

Investigating Nonlinear Behavior and Proposing a Retrofitting Method for the Fire Station in Sarpol-e-zahab City

Shahin Faraji¹ , Mahnoosh Biglari^{2✉}

1. Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: shahinfaraji3636@gmail.com

2. Corresponding Author, Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: m.biglari@razi.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received

2025-09-13

Received in revised form

2025-10-28

Accepted

2025-12-18

Available online

2025-12-24

Keywords:

Unconfined masonry building,
Seismic retrofitting,
Shotcrete,
Nonlinear dynamic analysis,
Nonlinear static analysis

ABSTRACT

Iran is a seismically active country that has experienced many human casualties from earthquakes. By understanding seismic behavior and applying proper retrofitting strategies, it is possible to reduce future damage. On November 11, 2017, the Mw 7.3 Sarpol-e-zahab earthquake struck a large part of Kermanshah Province in western Iran. The earthquake caused extensive damage to buildings in Sarpol-e-zahab city. In this study, the nonlinear behavior of an unreinforced masonry fire station building located in Sarpol-e-zahab city was investigated. The damage to this structure, including diagonal cracks in the walls, served as the basis for validating the analyses performed. The structure was modeled and analyzed using a nonlinear dynamic method to develop retrofitting solutions. This structure performed poorly due to large openings in the X-direction and the absence of an effective cross-sectional area in the walls. Shotcrete was proposed as a retrofitting method. Using this approach, the elastic stiffness in the X-direction was improved by 47.2%, the behavior factor increased by 2.5 times, and the ductility ratio increased by 15.9% compared to the initial condition. Additionally, after retrofitting, the same parameters in the Y-direction showed significant improvements, with elastic stiffness increasing by 26.5%, the behavior factor by 16.2%, and the ductility ratio by 56.9%, demonstrating improved performance compared to before.

Cite this article: Faraji, Shahin., & Biglari, Mahnoosh. (2025). Investigating Nonlinear Behavior and Proposing a Retrofitting Method for the Fire Station in Sarpol-e-zahab City. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 2(2), 115-132.

DOI: 10.22126/amcen.2025.13175.1050



© The Author(s).

DOI: 10.22126/amcen.2025.13175.1050

Publisher: Razi University

Introduction

Natural disasters have long been regarded as a major challenge for humanity, and the effort to understand them has continuously driven various scientific and technological progress. Among these disasters, earthquakes are one of the most destructive, making research focused on understanding and minimizing earthquake-related damage a longstanding priority for seismically active nations. Iran is recognized as one of the world's earthquake-prone regions. Masonry buildings, constructed with traditional materials, remain among the most common types of structures, particularly in older cities. These buildings are typically used for residential, educational, and service functions. However, most of them lack any seismic resisting system and have low resistance to seismic forces. This underscores the need to strengthen and retrofit unreinforced masonry buildings.

The primary causes of structural damage in masonry buildings include the use of heavy, low-strength bricks, weak or insufficient mortar, a lack of or absence of confining elements, interruptions in load transfer paths, non-rigid diaphragms, and inadequate load-bearing walls. Retrofitting involves a series of measures aimed at increasing the resistance and ductility of structural members against loads, thereby improving the overall integrity of the building. By strengthening both horizontal and vertical elements and enhancing lateral strength through various techniques, the box-like behavior of masonry walls can be improved, increasing their ability to withstand lateral loads.

Method

Among the common techniques used for seismic retrofitting, shotcrete is a prominent example. It involves spraying a layer of concrete onto masonry walls—either covered with or without a steel rebar mesh—and is widely adopted for strengthening masonry structures against earthquakes.

This study involves retrofitting the building with shotcrete. The process for applying this reinforcement layer, along with the rebar mesh, includes: first, attaching the steel mesh to the wall to enhance its tensile and flexural strength, and then—whether using a dry-mix or wet-mix method—the concrete layer is sprayed onto the surface through a nozzle at high velocity and pressure.

To ensure shear stress transfer and achieve composite action between the wall and the shotcrete layer, the steel mesh is anchored to the wall using various methods, such as drilling holes and inserting shear connector bars into them. These bars are then firmly fixed with injected grout or epoxy adhesive. In this research, the rebars used for shotcrete strengthening of the building walls are No. 8 bars, with a 4 cm thick concrete layer, and the spacing between the rebars in the shotcrete mesh is 15 cm.

Results

The selected building was retrofitted on both sides with reinforced shotcrete, with each concrete layer having a thickness of 4 centimeters. The structure was then analyzed using the Sarpol-e-zahab earthquake acceleration record. In the building retrofitted with reinforced shotcrete, the seismic capacity in the X-direction increased by 5,000 kN, while in the Y-direction, the capacity rose by 15,000 kN. Additionally, the stress in the shotcrete was 3.9 MPa, and the stress in the reinforcing steel bars embedded in the shotcrete reached 225 MP.

Conclusions

Damages in unreinforced masonry walls typically occur mainly in the lower areas, the wall toe, or along the diagonal, often accompanied by wide cracks. Applying shotcrete not only provides a strong, rigid layer to the load-bearing wall elements but also, through the bond created between the concrete and the masonry substrate, improves the wall's ductility. It also helps spread damage over a larger area, thereby changing how the wall may fail. Based on nonlinear time-history analysis using the Sarpol-e-zahab earthquake acceleration record, the seismic capacity of the shotcrete-retrofitted specimen was found to be 1.4 times higher than that of the unretrofitted specimen. The maximum stress in the unretrofitted model, concentrated at the wall toe under the Sarpol-e-zahab ground motion recorded at station SPZ, reached 3.92 MPa. After retrofitting with shotcrete, the maximum stress in the walls in the X-direction of the structure decreased to 3.7 MPa, showing improvement in structural performance.

By comparing the results of the nonlinear time-history analyses, the trend of increasing structural capacity becomes clear. In the shotcrete-retrofitted building, the highest energy absorption and stiffness were observed. The reinforced shotcrete retrofitting technique not only demonstrated superior analytical performance but also proved effective in practical aspects such as cost, availability of skilled labor and local materials, and minimal interference with the existing structure, making it a highly suitable retrofit method.

Author Contributions

author participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



ارزیابی رفتار غیرخطی و ارائه راهکار بهسازی ایستگاه آتش نشانی در شهر سرپل ذهاب

شاهین فرجی^۱، مهنوش بیگلری^۲

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: shahinfaraji3636@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: m.biglari@razi.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۶/۲۲

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۸/۰۶

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۹/۲۷

تاریخ انتشار:

۱۴۰۴/۱۰/۰۳

کلیدواژه‌ها:

ساختمان بنایی محصور نشده،

بهسازی لرزه‌ای،

شاتکریت،

تحلیل استاتیکی غیرخطی،

تحلیل دینامیکی غیرخطی

ایران کشوری لرزه‌خیز است که تاکنون در اثر رخدادهای لرزه‌ای، متحمل تلفات انسانی بسیاری شده است. با شناخت رفتار لرزه‌ای و پیاده‌سازی راهکارهای بهسازی مناسب می‌توان تلفات جانی در زلزله‌های آینده را کاهش داد. در بیست و یکم آبان ماه ۱۳۹۶ زمین‌لرزه ازگله با بزرگای گشتاوری ۷/۳ بخش وسیعی از غرب ایران را به لرزه درآورد. این زلزله خسارات جدی به ساختمان‌های مختلف در نزدیکی رومرکز وارد کرد. در این تحقیق، رفتار غیرخطی ساختمان بنایی غیرمسلح محصور نشده‌ای که یکی از ایستگاه‌های آتش‌نشانی در شهر سرپل ذهاب یکی از شهرستان‌های استان کرمانشاه است، مورد مطالعه قرار گرفته است. خسارات وارد بر این سازه شامل ترک‌های مورب در دیوارها مبنای صحت سنجی تحلیل‌های انجام‌شده بودند. سازه بعد از مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس و تحلیل به روش دینامیکی غیرخطی، برای ارائه راهکارهای بهسازی، مورد بررسی قرار گرفت. این سازه به علت وجود بازشوهای بزرگ در جهت X و کمبود سطح مقطع مؤثر دیوارها، عملکرد بسیار ضعیفی داشت. استفاده از شاتکریت به عنوان روش بهسازی پیشنهاد شد. استفاده از این روش، در جهت X سازه، سختی الاستیک را ۴۷/۲٪، ضریب رفتار را دو و نیم برابر و نسبت شکل‌پذیری را ۹/۱۵٪ نسبت به سازه اولیه بهبود بخشید. علاوه بر این، پس از بهسازی همین پارامترها در جهت Y نیز بهبود قابل توجهی نشان دادند. پارامترهای سختی الاستیک ۲۶/۵٪، ضریب رفتار ۱۶/۲٪ و نسبت شکل‌پذیری ۵۶/۹٪ عملکرد بهتری نسبت به شرایط اولیه نشان داد.

استناد: فرجی، شاهین؛ بیگلری، مهنوش. (۱۴۰۴). ارزیابی رفتار غیرخطی و ارائه راهکار بهسازی ایستگاه آتش‌نشانی در شهر سرپل ذهاب. مجله

مدل‌سازی پیشرفته در مهندسی عمران، ۲(۱۳۲)-۱۱۵. DOI: 10.22126/amcen.2025.13175.1050



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی.

