Housing and Rural Environment
Print ISSN: 2008 - 4994 Online ISSN: 2588 - 6215
Homepage: https://jhre.ir

Analysis of technical chara cteristics of bricks in Kashan historial buildings

Fatemeh Parchebaf Motlagh[1], Amir Hossein Sadeghpour[2]✉, Babak Alemi[3]

1. Master student of architectural technology, Department of Architecture Technology, University of Kashan, Kashan, Iran. Email: fparchebaf@yahoo.com
2. Corresponding author, Associate Professor, Department of Architecture Technology, University of Kashan, Kashan, Iran. E-mail: sadeghpour@kashanu.ac.ir
3. Associate Professor, Department of Architecture Technology, University of Kashan, Kashan, Iran. E-mail: alemi@kashanu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 16 April 2024
Received in revised form 21 May 2024
Accepted 24 June 2024
Available online 29 June 2024

Keywords:
Brick,
historical city of Kashan,
mechanical resistance,
laboratory tests,
Chemical test.

ABSTRACT

Objective: Self-sufficiency and reliance on natural materials are fundamental principles of Iranian architecture, with brick being a locally abundant material in Iran. Over time, brick buildings require retrofitting, restoration, and enhancement. To gain a deeper understanding of brick and its retrofitting, it is essential to analyze historical bricks and incorporate past experiences in brick making. This research aims to examine the technical characteristics of bricks used in the historical buildings of Kashan city across different time periods. Five brick samples from these historical structures have been selected for analysis.

Method: The research employs a quantitative approach based on field studies and laboratory experiments. The experiments are categorized into three groups. The first group comprises basic tests, including density, specific gravity, moisture content, and water absorption. The second group encompasses mechanical tests, focusing on compressive and bending strength. The third category involves chemical tests conducted through X-ray Diffraction (XRD) analysis.

Results: The tests revealed that the specific weight of the samples ranged from 1.6 to 2.14 grams per cubic centimeter, while water absorption varied between 9.3 and 18.5 percent. The compressive strength was found to be between 53.12 and 195.27 kg/cm², and the bending strength ranged from 11.62 to 125.83 kg/cm². The findings indicate that basic characteristics significantly influence mechanical properties. As specific weight and volume density of the samples increase, their internal pore structure diminishes, leading to reduced moisture content and lower water absorption. Furthermore, higher sample density correlates with increased compressive and bending strength. The predominant chemical composition in the samples was quartz, while the presence of gypsum contributed to decreased mechanical resistance. In contrast, higher levels of quartz, anorthite, and albite enhanced the resistance of the samples

Conclusions: The physical and mechanical characteristics of brick samples remain relatively stable over time. Consequently, it appears that the resistance parameters are more influenced by the quality of the raw materials, sample density, and production methods rather than the age of the samples.

© The Author(s).
Publisher: Natural Disasters Research Institute (NDRI).
DOI: https://doi.org/10.22034/43.186.6

[Downloaded from jhre.ir on 2024-11-20]
[DOI: https://doi.org/10.22034/43.186.6]

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Iran is a vast country characterized by diverse climate zones. The traditional architectural design methods in Iran effectively address environmental challenges and incorporate specific systems for rural architecture tailored to each region. This type of architecture is aligned with the local climate and cultural context, ensuring minimal energy consumption while providing high levels of environmental comfort. A fundamental principle of traditional rural architecture is the utilization of locally available materials. Among these, soil stands out as one of the oldest, most abundant, and least expensive building materials, historically used by humans and still prevalent in many cities and villages. The variety of earth materials employed in construction reflects the diversity of local resources and building techniques. Brick, a commonly used earthen material, continues to play a significant role in construction, particularly in desert regions and rural areas. Understanding soil materials and examining traditional construction practices not only helps preserve cultural heritage and architectural identity but also offers viable solutions to contemporary environmental issues, particularly in light of limited global energy resources. Bricks are referred to by various names such as Ajor, Aghor, Agor, and Sagh in different contexts. The term "ajor" or "agor" has Greek origins, meaning unbaked clay (Hosseini and Seydin Khorasani, 2015). Due to their high thermal mass, bricks are pivotal for energy efficiency, especially in desert areas, where they mitigate the harsh climate of hot, dry summers and cold, dry winters. Additionally, their production does not demand extensive skills or advanced technology. Given the long-standing history of brick architecture in Iran, one might expect a wealth of research on the subject; however, there remains a significant gap in accessible and practical resources for the preservation, repair, and reinforcement of brick structures (Rahim Nia et al., 2013). In contrast, advanced industrial nations have shifted their focus towards reducing energy consumption and optimizing efficiency in construction, recognizing that it is impractical to satisfy the immense demand for building materials solely through industrial options like concrete and steel. No region possesses the requisite production capacity or financial resources to meet this demand. Consequently, clay and its derivatives, such as bricks, provide a viable alternative to industrial materials, and many developed countries are increasingly seeking to incorporate these natural building materials into their construction practices (Minke, 2006).

