Journal of Athar

ISSN: 2538-1830 | Volume 45 | Issue 107 | Winter 2025

Study of Seismic Protection Technologies in Historical Wooden Structures

Afsane Samandi[1], Ali Zamanifard[1]

1. Ph.D Student in Restoration and Conservation of Historical Buildings and Urban Fabrics, Faculty of Conservation and Restoration, Iran University of Art, Tehran, Iran.
2. Associate Professor, Department of Restoration and Conservation of Historical Buildings and Urban Fabrics, Faculty of Conservation and Restoration, Iran University of Art, Tehran, Iran (Corresponding Author). ***Email:*** zamanifard@art.ac.ir

Article Info

Pp: 161-192

Original Article

Received: 2024/05/07
Revised: 2024/08/22
Accepted: 2024/08/26

https://dx.doi.org/10.22034/45.107.6

Use your device to scan and read the article online

Athar Journal
Journal of Cultural Heritage and Tourism Research Institute (RICHT), Tehran, Iran

Publisher:
Cultural Heritage and Tourism Research Institute (RICHT).

ABSTRACT

Abstract

This research, by reviewing historical buildings that use wood elements in their masonry structure with the aim of earthquake resistance, tries to find answers to the following questions:1-What kind of protection technology do the studied historical buildings use and what are their solutions against earthquakes?2-What are the systems of this technology, what are their characteristics and have they been used only for seismic retrofitting?3-What kind of technology are the examples of Iran and To what extent have they been successful in reducing earthquake damage and Are these systems still used in local architecture today? In this way, in the future research, focusing on the maintenance and development of these systems, it will help to protect the buildings in the future. The research identified and analyzed these systems with a library study, and the statistical population of this research focuses on the world-known systems and especially the local architecture of Iran, and the type of research is descriptive. Four identified earthquake-resistant technologies include foundation isolation, tie beam and timber bracing, and wooden framing. In these systems, wood is not exclusively used for seismic strengthening, and other factors have been effective in its selection.In Iran, there are also unique systems of the mentioned technologies that are considered successful examples against earthquakes, but today they forgotten .This study can be effective in creating the sensitivity of communities towards the protection of these systems by collecting local knowledge and creating a database of known historical systems of Iran and provide valuable insights about these local innovations in future research. Identifying and classifying these examples helps to understand traditional wooden construction systems and their potential for modern applications and it emphasizes the importance of integrating historical knowledge with modern architectural methods and their stability against earthquakes.

Keywords: Seismic Protection Technologie, Foundation Isolation, Timber Bracing, Wooden Framing, Tie Beam, Historical Building.

Copyright © 2023. This open-access journal is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the AttributionNonCommercial terms.

URL: https://athar.richt.ir/article-2-1681-en.html

How to Cite This Article:

Samandi, A. & Zamanifard, A., (2025). "Study of Seismic Protection Technologies in Historical Wooden Structures". *Athar*, 107(45):161-192. https://dx.doi.org/10.22034/45.107.6

Introduction

This research explores the use of wood in historical masonry buildings for seismic resistance. The objectives of this study are to identify various protection technologies used in historical wooden structures and assess their effectiveness in mitigating earthquake damage. The necessity of this research arises from the increasing frequency of seismic events and the potential loss of cultural heritage associated with the destruction of these structures.By examining unique systems developed, this study seeks to uncover forgotten technologies that have proven successful in the past. The study aims to create a comprehensive database of historical systems, fostering greater awareness and appreciation for the role of historical wooden structures in contemporary architecture.This research is not only significant for preserving cultural heritage but also for informing modern architectural practices that prioritize sustainability and resilience.

Materials and Methods: The research employs a descriptive methodology, utilizing a library study reviews literature from the past 25 years on traditional, earthquake-resistant buildings using wood. The statistical population includes historical buildings that incorporate wooden elements in their foundations, walls, and roofs, which are essential for earthquake resistance. This studyIt focuses on analyzing 42 case studies of wooden systems with seismic protection technology in earthquake-prone areas worldwide and ,particularly those found in Iran.

Data: Wood has been one of the earliest and most abundant natural materials used in construction worldwide.Archaeological evidence shows wooden houses dating back to 4200BCE in Iran(zomorshidi,1381) and ancient wooden structural elements in places like Knossos and Herculaneum, including rare multi-story wooden frame buildings(Dutu et.al.,2012).Medieval wooden structures discovered in Pertikara reveal sophisticated geometric designs and represent an important stage in the evolution of timber construction knowledge(Ruggieri et.al.,2013).Timber framing with brick infill first appeared in 8th-century Turkey and remains common in earthquake-prone and culturally significant regions, including parts of Europe(Dutu et.al.,2012).

During earthquakes, buildings experience vertical, horizontal, and torsional forces.Horizontal forces mainly cause shaking and damage, while vertical forces affect heavy structural parts(Carazas,Rivero,2010). Key qualities for earthquake resistance include flexibility, deformability, and strength-allowing buildings to withstand large deformations without collapse(Szakats,2007).

Building geometry is critical for seismic stability; simple, symmetrical plans with minimal projections perform better. Structural elements must be well-connected to act integrally during shaking. Quality construction and the use of lightweight materials like wood and bamboo significantly enhance resilience.

Wood’s high tensile strength along fibers and light weight make it valuable for seismic resistance, especially in elevated parts, connections, and roofs. However, wood alone is vulnerable to seismic loads and is often combined with masonry and used in framed connections and wooden ties, which remain key in strengthening historic buildings against earthquakes(tabeshpor,farhangfar,2005).

Wooden structures are effective in earthquake resistance due to their high tensile strength, light weight, and flexibility. However, wood alone is vulnerable to seismic loads(Olivier Moles,2006). Common seismic solutions include wooden base isolation (which reduces seismic demand by decoupling the structure from

ground motion, lowering energy transfer and keeping buildings mostly elastic during quakes), vertical and horizontal wooden ties, and light wooden frames, which improve structural integrity and distribute seismic forces, enhancing the resilience of masonry buildings.

Discussion

The seismic protection technologies can be categorized into four main types:1)foundation isolation,2) wooden framing,3) Tie beam, and 4Timber bracing. wooden frames, both regular and irregular, use various bracing shapes and are constructed with different infill materials such as stone, brick, adobe, plaster, wood, or bamboo, sometimes as single or double layers. Some frames are even without infill(open porches)or feature intricate decorations like stained glass and latticework(Figure11,12)

These systems are found in different structural locations:throughout the entire building(e.g., Quchan shelters,Darvarchin system),foundations(e.g.,Eskati,Shikili),exterior walls(most examples),sometimes interior walls(Pombalinos),around openings(Tak system),and roofs (Romanian,TaleBast).The critical factor is the system's integration from foundation to roof, ensuring structural unity(Figure13).

Wood connections are mainly done by palate and tongue joints, natural fibers and ropes, or nailing. These systems were not developed solely for seismic resistance but also due to material availability, functional needs, aesthetics, construction speed, lateral force control during construction, compression force management, ventilation, and comfort. Overall, their effectiveness can be grouped into structural, decorative, functional, and other categories(Table 5).

In Iran, all four historical seismic protection technologies have been used. For example, wooden base isolation in Shikili foundations is a notable historic example recognized globally. Except for pigeon towers and lattice windows(orosi or sash),these systems were directly aimed at earthquake resistance and were primarily built in highly seismic cities like Rudbar,Quchan, and Tabriz.They showed minimal damage compared to adjacent buildings without such technologies.

Today, except for some tie beam and occasionally wooden foundations,other seismic protection technologies like wooden frames and Darvarchin walls are fading in Iranian vernacular architecture(Figure14,15).

Conclusion

Masonry buildings have low earthquake resistance due to their poor tensile strength, limited ductility, weak connections between components, and heavy mass. Earthquake damage to these structures can manifest as bending, twisting, cracking, sagging, and in the worst cases, collapse and destruction. The mentioned structural systems, when incorporating wood within their framework, demonstrate adaptability and flexibility. This integration of wood not only reduces the building's weight but also enhances its strength, depending on the type of wood used and the connection details.

Historical examples show that these systems have effectively provided seismic resistance over long periods. Key factors influencing the earthquake resilience of wooden systems include the choice of wood species, its age and condition (avoiding decay), the quality of wood connections and integration with infill

materials, climate and environmental conditions (such as moisture protection), proper construction methods, and structural dimensions like height and cross-sectional area.

The four technologies discussed have been implemented worldwide in different regions using varied methods but share common fundamental principles. Iran, being an earthquake-prone country, has historically utilized these technologies in its traditional and vernacular architecture, with successful seismic performance. Studying these systems offers valuable insights into local innovations and their potential application in contemporary society.

This is especially important since global studies aimed at reviving these systems for modern architecture have produced positive seismic results. However, in Iran, these wooden technologies remain largely unknown or have not been modernized for current use. Future research could focus on testing these wooden systems in Iran, providing quantitative data to validate their effectiveness. Additionally, it could promote designs based on indigenous wooden systems while adhering to conservation principles and regulations.

Acknowledgments

We would like to thank the reviewers for their insightful comments and valuable suggestions, which greatly improved our article. We also appreciate everyone who provided feedback and support during the preparation of this work.

Observation Contribution

This research observes and analyzes historical wooden structures' seismic protection technologies, highlighting their effectiveness, characteristics, and relevance in modern architecture, while advocating for the preservation of traditional methods and raising awareness about their potential in reducing earthquake damage.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest in the conduct of this research.

مجلهٔ علمی اثر
شاپا: ۲۵۳۸-۱۸۳۰، دوره ۴۵ | شماره ۱۰۷ | زمستان ۱۴۰۳

مقالهٔ پژوهشی

بررسی فناوری‌های حفاظت لرزه‌ای در ساختارهای چوبی تاریخی

افسانه سمندی[۱]، علی زمانی‌فرد[۲]

۱. دانشجوی دکتری مرمت و احیای بناها و بافت‌های تاریخی، گروه مرمت و احیای بناها و بافت‌های تاریخی، دانشکدهٔ حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر ایران، تهران، ایران.
۲. دانشیار گروه مرمت و احیای بناها و بافت‌های تاریخی، دانشکدهٔ حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر ایران، تهران، ایران (نویسندهٔ مسئول).
Email: zamanifard@art.ac.ir

اطلاعات مقاله

صفحات: ۱۹۲-۱۶۱
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵

https://dx.doi.org/10.22034/45.107.6

فصلنامهٔ اثر
نشریهٔ پژوهشکدهٔ ابنیه و بافت‌های تاریخی، پژوهشگاه میراث‌فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران

ناشر:
پژوهشگاه میراث‌فرهنگی و گردشگری

خلاصه

این پژوهش با مرور و مطالعه بر ساختمان‌های تاریخی که در ساختار بنایی خود با هدف مقاوم‌سازی در برابر زلزله از عنصر چوب در پی، جرز و پوشش‌ها بهره جستند، در پی یافتن پاسخ به پرسش‌های زیر است: ۱. ساختمان‌های تاریخی نمونه از چه فناوری حفاظتی استفاده کرده و چه تمهیداتی در برابر زلزله دارند؟ ۲. سیستم‌های این فناوری چیست، چه ویژگی‌هایی دارد و آیا کاربردی صرفاً مقاوم‌سازی داشته‌اند؟ ۳. نمونه‌های ایران از چه نوع فناوری هستند و تا چه میزان در کاهش خسارات زلزله موفق بوده‌اند و آیا امروزه نیز از این سیستم‌ها در معماری بومی استفاده می‌شود؟ تا بدین‌طریق بتواند در پژوهش‌های آتی با محوریت حفظ و توسعه این سیستم‌ها در آینده به حفاظت لرزه‌ای ساختمان‌ها کمک کند. پژوهش حاضر با مطالعهٔ کتابخانه‌ای به شناسایی این سیستم‌ها پرداخته و جامعهٔ آماری پژوهش بر سیستم‌های شناخته شدهٔ جهانی و به‌طور ویژه معماری بومی ایران تمرکز دارد و نوع تحقیق آن توصیفی است. چهار فناوری شناسایی شده مقاوم لرزه‌ای شامل جداسازی پایه، کلاف‌های افقی و عمودی و قاب چوبی هستند. چوب در این سیستم‌ها منحصراً کارایی مقاوم‌سازی نداشته و عوامل دیگری در انتخاب آن اثرگذار بوده‌اند. در ایران نیز سیستم‌های منحصر به فردی از فناوری‌های مذکور وجود دارد که در مقایسه با ساختمان‌های اطرافشان که فاقد این فناوری بوده‌اند، در برابر زلزلهٔ نمونه‌های موفقی محسوب می‌شوند؛ اما امروزه ناشناخته مانده و روبه فراموشی هستند. این مطالعه می‌تواند با جمع‌آوری دانش بومی و ایجاد یک پایگاه اطلاعاتی از سیستم‌های شناخته شده تاریخی ایران در ایجاد حساسیت جوامع نسبت به حفاظت این سیستم‌ها مؤثر واقع شود و در پژوهش‌های آتی بینش‌های ارزشمندی را درمورد این نوآوری‌های محلی ارائه دهد. شناسایی و طبقه‌بندی این نمونه‌ها به درک سیستم‌های سنتی ساخت‌وساز چوبی و پتانسیل آن‌ها برای کاربردهای مدرن کمک می‌کند و بر اهمیت ادغام دانش تاریخی با شیوه‌های معماری امروزی، بر پایداری آن‌ها در برابر زمین‌لرزه تأکید دارد.

