Journal of Research on Archaeometry, 2022; 8 (1): 135-154

Journal of Research on Archaeometry

DOI: 10.52547/jra.8.1.135

URL: https://jra-tabriziau.ir/

Original Paper

Characterization of the Mechanical Properties of Historical Buildings Using Semi- Destructive Methods: A Case Study of Nafisi, Sorkheie and Kalantar Historic Houses, Tabriz

Ebrahim Aminifar [1], Farhad Akhoundi* [2], Ahad Nejadebrahimi [3]

[1]. Master of Strengthening of Historical Buildings, Faculty of Architecture and Urbanism, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, IRAN

[2]. Assistant Professor, Faculty of Architecture and Urbanism, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, IRAN

[3]. Professor, Faculty of Architecture and Urbanism, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, IRAN

Received: 17/01/2022 **Accepted: 20/06/2022**

Abstract

One of the most important stages of seismic evaluation involves ascertaining the mechanical properties of building materials, which is typically realized through destructive tests. To mitigate the destructive effects of these tests, a qualitative approach namely Masonry Quality Index (MQI) has been proposed by Italian scholars. In this article, the MQI approach was used to estimate the compressive strength and elastic modulus of building materials at three Qajar period houses in the city of Tabriz. Based on the results, the min and max compressive strength obtained by the MQI were 5.13 and 2.21 MPa, respectively, with the flat jack of 0.53-1.68 MPa, which suggested a big difference. Also, the min and max values of elastic modulus by the MQI was determined to range between 2050.5-1070.5 MPa, and the test results were 1179.4-2611.3 MPa, which indicated a strong correspondence.

Keywords: Historic buildings, Double flat-jack test, Masonry Quality Index, Mechanical properties, Masonry buildings.

*Corresponding Author: f.akhoundi@tabriziau.ac.ir

Introduction

Conservation of architectural heritage still poses many challenges to the involved practitioners. In the past, there have been attempts to classify historical masonry, but they rarely included an experimental study on mechanical properties. However, better technical information about these characteristics of historic masonry structures will assist the preservation of our building heritage. Iran is an important ancient civilization in the world, with a wealth of built heritage from antiquity, of which 4% are located in East Azerbaijan Province, especially in the city of Tabriz [2]. Through the ages, monuments have been exposed to catastrophic earthquakes. Assessment and retrofitting of this architectural heritage are effective measures to prevent their destruction by future earthquakes. These operations require a good understanding of the mechanical properties of the materials.

A popular approach to determining mechanical properties is the double flat jack testing, which is considered as a minor destructive method. Many attempts have been made to propose fully non-destructive methods for this purpose. A relevant approach is called the Masonry Quality Index (MQI) [1], which relies only on visual inspection. This method aims to develop a simple and systematic approach to the analysis of masonry constructions based on idealized typologies, different parameters, and mechanical properties of the constituent materials (stone, brick, mortar, etc.). Many methods have been advanced in order to evaluate the quality of existing buildings in Iran and other countries. Nevertheless, none of these involve the qualitative assessment of mechanical characteristics. In qualitative methods, special forms are prepared according to seismic conditions and building conditions and based on the experience of past earthquakes. Using these forms, building inspectors collect information such as the vertical bearing system, the quality of connections, the ductility of members, the construction method, the conditions of the building site, the condition of the foundation, etc., and store them in a database. These methods can be used for preliminary and approximate estimation of seismic resistance capacity of buildings in a specific region.

Materials and Methods

The present study is a practical work that analyzes the mechanical properties of materials used in the historic houses of Nafisi, Kalantar and Sorkheie, a sample of brick buildings from the Qajar period in Tabriz. Gholami and Akhoundi reported in 2022[3] that according to level 1 method of Italian guidelines to evaluation and reduction of seismic risk of historical buildings, the seismic safety index of Nafisi and Kalantar houses were less than 1, an observation that signaled the unsafe conditions of these buildings, calling for their prompt conservation. In the present study, data are collected through library and field researches. The study adopts an experimental-analytical approach to calculate the modulus of elasticity and compressive strength of the building materials of the sample under study through the double flat jack testing, and they are qualitatively evaluated using the method advanced by Borri. The values obtained through these methods are finally compared. Replacing the number of Masonry Quality Index (MQI) by X in the relations presented by Borri (Table 1) will enable the qualitative estimation of the modulus of elasticity and compressive strength.

Table 1: The equations proposed by Borri et al to estimate compressive strength and modulus of elasticity.

Mechanical properties	Min	Max
compressive strength	$Y=0/937e^{0/2232x}$	$Y=1/6882e^{0/1988x}$
modulus of elasticity	$Y=548/31e^{0/1737x}$	$Y=821/24e^{0/163x}$

Discussion

The study sample consists of historic brick buildings dating to the Qajar period in the city of Tabriz. Seven double flat jack tests were carried out on the main and the bearing walls of the buildings. The stress/strain diagram of these tests is presented in Fig. 1, and the arrangement of LVDT and cracking pattern of the walls is presented in Figs. 2, Fig. 3 and Fig. 4. The tested walls are the original, unrefurbished bearing walls, which are specified in the plans of the houses. The houses of Nafisi, Sorkheie and Kalantar each were subjected to 3, 2 and 2 tests, respectively, implemented with the stipulations specified by the provincial Cultural Heritage, Tourism and Handicrafts Directorate in mind. The obtained results outlined in Table 2 show that the maximum compressive strength. i.e. 1.68 MPa, was recorded for the Kalantar House, while the Sorkheie House yielded the minimum

value at 0.53 MPa. Also, the maximum elastic modulus of 13.2611 MPa belonged to the Kalantar House, and the minimum value of 803.26 MPa was registered for the Nafisi House.

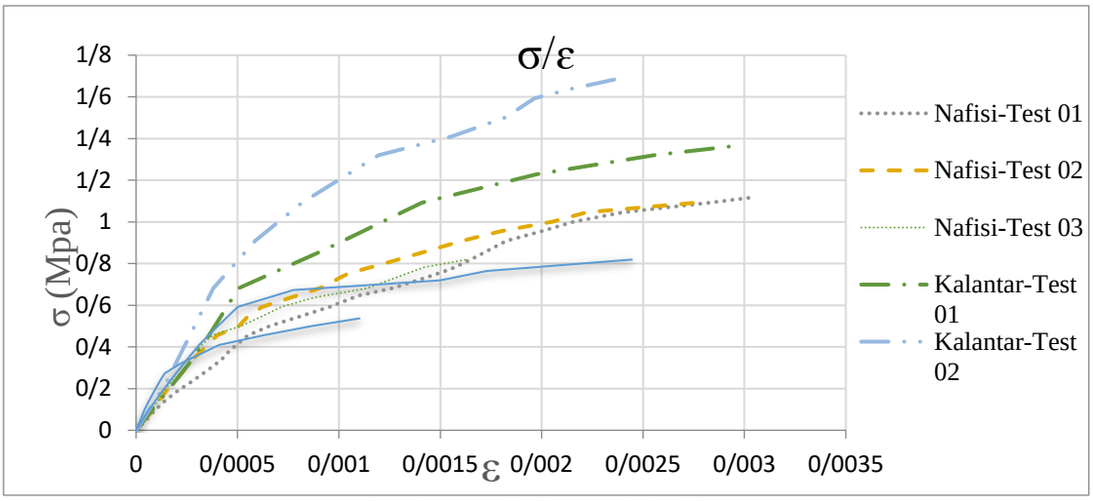


Fig.1. Stress/strain diagram obtained by tests

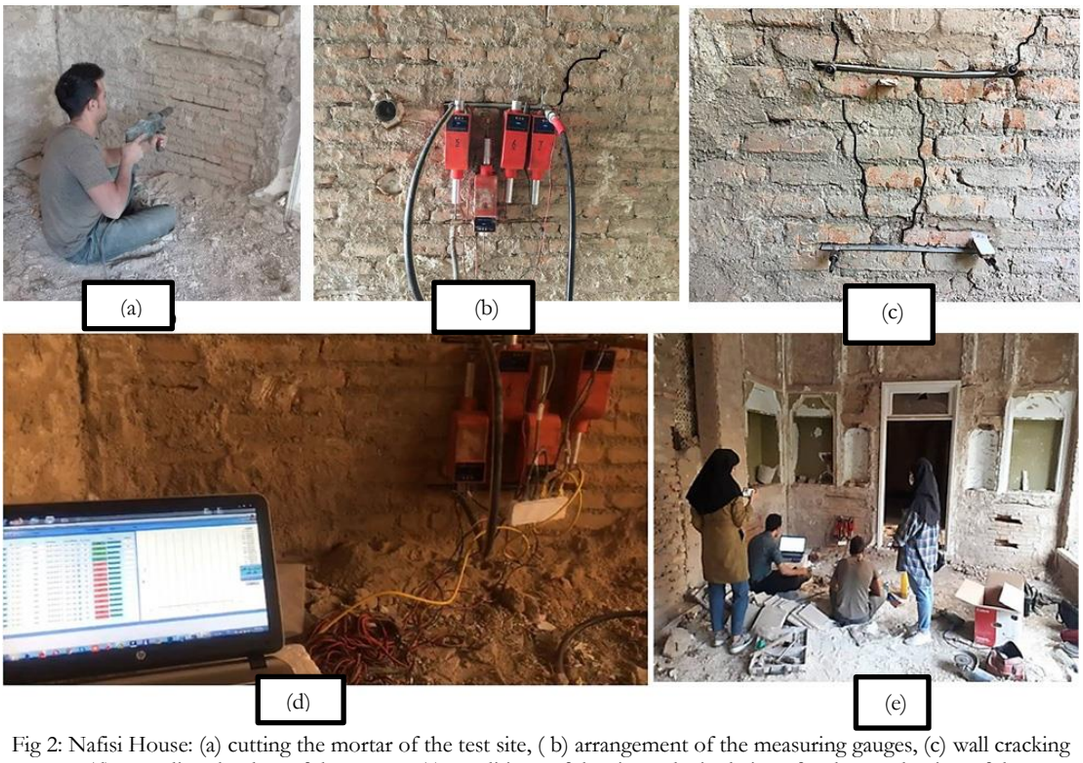


Fig 2: Nafisi House: (a) cutting the mortar of the test site, (b) arrangement of the measuring gauges, (c) wall cracking pattern, (d) recording the data of the gauges, (e) conditions of the site and stipulations for the conduction of the tests

Conclusions

The results of the study are outlined below.

- Based on the qualitative evaluation done by Borri's method, the Masonry Quality Index of the walls of the Nafisi, SorkheieSorkheie and Kalantar houses in different loading modes such as vertical, out-of-plane and in-plane loading are as follows:
- The walls at the Nafisi House yielded the Masonry Quality Index of 4.20 and 3.5 under vertical and out-of-plane loading, respectively, placing it in Category B with average quality, and under in-plane loading they produced an MQI of 3.85, corresponding to Category C with poor quality (Table 3).

- The Masonry Quality Index 3.85 under vertical loading and 3.50 under out-of-plane loading placed the Sorkheie House in Category B, i.e. average quality, while the recorded MQI of 3.85 under in-plane loading falls in Category C category, i.e. poor quality (Table 4).
- The walls of the Kalantar House under vertical and out-of- plane loading gave the Masonry Quality Indexes of 5.25 and 4.55, respectively, which place them in Category B. And the MQI of 5.60 under in-plane loading revealed the good quality of the respective walls, thus assigning them to Category A (Table 5).
- Mechanical properties of materials used in the houses of Nafisi, Kalantar and Sorkheie were evaluated by double flat jack tests, which produced a minimum and maximum compressive strength of 0.53 MPa for the Sorkheie House and 1.68 MPa for the KalantarHhouse. Also, the recorded minimum and maximum values of elastic modulus for the Sorkheie House was 1179 MPa, and for the Sorkheie and the Kalantar House at 2611/3 MPa, respectively (Table 6).
- Mechanical properties of the materials used at the studied houses were estimated through both quantitative (double flat jack testing) and qualitative (Borri's method) approaches. Based on the results from the comparison, the values obtained by the double jack tests for compressive strength are not compatible with those deduced by Borri's equations, while the values of elastic modulus are in good agreement with the values obtained by Borri's equations (Table 6). Due to the lack of guidelines regarding the historic constructions in Iran, in this study we used Borri's equations to estimate the mechanical properties of the building materials. This formula results from the correlation between the values of qualitative evaluation (MQI) performed on 11 types of historic constructions specific to Italy (a combination of stone and brick buildings) and the proposed Italian guideline values (IMIT2009).

