Journal of Structural and Construction Engineering, 8(9), 2021, pp. 337-352

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Structural Analysis and Vulnerability on Historical Structures; An Experience for Preventive Conservation in Small Tower of Semiran

Shadi Eslami [1], Reza Rahimnia [2]*, Milad Khanjari Miane [3]

1- *M.A in Conservation and Rehabilitation of Architectural and Urban Heritage, Faculty of Architectural and Urban Development, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran*
2- *Assistant Professor, Conservation of Architectural Heritage Department, Faculty of Architectural and Urban Development, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran*
3- *M.s in Earthquake Engineering, Faculty of Technical and Engineering, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran*

ABSTRACT

In historical structures, Vulnerability and probable behavior of structures against stresses are very effective in Restoration action. For this reason, a correct diagnosis will be necessary for the correct conservation action. Attention to valuable aspects as well as accuracy in using non-destructive tests for detection in historic buildings is considered an essential issue. With this need, this paper introduces the experience of using software analysis along with field surveys in the Samiran Small Tower (Borj-e Koochak Semiran) as a Method approach for Vulnerability and structural behavior analysis. The study tries to answer the question, "Given the field study and software analysis, what are the proposed preventive conservation actions for the small Samiran Tower to reduce damage?" General approach in this study is descriptive-analytical and the data collection method is shaped by library, field, and experimental studies. The analysis process has also been carried out by software with field surveys. After field investigations and determination of required parameters, and Material properties, the analysis was performed with Ansys 2018 software. Finally, according to the results of the analysis, proposed conservation action by creating a protective belt for the upper part and general actions for the other cases are presented.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

ARTICLE INFO

Receive Date: 10 April 2020
Revise Date: 07 November 2020
Accept Date: 23 November 2020

Keywords:
Preventive Conservation
Structural Behaviour
Seismic Analysis
Vulnerability
Samiran Small Tower (Borj-e Koochak Semiran)

doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.213776.2116

*Corresponding author: Reza Rahimnia
Email address: Rahimnia@arc.ikiu.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

تحلیل رفتار سازه و تشخیص آسیب‌پذیری در ساختارهای تاریخی؛ تجربه‌ای برای اقدامات پیشگیرانه در برج کوچک سمیران

شادی اسلامی[۱]، رضا رحیم نیا[۲*]، میلاد خنجری میانه[۳]

۱- کارشناس ارشد مرمت و احیاء ابنیه و بافت‌های تاریخی (میراث معماری)، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

۲- استادیار گروه مرمت و احیاء بناهای تاریخی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

۳- کارشناس ارشد مهندسی عمران (زلزله)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

چکیده

*در ساختارهای تاریخی، تشخیص آسیب‌پذیری و بررسی سلامت و رفتار احتمالی سازه در برابر تنش‌های وارده می‌تواند تغییرات متفاوتی را در نتیجه نهایی اقدام مرمتی موجب شود. به همین دلیل یک تشخیص صحیح برای اقدام صحیح ضروری خواهد بود. در بناهای تاریخی توجه به وجه‌های ارزشمند و همچنین دقت در استفاده از آزمون‌های غیر مخرب برای این تشخیص یک مسئله مهم تلقی می‌شود. با این ضرورت این مطالعه در تلاش است با ارائه یک تجربه در بهره‌گیری از تحلیل‌های نرم‌افزاری به همراه بررسی‌های میدانی در برج کوچک سمیران، آن را به‌عنوان یک روش برخورد برای تشخیص آسیب‌پذیری و تحلیل رفتار سازه معرفی کند. بررسی انجام شده تلاش دارد به این سؤال پاسخ دهد که "با توجه به بررسی‌های میدانی و تحلیل‌های نرم‌افزاری، اقدامات پیشگیرانه پیشنهادی برای برج کوچک سمیران - در جهت تقلیل میزان آسیب‌پذیری - چه هستند؟" رویکرد کلی در این مطالعه توصیفی تحلیلی است و شیوه گردآوری داده‌ها با مطالعات کتابخانه‌ای، میدانی و تجربی-آزمایشگاهی شکل گرفته است. همچنین فرآیند تحلیل نیز به‌وسیله نرم‌افزار و همچنین بررسی‌های تکمیلی میدانی انجام گرفته است. در بررسی‌های میدانی از مصالح بنا برای مطالعات آزمایشگاهی نمونه‌برداری شد و بررسی‌های مرتبط با ساختار نیز مورد توجه قرار گرفت. در مجموع پس از بررسی‌های میدانی و مشخص شدن پارامترهای موردنیاز، تحلیل‌ها با نرم‌افزار **Ansys 2018** انجام و نتایج حاصل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد علاوه بر مشکلات پی که قبلاً کنترل شده، ترک‌های موجود و علی‌الخصوص بخش بالایی سازه برج آسیب‌پذیر خواهد بود. در نهایت پیشنهاد اقدام پیشگیرانه با ایجاد کمربند حفاظتی برای بخش بالایی و اقدامات پیشگیرانه کلی برای سایر قسمت‌ها ارائه شده است.*

کلمات کلیدی: اقدامات پیشگیرانه، تحلیل رفتار سازه،تحلیل لرزه‌ای، آسیب‌پذیری، برج کوچک سمیران.

سابقه مقاله:					
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	شناسه دیجیتال:
۱۳۹۹/۰۱/۲۲	۱۳۹۹/۰۸/۱۷	۱۳۹۹/۰۹/۰۳	۱۳۹۹/۰۹/۰۳	۱۴۰۰/۰۱/۳۰	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.213776.2116
					doi: 10.22065/jsce.2020.213776.2116

***نویسنده مسئول:** رضا رحیم نیا

پست الکترونیکی: Rahimnia@arc.ikiu.ac.ir

۱- مقدمه

در مطالعات مرتبط با کالبد و ساختارهای معماری و از نظر مهندسی سازه، ارزیابی رفتار و علی‌الخصوص شناسایی عکس‌العمل‌های سازه در برابر نیروها و تنش‌های وارده به آن به‌عنوان روشی در جهت اطلاع از ویژگی‌های ساختارها موضوعی قابل توجه است. در نهایت این تجزیه وتحلیل‌ها برای نتیجه‌گیری در مورد اقدامات اصلاحی و برنامه‌ریزی در جهت جلوگیری از آسیب‌پذیری بیشتر سازه‌ها قابل کاربرد خواهند بود. این فرآیند تشخیص و تجزیه‌وتحلیل وقتی در سازه‌های بنایی مدنظر باشند فرآیندی بسیار پیچیده‌تر نیز خواهد داشت و معمولاً همواره تحلیل‌ها در سازه‌های بنایی با مسائل و مشکلات متفاوتی روبرو است. اضافه بر این در بین سازه‌های بنایی وقتی موضوع بحث ساختارهای ارزشمند تاریخی باشد که جنبه میراثی دارند، مسائل و چالش‌های پیش‌رو بیشتر و اساسی‌تر خواهند شد. عدم آسیب‌پذیری کالبد اصلی ارزشمند و مراقبت از آن و همچنین انجام فرآیند تشخیص آسیب‌پذیری دو جنبه خاص بوده، اگرچه مشکلات تجزیه‌وتحلیل سازه‌های تاریخی نیز موضوعی قابل توجه است [1].

علاوه بر این در ساختارهای تاریخی با توجه به توصیه‌نامه و منشورهای موجود، بخشی از دغدغه متوجه عدم آسیب‌پذیری به ساختار اصلی آثار در حین فرآیند تجزیه وتحلیل است. به طوری که اولویت‌های بررسی و تجزیه‌وتحلیل متمرکز بر آزمون‌های غیرمخرب خواهند بود که روش‌های تحلیل نرم‌افزاری گزینه‌های مناسبی برای آن هستند. به‌عنوان ضرورت در توصیه‌نامه بم [2] و بیانیه لیما [3] برای استحکام‌بخشی سازه‌های تاریخی در مناطق زلزله‌خیز، حفاظتگران ملزم به بررسی زلزله‌های پیشین در محدوده اثر و همچنین ارزیابی رفتار سازه در مقابل زلزله هستند، به‌طوری‌که با تحلیل سازه و ارزیابی رفتار لرزه‌ای آن، می‌توان عملکرد بنا در مقابل زلزله را پیش‌بینی کرده و نسبت به آسیب‌هایی که بنا متحمل می‌شود اقدامات پیشگیرانه را در قالب مرمت و استحکام‌بخشی مورد توجه قرار داد. در واقع این امر به نوعی از آسیب‌های جبران‌ناپذیر آینده جلوگیری کرده و می‌تواند به افزایش طول عمر بنا کمک کند. باید در نظر داشت که در تجزیه‌وتحلیل، همواره سعی بر آن است که با بهره از روش‌های متفاوت، نتایج به آنچه در واقعیت اتفاق می‌افتد نزدیک‌تر شوند.

در کل تحلیل رفتار در سازه‌های بنایی را می‌توان در قالب دو روش کلی دسته‌بندی کرد. تحلیل‌های کامپیوتری و تحلیل‌های آزمایشی. تحلیل‌های کامپیوتری با روش‌های مختلف صورت می‌گیرد که مرسوم‌ترین آن‌ها مدل‌سازی بنا در نرم‌افزار و معرفی مشخصات مکانیکی مصالح و مشخصات زلزله به نرم‌افزار مرتبط و در نهایت تجزیه‌وتحلیل بنا است. روش دیگر برخورد تحلیل‌های آزمایشی است که ساخت بنا در مقیاس کوچک‌تر و یا ساخت جزئی از بنا و اعمال زلزله بر روی بنا توسط میز لرزان و با سایر دستگاه‌های مشابه انجام می‌گیرد؛ در نهایت نیز نتایج حاصل از آن‌ها بررسی و مورد تحلیل قرار می‌گیرند. البته، در بعضی از تحلیل‌های کامپیوتری برای اطمینان از درستی نتایج به‌دست‌آمده از ترکیب روش آزمایشی و کامپیوتری و تحلیل و مقایسه آن‌ها نیز استفاده می‌شود. کاملاً مبرهن است که روش برخورد دوم (استفاده از میز لرزان) برای ساختارهای تاریخی کاربرد نخواهد داشت. چراکه ساخت مجدد اثر معماری تاریخی و اعمال دقیق جزییات بکار رفته در آن و یا انتقال آن بر روی میز زلزله عملاً غیر ممکن است. از این رو موضوع بحث اصلی در این مقاله متمرکز بر روش اول (تجزیه‌وتحلیل نرم‌افزاری) و در کنار آن بررسی‌های محیطی اثر معماری بوده است.

