



Seismic vulnerability analysis and retrofitting of the Ghadaki historic house

Gholamreza Davari*

M. A. in SAHC, Faculty of Architecture and Urbanism, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran

Samira Ghareayaghi

M. A. Student in SAHC, Faculty of Architecture and Urbanism, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran

Farhad Akhondi

Associate Professor, Faculty of Architecture and Urbanism, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran

Abstract

Iran is among top countries worldwide in terms of architectural heritage, and it has been located in an earthquake-prone region. To this end, preservation of historical buildings is of critical importance. The first task to address this issue is to determine the structural elements of the building as well as the mechanical properties of its materials and evaluate its response to earthquakes. The Ghadaki house is attributed to the middle period of the Qajar era in the nineteenth century and was recently included in the group of buildings belonging to Tabriz Islamic Art university. This research is focused on the seismic assessment of this structure and proposes appropriate retrofitting methods to improve its seismic performance. The subject is studied in three main steps; The researchers of Tabriz Art University have used non-destructive tests to preserve the originality of the building, and in this research, the results of these tests, which include the compressive strength of the building prism and the modulus of elasticity, were used. These values are equal to 0.43 and 843.9 MPa respectively. Then, a seismic safety analysis has been performed by 3Muri software, which uses an equivalent frame model to model masonry walls. The seismic safety index of this building was obtained to be less than 1, which means the structure lacks enough safety. In the last step, we propose three different methods for retrofitting and it was recommended to use all three methods simultaneously, which results in an improved seismic safety index lying between 2 and 4.45.

Keywords: Seismic analysis, Retrofitting scheme, Numerical modelling, Safety index, 3Muri.

* Corresponding Author, Email: g.davari@tabriziau.ac.ir

ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای و ارائه راهکارهای استحکام‌بخشی خانه تاریخی قدکی

غلامرضا داوری

کارشناسی ارشد استحکام‌بخشی بناهای تاریخی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، ایران

سمیرا قره ایاقی

دانشجوی کارشناسی ارشد استحکام‌بخشی بناهای تاریخی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، ایران.

فرهاد آخوندی

دانشیار گروه استحکام‌بخشی بناهای تاریخی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، ایران.

چکیده

کشور ما ایران، از لحاظ میراث معماری و فرهنگی جزء چند کشور مطرح دنیاست و در منطقه پر خطر لرزه‌ای واقع شده است. از این رو، حفاظت و حراست از این بناها در برابر زلزله امری حیاتی است. ابتدایی‌ترین و شاید مهم‌ترین کار، شناخت اجزای سازه‌ای بنا، مشخصات مکانیکی مصالح و بررسی رفتار بنا در مقابل بارهای ثقلی و جانبی در جهات مختلف است. خانه قدکی از ساختمان‌های دوره قاجار بوده که با تغییر کاربری، به‌عنوان یکی از ساختمان‌های دانشگاه هنر اسلامی تبریز در حال استفاده است. این پژوهش بر ارزیابی لرزه‌ای این بنا متمرکز شده و روش‌های استحکام‌بخشی مناسبی را برای بهبود عملکرد لرزه‌ای آن پیشنهاد می‌کند. مطالعه بنا در سه مرحله صورت پذیرفت: پژوهشگران دانشگاه هنر تبریز برای حفظ اصالت بنا از آزمایش‌های غیرمخرب استفاده کرده‌اند و در این پژوهش از نتایج این آزمایشات که شامل مقاومت فشاری منشور بنایی و مدول الاستیسیته است، استفاده شد. این مقادیر به ترتیب برابر با $0.43/0.9$ و 84.3 مگاپاسکال هستند. سپس تحلیل ایمنی لرزه‌ای توسط نرم‌افزار 3Muri، که از مدل قاب معادل برای مدل‌سازی دیوارهای بنایی استفاده می‌کند، انجام شد. شاخص ایمنی لرزه‌ای این بنا کمتر از ۱ به دست آمد؛ چنانچه این شاخص کمتر از عدد ۱ باشد، بیانگر آن است که سازه ایمنی لازم را ندارد. لذا سه راهکار برای استحکام‌بخشی این بنا پیشنهاد و توصیه شد که از هر سه روش به‌صورت هم‌زمان استفاده شود؛ این امر باعث افزایش شاخص ایمنی در جهات و سطوح عملکرد مختلف بین ۲ الی $4/45$ برابر شد.

کلیدواژه‌ها: ارزیابی لرزه‌ای، طرح استحکام‌بخشی، مدل‌سازی عددی، شاخص ایمنی، 3Muri.

۱- مقدمه

سازه‌های تاریخی ممکن است به دلیل حوادث طبیعی مانند زلزله و سیل یا عوامل انسانی مانند جنگ‌ها، علل اقتصادی، تغییر کاربری و یا اتمام طول عمر طبیعی سازه به ویرانه تبدیل شوند. بناهای تاریخی نه تنها آثار هنری معماری، بلکه شاهدان و اسنادی زنده برای سنت‌ها، صنعت، تکنولوژی و مصالح قدیمی هستند. ازدیگرسو، میراث فرهنگی، اعم از تک‌بناها و محله‌های تاریخی، به جذب گردشگران کمک می‌کنند که می‌توانند به لحاظ اقتصادی نیز ارزشمند باشند. خانه قدکی با بیش از ۱۷۰ سال قدمت از بناهای قدیمی محله مقصودیه به شمار می‌رود. با توجه به زلزله‌خیز بودن شهر تبریز و قرارگیری آن در محدوده با خطر لرزه‌خیزی بسیار زیاد، بررسی رفتار لرزه‌ای بناهای با اهمیت تاریخی، فرهنگی و عملکردی، ضروری به شمار می‌رود. با توسعه تکنولوژی و به خصوص نرم‌افزارهای تحلیل سازه، راه برای ارزیابی ایمنی لرزه‌ای سازه‌های بنایی و ارائه روش استحکام‌بخشی هموارتر شده و مطالعات بسیاری در سراسر جهان در این راستا انجام شده است. اساساً مدل‌سازی به دو روش بزرگ‌مقیاس (macro element) و کوچک‌مقیاس (micro element) انجام می‌شود. در این پژوهش از نرم‌افزار 3Muri که بر پایه بزرگ‌مقیاس کار می‌کند، استفاده شده است. راهکار و شکل مداخله جهت بهسازی در بناهای تاریخی با هدفی متفاوت نسبت به دیگر بناها مطرح می‌شود، لذا دارای محدودیت‌های مختص به خود است و باید با در نظر گرفتن معیارهای مهمی نظیر سازگاری با معماری، مصالح و سازه بنا، حفظ اصالت و برگشت‌پذیر بودن مداخلات، صورت پذیرد. ارتباط تنگاتنگ میان مداخلات حفاظتی و حفاظت، باعث شده است برخی مداخله و حفاظت را عین هم بدانند. حداقل مداخله به‌عنوان اساسی‌ترین اصل مداخله در آثار، امروزه جایگاه ویژه‌ای را در گستره حفاظت به خود اختصاص داده و به مهم‌ترین اصل حفاظت بدل شده است (امین‌پور و عباسی، ۱۳۹۰). روش‌های مختلفی برای استحکام‌بخشی بناهای تاریخی مورد مطالعه قرار گرفته که از جمله آن‌ها می‌توان به جداسازهای لرزه‌ای، استفاده از FRP، تزییق دوغاب، استفاده از اجزای فولادی (Tying)، تعویض ملات (Repainting) و... اشاره کرد.

۲- پیشینه پژوهش

تاکنون پژوهش‌های زیادی در رابطه با آسیب‌پذیری لرزه‌ای بناهای تاریخی در ایران و سراسر دنیا انجام گرفته است. امروزه با توجه به سادگی و سرعت آنالیز پوش‌آور نسبت به روش‌های دیگر آنالیز غیرخطی، در پژوهش‌های بسیاری از این روش برای تحلیل استفاده شده است؛ از جمله باریش‌گونش و همکاران ارزیابی لرزه‌ای وضعیت بازسازی شده مسجدی تاریخی واقع در قلعه بیگالی ترکیه را انجام دادند. این ارزیابی با آنالیز المان محدود و با در نظر گرفتن مفاد ارائه شده در کدهای مختلف برای بررسی ایمنی اقدامات بازسازی انجام شده است. مطالعه این گروه شامل چهار مرحله از جمله: آزمایشات درجا، تست‌های آزمایشگاهی، پروسه بازسازی و تجزیه و تحلیل عملکرد لرزه‌ای ساختار مورد بررسی بود، که مطالعه میدانی آن شامل بازرسی‌های بصری خرابی سازه و جمع‌آوری نمونه‌هایی از قسمت‌های مختلف سازه است. مطالعات آزمایشگاهی شامل آنالیز مکانیکی، شیمیایی و کانی‌شناسی نمونه‌های به دست آمده از سازه بوده و فرایند بازسازی مسجد با توجه به فرم اولیه آن بررسی شد. در آخر سطح عملکرد لرزه‌ای سازه در برابر اثرات لرزه‌ای با انجام تحلیل‌های خطی، پوش‌آور و کینماتیک تعیین شد (Gunes et al., 2021).

