مسئله ما باشند که در این تحقیق از نرم افزار ANSYS (نسخه 14) برای مدلسازی و تحلیل سازه مورد نظر استفاده شده است.

از المان سه بعدی ایزوپارامتریک SOLID65 برای مدل کردن مصالح آجری بنای مورد مطالعه استفاده شده است. لازم به توضیح است که این المان برای مدلسازی مصالح تردی چون بتن، سنگ و آجر که دارای رفتار متفاوت فشاری و کششی می‌باشند، مناسب است. این المان توسط یک شش وجهی، هشت گرهی با سه درجه آزادی انتقالی گرهی تعریف می‌شود. مصالح اعمالی با قابلیت ترک در تنشهای کششی و شکست یا خردشدگی در تنشهای فشاری در سه جهت متعامد و نیز تغییر شکلهای پلاستیک و خزش می‌باشد. امکان تقویت مصالح در هر

عوامل متعددی باعث ترک خوردگی دیوارها و اجزای چنین بناهایی می‌شود که از آن جمله می‌توان نشست‌های نامتوازن، توزیع بار غیر یکنواخت، عوامل طبیعی چون زلزله و ... را نام برد که در بنای اصلی بقعه بارگذاری مجدد ناشی از آجر چینی ثانویه گنبد باعث تشدید آن شده است. میزان و گستردگی انواع ترکهای سطحی و عمیق بنا زیاد بوده و در شکل (۴) یک ترک عمده قائم روی دیوار حمال گنبد که از هر دو وجه نمای داخلی و خارجی به وضوح قابل رویت است نشان داده شده است. البته فرسایش و ذوب و یخبندان‌های متوالی نیز باعث تخریب مصالح دیوارهای نزدیک به سطح زمین شده است که در دوره‌های مختلف بخشی از آن اصلاح گردیده است [۱ و ۴و ۶].



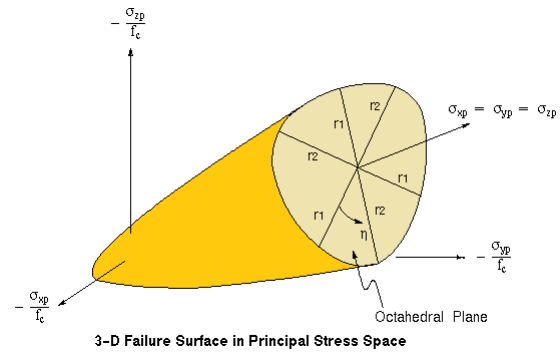
شکل (۳): آجر چینی گنبد اصلی در مرحله اجرا [۱].



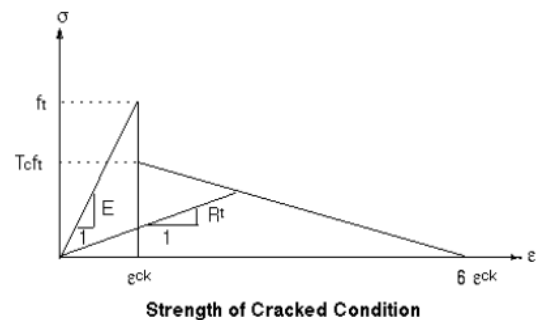
شکل (۴): ترک عمده دیوار باربر گنبد [۱].

ترک در نقاط انتگرال گیری المان SOLID65 بصورت اصلاح در رابطه تنش- کرنش با در نظر گیری ضعف مصالح در امتداد عمود بر سطح ترک در جهت کشش و کاهش در مقاومت برشی با اعمال ضرائب  $\beta_1$  (برای زمانیکه ترک باز است) و  $\beta_2$  (در حالتیکه ترک بسته است) در امتداد موازی ترک، می باشد. اهمیت ضرائب کاهشدهنده برشی برای مقاطع مرکب مورد بحث، بخصوص در بارگذاری لرزه ای زیاد است. جهت افزایش همگرایی محاسبات، نرم افزار امکان تعدیل در کاهش سختی را با اعمال ضریب  $R_t$  فراهم آورده و ایجاد ترک را در کرنشی برابر  $5 \epsilon^{ck}$  بسط می دهد (شکل ۶). و نیز به کاربر این امکان داده می شود که بجای سختی مماسی<sup>۱</sup>، راه حل را به مدول کج<sup>۲</sup> تغییر دهد تا روش حل دستگاه معادلات تعادل به روش کاهش انطباقی<sup>۳</sup> انجام گیرد.

برای سازه بنایی مقبره بر مبنای نتایج آزمایشگاهی دو مدل رفتاری معادل شامل مصالح فونداسیون و بدنه (رفتار معادل مصالح آجر و ملات) در نظر گرفته شده است. همچنین در موقعیت های مشخصی ترک هایی بر مبنای برداشت های محلی مدلسازی گردیده است. جدول (۱) مشخصات مصالح بکار رفته در مدلسازی بر اساس آزمایشات ژئوتکنیک سایت ارائه شده است. لازم به توضیح است که طبق نتایج گزارش مطالعات ژئوتکنیک، مقاومت فشاری دیوار شامل دو جزء آجر و ملات با اطمینان کافی برابر  $15 \text{ kgf/cm}^2$  اعلام شده است. با اینحال به دلیل مشکلات کرگیری دیوار که به دلیل سستی مصالح همواره توام با ترک فراوان بود و نیز حساسیت در تعداد کم نمونه برداری برای آسیب رسانی کمتر، جهت ارزیابی دقیقتر و نیز صحت سنجی مدلسازی عددی عناصر محدود مطابق شکل (۷) بخشی مکعبی از دیوار با اعمال مشخصات موجود برای مصالح آجر و ملات مدلسازی و تحلیل گردید. بطوریکه از نمودار تنش-کرنش و نیز توسعه ترک خوردگی تحت بارگذاری فشاری افزایشدهنده به دیوار مشاهده می شود، اعمال مقاومت فشاری معادل مصالح برابر با  $15 \text{ kgf/cm}^2$  قابل قبول



شکل (۵): سطح گسیختگی در فضای تنشهای اصلی المان SOLID65.