البته باید در نظر داشت که مشکلات ناشی از مدل‌سازی سازه‌های تاریخی هنوز هم به‌رغم پیشرفت‌های قابل‌توجهی که در دهه‌های گذشته انجام گرفته، بسیار چالش‌برانگیز و همچنان یادآور مسائلی هستند که پیشگامان با آن مواجه بودند. ولی به هر حال محاسبه و تحلیل به‌عنوان یک رکن اساسی از مطالعه یک بنا تلقی می‌شود. به علت تمام این مشکلات اگرچه ایکوموس (Icomos/Iscarsah Committee) پذیرفته است که مطالعه سازه‌های تاریخی تنها بر اساس این محاسبات کارساز نیست و باید فعالیت‌های تکمیلی متعددی مانند: تحقیقات دقیق تاریخی، بازرسی‌های عمیق با استفاده از تکنیک‌های غیرمخرب (NDT) و پایش را شامل شود [4] ؛ ولی به هر حال این تشخیص‌های آسیب‌پذیری الگوهای اولیه‌ای از نقاط آسیب‌پذیر را ارائه خواهند کرد که برای اقدامات پیشگیرانه قابل اتکا هستند.

در این بررسی، اثر تاریخی معماری که به‌عنوان نمونه موردی انتخاب شده، برج کوچک سمیران است. این برج تاریخی در منطقه طارم در محدوده استان قزوین قرار گرفته است. علاوه بر اینکه این اثر به‌واسطه رخدادهای طبیعی دچار آسیب شده ولی اقدام مرمتی خاصی برای آن صورت نگرفته است. در نهایت مدل‌سازی این بنا و سپس تحلیل نرم‌افزاری در کنار بررسی‌های میدانی ملاک تجزیه‌وتحلیل

رفتار سازه و تشخیص آسیب‌پذیری قرار گرفته است. با این مقدمه آنچه در قالب این مقاله فراهم آمده در جهت پاسخگویی به این دغدغه تلاش کرده است به سؤالات زیر پاسخ دهد:

- نقاط شاخص آسیب‌پذیر در برج کوچک سمیران چه بخش‌هایی هستند؟
- محل‌های نیازمند اقدامات پیشگیرانه با توجه به تحلیل‌های انجام شده چه بخش‌هایی است؟
- با توجه به تحلیل‌های خطی، غیر خطی و دینامیکی، رفتار سازه در برج کوچک سمیران چگونه است؟

۲- پیشینه پژوهش

پیشگام استفاده از روش‌های تجزیه‌وتحلیل ساختاری سازه‌های تاریخی با استفاده از روش‌های کامپیوتری در مطالعات گنبد برونلسکی (Brunelleschi Dome) چیارجی و همکارانش بودند [5]. تجزیه تحلیل کلسئوم (Colosseom) در رم توسط کروچی و ویسکوویک [6]، کلیسای مکزیک (Mexico Cathedral) توسط ملی و سانچز- رامیرز [7] و باسیلیکای سان مارکو (San Marco's Basilica) در ونیز توسط مولا و ویتالیانی [8] از دیگر تلاش‌ها در این زمینه هستند. در ابتدا تحلیل‌گران سعی در استفاده از روش‌های کامپیوتری و برنامه‌های پیشرفته تجزیه‌وتحلیل سازه‌های فلزی و بتنی در مطالعه ساختار سازه‌های تاریخی داشتند که با چالش‌های جدی مواجه شدند، متأسفانه روش‌های موجود (کلاسیک) توانایی مدل‌سازی سازه‌های تاریخی را با در نظر گرفتن مصالح، ترکیبات ساختاری و شرایط حفظ واقعی آن‌ها نداشتند. به همین دلیل علی‌الخصوص در سازه‌های بنایی و تاریخی پژوهش‌های کمتری با موضوع تحلیل رفتار و تشخیص آسیب‌پذیری سازه‌ها وجود دارد.

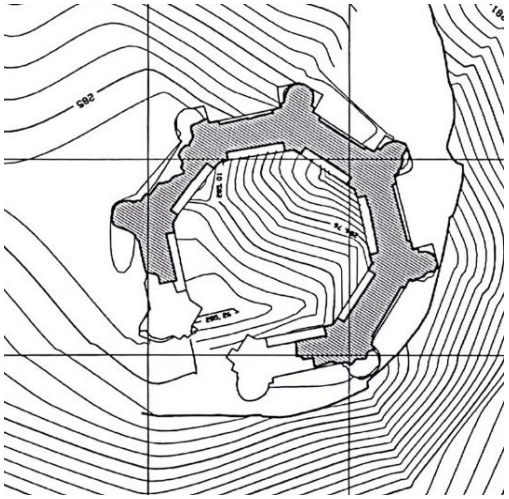
منابع و نمونه‌های موجود در این زمینه نشانگر این است که مطالعات مربوط به تجزیه‌وتحلیل کامپیوتری سازه‌های تاریخی در دو دسته "مطالعات مقایسه‌ای" و "مطالعات غیر مقایسه‌ای" قابل تفکیک هستند. همچنین حجم و تنوع مطالعات مقایسه‌ای به دلیل نتایج بهتر و نزدیک‌تر به واقعیت بیشتر از مطالعات نوع دوم است. *مطالعات و پژوهش‌های مقایسه‌ای* در حالات و روش‌های مختلف مانند مطالعه یک یا چند بنای تاریخی با چند نرم‌افزار مختلف، مطالعه چند بنای تاریخی با یک نرم‌افزار، مطالعه یک بنای تاریخی با روش‌های مختلف تحلیل سازه تاریخی و مطالعه یک بنای تاریخی با یک نرم‌افزار در حالت‌های مختلف بنا از لحاظ ایستایی و تقویت‌شده و مواردی از این دست قابل دسته‌بندی هستند. مطالعات مقایسه‌ای دو رویکرد کلی دارند:

رویکرد اول مقایسه نرم‌افزارها و روش‌های تحلیل مختلف بر روی یک بنای تاریخی یکسان [9, 10, 11] چندین بنای تاریخی [12, 13,14] و یا در جهت معرفی یک نرم‌افزار خاص [15, 16] انجام شده که در تلاش هستند تا بهترین روش و نرم‌افزار را با استفاده از آزمایش‌های متعدد بر روی گروهی از بناهای تاریخی شناسایی کنند. این مطالعات به دلیل اینکه توسط نرم‌افزارهای مختلف و با شیوه‌های گوناگون بررسی می‌شوند دقت بیشتری نسبت به سایر روش‌های تحلیلی دارند. به نظر هدف اغلب این مطالعات معرفی قابلیت‌ها و نقاط قوت و ضعف نرم‌افزارهای تحلیل رفتار سازه هستند. در مجموع نتایج حاصل از این مطالعات نشانگر این است که تاکنون روش کاملاً مطمئن و منطبق بر واقعیت برای تحلیل شناسایی نشده و برای دستیابی به نتایج نزدیک به واقعیت، بایستی از تحلیل‌های عددی و تجربی نیز در کنار تحلیل‌های نرم‌افزاری بهره گرفت.

رویکرد دوم مقایسه بنا یا بناهای تاریخی در حالات مختلف از ایستایی و میزان آسیب‌پذیری و رفتار سازه‌ای آن‌هاست که با موضوع این پژوهش نیز قرابت‌هایی دارد. هدف از این مطالعات اینکه یا میزان آسیب‌پذیری بنای تاریخی را تحت شرایط متفاوت بررسی می‌کنند و یا با مقایسه نرم‌افزارهای مرتبط و انواع روش‌های تحلیل در این حوزه تلاش می‌کنند بهترین نرم‌افزار و روش تحلیل را شناسایی و معرفی کنند. مطالعات مرتبط در این حوزه به روش‌های گوناگون مدنظر قرار گرفته‌اند. بررسی نتایج تحلیل چند بنای مشابه به هم از لحاظ ساختاری و حتی با یک نرم‌افزار خاص [17، 18]، مطالعه بنای تاریخی با آسیب‌های موجود و بدون آن آسیب‌ها و مقایسه هر دو حالت [19, 20]، بررسی بنای تاریخی در دو حالت اولیه و در حالت تقویت‌شده و مقایسه آن‌ها با یکدیگر [21, 22, 23, 24] و بررسی بنای تاریخی در نرم‌افزار و مقایسه نتایج آن با نتایج حاصل از نمونه ساخته‌شده و آزماش شده با میز لرزان [25, 26] سعی دارند مقاومت بنا یا بناهای تاریخی را در حالات مختلف بررسی کنند و با توجه به نتایج حاصل‌شده پیشنهاد مناسبی برای مقاوم‌سازی یا استحکام‌بخشی بنا ارائه کنند.

در این مطالعات چون رویکرد مقایسه‌ای وجود دارد می‌توان رفتارهای سازه را در حالت‌های مختلف و تغییرات آن‌ها ارزیابی کرد و در نتیجه میزان اثرگذاری و تغییر رفتار سازه را مدنظر داشت.

مطالعات غیر مقایسه‌ای به دلیل اینکه یک بنای تاریخی را با یک نرم‌افزار بدون در نظر گرفتن حالت‌ها یا روش‌های مختلف تحلیل کرده و سپس نتیجه‌گیری می‌کند، دقت کمتری نسبت به مطالعات مقایسه‌ای دارند و نمی‌توان به نتایج این نوع تحلیل اعتماد زیادی کرد. به علت دقت پایین نتایج در این شیوه، منابع بسیار کمی از آن موجود است. به‌عنوان نمونه عباسی و همکاران [27] گنبد دوازده امام یزد و رهگذر و مقدس [28] گنبد سبز مشهد را با این نگاه تحلیل کرده و راه‌حلی برای بهبود مقاومت بنا ارائه می‌کنند. مشکل عمده‌ای که در این روش برخورد وجود دارد اینکه مطمئناً تمام پارامترهای تأثیرگذار در نتایج تحلیل به‌طور دقیق در نرم‌افزار قرار نخواهند گرفت و از این رو نتایج خروجی نهایی نیز کامل و دقیق نیستند. بر خلاف این در رویکردهای مقایسه‌ای با توجه به اینکه تطبیق بین نتایج (بین دو نرم‌افزار، بین دو روش تحلیل و یا بین دو حالت ساختار) شکل گرفته می‌توان بحث و تحلیل‌های مستندتری را مدنظر قرار داد. البته باید در نظر داشت که نتایج حاصل از مطالعات غیر مقایسه‌ای وقتی با چند روش تحلیل متفاوت همراه شوند اطمینان بالاتری خواهند داشت و علی‌الخصوص در ساختارهای تاریخی برای در نظر گرفتن اقدامات پیشگیرانه می‌توانند مورد توجه باشند. در ساختارهای تاریخی، موضوع پایش و بررسی سلامت سازه در جهت ارزیابی خسارت‌های احتمالی موضوعی قابل توجه است، همان‌گونه که مطالعاتی در این زمینه وجود دارد [29]. در نتیجه حتی اگر نتایج خیلی دقیق نباشند، ولی برای اقدامات پیشگیرانه می‌توانند یک الگوی پیشنهادی اولیه باشند. در تحلیل ساختارهای تاریخی این نگاه کمتر مورد دقت قرار گرفته و این مطالعه این موضوع را مورد توجه قرار داده است.