The results indicate the masonry quality index (MQI) is a suitable method for assessing the behavioral quality of buildings in various loading conditions. Therefore, further tests and application of the masonry quality index (MQI) in the study of Iranian buildings will make it possible to adapt this approach to typical masonry used in Iran. This in turn will enable us to estimate mechanical properties by an enhanced qualitative method instead of destructive experimental tests.

Fig. 3: Sorkheie House: (a) crack pattern of the wall, (b) arrangement of measuring gauges

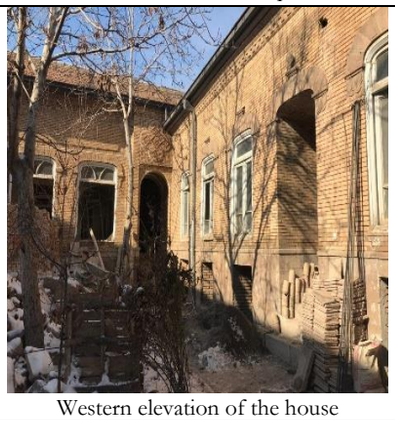
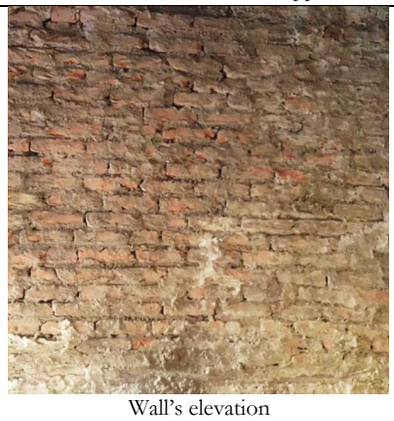
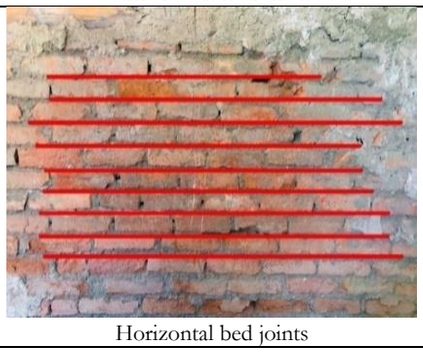
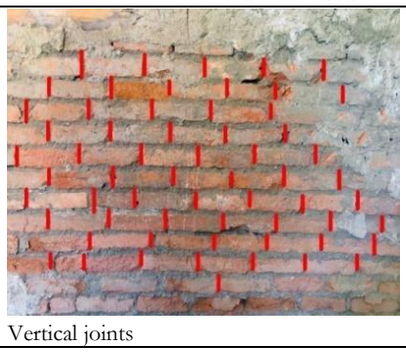
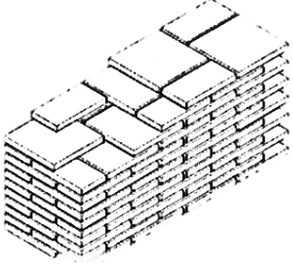
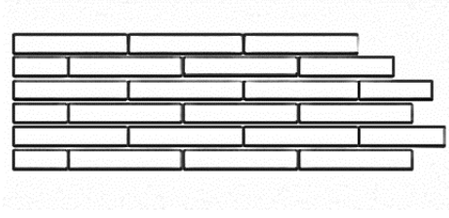
Table 2: Values of compressive strength and modulus of elasticity obtained by the double flat jack test

	Number of tests	Compressive strength (MPa)	Modulus of elasticity MPa
Nafisi House	3	1/11	803/26
		1/13	1182/06
		0/81	1382/27
Kalantar House	2	1/36	1794
		1/68	2611/13
Sorkheie House	2	0/53	1179/42
		0/81	1480/35

(b) (a)

Fig. 4. Sorkheie House: (a) stipulations for the conduction of the tests, (b) arrangement of measuring gauges

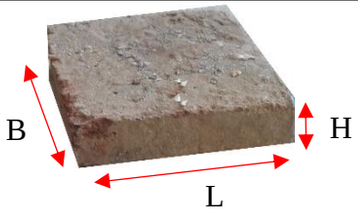
Table 3. The results of the qualitative evaluation of the Nafisi House based on Borri's approach.

Photos	 Western elevation of the house	 Wall's elevation
Analysis of horizontal and vertical joints and wall section	 Horizontal bed joints	 Vertical joints
	Wall section	
Arrangement of bricks	 Axonometric projection	 Front view

<table>
<tr><td>Material Descriptio</td><td colspan="11">Single-leaf brick wall:
– The wall built with square bricks
– Horizontal bed joints filled full.
– Vertical joints are implemented as staggered joints.</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="11">– Fired bricks measuring 4 x 20 x 20 cm
– Weak aerial lime-based mortar
– The thickness of mortar in horizontal bed joints partially filled.</td></tr>
<tr><td>Geometry</td><td colspan="11">

Dimensions of the bricks
L=B= 200 mm
Length and width
H= 40 mm
Thickness</td></tr>
<tr><td rowspan="6">Qualitative analysis</td><td>In-plane</td><td>Out-of-plane</td><td>Vertical</td><td></td><td>MM</td><td>VJ</td><td>HJ</td><td>WC</td><td>SS</td><td>SD</td><td>SM</td></tr>
<tr><td>C</td><td>B</td><td>B</td><td>Category</td><td>PF</td><td>F</td><td>PF</td><td>PF</td><td>F</td><td>PF</td><td>PF</td></tr>
<tr><td>> 1.25</td><td>> 1.6</td><td></td><td>M_I</td><td colspan="7" rowspan="3">MQI = SM (SD + SS + WC + HJ + VJ + MM)
MQIV = 0/7(0/5+1/5+1+2+0/5+0/5) = 4/20
MQIO = 0/7(0/5+1+1/5+1+0/5+0/5) = 3/5
MQII = 0/7 (0/5+1+1+0/5+1+1) = 3/5</td></tr>
<tr><td>3/5</td><td>3/5</td><td>4/20</td><td>MQI</td></tr>
<tr><td colspan="2">E (MPa)</td><td>f_m(MPa)</td><td rowspan="2">Mechanical properties</td></tr>
<tr><td colspan="2">-1382/27
1182/06</td><td>-1/13
0/81</td></tr>
</table>

Table 4. The results of the qualitative evaluation of the Sorkheie House based on Borri's approach

	– Brick wall with a thickness of 1 meter – The wall built with square bricks – The horizontal joints are filled full
	– Square (20x20x4 cm) and rectangular (20x10x4 cm) fired bricks – Weak aerial lime-based mortar with low bonding. – The thickness of the mortar is the same in the horizontal and vertical joints
	 Dimensions of the bricks L=B=200 mm H= 40 mm

In-plane	Out-of-plane	Vertical		MM	VJ	HJ	WC	SS	SD	SM
C	B	B	Category	PF	F	F	NF	PF	PF	PF
1.4 <	1.25 >		M_I	MQI = SM (SD + SS + WC + HJ + VJ + MM) MQIV = 7/0 (5/0 + 1/5+ 0 + 2 + 1 + 0/5) = 85/3 MQIO =0/7 (0/5 + 1 + 0 + 2 + 1 + 0/50) =5/3 MQII = 0/7 (0/5 + 1 + 0 + 1 + 2 + 1) = 3/85						
85/3	50/3	85/3	MQI							
E (MPa)		f_m(MPa)	Mechanical properties							
1179/42-1480/35		0/53-0/81								

Table6: Comparing the values of compressive strength and modulus of elasticity obtained from the double flat jack testing and the relations proposed by Borri et al.

Mechanical properties	Nafisi House		Sorkheie House		Kalantar House	
	Min and max values obtained by double flat jack test (MPa)	Min and max values obtained by Borri's relations (MPa)	Min and max values obtained by double flat jack test (MPa)	Min and max values obtained by Borri's relations (MPa)	Min and max values obtained by double flat jack test (MPa)	Min and max values obtained by Borri's relations (MPa)
Compressive strength	0/81 -1/13	2/39 – 3/89	0/0-53/81	2/21 -3/62	1/36 -1/68	3/27 -5/13
Elastic modulus	-1182/06 1382/27	-1137/74 1631/23	– 1179/42 1480/35	-1070/59 1540/56	-1794 2611/3	-1451/16 2050/53

Acknowledgments

This paper is extracted from the MSc thesis of Ebrahim Aminifar completed with the supervision of Dr. Farhad Akhoundi and consultation of Dr. Ahad Nejadebrahimi at Tabriz Islamic Art University. The authors are thankful for all the thesis's jury members who helped us improve the quality of the research.

References

[1] Borri A, Corradi M, Castori G, De Maria A. A method for the analysis and classification of historic masonry. Bulletin of Earthquake Engineering. 2015;13(9):2647-65.

[2] Pouraminian M, Hosseini M. Seismic safety evaluation of Tabriz historical citadel using finite element and simplified kinematic limit analyses. Indian Journal of Science and Technology. 2014;7(4):409.

[3] gholami s, akhoundi F. Siesmic vulnerability assessment of selected historical houses of Qajar period of Tabriz city according to Italian Guidelines: tabriz islamic art university; 2022.[In persian]

پژوهه باستان‌سنجی ۱۴۰۱؛ ۸(۱): ۱۳۵-۱۵۴

پژوهه باستان‌سنجی

DOI: 10.52547/jra.8.1.135

URL: http://jra-tabriziau.ir/

دانشگاه هنر اسلامی تبریز ۱۳۷۸

مقاله پژوهشی

تعیین مشخصات مکانیکی بناهای تاریخی با استفاده از انجام آزمایش‌های نیمه‌مخرب (مطالعهٔ موردی خانه‌های تاریخی نفیسی، سرخه‌ای و کلانترشهر تبریز)

ابراهیم امینی‌فر [۱]، فرهاد آخوندی [۲*]، احد نژاد ابراهیمی [۳]

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

۲. استادیار، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران

۳. استاد، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۳۰

چکیده

سالانه تعداد زیادی از آثار تاریخی در اثر رخدادهای لرزه‌ای تخریب می‌شوند. به‌منظور حفاظت از این آثار، ارزیابی آسیب‌پذیریِ لرزه‌ای آن‌ها امری ضروری به‌نظر می‌رسد. شناخت مشخصات مکانیکی مصالح به‌کاررفته در بنا یکی از مهم‌ترین مراحل ارزیابی لرزه‌ای است که از طریق آزمایش‌های مخرب و نیمه‌مخرب تعیین می‌شود. با توجه به اینکه انجام آزمایش‌های مخرب روی بناهای تاریخی نوعی آسیب تلقی می‌شود، پژوهشگران ایتالیایی یک روش کیفی با عنوان شاخص کیفیت بنایی (MQI) به‌منظور تخمین مشخصات مکانیکی مصالح بنایی پیشنهاد داده‌اند. در این مقاله کاربرد روش مذکور برای تخمین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیتهٔ مصالح بنایی در خانه‌های تاریخی نفیسی، سرخه‌ای و کلانترشهر تبریز مورد استفاده قرار گرفته و اعتبارسنجی نتایج حاصل از آن با نتایج آزمایش جک مسطح مقایسه شده است. بر اساس مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده، حداقل و حداکثر مقاومت فشاری حاصل از روش MQI به‌ترتیب ۵/۱۳ و ۲/۲۱ مگاپاسگال بوده درحالی‌که مقاومت فشاری حاصل از جک مسطح به ترتیب ۱/۶۸ – ۰/۵۳ مگاپاسگال به‌دست‌آمده است که اختلاف زیادی را نشان می‌دهد. همچنین حداقل و حداکثر مقادیر مدول الاستیسیتهٔ محاسبه‌شده از روش شاخص کیفیت بنایی(MQI) در بازه بین ۲۰۵۰/۵۳ – ۱۰۷۰/۵۹ مگاپاسگال قرار دارد و در مقایسه با نتایج آزمایش جک مسطح که بین بازه ۲۶۱۱/۳ – ۱۱۷۹/۴۲ مگاپاسگال بوده است، همخوانی نزدیکی را نشان می دهد. با توجه به مغایرت نتایج حاصل از مقاومت فشاری، لازم است مطالعات بیشتری در خصوص استفاده از روش شاخص کیفیت بنایی روی بناهای بومی صورت گیرد. به‌نظر می‌رسد در صورت انجام مطالعات بیشتر بتوان روش شاخص کیفیت بنایی را مناسب با بناهای تاریخی بومی تنظیم کرد و به‌عنوان روشی سریع و ایمن جهت تخمین مشخصات مکانیکی مصالح بنایی به‌کار برد.

واژگان کلیدی: بناهای تاریخی، آزمایش جک مسطح، شاخص کیفیت بنایی، مشخصات مکانیکی، ساختمان‌های بنایی.