۱. مقدمه

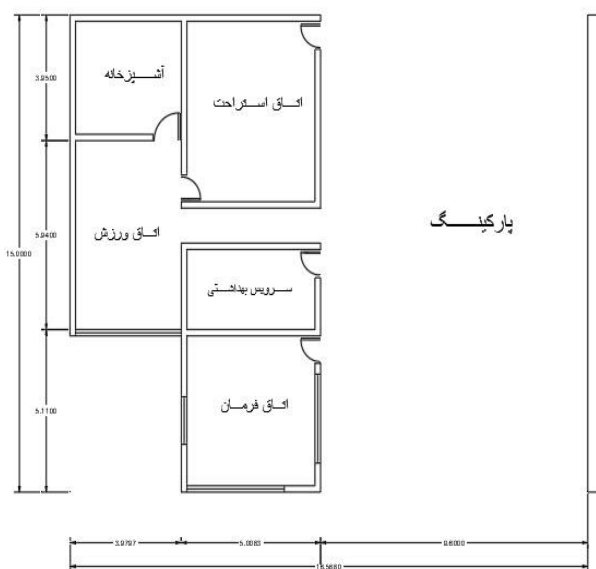
بلایای طبیعی از گذشته به عنوان یک چالش برای بشر محسوب شده‌اند و شناخت آن‌ها همواره محرک پیشرفت‌ها و دستاوردهای مختلف بوده است. زلزله بدون شک یکی از خطرناک‌ترین بلایای طبیعی است و از این رو، مطالعه برای شناخت و کاهش خسارات ناشی از زمین‌لرزه همواره از اولویت‌های کشورهای لرزه‌خیز بوده است. ایران یکی از مناطق زلزله‌خیز دنیاست. ساختمان‌های ساخته شده از مصالح بنایی هنوز خصوصاً در شهرهای قدیمی از جمله متداول‌ترین نوع ساختمان‌ها است. این ساختمان‌ها عموماً کاربری مسکونی و آموزشی و خدماتی دارند. اغلب این ساختمان‌ها هیچ سیستم باربر جانبی ندارند و در برابر نیروهای زلزله مقاومت کمی از خود نشان می‌دهند. همین مسأله اهمیت توجه به بهسازی ساختمان‌های بنایی غیرمسلح را نشان می‌دهد. از مهم‌ترین عوامل مؤثر در تخریب ساختمان‌ها با مصالح بنایی می‌توان به استفاده از آجرهای سنگین با مقاومت فشاری کم، استفاده از ملات ضعیف و ناکافی، کمبود یا فقدان المان‌های محصورکننده، ناپیوستگی مسیر انتقال بار، دیافراگم‌های غیر صلب و کمبود دیوارهای باربر اشاره نمود. بهسازی مجموعه اقداماتی است که سبب افزایش مقاومت یا شکل‌پذیری عضو در برابر نیروهای وارده و بهبود یکپارچگی سازه می‌گردد. با تقویت المان‌های افقی و عمودی و افزایش مقاومت جانبی دیوارهای بنایی با روش‌های مختلف می‌توان به بهبود رفتار جعبه‌ای این ساختمان‌ها کمک کرد و تحمل آن‌ها در برابر بارهای جانبی را بالا برد. علاوه بر این، با اتصال کف‌ها و دیوارها به یکدیگر و همچنین استفاده از کلاف‌ها در نقاط مختلف، به سازه عملکرد یکپارچه‌ای در برابر بار جانبی داد. مطالعه رفتارهای لرزه‌ای سازه‌های با مصالح بنایی همواره مورد توجه بوده است. بندتی و بنزونی^۱، یک مدل المان محدود غیرخطی مطابق نتایج آزمایش‌های تجربی و به خصوص آزمایش‌های میز لرزان ارائه کردند که بسیاری از مدل‌ها و روابط عددی ارائه شده برای شبیه‌سازی رفتار سازه‌ها پس از آن به آن توجه داشتند. تومازویک^۲، پس از بررسی یک سازه چهار طبقه آجری طی آزمایش میز لرزان، اقدام به ارائه یک مدل ساده شده جرم و فنر با استفاده از مشاهدات خود

کرد. خان^۳ و همکاران^۴، به بررسی مقاوم سازی دیوارهای بنایی با لایه شاتکریت روی یک سطح پرداختند. آن‌ها ۱۷ نمونه مختلف ساختند و آن‌ها را تحت یک بارگذاری چرخه‌ای معکوس استاتیکی که در امتداد قطر پنل‌ها اعمال می‌شد آزمایش کردند. نتیجه اعمال شاتکریت رو پنل‌های غیرمسلح نشان داد که این روش یک روش مؤثر در افزایش ظرفیت تغییر شکل غیر الاستیک است.

تاکنون آزمایش‌های متعددی، استفاده از شاتکریت برای بهسازی لرزه‌ای را مورد بررسی و آنالیز قرار داده‌اند. آبرامز^۴ و همکاران^۴، در طی بررسی تأثیر چهار روش بهسازی شامل نوارهای پلیمری، لایه شاتکریت، توری آهنی مدفون در لایه ملات، و تسلیح مغزه بر روی رفتار پایه‌های آجری، تحت بار تناوبی، اعلام داشتند که نمونه تقویت شده با شاتکریت بیشترین سختی اولیه، مقاومت تسلیم، و توانایی استهلاک انرژی را از خود نشان داده است. نتایجی مشابه در آزمایش‌های لین^۵ و همکاران^۵، روی ۲۵ دیوارچه آجری، با انواع چینش آجر و تقویت با ضخامت‌های مختلف شاتکریت، مشاهده شد. به گزارش آن‌ها، مقاومت برشی نمونه‌های تقویت شده با ضخامت یک و دو آجر در حدود ۳/۲ برابر نمونه‌های تقویت نشده بود. به طور مشابه، الگواودی^۶ و همکاران^۶، حدود ۲۶۰ درصد افزایش مقاومت تحت بارهای استاتیکی تناوبی برای دیوارهای ساخته شده با آجرهای حفره دار و تقویت شده با شاتکریت به ثبت رساندند. شبدین^۷ و همکاران^۷، اثر مقید کردن آرماتوهای عمودی شاتکریت به پی را برای دو نوع دیوار با نسبت ابعاد (ارتفاع به طول) متفاوت بررسی کردند. از جمله مشاهدات این آزمایش‌ها، می‌توان به توانایی لایه شاتکریت در افزایش مقاومت و تعویق شکست گهواره‌ای برای دیوارها با نسبت ابعاد بزرگ‌تر از ۱، تغییر مود خرابی از شکست گهواره‌ای به شکست برشی برای دیوارها با نسبت ابعاد کمتر از ۱، و افزایش مقاومت خارج از صفحه دیوار اشاره کرد. لوچونی^۸، به بررسی دیوار بهسازی شده توسط شاتکریت در هنگام بارگذاری لرزه‌ای پرداخت و تحقیقات حاکی از آن بود که

³ Kahn⁴ Abrams⁵ Lin⁶ ElGawady⁷ Shabdin⁸ Luccioni¹ Benedetti² Tomazevic

در یک طبقه با ارتفاع ۴/۶۰ متر با مصالح بنایی ساخته شده است. ضخامت سقف و دیوارهای آن ۴۰ سانتیمتر می‌باشد، تعداد پرسنل آتش‌نشانی این ایستگاه ۱۵ نفر است، و دارای تجهیزات آتش‌نشانی مانند ماشین، پمپ آب و غیره می‌باشد. سیستم سازه‌ای در این سازه دیوار باربر بنایی می‌باشد که مصالح آن از آجر و ملات است. شکل‌های (۱) و (۲)، به ترتیب، پلان و نمای سه‌بعدی و موقعیت جغرافیایی ایستگاه آتش‌نشانی مورد بررسی را نشان می‌دهد. بعد از وقوع زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ با بزرگای گشتاوری ۷/۳ از گله، به این سازه خساراتی وارد شد.



شکل ۱. پلان ایستگاه آتش‌نشانی سرپل ذهاب



(الف)

شاتکریت علی‌الخصوص شاتکریت پشت و روی دیوار، توسط آرما تور قادر به افزایش مقاومت جانبی دیوار به مقدار زیاد است. یکرنگ‌نیا و اقبالی [۹] در مقاله‌ای به تحلیل رفتار لرزه‌ای دیوار بنایی تقویت‌شده با شاتکریت پرداختند و نشان دادند که در بهسازی ساختمان بنایی مدارس توسط شاتکریت، دیوارهای جانبی روش به‌صرفه و در دسترسی می‌باشد. مطالعه غیائی و همکاران [۱۰]، شامل پیشنهادهایی در زمینه تحلیل دیوارهای تقویت‌شده با شاتکریت است. آن‌ها مطالعه کار خود را با مدل‌سازی دو دیوار آجری و با در نظر گرفتن تمامی جزئیات شرایط مرزی شروع کردند. پس از مقایسه خروجی‌ها و نتایج آزمایش‌های انجام‌شده روی دیوارهای واقعی، و اطمینان از صحت مدل، مدل هر دیوار با دو الگوی مختلف، تقویت و تحلیل شد تا امکان مشاهده انواع حالات خرابی و ارائه روابط تحلیلی برای محاسبه مقاومت هر خرابی و تصدیق آن‌ها با نتایج عددی و آزمایشگاهی فراهم شود. هدف پژوهش حاضر، بررسی رفتار ساختمان بنایی غیرمسلح محصور نشده با کاربری آتش‌نشانی واقع در شهر سرپل ذهاب، که یکی از شهرستانهای استان کرمانشاه است، می‌باشد. در این تحقیق، پس از مدل‌سازی این ساختمان و ارزیابی صحت مدل با مقایسه با خرابی‌های رخ داده در اثر زلزله با بزرگای گشتاوری ۷/۳ در ۲۱ آبان ۱۳۹۶ از گله، رفتار دینامیکی آن تحت شتاب زلزله مذکور، بررسی و راهکار بهسازی برای آن ارائه می‌شود.