شکل ۱ : پلان موجود از برج کوچک

۳- معرفی نمونه مطالعاتی (برج کوچک سمیران)

برج‌های تاریخی سمیران دو برج بازمانده از دوره سلجوقی در منطقه طارم سمیران (استان قزوین) هستند. آن‌گونه که ورجاوند [30] اشاره می‌کند دهستان طارم خود جزئی از یک منطقه وسیع است که میان قزوین و گیلان واقع شده و مجموع آن طارم خوانده می‌شود. حدود این منطقه که در شمال و شمال غربی قزوین واقع شده از شمال خط الراس جبال البرز، از شمال غربی بخش خلخال، از غرب بخش کاغذکنان، از جنوب و جنوب غربی بخش حومه زنجان، از شرق دهستان قاقازان است. در تقسیمات سیاسی امروز، منطقه طارم به دو قسمت تقسیم شده که بخشی از آن در استان قزوین قرار گرفته و بخش طارم سفلی نام دارد و بخش دیگر آن در استان زنجان قرار گرفته است که طارم علیا نامیده می‌شود. برج مورد مطالعه در این مقاله در بخش طارم سفلی به مرکزیت سیردان و روستای بهرام‌آباد قرار گرفته است.

شکل ۲ : وضعیت برج در حال حاضر

درباره عوامل استقرار و پیدایش هسته اولیه طارم، مطالعات فراوانی انجام شده که گواهی از حکومت دیلمیان در این منطقه دارد [34 ,33 ,32 ,31]. همچنین به گواهی متون تاریخی موجود [30، 35، 36] در دوره‌های مختلف نیز نشانه‌های فراوانی از آبادانی و گسترش منطقه وجود دارد. علاوه بر این گروه زیادی از محققین و سفرنامه‌نویسان نیز از این منطقه یاد کرده و در متون خود از آن نام برده‌اند [37]. محوطه تاریخی سمیران شامل بناهای متفاوتی است: قلعه سمیران، بنای چهارطاقی، سه بنای گنبدخانه‌ای، امامزاده قاسم، برج کوچک، برج بزرگ و مقابر موجود بناها و آثار شاخص موجود در این محوطه هستند. متأخرترین بنای

مجموعه امامزاده‌ای است که به نام امامزاده قاسم معروف است و قدمت آن متعلق به دوره صفوی است. همچنین برج‌های تاریخی سمیران (برج بزرگ و برج بزرگ) که یکی از آن‌ها موضوع این مطالعه است، از قدیمی‌ترین برج مقبره‌های اوایل دوران اسلامی هستند.

برج کوچک در شمال محوطه و بر روی تپه‌ای به ارتفاع حدود ۱۳ متر قرار گرفته است. مقبره مزبور از نوع مقابر هشت‌وجهی و دارای پلانی منتظم است. در حال حاضر طول هر ضلع بنا از داخل ۱/۹۰ متر و از خارج ۳/۲۰ و ارتفاع بنا بدون گنبد حدود ۶ متر است. برج دارای یک ورودی است که به‌طور کامل تخریب شده، همچنین دو ضلع شرقی و غربی نیز حدود ۷۰ درصد تخریب شده است. برخلاف برج بزرگ این بنا فاقد پنجره و پلکان است. همچنین به دلیل اینکه نسبت به برج بزرگ در دسترس‌تر بوده آسیب بیشتری دیده است و ورودی آن به‌طور کامل تخریب شده و در دیوارهای دیگر نیز شکست‌های جدی وجود دارند. ورجاوند [30] توصیف دقیقی از وضعیت برج را ارائه می‌دهد که در نوع خود قابل توجه است. از توضیحات و توصیفات رضایی کلج [38] در گزارش‌های باستان‌شناسی در این منطقه مشخص است که تا آن زمان اقدام مرمتی بر روی برج کوچک صورت نگرفته است. با توجه به گفتگوهای شفاهی، این برج تنها در سال ۱۳۹۰-۱۳۸۹ هجری شمسی آواربرداری، آجرهای آن بندکشی و بخشی از پی آن نیز زیرسازی شده است.

مکان قرارگیری و عدم دسترسی مناسب به این برج‌ها موجب شده کمتر مورد توجه جدی قرار گیرند. از همین رو آسیب‌های ناشی از زلزله بر روی سازه در حال حاضر نیز وجود دارد و اقدام استحفاظی خاصی علی‌الخصوص درباره برج کوچک صورت نگرفته است (شکل۲). این برج‌ها به دلیل قرارگیری در منطقه‌ای که از لحاظ زلزله آسیب‌پذیرند و همچنین به دلیل اینکه در سال‌های پیشین صدماتی به این دو برج وارد شده، به‌عنوان نمونه مطالعاتی در نظر گرفته شدند. لذا تصمیم گرفته شد پس از بررسی رفتار سازه و متناسب با نتایج حاصله رویکردهای کلی استحکام‌بخشی در جهت اقدامات پیشگیرانه پیشنهاد شود.

۴- روش اجرای پژوهش

این مطالعه با رویکرد پیشنهاد استحفاظی برای این برج مورد توجه قرار گرفته است. نگاه کلی در این مطالعه توصیفی تحلیلی است و شیوه گردآوری داده‌ها با مطالعات کتابخانه‌ای، میدانی و تجربی-آزمایشگاهی شکل گرفته است. همچنین فرآیند تحلیل نیز به‌وسیله نرم‌افزار و همچنین بررسی‌های تکمیلی میدانی انجام گرفته است. در ابتدا کلیه مستندات تاریخی و فنی و همچنین مطالعات و عکس‌های تاریخی مربوط به بنا شناسایی و بررسی شدند. سپس با بررسی میدانی در محل، اجزای ساختاری بنا بررسی و وضعیت آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفت و تلاش شد تا اطلاعات فنی دقیق و کامل آن‌ها برداشت شوند. یکی از موارد دیگر قابل توجه بررسی میدانی آسیب و فرآیند آسیب‌پذیری برج بوده است که مکمل مطالعات نرم‌افزاری و در تحلیل‌های آسیب‌پذیری مدنظر قرار گرفته‌اند. در بررسی‌های میدانی از مصالح بنا برای مطالعات آزمایشگاهی نمونه‌برداری شد و بررسی‌های مرتبط با آن مورد توجه قرار گرفت. در مجموع پس از بررسی‌های میدانی و مشخص شدن پارامترهای موردنیاز تحلیل‌ها در سه نوع استاتیکی خطی و غیر خطی و همچنین دینامیکی با نرم‌افزار Ansys 2018 انجام و نتایج حاصل مورد تحلیل قرار گرفت. آنچه در ادامه ارائه شده فرآیند دقیق روش‌شناسی پژوهش را مرور کرده است.

ردیف	نوع نمونه	کد اختصاری	آزمایش‌های مرتبط	ترکیبات شناسایی شده			
				SO3	CaO	SiO2	مجموع
۱	ملات بدنه برج	B1	XRF	٪۳۵	٪۲۴/۶۲	٪۱۳/۸۷	٪ ۷۳/۴۹
			XRD	Gypsum + Quartz			
۲	اندود نمای خارجی	B2	XRF	٪ ۳۸	٪ ۲۵/۰۴	٪ ۱۳/۱۵	٪ ۷۶/۱۹

۱-۴- مطالعـــــــــات	XRD	Gypsum + Quartz

آزمایشگاهی و تعیین مشخصات مصالح

یکی از پیش‌نیازهای تجزیه‌وتحلیل رفتار سازه، ارائه خصوصیات مکانیکی مصالح موردنیاز به نرم‌افزار است، برای ارائه این خصوصیات بایستی مصالح بنا به‌درستی شناسایی شود. در این مطالعه در جهت تشخیص دقیق و کامل مصالح، پس از نمونه‌برداری از بنا، آزمایش‌های شناسایی ترکیبات مربوطه (XRD و XRF) انجام گرفت. نمونه‌های برداشت شده از برج کوچک دو نمونه اندود و ملات برای بررسی ترکیبات آن‌ها و نمونه از سنگ برای دستیابی به خصوصیات مکانیکی آن‌ها بوده است. آزمایش‌های تشخیص ترکیبات در آزمایشگاه بیم گستر تابان انجام شد و نتایج حاصل از آن‌ها در نهایت در قالب جدول ۱ ارائه شده است [37]. این نتایج نشان می‌دهند علاوه بر سنگ که مصالح اصلی ساختار برج را تشکیل می‌دهد، ملات مورد استفاده ترکیبی از گچ و خاک است. علاوه بر این، مشخصات مکانیکی مصالح از پارامترهای مورد نیاز تحلیل است. مصالح اصلی در بخش‌های باقیمانده برج سنگ و با توجه به بررسی ترکیبات مصالح، ملات آن نیز ترکیب گچی دارد. با توجه به محدودیت‌های موجود در آزمایش مقاومت مصالح سنگی

جدول ۱ : نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی شناسایی ترکیبات مصالح، مأخذ: پژوهشگران

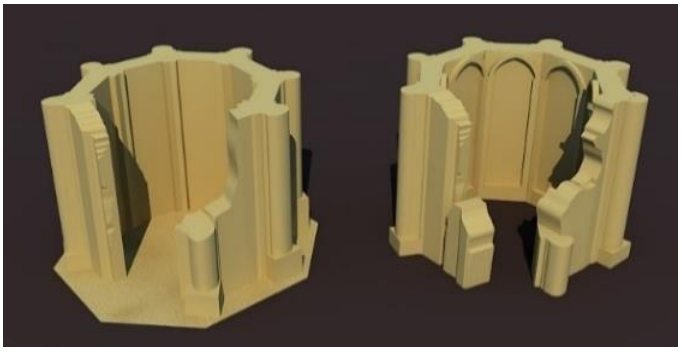
جدول ۲ : مشخصات مصالح جهت ورود به نرم افزار، مأخذ: پژوهشگران

برداشت شده از محل بنا، مشخصات مکانیکی مصالح با بررسی دقیق پژوهش‌های انجام شده تاکنون مورد توجه قرار گرفت. پیش از این باید در نظر داشت که مطالعات دیگری [18] نیز میانگین مقاومت مصالح را برای ورود به نرم‌افزار مدنظر قرار داده‌اند. در همین راستا با بررسی برخی از مطالعات انجام شده [39] تعیین [illegible] بررسی ۱۱ پژوهش انجام [illegible] به نرم‌افزار انتخاب شد [37]. لازم به ذکر است مصالح به‌صورت همگن در نظر گرفته شده‌اند و به همین دلیل سنگ به‌عنوان مصالح با مقاومت بالاتر ملاک تشخیص مشخصات مصالح بوده است.