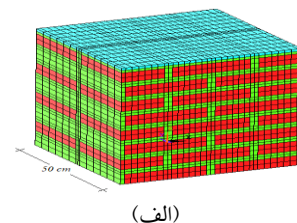
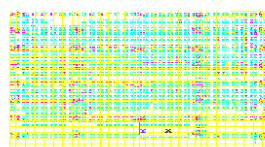
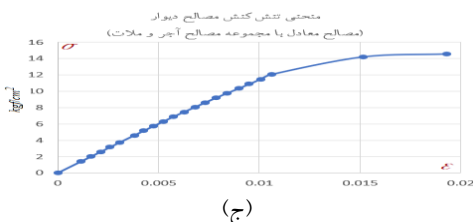


شکل (۶): مدل رفتاری مصالح در حالت ترک خورده.

سه امتداد با فولاد یا الیاف پلیمری و یا سایر مواد توسط کاربر میسر می باشد. شکل (۵) نشان دهنده سطح گسیختگی در فضای سه بعدی تنش های اصلی می باشد. از این شکل دیده می شود، اگر هر دو تنش اصلی  $\sigma_{yp}$ ،  $\sigma_{yt}$  منفی باشند (تحت فشار) و  $\sigma_{zp}$  دارای مقدار مثبت کوچکی باشد، پیش بینی می شود، ترک در امتداد عمود بر محور  $\sigma_{zp}$  ایجاد شود. هر چند، اگر  $\sigma_{zp}$  صفر یا دارای مقدار منفی کوچکی باشد، فرض می شود خرابی مصالح در اثر له شدگی (Crushing) باشد. حضور

جدول (۱): مشخصات مصالح بکار رفته در مدلسازی بنای مقبره.

چگالی	ضریب پواسون	مدول ارتجاعی	مقاومت کششی $f_t$	مقاومت فشاری $f_c$
$2100 \text{ kg/m}^3$	۰/۱۹۵	$1.05e^7 \text{ kgf/cm}^2$	$4.2 \text{ kgf/cm}^2$	$35 \text{ kgf/cm}^2$
$1650 \text{ kg/m}^3$	۰/۱۸۵	$9.0 \text{ kgf/cm}^2$	$3.2 \text{ kgf/cm}^2$	$15 \text{ kgf/cm}^2$



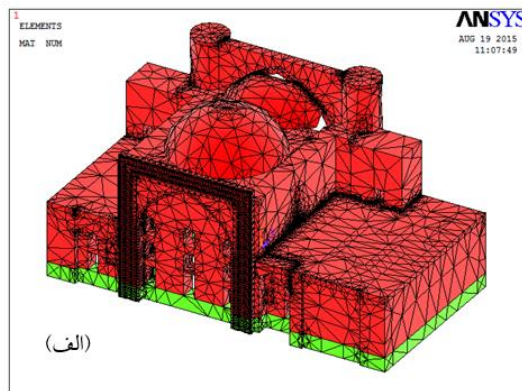
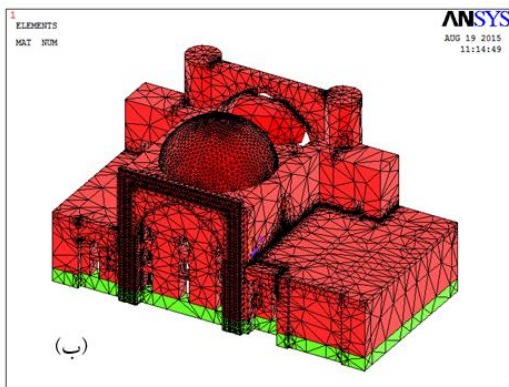
- 1 Tangent Stiffness
- 2 Secant Modulus
- 3 Adaptive Descent method



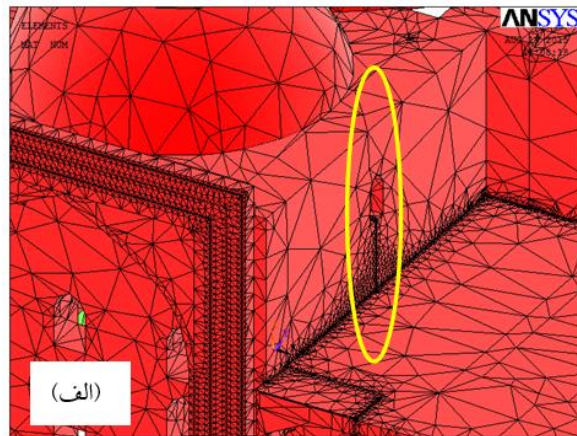
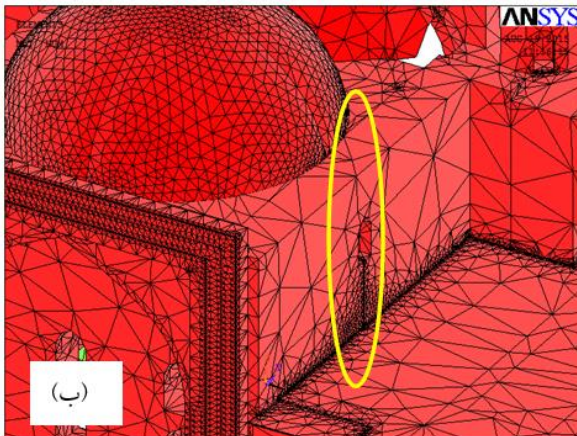
۴- بررسی نتایج تحلیل بنای موجود مقبره

