

Field and Numerical Seismic vulnerability assessment of Falak-ol-Aflak Castle

Alireza Khaloo¹, Mohammad Yekrangnia^{2*}

1- Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

ABSTRACT

In this article, seismic vulnerability of one of the ancient monuments in Iran, Falakol aflak Castle, located in Lorestan, is evaluated. In this regard, by conducting field surveys, the damages in different parts of the building were categorized. The results of these investigations indicated erosion and cracking in the construction of the building, settlements of parts of the building that caused cracks in some parts of the building, and rising dampness due to the presence of water flow in the foundation of the building. Next, by modeling the building in Abaqus software, the seismic vulnerability of the building was studied through incremental analysis. The results of this analysis indicated the vulnerability of different parts of the building, which indicated the necessity of presenting a seismic improvement plan. By using in-situ piles and micro piles in the soil as well as vertical reinforced cores in the walls, the results of numerical analysis showed that a significant improvement in the seismic performance of the building has occurred. The intensity of the original maximum plastic strains and its extent were much less compared to the unretrofitted building. Also, the force-displacement diagrams of the building in different directions indicated a significant decrease in the deterioration of the building's stiffness, which indicates the reduction of its vulnerability due to the addition of the proposed improvement system.

ARTICLE INFO

Receive Date:

Revise Date:

Accept Date:

Keywords:

*Falak Al-Aflak Castle
Vulnerability assessment
Retrofit plan
Numerical Modeling
Crack*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.355829.2901>

*Corresponding author: Mohammad Yekrangnia.

Email address: yekrangnia@sru.ac.ir

ارزیابی میدانی و عددی آسیب‌پذیری لرزه‌ای قلعه فلک الافلاک

علیرضا خالو^۱، محمد یکرنگ‌نیا^{۲*}

۱- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله آسیب‌پذیری لرزه‌ای یکی از آثار باستانی در کشور، قلعه فلک الافلاک واقع در استان لرستان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این راستا، با انجام بررسی‌های میدانی، آسیب‌های موجود در بخش‌های مختلف بنا تعیین و دسته‌بندی شد. نتایج این بررسی‌ها حاکی از فرسایش و ترک خوردگی در اجزای سازه‌ای بنا، نشست‌های قسمت‌هایی از بنا که سبب ترک خوردگی در بخش‌هایی از بنا شده بود، و نیز نم‌کشیدگی بالارونده به دلیل وجود جریان آب در پی بنا بود. در ادامه، با مدل‌سازی اجزای محدود بنا در نرم‌افزار آباکوس، آسیب‌پذیری لرزه‌ای بنا از طریق انجام تحلیل بارافزون مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این تحلیل حاکی از آسیب‌پذیری بخش‌های مختلف بنا بود که لزوم ارائه طرح بهسازی لرزه‌ای را نشان می‌داد. با بهره‌گیری از شمع‌های درجا و نیز ریزشمع‌ها در خاک و نیز استفاده از هسته‌های مسلح قائم در دیوارها، نتایج تحلیل‌های عددی نشان داد بهبود قابل ملاحظه‌ای در عملکرد لرزه‌ای بنا رخ داده است. شدت کرنش‌های پلاستیک اصلی بیشینه و نیز گستردگی آن در مقایسه با بنای بهسازی نشده بسیار کمتر بود. همچنین نمودارهای نیرو-جابجایی بنا در راستاهای مختلف حاکی از کاهش قابل ملاحظه زوال در سختی بنا بوده که نشان دهنده کاهش آسیب‌پذیری آن به سبب اضافه کردن سیستم بهسازی پیشنهادی شده است.

کلمات کلیدی: قلعه فلک الافلاک، ارزیابی آسیب‌پذیری، طرح بهسازی، مدل‌سازی عددی، ترک

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
10.22065/jsce.2022.355829.2901	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.355829.2901	۱۴۰۱/۰۵/۲۱	۱۴۰۱/۰۷/۱۲	۱۴۰۱/۰۸/۲۷	۱۴۰۱/۰۸/۲۷	۱۴۰۲/۰۶/۳۱
		*نویسنده مسئول:		محمد یکرنگ‌نیا		
		پست الکترونیکی:		yekrangnia@sr.u.ac.ir		

۱- مقدمه

تجربه مخاطرات طبیعی اخیر مانند زلزله کرمانشاه و سیل لرستان نشان داد یکی از معضلات موجود در حوزه بناهای تاریخی در کشور، عدم وجود مطالعات جامع بر روی خطرپذیری این بناها در کشور در برابر مخاطرات طبیعی است. انجام مطالعات ارزیابی آسیب‌پذیری و ارائه طرح‌های بهسازی برای هریک از این میراث‌های ملی و جهانی می‌تواند منجر به تصمیم‌گیری‌ها با مبنای علمی در راستای به حداقل رساندن آسیب‌های مالی و جانی و فرهنگی و نیز اولویت‌بندی پروژه‌های ترمیم و مقاوم‌سازی برای این بناها شود. یکی از مهمترین ملاحظات در تصمیم‌گیری‌ها در حوزه ترمیم و بهسازی در برابر مخاطرات و نیز اولویت‌بندی پروژه‌ها، تحلیل هزینه-فایده است. به عبارتی، هریک از این تصمیم‌ها شامل هزینه‌های مترتب به اجرای روش ترمیم یا بهسازی بوده و در مقابل فایده‌ای که منتج می‌گردد شامل بنای مرمت شده یا بهسازی شده است. نظر به وجود تعداد قابل توجه ساختمان‌های با اهمیت تاریخی-فرهنگی در کشور که در معرض مخاطرات طبیعی از جمله زلزله و سیل قرار دارند، لزوم تعیین میزان آسیب‌پذیری این ساختمان‌ها در برابر این مخاطرات شدیداً احساس می‌گردد. هدف از انجام پژوهش حاضر ارزیابی لرزه‌ای و ارائه طرح بهسازی و ترمیم برای یکی از مهمترین بناهای تاریخی در کشور قلعه فلک‌الافلاک است. نتایج این مطالعه می‌تواند درک مناسبی از وضعیت موجود این بنا و میزان آسیب‌پذیری آن به دست دهد و به این ترتیب منجر به طرح و اجرای روش قابل دفاع بهسازی و ترمیم برای میراث ملی شود.

در ابتدا مروری بر ادبیات فنی در حوزه آسیب‌پذیری ساختمان‌های تاریخی به عمل می‌آید. در ادامه خصوصیات قلعه فلک‌الافلاک ارائه شده و انواع آسیب‌های موجود آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین روش و فرضیات شبیه‌سازی عددی بیان می‌شود. در بخش بعدی موارد مربوط به بهسازی لرزه‌ای بنای مورد مطالعه ارائه شده و در نهایت نتایج حاصله مورد بررسی قرار می‌گیرد.

بناهای تاریخی هر کشور نمادی از تمدن، فرهنگ و مهندسی کهن آن کشور هستند. به منظور نگهداشت و حفاظت این آثار باستانی در برابر خطرات مختلف از جمله زلزله، باد، باران و ... لازم است از بهترین ابزارهای موجود در راستای شناخت رفتار و آسیب‌پذیری آنها و نیز ارائه راهکارهای مناسب در راستای بهبود عملکرد و وضعیت آنها بهره گرفت. متأسفانه این امر در کشور ما کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این امر با توجه به اینکه در اکثر موارد، بناهای تاریخی در حوزه کاربرد آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های ارزیابی و طراحی سازه‌ای نمی‌گنجد، دارای اهمیت دو چندان است.

در مطالعه‌ای توسط امیر شاه کرمی و همکاران [۱ و ۲] روش مستندسازی سازه‌ای و شناسایی دقیق قلعه با هدف کاهش مسائل و نامعینی‌ها ارائه شد. سپس با بهره‌گیری از مدل تحلیلی و نرم افزار ANSYS به آنالیز و تحقیق در طرح مقاوم سازی بستر سنگی قلعه با توجه به امکانات نرم افزاری و تکنولوژی روز دنیا پرداخته شد. در مدل سازی مصالح قلعه از مدل رفتاری دراکر-پراگر استفاده شد. پس از انجام تحلیل‌های استاتیکی و شبه دینامیکی سه بعدی، نتایج با شواهد و آسیب‌های موجود تطبیق داده شده است. در نهایت طرح مقاوم‌سازی سازه‌ای مدل‌سازی و تحلیل شد. خالو و همکاران همکاران [۳] آسیب‌پذیری مرقد دانیال نبی در شهر شوش را مورد بررسی قرار داده و آسیب‌های موجود به قسمت‌های مختلف ساختمان طبقه‌بندی و علت هر آسیب طبقه‌بندی شد. چندین آزمایش استاندارد در محل و آزمایشگاهی برای تعیین این مورد انجام شد. مهمترین ویژگی‌های مصالح، مشاهدات میدانی و نتایج آزمایشات نشان داد که ساختمان متحمل رطوبت صعودی شده است. از طریق انجام شبیه‌سازی‌های غیرخطی المان محدود و روش استاتیکی معادل و با استفاده از داده‌های محدود موجود از فاز قبلی ارزیابی، این نتیجه حاصل شد که حرم حضرت دانیال در برابر زلزله سطح طراحی آسیب‌پذیر است و برای بهبود عملکرد لرزه‌ای آن باید نسبت به زلزله و تدابیر یکپارچه سازی مناسب در نظر گرفته شود. در مطالعه‌ای توسط فراهانی و همکاران [۴]، رفتار لرزه‌ای دیوارهای بنایی مقاوم‌سازی شده با استفاده از تکنیک تسلیح مغزه به صورت عددی از طریق مدل‌سازی و تحلیل المان محدود کالیبره‌شده مورد بررسی قرار گرفت. مطالعه پارامتریک با در نظر گرفتن دیوارهای کنترلی بدون مقاوم سازی و دیوارهای مقاوم سازی شده با میلگرد مرکزی انجام شد. با در نظرگیری نسبت‌های ارتفاع به طول دیوار، مقاومت برشی ملات، قطر میلگرد و سوراخ مته قطرها در مجموع، ۴۵۰ تحلیل عددی انجام شد و تاثیر پارامتر در نظر گرفته شده در مقاومت برشی درون صفحه، سختی و شکل‌پذیری دیوارهای مقاوم‌سازی شده مورد بررسی قرار گرفت. محاسبات تحلیلی و روابط بر اساس فرمول‌های استاندارد ASCE/SEI 41-17 و معادلات