* نویسنده مسئول مکاتبات: تبریز، خیابان آزادی، میدان حکیم‌نظامی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، کدپستی: ۱۱۶۶۷۳۶۶۳۱

پست الکترونیکی: f.akhoundi@tabriziau.ac.ir

۱. مقدمه

حفاظت و صیانت از آثار تاریخی چالش‌های بسیاری را برای کسانی که می‌خواهند میراث تاریخی را حفظ کنند، به‌همراه دارد. در گذشته، تلاش‌های زیادی برای طبقه‌بندی مصالح تاریخی صورت گرفته، اما این تلاش‌ها به‌ندرت شامل مطالعات تجربی در خصوص شناخت مشخصات مکانیکی مصالح بنایی بوده است. درحالی‌که وجود اطلاعات فنی بهتر در مورد ویژگی‌های مکانیکی مصالح به‌کاررفته است، در این گونه بناها می‌تواند به حفظ میراث معماری ما کمک شایانی کند[1].

ایران یکی از مهم‌ترین تمدن‌های باستانی در دنیا به‌حساب می‌آید که در آن هزاران بنا و اثر تاریخی از دوران باستان در آن وجود دارد. ۳/۶درصد از این آثار در استان آذربایجان‌شرقی به‌ویژه در شهر تبریز واقع شده‌اند[2]. این بناها در طول تاریخ همواره توسط زلزله‌های ویرانگر آسیب‌های جدی و جبران‌ناپذیری به خود دیده‌اند. از جمله اقدامات مؤثر برای جلوگیری از تخریب این بناها در اثر زلزله، به‌کاربردن روش‌های استحکام‌بخشی برای تقویت آن‌هاست. انجام این عملیات نیازمند شناخت دقیق مشخصات مکانیکی مصالح به‌کاررفته در آن‌هاست. از جمله روش‌های موجود به‌منظور تعیین مشخصات مکانیکی مصالح به‌کاررفته در بناها، انجام آزمایش‌های جک مسطح است که در زمرهٔ آزمایش‌های نیمه‌مخرب قرار دارد[3].

تلاش‌های زیادی برای ارائهٔ روش‌های غیرمخرب برای تعیین مشخصات مکانیکی صورت گرفته است که یکی از معروف‌ترین این روش‌ها، روش شاخص کیفیت بنایی (MQI)[1] است که توسط آنتونیو بوری و همکارانش برای بناهای تاریخی کشور ایتالیا ارائه شده است [1]. این روش با هدف توسعهٔ یک رویکرد ساده و منظم برای تحلیل سازه‌های بنایی بر اساس توجه به رفتار ایده‌آل دیوار بنایی و همچنین خصوصیات مکانیکی اجزای تشکیل‌دهنده (سنگ، آجر، ملات و ...) انجام می‌گیرد.

روش‌های زیادی به‌منظور ارزیابی کیفی بناهای موجود در آیین‌نامه‌های داخلی و خارجی ارائه شده است؛ اما هیچ‌کدام از این روش‌ها به تعیین کیفی مشخصات مکانیکی اشاره نکرده‌اند. در روش‌های کیفی با توجه به شرایط لرزه‌خیزی و شرایط ساختمان و براساس تجربهٔ زلزله‌های گذشته، فرم‌های ویژه‌ای تهیه می‌شوند. بازرسان ساختمان با استفاده از این فرم‌ها، اطلاعاتی از قبیل سیستم باربر قائم، کیفیت اتصالات، شکل‌پذیری اعضا، نحوهٔ ساخت، شرایط محل ساختمان، وضعیت پی و ... را جمع‌آوری نموده و در یک بانک اطلاعاتی ذخیره می‌کنند. از این روش‌ها می‌توان برای برآورد اولیه و تقریبی ظرفیت مقاومت لرزه‌ای ساختمان‌های یک منطقهٔ خاص استفاده کرد. ازجملهٔ این روش‌ها می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

روش فیما ۳۱۰: احتمالاً پیشرفته‌ترین روش ارزیابی لرزه‌ای برای ساختمان‌های ساخته‌شده در آمریکا در سال‌های اخیر است. این روش ارزیابی بر اساس برآورد شرایط سازه‌های موجود است. مقدار مشخصی به‌عنوان آسیب‌پذیری مورد انتظار سازه در هنگام زلزله برآورد می شود. این مقدار آسیب (یا سطح عملکرد) با درنظرگرفتن اهمیت ساختمان و پیامدهای ناشی از خسارات توسط یک متخصص، برآورد اولیه می‌شود. این مجموعه یک روش سه‌مرحله‌ای با افزایش جزئیات و کاهش حاشیهٔ اطمینان برای برآورد لرزه‌ای ساختمان‌های موجود معرفی می‌کند [4].

روش فیما ۱۵۴: این روش با عنوان ارزیابی لرزه‌ای سریع بناها به‌صورت بصری با هدف شناسایی بناهای غیرمقاوم در برابر زلزله تدوین شده است. در این روش چک‌لیست‌هایی برای مناطق با لرزه‌خیزی‌های کم، متوسط و زیاد تهیه شده است که مواردی مانند موقعیت بنا از لحاظ تقسیمات درجه‌بندی خطر نسبی زلزله، نوع کاربری ساختمان، ساز_ آن، سیستم‌های باربر جانبی و ارتفاع ساختمان را بررسی می‌کند، سپس بر اساس جدول امتیازبندی به هرکدام از این موارد امتیازاتی تعلق می گیرد[5].

روش ارزیابی آسیب‌پذیری ونزوئلا: این روش شامل سه بخش جمع‌آوری اطلاعات، ارزیابی کیفی و ارزیابی تحلیلی است. ارزیابی کیفی به‌منظور تشخیص ضعف ساختمان است، و بر پایهٔ اطلاعات و مشخصات جمع‌آوری

شده به‌وسیلهٔ پرسش‌نامهٔ فنی ارزیابی رفتار کلی ساختمان استوار است. در این روش اجزای مختلف سازه دارای یک ضریب آسیب‌پذیری هستند. این ضریب در حقیقت، اهمیت اثر هر جزء در رفتار کلی سازه را اعمال می‌کند. با این کار برای هر جنبه از ساختمان، یک آسیب‌پذیری جزئی لحاظ می‌شود که وقتی در کنار یکدیگر قرار می گیرند، آسیب‌پذیری سازهٔ اصلی را نشان می‌دهند. برای حصول ضریب نهایی سازه، عامل‌های مرتبط با نوع خاک و توپوگرافی نیز به‌عنوان ضریب تشدید در ضریب آسیب‌پذیری تأثیر داده می‌شود[6].

روش ارزیابی آسیب‌پذیری آریا: این روش که توسط آریا پیشنهاد شده است، براساس شدت‌های مختلف زلزله و برای هر پارامتر ساختمان، ضرایبی را ارائه کرده و در نهایت نسبت خسارت کل ساختمان از ترکیب این ضرایب جزئی محاسبه می‌شود. در این روش نیز مانند روش‌های کیفیِ دیگر، ابتدا پرسشنامهٔ مربوط به ساختمان تکمیل می‌گردد. از جمله پارامترهای اصلی این پرسشنامه می توان به نوع زمین، نوع سیستم سازه‌ای و کیفیت ساخت اشاره کرد[7].

همچنین آیین‌نامهٔ ۳۷۶ ایران با عنوان دستورالعمل به‌سازی لرزه‌ای ساختمان‌های بنایی غیرمسلح موجود که در قسمتی از آن به بیان روش ارزیابی کیفی شامل روش‌های سریع پرداخته شده است[8].

مطالعهٔ حاضر با هدف بررسی کیفیت رفتاری خانهٔ تاریخی نفیسی با استفاده از روش بوری تحت سه حالت مختلف بارگذاری افقی داخل صفحه، بارگذاری افقی خارج از صفحه و بارگذاری قائم، همچنین تعیین مشخصات مکانیکی مصالح بنایی به‌کاررفته در ساخت بنا با استفاده از آزمایش‌های جک مسطح و بررسی رابطه میان مقادیر حاصل از ارزیابی کیفی و مقادیرکمی حاصل از آزمایش‌ها براساس روابط پیشنهادشده در دستورالعمل بوری می پردازد.

۲. پیشینهٔ پژوهش

آزمایش جک مسطح از جمله آزمایش‌های کاربردی در حوزهٔ مکانیک سنگ‌هاست. پائولو روسی در سال ۱۹۸۰ اولین بار از این آزمایش برای مصالح بنایی استفاده کرد و بعد از او محققان زیادی تاکنون این روش را به‌کار گرفته‌اند. در سال ۱۹۸۳ ابد نور با استفاده از جک‌های مسطح نیم‌دایره‌ای تنش و تغییر شکل‌های مصالح بتنی و بنایی را مورد مطالعه قرار داد[9]. اتکینسون و همکارانش در سال ۱۹۹۰ به‌دنبال ارزیابی آزمایش جک مسطح جهت استفاده در ارزیابی ساختمان‌های قدیمی موجود در ایالات متحده بودند[10].

ایالات متحده آمریکا در خصوص انجام آزمایش جک مسطح توسط ASTM دو استاندارد جداگانه تنظیم کرد که در سال ۱۹۹۱ تصویب شد، روش آزمایش استاندارد ASTM C1196-91برای تعیین مقاومت فشاری بنایی با استفاده از آزمایش جک مسطح است، و همچنین استاندارد C1197-91 برای بررسی شکل‌پذیری بنایی با استفاده از آزمایش جک مسطح است[11]. در اروپا آزمایش جک مسطح مطابق با استانداردهای RILEM، LUM.D.2 وLUM.D.3 انجام می‌شود. این استانداردها در سال ۱۹۹۰ معرفی شدند[12, 13] [14].

در سال ۱۹۹۹، لوئیجی بیندا و همکارانش در مورد محدودیت‌ها و مزایای انجام آزمایش جک مسطح روی: ۱- آجر و سنگ بنایی با درزهای نازک، ۲- آجر بنایی با درزهای ضخیم، ۳-بنایی نامنظم و چندلایه مطالعاتی انجام دادند [15]. در سال ۲۰۰۰، لورنسو و همکارانش مطالعه‌ای مروری در خصوص نحوهٔ انجام آزمایش جک مسطح و استانداردها و آیین‌نامه‌های مرتبط با آن انجام دادند [16].

در سال ۲۰۰۰ میلادی، بیندا و همکارانش براساس مطالعاتی مبنی‌بر ارزیابی لرزه‌ای و آسیب‌های وارده بر چندین بنای تاریخی شهر اومبریا ایتالیا که در زلزله‌های فیرییولی و ایرپینیا دچار آسیب جدی شده بودند، آزمایش‌هایی روی بناهای انتخاب‌شده انجام دادند و نتایج حاصل از تحقیات خود را این‌گونه بیان کردند:

مهم‌ترین مشخصهٔ مصالح بنایی ترکیب ناهمگون یا غیرمتجانس آن است که بر تکنیک و روش‌های تعمیر و بازسازی تأثیر می‌گذارد. بررسی الگوی هندسی و نوع تَرَک‌های ایجادشده به‌همراه نظارت و کنترل مستمر بر

سازه می‌تواند اطلاعات سودمندی در مورد سازه با گذشت زمان ارائه دهد. آزمایش‌های مکانیکی درجا می تواند مقادیر کمّی یا عددی از مشخصات مکانیکی مصالح را ارائه دهند، درحالی‌که آزمایش‌های آزمایشگاهی برای توصیف مشخصات مکانیکی اجزای منفرد یا نمونه در ابعاد کوچک‌تر هم استفاده می‌شوند [18].

در سال ۲۰۰۳، کورادی و همکارانش آزمایش‌هایی روی بناهای تاریخی شهر اومبریا ایتالیا که در زلزلهٔ سال ۹۸-۱۹۹۷ دچار آسیب شده بودند، انجام دادند. آن‌ها روی پانزده نمونه از دیوار بنایی انتخاب‌شده از بناهای مختلف مطالعاتی انجام دادند و نتایج را با مقادیر استانداردهای مختلف ایتالیا بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با توجه به اینکه استانداردهای ایتالیا دیوارهای خاص مصالح بنایی را در نظر نمی‌گیرد، بنابراین، نمی‌توان مقایسه‌ای بین مقادیر پیشنهادشده و نتایج آزمایش‌های انجام‌شده انجام داد. بااین‌حال، بیشترین مقادیر پیشنهادشده در استانداردهای ایتالیا مربوط به دیوارهای سنگی است که در مقایسه با نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام‌شده کمتر است[18].