پارامترهای موردنیاز	جرم حجمی	مدول الاستیسیته E	ضریب پواسون V	مقاومت کششی (ft)	مقاومت فشاری (fc)
میانگین پژوهش‌ها	2632 kg/m^3	6.9×10^9 (pa)	0.2	2.1×10^6 (pa)	26.5×10^6 (pa)

۲-۴- مدل‌سازی بنا

در پژوهش حاضر پس از اصلاح و به‌روزرسانی نقشه‌ها و ترسیمات فنی موجود از برج کوچک، مدل‌سازی سه‌بعدی با نرم-افزار Autocad نسخه ۲۰۱۳ انجام شد. این نرم‌افزار این امکان را فراهم می‌کرد که مدل ساخته شده در نرم‌افزار Ansys وارد شود. مدل‌سازی دقیق بنا مشکلاتی را در ورود به نرم‌افزار Ansys ایجاد کرد که در نهایت عملاً تحلیل ناممکن بود. از این رو بررسی‌های دقیق در مطالعات دیگر پژوهشگران [40, 13, 19, 41, 42] انجام گرفت و در نهایت مشخص شد در تمامی این موارد تا حد امکان سازه بنا ساده شده و تنها ساختار سازه‌ای اثر مورد توجه قرار گرفته است. در نتیجه عناصر غیرباربر و تزیینی از سازه حذف شده‌اند. برج کوچک به دلیل اینکه از نظر مکان جغرافیایی قابل دسترس‌تر بوده، به مرور زمان بیشتر آسیب دیده و در حال حاضر تزیینات کمتری دارد. در ساده‌سازی برج علاوه بر اینکه تزیینات محدود از سازه حذف شد



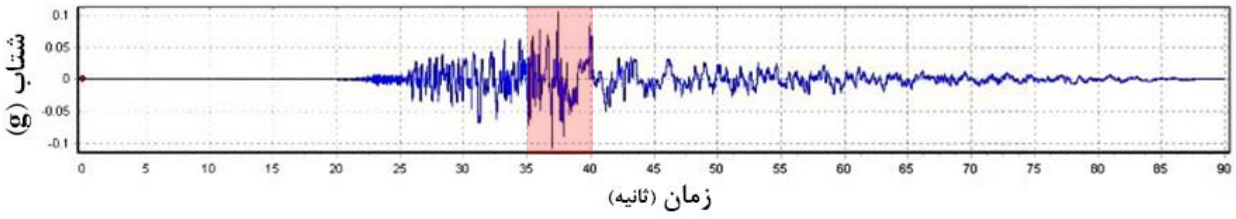
شکل ۳ : حذف تزیینات و ساده‌سازی مدل سه بعدی، مأخذ: پژوهشگران

یکی از دیوارهای ورودی که در حال حاضر اتصال مناسبی با سازه نداشته و کاملاً جدا شده است از بنای مدل‌سازی شده حذف گردید (شکل۳).

۳-۴- مشخصات زلزله منطقه (تحلیل لرزه‌ای)

با توجه به اینکه یکی از تحلیل‌های مدنظر این مطالعه، تحلیل‌های مرتبط با زلزله بوده، ضروری است تا مشخصات زلزله مورد مطالعه نیز برای ورود به نرم‌افزار مشخص شود. باید این موضوع را مدنظر داشت که تنها می‌توان در جهت آرام کردن ویرانی‌های زلزله، احتیاط‌های لازم را اتخاذ کرد [43]. مطالعات پژوهشگران نشان می‌دهد که تقریباً تمامی زلزله‌هایی که در سده اخیر رخ داده در همان جاهایی رخ داده که زمین لرزه‌های قدیمی روی داده‌اند. منطقه سمیران با توجه به قرارگیری در مرز استان‌های قزوین، زنجان و گیلان یکی از این مناطق مستعد زلزله است. چراکه با توجه به نقشه پراکندگی گسل‌های استان قزوین، گسل‌های رودبار، المترود، طالقان، گسل شمال قزوین و گسل قزل اوزن (منجیل) این منطقه را تهدید می‌کند. شاهد این موضوع اینکه ۲۳ زلزله با شدت بالای ۵ ریشتر از سال ۱۳۰۰ ه.ش تاکنون در این گسل‌ها فعال بوده و برج سمیران را تحت تأثیر قرار داده‌اند. از این بین، گسل رودبار نزدیک‌ترین گسل به این محدوده است که موجب شده برای این مطالعه تحلیل خطر زلزله این منطقه با رویکرد احتمالاتی مدنظر قرار گیرد.

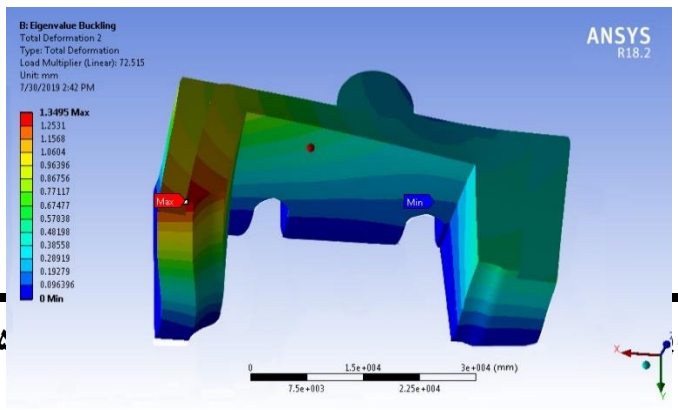
برای به دست آوردن رکورد زلزله منطقه، اگرچه در آیین‌نامه ۲۸۰۰ مبنای طراحی ساختمان برای منطقه رودبار 0/35 g تعیین گردیده ولی این مقدار (با توجه به محاسبه تحلیل خطر زلزله) برای منطقه با توجه به مطالعه حسن‌پور انارکولی و همکاران [44] مقدار 0/316 g به دست آمده، که مبنای این مطالعه نیز قرار گرفته است. جهت اینکه شتاب‌نگاشت انتخابی تا حد امکان نمایانگر شتاب واقعی وارد شده و حرکت واقعی زمین در محل بنا باشد تحلیل شتاب‌نگاشت زلزله چی چی (Chi-Chi) با دو PGA=0.107 g (حوزه دور) رکورد شماره (۱) و PGA=0.33 g (حوزه نزدیک) رکورد شماره (۲) انتخاب شده است که به 0/316 g مقیاسه (Scale) شده چراکه شتاب‌نگاشت باید تا حد امکان نمایانگر حرکت واقعی زمین در محل احداث بنا در هنگام زلزله باشد. در نهایت ۵ ثانیه از این زلزله شبیه‌سازی شده در بازه زمانی ۳۵ تا ۴۰ ثانیه انتخاب و سازه تحت این رکورد تحلیل شد (شکل۴).

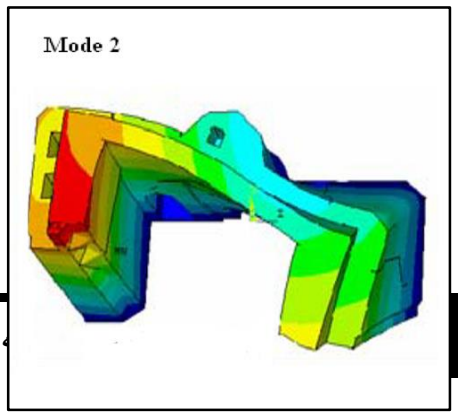


شکل۴ : نمودار شتاب بر زمان زلزله چی چی (مشابه سازی شده برای اعمال نیروی جانبی زلزله)

۴-۴- تحلیل رفتار سازه و صحت سنجی

تحلیل نرم‌افزاری سازه‌های موردنظر با سه روش عمده از آنالیز اجزای محدود صورت گرفته است که عبارت‌اند از: آنالیز استاتیکی خطی، آنالیز استاتیکی غیر خطی (با تکیه بر معیار گسیختگی ویلیام وارنکه) و آنالیز دینامیکی خطی. همان‌طور که اشاره شد مدل‌سازی سازه نیز به‌صورت ماکرو انجام گرفته است. نتایج تحلیل نیز یک بار در جهت‌های X، Y و Z به‌صورت جدا و یک بار در تمامی جهات به‌صورت هم‌زمان تحلیل شده است. در تحلیل‌های استاتیکی خطی سازه یک بار تحت نیروی وزن خود و بار دیگر تحت نیروی وزن به اضافه





شکل ۵ : مقایسه مود دوم تحلیل مودال مقاله مربوط به ارگ تبریز[45] و مدل صحت سنجی شده

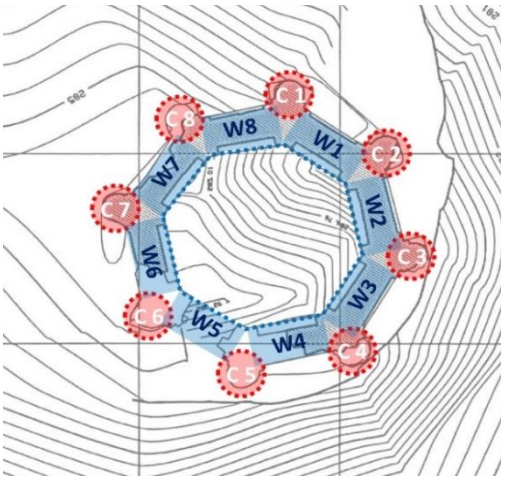
نیروی جانبی تحلیل شده است. در تحلیل‌های غیر استاتیکی سازه به‌طور همزمان تحت نیروی وزن و نیروی جانبی قرار می‌گیرد اما مدل‌سازی سازه‌ها به‌صورت غیر خطی است. در تحلیل دینامیکی نیز سازه تحت نیروی وزن و سپس نیروی جانبی (زلزله) -تحت رکورد مشخصی که در بخش قبل توضیح داده شد- قرار گرفت. گفتنی است برای مدل‌سازی بنا از المان هشت گرهی Solid 45 برای تحلیل خطی و Solid 65 برای تحلیل غیرخطی استفاده شده است (البته به‌طور خودکار المان در نرم‌افزار با Solid 185 جایگزین می‌شود). لازم به ذکر است برای صحت‌سنجی فرآیند انجام تحلیل مطالعه پورامینیان و همکاران [45] بررسی و پس از مدل‌سازی، تحلیل بنا با توجه به مشخصات ذکر شده در مقاله مذکور صورت پذیرفت. برای انجام تحلیل همانند مقاله، سازه عیناً مدل‌سازی، و آنالیز به‌صورت استاتیکی خطی تحت نیروی وزن سازه انجام شده است که نتایج حاصل با مطالعه پورامینیان و همکاران تطابق دارد (شکل۵).