ساده‌سازی شده انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد که روابط پیشنهادی می‌تواند مقاومت برشی و سختی دیوارهای مقاوم سازی شده را با دقت قابل قبول نشان دهد. ابراهیمیان و همکاران [۵]، در مطالعه‌ای میدانی-عددی، به بررسی آسیب پذیری گنبد قابوس به عنوان بلندترین برج آجری جهان که در شمال ایران قرار دارد پرداختند. با ارائه پیشینه تاریخی و معماری این بنای تاریخی و مرمت‌های مهمی که عمدتاً در قرن گذشته انجام شده است، انواع آسیب‌های موجود و احتمالی سازه‌ای و معماری به تفصیل طبقه‌بندی و شرح داده شدند و برای هر مشکل، یک سری راه‌حل پیشنهادی ارائه شد. با استفاده از شبیه‌سازی غیرخطی اجزای محدود و روش نیروی استاتیکی جانبی معادل، نتیجه‌گیری شد که گنبد قابوس در حالت موجود آسیب‌پذیر است و بنابراین، استراتژی‌های مقاوم‌سازی باید برای بهبود عملکرد لرزه‌ای آن در نظر گرفته شود. زیارتگاه العسکری واقع در سامرا، عراق، نمونه‌ای قابل توجه از ساختمانی با معماری و ساخت و ساز کهن اسلامی است که در اثر بمباران‌های عظیم به شدت آسیب دید. در مطالعه‌ای توسط یکرنگ‌نیا و آقابابایی [۷۶] به خلاصه‌ای از اقدامات مهم در شناسایی بناهای حرم از نظر پیشینه سازه‌ای و معماری پرداخته شد. علاوه بر این، کاستی‌های یک سری از ترمیم‌های جزئی قبلاً انجام شده به تفصیل شرح داده شد. همچنین یک ارزیابی آسیب‌پذیری عددی بر روی بنای آسیب‌دیده با استفاده از داده‌های آزمایشی محدود بر روی این بنای تاریخی، انجام شد. نتایج مدل‌های عددی نشان داد که پایه‌های ترک خورده تحت وزن بخش تازه اضافه شده آسیب‌پذیر نیستند. آسیب‌پذیری مناره‌ها شدیدتر است و نیاز به تقویت‌کننده‌های سنگین در پایه‌های آن‌ها دارد. همچنین مطالعات مشابهی بر روی بناهای مختلف تاریخی از اقصی نقاط جهان انجام شده است [۱۵-۸].

۲- معرفی قلعه فلک الافلاک

قلعه فلک الافلاک در شهر خرم آباد واقع شده است و متعلق به دوره ساسانی می‌باشد (شکل ۱). فلک‌الافلاک با نام قلعه دوازده بُرجی هم شناخته می‌شود. این بنا بر فراز تپه‌ای مشرف به شهر خرم‌آباد و در نزدیکی رودخانه، در مرکز شهر قرار گرفته و چشم‌گیرترین اثر تاریخی و گردشگری در این شهر است. تاریخ ساخت این قلعه به دوره ساسانیان باز می‌گردد. این بنا در تاریخ ۱۰ مهر ۱۳۴۸ با شماره ثبت ۸۸۳ در فهرست آثار ملی ایران به ثبت رسیده است. معماری کنونی بنا، بیانگر الحاقات فراوانی است که در دوران‌های گوناگون بدان افزوده شده، بیشترین این تحولات مربوط به دوره صفویه تا قاجار می‌باشد. بر اساس مدارک تصویری تا حدود یکصد سال پیش بارویی دوازده برجی در پیرامون بنای فعلی وجود داشته، که اکنون آثار این برج از آن در محوطه شمال غربی قلعه، قابل مشاهده است. وسعت تقریبی بنا ۵۳۰۰ متر مربع، شامل ۸ برج دو صحن و ۳۰۰ جان پناه می‌باشد. ارتفاع بلندترین دیوار تا سطح تپه ۲۳ متر و مصالح آن از سنگ آجر، خشت و ملات گچ و آهک است. ورودی بنا به سمت شمال و در بدنه برج جنوب غربی تعبیه شده که پس از گذر از راهرو ورودی به حیاط اول وصل می‌گردد. ورودی قلعه فلک‌الافلاک در جبهه شمالی و در برج جنوب غربی به عرض ۱۰ متر و ۲۰ سانتیمتر و ارتفاع سه متر ساخته شده و در ساخت این بنا از مصالحی چون خشت، آجر قرمز و بزرگ، سنگ و ملات استفاده شده است. پلان بنای این قلعه تاریخی به صورت هشت ضلعی نامنظم است. قلعه بر روی یک طاق‌دیس طولانی قرار دارد که محور طاق‌دیس تقریباً غربی-شرقی می‌باشد. بستر قلعه از جنس سنگ‌های آهکی نسبتاً سخت می‌باشد که ضخامت لایه‌های آهکی از ۳۰ سانتی‌متر تا ۲ متر متغیر است. پلان بنا به شکل هشت ضلعی نامنظم است. محیط آن در حدود ۲۲۸ متر و مساحت آن ۵۳۰۰ متر مربع است. لازم به ذکر است شهر خرم‌آباد روی گسل زاگرس قرار گرفته است و این منطقه شدیداً زلزله‌خیز است. با توجه به رودخانه و گسل فرعی عبوری از زیر قلعه، آب‌های سطحی و بارندگی به داخل حیاط‌های قلعه و خاک روی سنگ بستر جریان می‌یابد. در محل گسل فرعی که از زیر قلعه عبور می‌کند، چاه آبی وجود دارد که باعث زه‌کشی منطقه می‌شود.



شکل ۱: نمایی از قلعه (بر گرفته از پایگاه داده داخلی اداره میراث فرهنگی لرستان).

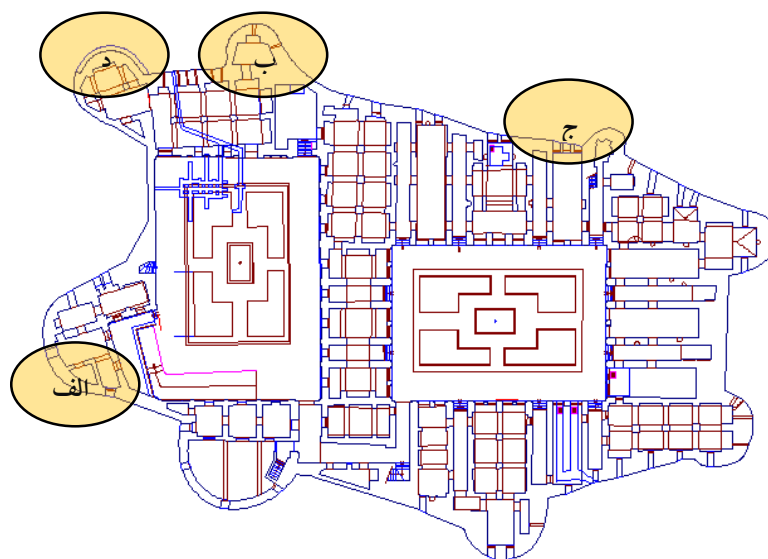
با اینکه این بنا در طول ۴ دهه گذشته در مقاطع متعددی، ترمیم و بازسازی جزئی و کلی را تجربه کرده است، بنای قلعه دارای آسیب‌های متنوعی است که محل اهم آنها در شکل ۲ نشان داده شده است و عبارت اند از [۱۶]:

الف) قسمت راست ورودی مشرف به خیابان که در آن به سبب نشست‌های ایجاد شده، پیاده رو ورودی قلعه دچار ترک خوردگی‌هایی شده است (شکل ۳ الف).

ب) برج شماره ۳ و باروهای الحاقی به آن که در آن فرسایش و ترک خوردگی در سنگ بستر به دلیل فرسایش و هوازدگی حاصل از خاک ارگانیکی روی آن و هوازدگی ملات قابل رویت است (شکل ۳ ب).

ج) قطعه سنگ‌های ضلع شمال شرقی که در آن ناپایداری تخته سنگ‌های پای شیب، خزش و اختلاف نشست سنگ بستر در زیر برج‌ها و فرسایش شدید الحاق کرسی چینی به سنگ بستر به چشم می‌خورد (شکل ۳ ج).