سونیا بوسکی و همکاران، ارزیابی ایمنی لرزه‌ای انستیتوی سیویتالی واقع در شهر لوکای ایتالیا را با کمک آزمایش دابل جک انجام دادند. بعد از انجام مرحله مطالعات، ارزیابی استاتیکی و لرزه‌ای براساس آزمایشات نیمه‌مخرب دابل جک و با آنالیز مکانیزم‌های محلی (local mechanism) و رفتار گلوبال و با در نظر گرفتن ساختارهای مختلفی که براساس اتصالات المان‌ها به وجود می‌آید، انجام گرفت. نتایج این آنالیزها تأکید دوباره‌ای است بر ضعف اتصالات در ساختمان‌های مصالح بنایی (Boschi et al., 2018). آخوندی و همکاران با استحکام‌بخشی دیوارهای مصالح بنایی با استفاده از مصالح FRP و به روش NSM، تغییر رفتار لرزه‌ای ساختمان قبل و بعد از استحکام‌بخشی را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش بنای مورد مطالعه به روش قاب معادل و در نرم‌افزار 3Muri مدل‌سازی شده و برای

غلامرضا داوری

ارزیابی رفتار لرزه‌ای ساختمان و همچنین تأثیر روش استحکام‌بخشی در این رفتار، از شاخص ایمنی تعریف شده در راهنمایی ارزیابی و کاهش خطر لرزه‌ای بناهای تاریخی میراث فرهنگی کشور ایتالیا استفاده شده است. محاسبه شاخص ایمنی برای سطوح عملکردی مورد نظر براساس نتایج حاصل از تحلیل بار افزون، توسط نرم‌افزار 3Muri صورت گرفته است (آخوندی و همکاران، ۱۳۹۹). زهیر عبدالحمید و همکاران در سال ۲۰۱۹، یک ساختمان ساده بنایی را با نرم‌افزار 3Muri و تحلیل غیرخطی، صرفاً برای مقایسه تحلیل خطی و غیرخطی و ضرورت انجام تحلیل غیرخطی انجام داده‌اند. در نتایج این تحلیل، برخی از دیوارها دچار شکست برشی و برخی دیگر دچار آسیب خمشی شده‌اند. سپس عنوان کردند این ساختمان قبلاً با نرم‌افزار Stati Cad تحلیل خطی شده است و در آنجا فقط شکست‌های برشی آشکار شده‌اند. از این رو، ضرورت انجام تحلیل غیرخطی به خوبی درک می‌شود (Zahir et al., 2019).

۳- توصیف و بررسی

۳-۱- معرفی بنا مورد مطالعه

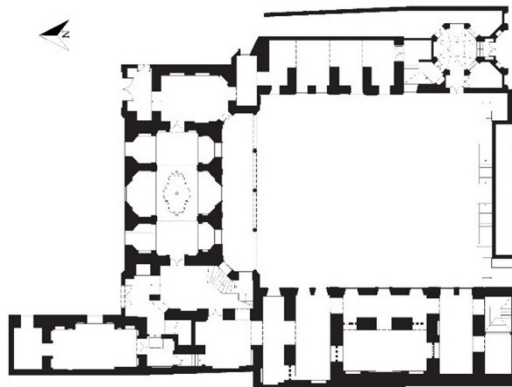
خانه قدکی مربوط به اواسط دوره قاجاریه است و قدمتی معادل ۱۷۰ سال دارد. مساحت اعیانی آن حدود ۸۶۳ متر مربع و مساحت عرصه آن ۱۳۴۰ متر مربع است. این بنا دارای اندرونی و بیرونی است: حیاط اندرونی آن حیاطی کوچک بوده که بازوهای فضای اندرونی خانه به آن باز می‌شده است. از سردر ورودی به هشتی و از هشتی به حیاط بیرونی راه دارد.

۳-۱-۱- بررسی ساختار و سازه

دو قسمت شرقی و غربی بنا، در دو طبقه شکل گرفته که اتاق‌های زیرزمین جناح‌های شرقی و غربی دارای سقف‌های طاقی شکل از نوع طاق آهنگ و خوانچه پوش است. قسمت شمالی بنا، دارای طنبی بزرگ است که پنجره‌های اُرسی آن به سمت شمال و جنوب باز می‌شود. در طبقه زیرزمین طنبی نیز، حوضخانه‌ای با سقف طاقی کاربندی قالب شاقولی وجود دارد. در جنوب طنبی ایوان ستون‌دار رفیعی واقع است (کی‌نژاد و شیرازی، ۱۳۹۰). ستون‌های چوبی به کار رفته در این قسمت از لحاظ سازه‌ای فقط بار سقف ایوان را تحمل می‌کنند و بار سقف این بخش از طریق تیر حمال اصلی به ستون‌ها منتقل می‌شود. این ستون‌ها دارای پاستون هستند و تمامی پاستون‌ها سنگی بوده و دارای مقطع مستطیل شکل هستند. پوشش به کار رفته در طبقه همکف بنا قدکی، سقف مسطح با تیرریزی چوبی است که به طریقه لمبه‌کوبی اجرا شده است. تیرهای چوبی که ساختار اصلی پوشش سقف‌ها در طبقه اول را تشکیل می‌دهند، از هر دو طرف روی تیرهای چوبی زیر سری محکمی (تیر حمال اصلی) قرار می‌گیرند. در پوشش تالار اصلی بنا از سقف دوپوش استفاده شده است. در این بخش خرپای چوبی در سقف به منظور پوشاندن دهانه بزرگ تالار، تعبیه شده که بار سقف را به تیرهای چوبی سقف اول تالار منتقل می‌کند. دیوارهای زیرزمین تا ارتفاع ۲ متر (ارتفاع تخمینی رطوبت) با مصالح سنگ و آجر و به طریقه تفلیسی کار شده و مابقی آن با آجر تکمیل گردیده است. در طبقه اول نیز دیوارهای ساختمان آجری بوده و در داخل آن‌ها به فواصل معین به صورت قائم کلاف‌کشی چوبی انجام گرفته است. پی دیوارهای باربر بین ۱۰۰ الی ۱۲۰ سانتی‌متر عمق دارد، عرض پی چندان بیش از عرض دیوار نیست و در حدود ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر از دیوار عرض‌تر است. پی دیوارهای ساختمان ترکیبی از سنگ و ملات ماسه آهکی بوده و مصرف آجر در آن‌ها بسیار نادر است.

۳-۱-۲- کاربری بنا

این بنا به وسیله اعتمادالدوله والی شهر تبریز ساخته شد و در دوره‌ای نیز به عنوان اسلحه‌خانه و کمیته موقت عمل می‌کرده و اکنون نیز جزء مجموعه دانشکده معماری دانشگاه هنر اسلامی تبریز است. این اثر در سال ۱۳۷۶ با شماره ثبت ۱۸۵۰ به عنوان یکی از آثار ملی ایران به ثبت رسیده است. در شکل (۱) پلان ساختمان و در شکل (۲) تصویری از نمای شمالی این ساختمان ارائه شده است.



شکل ۱. پلان ساختمان قدکی
(کی نژاد و شیرازی، ۱۳۹۰)



شکل ۲. نمای شمالی ساختمان قدکی
(کی نژاد و شیرازی، ۱۳۹۰)