۵- نتایج بررسی آسیب‌پذیری

موضوع آسیب‌پذیری و نتایج حاصل از آن دو بخش عمده را در بر می‌گیرد. اول اینکه باید وضعیت حال حاضر اثر تاریخی را با مطالعات میدانی بطور دقیق شناخت تا بتوان حدس‌های مربوط به رفتار آینده سازه و برنامه‌ریزی برای اقدامات پیشگیرانه را مدنظر داشت. دوم اینکه علاوه بر بررسی‌های میدانی با روش‌های دقیق‌تر بررسی رفتار سازه بتوان این مطالعات را تکمیل کرد. در این مطالعه برای بررسی آسیب‌پذیری، همراه با مطالعات نرم‌افزاری، مطالعات میدانی نیز به‌عنوان یک وجه مکمل مدنظر قرار گرفته است.

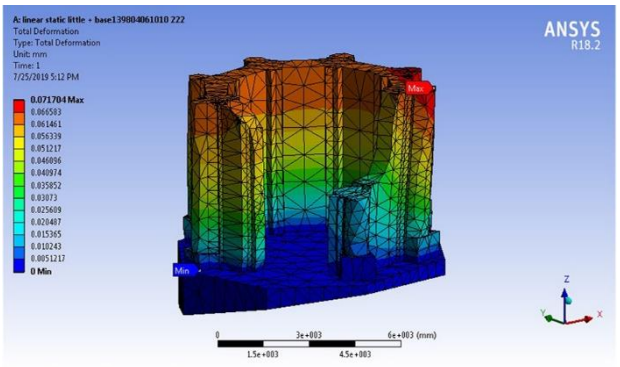
۵-۱- بررسی و مطالعات میدانی (کُدگذاری ساختار)

عناصر تشکیل‌دهنده تمامی بناها و علی‌الخصوص بناهای تاریخی متشکل از مصالح، هندسه و پیوستگی آن‌ها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که ایستایی و بقای بنا را تأمین کنند. اما عواملی مثل کیفیت مصالح، گذر زمان، عوامل جوی، طبیعی و انسانی در نهایت فرسودگی، کهنگی، تخریب و ویرانی را به همراه خواهند آورد. مطالعه میدانی ساختار و بررسی و شناسایی نقاط آسیب‌دیده و شواهد آن‌ها به‌عنوان نقطه شروع مطالعات تحلیلی، موضوعی قابل توجه بوده است. در این راستا پس از کدگذاری دیوارها و ستون‌های موجود در سازه برج کوچک، علاوه بر مطالعات دقیق عوارض و ثبت و مستندسازی شواهد آسیب، تلاش شده است وضعیت آسیب‌پذیری ساختار مورد مطالعه قرار گیرد. به عبارت دیگر مجموع این بخش به دنبال آن است تا عوارض کلی که خود عوامل مخلی برای آسیب‌های آینده بوده و تعادل بنا را برهم خواهند زد شناسایی کند.



شکل ۶ : کدگذاری دیوارها و ستون‌ها در برج کوچک

عمده‌ترین آسیب برج که عامل به وجود آورنده بسیاری از



شکل ۷ : تحلیل استاتیکی خطی تحت بار وزن

ترک‌ها است، شکست پی بنا در جبهه شمالی است. آسیب‌های مهم دیگر به ترتیب انواع ترک‌ها، فرسایش و ریزش مصالح هستند. ترک‌های موجود در این بنا ازلحاظ عوامل به وجود آورنده در کل به دو دسته تقسیم

جدول ۳ : نتایج حاصل از بررسی و مطالعات میدانی

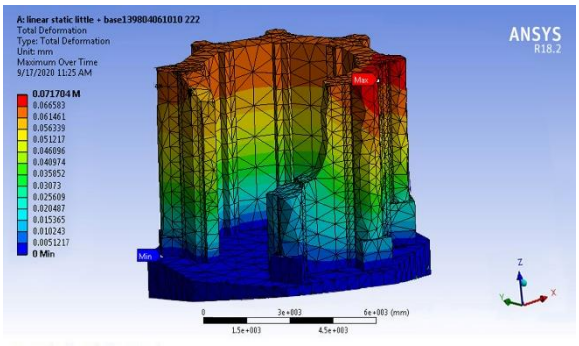
ردیف	آسیب	محل وجود آسیب
۱	ترک ساختاری (A)	W1, W2, W3, W4, W6, W7, W8, C8
۲	تخریب (C)	W4, W5, W6, C5, C6 و گنبد
۳	ریزش بالای دیوار (F)	W2, W3, W4, W6, W7
۴	فرسودگی (G)	W2, W3, W4, W6, W7, C1, C2, C3, C7, C8 و گنبد

می‌شوند. این عوامل علاوه بر عامل تخریب هم‌جواری، عامل شکست پی بنا نیز هست. آسیب در پی بنا به‌عنوان یک عامل اساسی موجب شده بخش-های دیگر سازه نیز تحت‌الشعاع قرار گیرد. اگرچه در سال‌های گذشته اقدامات مرمتی برای تقویت پی انجام شده و به نظر می‌رسد در حال حاضر پی بنا و حرکت آن کنترل شده است ولی اقدامات استحفاظی برای پیشگیری از اتفاقات احتمالی ضروری است.

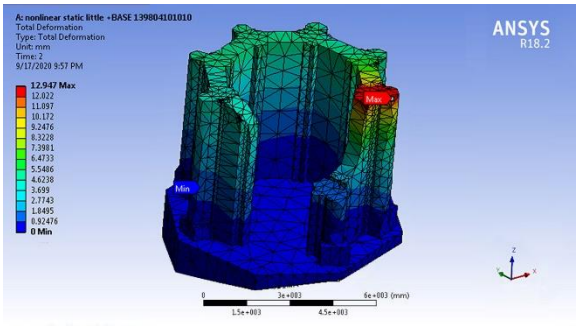
آنچه در جدول ۳ ارائه شده خلاصه‌ای از وضعیت حال حاضر برج و مستندسازی عوارض موجود در این سازه است. اگرچه این بررسی تنها در جهت شناخت بهتر وضعیت حال حاضر سازه تنظیم شده، ولی در فرآیند تحلیل نتایج حاصل از بررسی نرم‌افزاری بسیار کارا و مورد توجه خواهند بود. چرا که برخی از جزئیات ساختارها امکان ارائه در مدل را نداشته و در نتیجه مطالعات میدانی می‌تواند تا حدی این ضعف را پوشش دهند.

۲-۵- نتایج مطالعات نرم‌افزاری

همان‌طور که اشاره شد، مطالعات و تحلیل‌های نرم‌افزاری در جهت تحلیل و تشخیص آسیب‌پذیری اثر مدنظر قرار گرفته است. نتایج حاصل از این فرآیند در قالب سه تحلیل ارائه شده که در ادامه به آن‌ها پرداخته شده است:



شکل ۸ : تحلیل استاتیکی خطی تحت وزن



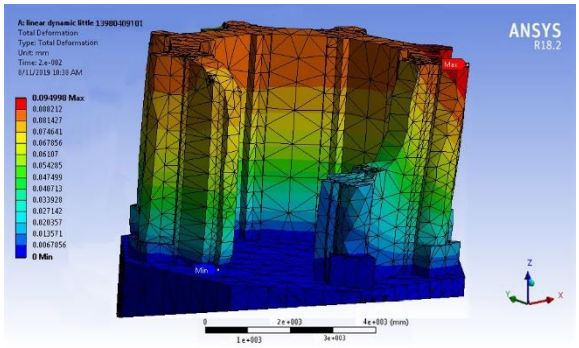
شکل ۹ : تحلیل استاتیکی غیرخطی تحت وزن

الف - تحلیل استاتیکی خطی:

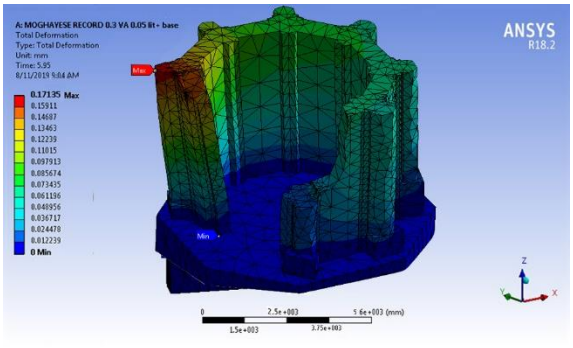
نتایج حاصل از آنالیز استاتیکی خطی در سازه با کف نشان می‌دهد که بیشترین میزان جابجایی در تمامی جهات -که بیشتر مورد توجه این مطالعه بوده است- در بالای ستون سوم بوده است. در مجموع در این تحلیل آسیب‌پذیرترین قسمت سازه بالای ستون سوم خواهد بود که باید در طرح‌های حفاظتی مدنظر قرار گیرد (شکل۷). این سازه در مرحله بعد علاوه بر نیروی وزن تحت تأثیر نیروی جانبی نیز قرار گرفته (به اندازه یک هزارم ارتفاع) که در نتیجه آن بیشترین میزان جابجایی آن در تمامی جهات مربوط به جبهه شمالی است. با توجه به نتایج این تحلیل آسیب‌پذیرترین نقاط سازه قسمت بالایی سازه در جبهه شمالی و غربی است (شکل۸)، که باید در طرح‌های حفاظتی مورد توجه باشد.