کلید واژه‌ها: فناوری حفاظت لرزه‌ای، کلاف چوبی، قاب چوبی، جداساز چوبی، بنای تاریخی.

حق کپی رایت انتشار: این نشریه دارای دسترسی باز، تحت قوانین گواهینامه بین‌المللی Creative Commons Attribution 4.0 International License منتشر می‌شود که اجازه اشتراک (تکثیر و بازآرایی محتوا به هر شکل) و انطباق (بازترکیب، تغییر شکل و بازسازی براساس محتوا) را می‌دهد.

URL: https://athar.richt.ir/article-2-1681-fa.html

سمندی، افسانه؛ و زمانی‌فرد، علی، (۱۴۰۳). «بررسی فناوری‌های حفاظت لرزه‌ای در ساختارهای چوبی تاریخی». *اثر*، ۱۰۷ (۴۵): ۱۹۲-۱۶۱. https://dx.doi.org/10.22034/45.107.6

مقدمه

برخلاف پیشرفت‌های شگرف دانش بشری در دورهٔ معاصر که طی آن به بسیاری از پرسش‌های علمی دوران‌های گذشته پاسخ داده شده، همچنان خلأهای دانشی زیادی در حوزهٔ مهندسی زلزله باقی است. بدین سبب زلزله همچنان موقعیت خود را در ردیف عوامل خطرآفرینی که در سراسر جهان موجب تلفات فراوان می‌شوند، حفظ کرده است؛ اما در تلاش برای تقلیل و تخفیف بحران‌های ناشی از این سانحه طبیعی، پژوهشگران می‌کوشند آگاهی‌های خود را با انجام مطالعات نظام‌مند و گسترده، ازجمله تحلیل واقعیت‌ها و پیامدهای مربوط به زمین لرزه‌های گذشته افزایش دهند (برگی، ١٣٨٨).

تجارب اندک کسب شده در زلزله‌های پیشین در سراسر جهان نشان داده است که بسیاری از ساختمان‌های مهندسی دارای مقاومت اساسی در برابر نیروهای زلزله نیستند؛ اما برخی ساختمان‌های تاریخی با پیروی از اصول ساده و کم هزینه از آسیب‌های زلزله در امان مانده‌اند. اجرای این قوانین ساده در امر مرمت ساختمان‌های در معرض خطر و یا ساختمان‌های دردست ساخت، رفع همه آسیب‌های بزرگ و کوچک زلزله را تضمین نمی‌کند، ولیکن تا حدودی از آسیب‌ها و تهدیدات جلوگیری می‌نماید (Arya et al., 2004).

رویکرد استفاده از چوب، حاصل تفکر خلاق معماران بومی جهت پیش‌نهادن راه‌حلی برای برطرف نمودن ضعف‌های ساختمان‌سازی رایج آن زمان بود. به‌ظن قوی، معماران سنتی با بررسی ساختمان‌های بازمانده از زلزله دریافته بودندکه[به عنوان مثال] کلاف‌کشی چوبی با ویژگی‌های استاتیکی خاصش می‌تواند تکنیکی مناسب برای بهبود عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌ها باشد. کاهش نیروی زلزله از طریق کاهش وزن ساختمان و افزایش ضریب رفتار از سوی مصالح چوبی، از مزیت‌های این انتخاب بود (کبیرصابر، ١٣٩٢).

این پژوهش با مروری بر ساختمان‌های تاریخی که در ساختار بنایی خود با هدف مقاوم‌سازی در برابر زلزله از عنصر چوب در پی، جرز و پوشش‌ها بهره جستند و شناسایی فناوری حفاظت لرزه‌ای به کاربرده شده در آن‌ها، به یک طبقه‌بندی از فناوری‌های حفاظتی چوبی در ساختمان‌های تاریخی می‌رسد و تمهیدات آن‌ها را شرح می‌دهد. سپس به معرفی سیستم‌های موجود این فناوری در جهان و ایران پرداخته و ویژگی‌های سیستم را بیان می‌کند. در نهایت تحلیلی بر نمونه‌ها با تمرکز بر سیستم های ایران و میزان موفقیت آن‌ها در برابر زلزله و همچنین نگاهی بر پایداری کاربری آن‌ها در معماری بومی امروزی دارد. هدف از این پژوهش جمع‌آوری دانش معماران سنتی بومی و ایجاد یک پایگاه اطلاعاتی از سیستم‌های شناخته شده تاریخی است که می‌تواند در پژوهش‌های آتی، خصوصاً با تمرکز بر نمونه‌های ایران منجر به اتخاذ روش‌های کاهش بلایای لرزه‌ای با بهبود سیستم‌ها، در طراحی معماری بومی و هم‌چنین حفاظت و انتقال آن‌ها به نسل‌های آینده شود، که در ارتقای پایداری فیزیکی ساختمان‌ها در مناطق زلزله خیز ضروری می‌نماید.

این تحقیق به مطالعه مقالات و کتب نگاشته شده طی ٢٥ سال اخیر با عنوان ساختمان‌های بومی و سنتی مقاوم در برابر زلزله که در ساختارشان از چوب استفاده کرده‌اند، پرداخته است و پژوهش حاضر از نوع توصیفی می‌باشد که جامعه آماری آن متمرکز بر بررسی ٤٢ نمونه سیستم‌های چوبی با فناوری حفاظت در برابر زمین لرزه در مناطق زلزله‌خیز ایران و جهان است.

استفاده از ساختار چوب در معماری

چوب یکی از اولین موادی است که به‌طور طبیعی و فراوان در دسترس بشر قرار داشته است. آثار باقیمانده از زمان‌های دور، نشان می‌دهد بشر از چوب در ساختن خانه استفاده کرده‌است. در ایران نقشی به‌جای مانده از ٤٢٠٠ سال پ.م در شوش کلبه‌ای چوبی را نشان می‌دهد (زمرشیدی، ١٣٨١). در جهان نیز استفاده از چوب در ساختمان، حداقل به دوران باستان برمی‌گردد. کاخ‌هایی درکنوسوس[1] شناسایی شده‌اند که دارای عناصر سازه‌ای چوبی هستند. در شهر بندری هرکولانیوم[2] روم باستان نیز یک خانه نیمه چوبی دو طبقه را کشف کرده‌اند، نمونه‌ای از آنچه ویتروویوس آن را اوپوس‌کراتیسم[3] نامیده است. سیستم چوبی کشف شده در این مکان ممکن است تنها نمونه باقی مانده از فرم ساخت‌وساز در روم باستان برای آپارتمان‌های هفت یا هشت طبقه باشد(شکل ١). (Dutu et al., 2012).

شکل ١. خانه‌ای با سیستم کراتی در هرکولانیوم (Langenbach, 2008)

Fig. 1. Infill-frame house unearthed in the archaeological site of Herculaneum, Italy (Langenbach, 2008)

آثار باستانی قرون وسطایی که در مزارع پرتیکارا[4] کشف شده است ویژگی‌های هندسی مشابهی را نشان می‌دهد و آن‌ها نماینده خانه/معبد با ساختار چوبی هستند. مدل‌های دست‌ساز با یک جعبه کوچک مستطیلی، یک سقف پیچیده و پایه با استفاده از چهار پشتیبان در چهارگوشه مشخص می‌شوند. قسمت فوقانی این مدل‌ها با عناصر زومورفیک (حیوان ریخت‌نگار)[5] مشخص می‌شود و خود اثر رنگ شده است. آثار پرتیکارا یک تولید واقع‌گرایانه از یک سیستم چوبی را نشان می‌دهد و همچنین شواهدی از توصیف ویژگی‌های یک خانه تاریخی است. لازم به ذکر است که آن‌ها یک مرحله مهم در تکامل دانش علمی ساختمان‌های چوبی در طول تمدن قرون وسطایی هستند.این سیستم چوبی توسط سنگ وگل و گاها با پوشش گچ پرشده‌اند (شکل ٢). (Ruggieri et al., 2013).

1. Knossos
2. Herculaneum
3. Opus Craticium
4. Guardia Perticara
5. zoomorphism

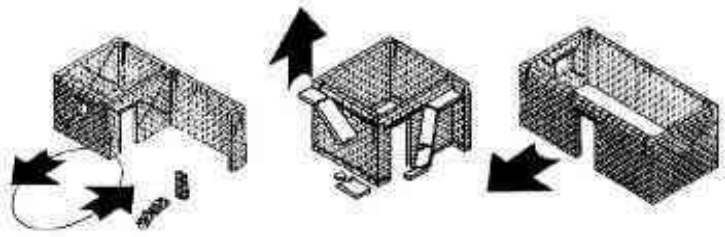
شکل ٢ : آثار باستانی کشف شده با ویژگی‌های قاب چوبی (Ruggieri et al., 2013)

Fig. 2. Discovered artifacts with wooden frame features (Ruggieri et al.,2013)

ساخت‌وساز قاب چوبی با آجر پرشده، برای اولین بار در قرن هشتم میلادی در ترکیه ظاهر شد. امروزه نیز در معماری بومی، سیستم قاب چوبی در مناطق زلزله‌خیز و خارج از مناطق به دلایل فرهنگی و اقتصادی، از جمله اروپا رواج یافته است (Dutu et al., 2012).

اثرات زلزله بر ساختمان

هنگامی‌که یک زلزله اتفاق می‌افتد، یک خانه توسط نوسان عمودی، نیروهای افقی و پیچشی، در همان زمان تکان داده می‌شود. یک خانه با توجه به مشخصات خود به آن پاسخ خواهد داد: نظیر شکل و نوع مواد به کار رفته در ساخت آن. نیرو افقی سبب لرزش، تغییر شکل و تخریب می‌شود؛ اما اثرات نیروی عمودی حداقل است، تنها قسمت‌های سنگین مانند قوس‌ها، ستون‌ها، سازه‌های سقف، و نیز قسمت‌هایی مانند بالکن آسیب خواهند دید. نوسان پیچشی که از حرکات افقی زمین همراه با نیروهای جانبی حاصل می‌شود، باتوجه به شکل ساختمان، بیشتر یا کمتراهمیت دارد (شکل ٣) (Carazas Aedo and Rivero Olmos,2010)



شکل ٣. تأثیرات مختلف زلزله بر ساختمان (Olivier Moles,2006)

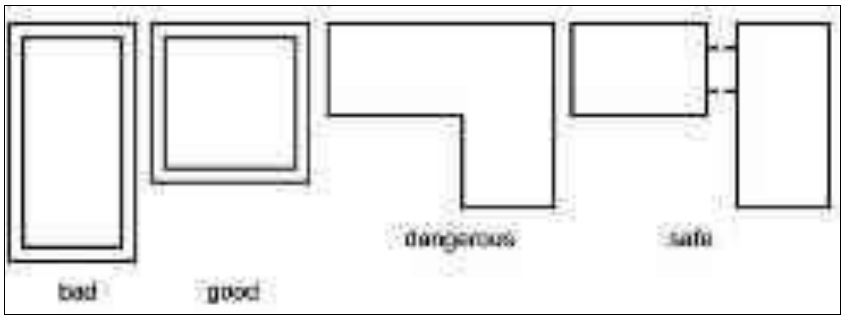
Fig. 3. Different effects of earthquake on buildings (Olivier Moles,2006)

انعطاف‌پذیری و تغییر شکل‌پذیری، مفاهیم مرتبط بهم هستند که توانایی یک ساختار را برای حفظ تغییر شکل‌های بزرگ دارند. انعطاف‌پذیری به توانایی جابه‌جایی یک ساختمان پیش از جابه‌جایی یا سقوط نهایی در اثر زلزله اشاره دارد. بعضی از مواد ذاتاً انعطاف‌پذیر هستند و بعضی مواد غیرقابل‌انعطاف؛ مانند مصالح بنایی سنتی که می‌توانند با موادی دیگر تقویت شوند. مواد تقویت‌شده مورد استفاده باید در کلیت با اجزای دیگر متناسب عمل کنند. تغییرشکل‌پذیری اصطلاحی است که به میزان توانایی یک ساختار در تغییر فرم بدون فروپاشی و تخریب آن می‌پردازد. انعطاف‌پذیری اصطلاحی است که به هر دو ماده و ساختار اعمال می‌شود، درحالی‌که شکل‌پذیری فقط برای ساختارها قابل استفاده است. استحکام نیز به توانایی یک ساختار در برابر هرگونه فروپاشی جزئی یا کلی، دربرابر علل و عوامل آسیب رسان از جمله زلزله اشاره دارد و یک کیفیت مطلوب برای ساخت‌وساز است

(Szakats, 2007). در یک تحلیل کلی، قابلیت انعطاف پذیری، تغییرشکل پذیری و استحکام از عملکرد مطلوب مقاومت در برابر زلزله می‌باشند.