د) برج شماره ۸ که در آن نم کشیدگی بالارونده شدید در کرسی‌ها و دیوارها به چشم می‌خورد (شکل ۳ د).



شکل ۲: نقشه پلان قلعه و محل های آسیب های موجود.



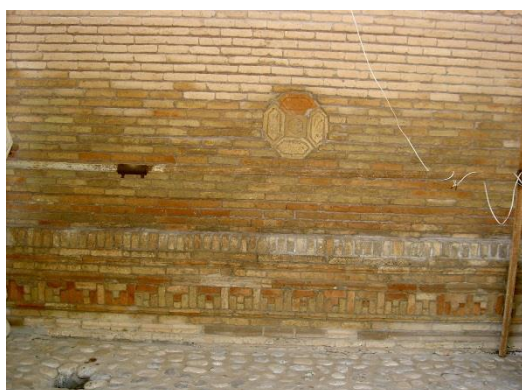
الف) آسیب های بخش الف (رجوع شود به شکل ۲).



ب) آسیب های بخش ب (رجوع شود به شکل ۲).



ج) آسیب‌های بخش ج (رجوع شود به شکل ۲).



د) آسیب‌های بخش د (رجوع شود به شکل ۲).

شکل ۳: آسیب‌های موجود در بخش‌های مختلف قلعه.

۳- روش و فرضیات شبیه سازی عددی

در این مطالعه به منظور بررسی آسیب‌پذیری لرزه‌ای قلعه فلک الافلاک، از شبیه سازی عددی به روش اجزای محدود در نرم افزار آباکوس^۱ بهره‌گیری شده است. از بین نگرش‌های موجود برای شبیه سازی عددی اجزای مصالح بنایی، به دلیل تاکید بر مدل سازی کل ساختمان و حجم عملیات محاسباتی، از روش ماکرو استفاده شده است. همچنین از روش تحلیل دینامیکی غیرخطی صریح^۲ به دلیل ماهیت شدید غیرخطی مصالح و ترد بودن آن و غیرممکن بودن همگرایی عددی در صورت استفاده از روش ضمنی استفاده شد. در این روش از روش حل عددی تفاضل مرکزی^۳ در انتگرال‌گیری از معادله حرکت و در طول مدت بارگذاری استفاده می‌شود. در روش مدل سازی عددی در این مطالعه، فرضیات متعددی در راستای بهینه‌سازی مدل عددی تا آنجا که امکان داشت اعمال گردید. همچنین عدم قطعیت‌ها و ابهام‌های متعددی در ارتباط با بخش‌های مختلف قلعه وجود داشت که لزوم برخی ساده‌سازی و توجیه فرضیات مربوطه را اجتناب ناپذیر می‌کرد. برخی از مهمترین فرضیات و ساده‌سازی‌ها به شرح زیر است: (۱) به عنوان یک فرض محافظه کارانه، هیچ گونه سختی و مقاومت بخش‌های غیر سازه‌ای قلعه در نظر گرفته نشد. با این حال جرم این بخش از قلعه به جرم قسمت سازه‌ای که در زیر آن قرار داشت اضافه گردید. (۲) با وجود سختی‌های بسیار برای انجام آزمایش‌های میدانی و نیز آزمایشگاهی بر روی اجزای مختلف تشکیل دهنده قلعه شامل آجر، ملات و منشور بنایی، انجام این آزمایش‌های مخرب که مستلزم نمونه‌گیری از بخش‌های مختلف سازه می‌باشد به دلیل محدودیت‌های موجود به لحاظ اهمیت تاریخی بنا، به تعداد محدودی میسر و نتایج آن در مدل اعمال گردید. در این مطالعه با توجه به تجربیات گذشته از

¹ Abaqus

² Dynamic Explicit

³ Central difference

پروژه‌های مرمت سازه‌های تاریخی، و با توجه به وجود محدودیت‌ها در تعیین مشخصات مکانیکی مصالح رو سازه قلعه، فرضیات زیر برای تعیین مشخصات مکانیکی مصالح برای مدل‌سازی در نظر گرفته شد: (۱) میانگین تخمینی مقاومت فشاری ملات با توجه به مشاهدات میدانی برابر ۳/۴۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. (۲) میانگین مقاومت فشاری آجر و خشت‌های به کار رفته در بخش‌های مختلف بنا، برابر ۷/۲۶ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. در مرحله بعدی و بر اساس فرضیات فوق‌الذکر باید مقاومت فشاری منشور بنایی بر اساس مقاومت‌های فشاری آجر و ملات استخراج گردد. اگرچه آزمایش‌های بسیاری در این مورد انجام شده است، اما از آنجا که بازه مقاومتی مصالح آن به طرز قابل ملاحظه‌ای بزرگ‌تر از مقادیر مقاومتی ملات و آجر سازه موجود می‌باشد، نتایج این آزمایش‌ها قابل استفاده در این مطالعات نیستند. همچنین روابطی که در این زمینه وجود دارند مقاومت فشاری منشور بنایی را وابسته با رابطه توانی مقاومت‌های فشاری آجر و ملات می‌کنند و تنها اختلاف آنها مقادیر توان‌های این مقاومت‌هاست. به عنوان مثال رابطه مورد توصیه یوروکد ۶ [۱۷] برای آجرها و ملات معمولی عبارت است از:

$$f_k = 0.6f_b^{0.65}f_m^{0.25} \text{ MPa} \quad (1)$$

که در آن f_m ، f_b و f_k به ترتیب مقاومت فشاری ملات، آجر و منشور بنایی می‌باشند. همچنین کاشیک و همکاران [۱۸] یک رابطه مشابه دیگر را بر اساس نتایج آزمایشگاهی متعدد پیشنهاد داد که بصورت زیر است:

$$f_k = 0.63f_b^{0.49}f_m^{0.32} \text{ MPa} \quad (2)$$

در این راستا مطالعات متعددی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به ردی و ویاس [۱۹] و نیز الرفایی و همکاران [۲۰] مراجعه نمود. خصوصیات مصالح مورد استفاده ایشان بسیار نزدیک به خصوصیات در دسترس مصالح موجود در بنای مورد مطالعه می‌باشد. بر اساس نتایج این مطالعات، مقدار مقاومت فشاری منشور بنایی در این مطالعه برابر ۲/۰ تا ۳/۰ مگاپاسکال می‌باشد. با در نظرگیری ضخامت ۲ سانتی‌متری ملات بین آجرها که سبب کاهش قابل ملاحظه مقاومت منشور بنایی در مقایسه با ضخامت مرسوم ۱ سانتی‌متری می‌گردد؛ مقدار حد پایین این مقاومت یعنی ۲/۰ مگاپاسکال به عنوان مقاومت فشاری منشور بنایی در این مطالعه انتخاب می‌گردد. همچنین ۵٪ مقاومت فشاری به عنوان مقدار محافظه کارانه‌ای برای مقاومت کششی منشور بنایی در نظر گرفته می‌شود. میزان حداکثر کرنش کششی قابل تحمل توسط منشور بنایی در فاز کششی ۱۰ برابر کرنش مرتبط با ترک خوردگی آن فرض شده است.

در مورد محاسبه مدول الاستیسیته منشور بنایی کاشیک و همکاران رابطه‌ای که مشابه رابطه پیشنهادی پیش استاندارد فیما ۳۵۶ [۲۱] بود را همانند زیر پیشنهاد داد.

$$E = 550f_c' \quad (3)$$

که در آن f_c' مقاومت فشاری منشور بنایی می‌باشد. با جایگذاری مقاومت فشاری منشور بنایی، مقدار مدول الاستیسیته آن برابر ۱/۱ گیگاپاسکال بدست می‌آید. لازم به ذکر است برای مدلسازی منحنی تنش-کرنش منشور بنایی در فاز فشاری از مدل رفتاری کنت و پارک [۲۲] استفاده شده است که مطابق رابطه زیر می‌باشد:

$$\frac{f_m}{f_m'} = 2 \frac{\epsilon_m}{\epsilon_m'} - \left(\frac{\epsilon_m}{\epsilon_m'}\right)^2 \quad (4)$$

که در آن f_m و ϵ_m به ترتیب تنش و کرنش منشور بنایی می‌باشند. همچنین f_m' و ϵ_m' مقاومت و کرنش مرتبط با مقاومت فشاری منشور بنایی می‌باشد. مقدار ϵ_m' از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۱۸]:

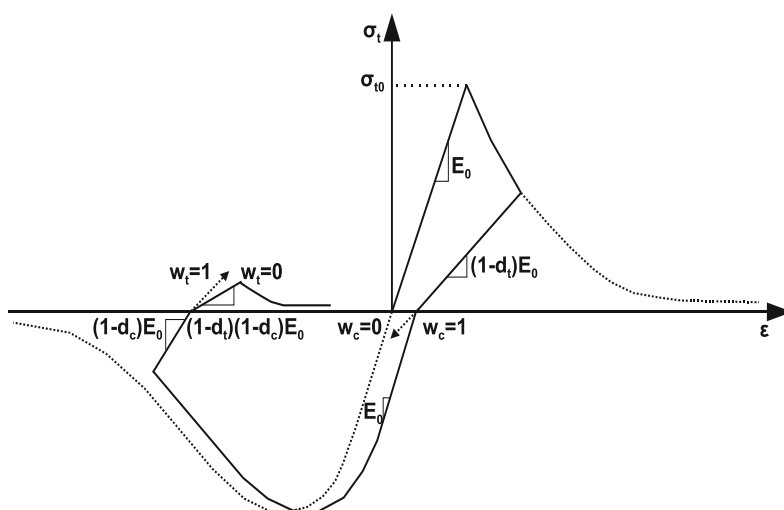
$$\epsilon_m' = c_j \frac{f_m'}{E_m^{0.7}} \quad (5)$$