تحلیل استاتیکی برای حالت ترکیب بارهای مرده وزن خود سازه و بار زنده برف معادل  $150 \text{ kg/m}^2$  در نظر گرفته شده است. هر چند که طبق ضوابط طراحی آئین‌نامه‌های موجود کشور لازم است بارهای مرده و زنده اعمالی با ضرایب افزایشده ترکیب گردند ولی در ارزیابی استقامت سازه در حالت بارگذاری عادی این ضرایب در نظر گرفته نشده است تا میزان تنش‌های موجود در بدنه بنا ارزیابی و حاشیه ایمنی موجود سازه تعیین گردد. در شکل (۸) نمایی از مدل تحلیلی برای دو حالت بدون

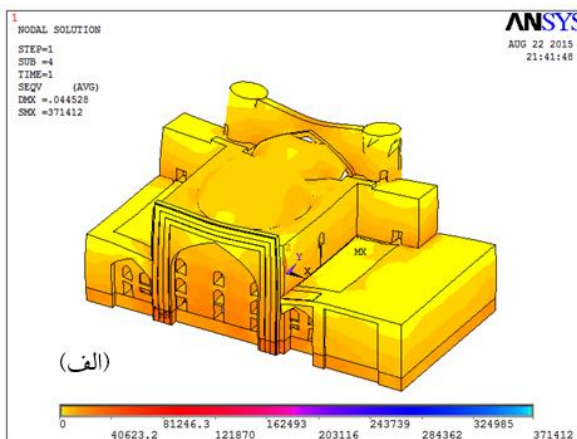
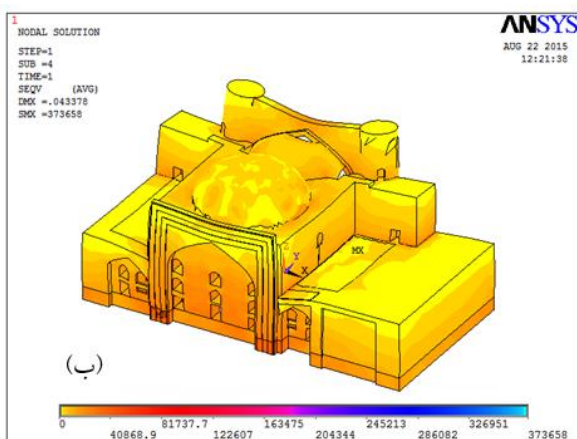
بوده و با نتایج گزارش ژئوتکنیک با تعداد آزمایشات محدود همخوانی دارد. البته این مقدار مقاومت محافظه کارانه بوده و بخش‌هایی که کمتر تحت اثر رطوبت و عواملی چون ذوب و یخ بندان‌های متوالی قرار گرفته اند دارای مقاومت مصالح حدوداً ۱۰ تا ۲۰ درصد بیشتر می‌باشند. در این مدلسازی مقاومت های فشاری و کششی آجرهای خشتی کم پخت به ابعاد  $5 \times 25 \times 25 \text{ cm}^2$  طبق نتایج گزارش شده به ترتیب  $22 \text{ kgf/cm}^2$  و  $4/8 \text{ kgf/cm}^2$  و برای ملات نیز مقاومت های با ۲۰ درصد کاهش نسبت به آجر انتخاب شده است.



شکل (۸): مدل تحلیلی بنای مقبره شیخ شهاب در حالات -الف- بدون گنبد ثانویه و -ب- با گنبد ثانویه.



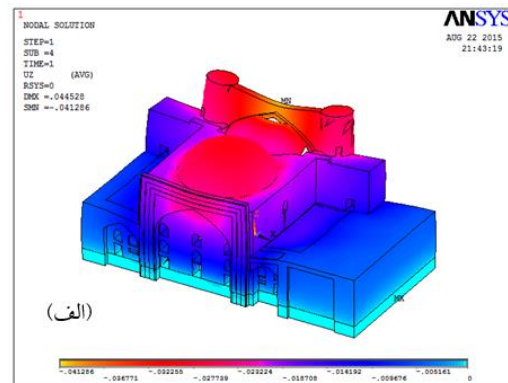
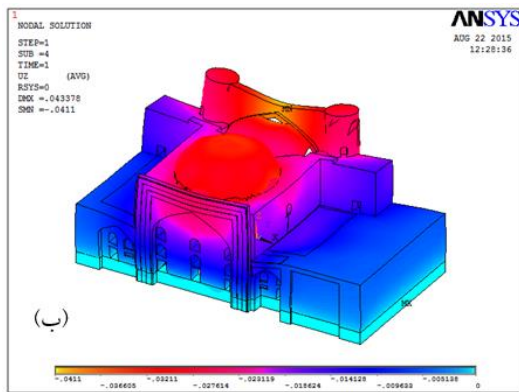
شکل (۹) موقعیت ترک عمده بدنه بنا برای حالات -الف- بدون گنبد ثانویه و -ب- با گنبد ثانویه.