۲. معرفی ساختمان مورد مطالعه: ایستگاه آتش‌نشانی شهر سرپل ذهاب واقع در استان کرمانشاه

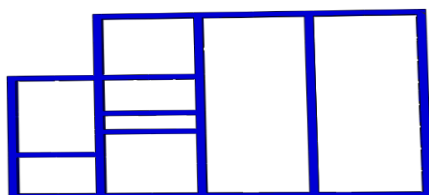
آتش‌سوزی یکی از رایج‌ترین پیامدهای زلزله است و ایستگاه‌های آتش‌نشانی از جمله مراکزی هستند که قبل از وقوع بحران باید در آمادگی کامل باشند. در حین بحران بدون تلفات جانی و مالی، تمامی امکانات آن‌ها در دسترس باشد تا بلافاصله پس از وقوع بحران بتوانند امدادرسانی فوری و سریع داشته باشد. اصلاح عملکرد این عوامل می‌تواند باعث کاهش خطرپذیری لرزه‌ای شود. در این مقاله به بررسی رفتار لرزه‌ای و بهسازی ساختمان یکی از ایستگاه‌های آتش‌نشانی شهر سرپل ذهاب در استان کرمانشاه پرداخته می‌شود.

این ساختمان به مساحت ۲۸۵ مترمربع در موقعیت جغرافیایی عرض جغرافیایی ۴۵° ۵۱' ۲۱" و طول جغرافیایی ۳۴° ۲۸' ۰۴"

پروفیل ها از المان پوسته (شیل)^{۱۰} و جهت مدل سازی میلگردها از المان سیم (وایر)^{۱۱} استفاده شده است.

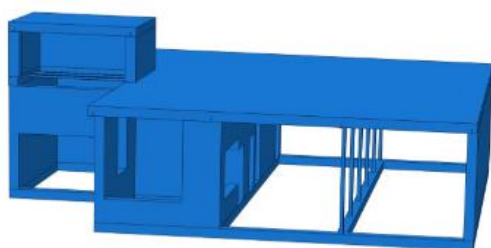


(الف)

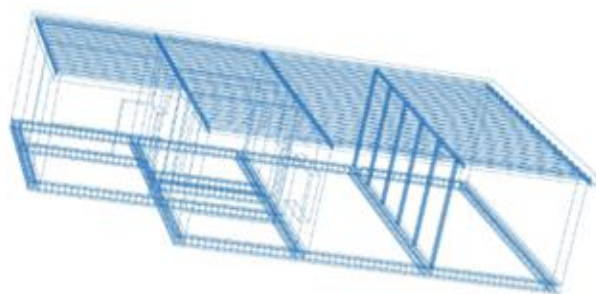


(ب)

شکل ۳. (الف) دیوارها (ب) تیرریزی سقف ساختمان



(الف)



(ب)

شکل ۴. (الف) ساختمان تکمیل شده (ب) نمایی از میلگردهای سقف و زیر دیوارها و تیر ریزی سقف



(ب)

شکل ۲. (الف) نمای بر ساختمان ایستگاه آتش نشانی شهر سرپل ذهاب، (ب) طول و عرض جغرافیایی ساختمان آتش نشانی

۳. مراحل مدل سازی ایستگاه آتش نشانی شهر سرپل ذهاب

مدل سازی ساختمان آتش نشانی به صورت المان های ماکرو در نرم افزار آباکوس صورت گرفته است. در این روش، آجر و ملات به صورت همگن مدل می شوند. به بیان دیگر مصالح بنایی به عنوان کامپوزیت (متشکل از آجر و ملات) فرض می شوند. ضخامت دیوارهای باربر و غیر باربر ۴۰ سانتیمتر و ابعاد ساختمان ۲۰ در ۱۵ متر است. در داخل پارکینگ ستون هایی از پروفیل IPB140 و به فواصل ۴ متری نسبت به همدیگر قرار گرفته اند. ارتفاع ستون ها ۴ متر است. تیرهای فرعی استفاده شده در سقف ساختمان از نوع IPE120 و تیرهای اصلی از نوع IPE140 است که در بتن مدفون شده اند. مشخصات مصالح مربوط به واحد آجری که شامل ملات و آجر می باشد به نرم افزار معرفی می شود. میلگردهای طولی مورد استفاده در زیر دیوارها از نمره ۱۲ استفاده شده است و توسط میلگردهای عرضی به ابعاد ۴۰ در ۴۰ به فواصل ۲۵ سانتیمتر به یکدیگر متصل شده اند. در شکل (۳)، مدل دیوارها و تیرریزی سقف نمایش داده شده است. نمایی از میلگردهای کلاف و مدل کامل ساختمان در شکل (۴) نشان داده شده است. برای مدل سازی دیوارهای آجری، از المان های سخت (سالید)^۹ و برای مدل سازی

^{۱۰} shell

^{۱۱} wire

^۹ solid

۱-۳. مشخصات مصالح

مشخصات مکانیکی مصالح بنایی و بتن استفاده شده در ساختمان آتش‌نشانی شهر سرپل ذهاب مشابه مولا^{۱۲} و ویتالیانی^{۱۳} [۱۱] فرض شده است که مشابه این تحقیق یک ساختمان دو طبقه مصالح بنایی بدون کلاف را مورد بررسی قرار داده‌اند. این ساختمان از نظر سیستم سازه‌ای و نوع آجر مصرفی تا حدود زیادی مشابه ساختمان آتش‌نشانی شهر سرپل ذهاب است. مشخصات مصالح مفروض در جداول (۱ و ۲) ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی مصالح بنایی

مدول الاستیسیته (MPa)	مقاومت برشی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت (kN/m ³)	نوع مصالح
۵	۲۰	۵	۰/۱۵	بنایی

جدول ۲. مشخصات مکانیکی فولاد مصرفی st37

تنش تسلیم در ناحیه کششی (MPa)	تنش تسلیم در ناحیه فشاری (MPa)	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)	چگالی (kg/m ³)	نوع مصالح
۲۲۰	۲۲۰	۰/۳	۱۹۹۰۰۰	۷۸۵۰	فولاد-st37

۲-۳. مدل رفتاری بتن آسیب‌دیده پلاستیک^{۱۴}

کتابخانه مصالح در نرم‌افزار آباکوس شامل چندین نوع رفتار غیرخطی از مواد مختلف مانند فلزات، چدن، خاک و بتن می‌باشد. متأسفانه برای مدل‌سازی مصالح بنایی مدلی در این نرم‌افزار وجود ندارد. هرچند مدل موجود برای بتن در نرم‌افزار آباکوس قابلیت مدل‌سازی سازه‌های بنایی را چنان‌چه در ذیل توضیح داده می‌شود، دارد. این مدل در محیط‌های آباکوس اکسپلیسیت^{۱۵} و

آباکوس استاندارد^{۱۶} جهت مدل کردن بتن و دیگر مواد شکننده در انواع سازه‌ها (تیر، خرپا، پوسته و اجسام توپر) تعبیه شده است. این مدل از مفهوم آسیب‌دیدگی همسانگرد در محدوده خطی و با ترکیب کشش ایزوتروپ و فشار پلاستیک جهت نمایش رفتار غیرخطی بتن استفاده می‌کند. همچنین این مدل قادر به مدل‌سازی شرایط بارگذاری دلخواه مانند بارگذاری چرخه‌ای بوده و کاهش سختی الاستیک با در نظر گرفتن کرنش پلاستیک هم در کشش و هم در فشار توجیه می‌گردد. مدل معرفی شده برای بتن در حالت آسیب‌دیده یک مدل پیوسته براساس رفتار پلاستیک بوده و دو مکانیزم اصلی خرابی در این مدل و ترک‌های ناشی از کشش و خردشدگی در قسمت فشاری می‌باشد. جدول (۳)، پارامترهای مفروض این مدل رفتاری را نمایش می‌دهد.

جدول ۳. پارامترهای مدل رفتاری بتن آسیب‌دیده

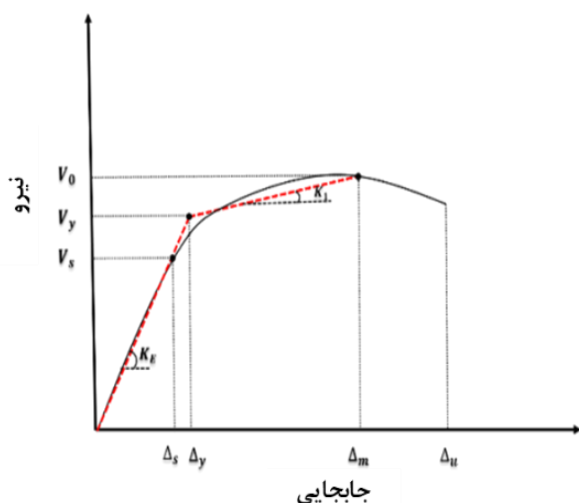
پارامتر	نسبت مقاومت فشاری دو محوره به تک محوره بتن	خروج از مرکزیت پلاستیک	زاویه اتساع (درجه)
ویسکوالاستیک	۱/۱۶	۰/۱	۲۰

۴. آنالیز استاتیکی غیرخطی و محاسبه تغییر مکان هدف

روش تحلیل استاتیکی غیرخطی شامل دو مرحله است. در مرحله اول تغییر مکان هدف تعیین می‌شود (تخمینی از بالاترین تغییر مکان محتمل تحت تحریک زلزله). این کار عموماً با به دست آوردن پاسخ غیرارتجاعی یک سیستم یک درجه آزاد معادل انجام می‌شود. در مرحله دوم نیروهای جانبی به طور فزاینده به مدل سازه اعمال می‌شود تا تغییر مکان نقطه کنترل، برابر تغییر مکان هدف شود. در این روش، بار جانبی ناشی از زلزله، استاتیکی و به تدریج بصورت فزاینده به سازه اعمال می‌شود تا آنجا که تغییر مکان در یک نقطه خاص (نقطه کنترل)، تحت اثر بار جانبی، به مقدار مشخصی (تغییر مکان هدف) برسد و یا سازه فروریزد. در هنگام تحلیل، تغییر شکل‌های سازه و نیروهای داخلی اعضا به طور پیوسته کنترل و نیروی طراحی و نیاز تغییر شکل در هر عضو برای

¹² Mola¹³ Vitaliani¹⁴ Concrete Damaged Plasticity Model¹⁵ ABAQUS/ Explicit¹⁶ ABAQUS/ Standard

جابجایی منحنی دوخطی، و Δ_y جابجایی حد تسلیم در منحنی دوخطی است.