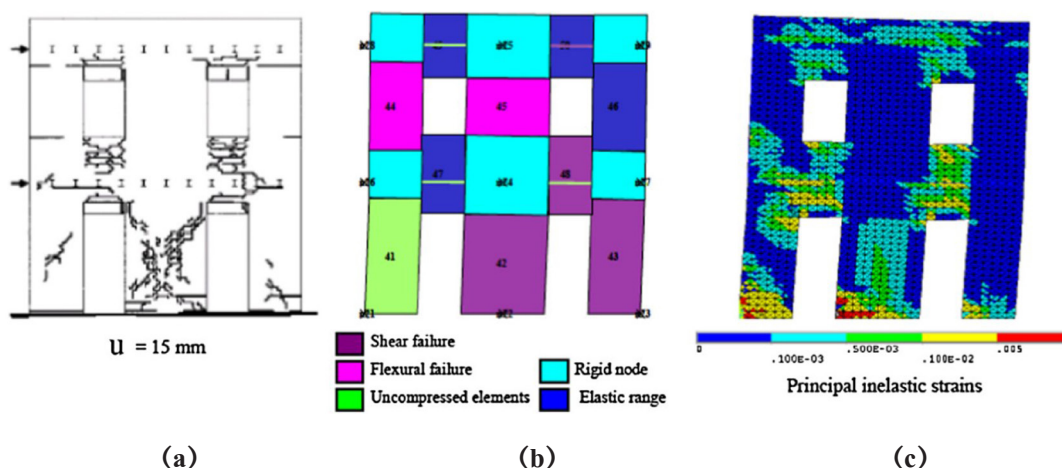


۳-۲- مبانی نظری پژوهش

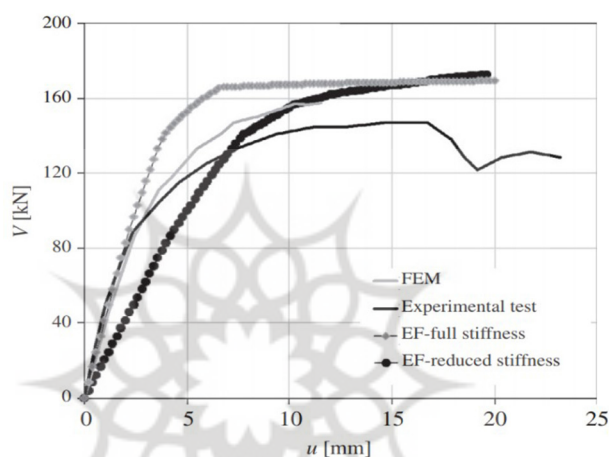
۳-۲-۱- صحت سنجی

همواره اعتبار نتایج یک کار عددی به صحت سنجی آن نسبت به یک کار آزمایشگاهی بستگی دارد. علاوه بر این، نرم افزار 3Muri یک نرم افزار کمتر شناخته شده در ایران است. لذا این موارد، صحت سنجی در این پژوهش را ضروری تلقی می کند. محققان تیم گسترش دهنده نرم افزار تری موری از نتایج نمونه آزمایشگاهی مگنز و همکاران که شامل یک ساختمان آجری دو طبقه در مقیاس کامل و در دانشگاه پاویا آزمایش شده بود، استفاده کردند. آن ها این ساختمان را در نرم افزار المان محدود و همچنین نرم افزار 3Muri مدل سازی و تحلیل کردند. در این مدل سازی از مشخصات فیزیکی مصالح که به صورت واقعی در آزمایشگاه بر روی ملات، آجر و ترکیب هر دو آزمایش شده بود، استفاده کردند. با توجه به اینکه تحلیل مدّ نظر، تحلیل پوش آور بود، لذا تمرکز آن ها بر روی بارهای جانبی قرار گرفت. سقف در ساختمان های بنایی معمولاً به دو صورت انعطاف پذیر و یا صلب (نیمه صلب) وجود دارد. از این رو در نرم افزار 3Muri دوبار مدل سازی صورت گرفته است. نتایج حاصل از این بررسی در شکل های (۳ و ۴) ارائه شده است (Lagomarsino et al., 2013).

غلامرضا داوری



شکل ۳. مقایسه نمونه آزمایشگاهی با مدل‌های نرم‌افزاری - (a) نمونه آزمایشگاهی (b) مدل‌سازی با نرم‌افزار 3Muri (c) مدل‌سازی با یکی از نرم‌افزارهای المان محدود



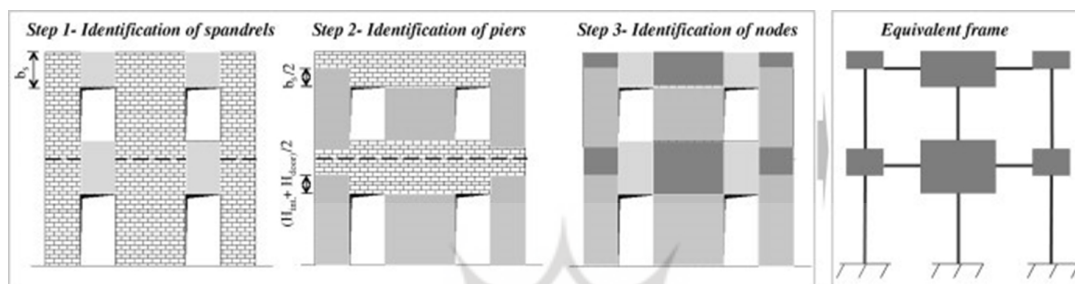
۲-۲-۳- روش مدل‌سازی

روش‌های تحلیل غیرخطی برای ساختمان‌های مصالح بنایی در دهه‌های اخیر پیشرفت چشمگیری به‌خصوص در نوع تحلیل‌های اجزای محدود (finite element) داشته است. البته استفاده از روش‌های macro element نیز به‌طور قابل ملاحظه‌ای حجم تحلیل‌های کامپیوتری، جهت تحلیل غیرخطی المان محدود را کاهش داده است (Braga & Liberatore, 1990). با این وجود، هنوز هم استفاده از روش‌های ساده‌ای نظیر روش مکانیزم طبقه‌ای می‌تواند در سطح وسیعی مورد استفاده مهندسان قرارگیرد. نیاز به تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی و دینامیکی در ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌ها با مصالح بنایی برای اولین بار در اواخر دهه ۷۰ میلادی احساس شد. پیشنهاد استفاده از روش ساده ارزیابی غیرخطی استاتیکی معادل در اسلوانیا توسط تومازویچ ارائه و گسترش داده شد (Tomažević, 2007). چنین روشی که پیشرفت‌های مختلفی را در سال‌های بعدی در پی داشت، بر پایه رویکرد مکانیزم طبقه بنا شده است که نیروهای برش و تغییر مکان برای هر طبقه به‌صورت جداگانه به دست آمده و سپس هر پایه بنایی توسط یک منحنی برش-تغییر مکان غیرخطی (شامل الاستیک و پلاستیک با شکل‌پذیری محدود) تحلیل غیرخطی انجام می‌گیرد. سادگی محتوایی روش مکانیزم طبقه‌ای و وجود آن در دستورالعمل‌های کشور ایتالیا سبب گسترش این روش و توجه به آن در آیین‌نامه‌های سایر کشورها شده است. روش قاب معادل که در ابتدا برای سازه‌های بتنی ابداع شده است، می‌تواند راهکار مناسبی برای این مسئله باشد. برای اولین بار در سال ۱۹۹۸ مگنز و دلا فونتانا این روش را به‌منظور آنالیز پوش‌آور دیوارهای بنایی چندطبقه به کار بردند.

غلامرضا داوری

ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای و ارائه راهکارهای استحکام‌بخشی خانه تاریخی قدکی

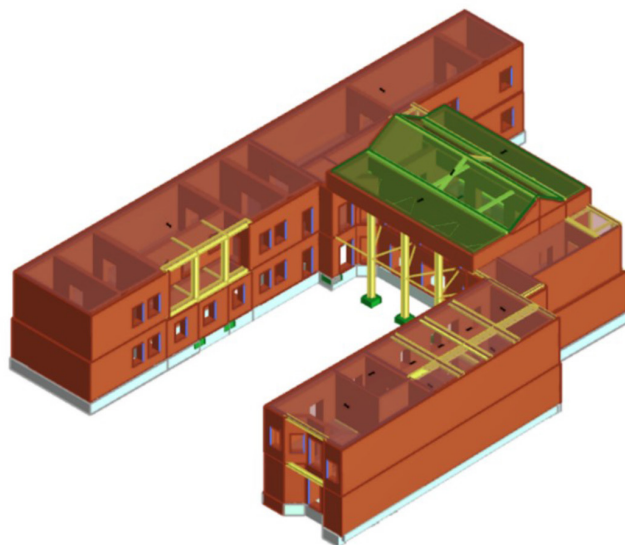
نحوه مدل‌سازی قاب بنایی با استفاده از این روش به این صورت است که به‌جای مصالح بنایی در پایه‌ها (Pier) و نیز در تیرهای زیر پنجره، (Spandrel beam) المان‌های قاب خمشی به‌صورت تیر-ستون با تغییر مکان برشی مدل می‌شود و تحلیل ساختمان بنایی به تحلیل یک قاب با تیر و ستون معادل تبدیل می‌شود (Magenes & Fontana, 1998). نرم‌افزار 3Muri نرم‌افزاری است که براساس ماکرو المنت (macro element) و برپایه قاب معادل، مدل‌سازی و تحلیل می‌کند. اصلی‌ترین فرض این نرم‌افزار صرف نظر کردن از مودهای شکست خارج از صفحه دیوارها و سقف است. در شکل (۵) نحوه مدل‌سازی یک قاب مصالح بنایی با بازشوهای مختلف به‌صورت قاب معادل و در شکل (۶) مدل‌سازی بنای مذکور به‌صورت سه‌بُعدی، در نرم‌افزار 3Muri نشان داده شده است. این نرم‌افزار با تبدیل دیوارها به ستون (Pier) و تبدیل بالای بازشوها به تیر (Spandrel Beam) مدل‌سازی و محاسبات خود را جلو می‌برد. بر این اساس دیوارهای مدل شده، براساس نوع نیروی اعمالی یا هندسه خود دیوار (نسبت طول، عرض و ارتفاع) دچار شکست‌های برشی-قطری یا خمشی-گهواره‌ای می‌شود.



شکل ۵. نحوه مدل‌سازی یک قاب مصالح بنایی با بازشوهای مختلف به‌صورت قاب معادل (Lagomarsino et al., 2013)

۳-۲-۳- تحلیل پوش آور

تحلیل پوش آور، یک تحلیل استاتیکی غیرخطی است که بار اعمالی روی سازه را به‌صورت یک الگوی مشخص، افزایش داده و به سازه اعمال می‌کند (تقی‌نژاد، ۱۳۹۹). با ادامه بارگذاری و افزایش بار اعمالی روی سازه، اعضای ضعیف و مودهای شکست سازه شناخته می‌شوند. با توجه به اینکه بار اعمالی به‌صورت یکنواخت بر سازه اثر داده می‌شود، اثرات رفت و برگشتی بارهای زلزله به‌وسیله تغییر در معیار بار، تغییر شکل و تقریب میرایی تخمین زده می‌شود (تقی‌نژاد، ۱۳۹۹). اخیراً با ظهور روش طراحی براساس عملکرد، تحلیل استاتیکی غیرخطی پوش آور بسیار مورد توجه قرار گرفته است. تحلیل پوش آور با کوشش مهندسان حرفه‌ای برای ارزیابی مقاومت واقعی سازه‌ها توسعه یافته و وعده داده شده که این نوع آنالیز به ابزار مناسب و مؤثری برای طراحی براساس عملکرد تبدیل شود. آیین‌نامه ATC-40 و FEMA-273 ضوابط مربوط به روش‌های مدل‌سازی، معیارهای پذیرش و روش‌های تحلیل برای تحلیل پوش آور را توسعه داده‌اند. در این آیین‌نامه‌ها معیار نیرو-تغییر شکل، برای مفاصل استفاده شده در تحلیل پوش آور تعیین شده است. 3Muri یک نرم‌افزار مدل‌سازی سه‌بُعدی سازه‌های بنایی و به‌صورت ماکرو، با استفاده از روش قاب معادل است که امکان تحلیل استاتیکی غیرخطی (بار افزون) را فراهم می‌آورد و با توجه به ساده‌سازی‌های صورت گرفته در آن، مشکلات نرم‌افزارهای پیچیده مدل‌سازی اجزای محدود (مثل عدم همگرایی و زمان‌بر بودن تحلیل) را ندارد (آخوندی و همکاران، ۱۳۹۹).