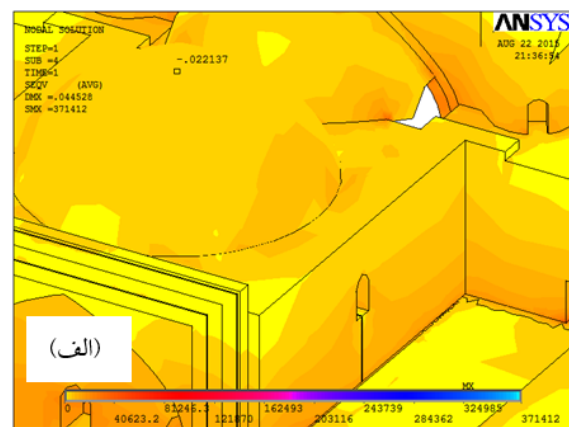
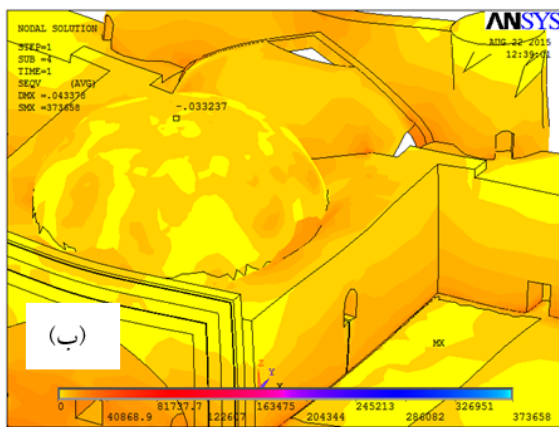
شکل (۱۰): کانتور تنش‌های ون مایسز برای حالات -الف- بدون گنبد ثانویه و -ب- با گنبد ثانویه ( $\text{kgf/m}^2$ ).

تنش‌ها تا حدی افزایش می‌یابد که ترک‌هایی در آن ظاهر می‌شود. در مطالعه پایایی بقعه شیخ شهاب‌الدین اهری، تاثیر قابل توجه حذف وزن ناشی از گنبد ثانویه بر عملکرد تحت بارهای ثقلی مورد توجه قرار گرفت. به منظور بررسی‌های تکمیلی سازه بقعه، نیاز به انجام تحلیل‌های تکمیلی همچون تحلیل استاتیکی غیرخطی افزایشده (Pushover) و تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی اجتناب ناپذیر است. همچنین پس از بررسی‌های مختلف و انتخاب گزینه‌های مختلف تقویت، در نهایت طرحی برای تقویت انتخاب و مورد ارزیابی قرار گرفته

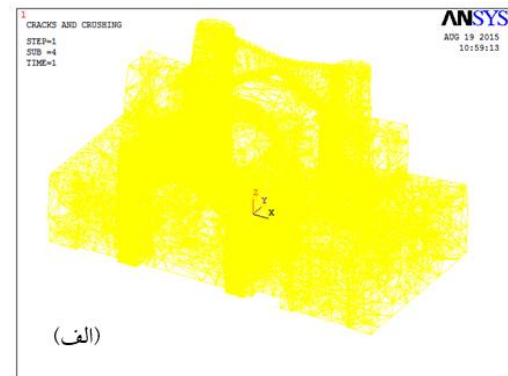
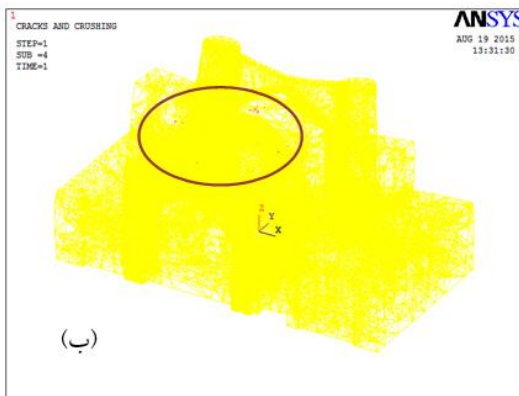
گنبد ثانویه (الف) و با گنبد ثانویه (ب) و نیز در شکل (۹) موقعیت ترک عمده موجود در بدنه بنا تحت بارگذاری استاتیکی مرده و زنده برف ارائه شده است. در اشکال (۱۰) تا (۱۲) کانتورهای تنش و جابجائی موجود بدنه در انتهای بارگذاری استاتیکی برای دو حالت مقایسه‌ای با و بدون گنبد ثانویه ارائه شده است. به منظور وضوح بیشتر تغییر شکل سازه از مقیاس افزایشده ۱۰۰ در این اشکال استفاده شده است. در شکل (۱۳) نیز مشاهده می‌شود حتی در حالت بارگذاری استاتیکی تحت بارهای بدون ضریب، در موقعیت‌هایی از بدنه بنای موجود با گنبد ثانویه



شکل (۱۱): کانتور جابجائی Uz برای حالات الف- بدون گنبد ثانویه و ب- با گنبد ثانویه (m).