شکل ۵. دوخطی سازی نمودار برش پایه-تغییر مکان به روش یانگ

۴-۱. نتایج آنالیز استاتیکی غیرخطی

در آنالیز استاتیکی غیرخطی میزان بار ثقلی محاسبه شده به صورت بار فشاری به مقدار ۵۴۱ نیوتن بر متر مربع است که به سطح بالای سقف اعمال شده است و اعمال بارهای جانبی بارگذاری به صورت کنترل تغییر مکان انجام گرفته است که میزان این جابجایی در دو راستای X و Y به ساختمان آتش نشانی به ترتیب به میزان ۲۶ و ۱۴ سانتیمتر اعمال شده است که این مقدار از محاسبه تغییر مکان هدف به دست آورده شده است. دیوارهای موجود در جهت X ساختمان مورد بررسی به چندین دلیل عملکرد ضعیفی دارند. که می توان به کمبود مساحت سطح دیوار و وجود بازشوهای بزرگ در این جهت ساختمان اشاره کرد. همچنین با توجه به نتیجه تحلیل در شکل (۶)، سختی اولیه دیوار در جهت X، ۲۵ درصد کمتر از جهت Y ساختمان است. در شکل (۷)، ترک های قطری به وقوع پیوسته در جهت X ساختمان بعد از زلزله قابل مشاهده است.

تغییر مکان های زلزله محاسبه می شود. حاصل تحلیل استاتیکی غیرخطی، نمودار نیروی برش پایه-تغییر مکان است. براساس دستورالعمل بهسازی [۱۲] تغییر مکان هدف طبق رابطه (۱)، محاسبه می شود.

$$\delta_i = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (1)$$

که در آن، T_e زمان تناوب اصلی ساختمان در جهت مورد بررسی برحسب ثانیه. C_0 : ضریب اصلاح برای ارتباط تغییر مکان طیفی سیستم یک درجه آزادی به تغییر مکان بام سیستم چند درجه آزادی. C_1 : ضریب اصلاح برای تبدیل تغییر مکان های محاسبه شده از پاسخ خطی به ماکزیمم تغییر مکان های غیرخطی مورد انتظار سازه یک درجه آزادی. S_a : شتاب طیفی برای زمان تناوب اصلی مؤثر T_e . g : شتاب گرانش است.

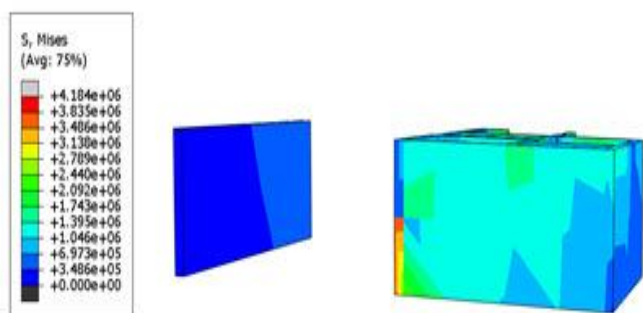
همان طور که ذکر شد یکی از خروجی های حاصل از نتایج آنالیز استاتیکی غیرخطی، نمودار بار-تغییر مکان است که از دوخطی کردن این نمودارها پارامترهای ضریب رفتار (R) (رابطه ۲)، ضریب شکل پذیری (μ) (رابطه ۳)، سختی الاستیک (K_E) (شیب خط اول) و سختی ثانویه (K_I) (شیب خط دوم) است. در این پژوهش از روش یانگ [۱۳] مطابق شکل (۵)، به دوخطی کردن نمودارهای بار-تغییر مکان پرداخته شده است. در این روش منحنی دوخطی با ادامه دادن محدوده الاستیک و به دست آوردن برش پایه تسلیم و سپس وصل کردن آن به برش پایه حداکثر به نحوی که انرژی کرنشی ذخیره شده تغییری ننماید حاصل می شود. در این حالت سطح زیر نمودار پوش آور معادل سطح زیر نمودار منحنی دوخطی فرض می شود.

$$R = R_s R_\mu = \frac{V_y V_E}{V_s V_y} = \frac{V_y K_E \Delta_E}{V_s V_y} = \frac{V_y K_E \sqrt{\frac{2A}{K_E}}}{V_s V_y} \quad (2)$$

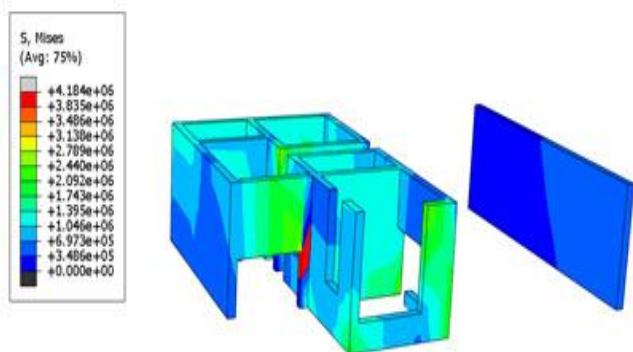
$$\mu = \frac{\Delta_m}{\Delta_y} \quad (3)$$

که در این روابط مطابق شکل ۵، V_y نیرو حد تسلیم در نمودار دوخطی، V_s نیروی حد تسلیم در منحنی پوش آور، K_E سختی الاستیک نمودار دوخطی، A سطح زیر نمودار پوش آور، Δ_m بیشینه

ظرفیت پلاستیک مصالح بنایی است. مقدار حداکثر تنش به وجود آمده در دیوارها به میزان $3/92$ مگاپاسکال است در صورتی که مقاومت فشاری مجاز دیوار $3/39$ مگاپاسکال است که سبب آسیب و به وجود آمدن ترک در اطراف بازشو شده است. به تعبیری مساحت سطح بازشو در ساختمان بنایی رابطه مستقیم با درصد آسیب‌پذیری ساختمان دارد.



(الف)

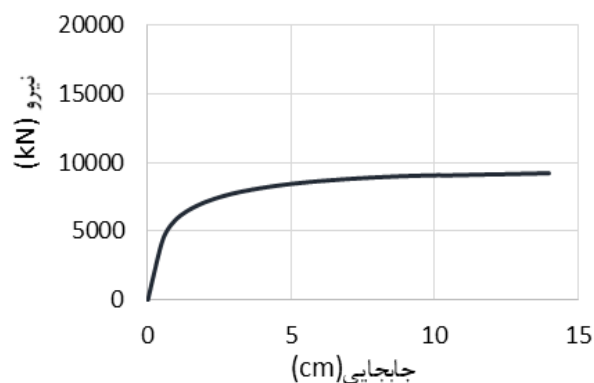


(ب)

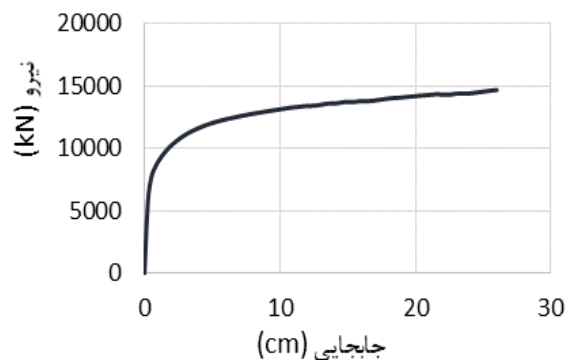
شکل ۸. (الف) تنش در دیوارهای بنایی (ب) وجه پشت ساختمان

در واقعیت دیوارهایی که در ساختمان دچار آسیب شده‌اند شامل دیوارهای کناری و پشت ساختمان می‌باشد که در شکل (۹ و ۱۰) مشاهده می‌شود. این دیوارها در حین زلزله دچار ترک شده‌اند. با توجه به نتایج آنالیز استاتیکی غیرخطی، محل این تمرکز تنش‌ها در واقعیت با محل ترک‌ها در دیوارها حین زلزله یکسان است.