ب - تحلیل استاتیکی غیرخطی:

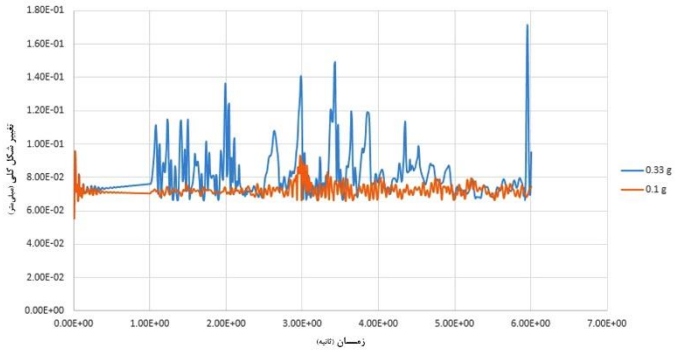
نتایج حاصل از آنالیز استاتیکی غیر خطی همان‌طور که در شکل ۹ آمده است نشان می‌دهد که بیشترین میزان جابجایی در قسمت‌های بالای بنا است. در مجموع با توجه به نتایج، آسیب‌پذیرترین بخش سازه قسمت بالای برج و بالای ستون ششم است.



شکل ۱۰ : تحلیل دینامیکی خطی تحت رکورد PGA: 0.1 g



شکل ۱۱ : تحلیل دینامیکی تحت رکورد PGA: 0.33 g



شکل ۱۲ : تغییر حالت کلی برج کوچک تحت دو رکود متفاوت

ج- تحلیل دینامیکی (تاریخچه زمانی):

همان‌طور که اشاره شد در تحلیل دینامیکی تنها تفاوت وابسته به زمان بودن تحلیل است. به همین دلیل در این تحلیل علاوه بر نیروی وزن سازه در بازه زمانی مشخص، سازه مورد نظر تحت رکورد زلزله مشخصی نیز قرار گرفته است که در بخش ۴-۳ درباره مشخصات و ویژگی‌های این زلزله بحث شد. نتایج حاصل از میزان جابجایی در تمام جهات تحت رکورد PGA:0.1g نشان می‌دهد که در قسمت بالایی بنا و بالای ستون سوم و ثانیه ۲ بیشترین میزان جابجایی و در پایین ستون هشتم نیز بیشترین میزان تنش در سازه اتفاق افتاده است (شکل۱۰). تحت رکورد PGA:0.33g همانند تحلیل قبل در تمام جهات به‌صورت هم‌زمان نتایج نشان می‌دهد میزان جابجایی در ثانیه ۵،۵۹ در بالای ستون ششم است و بیشترین میزان تنش نیز در پایین ستون هشتم خواهد بود (شکل۱۱). در مجموع با دو تحلیل انجام شده و جابجایی‌ها در هر یک از سه راستا (X، Y و Z) بالای ستون سوم، ستون ششم و جداره ششم نقاط آسیب‌پذیر ساختار در برج کوچک هستند. با توجه به بررسی‌های دقیق‌تر مشخص است که برج کوچک به یک میزان دچار تنش کششی و فشاری می‌شود و میزان جابجایی آن نیز تحت رکورد PGA:0.33g نسبت به رکورد PGA:0.1g بیشتر است (شکل۱۲).

در نهایت نتایج حاصل از تمامی تحلیل‌ها بر روی برج کوچک نشانگر این موضوع است که سازه تحمل نیروهای جانبی را نخواهد داشت و تحت تأثیر این نیروها تعادل خود را از دست خواهد داد. همچنین با توجه به اینکه امکان مدل شدن کلیه ترک‌ها بر روی سازه وجود نداشته در نتیجه میزان آسیب‌پذیری از آنچه تشخیص داده شده مطمئناً بیشتر نیز خواهد بود. با توجه به مجموع تحلیل‌ها آسیب-پذیرترین قسمت بنا قسمت‌های بالایی جداره سوم، ستون سوم، جداره ششم و ستون ششم هستند. نتایج حاصل از بررسی‌های نرم‌افزاری و همچنین توضیحات مربوط به آن‌ها در قالب جدول ۴ ارائه شده است.

ردیف	موضوع تحلیل	شماره تصاویر	موضع آسیب‌پذیر قابل‌توجه	توضیحات

۱	آنالیز استاتیکی خطی تحت بار وزن	۷	قسمت بالای ستون سوم	سازه جابجایی چشم‌گیری در هیچ‌کدام از جهات ندارد.
۲	آنالیز استاتیکی خطی تحت بار وزن و نیروی جانبی	۸	قسمت بالایی دیوارها مخصوصاً در بالای ستون هشتم	سازه در این تحلیل دچار جابجایی محدود می‌شود. در تصویر نقاط شاخص آن قابل مشاهده است.
۳	آنالیز استاتیکی غیرخطی	۹	قسمت بالایی دیوارها علی‌الخصوص در بالای ستون ششم	سازه در این تحلیل دچار جابجایی می‌شود به‌طوری‌که در تصویر نقاط شاخص آن قابل مشاهده است.
۴	آنالیز دینامیکی خطی با رکود ۰/۱	۱۰	قسمت بالایی دیوارها مخصوصاً در ستون سوم	سازه در پایین ستون هشتم دچار تنش بیشتری می‌شود.
۵	آنالیز دینامیکی خطی با رکود ۰/۳۳	۱۱	قسمت بالایی دیوارها مخصوصاً در ستون ششم	سازه در پایین ستون هشتم دچار تنش بیشتری می‌شود

جدول ۴ : جمع‌بندی مطالعات حاصل از تحلیل‌های نرم افزاری

۶- بحث و تحلیل

با تحلیل‌های انجام‌شده در این مطالعه علاوه بر به دست آمدن نقاط آسیب‌پذیر این نتیجه حاصل شد که برج کوچک به دلیل تخریب، ساختار فعلی نامنتظم و همچنین داشتن پی نامستحکم از استحکام کمتری برخوردار است و در مقابل نیروی جانبی نیز بسیار آسیب‌پذیر است. آسیب‌پذیرترین نقاط سازه با توجه به نتایج حاصل از تحلیل‌های صورت گرفته بخش‌های بالایی سازه هستند. به ترتیب بالای ستون سوم و جداره چهارم است که به‌شدت ریزش داشته و سازه دارای ضعف بسیاری نیز در این نقاط است. سپس جداره ششم و ستون ششم به دلیل ساختار نامنظم و ریزش قسمتی از جداره ششم و کل جداره پنجم آسیب‌پذیر هستند که در تحلیل‌های دینامیکی احتمال ریزش برای این قسمت پیش‌بینی می‌شود. بالای ستون هفتم نقطه آسیب‌پذیر دیگری است. در مطالعات میدانی و با توجه به مشاهدات ترک افقی عمیقی در این قسمت از سازه وجود دارد و ستون دارای ترک سازه‌ای است. با توجه به نتایج حاصل از مطالعات میدانی و نرم‌افزاری اصلی‌ترین آسیب‌های بنا به ترتیب اولویت جلوگیری از تغییر شکل سازه در بخش‌های بالایی ساختار (حاصل مطالعات نرم-افزاری) و آسیب پی بنا است که عامل به وجود آمدن بسیاری از ترک‌ها است (حاصل مطالعات میدانی). مطمئناً بعد از این مرحله و تثبیت آن‌ها، ترک‌های نوع اول که نیاز به دوخت و دوز دارند و ترک‌های نوع دوم که تبدیل به شکاف شده‌اند و باید پر شوند از موارد قابل توجه و ضروری در اقدامات پیشگیرانه هستند.

با توجه به تحلیل‌های کلی صورت گرفته، دو بخش اصلی برای اقدامات پیشگیرانه مورد توجه جدی‌تر هستند، چراکه خود جلوگیری کننده از آسیب‌های آینده خواهند بود. شکست پی بنا که از مطالعات میدانی حاصل شده و تنش‌های موجود در قسمت‌های بالایی سازه که باید تا حد امکان کنترل شوند. بررسی‌های میدانی نشان می‌دهند که ترک‌های موجود در ساختار که ناشی از مشکلات پی بوده‌اند با اقدامات مرمتی سال‌های ۹۰-۸۹ کنترل شده و پیشرفت نداشته‌اند. علاوه بر این در تمام تحلیل‌های رایانه‌ای سازه و همچنین بررسی‌های میدانی، مشکلات و آسیب‌پذیری قسمت بالایی سازه در مطالعات میدانی کاملاً مشهود و قابل توجه هستند. با این توضیح برای پیشگیری از آسیب بیشتر و در جهت کنترل آسیب‌ها در قسمت بالای سازه، اضافه شدن یک کمربند حفاظتی پیشنهادشده است. علاوه بر دستیابی به نقاط آسیب‌پذیر در سازه و ایده کلی برخورد، موضوع مهم دیگر اصول حفاظتی است که باید در اقدامات حفاظتی مورد توجه باشند. اگرچه این مقاله این اصول را هدف قرار نداده ولی پژوهش ذات اکرم و زمانی‌فرد [23] به این اصول پرداخته است. سهولت در اجرا، صرفه اقتصادی طرح، سازگاری با معماری بومی منطقه، باورپذیری اجتماعی، رعایت اصول مرمتی و برآورد اهداف سازه‌ای این اصول مورد توجه هستند. در نهایت با توجه به این اصول و در نظر گرفتن نیازهای سازه در جهت پیشگیری از آسیب‌پذیری، پیشنهادهای اجرایی ارائه شدند. آنچه در ادامه آمده پیشنهادهای برگزیده برای اقدامات پیشگیرانه مرتبط هستند.