شکل ۶. مدل سازی خانه قذکی به صورت سه بُعدی در نرم افزار 3Muri

۳-۲-۴- سطوح عملکرد

زمانی که سخن از تحلیل پوش آور به میان بیاید، باید سطوح عملکرد و همچنین سطوح خطر تعریف شوند. به طور کلی سطوح عملکرد را هم برای عناصر سازه‌ای و هم عناصر غیرسازه‌ای تعریف می‌کنند. از آنجاکه در نرم افزار 3Muri عناصر غیرسازه‌ای مدل نمی‌شوند لذا در این پژوهش به آن‌ها اشاره نمی‌شود. سطوح عملکرد سازه‌ای در کشورهای مختلف سطح‌های مختلف دارد، در کشور ایران، شش سطح عملکرد شامل: ۱- قابلیت استفاده بی‌وقفه؛ ۲- خرابی محدود؛ ۳- ایمنی جانی؛ ۴- ایمنی جانی محدود؛ ۵- آستانه فروریزش و ۶- لحاظ نشده، تعریف شده است (Code 376, 2007).

در کشور ایتالیا به سه سطح شامل: ۱- خرابی محدود (Limited damage)؛ ۲- ایمنی جانی محدود (خرابی قابل توجه، Significant damage) و ۳- آستانه فروریزش (Near Collapse) دسته‌بندی می‌شوند (Eurocode 8, 2005). نرم افزار 3Muri نیز براساس کدهای اروپا برنامه‌نویسی شده است و آن‌ها را به ترتیب با NC, SD, DL نمایش می‌دهد.

۳-۲-۵- سطوح خطر

تحلیل خطر با هدف برآورد پارامترهای حرکت قوی زمین انجام می‌گیرد. خطر ناشی از زلزله به دو صورت طیف طرح شتاب و تاریخچه زمان شتاب تعریف می‌شود (Code 376, 2007)؛ که در این پژوهش سطوح خطر براساس طیف طرح شتاب بررسی می‌شود و شامل سه سطح خطر است.

سطح خطر ۱: معادل سطحی از حرکت‌های قوی زمین است که احتمال فراگذشت از آن ۱۰ درصد در ۵۰ سال باشد. این سطح خطر معادل دوره بازگشت ۴۷۵ سال است و در آیین‌نامه ۲۸۰۰ زلزله طرح نامیده شده است.

سطح خطر ۲: معادل سطحی از حرکت‌های قوی زمین است که احتمال فراگذشت از آن ۲ درصد در ۵۰ سال است. این سطح خطر معادل دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال است.

سطح خطر ۳: معادل سطحی از حرکت‌های قوی زمین است که احتمال فراگذشت از آن انتخابی است. این سطح خطر برای موارد خاص و با ملاحظات ویژه استفاده می‌شود (Code 376, 2007).

با توجه به اینکه اکثر کشورهای از جمله ایران سطح خطر ۲ و ۳ را در آیین‌نامه‌های اجرایی خود ندارند، لذا با استفاده از یورو کد (EN1998-3) ضرایب تبدیل سطوح خطر به یکدیگر استخراج شده است (Eurocode 8, 2005). بنای مذکور در شهر تبریز با شتاب مبنای طرح ۰/۳۵ شتاب گرانش واقع شده است. ضرایب و اعداد مورد نیاز نرم افزار در جدول (۱) ارائه شده است.

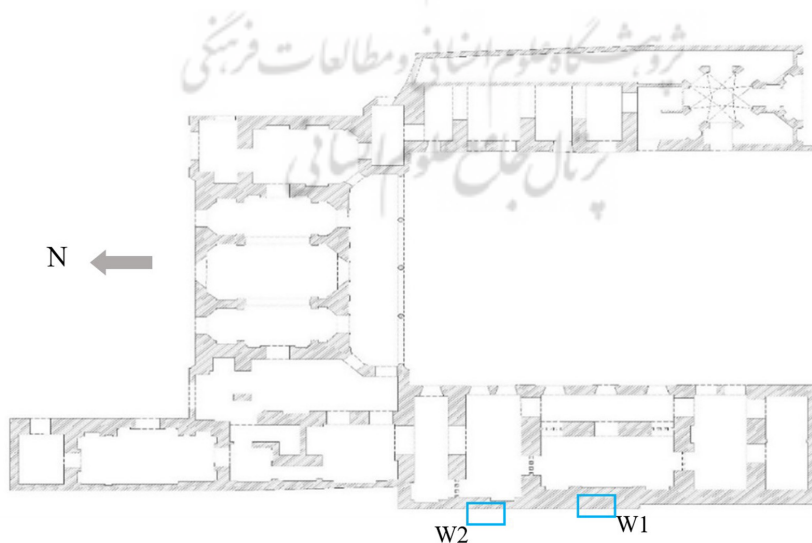
جدول ۱. ضرایب مورد نیاز جهت تبدیل سطوح خطر به یکدیگر و اعداد مورد نیاز نرم‌افزار

NC	SD	DL
Near Collapse آستانه فروریزش	Significant damage خرابی قابل توجه (ایمنی جانی)	Limited damage خرابی محدود
احتمال وقوع ۲ درصد در ۵۰ سال دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال	احتمال وقوع ۱۰ درصد در ۵۰ سال دوره بازگشت ۴۷۵ سال	احتمال وقوع ۲۰ درصد در ۵۰ سال دوره بازگشت ۲۲۵ سال
SD*1.5	شتاب مبنای طرح	SD*0.40
5.15=1.5*3.43	3.43=9.81*0.35	1.37=3.43/2.5

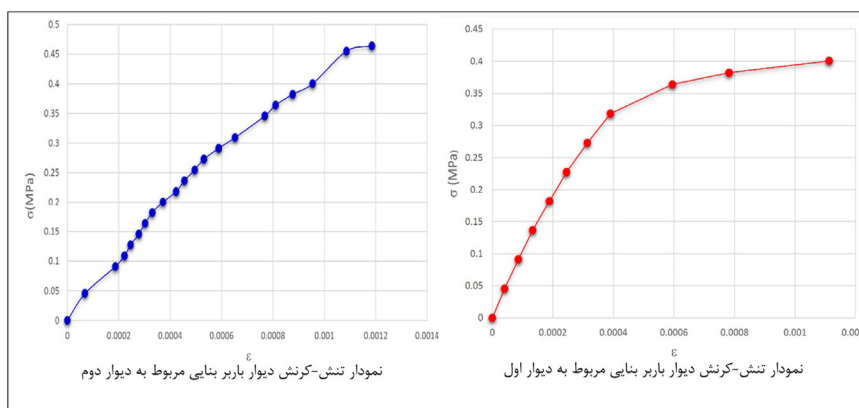
۳-۳-۳- مشخصات مصالح

۳-۳-۳-۱- آزمایش‌های انجام گرفته بر روی مصالح بنایی

مصالح موجود در ساختمان قدکی از نوع مصالح بنایی شامل آجر و ملات ماسه سیمان است که در مدل‌سازی نیز همین نمونه لحاظ شده است. برای اطلاع از مشخصات مکانیکی این مصالح از تست غیرمخرب درجا، نظیر تست فلت جک استفاده شده است. این تست براساس آیین‌نامه ASTM C1197-04 انجام شد (ASTM, 2004). در این روش دو برش موازی به فاصله چهار تا شش واحد بنایی (۲۰ الی ۳۰ سانتی‌متر) در داخل دیوار بنایی صورت می‌گیرد. فرض بر این است که این واحد جداشده، بدون تنش است، سپس جک‌ها (تولیدشده توسط شرکت بوویار ایتالیا) داخل برش‌ها قرار گرفته و فاصله اولیه نقاط، اندازه‌گیری می‌شوند. همچنین از چهار عدد گیج با دقت 0.001 میلی‌متر برای اندازه‌گیری مقدار جابه‌جایی بین دو جک استفاده می‌شود، فاصله گیج‌ها از دو انتهای فلت برابر با یک هشتم طول فلت‌ها است. با ایجاد فشار توسط پمپ هیدرولیکی و وارد شدن بار ناشی از فشار ایجادشده در جک‌های مسطح به نمونه، یک حالت تنش محوری فشاری ایجاد می‌شود. با افزایش فشار در جک‌های مسطح تغییر فاصله‌ها در گیج‌ها نشان داده می‌شود و با افزایش فشار تدریجی، می‌توان رابطه تنش کرنش را به دست آورد (شکل ۸). براساس منحنی تنش کرنش حاصل می‌توان مدول الاستیسیته را محاسبه کرد. در محل‌هایی که در پلان مشخص شده، دو تست انجام (شکل ۷) و نتایج حاصل از این دو تست در جدول (۲) به نمایش گذاشته شده است (Aminifar et al., 2022).