که در آن f'_m و E_m به ترتیب مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته منشور بنایی می‌باشند. همچنین C_j از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$c_j = \frac{0.27}{f_j^{0.25}} \quad (6)$$

که در آن f_j مقاومت فشاری ملات می‌باشد. با جایگذاری مقادیر بدست آمده در بخش‌های قبلی، مقدار ϵ'_m برابر 0.004 بدست می‌آید. لازم به ذکر است لورنزو [۲۳] و برتو و همکاران [۲۴] در مطالعات عددی خود مدول الاستیسیته مصالح بنایی را در فشار و کشش یکسان فرض کردند. همچنین منحنی تنش-کرنش منشور بنایی در فاز کششی به صورت خطی تا مقاومت کششی آن بالا رفته و سپس بصورت اکسپوننشیل تا مقاومت صفر پایین می‌آید. همچنین نسبت پواسون مصالح بنایی برابر 0.15 در نظر گرفته شده است. جرم حجمی آجرها برابر $1544 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ و برای منشور بنایی مقدار $1850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ فرض شده است.

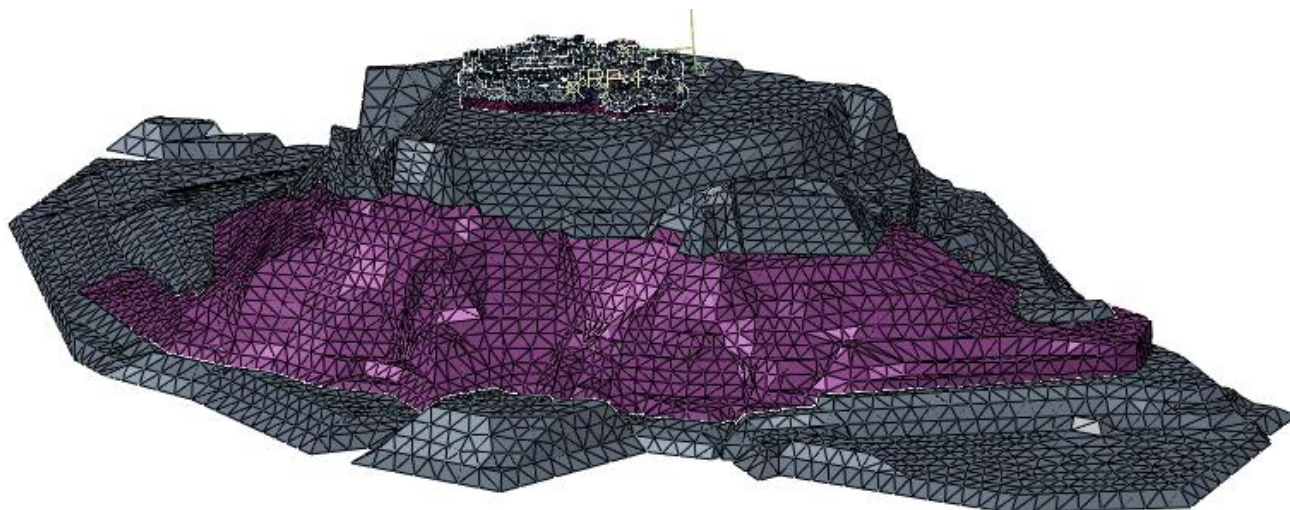
همانطور که گفته شد روش مورد استفاده برای شبیه‌سازی عددی قلعه از نوع ماکرو می‌باشد و به این ترتیب لازم است معیار خرابی برای مصالح بنایی در نظر گرفته شود. این معیار خرابی باید قادر باشد پلاستیسیته و خسارت را در فازهای رفتاری کششی و فشاری مصالح در نظر گرفته و نیز در رفتار چرخه ای مصالح اثرات زوال در سختی را مدل‌سازی نماید. از بین مدل‌های مصالح موجود در نرم افزار تجاری به کار گرفته شده، مدل رفتار پلاستیک با خسارت^۴ مورد استفاده قرار گرفت. بیان شماتیک رفتار مصالح بنایی در شکل ۴ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است این مدل مصالح دارای قابلیت‌های مختلف برای شبیه‌سازی بتن مسلح و نیز مصالح بنایی می‌باشد. همچنین معیار پلاستیسیته مورد استفاده در این مدل دراکر پراگر^۵ می‌باشد. مدل با استفاده از المان‌های کانتینیوم ۳ بعدی درجه اول انتگرال گیری کاهش یافته (C3D8R) مش شد. با انجام آنالیزهای متعدد حساسیت، تعداد 344331 المان برای شبیه‌سازی دقیق رفتار قلعه و 421357 برای شبیه‌سازی مجموعه خاک و سنگ زیرسازه تعیین گردید. لازم به ذکر است جرم قلعه برابر 92315 تن می‌باشد. اتصال بین اجزای مختلف قلعه بصورت گیردار فرض گردید. شکل ۵ نمایی از مدل عددی را در حالات مش شده نمایش می‌دهد. همچنین مشخصات خاک و سنگ زیرسازه از نتایج آزمایش‌های انجام شده در فاز قبلی استخراج شده است. به این ترتیب که مدول الاستیسیته سنگ برابر 44 مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. همچنین متوسط مدول الاستیسیته، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک به ترتیب برابر 20 مگاپاسکال، 21 درجه و 18 کیلوپاسکال می‌باشد.



شکل ۴: بیان شماتیک رفتار مصالح بنایی بر اساس مدل رفتار پلاستیک با خسارت.

⁴ Damage Plasticity Model

⁵ Drucker-Prager



شکل ۵: نمایی از مدل مش شده (رنگ طوسی بیانگر خاک و رنگ بنفش بیانگر سنگ است).

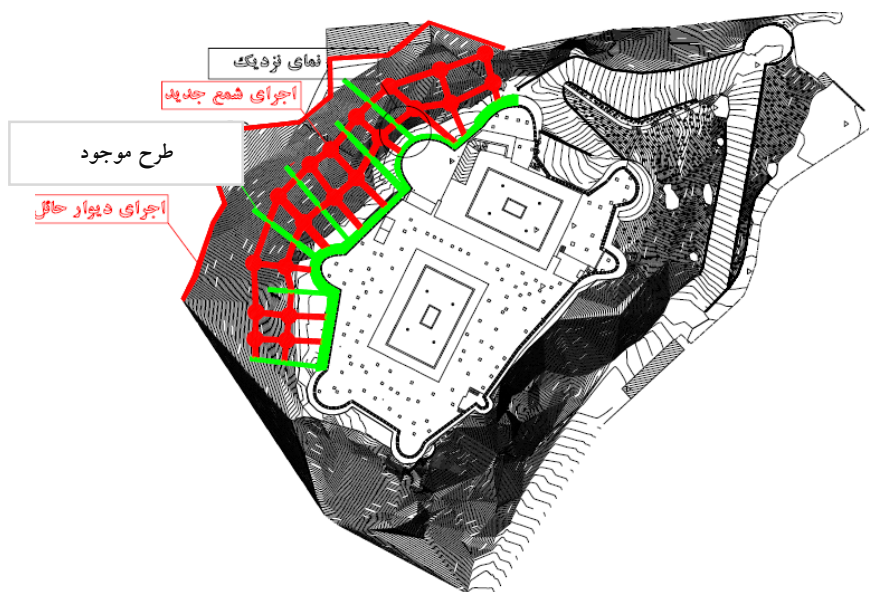
۴- بهسازی لرزه‌ای

با توجه به نتایج حاصله که حاکی از آسیب پذیری لرزه‌ای بنا است، نیاز به ارائه طرح بهسازی لرزه‌ای برای مجموعه بنا می‌باشد. با توجه به نتایج تحلیل سازه، مشاهدات میدانی، امکان‌سنجی مالی و فنی در بررسی سازه و تپه ی قلعه فلک الافلاک، ۵ روش نهایی جهت تقویت و بهسازی سازه مورد بررسی قرار گرفت. روش‌های بهسازی شامل روش‌های مربوط به بهسازی خاک و نیز روش بهسازی سازه می‌شود. روش‌های بهسازی خاک شامل استفاده از شمع درجای بتنی و اتصال به پی سازه جهت تثبیت خاک و نیز استفاده از ریز شمع جهت تثبیت خاک است. همچنین روش بهسازی بنا و دیوارها مشتمل بر استفاده از هسته مرکزی در دیوار بنایی جهت بهسازی دیوار می‌باشد.