شکل (۱۲): مقدار جابجائی Uz تاج گنبد برای حالات الف- بدون گنبد ثانویه و ب- با گنبد ثانویه (m).



شکل (۱۳): نمائی از موقعیت ترک خوردگی بنا در حالات الف- بدون گنبد ثانویه و ب- با گنبد ثانویه.



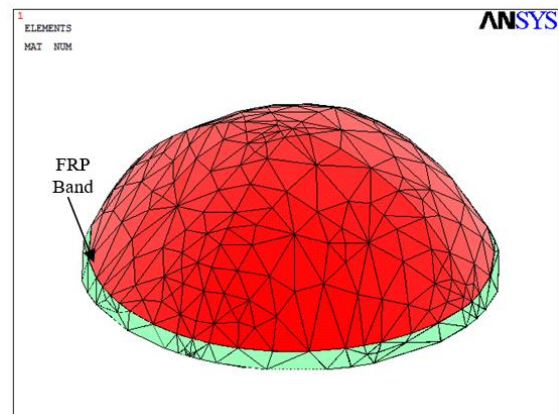
متعددی به دلیل عواملی چون بروز زمین لرزه وجود دارد که علاوه بر ترمیم آنها، از دو لایه الیاف تقویتی (FRP) به همراه چسب اپوکسی استفاده شده است. عرض نوار تقویتی در بخش تحتانی گنبد نیم متر در نظر گرفته شده است. این نوع تقویت علاوه بر استحکام بخشی گنبد مانع از رانش و بازشدگی ترکهای ریز تحت بارگذاریهای ثقلی و بخصوص زمین لرزه خواهد شد. از المان Shell181 با ضخامت کلی ۱cm جهت مدلسازی الیاف تقویتی گنبد استفاده شده است. هر چند انواع مختلف الیاف فیبری با مشخصات مختلف موجود می‌باشد، از مصالح معادل الیاف با چسب اپوکسی با مقاومت کششی امتداد الیاف ۱۱۰۰MPa و مدول الاستیسیته ۱۱۰GPa در مدلسازی استفاده شده است. در شکل (۱۵) نیز طرح تقویت بخش اصلی بقعه بصورت قاب فولادی با کابل‌های کششی ارائه شده است. در شکل (۱۶- الف و ب) مقاطع اجزای قائم و افقی متصل به سازه اصلی نشان داده شده است. نحوه ساخت چنین مقاطعی بصورت اجرای جوش منقطع ورق‌های فولادی با ضخامت حداقل ۱cm امکان پذیر است. المانهای بکار رفته در مقاطع پروفیل‌های فولادی Solid185 و برای کابل‌های کششی Link180 می‌باشد. نوع فولاد مورد استفاده در مدلسازی نیز ST37 در نظر گرفته شده است. هرچند جهت اتصال قاب فولادی به سازه آجری گزینه‌های متعددی همچون بستن درجات آزادی گره‌های مجاور (Merge or Coupling) یا برقراری تماس (Contact) می‌توانست مورد استفاده قرار گیرد ولی برای افزایش دقت و مدلسازی نزدیک به واقعیت از عناصر مشابه بولت با مقطع میلگرد نمره ۲۰ مطابق شکل (۱۷) بهره گرفته شده است. در اجرا توصیه می‌شود میزان نفوذ بولتها در سازه آجری حداقل ۵۰cm در نظر گرفته شده و پس از سوراخکاری و تزریق چسب یا ملات مخصوص درگیری لازم تامین گردد. واضح است که با استفاده از اجزای بادبندی یا کلاف‌های بتن آرمه افقی و قائم میتوان بر پایایی و استحکام سازه مخصوصاً در مقابله با زمین لرزه افزود، ولی محدودیت‌های معماری و ضوابط میراث فرهنگی مانع از آن شده است.

در شکل (۱۷) تاثیر اجزای مقاوم سازی شامل نوار FRP بکار رفته در گنبد و قاب فولادی بر کاهش نشست یا جابجایی قائم تاج گنبد نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در حالت واقعی بعد از بروز نشست‌های آبی و دراز مدت سازه، طرح مقاوم سازی اجرا خواهد شد و لذا نتایج شکل (۱۷) صرفاً جهت مقایسه ارائه شده است. برای تعیین ظرفیت باربری جانبی سازه، کلیه گره‌های تراز بام بخش اصلی مقبره در جهات X و Y به هم کوپل شده و جابجایی افزایش یافته‌ای در جهت X اعمال شده است. در شکل (۱۸)، ترک خوردگی سازه در جابجایی نهائی ۳۰cm برای مشخص کردن میزان تاثیر مقاوم‌سازی بر کاهش آسیب سازه ارائه شده است. مشخص است که چون مقاوم سازی صرفاً محدود به بخش اصلی مقبره و گنبد آن شده است لذا ترک‌خوردگی در اینجه مجاور زیاد بوده و چندان تحت تاثیر قرار نگرفته است ولی در سازه اصلی مطابق شکل (۱۹) شاهد افزایش