آنتونیو بوری و همکارانش ابتدا با استفاده از یک روش کیفی، دیوارهای باربر مورد نظرشان را ارزیابی کردند. سپس، با یافتن منحنی همبستگی میان شاخص کیفیت بنایی دیوارهای مورد مطالعه و مقادیر مشخصات مکانیکی پیشنهادشده در آیین‌نامهٔ ایتالیا، روابطی را برای تخمین مشخصات مکانیکی بنا با استفاده از رابطهٔ شاخص کیفیت بنایی (MQI) بدون انجام آزمایش جک مسطح ارائه دادند[1].

فاناله و همکارانش در مطالعه‌ای که انجام دادند، چهل‌گونه از چهار تیپ مختلف دیوار با مصالح بنایی را با روش ارزیابی کیفی بوری و همچنین انجام آزمایش فلت جک ارزیابی کردند. سپس با رسم نمودار همبستگی بین شاخص کیفیت بنایی (MQI) و مقاومت فشاری روابطی را تعیین کردند که به طریق آن‌ها می توان بدون انجام آزمایش فلت‌جک و فقط با انجام ارزیابی کیفی، مقاومت فشاری چهارتیپ مصالح بنایی شامل سنگ‌های نامنظم، ترکیب سنگ نامنظم و قطعات آجر، ترکیب سنگ نامنظم و آجر خطی و تیپ مخصوص آکوئیلا (a m a) است، تخمین زد[19].

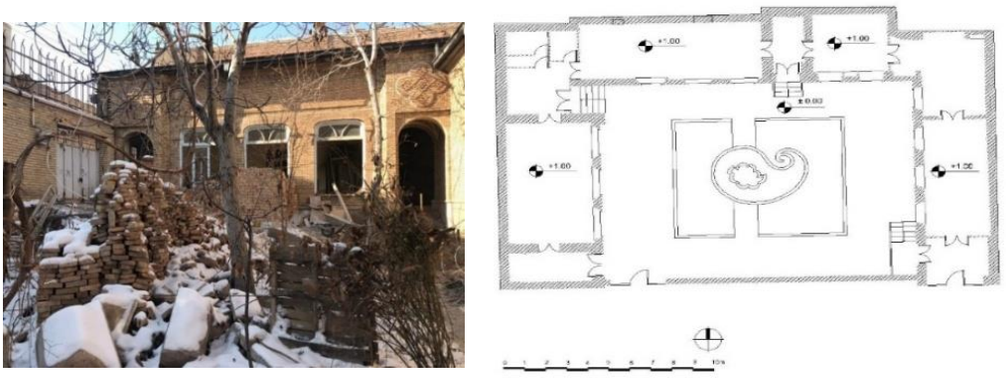
رووِرو و همکارانش در سال ۲۰۱۶ روی پنج تیپ مختلف دیوار بنایی ارزیابی کیفی به روش پیشنهادی بوری را به‌کار گرفتند. سپس، با استفاده از آزمایش جک مسطح مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری پنج تیپ بنایی یادشده را به‌دست آوردند، پس از آن، داده‌های حاصل از هر دو روش ارزیابی کمّی و کیفی را با هم مقایسه کردند که کاملاً در یک راستا قرار داشتند. همچنین روابطی را برای تخمین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته این مصالح بدون نیاز به آزمایش دابل فلت جک پیشنهاد دادند[20].

۳. ساختمان‌های مورد مطالعه

۳-۱. خانهٔ تاریخی نفیسی

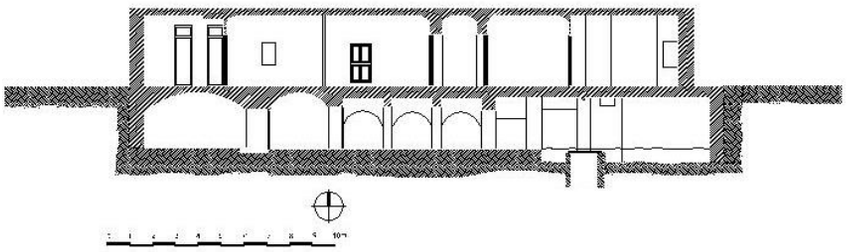
این بنا با زیربنای ۴۶۳ مترمربع در خیابان ارتش جنوبی، در کنار خانه‌های دانشگاه هنر اسلامی تبریز واقع شده است. قدمت این بنا به اواخر دورهٔ قاجار و اوایل دورهٔ پهلوی اول می‌رسد. از ویژگی‌های خاص این اثر تاریخی می‌توان به پلان Uشکل آن که شکل کلی پلان‌های دورهٔ قاجار است، اشاره کرد (شکل ۱- ب).

ترکیبی از دو سازهٔ قابی و طاقی است که زیرزمین‌ها دارای سازهٔ طاقی با پوشش تخت و طبقهٔ اول دارای سازهٔ قابی است (شکل۱- الف). بنا دارای حدوداً ۲۶۰ مترمربع عرصه و ۴۰۸ مترمربع زیربنا ساخته شده است. طبقهٔ اول بنا حدود نود سانتی‌متر بالاتر از سطح زمین و زیرزمین آن حدود ۲/۴متر پایین‌تر از سطح کنونی حیاط ساخته شده است. نمای شمالی ترکیبی از پوشش‌های آجری و پنجره‌های چوبی است. مصالح مورد استفاده در ساخت این خانه همچون سایر خانه‌های قاجاری آجر، خشت، چوب و ملات ماسه‌آهک است. پوشش طبقهٔ زیرزمین این بنا به‌صورت طاق‌ضربی و طبقهٔ همکف آن تیرهای چوبی و شیروانی است. مقطع این بنا در شکل۱- «پ» قابل مشاهده است.



(الف)
(a)

(ب)
(b)



(ب)
(c)

شکل ۱: (الف) پلان Uشکل خانهٔ نفیسی (ب) تصویری از خانهٔ تاریخی نفیسی (پ) مقطع خانهٔ نفیسی
Fig.1: (a) U-shaped plan of Nafisi house, (b) a picture of Nafisi house, (c) section of Nafisi house.

۳-۲. خانهٔ تاریخی کلانتر

این بنا کوشکی است در داخل باغی به مساحت ۶۵۵۰مترمربع (این باغ بخشی از باغ قدیمی است) و با اعیانی ۱۰۴۰مترمربع در دوطبقه که قبالهٔ آن به نام خانه است. معماری این بنا ملهم از معماری قفقاز بوده که اجرای آن به دست مهرازان و بنّایان ایرانی بوده و در سال ۱۹۳۲ میلادی (۱۳۱۱ شمسی) در دورهٔ قاجار ساخته شده است (شکل ۲).

پلان این خانه کاملاً قرینه و همانند سایر بناهای دورهٔ قاجاریه تقارن به‌صورت کامل در این خانه رعایت شده است (شکل‌های ۲–الف) طبقهٔ همکف شامل یک ایوان با چهارجفت ستون، یک ورودی به‌عنوان هشتی، یک دهلیز، دو اتاق جانبی با الگوی سه‌دری به‌عنوان نشیمن و دو اتاق کشیده با مدول ۳*۱پشت اتاق‌های نشیمن که به‌عنوان آشپزخانه استفاده می‌شده، قرار گرفته است. پله‌های ارتباطی طبقهٔ همکف به اول در انتهای دهلیز قرار گرفته است. طبقهٔ اول نیز شامل یک طنبی (طنبی روی محور اصلی بنا قرار دارد و توسط دو درب به ایوان‌های جانبی متصل شده است.) یک دهلیز و چهار اتاق است. پوشش طبقهٔ همکف طاق آجری، و طبقهٔ اول چوبی است. مصالح به‌کاررفته در ساخت این بنا آجر، خشت و سنگ است. تعدادی از دیوارهای بنا به صورت تفلیسی کار شده‌اند.

تـزئینـات به‌کـاررفتـه:

۱- سرستون‌های گچی

۲- رومی بالای ستون‌های ایوان‌های طبقهٔ اول

۳- قاب‌بندی‌های آجری

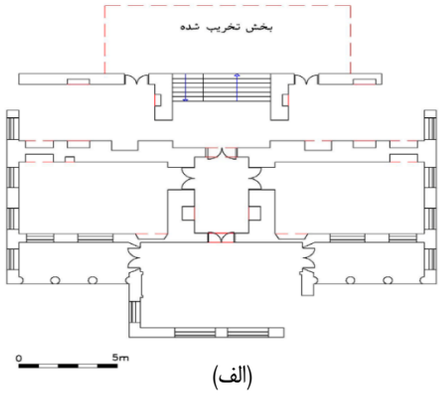
۴- گچ‌بری‌های برجسته در نما با نگاره‌های انگور و برگ

۵- کاشی‌کاری هفت‌رنگ بالای طاق‌های ایوان‌ها که جزو نادر کاشی‌کاری‌های بناها در تبریز است.

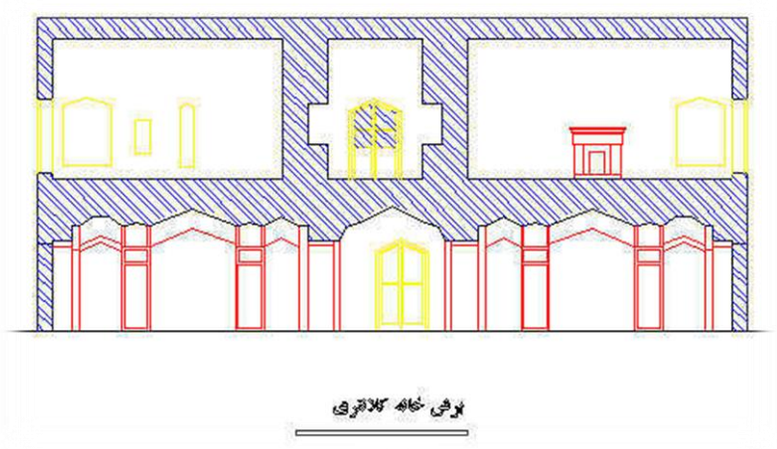
۶- اتاق طنبی

۷– قاب‌بندی‌های گچی داخل طبقهٔ همکف

(ب)
(b)



(الف)
(a)



(پ)
(c)

شکل ۲: (الف)پلان خانهٔ تاریخی کلانتر، (ب) تصویری از خانهٔ تاریخی کلانتر، (پ) مقطع خانهٔ کلانتر
Fig.2: (a) plan of Kalantar house, (b) a picture of Kalantar house, (c) section of Kalantar house.

۳-۳. خانهٔ تاریخی سرخه‌ای

این بنا در محلهٔ سرخاب شهر تبریز واقع شده است و متعلق به دورهٔ قاجار است که یکی از شواهد آشکار آن زیرزمین بناست. البته در دوره‌های بعدی، نمای بخش اندرونی بنا به سبک پهلوی کار شده است. این بنا با مصالح بنایی ساخته شده است. در طبقهٔ زیرزمین سازهٔ آجری با پوشش طاقی می‌باشد. در طبقهٔ همکف ضمن کاهش احجام سازه‌ای از مصالح سبک‌تر نیز استفاده شده و پوشش سقف آن چوبی است. عمده مصالح به‌کاررفته در بنا آجر، سنگ، چوب و گچ است. در ساخت اُرُسی‌ها و در و پنجره‌ها از چوب استفاده شده است (شکل ۳).

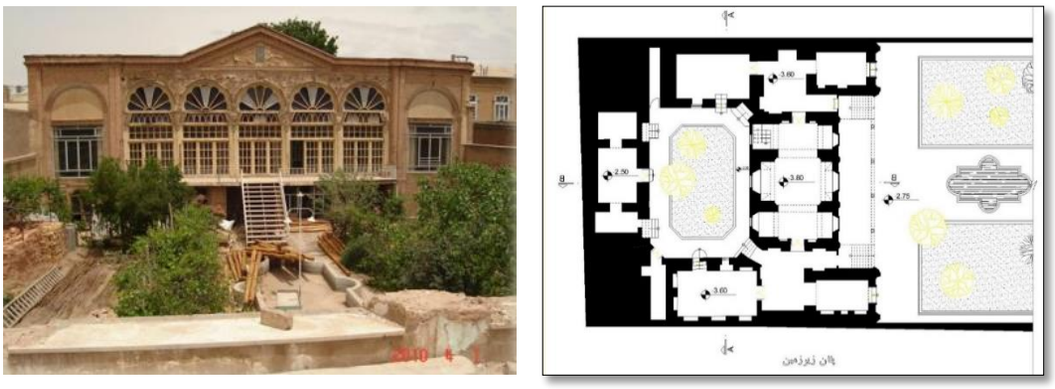
پلان بنا همچون سایر بناهای هم‌دوره‌اش به‌صورت متقارن است البته در بعضی قسمت‌ها نامتقارنی‌هایی نیز دیده می‌شود (شکل ۳–الف). مساحت زیربنای طبقهٔ همکف این خانه با احتساب سطح جرزها حدوداً ۴۹۰ مترمربع است. این خانه همچون اکثر خانه‌های قدیمی تبریز دو حیاط اندرونی و بیرونی دارد که دورادور حیاط اندرونی را ساختمان فراگرفته است. در دورهٔ متأخر، تغییرات زیادی در پلان خانه صورت گرفته و هندسه و تناسبات آن به‌هم خورده است.