شکل ۷. محل‌های انجام تست فلت جک در ساختمان قدکی (Aminifar et al., 2022)



شکل ۸. نمودار تنش-کرنش حاصل از تست فلت جک در خانه تاریخی قدکی
(Aminifar, E., et al., 2022)

جدول ۲. نتایج حاصل از تست فلت جک در خانه تاریخی قدکی

مدول الاستیسیته (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	
664.05	0.4	تست اول
1023.75	0.46	تست دوم

(Aminifar, E., et al., 2022)



شکل ۹. روند انجام تست فلت جک
(Aminifar et al., 2022)

۲-۳-۳- پارامترهای مربوط به مشخصات مصالح

نتایج حاصل از آزمایش‌های فلت جک فقط دو پارامتر مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری را مشخص می‌کند، درحالی که پارامترهای دیگری برای ورود به نرم‌افزار لازم است. خوشبختانه روابط ریاضی زیادی وجود دارد که می‌توان با استفاده از مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته این پارامترها را مشخص کرد.

براساس کد EN1996-1 اگر چندین تست صورت پذیرد مقاومت فشاری () و مدول ارتجاعی () از میانگین مقادیر به دست آمده از تست، حاصل می‌شوند. براساس همین کد اگر نتایج حاصل از تمامی تست‌ها در دسترس باشد آنگاه مقدار مقاومت فشاری مشخصه () با کمترین مقدار به دست آمده از تست برابر است؛ اما چنانچه کمتر از سه تست انجام گرفته باشد، مقاومت فشار میانگین بر ضریب آگاهی سطح ۳ (LC3) که برابر ۱/۳۵ است، تقسیم می‌شود. برای به دست آوردن مدول برشی، ضریب پواسون برابر ۰/۲۰ لحاظ شد که بر این اساس، مدول برشی برابر ۰/۵۰ مدول الاستیسیته و میزان مقاومت برشی بین ۰/۴/۵ الی ۰/۶/۵ مقاومت فشاری محاسبه می‌شود (Eurocode 6, 2005). تمامی مشخصات مکانیکی مربوط به مصالح در جدول (۳) نمایش داده شده است.

جدول ۳. مشخصات مکانیکی مصالح وارد شده در نرم‌افزار

کدهای مرجع	G مدول برشی	مقاومت فشاری مشخصه	مدول ارتجاعی میانگین	مقاومت فشاری میانگین N/mm ²	(W) وزن مخصوص	
EN 1996:2005 EN 1998:2005 Code 376 Iran	428.5	0.32	843.50	0.43	16	مصالح بنایی
EN 338:2002	440	14	7000	20	3.5	چوب

۳-۳-۳- FRP مشخصات مصالح

کامپوزیت‌های FRP از یک ماتریس پلیمری و فیبرهای مسلح‌کننده، تشکیل شده‌اند. بارهای وارده بر کامپوزیت، توسط فیبرهای مسلح‌کننده تحمل می‌شوند، درحالی که حفاظت از فیبرها در برابر شرایط محیطی، انتقال تنش بین فیبرها و نگهداری این‌ها در موقعیت خود، وظیفه ماتریس است. نوع الیاف FRP باید طوری انتخاب شود که با مصالح بنایی سازگاری داشته باشد. از میان الیاف کربن، شیشه و آرامید، الیاف شیشه، به دلیل مدول الاستیسیته پایین، در استحکام بخشی سازه‌های بنایی کاربرد گسترده‌ای دارند. علاوه بر این، هزینه الیاف شیشه نسبت به کربن پایین‌تر است (Code 345, 2014). از این رو، در مطالعه حاضر، از مشخصات مکانیکی میلگردهای GFRP در طرح تقویت دیوارهای بنایی جدید و از نوارهای مستطیل شکل، GFRP در دیوارهای بنایی موجود، استفاده شده است. درکنار مزایایی که برای الیاف شیشه ذکر شد، معایبی نیز وجود دارد که از این جمله، می‌توان به حساسیت در مقابل سایش و مقاومت کم آن در مقابل خستگی اشاره کرد (Code 345, 2014). مشخصات GFRP مورد استفاده، در جدول (۴) آورده شده است. این مشخصات مربوط به GFRP شرکت Quantom با نام اختصاری Quantom Warp 600G است که در بازار وجود دارد.

جدول ۴. مشخصات مکانیکی مصالح GFRP وارد شده در نرم افزار

E مدول الاستیسیته N/mm^2	f_{td} مقاومت کششی نهایی N/mm^2	ε کرنش کششی نهایی %
90000	2300	3.90

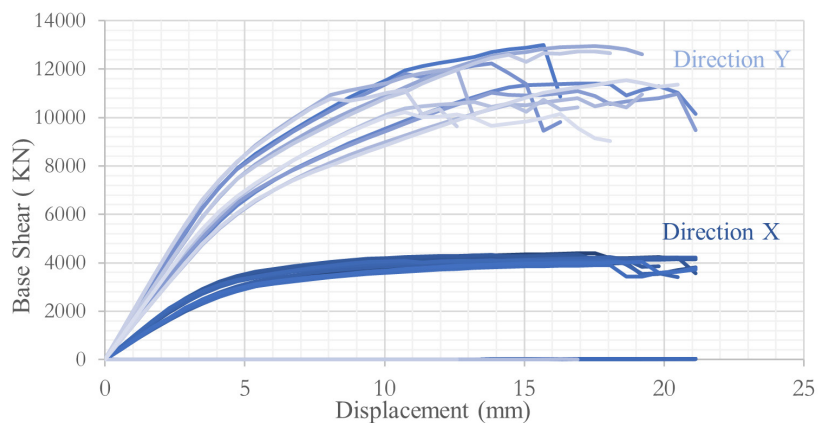
۳-۴- بررسی و نتایج تحلیل ها

۳-۴-۱- نتایج تحلیل ها در شرایط وضع موجود ساختمان

نتایج حاصل از تحلیل پوش آور ساختمان قدکی با نرم افزار 3Muri در جدول (۵) آورده شده است. این نتایج شامل ۲۴ حالت است که از سه دسته ۸ تایی تشکیل می شود. این نرم افزار براساس دو نوع الگوی بار، نیروی مود اول و نیروی متناسب با جرم تحلیل را انجام می دهد. از آنجا که تحلیل پوش آور باید در دو راستا X, Y و همچنین در هر دو جهت مثبت و منفی انجام گیرد، لذا ۴ جهت ایجاد می شود و دو نوع الگوی بار نیز وجود داشت که در مجموع منجر به تولید ۸ حالت می شود. می دانیم که تحلیل پوش آور با خروج از مرکزیت سازه در ارتباط است و نرم افزار 3Muri براساس هندسه پلان، جرم ساختمان و... در ۳ حالت خروج از مرکزیت (صفر، مثبت و منفی) اقدام به تحلیل می کند و با توضیحات داده شده، ۲۴ حالت مشخص شد. قبل از ارائه نتایج نهایی پارمتر شاخص ایمنی به صورت مختصر توضیح داده می شود. شاخص ایمنی لرزه ای برابر با نسبت ظرفیت لرزه ای به نیاز لرزه ای است. در این روش نسبت نیاز لرزه ای را که برابر است با حداکثر میزان شتابی که در حالت حدی خاص ایجاد خواهد شد، به حداکثر شتابی که ظرفیت سازه (حداکثر شتابی که سازه می تواند تحمل کند تا به حالت حدی خاص برسد) است، بررسی می کند.

$$I_s = \frac{a_{slu}}{\gamma_I * S * a_g} \quad \text{رابطه (۱)}$$

a_{slu} : شتابی از زمین است که ساختمان را به حالت حدی مورد نظر می رساند (شتاب ظرفیت در حالت حدی خاص)، : ضریب اهمیت ساختمان؛ S : ضریبی است که اثرات لایه های مختلف خاک ساختگاه و سایر اثرات مورفولوژیکی آن را لحاظ می کند؛ a_g : حداکثر شتاب مبنای زمین در محل ساختگاه متناسب با سطح عملکرد (حالت حدی) مورد نظر (شتاب نیاز لرزه ای) را اعمال می کند. شاخص ایمنی لرزه ای با مقدار بیشتر از یک، نشان می دهد که ساختمان توانایی تحمل زلزله تعیین شده برای این منطقه در حالت حدی مورد نظر را دارد. در نقطه مقابل، اگر کمتر از یک باشد، نشانگر آسیب پذیری ساختمان در برابر زلزله متناظر با حالات حدی مورد نظر است (-Guidelines for Cultural Heri-tage [GCH], 2007). به منظور تعیین شاخص ایمنی از نرم افزار 3Muri استفاده شده است که با استفاده از تحلیل بار افزون و براساس پارامترهای a_g ، S و γ_I ، مقدار شاخص ایمنی را براساس رابطه (۱) و به صورت کامل محاسبه می کند. همان طور که در جدول (۵) نمایش داده شده است در حالت حدی DL (خرابی محدود) مقادیر شاخص ایمنی در جهت Y حداقل ۱/۳۶ و حداکثر ۱/۷۶ و در جهت X حداکثر ۰/۵۲، در حالت حدی SD (خرابی قابل توجه) در جهت Y حداکثر ۰/۹۱ و در جهت X حداکثر ۰/۵۶ و در حالت حدی NC (آستانه فروریزش) در جهت Y حداکثر ۰/۶۹ و در جهت X حداکثر ۰/۴۷ ثبت شده است. این نتایج نشان می دهد ساختمان در جهت X ضعیف تر از جهت Y است و در حالت حدی NC و SD چه در جهت X و چه در جهت Y ساختمان شاخص ایمنی کمتر از یک دارد. علاوه بر جدول (۵)، در شکل (۱۰) نمودار بار افزون، نمودار نیرو- تغییر مکان (برحسب میانگین وزنی جابه جایی نقاط تراز بام)، برای تمامی تحلیل ها نشان داده شده است. در آن نمودار نیز ملاحظه می شود که ساختمان در راستای Y مقاومت برشی حدود ۳ برابر نسبت به راستای X دارد.