(الف)



(ب)

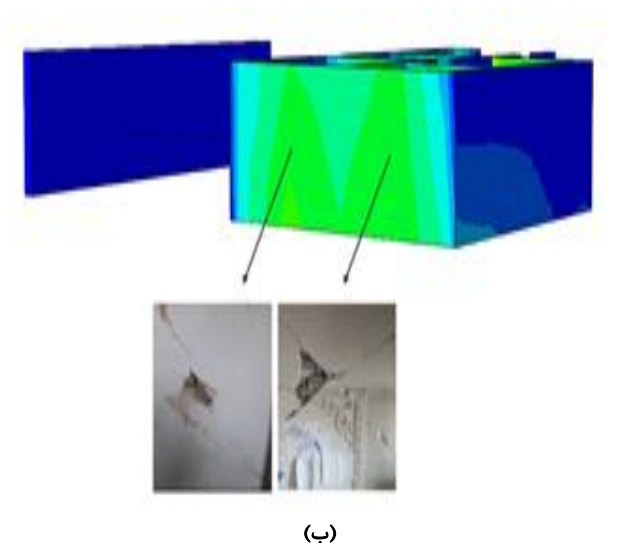


شکل ۶. نتیجه نمودار ظرفیت ساختمان (نیرو- تغییر مکان) (الف) در جهت X ساختمان- (ب) در جهت Y ساختمان



شکل ۷. آسیب‌های وارد شده به ساختمان بعد از زلزله

در شکل (۸)، مقدار تنش به وجود آمده در دیوارها به نمایش گذاشته شده است. مقدار تنش حداکثر به وجود آمده بیشتر از

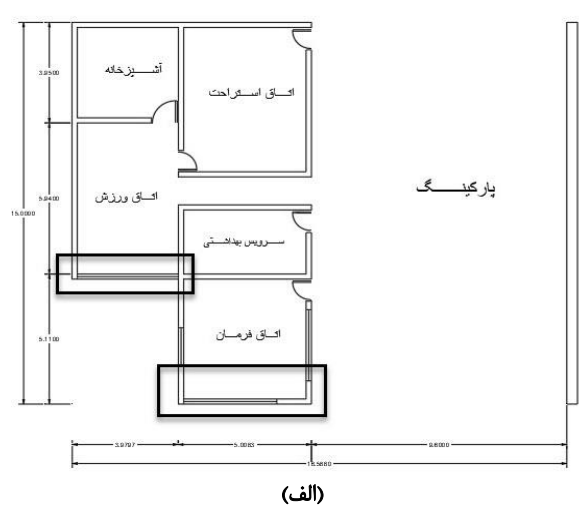


(ب)

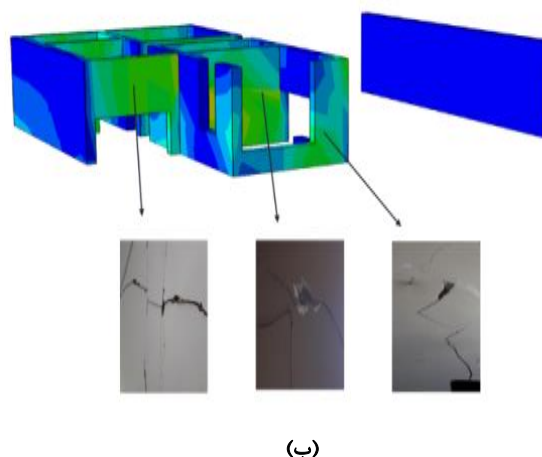
شکل ۱۰. (الف) خرابی‌های به وقوع پیوسته در زلزله واقعی ایستگاه آتش‌نشانی شهر سرپل‌دهاب (ب) محل خرابی در پلان

۴-۲. ارائه راهکار بهسازی

از جمله روش‌های بهسازی متداول می‌توان به شاتکریت اشاره کرد. پاشش لایه بتنی روی دیوارهای مصالح بنایی پوشانده شده با یا بدون شبکه میلگرد فولادی که با نام شاتکریت شناخته می‌شود، یکی از روش‌های رایج در بهسازی لرزه‌ای سازه‌های بنایی است. در این پژوهش بهسازی ساختمان در دو جهت به صورت دوطرفه توسط شاتکریت صورت می‌گیرد. ترتیب اعمال این لایه تقویتی به همراه شبکه میلگرد، بدین صورت است که ابتدا شبکه میلگرد برای تقویت مقاومت کششی و خمشی به دیوار متصل می‌شود و سپس، صرف‌نظر از شیوه اختلاط مصالح (خشک و یا تر)، لایه بتنی به وسیله یک نازل و با سرعت و فشار زیاد بر روی سطوح موردنظر پاشیده می‌شود. برای انتقال تنش‌های برشی و ایجاد عملکرد کامپوزیت بین دیوار و شاتکریت، شبکه میلگرد به طرق مختلف، نظیر سوراخ کردن دیوار و استفاده از میلگردهای برش‌گیر که درون سوراخ‌ها قرار می‌گیرد و با تزریق ملات و یا چسب اپوکسی محکم می‌شوند، به دیوارها متصل می‌شود. طبق شکل (۱۱)، میلگرد مورد استفاده در شاتکریت دیوارهای ساختمان، نمره ۸ و ضخامت بتن ۴ سانتیمتر است. فواصل میلگردهای استفاده‌شده در شاتکریت، ۱۵

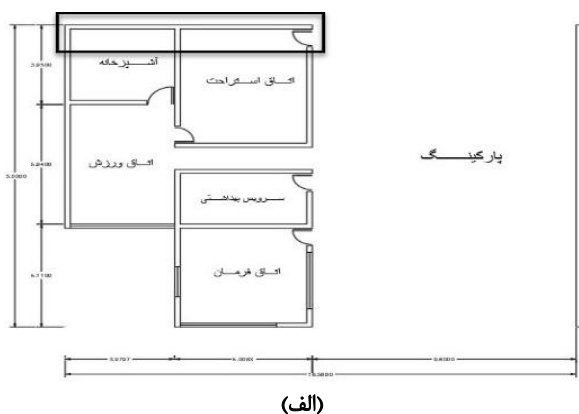


(الف)



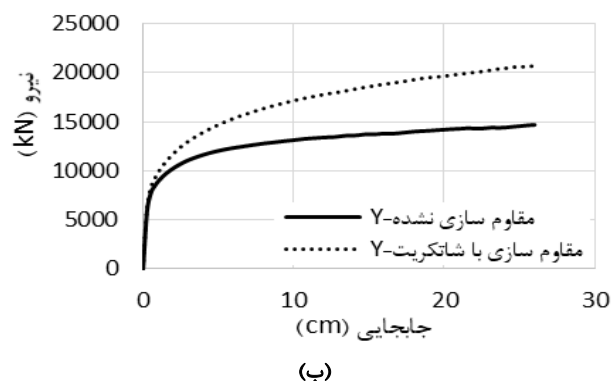
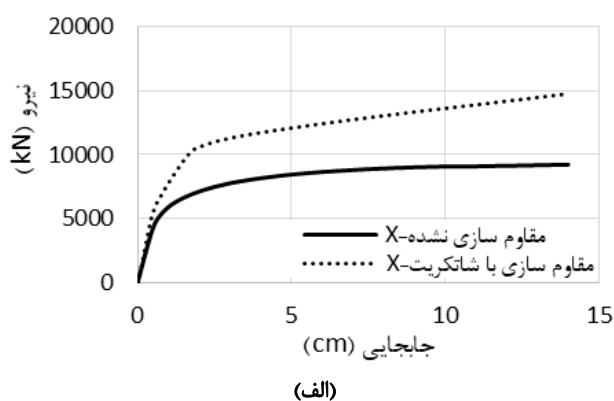
(ب)

شکل ۹. (الف) خرابی‌های به وقوع پیوسته در دیوارهای کناری ساختمان در زلزله ایستگاه آتش‌نشانی شهر سرپل‌دهاب (ب) محل خرابی در پلان



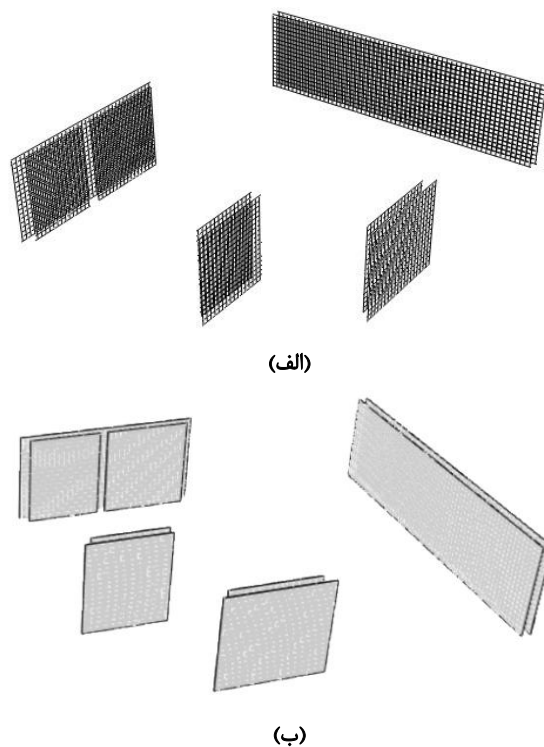
(الف)

سختی ثانویه و ضریب رفتار و نسبت شکل‌پذیری محاسبه گردیده‌اند. شکل‌های (۱۴ الف و ب)، به ترتیب، نمودارهای دوطبقی شده بدون بهسازی و همراه با بهسازی را در جهت X و شکل‌های (۱۵ الف و ب) همان نمودارها را در جهت Y نشان می‌دهند. مطابق جدول (۴)، در جهت X، نمونه موردنظر، زمانی که با شاتکریت تحت بهسازی قرار می‌گیرد، پارامترهای سختی الاستیک $47/17\%$ ، ضریب رفتار دو و نیم برابر و نسبت شکل‌پذیری $9/15\%$ عملکرد بهتری نسبت به نمونه موردنظر بدون شاتکریت دارد. در جهت Y، زمانی که ساختمان تحت بهسازی با شاتکریت قرار می‌گیرد، پارامترهای سختی الاستیک $26/5\%$ ، ضریب رفتار $16/17\%$ و نسبت شکل‌پذیری $56/9\%$ عملکرد بهتری نسبت به نمونه موردنظر بدون شاتکریت دارد. به‌طور کلی رفتار سازه در جهت X، پس از بهسازی عملکرد بهتری از خود نشان داده است.