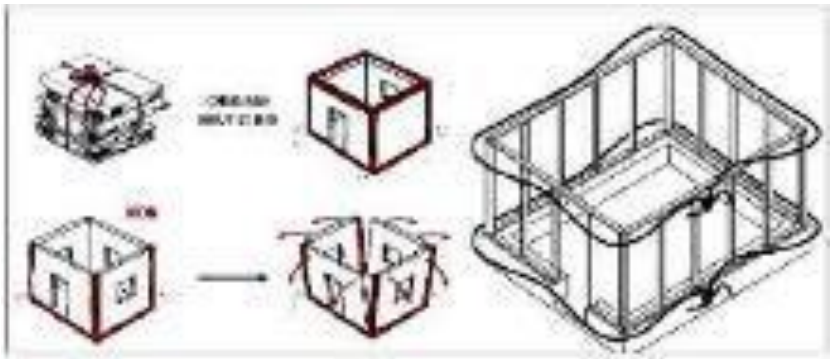
فاکتورهای مؤثر در مقاوم‌سازی بناها در برابر زلزله

شکل هندسی یک ساختمان مهم‌ترین عامل در پایداری آن در مقابل زمین لرزه با حرکات شدید است. نمونه‌های متعددی از انهدام یا خسارات عمده در ساختمان‌ها وجود دارد که ناشی از عدم رعایت اصول شکل هندسی در طراحی سازه‌ها و ساختمان‌ها باشد. آثار تاریخی که دارای پلان به شکل ساده و متقارن در دو امتداد عمود برهم و بدون پیش‌آمدگی و پس‌رفتگی زیاد بوده و تغییرات نامتقارن پلان در ارتفاع نیز کم است، ساختمان‌های مقاوم‌تری هستند (شکل ٤). همچنین کلیه عناصر باربر ساختمان بایستی بنحو مناسبی بهم پیوسته باشند تا در هنگام زلزله عناصر مختلف از یکدیگر جدا نشده و ساختمان به‌طور یکپارچه عمل کند. در این راستا در ساختمان‌های تاریخی علاوه‌بر کلاف‌بندی ساختمان با مصالح مناسب و تأمین یکپارچگی دیوارها، بایستی سقف نیز با مصالح مناسب و بنحوی ساخته شود که در برابر نیروهای زلزله اولا از تکیه گاه خود جدا نشود، ثانیا انسجام و استحکام خود را حفظ نماید(شکل ٥).از فاکتورهای کلیدی دیگر، کیفیت اجرا و ساخت بنا می باشد، استفاده از مصالح بنایی در ترکیب با عناصر ثانویه [مانند چوب] تاثیرات بسیار زیادی را در استحکام بناها دارند؛ هم‌چنین استفاده از مصالح سبک [نظیر چوب، بامبو و....] حایز اهمیت است (تابش‌پور و فرهنگ‌فر، ١٣٨٥).



شکل ٤. تأثیر شکل پلان در زلزله (Minke, 2001)

Fig. 4. Effect of plan shape on earthquake (Minke, 2001)



شکل ٥. تأثیر یکپارچگی و پیوستگی اعضا ساختمان در زلزله (Minke, 2001).

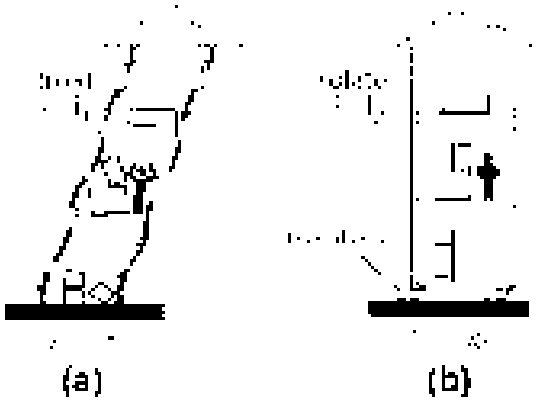
Fig. 5. The effect of the integrity of building members in an earthquak (Mink, 2001)

ساختارهای چوبی مقاوم در برابر زلزله

امروزه از راهکارهای متفاوت مقاوم‌سازی ساختمان‌های بنایی براساس اهمیت و توجیه اقتصادی و همچنین نوع منطقه و زلزله‌خیزی آن منطقه همچون: شبکه فولادی و شاتکریت، پشتبند بتنی، FRP، الیاف پلیمری و.... استفاده می‌شود. در ساختمان‌های تاریخی یکی از عناصر مهمی که در جهت مقابله با زلزله استفاده شده، چوب است. مقاومت کششی چوب در جهت الیاف بسیار خوب که تحت انعطاف‌پذیری قرار می‌گیرد. عنصری نسبتاً سبک است. به علت حساسیت به رطوبت و آب، باید به‌درستی استفاده گردد؛ بنابراین استفاده از آن در نزدیکی زمین باید با دقت زیادی انجام شود. بهتر است در ارتفاعات و برای اتصالات و سقف و دهانه استفاده شود. چوب همچنین قدرت فشاری خوبی نیز دارد. ولیکن ساختار چوبی به تنهایی دارای ضعف در برابر بارهای لرزه‌ای است. یکی از شیوه‌هایی که از چوب جهت مقاومت در برابر زلزله استفاده می‌شد، اتصالات قابی و ترکیب آن با مصالح بنایی است. همچنین کلاف‌های چوبی، رایج‌ترین نوع استفاده از چوب در مقاوم‌سازی بناهای‌تاریخی هستند (Olivier Moles, 2006). در ادامه به سه فناوری رایج که با ساختار چوبی خود در برابر زلزله مقاوم هستند، پرداخته می‌شود:

- فناوری جداسازی پایه چوبی

ایدهٔ اصلی فناوری جداسازی لرزه‌ای به‌جای افزایش ظرفیت لرزه‌ای سازه، بر مبنای کاهش نیاز لرزه‌ای قرار دارد (زهرائی و دیگران، ١٣٩٠). یعنی با افزایش قابل‌ملاحظه پریود ارتعاشی غالب زمین لرزه، سبب کاهش انتقال انرژی دینامیکی ناشی از آن می‌شود. در این صورت انرژی منتقل شده به سازه به‌شدت کاهش می‌یابد. این کار به‌وسیله سیستم‌های جداساز صورت می‌گیرد (زریبافیان، ١٣٨٥). سیستم جداساز، با سختی افقی پایینی که بین سازه و پی ایجاد می‌کند، ساختمان یا سازه را از مولفه‌های افقی حرکت زمین جدا می‌سازد. استفاده صحیح از این فناوری سبب بهبود رفتار سازه‌ها شده و آن‌ها را حتی در حین لرزه‌های بزرگ، عمدتاً در محدوده ارتجاعی باقی نگه می‌دارد (زهرائی و دیگران، ١٣٩٠). از جداسازها می‌توان در تراز سقف یا پی و یا یک جز منفرد استفاده کرد. چنانچه این جداسازها در تراز پایه ساختمان استفاده شود به آن‌ها جداساز پایه می‌گویند. (شکل ٦). برای ایجاد جداسازی پایه معمولا نیاز به یک پی گسترده زیر کل بنا می‌باشد (زریبافیان، ١٣٨٥).

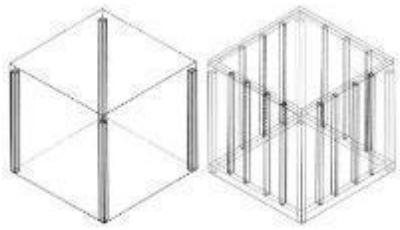


شکل ٦. استفاده از جداساز پایه‌ای در ساختمان (Ugalde et al., 2019)

Fig. 6. Using a base isolator in a building(Ugalde et al., 2019)

- کلاف‌های عمودی و افقی چوبی

همان‌طورکه بیان شد، در سازه‌های بنایی، یکی از مهم‌ترین عوامل خرابی در حین زلزله، عدم‌پیوستگی اجزای این نوع از سازه‌ها، به یکدیگر می‌باشد. در واقع در یک سازه بنایی تمامی اتصالات بین اجزا مختلف اعم از اتصال دیوار به پی و اتصال سقف به دیوار، با چسبندگی و البته اصطکاک بین مواد صورت می‌گیرد. در این نوع از اتصال، در ابتدا چسبندگی بیشترین بار را تحمل می‌کند و بعد از گسستن چسبندگی، اصطکاک تمام بار را بر دوش خواهد کشید. اگر اصطکاک نیز شکسته شود، آن‌گاه لغزش رخ خواهد داد که این لغزش می‌تواند عاملی مهم در خرابی این ساختمان‌ها باشد. در نتیجه سازه‌های بنایی نیاز به وجود عناصری است که این اتصالات را به‌خوبی برقرار کنند. کلاف‌ها عناصری هستند که دورتادور ساختمان بنایی را احاطه می‌کنند و در ارتفاع‌های مختلف بین دیوارها جاسازی می‌شوند. در نتیجه این عناصر اتصال محکم‌تری بین دیوارهای متقاطع و بین دیوار و سقف برقرار می‌کنند و می‌توانند قابلیت انبساط و شکل‌پذیری را در مصالح ایجاد کنند. هم چنین این سیستم هم با تقسیم دیوار خنثی به چند سطحی که در هنگام زلزله به‌طور مستقل عمل می‌کنند، نیروهای زلزله را پخش می‌کند و هم مقاومت سازه را در برابر خمش افزایش می‌دهد و در نتیجه یکی از ضروری‌ترین عناصر ایجاد کننده مقاومت لرزه‌ای برای سازه‌های باربر بنایی است. برای این‌که گوشه‌های کلاف توانایی انتقال گشتاور نیروهای زلزله را داشته باشند، باید در این نقاط به خوبی ثابت شده باشند. به‌علاوه چنانچه کلاف‌بندی در گوشه‌ها تا روی دیوارهای پشت‌بند ادامه یابد، مقاومت بنا در برابر زلزله بیشتر می‌شود. کلاف‌ها به دو شکل رایج افقی و عمودی وجود دارند. اتصال کلاف‌ها به این صورت است که اگر سازه بنایی دارای عناصر تقویتی عمودی داخلی باشد، این عناصر از پایین به پی و در طول مسیر خود در بالا به کلاف‌های افقی متصل می‌شوند (Minke, 2001). در واقع این کلاف‌ها به اتصال دیوارها به پی کمک می‌کنند و نیروهای خمشی و برشی را مهار می‌کنند. کلاف‌های عمودی باید در محل تقاطع دیوارها تعبیه گردند. درصورتی‌که طول دیوار بین دو کلاف بیش از ۵ متر باشد باید کلاف‌های قائم با توزیع یکنواخت در فواصل کمتر از ۵ متر در دیوار تعبیه شوند (شکل۷) (مظلوم، ۱۳۸۹).

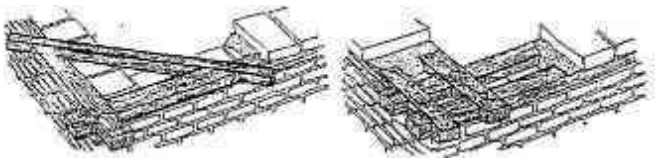


شکل ۷. کلاف عمودی در دیوار (Carazas Aedo and Rivero Olmos, 2010)

Fig. 7. vertical tie in the wall (Carazas Aedo and Rivero Olmos, 2010)

و اگر سازه فاقد عناصر تقویتی عمودی باشد، کلاف‌های افقی با ملاتی با چسبندگی بالا در ارتفاع تکرار می‌شوند (Minke, 2001).

در کلیه دیوارهای سازه‌ای ساختمان‌های ساخته شده با مصالح بنایی، اعم از یک طبقه و دو طبقه و اعم از آجری، خشتی و سنگی، کلاف‌های افقی استقرار می‌یابند (مظلوم، ۱۳۸۹). کلاف‌های افقی به انتقال نیروهای خمشی و برشی در دیوارهای متقاطع به دیوارهای برشی کمک کرده و به‌علاوه باعث جلوگیری از تنش‌های برشی بین دیوارهای مجاور و گسترش ترک می‌شوند (شکل ۸)



شکل ۸. کلاف‌های چوبی افقی ("Guidelines for Earthquake," 1980)

Fig. 8. tie beam ("Guidelines for Earthquake," 1980)

- قاب چوبی

ساختمان‌های با قاب سبک چوبی عملکرد بسیار مناسبی در برابر زلزله‌های گذشته از خود نشان داده‌اند، به‌گونه‌ای‌که ساخت‌وساز این ساختمان‌ها برروی گسل‌های زلزله و مناطق زلزله‌خیز کشورهای صنعتی جهان به سرعت درحال افزایش است. مقاومت بالای این سیستم ساختمانی در برابر زلزله به‌دلیل توزیع یکنواخت نیروهای جانبی باد و زمین‌لرزه در دیوارها و سقف، استحکام قاب دیوارها و هدایت لرزه‌ای آن‌ها، استحکام و پیوستگی عضوهای افقی مانند سقف و بام، اتصال داخلی و یکپارچگی تمام اجزای ساختمانی آن است. قاب‌بندی دیوارهای خارجی متشکل از اعضای مقاوم با اندازه مناسب جهت تحمل بارهای کف و بام است. قاب سبک چوبی در برابر توفان و زلزله هنگامی کامل می‌شود که پوشش چوبی دیوارهای خارجی، که به‌گونه‌ای برشی عمل می‌کند، به خوبی برروی لبه‌های بیرونی استادها، صفحه‌ها و پانل‌های سازه‌ای چوبی متصل شده باشد. چنین پوششی با مطابقت کامل با الزامات تولیدکننده در مورد اتصالات انجام می‌شود تا ساختار قابی صلب و در عین حال ارتجاعی را پدید آورد (گنجه‌ای، ۱۳۹۰).