جدول ۵ : جمع‌بندی مطالعات آسیب‌شناسی میدانی و نرم‌افزاری

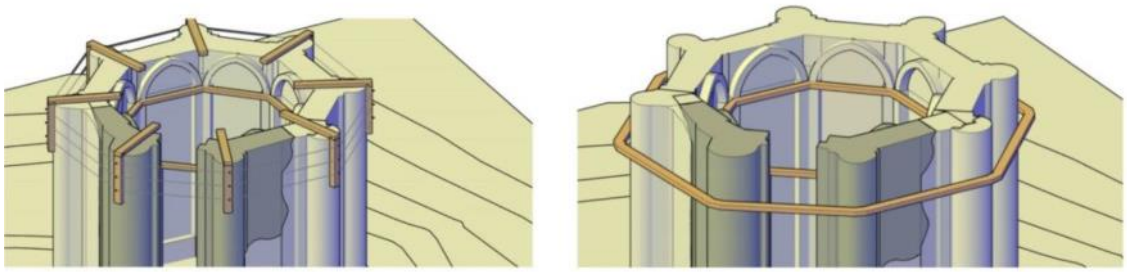
ردیف	محل آسیب	عنوان آسیب	شرح آسیب	رویکرد حفاظتی پیشنهادی
۱	قسمت شمالی بنا	شکست پی بنا	در جبهه شمالی پی بنا تخریب‌شده است	استحکام‌بخشی پی
۲	C2, C3, C4, C8, C9, C10	ترک نوع اول	ترک‌های عمیق که در دو قسمت دیواره گنبد وجود دارند	دوخت و دوز ترک

۳	C1, C5, C6, C7	ترک نوع دوم	این نوع ترک‌ها تبدیل به شکاف شده‌اند و دارای عمق بیشتری هستند	پر کردن حفره‌ها و شکاف‌های ایجادشده پس از تثبیت
۴	گنبد، قسمتی از دیوار چهارم، دیوار پنجم و قسمتی از دیوار ششم، قسمتی از ستون چهارم و پنجم	ریزش و تخریب سازه	به دلیل عوامل متعدد گنبد بنا، سردر ورودی و جداره چهارم و ششم بنا در حال حاضر فرو ریخته است که خود منجر به آسیب‌های متعددی می‌شوند	تکمیل و بازسازی قسمت‌های تخریب شده در جهت تکمیل و یکپارچگی عملکرد سازه و در جهت تحمل بارهای جانبی ضروری است.
۵	قسمت بالایی دیوارهای دو، سه و هفت و دیوارهای چهار و ششم، تنها تزیینات باقی‌مانده بنا	فرسودگی مصالح	به دلیل تخریب پوشش سقف و همچنین به دلیل ریزش جداره‌های بنا قسمت زیادی از بنا در معرض مستقیم نزولات جوی قرارگرفته و به‌مرورزمان استحکام خود را ازدست‌داده و فرسوده شده‌اند	جایگزین کردن مصالح با مصالح جدید و سازگار با بنا و همچنین امکان ایجاد پوشش موقت برای حفاظت و جلوگیری از فرسایش بیشتر مصالح

۷- اقدامات پیشگیرانه حفاظتی

با توجه به مطالعات، تحلیل‌ها و بررسی‌های میدانی و با در نظر گرفتن اصول حفاظتی، ایده‌های مرمت و استحکام‌بخشی برای برج کوچک ارائه شده‌اند. لازم به ذکر است برای هر موضوع، معمولاً دو ایده پیشنهاد شده و سپس با نظر گروهی از متخصصین [37] بررسی و جمع‌بندی نهایی در مورد هرکدام از آن‌ها ارائه شده است. اقدامات حفاظتی پیشنهادی که در ادامه آمده، در جهت کنترل آسیب‌ها با مرمت‌های موضعی و اقدامات پیشگیرانه در برج کوچک سمیران ارائه شده است:

قسمت بالایی سازه: یکی از قسمت‌های اصلی آسیب‌پذیر بالای برج کوچک بوده که در محل‌های مختلف دچار عدم تعادل شده است. ایجاد کمربند حفاظتی برای این بخش ضروری است. از این رو دو طرح برای کمربند حفاظتی پیشنهاد شد که البته در آن‌ها موضوع بازگشت‌پذیری یک اصل مهم تلقی شده است، چراکه مطمئناً این اقدام یک پیشنهاد موقت خواهد بود. اگرچه جنس و نوع اجرای این کمربند حفاظتی می‌تواند متفاوت برنامه‌ریزی شود ولی آنچه در مجموع در قالب این بررسی به‌عنوان طرح اجرایی پیشنهاد شده استفاده از یک کمربند (رینگ) حفاظتی با ترکیبی از مصالح چوب و همچنین میلگردهای FRP در بیرون سازه همراه با یک سازه چوبی در داخل سازه است (شکل ۱۳). رینگ بیرونی برای جلوگیری از جابجایی سازه به سمت خارج از بنا و رینگ داخلی در جهت کاهش آسیب‌پذیری سازه و تخریب آن به داخل پیشنهاد شده است. لازم به ذکر است اگرچه جزئیات اجرایی دقیقی از طرح پیشنهادی قابل ارائه است ولی باید در نظر داشت که هدف از این مطالعه ارائه راهکارهای کلی در جهت جلوگیری از آسیب‌پذیری بیشتر سازه با اقداماتی پیشگیرانه بوده است.



شکل ۱۳ : نمونه پیشنهاد اجرایی برای کمربند حفاظتی

ترک در دیوارها: درباره ترک‌های نوع اول (غیر عمیق) پیشنهاد می‌شود با تزریق دوغاب مناسب و همچنین دوخت و دوز آن‌ها تثبیت شوند. دوغاب مناسب پیشنهادی برای این موضوع بهتر است از ۱۵ تا ۲۵ درصد ماسه، ۱۰ تا ۲۰ درصد گچ، ۲۵ درصد آهک و ۴۰ درصد خاکستر بادی تشکیل شده باشد. همچنین در جهت تثبیت بهتر ساختار استفاده از بست‌های فلزی پیشنهاد می‌شود. در ترک‌های نوع دوم که همراه با شکاف‌های عمیق‌تر هستند، با توجه به تثبیت سازه در حالت فعلی پیشنهاد می‌شود با استفاده از دوغاب پیشنهادی شکاف‌ها پر شده و اتصال مناسب نیز بین بخش‌های مختلف دیوار برقرار شود.

ریزش و تخریب سازه: قسمت‌هایی از ساختار مثل ورودی برج و دو دیوار طرفین که تخریب شده و خود باعث آسیب‌رساندن به دیگر بخش‌های سازه نیز خواهد شد بازسازی و تکمیل شوند. با توجه به اینکه شواهد دقیق از وضعیت ورودی در دست نیست، کلیات ساختار و خطوط اصلی در جهت حفظ یکپارچگی سازه بازسازی خواهد شد. همچنین باید در نظر داشت که قسمت‌های بازسازی‌شده با اتصالات مطمئن به قسمت‌های پابرجا متصل شوند. همچنین قسمت‌هایی از دیوارها که تخریب شده با ظاهری متمایز بازسازی و تکمیل خواهند شد. این بدان منظور است که بتوان بخش‌های مرمتی را از بخش‌های اصیل تمیز داد.

فرسایش مصالح: با توجه به تخریب گنید بنا آسیب‌پذیری سازه به دلیل قرار گرفتن در معرض عوامل محیطی فراوان است. از طرفی شواهد دقیقی از گنبد این برج در دست نیست و می‌توان گفت بازسازی آن ممکن نخواهد بود. پیشنهاد می‌شود با انجام مرمت‌های موضعی در سطح بالایی دیوار و هدایت آب‌های سطحی در بالای سازه و حتی استفاده از لایه‌های اندود موقت از آسیب‌پذیری بیشتر ساختار جلوگیری شود.

استحکام‌بخشی پی: اگرچه آسیب‌پذیری و ترک‌های ناشی از مشکلات پی در سازه مشهود است ولی اقدامات انجام‌شده در سال‌های ۹۰-۸۹ و استحکام‌بخشی‌های صورت گرفته در آن نشان می‌دهد این حرکت پی کنترل شده است. بررسی ترک‌ها و عدم رشد آن‌ها در سال‌های بعد از این اقدامات شاهدی بر این موضوع است. در نتیجه به نظر می‌رسد در حال حاضر با نگاه پیشگیرانه، نیاز به اقدامات تکمیلی در جهت استحکام‌بخشی پی وجود نداشته باشد.

۸- جمع‌بندی

آسیب‌پذیری و تحلیل رفتار سازه در برابر تنش‌های وارده بر آن در ساختارهای تاریخی موضوعی مهم تلقی می‌شود. بخصوص وقتی که این تشخیص‌ها حتی بتوانند گمان‌های اولیه از نقاط آسیب‌پذیر را نشان دهند. همان‌طور که مرور شد اگرچه نقاط ضعف و اختلاف نظرهایی در بهره از تحلیل‌های نرم‌افزاری وجود دارد ولی وقتی نتایج حاصل از تحلیل‌ها با مطالعات میدانی، تاریخی، آزمایشگاهی و همچنین بررسی تجربیات مرمتی گذشته اثر و در نهایت با تحلیل‌های نرم‌افزاری همراه شوند، می‌توان نگاه متفاوتی به آن‌ها داشت. در اقدامات پیشگیرانه و در جهت کنترل آسیب‌ها این تحلیل‌ها نتیجه مفیدی را به همراه خواهند داشت. در نتیجه می‌توان برخی از آسیب-هایی که در آینده اثر را تهدید می‌کنند کنترل کرد. همان‌طور که در مقاله مرور شد بررسی‌ها و تحلیل‌های انجام شده بر روی برج کوچک سمیران در نهایت بیانگر آن است که :

- شاخص‌ترین آسیب تهدید کننده عدم تعادل سازه در بخش‌های بالایی است که با ایجاد کمربند حفاظتی می‌توان آن را کنترل کرد. اضافه کردن این رینگ از حرکت سازه به بیرون و درون در اثر تنش‌های وارده جلوگیری خواهد کرد.
- اگرچه در مطالعات میدانی نیز ضرورت‌هایی برای ایجاد این کمربند دیده شد ولی تحلیل‌های رایانه‌ای، برای اجرای آن قطعیت بهتری را ایجاد کرد.
- باید در نظر داشت که تحلیل رفتار سازه و تشخیص آسیب‌پذیری با استفاده از نرم‌افزارهای تحلیلی می‌توانند گزینه‌های مطلوبی را در جهت تصمیم‌گیری برای اقدامات پیشگیرانه مهیا کنند. البته باید در نظر داشت با توجه به ذات اضطراری و پیشگیرانه بودن این اقدامات و نه مرمت‌های دائمی، در فاصله مناسب باید برنامه‌ریزی‌های دقیق مرمتی نیز برای آن‌ها در برنامه تصمیم و اجرا قرار گیرد.
- با توجه به ماهیت پیشگیرانه و موقتی بودن این اقدامات، باید در نظر داشت که اکیداً اصل بازگشت‌پذیری و حداقل مداخله -همان‌گونه که در ایجاد کمربند حفاظتی در برج کوچک در نظر گرفته شد- مورد توجه جدی قرار گیرد، چرا که مطمئناً در آینده‌ای نزدیک با اقدامات دقیق مرمتی جایگزین خواهند شد.