۴-۱- بهسازی خاک

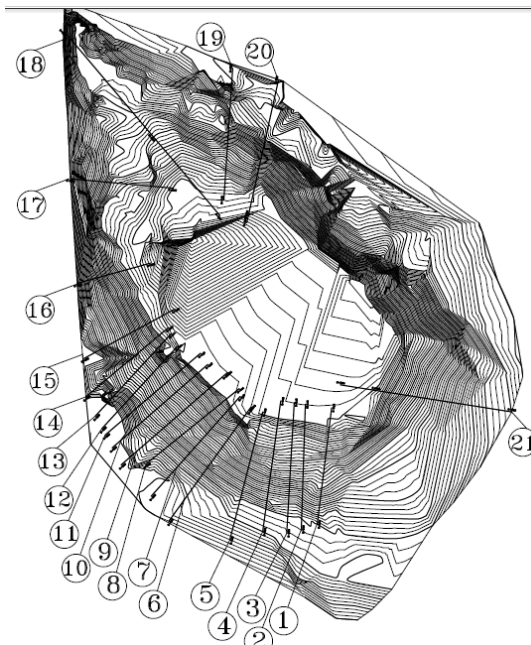
۴-۱-۱- بهسازی با شمع درجای بتنی و اتصال به پی سازه

با توجه به اینکه بخشی از اطراف سازه با خاک پوشیده شده است و همچنین وزن زیاد بنا (در حدود یکصد هزار تن)، جابجایی و روانگرایی خاک قابل پیش‌بینی می‌باشد. از این رو لازم است مانعی جهت جلوگیری از حرکت خاک ایجاد نمود و یکی از روش‌های موثر در این امر ایجاد شمع‌های درجا می‌باشد. علت انتخاب این روش در بخشی از اطراف قلعه به دلیل عدم دسترسی و استقرار دستگاه حفار جهت اجرای ریز شمع می‌باشد. ضمناً این شمع‌ها در مسیر خود به نحوی قرار می‌گیرند که به قسمت‌های ساخته شده از طرح موجود متصل می‌گردد. لازم به ذکر است این شمع‌ها در کنار سازه نگهبان بتن مسلحی که در مداخلات قبلی به بنا اضافه شده بود، شبکه‌ای یکپارچه شامل المان‌های قائم و المان‌های افقی در قالب شناژ رابط را تشکیل داده و کاملاً به سازه اصلی اتصال خواهند داشت؛ در غیر این صورت تاثیر چندانی در پایدار سازی سازه نخواهند داشت. شکل ۶ پلان موقعیت قرارگیری شمع‌های بتنی نمایش داده شده است.

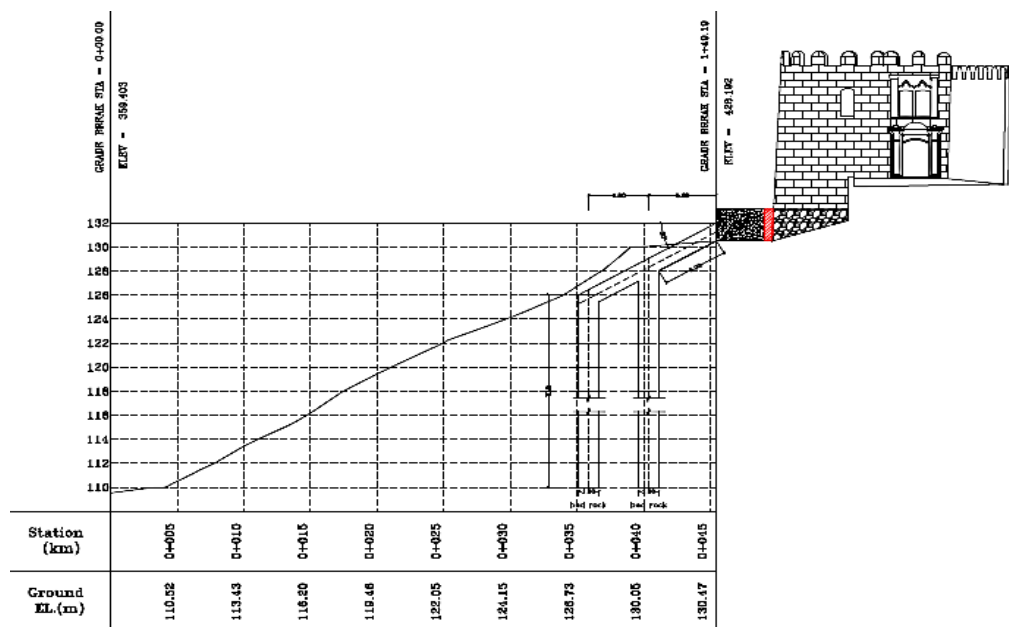


شکل ۶: پلان موقعیت شمع‌های درجا.

با توجه به گستردگی پهنه خاکی ضلع جنوبی بنا استفاده از یک ردیف شمع جهت بهسازی و تقویت خاک کافی نبوده و می-بایست از دو ردیف شمع بتنی درجا به این منظور استفاده نمود. با توجه به متغیر بودن شیب تپه می-بایست نحوه قرارگیری این شمع‌ها و فاصله آن از سازه در برش‌هایی از تپه نمایش داده شود که بتوان درک مناسبی از نحوه قرارگیری این شمع‌ها بدست آورد. در شکل ۷ برش-هایی از توپوگرافی تپه و محل قرارگیری شمع بتنی نشان داده شده است.

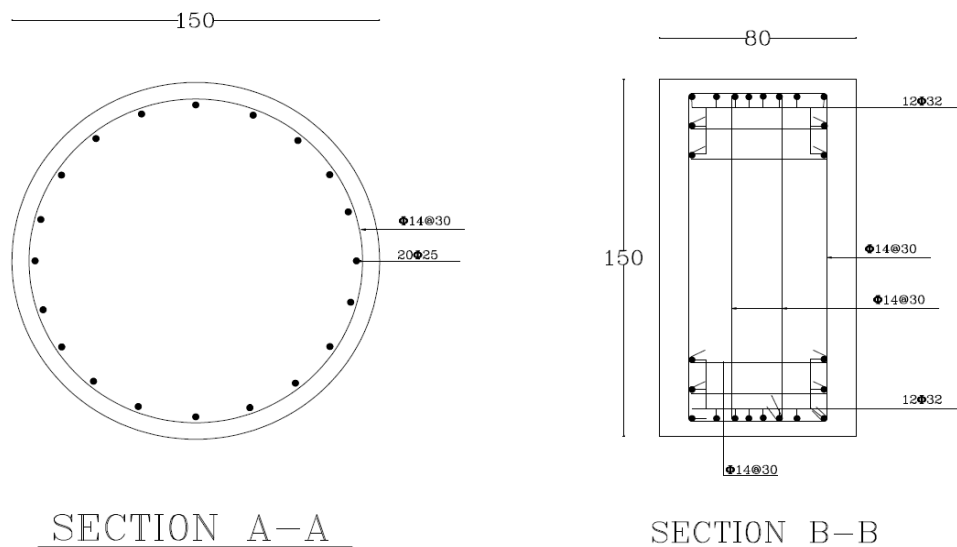


الف) پلان شماره گذاری برش از توپوگرافی تپه.



SECTION 2

ب) برش ۲ از پلان تپه.

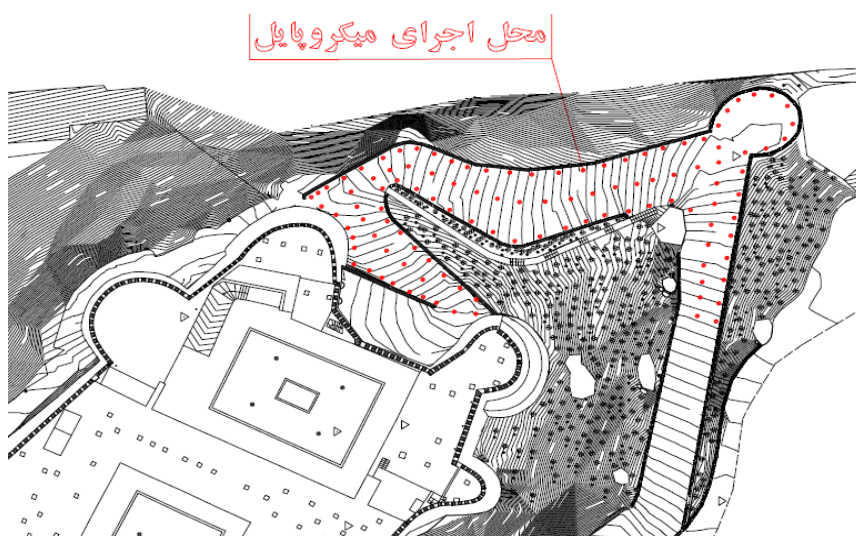


ج) جزئیات شمع بتنی و تیر جدید.

شکل ۷: محل قرارگیری و جزئیات شمع‌های بتنی.

۲-۱-۴- بهسازی و تثبیت خاک در قسمت رمپ با استفاده از ریز شمع

با توجه به اینکه برخی نقاط از جمله مسیر عبور جاده ورودی قلعه که مشکل رانش خاک را دارد، امکان اجرای دیوار حائل یا شمع درجا نمی‌باشد، استفاده از این روش در بهسازی و تقویت خاک موثر بوده و مانع حرکت خاک در جبهه شمال غربی و نشست ناشی از این حرکت می‌گردد. با توجه به اینکه در روش ریز شمع از دستگاه حفار استفاده می‌شود، دقت و سرعت این کار افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است با توجه به اینکه حرکت دستگاه حفار به صورت دورانی و چرخشی می‌باشد، هیچگونه ضربه و لرزشی به بنا وارد نمی‌شود. به عنوان نمونه در دو نقطه در مجاور دیوار بنا گمانه خاک جهت آزمایش حفر شده و مشکلی برای بنا ایجاد ننموده است. در این روش ریز شمع‌ها به صورت متوالی در کنار مسیر جاده در فواصل در حدود ۲ متری و ارتفاع متغیر بین ۱۵ الی ۴ متری با توجه به اینکه شیب رمپ کاهش می‌یابد، نصب می‌گردد. در شکل ۸ محل و تعداد ریز شمع‌های مورد نیاز نشان داده شده است.