دیوارها در این سیستم عملکرد سازه‌ای دارند و از موارد زیر تشکیل شده‌اند:

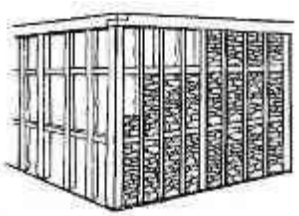
- المان‌های افقی (که در طبقه‌های بالاتر نقش محصورکننده برای اتصال دیوارها، و در طبقات پایینتر با سطح مقطع یکسان برای توزیع بار روی شالوده‌ها استفاده می‌شوند)

- عناصر عمودی (استادها)

-گاهاً مهاربندی‌های مورب (بادبند) که فقط در فشرده‌سازی مؤثر هستند و در کشش، معمولاً از قاب جدا می‌شوند. معمولاً مهاربندها به عناصر عمودی متصل می‌شوند.

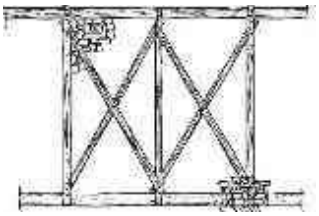
- پرکننده‌ها با آجر و مواد دیگر (شکل ۹) (Dutu et al., 2018).

در جایی‌که لازم است پوسته خارجی ساختمان اندود شود یا هنگامی‌که پوشش اریب مستقیم بر روی استادها اجرا می‌شود، دیوارهای خارجی باید به‌وسیله بادبندها (مهاربندی‌های مورب) مهار شوند. این بادبندها بر روی سطح خارجی دیوارها و بر روی استادها، صفحه‌ها و سراندازها با زاویه‌ای در حدود ٤٥ درجه متصل می‌شوند. (شکل ۱۰) (گنجه‌ای، ۱۳۹۰).



شکل ۹. اجزای دیوار قاب چوبی (Hueto Escobar et al., 2022)

Fig. 9.Components of a wooden frame wall (Hueto Escobar et al., 2022)



شکل ۱۰. نقش بادبند در قاب چوبی (Aloisio, 2020)

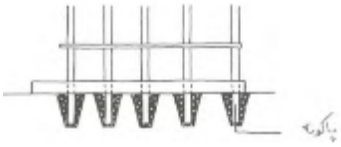
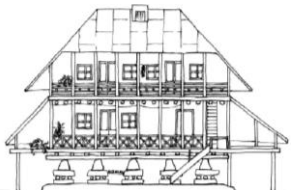
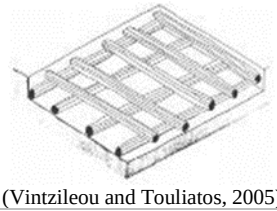
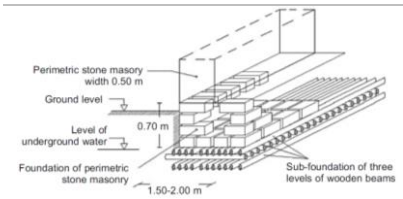
Fig. 10 .The role of bracing in a wooden frame (Aloisio, 2020)

معرفی سیستم‌های چوبی و تحلیل نمونه‌ها

جداول زیر به معرفی سیستم‌های چوبی که در ساختمان‌های تاریخی جهان با آن روبه رو هستیم و در آن‌ها از تمهیداتی جهت مقابله با زلزله استفاده شده‌است، پرداخته است. لازم به ذکر است امروزه نیز از برخی از این سیستم‌ها همواره استفاده می‌گردد.(جداول ١تا ٤)

جدول ١. معرفی سیستم‌های فناوری جداسازی پایه چوبی (نگارندگان، ١٤٠٣)

Table. 1: Introduction to wooden base separation technology systems (Authors,2024)

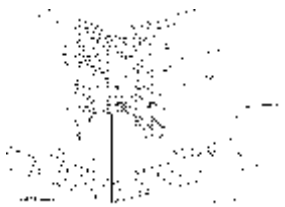
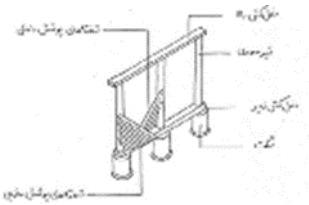
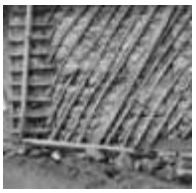
فناوری جداسازی لرزه‌ای				
سیستم	**موقعیت**	**ویژگی**	**کاربرد**	**تصویر**
پی چوبی پاکونه	شمال ایران	گودال به عمق ٨٠ سانتی‌متر و ابعاد ٣٠ ×٣٠ حفرشده و پایه چوبی کوتاه درون آن قرار داده و با خاک پر و خاک کوبیده می‌شود، سپس تیر افقی سرتاسری (نال) روی پایه‌ها قرار گرفته و ستون‌ها در امتداد پایه‌های درون خاک احداث می‌شود.  (اشتری‌ماجلان، ١٤٠٠)	مقاوم‌سازی	(اشتری‌ماجلان، ١٤٠٠)
پی چوبی شیکیلی (باج بنه)	شمال ایران	متشکل از سه قسمت بستر، نقاط تمرکز و تیرچوبی که نقاط تمرکز از پنج لایه اتصال چوبی تشکیل شده و تیرهای چوبی که عامل اتصال پی و کف ساختمان است از سه لایه چوبی تشکیل شده است.  (خاکپور، ١٣٩٠)	مقاوم‌سازی– تهویه و چرخش رطوبت – فضایی برای قرارگیری ماکیان	(گدار، ١٣٦٥)
پی چوبی شبکه‌ای	لفکادا، یونان	دو تا سه سطح تیرهای چوبی سرتاسری در زیر پی سنگی اصلی اجرا می‌شود و فضای بین تیرها با ماسه و ملات پر شده است.  (Vintzileou and Touliatos, 2005)	مقاوم‌سازی	 (Dutu et al., 2012)
تیرریزی زیر و بالای	ساختمان‌های کسبه الجزایر	قرار دادن چوب تقریباً دو متر طول افقی در کف، تکرار هر پنجاه سانتی‌متر در ارتفاع، در کنج‌ها نیز هشت‌وگیر شده است.	مقاوم‌سازی	

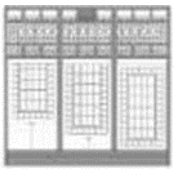
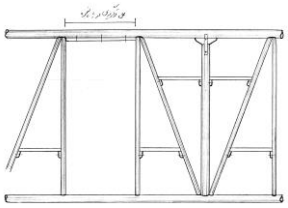
ستون و دیوار	(Benouar & Amina –Foufa, 2001)	(Carpani,2017)

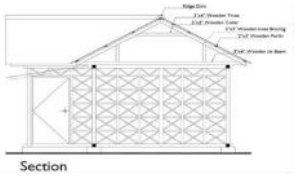
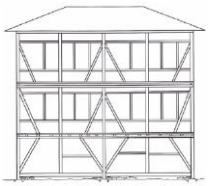
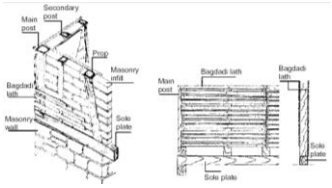
جدول ٢. معرفی سیستم‌های فناوری قاب چوبی (نگارندگان، ١٤٠٣)

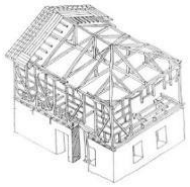
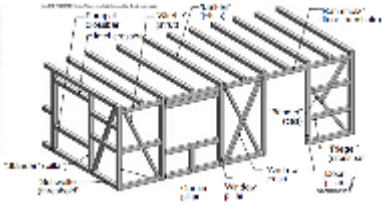
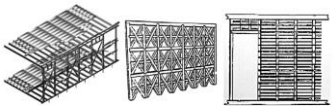
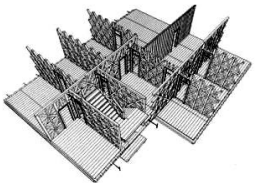
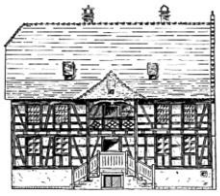
Table 2: Introduction to wooden frame technology systems (Authors, 2024)

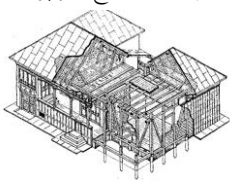
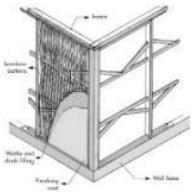
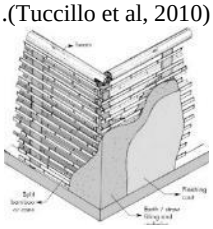
فناوری قاب چوبی (قاب چوبی ساده–تلفیق بادبند و قاب چوبی)

سیستم	موقعیت	ویژگی	کاربرد	تصویر
قاب چوبی ساده	ایران (فضاهای شهری گیلان)	سیستم قاب چوبی پر شده با آجر که معمولاً اندود نهایی دارند (خاکپور، ١٣٨٦).	مقاوم‌سازی	(خاکپور، ١٣٨٦)
قاب لارده	ایران (سوادکوه)	پس از اجرای کرسی‌چینی، یک قطعه چوب سرتاسری بر روی پایه‌ها به‌صورت شناژ می‌اندازند (نعل‌کشی) و پس از آن فضای خالی را با کاهگل پر می‌کنند و ماله می‌کشند. (فاتح و داریوش، ١٣٨٩)  (معقولی و احمدزاده، ١٣٩٥)	مقاوم‌سازی	(معقولی و احمدزاده، ١٣٩٥)
زگالی یا نفار	شمال ایران	قرار دادن چوب‌های عمودی و سپس افقی و مورب، و پرکردن آن با گل / گاهاً اندود نهایی گل دارند و ساختار چوبی قابل‌مشاهده نیست (گلابچی و جوانی دیزجی، ١٣٩٥).  (اشتری‌ماجلان، ١٤٠٠)	مقاوم‌سازی	 (چرختاب‌مقدم و حسینی، ١٣٩٥)

قاب ارسی‌خانه‌ها	ایران	در بعضی از بناها، درهای ارسی نقش قاب‌های چوبی سازه‌ای را دارند.  (Hosseini,2020)	مقاوم‌سازی- تزیینی- عملکردی	(خاکپور، ١٣٨٦)
بادبندهای عمودی درون قاب دیوار	ایران (خانه‌های تبریز)	اجرای بادبندهای متصل به قاب یا ستون و جرز اندود نهایی می‌شود.  (فخار تهرانی،١٣٨٥)	مقاوم‌سازی	(فخار تهرانی،١٣٨٥)
توفالی	شمال ایران	تخته چوب‌های منظم درون قاب اصلی، که فاصله آن‌ها معمولاً با گچ پر می‌شود (چرختاب‌مقدم و حسینی، ١٣٩٥).	مقاوم‌سازی	(چرختاب مقدم و حسینی، ١٣٩٥)
دارورچین (گامه- دار و دورگون-زگمه ای- ورجینی)	شمال ایران/	قرار دادن الوارهای‌چوبی بر روی هم و بالابردن پایداری آن‌ها در کنج دیوار با قفل و بست چوب‌ها که گاهاً بدون اندود است (گلابچی و جوانی‌دیزجی، ١٣٩٥) (کامران‌کسمایی و دیگران، ١٣٩٦)	مقاوم‌سازی	(مختاری و دیگران،١٣٩٨)
تله بست (اسکلت‌بندی چوبی)	ایران (برخی خانه‌های مازندران و تبریز)	سازه‌های قاب‌چوبی شامل چوب‌های عمودی و افقی در حدود یک متر و یا بیشتر است و سپس با تخته‌های جانبی پر می‌شود. (کبیرصابر،١٣٩٢)	مقاوم‌سازی	(کبیرصابر، ١٣٩٢)