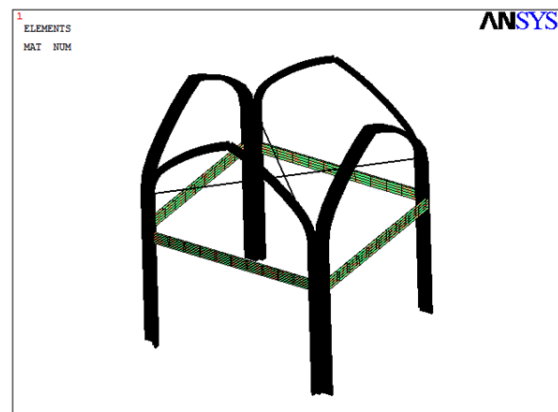
است. بدیهی است که به لحاظ قدمت بقعه، در انتخاب طرح تقویت سازه محدودیت‌های زیاد عدم تغییر عمده در نمای فضاهای داخلی و خارجی و نیز تخریب و بهسازی در بخش‌های مختلف وجود داشته و لذا تقویت کلی از جنبه سازه‌ای میسر نبوده و یا از منظر متخصصین مرمت و معماری و کارشناسان سازمان میراث فرهنگی رویکرد مناسبی نمی‌باشد.

## ۵- جزئیات و مشخصات عناصر مقاوم سازی

بطوریکه ذکر گردید محدودیت‌های معماری مانع از مقاوم سازی کلی و اصولی سازه شده است. همچنین مقاوم سازی صرفاً محدود به سازه اصلی بقعه و گنبد فوقانی آن شده و دربرگیرنده فضاهای مسقف اطراف و مناره‌ها نشده است. لازم به توضیح است که در مدل تحلیلی مقاوم سازی شده، فرض بر اصلاح و مرمت ترک‌های موجود در بقعه به روشی مناسب بوده است. پیشتر تاثیر ترک قائم موجود در دیواره بقعه مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۱۴) تقویت بکار رفته بخش گنبد نشان داده شده است. شایان ذکر است که با وجود حذف گنبد ثانویه، در گنبد اولیه ترک‌هایی



شکل (۱۴): طرح تقویت گنبد با دو لایه نوار FRP به عرض نیم متر در قسمت تحتانی.



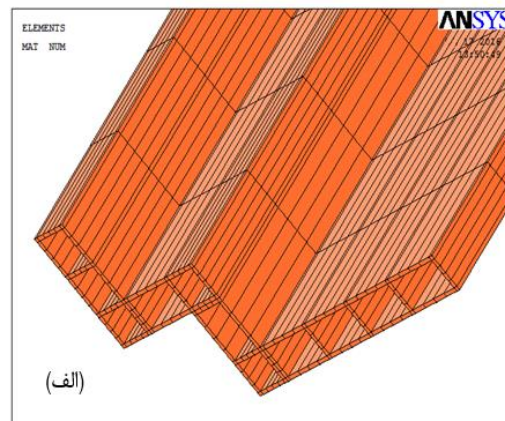
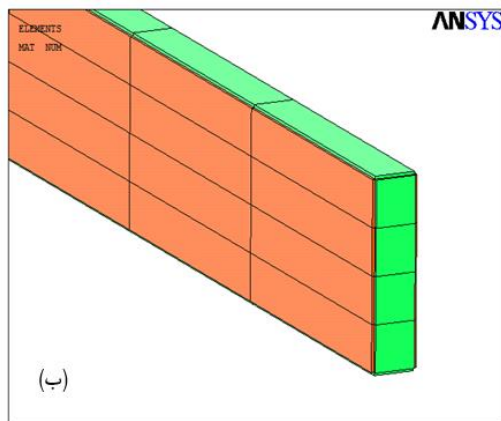
شکل (۱۵): نمائی از قاب فولادی تقویتی به همراه کابل‌های پس‌کشیده.

با مشخص و فعال نمودن صرفاً درجات آزادی بنای اصلی در آنالیز مدال، پیروید اصلی بنا با وجود گنبد ثانویه حدود  $0/315$  ثانیه حاصل گردید که پس از مقاوم سازی پیروید به حدود  $0/284$  ثانیه کاهش یافته است. این مقادیر در حالت بنای بدون گنبد ثانویه و برای حالات بدون و با مقاوم سازی به ترتیب  $0/302$  و  $0/271$  حاصل شده است.

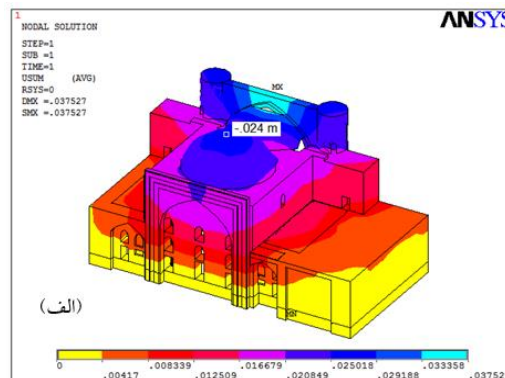
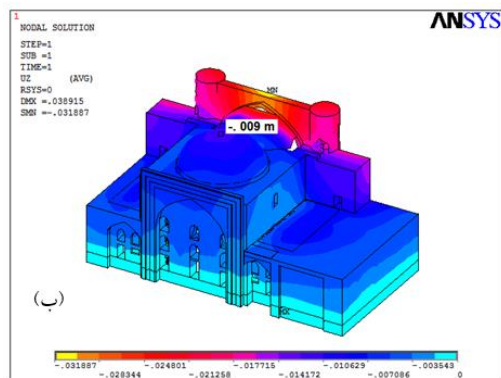
### ۶- نتیجه گیری