سپاسگزاری

بدینوسیله از جناب آقای دکتر محسن فضلوی به جهت مشاوره و همراهی ارزشمند ایشان در فرآیند انجام این پژوهش صمیمانه قدردانی می‌گردد.

مراجع

[1] Eslami, Sh and Rahimnia, R. (2020). Analysis and Evaluation of Structural Behaviour in Historical Structures; A Review of the Capabilities and Challenges of Software Analysis as a Test Method. *1st International and 5th National Conference on Sustainable Architecture and City*. Tehran, Shahid Rajaee Teacher Training University, 15. [In Persian]

[2] Icomos. (2010). Lima Declaration for Disaster Risk Management of Cultural Heritage. In: *International Symposium*, Peru: Lima Declarations.

[3] Icomos. (2004). The BAM Declaration and Recommendations. In: *The International Workshop on the Recovery of Bam's Cultural Heritage*. Bam, 17-20.

[4] ICOMOS/ISCARSAH Committee. (2005). Recommendations for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage. See www.icomos.org.

[5] Chiarugi, A, Fanelli, A, Giuseppetti, G. (1993). Diagnosis and Strengthening of The Brunelleschi Dome. In: *IABSE Symposium*, Zürich: IABSE.

[6] Croci, G, Viscovik. (1993). A Causes of Failures of Colosseum Over the Centuries and Evaluation of The Safety Levels. In: *Public Assembly Structures*. *From Antiquity to the Present*. Istanbul: IASS-Mimar Sinan University.

[7] Meli R, Sánchez-Ramírez AR. (1995). Structural Aspects of the Rehabilitation of the Mexico City Cathedral. In: *Structural Analysis of Historical Constructions*, Barcelona, Spain.

[8] Mola F, Vitaliani R. (1995). Analysis, Diagnosis and Preservation of Ancient Monuments: The St. Mark's Basilica in Venice. In: *Structural Analysis of Historical Constructions*. Barcelona, Spain.

[9] Salonikios, T. and Karakostas, C. and Lekidis, V. and Anthoine, A. (2003). Comparative Inelastic Pushover Analysis of Masonry Frames. *Engineering Structures*, 25, 1515-1523.

[10] Angelo D, Valentina M, Marco M. (2012). Seismic Assessment of A Historical Masonry Tower With Nonlinear Static And Dynamic Analyses Tuned On Ambient Vibration Tests. *Engineering Structures*, 36, 210-219.

[11] De Luca, A. and Giordano, A. and Mele, E. (2004). A Simplified Procedure for Assessing the Seismic Capacity of Masonry Arches. *Engineering Structures*, 26, 1915-1929.

[12] Brandonisio, G. and Mazziotti, A. and Lucibello, G. and Mele, E. and De Luca, A. (2014). Seismic Behaviour of Four Italian Masonry Buildings: Comparison between Different Modelling. In: *9th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions*. Mexico City: SAHC2014.

[13] Valente,M. and Milani,G. (2016). Seismic Assessment of Historical Masonry Towers by Means of Simplified Approaches and Standard FEM. *Construction and Building Materials*. 74-104.

[14] Galasco, A. and, Lagomarsino, S. and, Penna, A. and Resemini, S. (2004). Non-Linear Seismic Analysis of Masonry Structures. In: *13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver

[15] Lagomarsino, S. and Penna, A. and Galasco, A. and Cattari, S. (2013). TREMURI Program: An Equivalent Frame Model for The Nonlinear Seismic Analysis of Masonry Buildings. *Engineering Structures*, 1787-1799.

[16] Casolo, S. and Milani, G. and Uva, G. and Alessandri, C. (2013). Comparative Seismic Vulnerability Analysis on Ten Masonry Towers in The Coastal Po Valley in Italy. *Engineering Structures*, 465-490.

[17] Hejazi, M. and Moayedyan, M. and Daei, M. (2015). Seismic Analysis of Persian Historical Brick Masonry Minarets. *Ferdowsi Civil Engineering Publications*, 27(1), 35-49. [In Persian]

[18] Hejazi, Me. and Mirghaderi, R. (2005). Seismic Analysis of Persian Domes, *Faculty of Engineering Publications*, 28(6), 747-757. [In Persian]

[19] Khodayari,R. and Karimi, K. and Yadegari, A. (2013). Equivalent Static Analysis of the Kabud Tower of Maragheh. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 260-264.

[20] Pouraminian,M. and Hosseini,M., "Seismic Safety Evaluation of Tabriz Historical Citadel Using Finite Element And Simplified Kinematic Limit Analyses", Indian Journal of Science And Technoligy, Vol7(4), 409-417, (2014).

[21] Riva, P. and Perotti, F. and Guidoboni, E. and Boschi, E. (1998). Seismic Analysis of The Asinelli Tower and Earthquakes in Bologna. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 17, 525-550.

[22] Hejazi, M. and Hejazi, B. and Mehdad, H. and Hejazi, S. (2015). The Study of Seismic Destruction of an Adobe Shop in the Bam Citadel and its Restoration Plan. *Maremat & memari-e Iran*, 1(9), 71 – 85. [In Persian]

[23] Zatakram, V. and Zamanifard, A. (2019). Seismic Consolidation of Rural Adobe Building (Case Study: Tabas Isfahak Historical Village). *Housing and Rural Environment*, 38 (166). 123-136 [In Persian]

[24] Camathias U. (2013). *Seismic Performance Evaluation of a Historic Unreinforced Masonry Building Structure*. Master Thesis. University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering.

[25] Juhásová, E., Sofronie, R., and Bairrão, R. (2008). Stone Masonry in Historical Buildings—Ways to Increase Their Resistance and Durability. *Engineering Structures*, 30(8), 2194-2205.

[26] Smoljanović, H. and Živaljić, N. and Nikolić, Ž. (2013). A Combined Finite-Discrete Element Analysis of Dry Stone Masonry Structures. *Engineering Structures*, 89-100.

[27] Attar-abbasi, M. and Hematzadeh Dastgerdi, S. and Mahboubi, Gh. (2015). A Survey of Structural Behaviour and Stability of Davazdah Emam Dome in Yazd Against Earthquake. *Quartery Specialized Journal of Structural Engineering*, 12(3), 25-32. [In Persian]

[28] Rahgozar, R, and Moghaddas, M. (2008). Investigating the Behavior and Endurance of The Green Dome Building Against Earthquakes. In: *Fourth National Congress of Civil Engineering*. Tehran: Tehran University, 8. [In Persian]

[29] Blyth, A., Napolitano, R. and Glisic, B. (2019). Documentation, structural health monitoring and numerical modelling for damage assessment of the Morris Island Lighthouse. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 377(2155), 1-19. (https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0002)

[30] Varjavand, P. (1998). *Visage of Qazvin's History and Culture*. Tehran: Ney Publications, 393,421-423. [In Persian]

[31] Kasravi, A. (1929). *Shahriaran-e Gomnanm (Anonymous Shahriars)*. Tehran: Amirkabir Publications. [In Persian]

[32] Moghaddasi, M. (1982). *Ahsan Al-taqasim Fi Ma'rifat Al-aqalim (The Best Divisions for Knowledge of the Regions)*. Tehran: Komesh Publications. [In Persian]

[33] Naser-e Khosraw. (1963). *Safar nameh ye Naser-e Khosrow*. Tehran: Tahoori Publications. [In Persian]

[34] Marashi, S.Z. (1968). *History of Gilan and Deylamistan*. Tehran: Iran Culture Foundation Publications. [In Persian]

[35] Mostofi, H. (1985). *Selected History (Tarikh-i guzida)*. Tehran: Amirkabir Publications, 777. [In Persian]

[36] Golriz, M. (2002). *Minodar or Bab al-Jannah Qazvin*. Qazvin: Taha Publications, 952-953. [In Persian]

[37] Eslami, Sh. (2019). *Restoration and Consolidation/ Strengthening Plan with Approach to Structural Analysis and Seismic Assessment for Historical Monuments; Case Study: Semiranat Tomb Towers (Borj-e Koochak va Bozorg-e Semiran), Qazvin*. Master Thesis. Imam Khomeini International University. [In Persian]

[38] Rezaei Kalaj, M.R. (1999). *Review and Study of Semiran's Works in Tarom Region of Qazvin*. Master Thesis. Tehran University. [In Persian]

[39] Croci, G. (2016). *The Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage*, Translated by Bagher Ayatollahzadeh Shirazi and Mehrdad Hejazi. Theran: Office of Cultural Research. [In Persian]

[40] Giordano, A. and Mele, E. and De Luca, A. (2002). "Modelling of Historical Masonry Structures: Comparison of Different Approaches Through a Case Study. *Engineering Structures*, 24, 1057-1069.

[41] Betti, M. and Galano, L. (2012). Seismic Analysis of Historic Masonry Buildings: The Vicarious Palace in Pescia (Italy). *Buildings ISSN*, 2075-5309, 63-82.

[42] Karimi, A. and et al. (2018). Understanding the Structural Behaviour of Taj Al-Molk Dome of Isfahan Grand Mosque. In: *Second National Conference on Applied Research in Civil Engineering (Structural Engineering and Construction Management)*. Tehran: Sharif University of Technology.

[43] Feilden, B. (2007). Conservation of Historic Buildings. *Routledge*.

[44] Hassanpour Anarkoli, H. and Ahmad Mighani, J. and Aghabarati, H. (2017), Earthquake risk analysis and preparation of micro-zoning maps for Rudbar city with a probabilistic approach. In *4th International Conference on New Technologies in Civil Engineering, Architecture and Urban Planning.* Tehran. [In Persian]

[45] Sadeghi, A. and Pouraminian, M. (2010). An investigation of the vulnerability of Arge Tabriz (Tabriz Citadel)." In *8th International Masonry Conference*. Germany: Dresden.