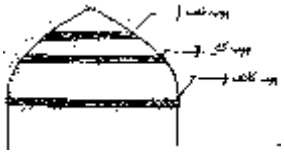
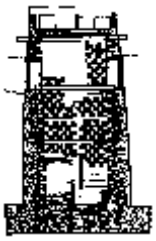
خرپای چوبی	ایران – جهان	متشکل از قاب های مثلثی که تیرهای داخلی مورب (فرنگی) و در نمونه هایی عمودی (ایرانی) هستند. (اسماعیل‌زاده و دیگران، ١٤٠١)	مقاوم‌سازی	 (اسماعیل‌زاده و دیگران، ١٤٠١)
dhajji-dewari	هند	پرکردن آجرهای سوخته در چارچوب درون دیوار که عناصر چوبی به شکل پنل‌های کوچک کنارهم قرار می‌گیرند.  (Dar & Ahmad, 2015)	مقاوم‌سازی	 (Hicyilmaz et .al., 2011)
Himis	ترکیه	هر ٦٠ سانتی‌متر دارای اتصال. این اتصالات، میان قاب‌های اصلی قرار گرفته است. مصالح پرکننده از آجر و قلوه‌سنگ است. دیوارها فقط ضخامت ١٠ تا ١٢ سانتی‌متر دارند.  (Gulkan & Langenbach, 2004)	قاوم‌سازی	 (Sahin, 2018)
Dizeme	ترکیه	اگر چوب برای پر کردن مواد در سیستم ساخت‌وساز هیمس استفاده شود، دیزم نامیده می‌شود (Doğangün et al., 2006).	مقاوم‌سازی	 (Doğangün et. al, 2006)
توفال بغدادی (دیوار بغدادی)	ترکیه	دیوارهای داخلی با ملات و گچ و یا با شکل چوب پوشیده شده، سطوح بیرونی با گچ خاک پوشیده شده است.  (Cardoso, 2004)	مقاوم‌سازی	 (Karaman and Zeren, 2015)
سازه‌های یک تا سه طبقه	یونان	ساختمان‌های چندطبقه که همکف سنگی و طبقات بعدی کف و سقف چوبی دارد و دیوارها قاب‌چوبی باعناصر تزیینی اندک در ورودی‌ها، گوشه‌های و اطراف دهانه‌ها هستند.	مقاوم‌سازی– تزیینی	 (Vintzileou and Touliatos,

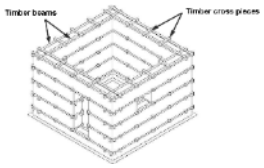
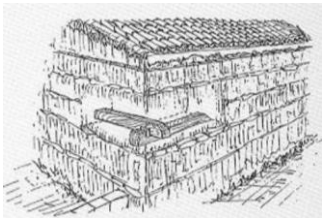
2005)		 (Vintzileou and Touliatos, 2005)		
(https://imaggeo.egu.eu/view/13861/)	مقاوم‌سازی	قاب‌های چوبی که گاهاً عنصر عمودی تا پی امتداد می‌یابد. (Dipasquale et al., 2015)	ایتالیا	Casa Baraccata
(Dutu et al., 2012)	مقاوم‌سازی	قاب‌های چوبی که از مصالح بنایی آجر پر شده است  (Dutu et al., 2012)	آلمان	Fachwerk (post-and-plank)
(Gonc alves et al., 2018)	مقاوم‌سازی	ساختاری درچهار طبقه با دیوارهای بنایی قاب چوبی است.  ج ب الف (الف) ساختار دیوار خارجی (ب). ساختار دیوار داخلی (ج) دیوارهای پارتیشن داخلی (Cardoso, 2004)	پرتغال	Pombalinos
(Campisi and Saeli, 2017)	مقاوم‌سازی	ساخت و ساز تکامل یافته پومبالینوس است.  (Graça. et al., 2013)	پرتغال	Gaiolas
(Dutu et al. 2012)	مقاوم‌سازی	قاب چوبی ساختار اصلی آن است و می‌تواند از مصالح بنایی و گچ پر شود.  (Dutu et al. 2012)	فرانسه	Colombage

قاب چوبی ساده	رومانی	قاب‌چوب که از مصالح آجر پرشده‌است.  (Dutu et al. 2012)	مقاوم‌سازی	 (Dutu et al. 2012)
Half-timbered	انگلستان و اسکاندیناوی	چوب بلوط برای ایجاد اسکلت ساختمان که با آجر پر شد و با گچ اندود می‌شود. (Dutu et al., 2012)	مقاوم‌سازی – تزیینی	 (Dutu et al., 2012)
Telar de Medianera	اسپانیا	ساختار عمودی و افقی چوبی محکم شده با طناب‌های الیافی که فضای بین عناصر عمودی و افقی چوبی از مواد مختلف، به ویژه آجرو سنگ پر می‌شود (Dutu et al. 2012)	مقاوم‌سازی	 (Hueto Escobar et al., 2022)
Quincha	سایت باستانی پرو، امریکای جنوبی	شبکه بافته شده از چوب به نام wattle که با مواد چسبنده ترکیبی از خاک ، شن، کاه که Daub نامیده می‌شود، ساخته شده است.  (Carazas Aedo and Rivero Olmos, 2010)	مقاوم‌سازی	 (Quinn. et al., 2016)
Bahareque (Takzal)	امریکا جنوبی (کلمبیا)	ساختاری مرکب از ستون‌های باربر چوبی با کلاف افقی تک یا دوتایی از بامبو به هم متصل شده و بین آن‌ها با خاک و سنگ پر شده است (Tuccillo et al, 2010).  Carazas Aedo and Rivero (Olmos,2010	مقاوم‌سازی	 Carazas Aedo and Rivero (Olmos, 2010

جدول ۳. معرفی سیستم‌های فناوری کلاف افقی (نگارندگان، ١٤٠٣)

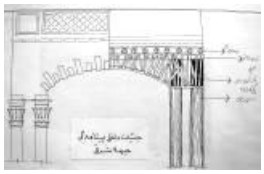
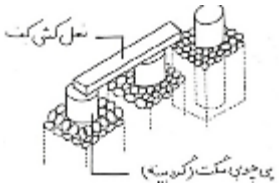
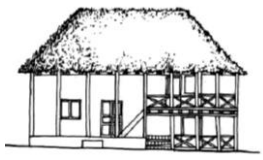
Table 3: Introduction to tie beam technology systems (Authors, 2024)

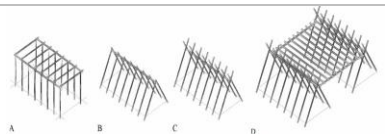
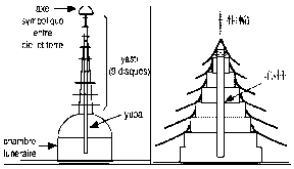
فناوری کلاف افقی(آزاد- ترکیب با مصالح)				
سیستم	موقعیت	ویژگی	کاربرد	تصویر
تیرکش	ایران	جهت اتصال پاکار تاق‌ها و قوس‌ها با چوب کلاف و همچنین چوب کش میان دو شکرگاه است.  (گلابچی و جوانی دیزجی،۱۳۹۵)	مقاوم‌سازی	 (فخار تهرانی، ۱۳۸۵)
کلاف میانه و انتهایی /کش اتصال کندوها عرضی و طولی در کبوترخانه	ایران	در کلاف عرضی در نقاط متعدد دیوار جهت افزایش استحکام کبوترخانه وهمچنین کلاف‌کشی کندوها در کبوترخانه‌های چندقلو استفاده می‌شود.  (گلابچی و جوانی‌دیزجی، ۱۳۹۵)	مقاوم‌سازی – عملکردی	 (گلابچی و جوانی‌دیزجی، ۱۳۹۵)
بادبند مورب افقی	ایران(مساجد کناره دریاچه ارومیه. چهل ستون اصفهان)	در بالاترین نقطه ستون چوبی، روی تیرهای سرتاسری تیرهای چوبی بصورت افقی و قطری به منظور مهار نمودن ستون‌ها و جلوگیری از جابجایی سر آن‌ها قرار گرفته‌اند.	مقاوم‌سازی	 (جبل عاملی، ۱۳۸۲) 1-
کلاف افقی ستون و جرز	ایران	پنهان میان اندود و در محل‌هایی که معمار نتواند این عمل را انجام دهد با دادن فرم و تغییر رنگ خاص از دیده شدن آن جلوگیری می‌نماید. اما گاها نیز آشکار است و اندود ندارد. (گلابچی و جوانی دیزجی، ۱۳۹۵)	مقاوم‌سازی	 (اشتری ماجلان،١٤٠٠)

Bhatar	هند	مصالح بنایی آجر و سنگی که با تخته و کلاف چوبی افقی تقویت شده است.  (“Bhatar Construction”, 2017)	مقاوم‌سازی	 (“Build Back Better”, 2007)
Kath-Khuni	هند	ترکیب لایه‌لایه چوب و سنگ. در این سیستم کنج بنا باید حتماً از چوب باشد. کلاف‌ها گاها دارای تزیینات و حکاکی هستند. (Thakkar and Morrison, 2010)	مقاوم‌سازی – تزیینی	 (Das, 2013)
Tak	کشمیر	تخته چوبی که روی تیرهای کف قرار دارند، با یک لایه خاک پوشانده و در طبقات و بازشوها تکرار می‌شوند. (Dar and Ahmad, 2015)	مقاوم‌سازی	 (Shah and Tayyibji, 2008)
Hatil	ترکیه	استفاده از الوارهای افقی پیوسته تعبیه شده در در دیوار سنگی. گاها در ترکیب با هیمیس به کار رفته است(Gulkan and Langenbach, 2021).  (Javier. Et.al, 2014)	مقاوم‌سازی	 (Gulkan and Langenbach, 2004)

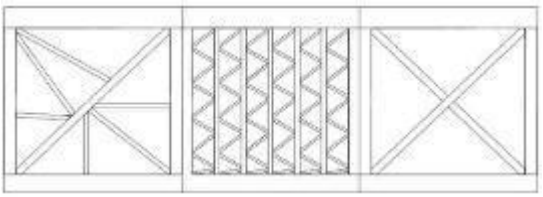
جدول ٤. معرفی سیستم‌های فناوری کلاف عمودی (نگارندگان، ١٤٠٣)

Table. 4. Introduction to timber bracing technology systems (Authors,2024)

فناوری کلاف عمودی				
سیستم	موقعیت	ویژگی	کاربرد	تصویر
کلاف عمودی ایوان سرتاسری	ایران (به عنوان مثال خانه‌های قاجاری تبریز)	ایوانی با سازه چوبی، با نازک‌کاری گچی. شکل و فرم و رنگ ایوانی ستوندار با مصالح بنایی را در معرض دید می‌گذارد. نمونه مشابه: سیستم‌های خرپایی  (فخار تهرانی،١٣٨٥)	مقاوم‌سازی	(فخار تهرانی، ١٣٨٥)
پی چوبی اسکت چاه (سگت سری)	شمال ایران	ارتفاع دادن به ساختمان به‌وسیله ستون‌های عمودی احداث شده با فواصل نزدیک بهم که پایه آن‌ها درون خاک است. فواصل بین ستون‌ها با خشت پر می‌شود و سپس با سبوس و گل رس اندود می‌شود.  (اشتری ماجلان،١٤٠٠)	مقاوم‌سازی	(اشتری ماجلان، ١٤٠٠)
ستون ایوان تالار (بالاخانه)	شمال ایران	فضای تشکیل‌شده از ستون‌های چوبی که در بستر تیرهای چوبی شکل گرفته‌اند و دورتادور فضا جان‌پناه قاب چوبی قرار دارد.  (خاکپور، ١٣٨٦)	مقاوم‌سازی – عملکردی	(خاکپور، ١٣٨٦)
پناهگاه‌های A شکل	ایران، قوچان/	تیرهای چوبی که فاصله بین آن‌ها با مواد سبک مانند بوته پر شده است. سپس سطوح با گچ اندود می‌شد. در ابتدا جهت پناهگاه موقت ساخته شد، به علت نتیجه مطلوب در برابر زلزله، در قرن ١٩ میلادی با گسترش آن به سه اتاق جدا شده ، از آن استفاده طولانی مدت شد.	مقاوم‌سازی	(Mehdizadeh Seraj and Moussavian, 2012)

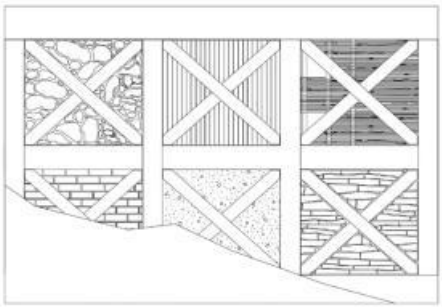
		 (Mehdizadeh Seraj and Moussavian, 2012)		
شاهنگ گنبد	ایران	کلاف عمودی مرگزگنبد به همراه هشت الی ده کلاف افقی (مداری-کش) جهت بستن شاهنگ به دیوار گنبد و اتصال گنبدهای دو پوسته (رضازاده اردبیلی، ١٣٩٦) (ولی بیگ و همکاران، ١٣٩٦)	مقاوم‌سازی - عملکردی	(معماریان، ١٣٩٧)
ستون چوبی مرکزی پاگودا	ژاپن	معبد در اطراف یک ستون چوبی؛ چوب در وسط ساختمان توسط زنجیرهایی به ساختار بتکده که آن را احاطه کرده است، متصل می‌شود .(Yijie L, et al., 2022).  (Zatir and Mokhtari, 2014)	مقاوم‌سازی - تزیینی	(Larsen and Marstein, 2000)

همان‌طور که ذکر گردید فناوری‌های حفاظت لرزه‌ای در چهار دسته ١- جداسازی پایه ٢- قاب چوبی ٣- کلاف افقی ٤- کلاف عمودی قابل تقسیم‌بندی هستند. قاب‌های چوبی منظم و نامنظم با اشکال مختلف بادبندها (شکل ١١). با مواد پرکننده مختلف نظیر سنگ، آجر، کاه گل، خشت، سنگ، گچ، چوب، ترکه درختان یا بامبو به‌صورت دوجداره یا تک جداره ساخته شده‌اند و در مواردی قاب‌ها بدون پرکننده (ایوان‌های تلار) و یا با تزیینات مفصل (شیشه رنگی و گره‌سازی ارسی) می‌باشند (شکل ١٢).