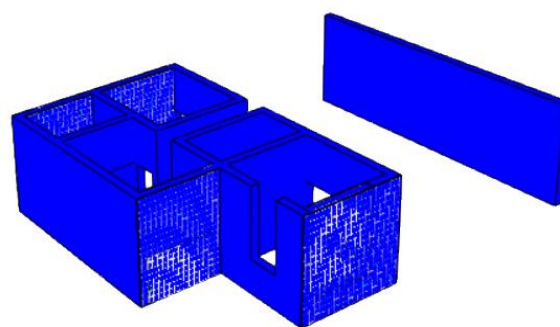


شکل ۱۳. نتیجه نمودار ظرفیت ساختمان (نیرو- تغییر مکان) بهسازی شده توسط شاتکریت مسلح - (الف) در جهت X ساختمان- (ب) در جهت Y ساختمان

سانتیمتر می‌باشد. نمای کلی ساختمان بعد از شاتکریت مسلح مطابق شکل (۱۲) می‌باشد.

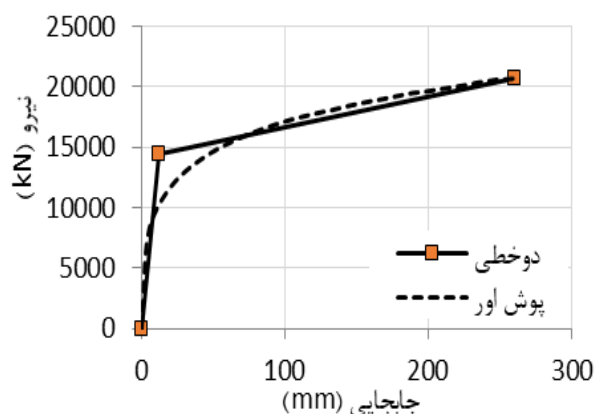


شکل ۱۱. (الف) نمایی از آرماتورها به‌صورت شبکه (ب) نمایی از آرماتورها به همراه روکش بتنی



شکل ۱۲. تصویر ساختمان بعد از بهسازی

شکل (۱۳)، نمودار ظرفیت ساختمان را پس از بهسازی با شاتکریت در جهت X و Y نشان می‌دهد. این نمودارهای ظرفیت به روش یانگ، دوطبقی سازی شده‌اند و پارامترهای سختی الاستیک و



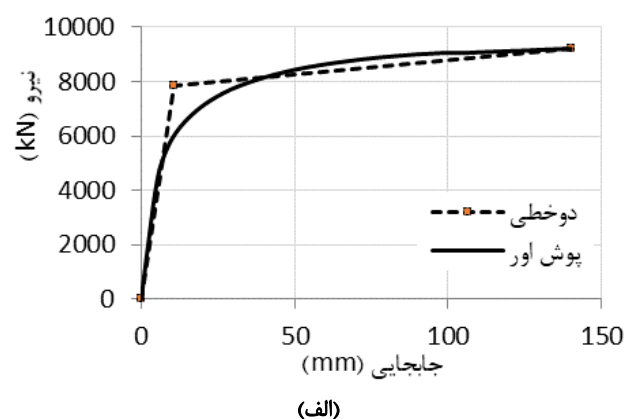
(ب)

شکل ۱۵. نمودار دوخطی ظرفیت ساختمان (نیرو- تغییر مکان) - (الف) بدون بهسازی در جهت Y ساختمان- (ب) بهسازی شده توسط شاتکریت مسلح در جهت Y ساختمان

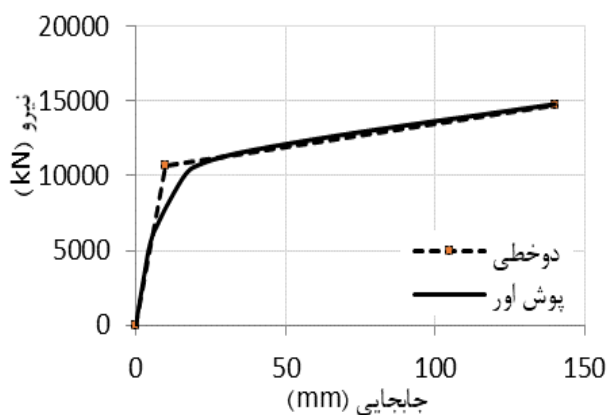
مقادیر تنش در دیوارهای بهسازی شده توسط شاتکریت مسلح در جهت X، به مقدار ۱/۵۵ مگاپاسکال رسیده است و همچنین در جهت Y ساختمان مقادیر تنش در دیوارها به مقدار ۴/۴۸ پاسکال رسیده است که این مقادیر تنش نسبت به نمونه قبل از بهسازی دچار کاهش شده است. شکل (۱۶) تنش در دیوارهای ساختمان را نشان می دهد.

جدول ۴. بررسی نتایج به دست آمده از دوخطی کردن نمودارهای پوش آور

جهت X				
نمونه	سختی الاستیک kN/mm	سختی ثانویه kN/mm	ضریب رفتار	ضریب شکل پذیری
بهسازی نشده	۷۳۱/۵۹	۱۰/۳۵	۷/۹۶	۱۳
بهسازی شده با شاتکریت	۱۰۷۶/۷۲	۳۱/۶۷	۱۰	۱۴/۱۹
درصد افزایش پارامترها	+۲/۴۷	+۹/۲۰۵	+۶/۲۵	+۲/۹
جهت Y				
بهسازی نشده	۱۱۷۶	۱۲	۱۱/۱۳	۲۱/۱۵
بهسازی شده با شاتکریت	۱۴۸۸/۴۵	۲۵	۱۲/۹۳	۳۳/۲
درصد افزایش پارامترها	+۶/۲۶	+۳/۱۰۸	+۲/۱۶	+۰/۵۷

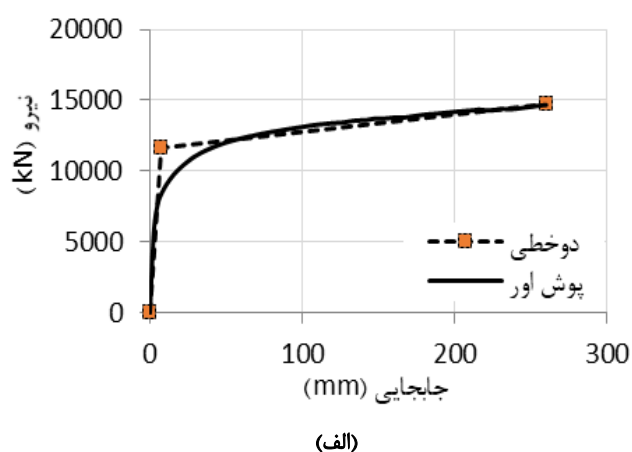


(الف)

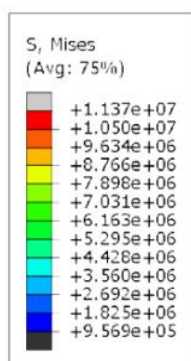


(ب)

شکل ۱۴. نمودار دوخطی ظرفیت ساختمان (نیرو- تغییر مکان) - (الف) بدون بهسازی در جهت X ساختمان- (ب) بهسازی شده توسط شاتکریت مسلح در جهت X ساختمان



(الف)



(ب)

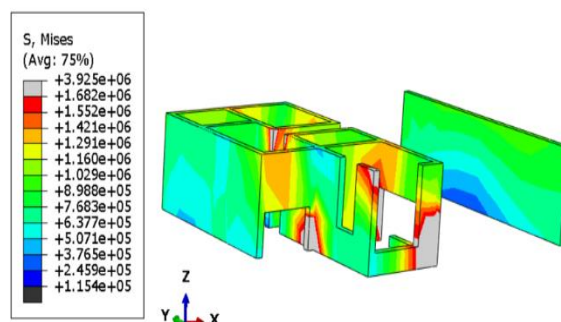
شکل ۱۷. (الف) مقادیر تنش در بتن شاکریت (ب) مقادیر تنش در میلگردها

۵. آنالیز تاریخیچه زمانی غیرخطی

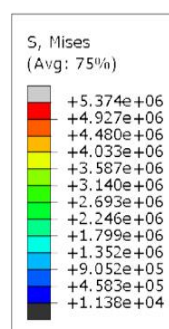
مشخصه مهم دیوارهای بنایی کم بودن مقاومت کششی می‌باشد. کم بودن مقاومت کششی موجب ترک‌خوردگی و تغییر در سختی مصالح می‌شود، بدین علت استفاده از تحلیل خطی برای این سازه‌ها دقیق نمی‌باشد لذا انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی جهت ارزیابی رفتار لرزه‌ای برای این نوع سازه‌ها توصیه می‌شود. همچنین این روش قادر به نشان دادن رفتار لرزه‌ای ساختمان‌ها است. از این رو می‌توان آن را مناسب‌ترین روش تحلیل یک ساختمان تحت اثر زلزله دانست. در این روش تحلیل، سازه تحت زوج شتاب‌نگاشت ثبت‌شده در ایستگاه شهر سرپل ذهاب SPZ از زلزله ازگله قرار می‌گیرد و نواحی آسیب‌پذیر سازه تحت شتاب‌نگاشت مذکور شناسایی می‌گردد.