به دلیل محدودیت‌های پروژه از جنبه معماری و ضوابط میراث فرهنگی

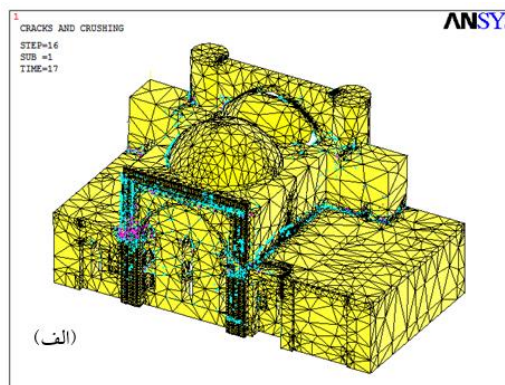
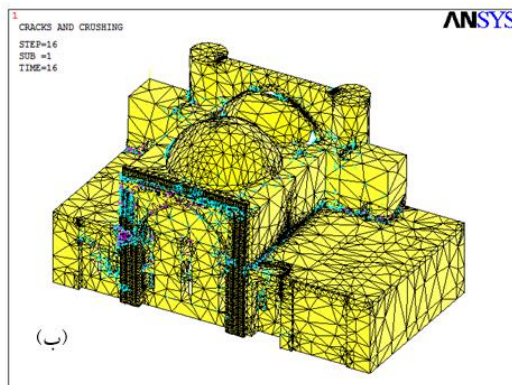
ظرفیت باربری، سختی جانبی و شکل پذیری سازه هستیم. شایان ذکر است با جستجوی منابع مختلف به ندرت می‌توان سازه‌ای با مشخصات بنای مورد مطالعه و با نوع مقاوم سازی اعمالی جهت مقایسه یافت. البته در خصوص نوع مقاوم سازی بنا، تاکید زیادی از طرف میراث فرهنگی استان آذربایجان شرقی برای ایجاد کمترین تغییرات بصری داخلی و خارجی وجود داشت که مانع از بهره‌گیری گزینه‌های دیگر مثلاً بکارگیری قاب مهارتی خارجی می‌شد. لازم به توضیح است که تحت آنالیز مدال، مدهای نخست بخش‌های نرم‌تر تحریک شده و مدهای سازه اصلی در مرتبه‌های بالاتر قرار می‌گرفت. برای این منظور



شکل (۱۶): مقاطع بکار رفته برای قاب فولادی بصورت ورق‌های با جوش منفصل. الف) مقطع اجزای قائم و ب) مقطع اجزای افقی.



شکل (۱۷): مقایسه کانتور جابجایی‌ها و نشست تاج گنبد سازه تحت بارگذاری ثقلی در حالات الف) - بدون مقاوم سازی سازه و ب) بعد از اعمال طرح مقاوم سازی.



شکل (۱۸): مقایسه میزان شکست و ترک خوردگی تحت بارگذاری جانبی افزاینده در حالات الف) - بدون مقاوم سازی سازه و ب) بعد از اعمال طرح مقاوم سازی.



4. Consulting engineers of Baghshahr Bana, (2003), Ahar detailed plan (In Persian).

5. Kiani, Mostafa (2004), Architecture of the First Pahlavi Period Transformation of Ideas, Origin and Formation of Architecture (In Persian).

6. Kashefi, Rahim, (1342), Biography and proud life of Sheikh Shahabuddin Mahmoud Ahri, manuscript version of the master's thesis (In Persian).

7. ANSYS User's Manual, Revision 14.0, Swanson Analysis System Inc., Houston.

8. Kazaz, I., Akansel, V. and Gülkan, P. "A Unique Example for Earthquake Resistance in Historic Structures: The Free-Standing Minaret of the Sheyh Mutahhar Mosque in Diyarbakir" Proceedings, International Symposium on Strengthening Historic Structures vol. II, 15-17 October 2009, Diyarbakir, Turkey.

9. Ahmed M. R. Khalil, Naglaa Y. Hammouda and Khaled F. El-Deeb. "Implementing Sustainability in Retrofitting Heritage Buildings. Case Study: Villa Antoniadis, Alexandria, Egypt" Department of Architecture, Faculty of Fine Arts, University of Alexandria, Egypt. Heritage 2018, 1, pp. 57-87

10. P. Gülkan, S. T. Wasti "Seismic Assessment and Rehabilitation of Historic Structures" 2009. Tech Science Press SL, vol.1, no.2, pp.111-134.

11. Kanika Bansal. "Structural retrofitting in historic buildings – the case of Hearst Greek theatre, California" International Journal of Engineering & Technology, 2018. 7 (1.4) 1-7.

12. "Retrofitting Historic Buildings for Sustainability" Retrofitting Guide, Westminster City Council, Built Environment, January 2013.

13. Antonio Formisano, Michele D'Amato "Seismic Analysis and Retrofitting of Historical Buildings" 2020, , *Frontiers in Built Environment Journal*, Vol. 6, Article 96.