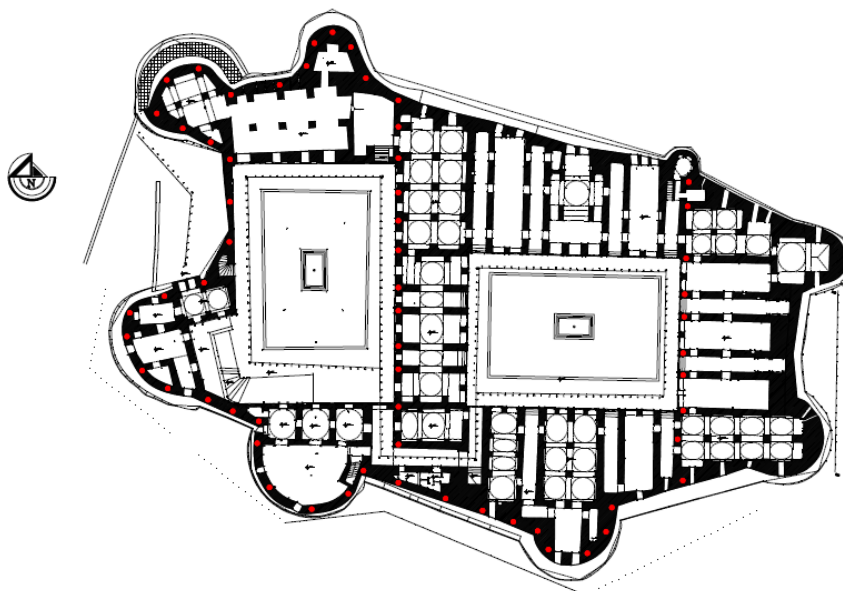


شکل ۸: محل اجرای ریز شمع‌ها در اطراف بنا.

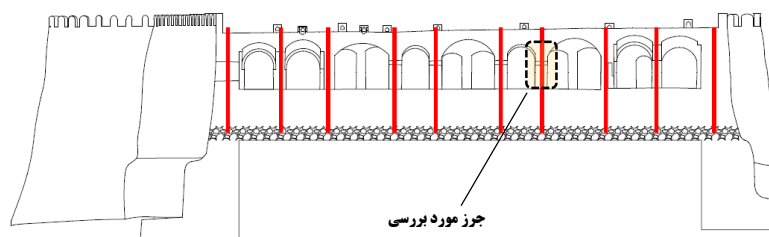
۴-۲- بهسازی و ترمیم دیوار بنا با استفاده از هسته مرکزی

در این روش از روی سقف سازه و قسمت میانی، درون دیوار به صورت عمودی سوراخی به قطر حدود ۱۰ سانتیمتر از روی سقف تا روی کرسی چینی و پی دیوار حفر نموده، سپس در داخل این سوراخ ۳ عدد میلگرد GFRP به قطر ۸ میلیمتر جهت جلوگیری از زنگ زدگی قرارداده و سپس داخل آن را با استفاده پمپ از گروت پایه سیمانی و خود متراکم پر می‌نماییم. در این روش نیازی به اتصال بالا و پایین میلگردها نبوده و نیاز به تزریق گروت نمی‌باشد و تنها گروت بصورت ثقلی ریخته می‌شود. با توجه به اختلاف مصالح داخل دیوارها نمی‌توان از تزریق استفاده نمود، چون ممکن است فشار وارد شده از دستگاه تزریق باعث جدا شدن و گسستن آجرهای دیوار گردد. با توجه به وجود بازشوهای مختلف در محل‌هایی که می‌بایست هسته مرکزی اجرا گردد، محل دقیق این عملیات بر روی پلان بنا در شکل ۹ نشان داده شده است. در مجموع بر روی دیوارهای بنا ۶۰ عدد هسته حفر و اجرا می‌گردد. با توجه به اینکه ممکن است لرزش دستگاه حفاری بر روی سقف بنا مشکلاتی را ایجاد نماید، با بررسی و استعمال از شرکت سازنده این دستگاه، لازم است نسبت به انتخاب مدلی از دستگاه را اقدام نمود که هم وزن بسیار پایینی داشته، هم به صورت دستی قابلیت حمل بر روی سقف بنا داشته باشد. لازم به ذکر است دور گردش این دستگاه کاملاً قابل کنترل بوده و به مقداری که آسیبی به دیوار بنا نزند می‌توان از آن استفاده نمود.

به منظور مدل‌سازی هسته‌های مرکزی در نرم‌افزار، مقطع سالید و مصالح گروت به بخش‌های گروت که با استفاده از پارتیشن بندی از بخش مصالح بنایی دیوارها مجزا شدند اختصاص داده شد. سه میلگرد GFRP به صورت یک میلگرد واحد با قطر معادل درون بخش‌های گروت با استفاده از المان‌های تیر ۳ بعدی با تابع شکل درجه اول و طول ۰/۵ متر شبیه سازی شد. اندرکنش میلگرد با گروت و نیز اندرکنش گروت با سطح اطراف آن در دیوار مصالح بنایی به صورت اتصال کامل (Full bond/embedded) در نظر گرفته شد. درجات آزادی دو انتهای میلگردها بسته نشد ولی این درجات به دلیل تعریف اندرکنش ذکر شده، تابع درجات آزادی گره‌های گروت در مجاورت آن نقاط بودند.



الف) پلان محل اجرای هسته مرکزی.

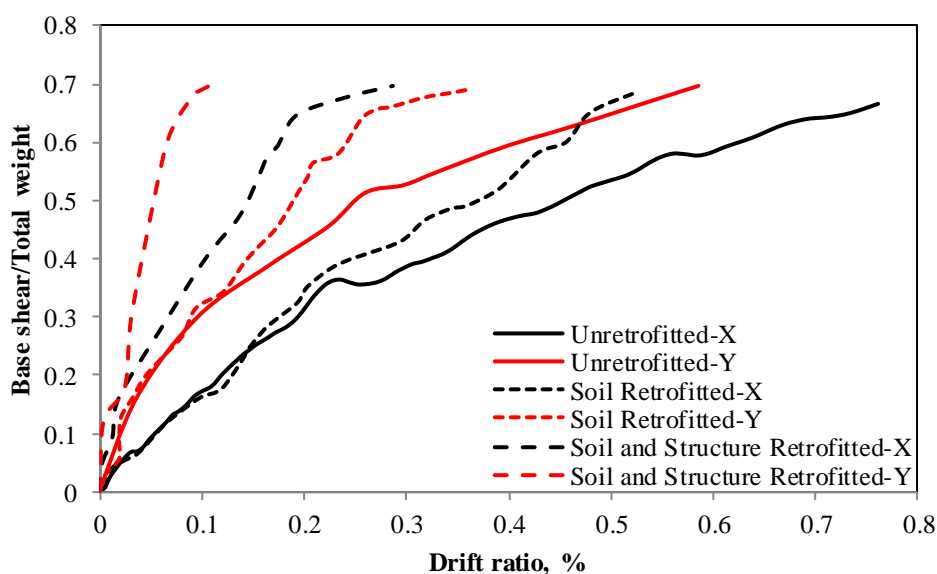


(ب) برش دیوار بنا و محل اجرای هسته مرکزی.

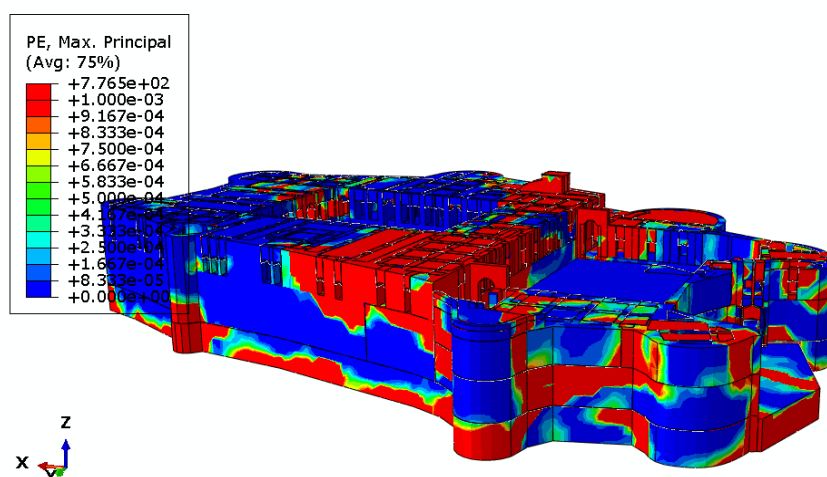
شکل ۹: جزئیات اجرایی هسته مرکزی.