شکل ١١. انواع چیدمان قاب چوبی به شکل منظم و نامنظم (نگارندگان، ١٤٠٣)

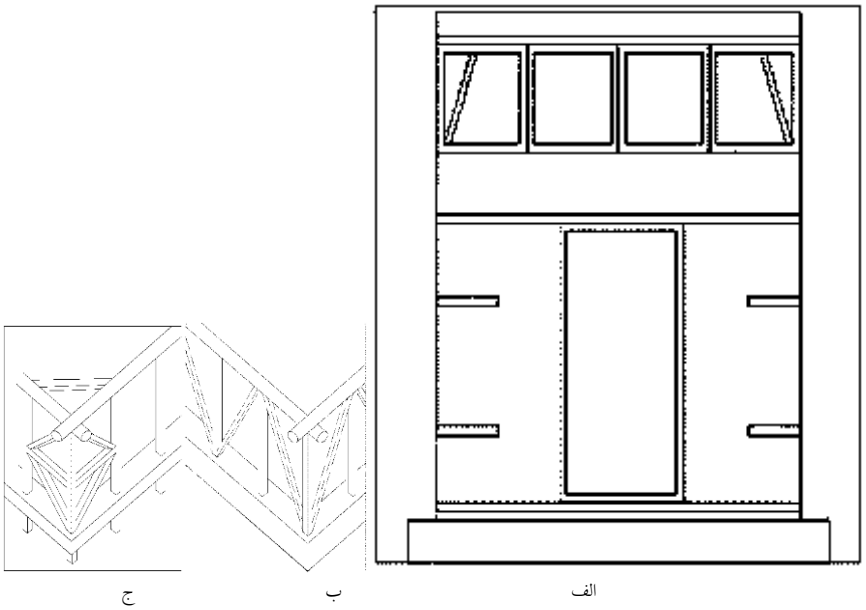
Fig. 11. Types of regular and irregular wooden frame arrangements (Authors, 2024)



شکل١٢. انواع ماده پرکننده سیستم قاب چوبی (بامبو، تخته چوب، سنگ، خشت، کاهگل و آجر)، (نگارندگان، ١٤٠٣)

Fig. 12. Types of filling materials for wooden frame systems (bamboo, wood planks, stone, clay, thatch and brick), (Authors, 2024)

سیستم‌ها از نظر موقعیت در: کل سازه(پناهگاه‌های قوچان، سیستم دارورچین)، پی (اسکتی، شیکیلی)، دیوار بیرونی (اکثر نمونه‌ها) و گاها داخلی(پومبالینوس)، اطراف بازشوها (سیستم تک) و سقف (رومانی، تله بست) مشاهده می‌شوند؛ اما آنچه مهم است یکپارچگی این سیستم از پی تا سقف می‌باشد (شکل ١٣).



ج ب الف

شکل ١٣. الف: جزییات اجرایی ساختمان با ساختار یکپارچه از پی تا سقف (جداساز، کلاف افقی، عمودی، مورب) ب: جزییات اجرایی دیوار و افزودن کلاف مورب عمودی و استحکام بخشی بیشتر سازه ج: نمای یک ساختمان با ترکیب قاب چوبی و کلاف افقی و تقویت گوشه‌ها با کلاف افقی ثانویه (نگارندگان، ١٤٠٣)

Fig. 13. **A**: Construction details of a building with an integrated structure from foundation to roof (separator, horizontal, vertical and diagonal braces) **B**: Construction details of the wall and the addition of bracing and further strengthening of the structure **C**: Facade of a building with a combination of wooden frame and tie beam and strengthening of the corners with secondary tie beam (Authors, 2024)

اتصالات چوب‌ها نیز به شکل ١- کام و زبانه ٢- الیاف و طناب‌های طبیعی ٣- میخ‌گذاری قابل دسته‌بندی می‌باشد. این سیستم‌ها منحصرا در ارتباط با مقاوم‌سازی زلزله شکل نگرفته‌اند. فاکتورهای دیگری نظیر در دسترس بودن مصالح، کارکرد و نیازهای عملکردی، تزئین و آرایش بنا و ملاحظات زیبایی شناختی، سرعت

ساخت و اجرا، روش اجرا و مهار نیروهای جانبی حین ساخت، مهار نیروی فشاری، تهویه و استفاده از باد مطبوع و هم‌چنین، همان‌طور که ذکر گردید در همه سیستم‌ها مهار نیروی جانبی و کششی و ایجاد یکپارچگی مدنظر است. در یک تقسیم‌بندی کلی، کارایی سیستم‌های مذکور را می‌توان به چهار دسته۱–سازه‌ای ۲–تزئینی ۳– کارکردی ٤– سایر تقسیم نمود (جدول ٥).

جدول ٥. تحلیل کلی از سیستم‌های بررسی شده (نگارندگان، ١٤٠٣)

Table 5. General analysis of the systems studied (authors, 2024)

موقعیت چوب در سازه							
پی	میانه یا گوشه‌ها در جرز و ستون			دیوار داخلی		اطراف بازشوها	کل سازه
فناوری مورد استفاده							
کلاف افقی	کلاف عمودی		قاب چوبی		جداسازی پایه		ساختار یکپارچه
نحوه اتصالات							
	کام و زبانه			الیاف و طناب‌های طبیعی			میخ
ماده پرکننده کلاف‌ها و قاب‌ها							
آجر	سنگ	بامبو	چوب	خشت	کاهگل	گچ	شیشه و گره چوبی(ارسی)	بدون ماده پرکننده
اندود							
دارای اندود نهایی با پوشش گچ، سبوس، کاهگل، گچ خاک						بدون اندود نهایی مانند دارورچین، هیمیس، تک و بهاتار	
فاکتورهای پایداری چوب در سازه							
نوع چوب	سن چوب		نحوه اجرا		اتصالات و پیوستگی	اقلیم و شرایط محیطی	میزان ارتفاع سازه

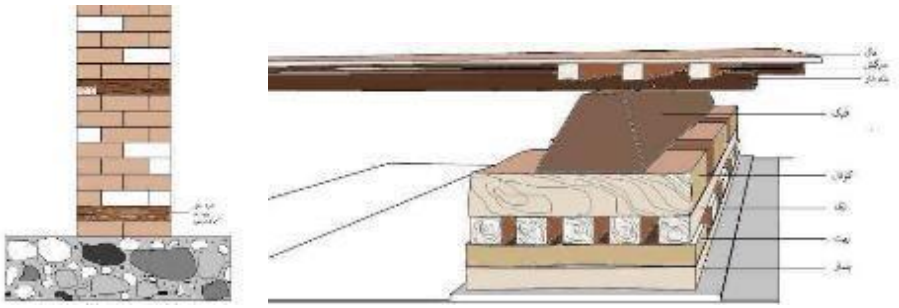
علل کاربرد چوب در سیستم	**شرح**	**مثال**
سازه‌ای	مهار نیروی فشاری	معابد ژاپنی / سیستم شاهنگ
	مهار نیرو جانبی نظیر زلزله، در طول زمان استفاده	همه نمونه‌ها
	مهار نیروی جانبی حین ساخت بنا	سیستم کش طاق‌ها
کارکردی	تهویه و گردش هوا	سیستم شیکیلی
	خلق فضاهای جدید در معماری	کلاف‌های کبوترخانه: محل نشستن پرندگان / فضای زیرین پی‌های اسکتی: محل نگهداری طیور
تزیینی	نماسازی	ارسی/ هاف تیمبر
سایر	در دسترس بودن در محل	تلار شمال ایران
	سرعت ساخت و ساز بالا	سیستم بهاتار

مروری بر نمونه‌هایی در ایران

همان‌طور که مشاهده گردید در نمونه‌های ایران هر چهار فناوری حفاظتی تاریخی استفاده شده است. به‌عنوان‌مثال جداسازی پایه در پی‌های چوبی شیکیلی، یکی از شاخص‌ترین نمونه‌های جداکننده‌های چوبی تاریخی است که منابع جهانی نیز در تاریخچه این فناوری به آن اشاره دارند.

همه سیستم‌ها به جز کبوترخانه‌ها و ارسی‌ها با هدف مستقیم حفاظت لرزه‌ای و همچنین در شهرهایی که بیشتر در معرض زلزله قرار گرفته‌اند؛ مانند شهرهای رودبار، قوچان، تبریز، ساخته شده‌اند و با کمترین میزان خرابی و خسارت در مقایسه با ساختمان‌های مجاور خودشان که فاقد این فناوری بوده‌اند، نمونه‌های موفقی در برابر زلزله

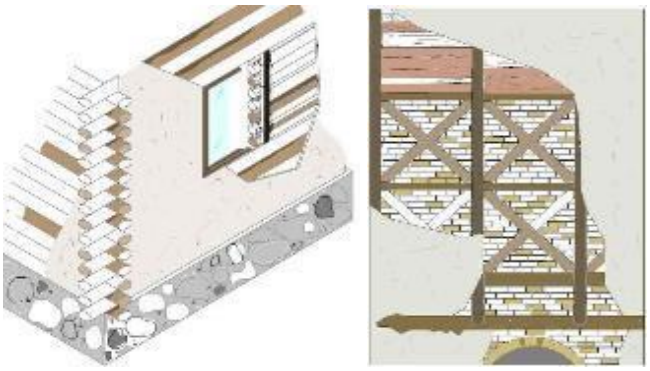
محسوب می‌شدند.امروزه به‌جز کلاف‌های افقی و گاهاً پی‌های چوبی به‌طور خلاصه شده و محدود در معماری بومی (شکل ١٤)، فناوری‌های دیگر حفاظت لرزه‌ای نظیر قاب چوبی و یا دیوارهای دارورچین در معماری ایران رو به فراموشی هستند (شکل ١٥).



ب الف

شکل ١٤-الف. اجزای پی تاریخی شیکیلی با فناوری جداساز پایه ای ب: کلاف افقی دیوار و ستون در ساختمان های تاریخی (نگارندگان، ١٤٠٣)

Fig.14-**A**. Historical foundation components of a Shikili with foundation isolation technology. **B**: Horizontal wall and column coil in historical buildings (Authors, 2024).



ب الف

شکل ١٥: الف: جزئیات یک دیوار قدیمی با سیستم قاب چوبی در ایران ب: جزئیات سیستم دیواردارورچین (نگارندگان، ١٤٠٣)

Fig. 15. **A**: Details of an old wall with a wooden frame system in Iran **B**:Details of the Darvarchin wall system (Authors, 2024)

نتیجه‌گیری

ساختمان‌های با مصالح بنایی دربرابر زلزله به علت پایین بودن مقاومت کششی و شکل‌پذیری کم، اتصال ضعیف بین اجزا و جرم زیاد، مقاومت کمی دارند. آسیب‌های وارده بر اثر زلزله بر این ساختمان‌ها می‌تواند خمش، پیچش، ترک، افتادگی و در نامطلوب‌ترین وضع سقوط و تخریب باشد. سیستم‌های ذکرشده در جزییات درون سیستمی خود با افزودن چوب در ساختارشان تغییرات را می‌پذیرند و این نشان‌دهنده سازگاری و انعطاف‌پذیری این سیستم‌ها است. همچنین بررسی نمونه‌ها تأکید می‌کند که چوب در این سیستم‌ها باتوجه به نوع استفاده و اتصال خود، در کنار سبک‌سازی بنا، می‌تواند به استحکام آن کمک کند. در نهایت قدمت ساختمان‌های بررسی شده و استفاده طولانی‌مدت از این سیستم‌ها، نشان می‌دهد این سیستم‌ها در ارائه مقاومت در برابر زلزله مؤثر بوده‌اند.