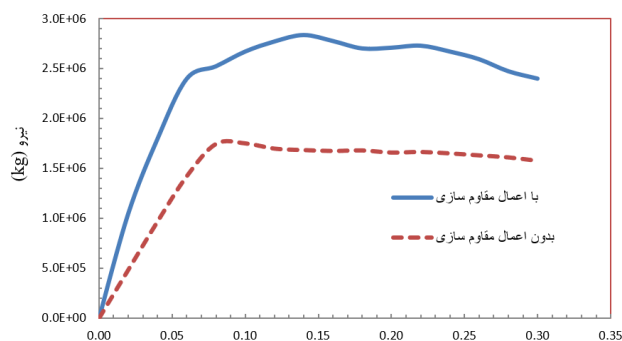
14. Jelena Milosevic, Rita Bento, Serena Cattari. "Seismic Behavior of Lisbon Mixed Masonry-RC Buildings With Historical Value: A Contribution for the Practical Assessment" 2018, *Frontiers in Built Environment Journal*, Vol 4, Article 43.

15. Andrea Miano, Giovanni Chiumiento, Angelo Saggese. "Structural Assessment and Upgrading for an Old Building Belonging to an Historical Multi-Sports Center in Naples" 2019, *Frontiers in Built Environment Journal*, Vol. 5, Article 23.

16. Simon Petrovčič, Vojko Kilar "Design Considerations for Retrofitting of Historic Masonry Structures with Externally Bonded FRP Systems" *International Journal of Architectural Heritage*, <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1853278>, 2020.

17. Dušan Tomanović, Ljubo Marković, Nebojša Gadžić, Irena Rajković, Julija Aleksić and Tijana Tomanović "Seismic Evaluation and Methods of Rehabilitation of Old Masonry Buildings in the Bay of Kotor (Montenegro)" *Appl. Sci.* 2021, 11, 3544. <https://doi.org/10.3390/app11083544>, 2021.

18. Michele Betti, Luciano Galano, "Seismic Analysis of Historic Masonry Buildings: The Vicarious Palace in Pescia (Italy)" *Buildings* 2012, 2, 63-82; doi:10.3390/buildings 2020063.



شکل (۱۹): مقایسه نمودارهای بار - جابجائی با اعمال جابجائی افزایشنده در تراز بام سازه اصلی (تراز کف گنبد).

و نیز بودجه اختصاص یافته به طرح، علی رغم وجود گزینه‌های مقاوم سازی اصولی ناگزیر از ارائه طرحی ساده و کاربردی با المان‌های کم حجم سازه‌ای به منظور ممانعت از آسیب بیشتر بقعه مخصوصاً در زلزله‌های آتی مد نظر بوده است. واضح است که با استفاده از اجزای بادبندی یا کلاف‌های بتن آرمه افقی و قائم میتوان بر پایایی و استحکام بقعه مخصوصاً در مقابله با زمین لرزه افزود، ولی ممانعت از بروز هر گونه آسیبی فراتر از انتظار طراحی می‌باشد. با استفاده از طرح پیشنهادی مقاوم سازی شاهد افزایش حدود ۴۵ درصدی مقاومت تسلیم و ۶۲ درصدی مقاومت نهائی، افزایش ۶۵ درصدی در سختی اولیه و ۶۰ درصدی در جذب انرژی تحت بارگذاری جانبی افزایشنده در تراز بام هستیم. همچنین رفتار پس از تسلیم سازه مقاوم سازی شده، سخت شونده می‌باشد در حالی که سازه موجود دارای رفتار نرم شونده است. لازم به توضیح است که نتایج مشابهی تحت تحریک دینامیکی زلزله مقیاس شده السنترو حاصل شده است.

## ۷- قدردانی

جا دارد از همکاری آقایان دکتر احد نژاد ابراهیمی و دکتر یاسر شهبازی از اساتید محترم دانشگاه هنر اسلامی تبریز بابت ارائه اطلاعات و راهنمایی‌های ارزنده مربوط به مطالعه موردی بقعه شیخ شهاب الدین اهری کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

## ۸- مراجع

- Ahad Nejad Ebrahimi et al., (2014) " Study and recognition of the tomb and monastery of Sheikh Shahabuddin Ahri - with a comprehensive renovation approach to rehabilitation" Research project belonging to the cultural heritage of East Azerbaijan province (In Persian).
- Ebrahimi, Mohammad Reza., 2011, Restoration project of the tomb of Sheikh Shahabuddin Ahar, Master Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran (In Persian).
- Pour Javad Asl, Baqer., 2011, Contemporary design of Aqmasjed Ahar Square, M.Sc. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran (In Persian).

19. Panel O.A.Kamal, G.A.Hamdy, T.S.El-Salakawy, "Nonlinear analysis of historic and contemporary vaulted masonry assemblages" HBRC Journal. Volume 10, Issue 3, December 2014, Pages 235-246
20. Alemdar BAYRAKTAR, Emin HÖKELEKLİ, Temel TÜRKER, İsmet ÇALIK, Ashraf ASHOUR, Ayman MOSALLAM. "Window Opening Effects on Structural Behavior of Historical Masonry Fatih Mosque" *International Journal of Architectural Heritage*. 2018, pp. 1-15.
21. Arjun Prasad, Kumar Pallav ,Deepak K. Singh, "Seismic Behaviour of 17<sup>th</sup> Century Khusro Tomb due to Site-Specific Ground Motion" *The Open Civil Engineering Journal*, 2019, Volume 13, pp. 26-41.
22. Ambareesh Kumar\*, Kumar Pallav " Static and dynamic analysis of unreinforced masonry wall using finite element modeling in senate hall building" The 2018 Structures Congress (Structures18) Songdo Convensia, Incheon, Korea, August 27 - 31, 2018.