شکل ۱۰. نمودار نیرو- تغییر مکان برای هر ۲۴ حالت در شرایط وضع موجود ساختمان

جدول ۵. نتایج حاصل از تحلیل پوش اور در نرم افزار 3Muri در شرایط وضع موجود ساختمان

شاخص ایمنی حالت حدی DL	شاخص ایمنی حالت حدی SD	شاخص ایمنی حالت حدی NC	خروج از مرکزیت	الگوی بار زلزله	راستای زلزله	ردیف
			(cm)			
۰٫۵۲۲	۰٫۴۲۴	۰٫۳۵۱	۰	uniform	X+	۱
۰٫۵۰۸	۰٫۵۳۶	۰٫۴۵۴	۰	Static forces	X+	۲
۰٫۵۰۰	۰٫۳۸۹	۰٫۳۲۱	۰	uniform	X-	۳
۰٫۴۷۲	۰٫۴۶۶	۰٫۳۹۳	۰	Static forces	X-	۴
۱٫۷۵۸	۰٫۹۰۸	۰٫۶۹۴	۰	uniform	Y+	۵
۱٫۴۹۷	۰٫۷۵۹	۰٫۵۸۳	۰	Static forces	Y+	۶
۱٫۶۳۸	۰٫۸۵۵	۰٫۶۵۴	۰	uniform	Y-	۷
۱٫۴۶۵	۰٫۸۴۵	۰٫۶۶۰	۰	Static forces	Y-	۸
۰٫۵۱۶	۰٫۳۹۶	۰٫۳۲۷	۲۳۴٫۸۹	uniform	X+	۹
۰٫۵۱۶	۰٫۴۱۹	۰٫۳۴۸	۲۳۴٫۸۹-	uniform	X+	۱۰
۰٫۵۰۲	۰٫۵۱۵	۰٫۴۳۵	۲۳۴٫۸۹	Static forces	X+	۱۱
۰٫۵۰۶	۰٫۵۶۰	۰٫۴۷۵	۲۳۴٫۸۹-	Static forces	X+	۱۲
۰٫۴۹۴	۰٫۳۸۱	۰٫۳۱۴	۲۳۴٫۸۹	uniform	X-	۱۳
۰٫۴۹۶	۰٫۳۹۹	۰٫۳۳۱	۲۳۴٫۸۹-	uniform	X-	۱۴
۰٫۴۹۳	۰٫۴۴۳	۰٫۳۷۳	۲۳۴٫۸۹	Static forces	X-	۱۵
۰٫۴۷۶	۰٫۴۹۷	۰٫۴۲۱	۲۳۴٫۸۹-	Static forces	X-	۱۶
۱٫۷۴۰	۰٫۸۳۶	۰٫۶۳۱	۱۶۴٫۹۱	uniform	Y+	۱۷
۱٫۵۹۵	۰٫۸۲۹	۰٫۶۳۳	۱۶۴٫۹۱-	uniform	Y+	۱۸
۱٫۴۳۵	۰٫۶۸۴	۰٫۵۲۰	۱۶۴٫۹۱	Static forces	Y+	۱۹
۱٫۴۳۲	۰٫۸۰۴	۰٫۶۲۶	۱۶۴٫۹۱-	Static forces	Y+	۲۰
۱٫۷۰۹	۰٫۸۷۰	۰٫۶۶۴	۱۶۴٫۹۱	uniform	Y-	۲۱
۱٫۵۰۷	۰٫۷۹۴	۰٫۶۰۸	۱۶۴٫۹۱-	uniform	Y-	۲۲
۱٫۴۵۹	۰٫۶۷۱	۰٫۵۰۸	۱۶۴٫۹۱	Static forces	Y-	۲۳
۱٫۳۶۴	۰٫۷۶۱	۰٫۵۹۱	۱۶۴٫۹۱-	Static forces	Y-	۲۴

۲-۴-۳- طرح استحکام بخشی

۲-۴-۳-۱- رویکردهای استحکام بخشی

همان طور که در قسمت قبل توضیح داده شد، ساختمان در جهت X در هر سه حالت حدی (SD, DL, NC)، شاخص ایمنی، عددی کمتر از ۱، و علاوه بر این در حالت حدی NC و SD در راستای Y نیز شاخص ایمنی، عددی کمتر از ۱ دارد که این امر نشان از آن دارد که ساختمان پایداری لازم را ندارد و باید استحکام بخشی شود.

رویکرد اول: این رویکرد، که کمترین مداخله را نیز به همراه دارد، استفاده از ضریب اصلاح است، این ضریب از آیین نامه NTC 2018 اقتباس شده است (NTC2018). در این روش پارامترهای مختلفی برای تقویت دیوارهای بنایی ارائه شده است که در صورت انجام هر کدام، یک یا چند مشخصه مکانیکی، در یک ضریب افزایشی، ضرب می شود. پیشنهاد این آیین نامه برای دیوارهای بنایی با مصالح آجر و ملات ماسه سیمان، استفاده از روش تزریق ملات در بین رج های آجر است، که به نوعی بندکشی نیز گفته می شود؛ اما منظور از بندکشی، بندکشی ساده و عامیانه نیست بلکه روش و اصول خاص خود را دارد که در ادامه به برخی از آن ها اشاره می شود.

۱- ملات مصرفی باید از نوع ملات های خوب یعنی دارای مقاومت فشاری بیشتر از ۲ مگاپاسکال باشد،

۲- میزان نفوذ و تزریق ملات باید به صورت کامل انجام شود،

۳- میزان نفوذ ملات، تابعی از ضخامت دیوار باشد،

۴- بین رج ها عاری از گردوغبار باشد تا چسبندگی ملات به خوبی انجام شود. براساس این آیین نامه اگر تزریق ملات با این شرایط انجام پذیرد، می توان پارامترهای نظیر مقاومت فشاری (f_m)، مدول الاستیسیته (E)، مدول برشی (G)، مقاومت برشی در حالت تنش قائم صفر (τ) و مقاومت برشی (T) را در ضریب اصلاح ضرب کرد. این ضریب برای دیوارهای با مصالح بنایی و ملات سیمانی برابر با ۱/۳ است. مشخصات مکانیکی مصالح بعد از اعمال ضریب اصلاح در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۶. مشخصات مکانیکی مصالح بعد از اعمال ضریب اصلاح

کدهای مرجع	G مدول برشی N/mm ²	f_k مقاومت فشاری مشخصه N/mm ²	E_m مدول ارتجاعی میانگین N/mm ²	f_m مقاومت فشاری میانگین N/mm ²	(W) وزن مخصوص KN/m ³	
EN 1996:2005 EN 1998:2005 NTC2018	557	0.42	1096	0.56	16	مصالح بنایی

رویکرد دوم: همان طور که در پلان ساختمان نمایان است، پلان از نظر هندسه، جزء پلان های پیچیده است که این پیچیده بودن پلان باعث عدم تطابق مرکز سختی بر مرکز جرم شده و در نهایت منجر به پیچش می شود. به عنوان یک راهکار استحکام بخشی می توان این ساختمان را در پلان به سه قسمت تبدیل کرد. این رویکرد بیشتر برای جلوگیری از پیچش در پلان، اتخاذ می شود؛ چراکه شاخص ایمنی را در برخی از حالات افزایش داده در برخی دیگر کاهش می دهد و لذا صرفاً برای جلوگیری از پیچش و مکمل رویکرد اول پیشنهاد می شود. در قسمت تحلیل نتایج بعد از ارائه طرح استحکام بخشی، راجع به آن توضیح داده شده است. جزئیات و نحوه اجرای این رویکرد در شکل (۱۲) نمایان است.

رویکرد سوم: بعد از ارائه رویکرد اول و دوم، شاخص ایمنی از ۱۰ تا ۴۵ درصد افزایش پیدا کرد، ولی مقادیر شاخص همچنان کمتر از ۱ بودند. بر همین اساس، در مرحله آخر از نوارهای GFRP به روش NSM استفاده شده است. این نوارها در سیستم NSM، در داخل شیارهای افقی قرار خواهند گرفت. حداقل ابعاد این شیار ۱/۵ برابر ضخامت نوار و ۱/۵ برابر عرض نوار است (Code 345, 2014). با توجه به اینکه در دیوارهای بنایی موجود، این نوارها باید در داخل