در یک جمع‌بندی کلی فاکتورهای مؤثر در پایداری سیستم‌های چوبی در برابر زلزله می‌تواند شامل انتخاب نوع چوب، میزان سن و فرسوده نبودن، اتصالات چوب‌ها و پیوستگی با مصالح پرکننده، اقلیم و شرایط محیطی (انتخاب مصالح سازگار. عایق کردن چوب در برابر عواملی نظیر رطوبت)، نحوه اجرا صحیح سازه، میزان ارتفاع و سطح مقطع اثر باشد.

چهار فناوری نام برده شده در مناطق مختلف جهان، با شیوه‌های متفاوت ولیکن اصولی مشترک اجرا شده‌اند. ایران نیز با توجه به زلزله‌خیز بودن، از این فناوری‌ها در نمونه‌های تاریخی و بومی خود استفاده کرده است و تجربه نشان داده که نمونه‌های موفقی در برابر زلزله بوده‌اند. مطالعه این سیستم‌ها می‌تواند بینش‌های ارزشمندی را در مورد این نوآوری‌های محلی و استفاده از آن در جامعه امروز، ارائه دهد.این موضوع زمانی اهمیت می‌یابد که در بررسی پیشینه سیستم‌های جهانی توسط نویسندگان، منابع موردمطالعه به جهت نتیجه مطلوب و کم‌زیان در برابر زلزله، با هدف احیای سیستم‌ها ودستیابی به الگوهای منطبق با معماری مدرن نگاشته شده بودند؛ ولیکن فناوری‌های نامبرده در ایران نه تنها جهت کاربرد معاصر به‌روز نشده‌اند، بلکه گاها ناشناخته مانده‌اند. این پژوهش در مطالعات بعدی می‌تواند با تمرکز بر نمونه‌های ایران سیستم‌های چوبی مذکور را مورد آزمایش قرارداده و برای تأیید اثربخشی سیستم‌ها، داده‌های کمی ارائه نماید. همچنین می‌تواند بر ارائه طرح‌هایی منطبق بر سیستم‌های چوبی بومی و با رعایت اصول و قوانین حفاظتی تمرکز داشته باشد.

سپاسگزاری

از داوران محترم بابت نظرات دقیق و پیشنهادهای ارزشمندشان که موجب ارتقای کیفیت این مقاله شد، صمیمانه سپاسگزاریم.

درصد مشارکت نویسندگان

هر دو نویسنده به یک میزان در تمامی مراحل پژوهش، نگارش و بازنگری این مقاله مشارکت داشته‌اند.

تعارض منافع

بین نویسندگان تعارضی در منافع وجود ندارد و منابع مالی این مقاله توسط نویسندگان تامین شده است..

کتابنامه

– اسماعیل‌زاده، پریسا؛ مختاری، طالقانی‌اسکندر؛ اصغرزاده، علی، (١٤٠١)، «تحلیلی بر سازه‌های چوبی شیبدار در ساختمان‌های صنعتی شمال ایران مربوط به دوران پهلوی». *نقش جهان – مطالعات نظری و فناوری های نوین معماری و شهرسازی*، ١٢ (١): ١٤٥–١٢٨. https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224 991.1401.12.1.6.6

– اشتری‌ماجلان، سارا، (١٤٠٠). «درآمدی بر معماری بومی روستایی گیلان(بخش دوم)». *گاهنامه کمیته علمی معماری بومی ایکوموس ایران(گزارش داخلی)*، ٨: ١٤–٢٩. https://openarchive.icomos.org/id/eprint/2829/1/

– برگی، خسرو، (١٣٨٨). *اصول مهندسی زلزله*، تهران: دانشگاه تهران.

- تابش‌پور، محمدرضا؛ و فرهنگ فر، حسن، (١٣٨٤). «مقاوم سازه‌ای لرزه‌ای سازه‌های بنایی خشتی». *نشریه راه و ساختمان*، ٢٨. https://www.magiran.com/p308034

- جبل‌عاملی، عبدالله، (١٣٨٢). *طرح استحکام‌بخشی ایوان ستوندار عالی قاپو*. سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری.

- چرخ‌تاب‌مقدم، شاهین؛ حسینی، سیدباقر، (١٣٩٥). «بررسی تاثیر هماهنگی شکلی سازه و معماری خانه‌های امامزاده ابراهیم بر مقاومت لرزه‌ای آن‌ها». *مسکن و محیط روستا*. ٣٥ (١٥٣): ٢٣-٣٤. http://jhre.ir/article-1-763-fa.html

- خاکپور، مژگان، (١٣٩٠). *معماری خانه‌های گیلان*. رشت: فرهنگ ایلیا.

- رضازاده‌اردبیلی، مجتبی، (١٣٩٦). *مرمت آثار تاریخی(شناخت، آسیب شناسی و فن شناسی)*. تهران: دانشگاه تهران.

- زریبافیان، امید، (١٣٨٥). «راهکارهای حفاظت از بناهای تاریخی در برابر زمین لرزه». *همایش علمی منطقه‌ای معماری کویر*. دانشگاه آزاد اسلامی واحد اردستان. paper/811793/1385

- زمرشیدی، حسین، (١٣٩٠). *معماری ایران، مصالح شناسی سنتی*. تهران: زمرد.

- زهرائی، سید مهدی؛ صادق‌آذر، مجید؛ و زینالی، رضا، (١٣٩٠). «بررسی‌عملکرد سه روش سه کنترل غیرفعال در بهبود پاسخ لرزه‌ای قاب های خمشی فولادی(یادداشت فنی)». *نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری*، ٤٥ (٤): ٤٢٩ – ٤٣٦. https://jcse.ut.ac.ir/article_23742.html

- ستارشیخی، غلامرضا؛ بخشی، حشمت‌اله؛ و یزدی‌نژاد، محمد مهدی، (١٣٨٧). «روشی برای بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های مصالح بنایی»، همایش ملی مقاوم سازی ایران، دانشگاه یزد.

- فاتح، محمد؛ و داریوش، بابک، (١٣٨٩). *معماری روستایی* (٢). تهران: علم و دانش.

- فخارتهرانی، فرهاد، (١٣٨٥). «مقابله پدرانمان با زمین‌لرزه در تبریزشیوه‌های تامین ایمنی ابنیه در برابر زلزله در معماری سنتی شهر تبریز». *دومین کنفرانس بین المللی مدیریت جامع بحران در حوادث غیرمترقبه طبیعی*، تهران.

- کامران‌کسمایی، حدیثه؛ دانشجو، خسرو؛ و مفیدی‌شمیرانی، سید مجید، (١٣٩٦). «ارزیابی سکونتگاه‌های بومی گیلان بر محوریت زیست پایداری». *نقش جهان. مطالعات نظری و فناوری های نوین معماری و شهرسازی*، ٢-٧: ٥٨-٦٩. 20.1001.1.23224991.1396.7.2.3.0

- کبیرصابر، محمدباقر، (١٣٩٢). «رهیافت‌های معماری سنتی تبریز برای ساخت‌وساز ایمن پس از زلزله مطالعه موردی: کاربست کلاف‌های چوبی در معماری خانه‌های قاجاری»، *نامه معماری و شهرسازی*، (١١): ٥٩-٧٠. https://aup.j111_61904ff1e63cd03cb2ab30b3b7368a3e

- گدار، آندره، (١٣٦٥). *آثار ایران*. ترجمهٔ سروقدمقدم، ابوالحسن. مؤسسه چاپ و انتشارات آستان قدس رضوی.

- گلابچی، محمود؛ و جوانی دیزجی، آیدین، (١٣٩٥). *فن‌شناسی معماری ایران*. تهران: دانشگاه تهران.

- گنجه‌ای، سپهر، (١٣٩٠). «سیستم قاب سبک ساختمانی». *دومین کنفرانس بین المللی معماری و سازه*، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، شمارهٔ ٥٠١.

- مختاری، فلورا؛ حاتمی‌خانقاهی، توحید؛ و گسیلی، بهرام، (١٣٩٨). «ارزیابی تحلیلی شناسه‌های حرارتی جداره‌های خارجی ابنیه بومی روستایی اقلیم کوهپایه‌ای استان مازندران». *پژوهش‌های روستایی*، ١٠ (٢): ٣١٣-٣٢٧. 10.22059/JRUR.2019.266280.1289

- مظلوم، مهدی، (١٣٨٩). *جزوه سازه‌های بنائی مقاوم در برابر زلزله*: گروه عمران.

- معقولی، نادیا؛ و احمدزاده، معصومه، (١٣٩٥). «گونه شناسی مسکن روستایی شهرستان سوادکوه از نظر معماری و سازه». *مسکن و محیط روستا*، ٣٦ (١٦٠): ٧٨-١٠٢.http://jhre.ir/article-1-1230-fa.html.

- معماریان، غلامحسین، و صفایی‌پور، هادی، (١٣٩٧). *نیارش معماری ایرانی*. گلجام.

- ولی‌بیگ، نیما؛ رحیمی‌آریایی، افروز؛ و رهروی‌پوده، ساناز، (١٣٩٦). «تحلیل ویژگی‌های هندسی و توانمندی معماران محلی در فن‌آوری ساخت گنبدهای دو پوسته ی گسسته در شیوه‌ی نایین». *پژوهش‌های باستان شناسی ایران*، ٧ (١٤): ١٩١- ٢٠٦ . 10.22084/NBSH.2017.6824.1286

- Aloisio, A., (2020). "The Timber-Framed (TF) masonries in L'Aquila: The baraccato Aquilano". *Heritage*, 3(2): 306-317. https://doi.org/10.3390/heritage3020018

- Amina Abdessemed-Foufa, A. & Benouar, D., (2001). "Atlas of earthquake-resistant traditional techniques in Algeria: The case of the Casbah of Algiers". *European Earthquake Engineering*, *EEE* 2, 0: 2-29. https://www.academia.edu/9090310

- Arya, A. S., Bone, T. & Ishiyama, Y., (2004). *Guidelines for earthquake resistant non-engineered construction.* 13th World Conference on Earthquake Engineering: Canada .https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000229059

- Ashtari Majlan, S., (2021). "An Introduction to Rural Vernacular Architecture of Gilan (Part Two)". *Journal of the Scientific Committee of Vernacular Architecture of ICOMOS Iran(Internal Report)*, 8: 14-29. https://openarchive.icomos.org/id/eprint/2829/1/CIAV-Iran-Bulletin-No8-Autumn-2021 (In Persian).

- Bargi, K., (2009). *Principles of Earthquake Engineering*. Tehran: University of Tehran. (In Persian).

- Barreto, I., (2015). "The bank of Portugal's quarter : Urban rehabilitation of Baixa Pombalina. extended abstract for obtaining a Master Degree in Architecture". Supervisor: Professora Doutora Ana Cristina dos Santos Tostões. https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/844820067124737/

- Campisi, I. & Saeli, M., (2017). "Timber Anti-Seismic Devices In Historical Architecture In The Mediterranean Area". *J. Comp. Meth. and Exp. Meas.*, 5(6): 940–952. https://DOI: 10.2495/CMEM-V5-N6-940-952

- Carazas Aedo, W & Rivero Olmos, A., (2010). "Wattle & Daub: Paraseismic construction handbook". CRATerre-EAG Team. Maison Levrat, Parc Fallavier. BP 53 F-38092 Villefontaine Cedex, France. https://www.misereor.org/fileadmin/user_upload

- Cardoso, R., Lopes, M. & Bento, R., (2004)." Earthquake resistant structures of Portuguese old 'Pombalino' buildings". *13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C.*, Canada. https://scholar.tecnico.ulisboa.pt/records/b152c64f-441a-4594-a44d-ffe9fe651112?lang=en

- Charkhtab Moghaddam, S., & Hosseini, S. B., (2016). "the effect of Harmony between form and structural on seismic resistance in Houses of Imamzadeh Ibrahim Village". *JHRE*. 35(153): 23-34. http://jhre.ir/article-1-763-fa.html (In Persian).