۵- نتایج

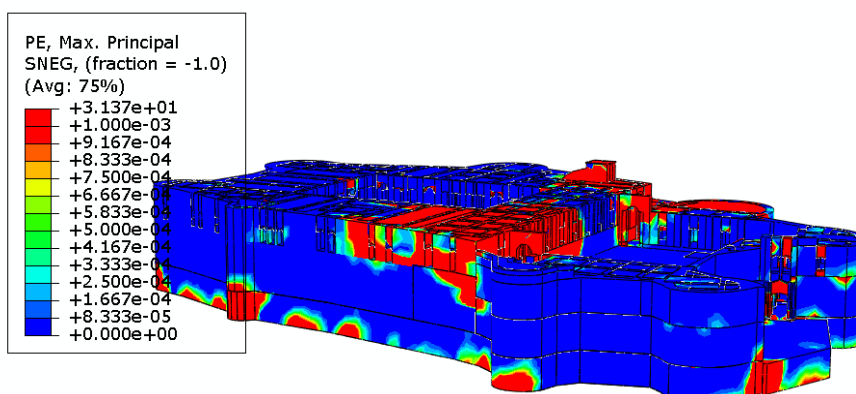
به منظور بررسی آسیب پذیری لرزه‌ای قلعه، بار زلزله به صورت استاتیکی و با شدتی برابر ۰/۷۵٪ وزن لرزه‌ای قلعه بصورت خطی با ارتفاع (مثلثی معکوس) و نیز متناسب با جرم قسمت‌های مختلف قلعه به آن وارد گردید. نمودار برش پایه-جابجایی بالای قلعه (میانگین جابجایی جانبی برج‌های قلعه) تحت بارگذاری زلزله در راستای X و Y برای بنا در وضع موجود و بهسازی شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، رفتار بنا در دو راستا تقریباً مشابه هم است. البته مقادیر جابجایی‌ها در راستای Y هم در حالت موجود و هم در حالت بهسازی شده کمی کمتر از جابجایی‌های راستای X در همان سطح نیرویی است. این امر ناشی از وجود جرزه‌های بیشتر در راستای Y می‌باشد. به منظور بررسی میزان تاثیر سیستم بهسازی سازه و خاک به تنهایی، دو تحلیل را بر روی مدل‌های دارای بهسازی خاک و فاقد بهسازی سازه انجام شد و نتایج آن در شکل ۱۰ قابل رویت است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در ابتدا، بهسازی خاک تاثیر چندانی در منحنی نسبت به مدل‌های بهسازی نشده ندارند. اما با افزایش نیروی جانبی و جابجایی‌های نسبی، بهبود در عملکرد مجموعه به صورت نسبی قابل ملاحظه است. این امر نشان دهنده لزوم بهسازی خاک علاوه بر بهسازی سازه به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای مجموعه بنا و کاهش آسیب‌پذیری آن خصوصاً در نیازهای لرزه‌ای بالا است. به طوری که در نیاز نیروی لرزه‌ای برابر ۰/۷۰٪ وزن سازه، میزان جابجایی‌های نسبی تجربه شده برای سازه مقاوم سازی نشده، بهسازی خاک، و بهسازی خاک و سازه به ترتیب برابر ۰/۵۸، ۰/۳۶ و ۰/۱۱ در راستای X و راستای Y است. بر اساس نتایج این شکل، سیستم بهسازی به کار گرفته شده سبب کاهش مقادیر زوال در سختی برای بنای موجود شده که این امر بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه را در پی خواهد داشت. همچنین کانتور کرنش‌های اصلی بیشینه در قلعه تحت بارگذاری جانبی وضع موجود و بهسازی شده در راستای X و Y به ترتیب در شکل ۱۱ و ۱۲ نمایش داده شده است. نتایج این دو شکل گویای این امر است که پیاده سازی روش بهسازی پیشنهادی سبب کاهش شدت و نیز گسترده‌تری ترک‌ها (معادل کرنش‌های اصلی بیشینه) شده است. این امر با توجه به نمودار نیرو-جابجایی نیز مشخص بود که در هر سطح نیرویی، جابجایی‌های کمتری در بنای بهسازی شده حاصل شده است که این امر متناظر با خسارات کمتر در جرزه‌ها خواهد بود. لازم به ذکر است بخش‌های انتهایی تحلیل‌ها به دلیل افزایش انرژی جنبشی کل مدل در مقایسه با انرژی داخلی آن گزارش نشده است؛ به طوری که در حوالی شدت بار ۰/۷۰٪، نسبت انرژی جنبشی کل مدل به انرژی داخلی آن از ۰/۲۰٪ تجاوز کرد. این امر ناشی از روش دینامیکی صریح مدل بود به طوری که سرعت و شتاب در تحلیل تاثیر گذار شده و نیز ناشی از ماهیت نیرو کنترل بودن تحریک است به طوری که امکان کنترل تغییرمکان‌ها وجود نداشته و سازه با افزایش خسارت‌ها شتاب می‌گیرد. لازم به ذکر است علت به کارگیری نیرو کنترل بودن تحریک، شکل پیچیده بنا و جلوگیری از تمرکز خسارت ناشی از اعمال جابجایی به نقاط مشخص بوده است.



شکل ۱: نمودار برش پایه-جابجایی بالای قلعه تحت بارگذاری زلزله در راستاهای X و Y در حالات موجود و مقاوم سازی شده.

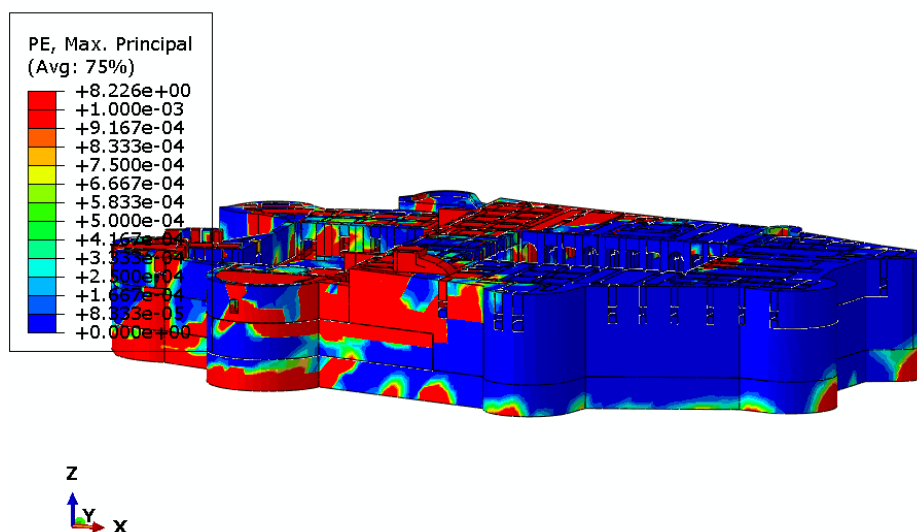


الف) بنای موجود.

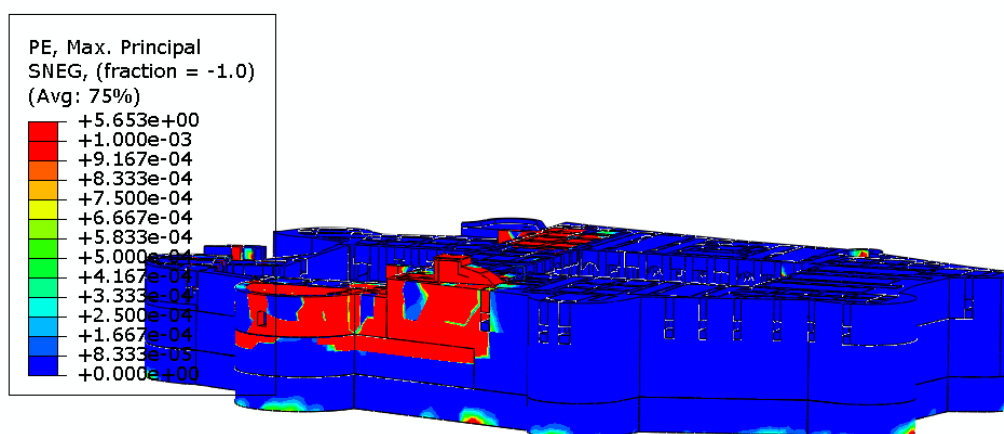


ب) بنای بهسازی شده.

شکل ۱۱: کانتور کرنش‌های اصلی بیشینه در قلعه تحت بارگذاری جانبی وضع موجود و بهسازی شده در راستای X.



الف) بنای موجود.



ب) بنای بهسازی شده.

شکل ۱۲: کانتور کرنش‌های اصلی بیشینه در قلعه تحت بارگذاری جانبی وضع موجود و بهسازی شده در راستای Y.