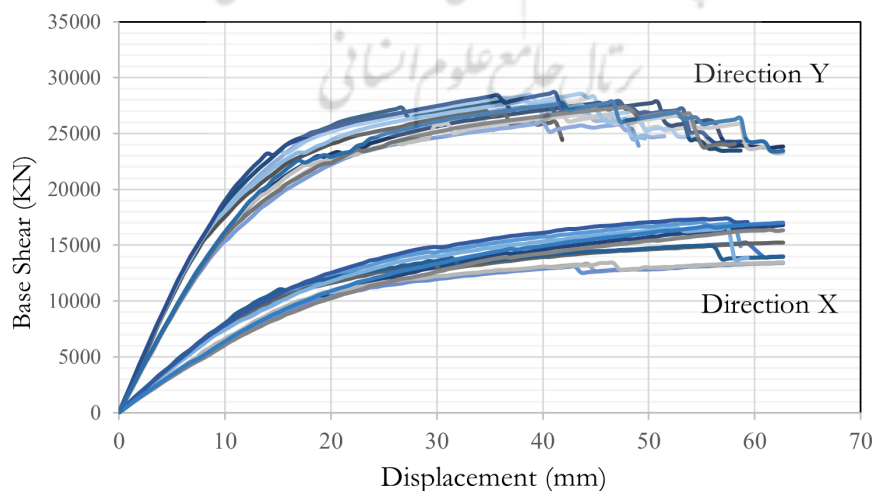
رج‌های افقی دیوار قرارگیرند، و اینکه ضخامت این رج‌ها به‌طور معمول ۱۰ الی ۱۲ میلی‌متر است؛ پس ضخامت انتخابی برای این نوارها باید کمتر از ۶ میلی‌متر باشد. مسلح کردن دیوارهای بنایی به‌منظور افزایش مقاومت برشی درون صفحه دیوار انجام می‌شود، به همین منظور فاصله نوارهای GFRP، باید طوری انتخاب شود که نه‌تنها از ۴۰۰ میلی‌متر تجاوز نکند، بلکه این نوارها داخل رج‌های افقی دیوار در قسمت ملات، قرار گیرند (Code 345, 2014). لازم به ذکر است تمامی این موارد در نرم‌افزار 3Muri با دستور دیوارهای مسلح و اضافه کردن متریال GFRP قابلیت طراحی و مدل‌سازی دارد. همان‌طور که در قسمت‌های قبل بیان شد، شاخص ایمنی در حالت کلی هم در راستای X و هم در راستای Y مقادیر کمی داشت. بر همین اساس در تمامی دیوارهای باربر چه در جهت X و چه در جهت Y از نوارهای GFRP استفاده شده است. از طرفی راستای Y ضعف کمتری نسبت به راستای X داشت لذا در راستای Y از فاصله بیشتر و ضخامت کمتر نوارهای GFRP استفاده شده است. جزئیات استفاده از این نوارها در جدول (۷) آورده شده است.

جدول ۷. جزئیات استفاده از نوارهای GFRP

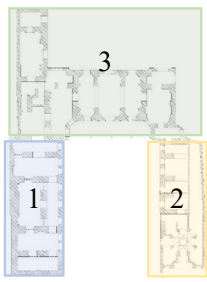
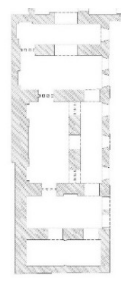
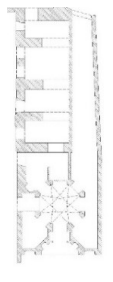
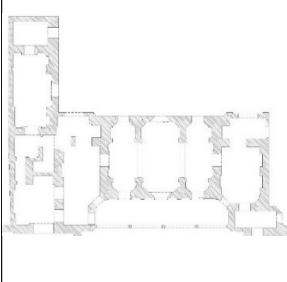
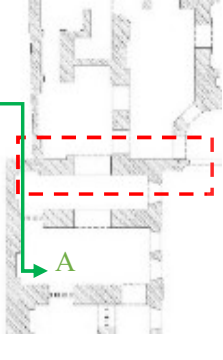
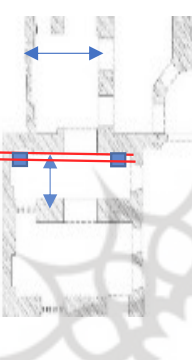
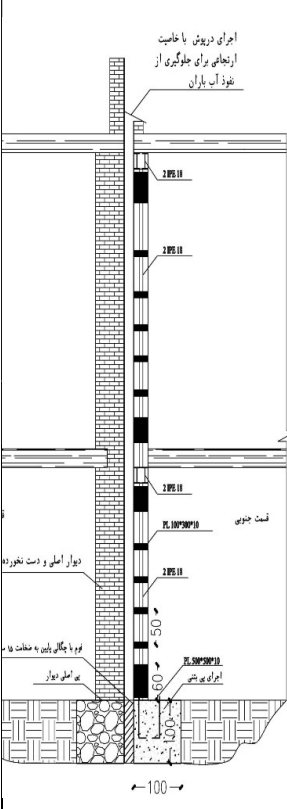
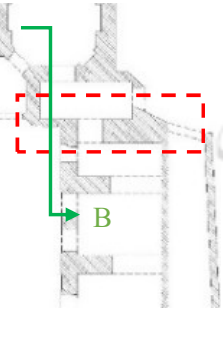
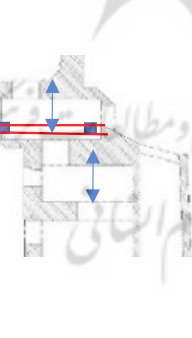
نوع FRP	ضخامت	عرض	فاصله افقی	فاصله عمودی	
	mm	mm	mm	mm	
Glass	5	50	لحاظ نشده	180	دیوارهای راستای X
Glass	2	50	لحاظ نشده	360	دیوارهای راستای Y

۲-۲-۴-۳- نتایج تحلیل بعد از طرح استحکام بخشی

نتایج حاصل از تحلیل پوش‌آور ساختمان قدکی با نرم‌افزار 3Muri بعد از اعمال طرح استحکام بخشی در شکل (۱۱) و جدول (۹) ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است، شاخص ایمنی برای تمام حالات بیشتر از ۱ شده است. این بدان معناست که در حالت حدی DL (احتمال وقوع زلزله ۲۰ درصد در ۵۰ سال) علاوه بر اینکه جان انسان‌ها حفظ می‌شود ساختمان نیز خرابی محدود و اندکی را تجربه می‌کند. در حالت حدی SD (احتمال وقوع زلزله ۱۰ درصد در ۵۰ سال) جان انسان‌ها حفظ شده ولی ساختمان خرابی‌های بیشتری خواهد داشت اما فرو نمی‌ریزد و در حالت حدی NC (احتمال وقوع زلزله ۲ درصد در ۵۰ سال) به ساختمان اجازه داده می‌شود به حد فروریزش برسد به شرط آنکه جان انسان‌ها حفظ شود. بعد از انجام هر رویکرد و تحلیل در نرم‌افزار، در شاخص ایمنی نسبت به حالت وضع موجود تغییراتی حاصل می‌شود که این مقادیر برحسب درصد افزایش در جدول (۸) و نتایج کلی طرح استحکام بخشی در جدول (۹) ارائه شده است.



شکل ۱۱. نمودار نیرو - تغییر مکان برای هر ۲۴ حالت در شرایط بعد از استحکام بخشی

پلان کلی	قسمت اول	قسمت دوم	قسمت سوم
			
۱- محل اتصال قسمت ۱ و ۳	۲- جهت بازگذاری سقف	۳- مراحل کار	۴- جزئیات
		<p>- نیاز به حداقل ۱۰ سانتی متر فاصله با توجه به ارتفاع</p> <p>- ایجاد دو ستون و تیر در نقاط نشان داده شده با IPE 18 دوبل</p> <p>- بستن کامل زیر سقف با استفاده از جک‌های سقفی</p> <p>- بعد از اجرای پی بتنی ستون فولادی بر روی این پی نصب شود.</p> <p>- در قسمت سقف فقط به اندازه ۳۰×۳۰ سانتی متر رویه روی ستون‌ها سوراخ شود تا ستون از سقف رد شود.</p> <p>- تیرها به خوبی در زیر سقف اول گوه‌گیری شده سپس به ستون‌ها جوش شوند.</p> <p>- از روی سقف اول به آرامی شروع به ایجاد شکاف طبق پلان می‌شود.</p> <p>- امتداد ستون‌ها را ادامه داده و در زیر سقف دوم مهار می‌شود.</p> <p>- مثل سقف اول، کل زیر سقف با جک‌های سقفی بسته می‌شود.</p> <p>- تیر بر روی ستون‌ها قرار گرفته و سپس بر زیر سقف گوه‌گیری می‌شود.</p> <p>- در انتها می‌توان پروفیل‌ها را در دیواری به ضخامت ۳۰ سانتی متر پنهان کرد.</p> <p>- درپوش نرم و ارتجاعی بر روی بام تعبیه می‌شود.</p>	
۵- محل اتصال قسمت ۲ و ۳	۶- جهت بازگذاری		
			

شکل ۱۲. جزئیات و نحوه جداسازی ساختمان قدکی

جدول ۸. میزان افزایش شاخص ایمنی برای رویکردهای مختلف برحسب درصد

شاخص ایمنی حالت حدی NC			شاخص ایمنی حالت حدی SD			شاخص ایمنی حالت حدی DL			طرح استحکام بخشی	
درصد میانگین افزایش	درصد افزایش/کاهش	شماره حالت	درصد میانگین افزایش	درصد افزایش/کاهش	شماره حالت	درصد میانگین افزایش	درصد افزایش/کاهش	شماره حالت		
+۱۳	-۱۴	۱۱	+۱۴	-۱۳	۱۱	+۱۸	+۳	۱۵	min	رویکرد اول
	+۲۹	۲۲		+۳۰	۲۲		+۳۰	۱۸	max	
+۱۰	-۴۰	۱۲	+۱۰	-۳۸	۱۲	+۱۴	+۱	۸	min	رویکرد اول+ رویکرد دوم
	+۴۸	۲۲		+۴۵	۲۲		+۳۹	۹	max	
+۲۱۵	+۱۰۰	۱۲	+۲۱۷	+۱۰۶	۱۲	+۲۷۱	+۲۲۹	۱۷	min	هر سه رویکرد
	+۳۰۹	۲۳		+۳۰۴	۲۳		+۳۴۴	۱۵	max	