در فونداسیون بنا از سنگ استفاده شده است. زیرزمین بنا آجرفرش است. و با توجه به اینکه از این مکان به‌عنوان مطبخ استفاده می‌شده است، امری منطقی به‌نظر می‌رسد

قسمت قدیمی سقف کاهگل باشد که اکنون در قسمتی از آن از پوشش شیروانی استفاده شده که در دورهٔ متأخر به بنا افزوده شده است. استفاده از چوب در درها و پنجره‌ها کاملاً مشهود است و نمونه‌های اعلی و بسیار ظریف کار با چوب در اُرُسی‌های خانه به‌چشم می‌خورَد. استفاده از شیشه‌های رنگی در اُرُسی‌ها زیبایی خاصی به بنا بخشیده است. در کلِ ساختمان دو نوع پله به‌چشم می‌خورَد که یک نوع هم‌عصر خود بناست و از سنگ ساخته شده است و نوع دوم پلهٔ فلزی است که در دوهٔ متأخر و با تغییر ورودی بنا اضافه گردیده و کف پله از سنگ تراورتن پوشیده شده است. طبق مشاهدات انجام‌شده، بنا در چند دوره تغییر داده شده یا تکمیل شده است، ولی اساس تشکیل بنا دورهٔ قاجار است.

هندسهٔ بنا: اکثر بناهای دورهٔ قاجار پلانی متقارن دارند. این بنا نیز از این قاعده مستثنی نبوده و در کلیت تقارن به‌چشم می‌خورَد اما در کنار این تقارن، در برخی نقاط، متوجه تفاوت‌هایی می‌شویم که عمدتاً از نظر عملکردی نیز تابعیت فرم و عملکرد را می‌توان در این‌گونه جاها دید و این نماها و پلان‌ها را به‌سوی مفهوم تعادل در کنار تقارن نزدیک می‌کند. همچنین در نماها و در و پنجره‌ها نیز نشانه‌هایی از ریتم دیده می‌شود.

تزئینات: تزئینات غالب این بنا در نمای خارجی، آجرکاری و گچ‌کاری‌های ظریف است و در فضای داخلی اندودگچی و استفاده از لایه‌های رنگی می‌باشد، استفاده از نقاشی و آینه‌کاری در سقف‌ها و داخل طاقچه‌ها و رَف‌ها نیز از ویژگی‌های بناست. از دیگر تزئینات می‌توان به اُرُسی‌های زیبا و شیشه‌های رنگی آن اشاره کرد که یک نور بسیار لطیف و زیبا را به فضای درونی هدایت می‌کند. حوض و محوطه‌سازی حیاط نیز از تزئیناتی بوده است که اکنون بیشتر آن‌ها از بین رفته است.



(الف)
(a)

(ب)
(b)

شکل ۳: (الف)پلان خانهٔ تاریخی سرخه‌ای (ب) تصویری از خانهٔ تاریخی سرخه‌ای
Fig.3: (a) plan of Sorkhehee house, (b) a picture of Sorkhehee house

٤. مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر از نوع پژوهش‌های کاربردی است که به تحلیل مشخصات مکانیکی مصالح استفاده‌شده در خانه‌های تاریخی نفسی، کلانتر و سرخه‌ای می‌پردازد که از نمونه بناهای آجری دورهٔ قاجار شهر تبریز است. در سال ۱۴۰۰، توسط غلامی و آخوندی [21] با استفاده از سطح یک آیین‌نامه‌های ایتالیا برای ارزیابی و کاهش خطر لرزه‌ای بناهای تاریخی، میزان ایمنی خانهٔ تاریخی نفیسی مورد بررسی قرار گرفته است، مطالعهٔ یادشده به بررسی میزان مقاومت بر شیئ و شاخص ایمنی لرزه‌ای این بنا در حالت حد نهایی پرداخته است. در واقع شاخص ایمنی لرزه‌ای بنا از نسبت ظرفیت لرزه‌ای به نیاز لرزه‌ای به‌دست می‌آید. بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده میزان شاخص ایمنی لرزه‌ای خانه‌های تاریخی نفیسی ۰/۵۷۶ و کلانتر

۰/۷۵۸ شده است. ازآنجاکه براساس دستورالعمل ایتالیا شاخص ایمنی کمتر از یک نشان از عدم ایمنی بنا در برابر شرایط لرزه خیزی منطقه دارد، خانه‌های مذکور غیرایمن بوده و به استحکام‌بخشی نیاز مبرم دارد[21]. داده‌های پژوهش از روش کتابخانه‌ای و میدانی گردآوری شده‌اند. روش تحقیق آزمایشی–تحلیلی است. در این پژوهش سعی شده است مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری مصالح بنایی خانه‌های مورد مطالعه با استفاده از آزمایش جک مسطح محاسبه شود، و سپس با استفاده از روش پیشنهادشدهٔ بوری بنا ارزیابی کیفی شود و با جای‌گذاری عدد شاخص کیفیت بنایی (MQI) به جای X در روابط ارائه‌شده توسط بوری (جدول ۱) مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری را به روش کیفی تخمین می‌زنیم و در نهایت مقادیر حاصل از دو روش با هم مقایسه می‌شوند.

جدول ۱: روابط پیشنهادی بوری و همکارانش جهت تخمین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته.

Table 1: The equations proposed by Borri et.al to estimate compressive strength and modulus of elasticity.

مشخصات مکانیکی Mechanical properties	Min	Max
مقاومت فشاری compressive strength	$Y=0/937e^{0/2232x}$	$Y=1/6882e^{0/1988x}$
مدول الاستیسیته modulus of elasticity	$Y=548/31e^{0/1737x}$	$Y=821/24e^{0/163x}$

٤-١. آزمایش جک مسطح

در این روش که به‌صورت درجا انجام می‌شود، دو شکاف به فاصلهٔ چهار تا شش ردیف از اِلمان‌های بنایی در قسمت ملات دیوار ایجاد می‌شود و سپس با قراردادن جک‌های مسطح هیدرولیکی در شکاف‌ها فشار لازم اعمال می‌شود تا قسمت مورد نظر از دیوار در معرض تنش قائم قرار گیرد .مقدار فشار اعمالی توسط جک‌ها، در این آزمایش تا کمتر از نصف مقاومت مصالح کافی است. تغییرشکل، به‌وسیلهٔ گِیج‌ها اندازه‌گیری می‌شود و کرنش از تقسیم این تغییر شکل بر فاصلهٔ بین گِیج‌ها به‌دست می‌آید. تجهیزات مورد نیاز برای انجام آزمایش جک مسطح در شکل ۲ نشان داده شده است که به‌ترتیب شامل الف) دستگاه برش ب) وسایل (گِیج‌های) اندازه‌گیری پ) پمپ هیدرولیک و ت) جک‌های مستطیل و نیم‌دایره هستند.

جک‌های استفاده‌شده در این آزمایش از نوع جک‌های تولیدشده توسط شرکت بوویار ایتالیا (بووی یار) با سطح مقطع‌های مستطیلی در ابعاد ۴۰۰×۲۰۰×۴ میلی‌متر و سطح مقطع‌های نیم‌دایره‌ای در ابعاد ۳۵۰×۲۶۰×۴ میلی متر با ضریب کالیبراسیون ۰/۹ تا ۰/۹۲ مگاپاسکال (K_m= 0/9-0/92) است. همچنین برای ایجاد تنش فشاری داخل فلت‌ها از جک هیدرولیکی دستی تولیدشده توسط شرکت بوویار ایتالیا استفاده شده است.

با توجه به اینکه صفحات جک مسطح دارای سختی ذاتی اند، بنابراین برای محاسبهٔ مقدار تنش فشاری واقعی بین صفحهٔ جک مسطح و دیوار از رابطهٔ ۱ استفاده می‌شود: (۱) که در آن :

$$\sigma_m = K_m K_a P$$

K_m: ضریب کالیبراسیون جک مسطح که به ویژگی‌های هندسی و سختی جک‌ها اشاره دارد. مقدار آن توسط شرکت سازنده تعیین می‌شود.

K_a: نسبت سطح جک مسطح به سطح برش خورده دیوار.

P: فشار فلت جک است براساس بار یا مگاپاسگال

قبل از شروع آزمایش فاصلهٔ عمودی بین دو محل برش اندازه‌گیری می‌شود، سپس برای محاسبهٔ کرنش، جابه‌جایی های ثبت‌شده توسط وسایل اندازه‌گیری (گِیج‌ها) در هر گام افزایش فشار بر فاصلهٔ دو جک تقسیم می‌شود، نمودار تنش کرنش مربوط به هر آزمایش براساس اعداد ثبت‌شده توسط وسایل اندازه‌گیری (گِیج‌ها) ترسیم و مقدار مدول الاستیسیته با رابطهٔ $E=\sigma/\varepsilon$ محاسبه می‌شود

شکل ۴: الف) دستگاه برش ب) وسایل (گِیج‌های) اندازه‌گیری پ) پمپ هیدرولیکی ت) جک‌های مسطح
Fig.4: (a) cutting machine, (b) LVDTs , (c) Hydraulic pump, (d) double flat jacks

٤-٢. ارزیابی شاخص کیفیت بنایی (MQI)

این روش با هدف توسعهٔ یک رویکرد ساده و منظم برای تحلیل سازه‌های بنایی براساس توجه به رفتار ایده‌آل دیوار بنایی و همچنین خصوصیات مکانیکی اجزای تشکیل‌دهنده (سنگ، آجر، ملات و ...) انجام می‌گیرد. در این روش، هفت پارامتر اعم MQI یا شاخص کیفیت بنایی است و مقدار عددی آن از جمع شش پارامتر و ضرب آن‌ها در پارامتر SM که وضعیت حفاظت‌شدهٔ بنا را در نظر می‌گیرد، به‌دست می‌آید. پارامترهای SD و SS به‌ترتیب ابعاد مصالح به‌کاررفته در بنا در مقایسه با ضخامت دیوار و شکل هندسی آن‌ها را در نظر می گیرند، پارامترWC اتصالات عرضی دیوار، کیفیت و چگونگی پیوند و قفل و بست مصالح دیوار را بررسی می‌کند، همچنین پارامترهای HJ و VJ کیفیت بند یا درزهای افقی و عمودی را به ترتیب بررسی می‌کنند و پارامتر MM نیز کیفیت ملات به‌کاررفته در بنا را از نظر مقاومت و چسبندگی مورد بررسی قرار داده که برای تخمین مشخصات مکانیکی دیوار بنایی در نظر گرفته می‌شود، این تخمین نیازمند شناخت عمیق از روش‌های ساخت تاریخی است. بر اساس نتایج تحلیل‌های کیفی صورت‌گرفته یک مقدار عددی از جدول ۲ (طبق دستورالعمل بوری) برای هر پارامتر اختصاص داده می شود، سپس با جمع پارامترها و ضرب آن‌ها در مقدار SMیک مقدار عددی برای MQI به‌دست می‌آید. این مقدار بر اساس جدول ۳ سازه‌ها را از نظر کیفیت به سه دسته تقسیم می‌کند. پارامترهای PF, NF و F در جدول ۳ وضعیت دیوارها را از نظر کیفیت اجرا توصیف می‌کند که NF (Not Fulfilled) یا کیفیت اجرای ضعیف، PF (Partially Fulfilled) یا کیفیت اجرای متوسط و F (Fulfilled) یا کیفیت اجرای خوب را نشان می‌دهند[1].