به منظور بررسی رفتار اجزای سازه‌ای بنا مورد بررسی، نمونه‌ای از جرزهای موجود در بنا در دو حالت بودن مقاوم سازی و مقاوم سازی شده مورد بررسی قرار گرفت. این جرز در شکل ۹ ب نمایش داده شده است. لازم این ذکر است با در نظر گیری عدم وجود آیین‌نامه مستند ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های تاریخی، از حالات حدی و معیارهای پذیرش موجود در ویرایش دوم نشریه ۳۶۰ [25] به منظور بررسی عملکرد این جرز استفاده شده است. با وجود مشخصات مصالح مذکور در بخش ۴، میزان نیروی قائم ایجاد شده در جرز برابر $28/4$ کیلو نیوتن و طول و ارتفاع به ترتیب $0/8$ و $2/1$ متر، حالت حدی این جرز حرکت گهواره‌ای بوده و میزان ظرفیت نیرویی این جرز در حالت مقاوم سازی نشده برابر $4/8$ کیلو نیوتن می‌باشد که نزدیکی قابل قبولی با مقدار $5/3$ کیلو نیوتن مستخرج از تحلیل دارد. بر اساس معیارهای پذیرش مندرج در این نشریه برای جرز مورد بررسی، میزان تغییر مکان نسبی برابر $0/52$ و $0/79$ به ترتیب برای سطوح عملکرد ایمنی جانی و آستانه فروریزش تعیین می‌شود. میزان تغییر مکان نسبی این جرز در دو مدل مقاوم سازی نشده و مقاوم سازی شده در انتهای تحلیل بر اساس شکل ۱۰ بر اساس تحلیل‌های انجام شده به ترتیب برابر $0/91$ و $0/44$ می‌باشد. این امر نشان دهنده تاثیر قابل توجه روش مقاوم سازی به کار گرفته شده در کاهش آسیب‌پذیری لرزه‌ای جرزهای بنای مورد بررسی دارد.

۶- نتیجه گیری

- در این مطالعه به بررسی آسیب پذیری لرزه‌ای قلعه فلک الافلاک واقع در استان لرستان از طریق مشاهدات میدانی و شبیه‌سازی عددی پرداخته شد. در ابتدا، آسیب‌های وارده به اجزای مختلف بنا مورد بررسی قرار گرفت. اهم نتایج حاصله عبارت‌اند از:
- (۱) با تحلیل به روش اجزای محدود بنا، مشخص گردید بنای مورد نظر از نظر لرزه‌ای آسیب‌پذیر بوده و نیاز به بهسازی لرزه‌ای آن وجود دارد.
 - (۲) با توجه به اهمیت تاریخی بنا، گزینه‌های بهسازی واجد شرایط علاوه بر تاثیر قابل توجه در بهبود عملکرد لرزه ای بنا، نباید ظاهر بنا را دستخوش تغییر کند. سیستم بهسازی شامل استفاده از شمع‌های درجا و ریز شمع‌ها به منظور کنترل رانش خاک و نیز استفاده از هسته مرکزی مسلح در جرزهای بنا بود.
 - (۳) نتایج تحلیل‌های استاتیکی معادل غیرخطی نشان داد، آسیب‌پذیری بنای بهسازی شده به میزان قابل ملاحظه‌ای سبب کاهش مقدار و گستردگی کرنش‌های اصلی بیشینه متناظر با ترک خوردگی در مصالح بنایی شده است.
 - (۴) استفاده از هسته‌های مسلح در جرزها سبب کاهش زوال در سختی در نمودار نیروی برش پایه بر اساس جابجایی بالای بنا شده است که از جمله پارامترهای مهم در بهبود عملکرد لرزه‌ای می‌باشد.
 - (۵) مقایسه نتایج مدل بدون مقاوم‌سازی، با مقاوم سازی خاک و نیز با مقاوم سازی سازه و خاک بیانگر این است که مقاوم سازی خاک سبب بهبود عملکرد بنا در نیازهای لرزه‌ای بالاتر می‌شود؛ به طوری که مقاوم سازی سازه و خاک سبب کاهش جابجایی جانبی بالای سازه به میزان بین ۴۵ تا ۷۰٪ در مقایسه با حالت مقاوم سازی خاک (بدون مقاوم سازی سازه) می‌شود.
 - (۶) بررسی جابجایی نسبی نمونه‌ای از جرزها نشان دهنده این بود که سیستم مقاوم سازی پیشنهادی سبب کاهش حدود ۵۰ درصدی در جابجایی جانبی جرز در نیاز لرزه‌ای نیرویی برابر ۷۰٪ وزن لرزه‌ای سازه شده و به این ترتیب منجر به کاهش قابل ملاحظه در آسیب پذیری آن می‌شود.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از حمایت‌های اداره میراث فرهنگی استان لرستان کمال سپاسگزاری را دارند.

مراجع

- [1] Amirshah karami, A., Satatrian H.H., and Ensani, A., (2008). Retrofit and Numerical Simulation of Falakol Aflak Castle, In: *2nd National Conference on Strengthening and Retrofitting*, Kerman, Iran.
- [2] Amirshah karami, A., Khazaie, J., Nomiri, M. and Mahdiabadi, M., (2008). Numerical Study of Interaction of Falakol Aflak Castle and the Retrofit Elements of the Rock Foundation, In: *3rd Iranian Rock Mechanics Conference*, Tehran, Iran.
- [3] Khaloo, A., Khoshnevis, A., & Yekrangnia, M. (2019). On the vulnerability of the Shrine of Prophet Daniel through field observation and numerical simulation. *Engineering Failure Analysis*, 102, 237-259.
- [4] Farahani, E. M., Yekrangnia, M., Rezaie, M., & Bento, R. (2021). Seismic behavior of masonry walls retrofitted by centercore technique: A numerical study. *Construction and Building Materials*, 267, 120382.
- [5] Ebrahimiyan, M., Golabchi, M., & Yekrangnia, M. (2017). Field observation and vulnerability assessment of Gonbad-e Qābus. *Journal of Architectural Engineering*, 23(4), 05017008.
- [6] Yekrangnia, M., & Mobarake, A. A. (2016). Restoration of historical Al-Askari shrine. I: Field observations, damage detection, and material properties. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(3), 04015030.

- [7] Yekrangnia, M., & Mobarake, A. A. (2016). Restoration of historical Al-Askari shrine. II: Vulnerability assessment by numerical simulation. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(3), 04015031.
- [8] Yekrangnia, M. (2018). *Advanced Design Examples of Seismic Retrofit of Structures*. Butterworth-Heinemann.
- [9] Betti, M., Galano, L., & Lourenço, P. B. (2021). Territorial seismic risk assessment of a sample of 13 masonry churches in Tuscany (Italy) through simplified indexes. *Engineering Structures*, 235, 111479.
- [10] Cámara, M., Romero, M., Pachón, P., Compán, V., & Lourenço, P. B. (2021). Integration of disciplines in the structural analysis of historical constructions. The Monastery of San Jerónimo de Buenavista (Seville-Spain). *Engineering Structures*, 230, 111663.
- [11] Zarrabi, M., & Valibeig, N. (2021). 3D modelling of an Asbad (Persian windmill): a link between vernacular architecture and mechanical system with a focus on Nehbandan windmill. *Heritage Science*, 9(1), 1-11.
- [12] Najafgholipour, M. A., Darvishi, H., & Maheri, M. R. (2021). The influence of the frequency content of ground motion on the nonlinear dynamic response and seismic vulnerability of historical masonry towers. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(7), 2919-2940.
- [13] Dais, D., Sarhosis, V., Smyrou, E., & Bal, I. E. (2021). Seismic intervention options for multi-tiered Nepalese Pagodas: The case study of Jaisedewal temple. *Engineering Failure Analysis*, 123, 105262.
- [14] Aghabeigi, P., & Farahmand-Tabar, S. (2021). Seismic vulnerability assessment and retrofitting of historic masonry building of Malek Timche in Tabriz Grand Bazaar. *Engineering Structures*, 240, 112418.
- [15] Pirchio, D., Walsh, K. Q., Kerr, E., Giongo, I., Giaretton, M., Weldon, B. D., ... & Sorrentino, L. (2021). Integrated framework to structurally model unreinforced masonry Italian medieval churches from photogrammetry to finite element model analysis through heritage building information modeling. *Engineering Structures*, 241, 112439.
- [16] Amirshah karami, A., Ensani, A., and Satatrian H.H., (2000). Engineering Geology of Falakol Aflak Historic Castle, In: *Engineering Geology and Environment of Iran*, Tehran, Iran.
- [17] Eurocode 6 (1996): Design of masonry Structures, Simplified Calculation Methods for Unreinforced Masonry Structures.
- [18] Kaushik, H. B., Rai, D. C., & Jain, S. K. (2007). Stress-strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression. *Journal of materials in Civil Engineering*, 19(9), 728-739.
- [19] Reddy, B. V., & Vyas, C. V. U. (2008). Influence of shear bond strength on compressive strength and stress-strain characteristics of masonry. *Materials and structures*, 41(10), 1697-1712.
- [20] L.E. El-Refai, A.E. Salama, E.H. Morsy, Analytical and Experimental Investigation of Masonry in Compression, Proceeding of the First National Conference on the Science and Technology of Buildings, Khartoum, 1984
- [21] FEMA-356 (2000). Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings American Society of Civil Engineers.
- [22] Kent, D. C., & Park, R. (1971). Flexural members with confined concrete. *Journal of the Structural Division*, 97(7), 1969-1990.
- [23] Lourenço P. J. B. B. (1996), *Computational strategies for masonry structures*, PhD Thesis, Delft University of Technology.
- [24] Berto, L., Saetta, A., Scotta, R., & Vitaliani, R. (2005). Failure mechanism of masonry prism loaded in axial compression: computational aspects. *Materials and structures*, 38(2), 249-256.
- [25] Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision, (2014). Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings (Code No. 360). Tehran, Iran.