جدول ۹. نتایج حاصل از تحلیل پوش اور در نرم افزار 3Muri بعد از طرح استحکام بخشی

شاخص ایمنی حالت حدی DL	شاخص ایمنی حالت حدی SD	شاخص ایمنی حالت حدی NC	خروج از مرکزیت (cm)	الگوی بار زلزله	راستای زلزله	ردیف
۱٫۹۱۰	۱٫۲۶۱	۱٫۰۲۲	۰	uniform	X+	۱
۱٫۸۶۶	۱٫۲۰۲	۰٫۹۹۸	۰	Static forces	X+	۲
۲٫۰۱۷	۱٫۲۳۷	۱٫۰۲۷	۰	uniform	X-	۳
۱٫۹۷۰	۱٫۲۰۵	۱٫۰۰۳	۰	Static forces	X-	۴
۵٫۸۲۲	۳٫۰۲۸	۲٫۲۹۷	۰	uniform	Y+	۵
۴٫۹۴۵	۲٫۵۸۹	۱٫۹۸۲	۰	Static forces	Y+	۶
۵٫۹۲۳	۳٫۰۹۴	۲٫۳۵۱	۰	uniform	Y-	۷
۵٫۱۷۳	۲٫۷۶۳	۲٫۲۱۲	۰	Static forces	Y-	۸
۱٫۹۵۱	۱٫۲۹۵	۱٫۰۵۰	۲۳۴٫۸۹	uniform	X+	۹
۱٫۸۳۷	۱٫۲۱۸	۱٫۰۰۵	۲۳۴٫۸۹-	uniform	X+	۱۰
۱٫۸۸۴	۱٫۲۴۲	۱٫۰۱۲	۲۳۴٫۸۹	Static forces	X+	۱۱
۱٫۸۱۳	۱٫۱۵۹	۰٫۹۵۳	۲۳۴٫۸۹-	Static forces	X+	۱۲
۲٫۱۰۴	۱٫۲۹۷	۱٫۰۴۷	۲۳۴٫۸۹	uniform	X-	۱۳
۱٫۹۲۳	۱٫۱۶۲	۰٫۹۸۹	۲۳۴٫۸۹-	uniform	X-	۱۴
۲٫۰۵۸	۱٫۳۰۰	۱٫۰۶۱	۲۳۴٫۸۹	Static forces	X-	۱۵
۱٫۸۸۲	۱٫۱۲۶	۰٫۹۷۴	۲۳۴٫۸۹-	Static forces	X-	۱۶
۵٫۷۳۸	۲٫۹۴۳	۲٫۲۳۰	۱۶۴٫۹۱	uniform	Y+	۱۷
۵٫۹۳۰	۳٫۰۷۸	۲٫۳۳۷	۱۶۴٫۹۱-	uniform	Y+	۱۸
۴٫۸۷۰	۲٫۵۶۳	۱٫۹۶۳	۱۶۴٫۹۱	Static forces	Y+	۱۹
۵٫۰۴۴	۲٫۶۳۵	۲٫۰۱۸	۱۶۴٫۹۱-	Static forces	Y+	۲۰
۵٫۸۵۰	۳٫۰۵۹	۲٫۳۲۴	۱۶۴٫۹۱	uniform	Y-	۲۱
۶٫۰۵۱	۳٫۱۲۲	۲٫۳۶۹	۱۶۴٫۹۱-	uniform	Y-	۲۲
۵٫۰۷۷	۲٫۷۱۰	۲٫۰۷۹	۱۶۴٫۹۱	Static forces	Y-	۲۳
۵٫۲۸۳	۲٫۸۱۰	۲٫۱۵۵	۱۶۴٫۹۱-	Static forces	Y-	۲۴

غلامرضا داوری

ارزیابی آسیب پذیری لرزه‌ای و ارائه راهکارهای استحکام بخشی خانه تاریخی قدکی



۴- نتیجه‌گیری

ساختمان قدکی با کاربری دانشکده معماری و شهرسازی در دانشگاه هنر اسلامی تبریز به وسیله تست فلت جک مورد آزمایش و با کمک نرم‌افزار 3Muri مدل‌سازی و تحلیل شد. نتایج حاصل از این تحلیل نشان داد که وضع موجود ساختمان در هر سه حالت حدی، شاخص ایمنی کمتر از یک و یا حدود یک دارد، این به این معنی است که هر چند مقاومت برشی راستای Y حدود ۳ برابر مقاومت برشی راستای X بود، ولی در حالت کلی ساختمان در برابر نیروی زلزله مقاومت لازم و کافی را ندارد. با استفاده از ضریب اصلاح، جداسازی در پلان و همچنین استفاده از نوارهای GFRP در دیوارهای هر دو راستا، باعث شد شاخص ایمنی برای هر سه حالت حدی افزایش یابد به طوری که در حالت حدی DL از ۳/۳ تا ۴۵/۴ برابر، در حالت حدی SD از ۲ تا ۴ برابر و در حالت حدی NC از ۲ تا ۳/۱ برابر شد. علاوه بر این، میانگین مقاومت برشی در راستای X، ۴ برابر و در راستای Y، ۲/۳ برابر افزایش یافته است به طوری که اختلاف مقاومت برشی در راستای Y نسبت به راستای X از ۳ برابر به ۱/۷ برابر کاهش یافته است که این امر در شکل (۱۱) مشهود است.

سپاس‌گزاری

وجود ندارد.

تعارض منافع

بین نویسندگان تعارضی وجود ندارد.

منابع مالی

نویسندگان اعلام می‌دارند برای انجام این پژوهش از حمایت مالی خاصی بهره‌مند نبوده‌اند.

فهرست منابع

- آخوندی، فرهاد؛ محمدپور، رضا و شهبازی، یاسر (۱۳۹۹). استفاده از مصالح FRP به روش NSM در مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمان‌های بنایی تاریخی. *دوفصلنامه پژوهش‌های باستان‌سنجی*، دوره ۶، شماره ۱، ص ۶۳-۸۵.
- امین‌پور، احمد و عباسی‌هرفته، محسن (۱۳۹۰). حداقل مداخله، بزرگترین چالش مداخلات حفاظتی میراث فرهنگی. *نشریه مرمت و معماری ایران*، دوره ۱، شماره ۱، ص ۶۹-۸۲.
- تقی‌نژاد، رامین (۱۳۹۹). *طراحی و بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها بر اساس سطح عملکرد*. نشر کتاب دانشگاهی.
- کی‌نژاد، محمدعلی و شیرازی، محمدرضا (۱۳۹۰). *خانه‌های تاریخی تبریز*. مؤسسه تالیف ترجمه و نشر آثار هنری متن.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112418>
- ASTM (2004). *ASTM-C 1197-04 Standard test method for in situ measurement of masonry deformability properties using flat-jack method*. ASTM International.
- Braga, F., & Liberatore, D. (1990). *A finite element for the analysis of the response of masonry buildings*. In *Proceedings of 5th North American masonry conference*.
- Boschi, S., Bilgin, H., & Korini, O. (2018). *Seismic vulnerability of historic masonry buildings: a case study in the center of Lucca*. *Procedia Structural Integrity*, 11, 169-176. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.023>, 2018
- Code 345. (2014). *Instruction for seismic rehabilitation of structures with Fiber Reinforced Polymer (FRP)*.

غلامرضا داوری

ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای و ارائه راهکارهای استحکام‌بخشی خانه تاریخی قدکی

- Journal of management and planning organization.
- Code 376. (2007). *Instruction for seismic rehabilitation of existing unreinforced masonry buildings*. Journal of management and planning organization.
 - European Committee for Standardization, C.E.N. (2005b). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*.
 - Documentation of restoration activities of Architecture and Urbanism Faculty.(2016). Tabriz Islamic Art University (Technical Office of Tabriz Islamic Art University)
 - European Committee for Standardization, C.E.N. (2005a). *Eurocode 6: Design of masonry structures-Part 1- 1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures*.
 - Gunes, B., Çoşgun, T., Sayin, B. (2021). *Seismic assessment of a reconstructed historic masonry structure: A case study on the ruins of Bigali castle mosque built in the early 1800s*. Journal of Building Engineering, 39, 102240. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.102240>
 - Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A., Cattari, S. (2013). *An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings*. Engineering Structures 56 (2013) 1787-1799
 - Magenes, G., & Fontana, A. D. (1998). *Simplified non-linear seismic analysis of masonry buildings*. In Proc. Br. Masonry Soc.
 - Tomaževič, M. (2007). *Damage as a measure for earthquake-resistant design of masonry structures: Slovenian experience* This article is one of a selection of papers published in this Special Issue on Masonry. Canadian Journal of Civil Engineering, 34(11), 1403-1412. <https://doi.org/10.1139/l07-128>

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Journal of Architecture and Urban Planning. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



نحوه ارجاع به این مقاله

داوری، غلامرضا؛ قره ایاقی، سمیرا و ناسخیان، شهریار (۱۴۰۲). ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای و ارائه راهکارهای استحکام‌بخشی خانه تاریخی قدکی. فصلنامه علمی اثر، دوره ۴۴، شماره ۲ (۱۰۱): ۲۷۴-۲۵۶.

DOI: 10.22034/44.2.256

URL: <https://athar.richt.ir/article-2-1644-fa.html>