(2): MQI = SM (SD + SS + WC + HJ + VJ + MM)

۱- نیروهای داخل صفحهٔ دیوار (in-plane actions)
۲- نیروهای خارج از صفحهٔ دیوار(out-of-plane actions)
۳- نیروهای قائم (vertical actions)

سازه‌ها را به سه دستهٔ الف) کیفیت رفتاری خوب ب) کیفیت رفتاری متوسط پ) و رفتار ناکافی یا نامناسب تقسیم‌بندی می‌کند. (جدول ۳)

جدول۲: مقادیر عددی تحلیل[1]
Table2: Numerical values for analysis

MQI	بارهای عمودی یا قائم Vertical loads			بارهای افقی داخل صفحه In plane loads			بارهای افقی خارج از صفحه Out of plane loads		
	NF	PF	F	NF	PF	F	NF	PF	F
HJ	۰	۱	۲	۰	۰/۵	۱	۰	۱	۲
WC	۰	۱	۱	۰	۱	۲	۰	۱/۵	۳
SS	۰	۱/۵	۳	۰	۱	۲	۰	۱	۲
VJ	۰	۰/۵	۱	۰	۱	۲	۰	۰/۵	۱
SD	۰	۰/۵	۱	۰	۰/۵	۱	۰	۰/۵	۱
MM	۰	۰/۵	۲	۰	۱	۲	۰	۰/۵	۱
SM	۰/۳	۰/۷	۱	۰/۳	۰/۷	۱	۰/۵	۰/۷	۱

جدول ۳: دسته‌بندی بناها براساس تابعی از شاخص کیفیت بنایی[1]
Table3: Masonry categories as function of the Masonry Quality Index (MQI)

	الف A	ب B	پ C
بارهای عمودی یا قائم Vertical loads	۵ ≤ MQI ≤ ۱۰	۲/۵ ≤ MQI ≤ ۵	۰ ≤ MQI ≤ ۲/۵
بارهای افقی داخل صفحه Horizental in plane loads	۷ ≤ MQI ≤ ۱۰	۴ ≤ MQI ≤ ۷	۰ ≤ MQI ≤ ۴
بارهای افقی خارج از صفحه Horizental out of plane loads	۵ ≤ MQI ≤ ۱۰	۳ ≤ MQI ≤ ۵	۰ ≤ MQI ≤ ۳

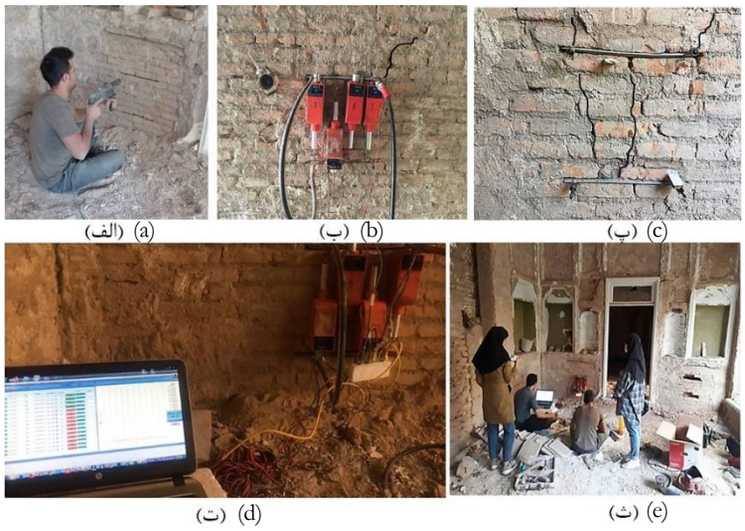
۵. بحث در نتایج و یافته‌ها

بناهای مورد مطالعه از بناهای آجری مربوط به دورهٔ قاجار شهر تبریز است که هفت مورد آزمایش جک مسطح روی دیوارهای اصلی و باربر نمونه بناهای انتخاب‌شده انجام شد، نمودار تنش/کرنش این آزمایش‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است، در شکل‌های ۵، ۷ و ۹ نحوهٔ جانمایی وسایل اندازه‌گیری (گِیج‌ها) و الگوی ترک‌خوردگی دیوارها آورده شده است. دیوارهای آزمایش‌شده از دیوارهای اصلی باربر و مرمت‌نشدهٔ بناست که در پلان خانه‌ها نشان داده شده است، همچنین تعداد آزمایش‌ها در خانهٔ تاریخی نفیسی سه مورد در خانه‌های تاریخی کلانتر و سرخه‌ای هرکدام دو مورد بوده که براساس محدودیت‌های اعمال‌شده از طرف ادارهٔ کل میراث فرهنگی استان انجام شده است. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در جدول ۴ نشان می‌دهد حداکثر مقاومت فشاری ۱/۶۸ مگاپاسگال مربوط به خانهٔ تاریخی کلانتر و حداقل مقدار ۰/۵۳ مگاپاسگال مربوط به خانهٔ تاریخی سرخه‌ای می‌باشد، همچنین حداکثر مقدار مدول الاستیسیته ۲۶۱۱/۱۳ مگاپاسگال مربوط به خانهٔ تاریخی کلانتر و حداقل مقدار آن ۸۰۳/۲۶ مگاپاسگال مربوط به خانهٔ تاریخی نفیسی است.

جدول۴: مقادیر مربوط به مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش فلت جک

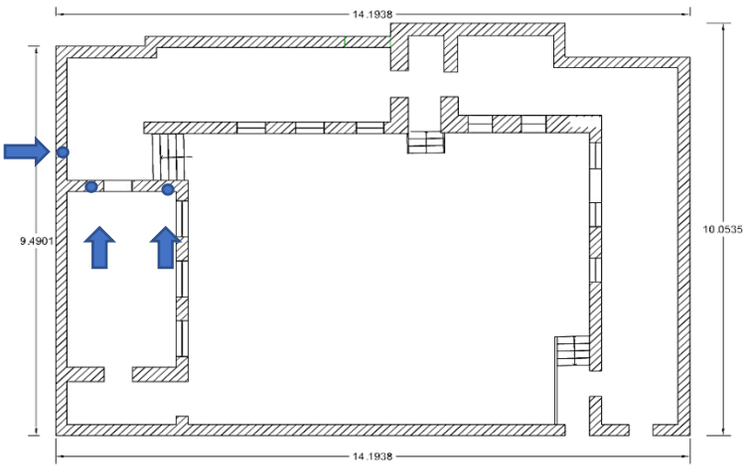
Table4: Values of compressive strength and modulus of elasticity obtained by the double double flat jack test

مدول الاستیسیته (MPa) modulus of elasticity	مقاومت فشاری (MPa) compressive strength	تعداد آزمایش‌ها Number of tests	
۸۰۳/۲۶	۱/۱۱	۳	خانهٔ تاریخی نفیسی Nafisi historic house
۱۱۸۲/۰۶	۱/۱۳		
۱۳۸۲/۲۷	۰/۸۱		
۱۷۹۴	۱/۳۶	۲	خانهٔ تاریخی کلانتر Kalantar historic house
۲۶۱۱/۱۳	۱/۶۸		
۱۱۷۹/۴۲	۰/۵۳	۲	خانهٔ تاریخی سرخه‌ای Sorkhehee historic house
۱۴۸۰/۳۵	۰/۸۱		



شکل ۵: خانهٔ تاریخی نفیسی: الف) نحوهٔ برش ملات محل آزمایش ب) نحوهٔ آرایش وسایل (گِیج‌های) اندازه‌گیری پ) الگوی ترک‌خوردگی دیوار ت) ثبت داده‌های وسایل (گیج‌ها) ث) شرایط محل و نحوهٔ انجام آزمایش.

Fig 5: Nafisi's historic house (a) cutting the mortar of the test site(b) arrangement of the measuring gauges (c) wall cracking pattern (d) recording the data of the gauges (e) site conditions and how to conduct the test.



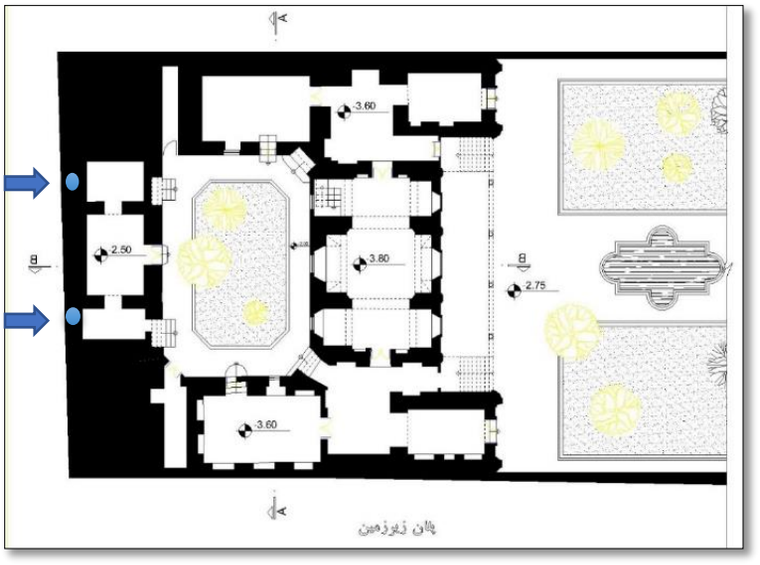
شکل ۶: محل انجام آزمایش‌ها در خانهٔ تاریخی نفیسی با دایرهٔ آبی‌رنگ در پلان خانه مشخص شده است.

Fig6: The locations of conducted testsin Nafisi house are marked with blue circle

(الف) (a)　　(ب) (b)

شکل ۷: خانهٔ تاریخی سرخه‌ای: الف) الگو ترک‌خوردگی دیوار ب) نحوهٔ آرایش وسایل (گِیج‌های) اندازه‌گیری

Fig.7: Historical house of Sorkhehee: (a)crack pattern of wall (b) The arrangement of measuring gauges



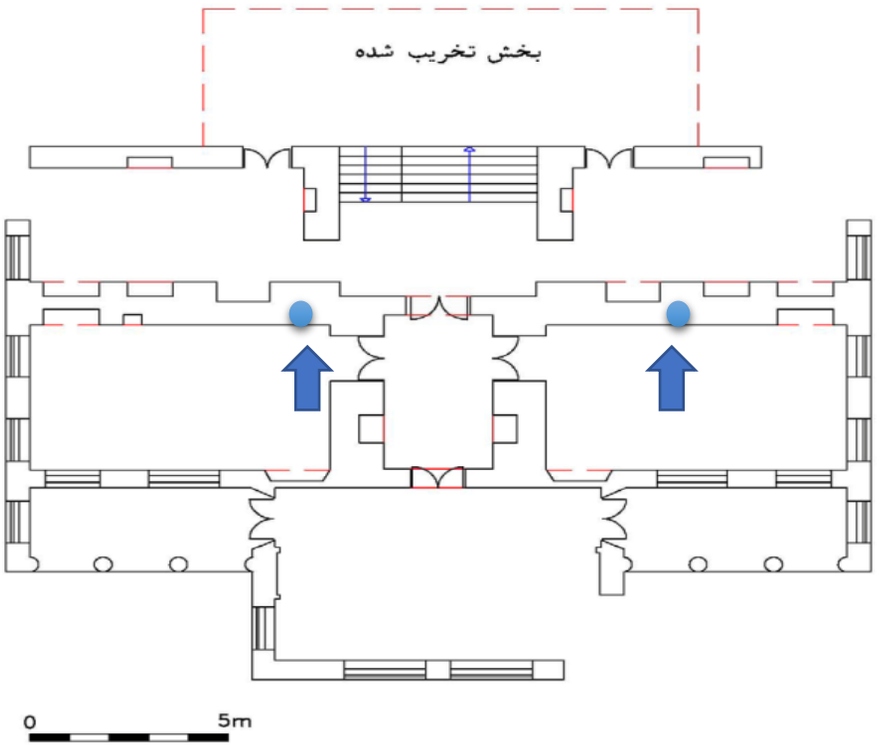
شکل ۸: محل انجام آزمایش‌ها در خانهٔ تاریخی سرخه‌ای با دایرهٔ آبی‌رنگ در پلان خانه مشخص شده است.