- Dar, M. A. & Ahmad, S., (2015). T*raditional earthquake resistant systems of Kashmir*: https://www.researchgate.net/publication/273322286

- Das. R., (2013). *Standing Firm: Traditional Aseismic Architecture in the Western-Central Himalayas.* Paper presented at Seminar on Traditional Knowledge Systems, Binsar (Almora), October 4-7. https://www.academia.edu/105948496

- Dipasquale, L., Omar Sidik, D. & Mecca, S., (2015). "Local seismic culture and earthquake-resistant devices: Case study of Casa Baraccata". *Vernacular Architecture: Towards a Sustainable Future – Mileto,* Vegas, García Soriano & Cristini (Eds), https://flore.unifi.it/bitstream/2158/918744/6/6

- Doğangün, A., Tuluk, L., Livaoğlu, R. & Acar, R., (2006) "Traditional wooden buildings and their damages during earthquakes in Turkey". *Engineering Failure Analysis*, 13: 981– 996. 10.1016/j.engfailanal.2005.04.011

- Dutu, A., Gomes Ferreira, J., Guerreiro, L., Branco, F. & Goncalves, A. M., (2012). "Technical note: Timbered masonry for earthquake resistance in Europe". *Materiales de Construccion*, 62(308): 615-628. https://doi.org/10.3989/mc.2012.01811

- Dutu, A., Niste, M., Spatarelu, I., Dima, DI. & Kishik, S., (2018). "Seismic evaluation of Romanian traditional buildings with timber frame and mud masonry infills by in-plane static cyclic tests". *Engineering Structures*, 167: 655-670. 10.1016/j.engstruct.2018.02.062

- Esmaeil Zadeh, P., Mokhtari Taleghani, E. & Asghar Zadeh, A., (2022). "An Analysis of Wood Sloped Structures in Industrial Buildings of North of Iran Belonging to the Pahlavi Era". *Naqshejahan-Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning*, 26 (12(1)): 128-145. https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224 991.1401.12.1.6.6 (In Persian).

- Fakhar Tehrani, F., (2006). "Our Fathers' Coping with Earthquakes in Tabriz: Methods of Ensuring Building Safety Against Earthquakes in Traditional Architecture of Tabriz". *Second International Conference on Comprehensive Crisis Management in Unexpected Natural Disasters*, Tehran. INDM02_149 (In Persian).

- Fateh, M. & Dariush, B., (2009). *Rural Architecture* (2), Tehran: Science and Knowledge. 9786009092758 (In Persian).

- Ganjehi, S., (2011). "Light Frame Construction System". *Second International Conference on Architecture and Structures, Building and Housing Research Center,* Issue 501. NCSA02 (In Persian).

- Godard, A., (1996). *The Art of Iran.* Sarvghad Moghaddam, A. Astan Quds Razavi Printing and Publishing Institute. https://noo.rs/ba2Og (In Persian).

- Golabchi, M. & Javani-Diazji, A., (2016). *Iranian Architectural Technology.* Tehran: University of Tehran. (In Persian).

- Gonc Alves, A., Guerreiro, L., Candeias, P., Ferreira, J. & Costa, A., (2018) "Characterization of reinforced timber masonry walls in 'Pombalino' buildings with dynamic tests". *Eng. Struct.*, 166: 93-106. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.036

- Graça,V., Paulo, L. & Elisa, P., (2013). "An overview on the seismic behaviour of timber frame structures". *Proceedings of the 1st International symposium on Historic Earthquake-Resistant Timber Frames in the Mediterranean Region H. Ea. R. T,* University of Calabria, Italy:10.1007/978-3-319-16187-7_10

- Gulkan, P. & Langenbach, R., (2021). "Raditional timber-laced masonry construction in Turkey known as himis". *Masonry Construction in Active Seismic Regions Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*: 61-97. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821087-1.00015-6

- Gulkan, P.& Langenbach, R., (2004). "The earthquake resistant of traditional timber and masonry dwelling in Turkey". *13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, B. C., Canada. http://www.conservationtech.com

- Hicyilmaz, K., Bothara, J. & Stephenson, M., (2011). "Housing report Dhajji Dewari". *World Housing Encyclopedia an Encyclopedia of Housing Construction in Seismically Active Areas of the World an initiative of Earthquake Engineering Research Institute (EERI) and International Association for Earthquake Engineering (IAEE)*: Report 146. https://www.world-housing.net/WHEReports

- Hosseini, N., Hosseini, M. & HeiraniPour, M., (2020). "The role of Orosi's Islamic Geometric Patterns in the building façade design for Improving occupants' daylight performance". *Journal of Daylighting*, 7: 201-221. DOI: 10.15627/jd.2020.18

- Hueto Escobar, A., Mileto, C., Vegas López-Manzanares, F. & Macchioni, N., (2022). "Traditional constructive techniques and their relation to geographical conditioning factors. The case of Half-Timbered walls in Spain". *International Journal of Architectural Heritage*, https://doi.org/10.1080/15583058.2022.2155884

- Jabal Ameli, A., (2003). *Strengthening plan for the columned porch of Ali Qapu.* Organization of Cultural Heritage, Handicrafts and Tourism. (In Persian).

- Javier, O., Graca, V. & Mariana, C., (2014). "An overview of seismic strengthening techniques traditionally applied in vernacular architecture". *9th International Masonry Conference in Guimarães.* https://esg.pt/seismic-v/assets/uploads/2015/10/

- Kabir Saber, M., (2013). "Traditional principals For safe construction after earthquake in old Tabriz (wooden coil technique in Qajariieh era residential architecture)". *Architecture and Urban Planning*, (11): 59-70. https://aup.j111_61904ff1e63cd03cb2ab30b3b7368a3e (In Persian).

- Kamran Kasmaii, H., Daneshjou, K. & Mofidi Shemirani, S., (2017). "Gilan native habitat assessment body-centered sustainable by Sachs and energy simulation software". *Naqshejahan*, 7(2): 58-69. 20.1001.1.23224991.1396.7.2.3.0 (In Persian).

- Karaman, O. Y. & Zeren, M. T., (2015). "Examples of wooden vernacular architecture; Case study: Turkish houses in Western Anatolia". *DG Gruyter*, 77-87. 10.1515/jbe-2015-0008

- Khakpour, M., (2011). *Architecture of Gilan houses.* Rasht: Farhang Ilia. (In Persian).

- Langenbach, R., (2008). "Resisting Earth's Forces: Typologies of Timber Buildings in History". *Structural Engineering International*, 18(2): 137-140. https://doi.org/10.2749/101686608784218806

- Larsen, K. & Marstein, N., (2016). *Conservation of historic Timber structures: An ecological approach.* This text was originally published in 2000 in Butterworth-Heinemann Series in Conservation and Museology All illustrations are by the authors if not stated otherwise Oslo. http://openarchive.icomos.org/1656/1

- Lin, Y., Chun, Q., Zhang, C., Han, Y. & Fu, H., (2022). "Research on seismic performance of traditional Chinese hall-style timber buildings in the Song and Yuan dynasties (960–1368 AD): a case study of the main hall of Baoguo Temple". *Journal of Wood Science*, 68(1): 10.1186/s10086-021-02009-y

- Maghouli, N. & Ahmadzadeh, M., (2017). "Typology of Architectural and Structural of Rural housing in Savadkuh City". *JHRE*, 36(160): 87-102. http://jhre.ir/article-1-1230-fa.html (In Persian).

- Mazloum, M., (2010). *Handbook of Earthquake-Resistant Building Structures*: Civil Engineering Group. (In Persian).

- Mehdizadeh Seraj, F. & Moussavian, E., (2012). "A historical experience of local seismic proof shelters in Quchan-northeast of Iran". *International Journal of Architectural Engineering & Urban Planning*: 100-107. https://ijaup.iust.ac.ir/article-1-83-en.html

- Memarian, G. & Safaeepor, H., (2018). *Iranian Architectural Niyāresh*. Goljam. (In Persian).

- Miguel, F., Julien, H. & Olivier, L., (2015). "Technical guide for master trainers: earthquake resistant buildings using local materials in Dolakha, Ramechhap and Sindhuli – Nepal". *Grenoble: CRAterre-ENSAG & Croix-Rouge suisse*. 116. https://archive.org/details

- Minke, G., (2001). *Conservation manual for earthquake resistant houses built of earth.* gate BASIN at CTZ gmbh. https://www.preventionweb.net/files/5230

- Mukhtari, F.; Hatami Khanghahi, T. & Gasili, B., (2019). "Analytical Evaluation of the Thermal Properties of the External Walls of Traditional Rural Dwellings Located in the Foothills of Mazandaran Province". *Rural Research*, 10(2): 313-327. 10.22059/jrur.2019.266280.1289 (In Persian).

- National information center of earthquake engineering, (1980). *Guidelines for earthquake resistant non-engineered construction.* Revised edition of "Basic concept of Seismic codes". I (2), India. https://www.traditional-is-modern.net/LIBRARY/GUIDELINES/

- Olivier Moles, M., (2006). *Technical guide for master trainers: Earthquake resistant buildings using local materials in Kafal Ghar* (Kashmir, Pakistan): CRATerre-ENSAG Grenoble https://archive.org/details/Technical_guide_for_master_trainers

- Ortega, J., Vasconcelos, G. & Pereira, M. C., (2014). *An overview of seismic strengthening techniques traditionally applied in vernacular architecture*. https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/30423

- Quinn, N., D'Ayala, A. & Descamps, T., (2016). "Structural characterization and numerical modelling of historic Quincha walls". *Int. J. Architect. Herit.* 10 (2e3): 300e331. 10.1080/15583058.2015.1113337

- Rezazadeh Ardebili, M., (2017). *Restoration of historical monuments (cognition, pathology and technology)*. Tehran, University of Tehran. (In Persian).

- Ruggieri, N., Tampone, G. & Zinno, R., (2013). *Historical earthquake- resistant timber frames in the Mediterranean Area: ICOMOS International Wood Committee Florence.* Italy. https://www.conservationtech.com/2013-Italy-HEaRT-conf-Cosenza/BOOK

- Sahin, G., (2018). "History and characteristics of construction tech- niques used in traditional timber Ottoman houses". *Int. J. Ar- chitect. Herit.*, 12 (1): 1e20. 10.1080/15583058.2017.1336811

- Sattar Sheikhi, G., Bakhshi, H. & Yazdinejad, M., (2008). "A method for seismic rehabilitation of buildings made of building materials". *National Conference on Reinforcement of Iran,* Yazd University. (In Persian).

- Shah,V. R. & Tayyibji, R., (2008). "The Kashmir House its Seismic Adequacy and the Question of Social Sustainability". *The 14th World Conference on Earthquake Engineering.* October 12-17, Beijing, China. https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article

- Szakats, J., (2007). *Improving the earthquake resistant of small buildings, Houses and Community infrastructure.* BE(Civil), MIPENZ (Civil & Structural), MIStructE, IntPE Wellington, New Zealand. https://www.unisdr.org/files/1390_Earthquake

- Tabeshpour, M. & Farhangfar, H., (2005). "Seismic structural resistance of brick masonry structures". *Road and Building Journal*, 28. https://www.magiran.com/p308034 (In Persian).

- Thakkar, J. & Morrison, S., (2010). "An Analysis of Kath-khuni Architecture as a Sustainable Humane Habitat in Himachal Pradesh". *11th International Conference on Humane Habitat (ICHH) 2009 by International Association for Humane Habitats (IAHH) at Rizvi College of Architecture*, India. https://www.academia.edu/195861/

- Tuccillo, V., Palmsano, M., Leccisi, F., Varchetta, M. & Fiengo, P., (2010). "Recovery of Traditional Construction Techniques in Colombia, Portugal and Italy". *Collected Papers on Building Technology 18th CIB World Building Congress.* Salford, United Kingdom. https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB18728

- Ugalde, D., Almazán, J., María, H. & Guindos, P., (2019) "Seismic protection technologies for timber structures: a review". *European Journal of Wood and Wood Products*, 77: 173–194 https://doi.org/10.1007/s00107-019-01389-9

- UNHABITAT, (2007). B*uild back Better –Bhatar background and rationale June.* UNHABITAT https://www.traditional-is-modern.net/LIBRARY/PAKISTAN-reconstruct/07(06-29

- UNHABITAT, (2017). *Bhatar construction timber reinforced masonry.* UNHABITAT https://unhabitat.org.pk/wp-content/uploads/2021/07/

- ValiBeig, N., Rahimi Ariaei, A., & Rehravi Poudeh, S., (2017). "Persian Architects' Mastery over Geometry to Build Discontinuous Double-Skin Domes in Nain Style". *Iranian Archaeological Research*, 14(7): 191-206. 10.22084/nbsh.2017.6824.1286 (In Persian).

- Van Der Zanden, M., (2018). “Assessment of the seismic performance and sustainability of the Kath-Kuni building style in the Indian Himalaya”. Thesis Research For the degree of Master of Science at Delft University of Technology. https://repository.tudelft.nl/record/uuid:6eea

- Zahraei, M., Sadegh Azar, M. & Zeinali, R., (2011). “Studying Performance of 3 Passive Control Methods to Improve Seismic Response of Moment Steel Frames”. *Journal of Civil Engineering and Surveying*, 45(4): 436-429. https://jcse.ut.ac.ir/article_23742.html (In Persian).

- Zaribafian, O., (2006). “Strategies for protecting historical monuments against earthquakes. Regional Scientific Conference on Desert Architecture”. Islamic Azad University, Ardestan Branch. paper/811793/1385 (In Persian).

- Zatir, A., & Mokhtari, A., (2014). “Research on the seismic performance of traditional buildings: Impact”. *International Journal of Research in Engineering & Technology*: 2(1): 15-20. https://www.researchgate.net/publication/332182391

- Zomorashidi, H., (2011). *Iranian Architecture, Traditional Materials.* Tehran, Zomord. (In Persian).

- https://imaggeo.egu.eu/view/13861/