۵-۱. معرفی شتاب‌نگاشت

به علت تشابه زمین در ساختگاه ساختمان مورد بررسی با ایستگاه شتاب‌نگاری شهر سرپل ذهاب (SPZ) که از مطالعات عشایری و همکاران [۱۴، ۱۵] به دست آمده است، شتاب‌نگاشت‌های انتخابی مربوط به زلزله ازگله هستند. این زلزله در ۲۱ آبان ماه سال ۱۳۹۶ با رومرکزی ازگله بزرگای گشتاوری ۷/۳ رخ داد. شکل‌های (۱۸) و (۱۹) به ترتیب دو مؤلفه شتاب افقی شمالی-جنوبی و شرقی-غربی ثبت‌شده در ایستگاه شتاب‌نگاری SPZ را نشان می‌دهند.



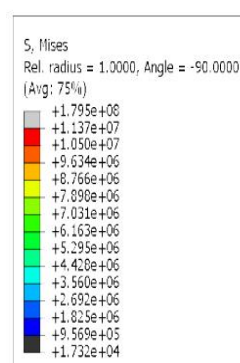
(الف)



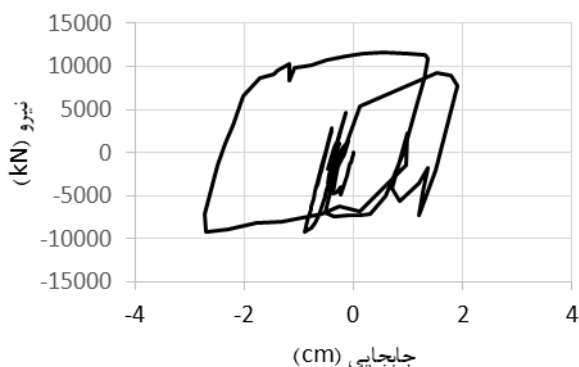
(ب)

شکل ۱۶. مقادیر تنش در دیوارها بعد از بهسازی توسط شاکریت مسلح - (الف) بارگذاری در جهت X (ب) بارگذاری در جهت Y

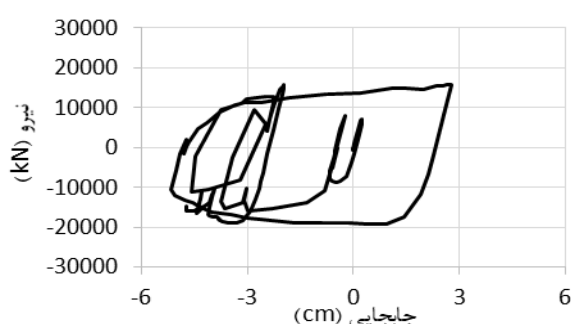
میلگردهای مورد استفاده در شاکریت مسلح بیشترین تنش را در خود جذب کرده‌اند؛ که مقدار این تنش حداکثری به مقدار ۱۱ مگاپاسکال است و همچنین بیشترین تنش به وجود آمده در شاکریت به مقدار ۷ مگاپاسکال است. شکل (۱۷) مقادیر تنش در بتن شاکریت و میلگردهای آن را نشان می‌دهد.



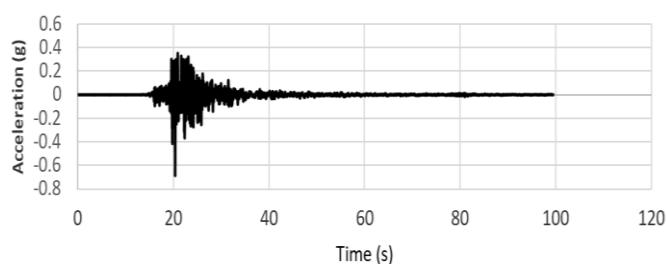
(الف)



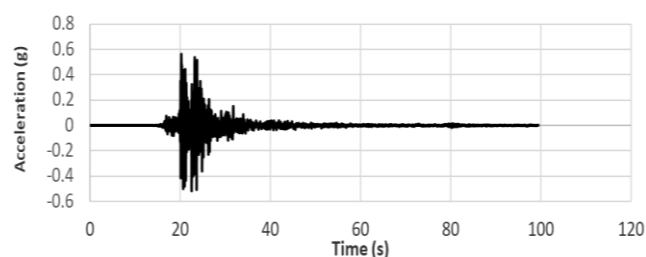
(الف)



(ب)



شکل ۱۸. مؤلفه افقی شتاب در جهت شمالی-جنوبی زلزله ۲۱ آبان ازگله در ایستگاه SPZ



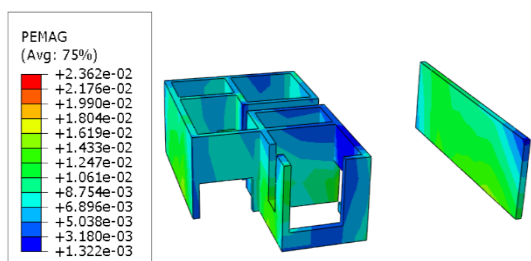
شکل ۱۹. مؤلفه افقی شتاب در جهت شرقی-غربی زلزله ۲۱ آبان ازگله در ایستگاه SPZ

۲-۵. نتایج ارزیابی تاریخچه زمانی غیرخطی

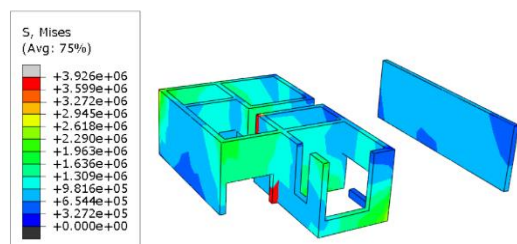
سازه موردنظر تحت شتاب‌نگاشت‌های مذکور مورد ارزیابی قرار گرفت که در ادامه نتایج آن شرح داده می‌شود. با توجه به نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، مطابق شکل (۲۰)، میزان ظرفیت لرزه‌ای ۱۰۰۰۰ کیلونیوتن است که این نیرو منجر به جابجایی ۲ سانتیمتری در ساختمان شده است و سبب عملکرد غیرخطی ساختمان از ناحیه الاستیک به پلاستیک شده است.

مقدار تنش حداکثری به وجود آمده در ناحیه پاشنه دیوارها تحت شتاب‌نگاشت مورد نظر به مقدار ۳/۹۲ مگاپاسکال است که این میزان تنش به وجود آمده از میزان ظرفیت پلاستیک مصالح بنایی به میزان ۳/۳۹ مگاپاسکال بیشتر است. مقدار کرنش در دیوارهای موردنظر در جهت X ساختمان به مقدار ۰/۰۲۳ است. شکل (۲۱) مقدار کرنش و تنش در دیوارهای بنایی را نشان می‌دهد.

شکل ۲۰. نتیجه نمودار ظرفیت تحلیل تاریخچه زمانی (نیرو- تغییر مکان) - (الف) در جهت X ساختمان- (ب) در جهت Y ساختمان



(الف)

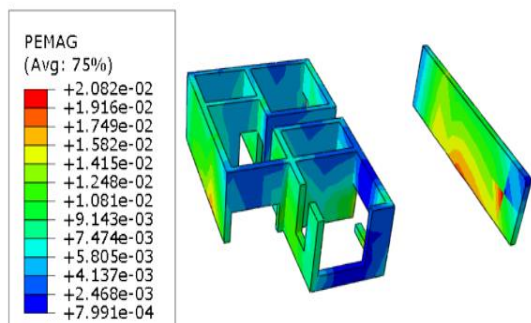


(ب)

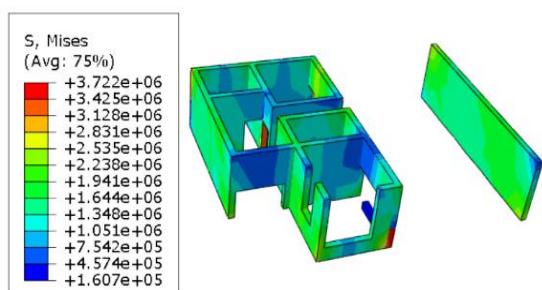
شکل ۲۱. (الف) کرنش ایجادشده در دیوارهای بنایی (ب) تنش در دیوارهای بنایی

۳-۵. نتایج بهسازی توسط شاتکریت مسلح شده

۰/۰۲ است. مقادیر تنش و کرنش حداکثری در شکل (۲۳) نشان داده شده است.



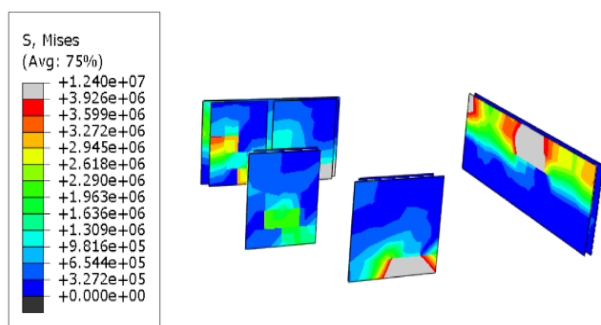
(الف)



(ب)

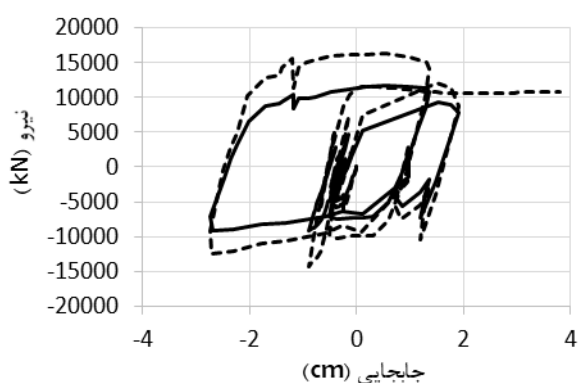
شکل ۲۳. کانتورها در دیوارها بعد از بهسازی توسط شاتکریت در جهت X -
(الف) مقادیر تنش حداکثری (ب) مقادیر کرنش حداکثری

همچنین طبق شکل (۲۴)، مقادیر تنش به دست آمده در شاتکریت به مقدار ۳/۹ مگاپاسکال است. همچنین تنش در میلگردهای استفاده شده در شاتکریت ۲۲۵ مگاپاسکال می باشد.