Fig8. The locations of conducted tests in Sorkhehee house are marked with blue circle

(الف) (a)　　(ب) (b)

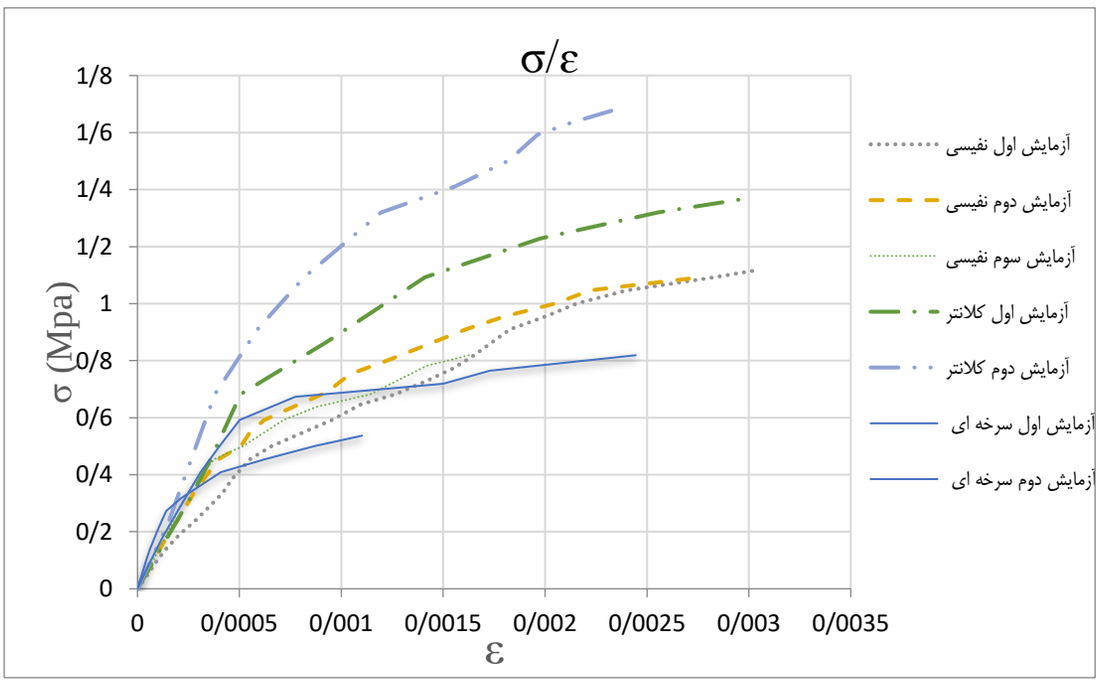
شکل ۹: (الف) شرایط انجام آزمایش (ب) آرایش سنسورها و الگوی ترک‌خوردگی دیوار

Fig 9.(a) Condition of conducting the tests (b) The arrangement of measuring gauges



شکل ۱۰: محل انجام آزمایش‌ها در خانهٔ تاریخی کلانتر با دایرهٔ آبی‌رنگ در پلان خانه مشخص شده است.

Fig10: The locations of conducted tests in Kalantar house are marked with blue circle



شکل۱۱: نمودار تنش/کرنش آزمایش‌ها

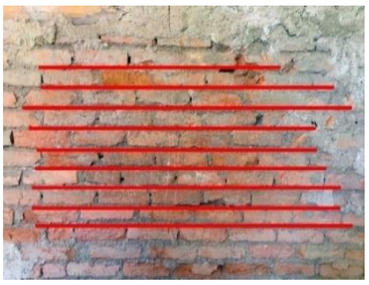
Fig11. Stress/strain diagram obtained by tests

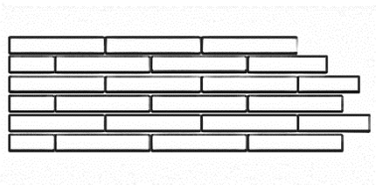
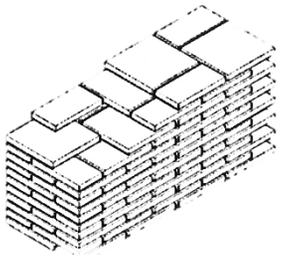
برای ارزیابی کیفی بنا درزهای افقی و عمودی دیوارها، اتصالات عرضی دیوارها ،کیفیت ملات، ابعاد آجرها و ملات استفاده‌شده به‌طور کامل بررسی شد. سپس، شاخص کیفیت بنایی در حالات بارگذاری قائم، داخل صفحه و خارج از صفحه محاسبه شد، در جدول ۵، ۷ و ۹ نتایج این ارزیابی‌ها قابل مشاهده است.

مطابق این جداول دیوارهای خانهٔ تاریخی نفیسی تحت بارگذاری قائم و خارج از صفحه با شاخص کیفیت بنایی به ترتیب ۴/۲۰ و ۳/۵ در دسته‌بندی «ب» با کیفیت رفتار متوسط و در بارگذاری داخل صفحه با شاخص کیفیت بنایی ۳/۸۵ در دسته‌بندی «پ» با کیفیت رفتار ضعیف قرار داشت (جدول ۵). دیوارهای خانهٔ تاریخی سرخه‌ای تحت بارگذاری قائم و خارج از صفحه با شاخص کیفیت بنایی به‌ترتیب ۳/۸۵ و ۳/۵ در دسته‌بندی «ب» با کیفیت رفتار متوسط و در بارگذاری داخل صفحه با شاخص کیفیت بنایی ۳/۸۵ در دسته‌بندی «پ» با کیفیت رفتار ضعیف قرار داشت (جدول ۷). دیوارهای خانهٔ تاریخی کلانتر تحت بارگذاری قائم و خارج از صفحه با شاخص کیفیت بنایی به‌ترتیب ۵/۲۵ و ۴/۵۵ در دسته‌بندی «ب» با کیفیت رفتار متوسط و در بارگذاری داخل صفحه با شاخص کیفیت بنایی 5/60 در دسته‌بندی «الف» با کیفیت رفتار خوب قرار داشت (جدول ۹).

جدول ۵: نتایج ارزیابی کیفی خانهٔ تاریخی نفیسی بر اساس دستورالعمل بوری.

Table5.The results of the qualitative evaluation of Nafisi's historical house based on Borri's method

تصاویر Photos	 نمای دیوار Wall's elevation نمای ضلع غربی خانه Western elevation of the house
تحلیل بندهای افقی؛ عمودی و مقطع دیوار Analysis of hoorizental and vertical joints and wall section	 مقطع دیوار Wall section درزهای عمودی Vrtical joints  درزهای افقی Horizontal bed joints

چیدمان آجرها Arrangement of bricks	نمای شماتیک دیوار Front views  نمای سه‌بُعدی Axonomertic projecion 
توصیف description	دیوار یک‌لایهٔ آجری: Single-leaf brick wall • دیوار ساخته‌شده با آجرهای مربعی‌شکل The wall built with square bricks • مفاصل یا بندهای افقی کاملاً موازی هستند. Horizontally of bed joints fulfilled. • مفاصل یا بندهای قائم به‌صورت پله‌ای اجرا شده. Vertical joints are implemented staggered.
مصالح material	• آجرهای پخته‌شده در ابعاد (۴×۲۰×۲۰سانتی متر) Fired bricks in dimensions (4 x 20 x 20 cm) • ملات ماسهٔ آهکی با چسبندگی کم Weak aerial lime-based motar • ضخامت ملات در بندهای افقی و قائم تقریباً یکنواخت است. The thickness of mortar in horizontal of bed joints partillay fulfilled.
هندسه Geometry	• ابعاد آجر Dimention of the bricks طول و عرض آجرL=B= 200 mm Length and wide of bricks ضخامت آجرH= 40 mm Thickness of brick

SM	SD	SS	WC	HJ	VJ	MM		Vertical	Out-of-plane	In-plane	
PF	PF	F	PF	PF	F	PF	طبقه بندی Category	ب B	ب B	پ C	تحلیل کیفی Qualitative analysis
MQI = SM (SD + SS + WC + HJ + VJ + MM)							M_I		> ۱,۶	> ۱,۲۵	
MQI_V = ۰/۷(۰/۵+۱/۵+۱+۲+۰/۵+۰/۵) = ۴/۲۰							MQI	۴/۲۰	۳/۵	۳/۵	
MQI_O = ۰/۷(۰/۵+۱+۱/۵+۱+۰/۵+۰/۵) = ۳/۵							مشخصات مکانیکی Mechanical properties	f_m(MPa)	E (MPa)		
MQI_I = ۰/۷ (۰/۵+۱+۱+۰/۵+۱+۱) = ۳/۵								۱-۱/۱۳ ۰/۸۱	۱۳۸۲/۲۷-۱۱۸۲/۰۶		

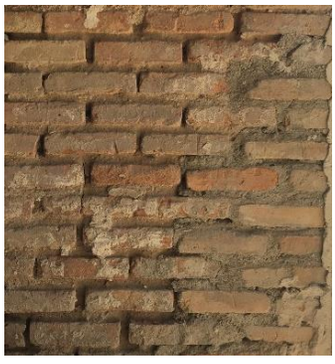
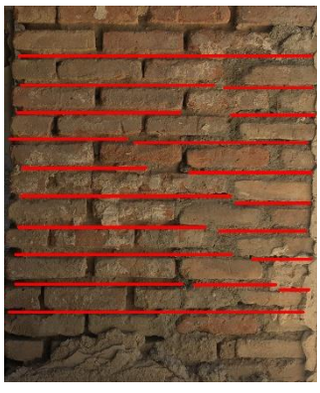
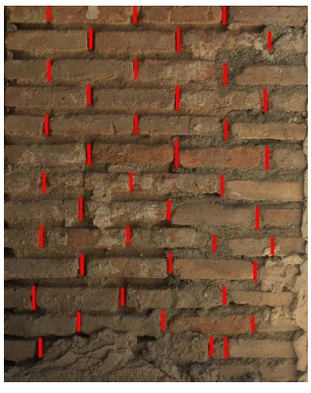
جدول ۶: بررسی وضعیت شاخص کیفیت خانهٔ تاریخی نفیسی.

Table8: Investigating the status of the masonry quality index of Nafisi historical house

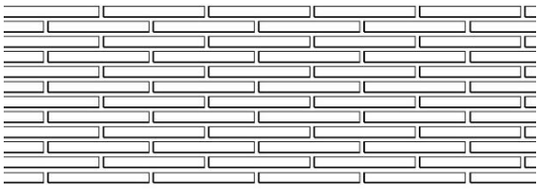
	الف A	ب B	پ C
بارهای عمودی یا قائم Vertical loads	۵ ≤ MQI ≤ ۱۰	۲/۵ ≤ MQI ≤ ۵	۰ ≤ MQI ≤ ۲/۵
بارهای افقی داخل صفحه Horizenal in plane loads	۷ ≤ MQI ≤ ۱۰	۴ ≤ MQI ≤ ۷	۰ ≤ MQI ≤ ۴
بارهای افقی خارج از صفحه Horizenal out-of-plane loads	۵ ≤ MQI ≤ ۱۰	۳ ≤ MQI ≤ ۵	۰ ≤ MQI ≤ ۳

جدول ۹: نتایج ارزیابی کیفی خانهٔ تاریخی کلانتر

Table9: The results of the qualitative evaluation of Kalantar's historical house based on Borri's method.

تصاویر Photos	 نمای اصلی خانه Main facade of the house  نمای دیوار Elevation of the wall
تحلیل بندهای افقی؛ عمودی و مقطع دیوار Analysis of hoorizental and vertical joints and section of wall	 درزهای افقی Horizontal of bed joints  درزهای عمودی vertical joints مقطع دیوار Wall section

چیدمان آجرها
Arrangement of bricks



نمای جلو
Front view

توصیف
description

دیوار آجری به ضخامت یک‌متر
Brick wall with a thicknes equal 1 meter

- دیوار ساخته‌شده با آجرهای مربعی و مستطیل‌شکل
A wall built with square and rectangular bricks
- درزهای افقی موازی هستند.
Horizontal of bed joints fulfilled
- درزهای قائم کاملاً پله‌ای.
fulfilled Vertical mortar joints compeletlly

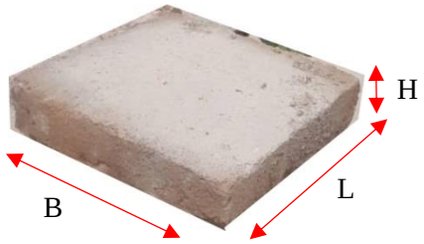
مصالح
material

- آجرهای پخته‌شده در ابعاد (۴×۲۰×۲۰سانتی متر) و مستطیلی (۴×۲۰×۱۰سانتی متر)
Square fired bricks in dimensions (4x20x20 cm) and rectangular (4x20x10 cm)
- ملات ماسه آهک با چسبندگی خوب.
Good aerial lime-based mortar
- ضخامت ملات در بندهای افقی و قائم تقریباً یکسان است.
The thickness of the mortar is the same in the horizontal and vertical joints

هندسه آجر
Geometry

- ابعاد آجر به‌کاررفته در دیوارها
Dimention of the bricks of wall

L=B=200 mm
H= 40 mm



ارزیابی کیفی
Qualitative assessment

SM	SD	SS	WC	HJ	VJ	MM		Vertical	Out-of-plane	In-plane
PF	PF	PF	PF	F	F	F	طبقه‌بندی Category	الف A	ب B	ب B
							M_I		>۱,۶	>۱,۲۵
							MQI	۵/۶	۴/۵۵	۵/۲۵
								Fm (MPa)	E (MPa)	
							مشخصات مکانیکی Mechanical properties	۱/۳۶-۱/۶۸	۱۷۹۴-۲۶۱۱/۳	

MQI = SM (SD + SS + WC + HJ + VJ + MM)

MQI_V = ۰/۷ (۰/۵+۱/۵+۱+۲+۱+۲) =۵/۶

MQI_O =۰/۷ (۰/۵+۱+۱/۵+۲+۱+۰/۵) =۴/۵۵

MQI_I = ۰/۷۰ (۱+۲+۲+۱+۲+۰/۵+۱) =۲۵/۵

جدول ۱۰: بررسی وضعیت شاخص کیفیت خانهٔ تاریخی کلانتر
Table10:Investigating the status of the masonry quality index of Kalantar historical house

	A	B	C
بارهای عمودی یا قائم Vertical loads	۵ ≤ MQI ≤ ۱۰	۲/۵ ≤ MQI ≤ ۵	۰ ≤ MQI ≤ ۲/۵
بارهای افقی داخل صفحه Horizontal in plane loads	۷ ≤ MQI ≤ ۱۰	۴ ≤ MQI ≤ ۷	۰ ≤ MQI ≤ ۴
بارهای افقی خارج از صفحه Horizontal out of plane loads	۵ ≤ MQI ≤ ۱۰	۳ ≤ MQI ≤ ۵	۰ ≤ MQI ≤ ۳

با جای‌گذاری مقدار عددی شاخص کیفیت بنایی (MQI) در حالت بارگذاری قائم در روابط موجود در جدول ۱ مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته مینیمم و ماکزیمم محاسبه گردید، و با مقادیر حاصل از آزمایش فلت جک مقایسه شد (جدول۴). مقدار مقاومت فشاری حاصل از این روابط اختلاف زیادی با مقادیر مقاومت فشاری حاصل از آزمایش جک مسطح داشتند، درحالی‌که مقادیر مدول الاستیسیته حاصل از این دو روش همخوانی نزدیکی باهم داشتند (جدول۱۱).