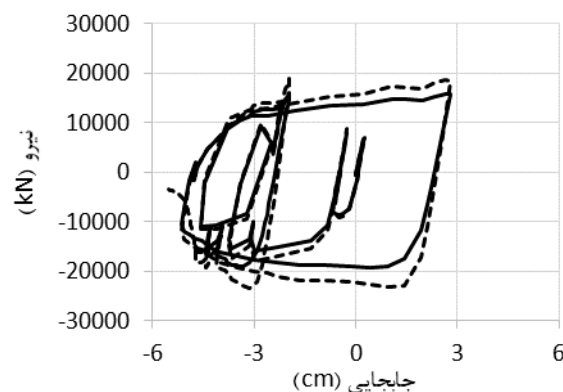


(الف)

ساختمان موردنظر به صورت پشت‌ورو توسط شاتکریت مسلح با ضخامت هر لایه بتن ۴ سانتیمتری بهسازی شده است و سپس تحت شتاب‌نگاشت معرفی شده تحلیل شده است. در ساختمان بهسازی شده با استفاده شاتکریت مسلح مطابق شکل (۲۲)، مقدار ظرفیت لرزه‌ای در جهت X به میزان ۵۰۰۰ کیلونیوتن افزایش یافته است و در جهت Y ساختمان نیز، مقدار ظرفیت لرزه‌ای به میزان ۱۵۰۰۰ کیلونیوتن افزایش یافته است.



(الف)



(ب)

شکل ۲۲. نتیجه نمودار ظرفیت تحلیل تاریخیچه زمانی ساختمان بهسازی شده توسط شاتکریت مسلح (خط چین) نسبت به ساختمان بهسازی نشده (خط توپر) -
(الف) در جهت X - (ب) در جهت Y

مقادیر تنش در دیوارهای ساختمان در جهت X سازه به مقدار ۳/۷ مگاپاسکال به دست آمده است و مقدار کرنش به وجود آمده به مقدار

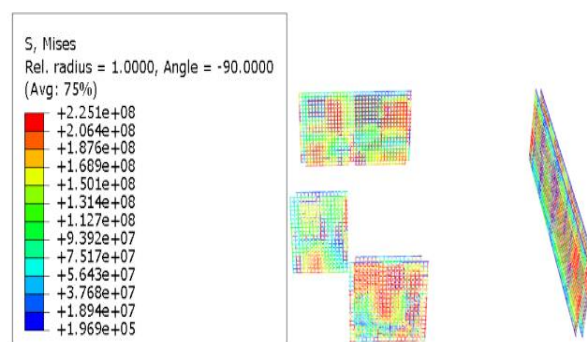
دارد. به طور کلی رفتار سازه در جهت X، پس از بهسازی عملکرد بهتری از خود نشان داده است.

با توجه به نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت شتابنگاشت مورد نظر، میزان ظرفیت لرزه‌ای نمونه بهسازی شده با شاتکریت، ۱/۴ برابر نمونه‌ای است که بهسازی نشده است. مقدار تنش حداکثری در نمونه بدون بهسازی در ناحیه پاشنه به مقدار ۳/۹۲ مگاپاسکال است که این مقادیر تنش در نمونه پس از بهسازی با شاتکریت در دیوارهای ساختمان در جهت X سازه به مقدار ۳/۷ مگاپاسکال به دست آمده است که این بهسازی با شاتکریت موجب بهبود در عملکرد شده است.

با توجه به مقایسه نتایج در تحلیل تاریخچه زمانی می‌توان روال افزایش ظرفیت ساختمان را مشاهده کرد. در ساختمان بهسازی شده توسط شاتکریت، بیشترین جذب انرژی و سختی مشاهده شده است. ساختمان بهسازی شده توسط شاتکریت مسلح، هم به لحاظ تحلیلی عملکرد بهتری داشته و هم به لحاظ موارد اجرایی از جمله هزینه، نیروی کار ماهر و مصالح در دسترس و تداخل کمتر با سازه، می‌تواند روش بهسازی مناسبی باشد.

References

- [1] D. Benedetti, G. Benzoni, A numerical model for seismic analysis of masonry buildings: Experimental correlations, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 12(6) (1984) 817-831.
- [2] M. Tomazevic, R. Velochovsky, Some aspects of experimental testing of seismic behavior of masonry walls and models of masonry buildings, *ISCT Journal of earthquake Technology*, 37(4) (2000) 101-117.
- [3] L. Kahn, Shotcrete retrofit for unreinforced brick masonry, in: 8th WCEE, 1984, pp. 590.
- [4] D. Abrams, J. Lynch, Flexural behavior of retrofitted masonry piers, in: KEERC-MAE joint seminar on risk mitigation for regions of moderate seismicity, 2001, pp. 234-243.
- [5] Y. Lin, D. Lawley, L. Wotherspoon, J.M. Ingham, Out-of-plane testing of unreinforced masonry walls strengthened using ECC shotcrete, in: *Structures*, Elsevier, 2016, pp. 33-42.



(ب)

شکل ۲۴. (الف) مقادیر تنش در میلگردهای شاتکریت (ب) مقادیر تنش در شاتکریت

۶. نتیجه‌گیری

خرابی‌های دیوارهای تقویت نشده عموماً به صورت متمرکز در نواحی پای دیوار، پاشنه و یا قطر دیوار و با ایجاد ترک‌های عریض اتفاق می‌افتند. افزودن شاتکریت به دیوارها نه تنها یک لایه مقاوم و سخت را به المان‌های برابر دیوار اضافه می‌کند، بلکه به دلیل پیوند تشکیل شده بین بتن و قسمت بنایی شکل‌پذیری دیوار را افزایش می‌دهد و همچنین باعث پراکنده شدن خرابی‌ها در سطحی گسترده‌تر و از این رو، تغییر مودهای خرابی دیوار می‌شود.

ساختمان مورد پژوهش در یکی از بعدهای خود (جهت X سازه) دارای بازوهای بیشتر، سطح مقطع کمتر دیوار و در نهایت ضعیف‌تر می‌باشد. دلیل قوی‌تر بودن بعد دیگر ساختمان (جهت Y) وجود دیوارهای برابر پیوسته است. با توجه به پژوهش مورد نظر دو نوع تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش آور) تحلیل دینامیکی غیرخطی (تاریخچه زمانی) بر ساختمان مورد پژوهش، انجام شده است.

با توجه به نتایج آنالیز پوش آور، مشخص گردیده است که بهسازی سازه مورد نظر از طریق شاتکریت، تأثیر خوبی در بهبود عملکرد آن داشته است. مدل بهسازی شده در جهت X، از نظر سختی الاستیک ۴۷٪/۱۷، سختی ثانویه دو برابر، ضریب رفتار دو و نیم برابر و نسبت شکل‌پذیری ۹/۱۵٪ عملکرد بهتری نسبت به نمونه مورد نظر بدون شاتکریت دارد. در جهت Y، زمانی که ساختمان تحت بهسازی با شاتکریت قرار می‌گیرد، پارامترهای سختی الاستیک ۲۶/۵٪، سختی ثانویه یک برابر، ضریب رفتار ۱۶/۱۷٪ و نسبت شکل‌پذیری ۵۶٪/۹ عملکرد بهتری نسبت به نمونه مورد نظر بدون شاتکریت

- [6] M. ElGawady, P. Lestuzzi, M. Badoux, Retrofitting of masonry walls using shotcrete, in: 2006 NZSEE Conference, Paper, 2006.
- [7] M. Shabdin, N.K. Attari, M. Zargaran, Experimental study on seismic behavior of Un-Reinforced Masonry (URM) brick walls strengthened with shotcrete, Bulletin of Earthquake Engineering, 16(9) (2018) 3931-3956.
- [8] B.M. Luccioni, R.D. Ambrosini, R.F. Danesi, Analysis of building collapse under blast loads, Engineering structures, 26(1) (2004) 63-71.
- [9] M. Yekrangnia, Evaluation of applied methods in retrofitting buildings with building materials, 8th National Congress of Civil Engineering, School of Civil Engineering, Babol, (2004).
- [10] B. Ghiassi, M. Soltani, A.A. Tasnimi, Seismic evaluation of retrofitted masonry structures with reinforced concrete layer, Journal of structural Engineering (ASCE), (2011).
- [11] F. Mola, R. Vitaliani, Analysis, diagnosis and preservation of ancient monuments: the St. Mark's Basilica in Venice, Structural analysis of historical constructions I. CIMNE, Barcelona, Spain, (1995) 166-188.
- [12] IIEES, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Seismic Rehabilitation Code for Existing Buildings in Iran, (2002).
- [13] CM. Uang, Establishing R (or R_w) and C_d factors for buildings seismic provisions. J. Struc. Eng. (1991) 117(1): 19-28.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1991\)117:1\(19\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:1(19))
- [14] I. Ashayeri, A. Sadr, M. Biglari, E. Haghshenas, Comprehensive ambient noise analyses for seismic microzonation of sarpol-e-zahab after the Mw 7.3 2017 Iran earthquake. Eng Geol (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105636>
- [15] I. Ashayeri, A. Memari, E. Haghshenas, Seismic microzonation of Sarpol-e-zahab after Mw 7.3 2017 Iran earthquake: 1D-equivalent linear approach. Bull Earthq Eng 19:605–622 (2021).
<https://doi.org/10.1007/s10518-020-00999-6I>