جدول ۱۱: مقایسهٔ مقادیر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش جک مسطح و روابط پیشنهادی بوری و همکارانش.
Table11: Comparing the values of compressive strength and modulus of elasticity obtained from the double double flat jack testing and the relationships proposed by Borr et. al

مشخصات مکانیکی مصالح Mechanical properties	خانهٔ نفیسی Nafisi house		خانهٔ سرخه‌ای Sorkhehee house		خانهٔ کلانتر Kalantar house	
	حداقل و حداکثر نتایج آزمایش جک مسطح (MPa) Min and max values obtained by double flat jack test	حداقل و حداکثر نتایج حاصل از رابطهٔ بوری (MPa) Min and max values obtained by Borri's relations	حداقل و حداکثر نتایج آزمایش جک مسطح (MPa) Min and max values obtained by double flat jack test	حداقل و حداکثر نتایج حاصل از رابطهٔ بوری (MPa) Min and max values obtained by Borri's relations	حداقل و حداکثر نتایج آزمایش جک مسطح (MPa) Min and max values obtained by double flat jack test	حداقل و حداکثر نتایج حاصل از رابطهٔ بوری (MPa) Min and max values obtained by Borri's relations
مقاومت فشاری Compressive strength	۰/۸۱ –۱/۱۳	۲/۳۹ — ۳/۸۹	۰/۰–۵۳/۸۱	۲/۲۱ –۳/۶۲	۱/۳۶ –۱/۶۸	۳/۲۷ –۵/۱۳
مدول الاستیسیته Elastic modulus	–۱۱۸۲/۰۶ ۱۳۸۲/۲۷	–۱۱۳۷/۷۴ ۱۶۳۱/۲۳	— ۱۱۷۹/۴۲ ۱۴۸۰/۳۵	–۱۰۷۰/۵۹ ۱۵۴۰/۵۶	–۱۷۹۴ ۲۶۱۱/۳	–۱۴۵۱/۱۶ ۲۰۵۰/۵۳

۶. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از پژوهش حاضر به شرح ذیل است.

بر اساس ارزیابی کیفی صورت‌گرفته به روش بوری از مصالح خانه‌های تاریخی مورد مطالعه شاخص کیفیت رفتاری دیوارهای خانه‌های تاریخی نفیسی، سرخه‌ای و کلانتر در حالت‌های مختلف بارگذاری اعم از بارگذاری قائم، خارج از صفحه و داخل صفحه به شرح زیر است .

- دیوارهای خانهٔ تاریخی نفیسی تحت بارگذاری قائم و خارج از صفحه با شاخص کیفیت بنایی به ترتیب ۴/۲۰ و ۳/۵ در دسته‌بندی «ب» با کیفیت رفتار متوسط و در بارگذاری داخل صفحه با شاخص کیفیت بنایی ۳/۸۵ در دست بندی «پ» با کیفیت رفتار ضعیف قرار داشت (جدول شماره ۵).
- دیوارهای خانهٔ تاریخی سرخه‌ای تحت بارگذاری قائم و خارج از صفحه با شاخص کیفیت بنایی به ترتیب ۳/۸۵ و ۳/۵ در دسته‌بندی «ب» با کیفیت رفتار متوسط و در بارگذاری داخل صفحه با شاخص کیفیت بنایی ۳/۸۵ در دست بندی «پ» با کیفیت رفتار ضعیف قرار داشت (جدول شماره ۷).
- دیوارهای خانهٔ تاریخی کلانتر تحت بارگذاری قائم و خارج از صفحه با شاخص کیفیت بنایی به ترتیب ۵/۲۵ و ۴/۵۵ در دسته‌بندی «ب» با کیفیت رفتار متوسط و در بارگذاری داخل صفحه با شاخص کیفیت بنایی ۵/۶۰ در دسته‌بندی «الف» با کیفیت رفتار خوب قرار داشت (جدول شماره ۹).
- مشخصات مکانیکی مصالح به‌کاررفته در بنای‌های تاریخی خانهٔ نفیسی، کلانتر و سرخه‌ای با استفاده از آزمایش‌های جک مسطح به‌دست آمد که حداقل و حداکثر مقاومت فشاری به ترتیب ۰/۵۳ مگاپاسگال مربوط به خانه سرخه‌ای و ۱/۶۸ مگاپاسگال مربوط به خانه کلانتر حاصل شد. همچنین حداقل و حداکثر مدول الاستیسیته نیز به ترتیب بین ۱۱۷۹ مگاپاسگال مربوط به خانهٔ تاریخی سرخه‌ای و ۳/۲۶۱۱ مگاپاسگال مربوط به خانهٔ تاریخی کلانتر قرار داشت (جدول شماره ۱۱).
- مشخصات مکانیکی مصالح به‌کاررفته در خانهٔ مورد مطالعه با دو روش کمّی (آزمایش جک مسطح) و روش کیفی (طبق دستورالعمل پیشنهادشدهٔ بوری) مورد ارزیابی قرار گرفت، سپس مقادیر حاصل از دو روش مذکور باهم مقایسه گردید که نتایج حاصل حاکی از مغایرت مقادیر مقاومت فشاری و همخوانی نزدیک مقادیر مدول الاستیسیته باهم بودند (جدول شماره ۱۱). با توجه به نبود وجود آیین‌نامه‌های مرتبط با بناهای تاریخی در ایران در این پژوهش برای تخمین مشخصات مکانیکی مصالح بنای مورد مطالعه از فرمول پیشنهادشدهٔ بوری استفاده شد. این فرمول حاصل همبستگی بین مقادیر ارزیابی کیفی (MQI) صورت‌گرفته روی یازده تیپ بنای تاریخی مختص کشور ایتالیا (ترکیبی از بناهای سنگی و آجری) و مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه‌ای ایتالیا (IMIT2009) می‌باشد .
- با توجه به نتایج به‌دست‌آمده روش شاخص ارزیابی کیفی (MQI) روشی مناسب برای تعیین کیفیت رفتاری بناها در انواع بارگذاری‌هاست. لذا در صورت انجام تعداد آزمایش‌های بیشتر می‌توان با تشکیل همبستگی حاصل از مقادیر ارزیابی کیفی (MQI) روابطی منطبق با انواع تیپ‌های بنایی کشور ایران تنظیم کرد که بدون نیاز به انجام آزمایش‌های بیشتر می‌توان به‌صورت کیفی مشخصات مکانیکی را تخمین زد.

سپاسگزاری

این مقاله از پایان‌نامهٔ دوره کارشناسی ارشد رشتهٔ استحکام‌بخشی بناهای تاریخی مصوب و دفاع‌شده در دانشگاه هنر اسلامی تبریز استخراج شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه‌شان را از مسئولان پژوهشی دانشکدهٔ معماری و شهرسازی دانشگاه هنر اسلامی تبریز و هیئت داوران پایان‌نامه که ما را در انجام و ارتقای کیفی این پژوهش یاری دادند، اعلام کنند.

پی نوشت ها

1. Masonry Quality Index
2. Apparecchio murario aquilano

References

[1] Borri A, Corradi M, Castori G, De Maria A. A Method for the Analysis and Classification Of Historic Masonry. Bulletin of Earthquake Engineering. 2015;13(9): 2647-65.

[2] Pouraminian M, Hosseini M. Seismic Safety Evaluation of Tabriz Historical Citadel Using Finite Element and Simplified Kinematic Limit Analyses. Indian Journal of Science and Technology. 2014; 7(4):409.

masonry based on the flat jack. ,

[14] RILEM, LUM.D.3, In-situ strength/elasticity tests on masonry based on the flat-jack.

[15] Binda L, Tiraboschi C. Fiat-Jack Test: A slightly destructive technique for the diagnosis of brick and stone masonry structures/Flachpressenprüfung: Eine zerstörungsarme Methode zur Untersuchung von Ziegel-und Natursteinmauenverk. Restoration of Buildings and Monuments. 1999;5(5):449-72.

[16] Gregorczyk P, Lourenço PB. A review on flat-jack testing. 2000.

[17] Binda L, Saisi A, Tiraboschi C. Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. Construction and Building materials. 2000;14(4):199-233.

[18] Corradi M, Borri A, Vignoli A. Experimental study on the determination of strength of masonry walls. Construction and building materials. 2003;17(5):325-37.

[19] Fanale LG, Dante2 and Pietrucci, Antonio3. APPLICATION OF NONDESTRUCTIVE EVALUATION TEST METHOD FOR ITALIAN MASONRY: MASONRY QUALITY INDEX (MQI) METHOD. 2017.

[20] Rovero L, Alecci V, Mechelli J, Tonietti U, De Stefano M. Masonry walls with irregular texture of L'Aquila (Italy) seismic area: validation of a method for the evaluation of masonry quality. Materials and Structures. 2016;49(6):2297-314.

[21] gholami s, akhoundi F. Siesmic vulnerability assessment of selected historical houses of Qajar period of Tabriz city according to Italian Guidelines: tabriz islamic art university; 2022. [in Persian]
[غلامی سمیه، آخوندی فرهاد. ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای خانه‌های تاریخی منتخب دورهٔ قاجاریه شهر تبریز طبق دستورالعمل‌های حفاظتی ایتالیا. دانشگاه هنر اسلامی تبریز،۱۴۰۰.]

[3] Gajjar PN, Gabrielli E, Martin-Alarcon DC, Pereira JM, Lourenço PB, Colla C. An experimental and numerical contribution for understanding the in-situ shear behaviour of unreinforced masonry. Journal of Building Engineering. 2021;44:103389.

[4] Latinović M. Seismic evaluation of existing buildings according to document FEMA 310. САВРЕМЕНА ТЕОРИЈА И ПРАКСА У ГРАДИТЕЉСТВУ. 2018;13.(۱)

[5] Agency FEM. Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: A handbook: Government Printing Office; 2017.

[6] COVENIN. Edificaciones sismorresistentes, Norma COVENIN 1756-98. Comisión Venezolana de Normas Industriales, COVENIN, FONDONORMA, MINDUR y …; 1998.

[7] Arya AS. Earthquake resistant design of masonry buildings. Advances in Indian Earthquake Engineering and Seismology: Springer; 2018. p. 259-71.

[8] Instructions for improving the vibrations of masonry buildings (code 376). Deputy for strategic supervision of technical system affairs2013.[in Persian]
[دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های بنایی (کد۳۷۶). معاونت امور فنی دفتر امور فنی، تدوین معیارها، ۱۳۸۶.]

[9] Abdunur C, editor Stress and deformability in concrete and masonry. IABSE Symposium on Strengthening of Building Structures-Diagnostic and Therapy, Venice, Italy; 1983.

[10] Noland J, Atkinson R, Schuller M. A review of the flat-jack method for nondestructive evaluation. Proc Nondestructive evaluation of civil structures and materials, Boulder, USA. 1990.

[11] Standard A. C1196-91. situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flatjack measurements. 1991.

[12] Rilem T. RILEM recommendations for the testing and use of constructions materials. RC. 1994;6:218-20.

[13] RILEM, LUM.D.2, In-situ stress tests on