In addition, given the preservation of certain historical brick buildings, it is essential to analyze and examine the materials used in these structures. This analysis will enable the application of valuable techniques and experiences from various historical periods of brick making. Thus, it can be asserted that reinforcing brick structures is not feasible without first analyzing historical examples. Prior examination of these materials should serve as a foundation for future construction and research in this field. Moreover, considering the numerous historical cities in Iran, this research focuses on a specific segment of historical buildings in the extensive region of Kashan. As a historic city located in central Iran, Kashan boasts many ancient brick buildings, some dating back several centuries. This study aims to explore the types of bricks utilized in traditional buildings of Kashan across different historical periods, while also considering the city's past and leveraging the enduring and stable elements found in its brick structures. The research will encompass the history, aesthetic characteristics, chemical composition, physical properties, and construction techniques of these bricks, followed by a thorough analysis.

[Downloaded from jhre.ir on 2024-11-20]

[DOI: https://doi.org/10.22034/43.186.6]

Method

The research employs a quantitative methodology, grounded in field studies and laboratory experiments. The experiments are categorized into three groups. The first group consists of basic tests, including density, specific gravity, moisture content, and water absorption. The second group comprises mechanical tests, focusing on compressive and bending strength. The third group involves chemical tests conducted through X-ray Diffraction (XRD) analysis. All tests were performed in accordance with ASTM standards as well as the national standards of Iran (ISIRI). The following image presents the program for conducting laboratory studies along with their corresponding standard numbers.

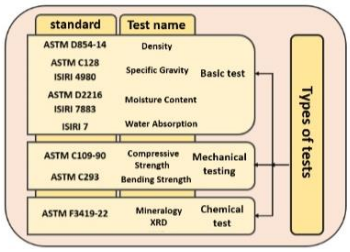


Figure 1. Classification of experiments conducted in research

In this research, five brick samples from four historical monuments in Kashan were tested across different time periods, with their characteristics detailed in Figure 2. The samples are designated with the letter "B" (representing the word "Brick") and are numbered sequentially according to their historical periods, from the past to the present. Alongside the historical period and age of the samples, the precise location and structural context of each sample are crucial for the examination and analysis of the test results. Consequently, the locations of the brick samples are indicated on the map presented in Figure 3.

Sample	historical period	Year (AD)*	Sample Location	Sample age (Year)
B1	Sassanid	200-650	Vigol fire temple	1350-1800
B2	Khwarazmshahis & Ilkhanians	1100-1400	Feizabad government citadel	600-900
B3	Qajar	1700-1900	Historical house adjacent to the market	100-300
B4 & B5	Pahlavi	1934	The building of the old spinning factory in Kashan	90

AD*: Anno Domini

Figure 2. General specifications of project brick samples.

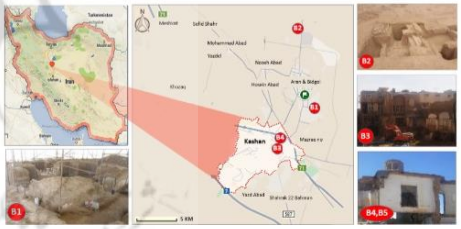


Figure 3. The position of preparing brick samples in the map and photo of its building. Original photo: Google Map

Figure 4 presents images of the samples along with their dimensions. Most samples exhibit a brown color, while only sample B2 displays a reddish hue. This red coloration is likely due to the presence of iron compounds in the soil used to create this brick. Additionally, the surface texture of sample B2 features patterns that appear deliberately roughened, which enhances the adhesion between the bricks.

Specifications	B1	B2	B3	B4	B5
Dimensions (cm)	*15×7×4	30×16×4.5	20×10×6	20×10×6	22×22×5
Brick image					

* Part of the brick

Figure 4. Appearance characteristics of brick samples

[Downloaded from jhre.ir on 2024-11-20]

[DOI: https://doi.org/10.22034/43.186.6]

Results

The analysis of the results indicates that specific weight is a fundamental parameter influencing the strength and quality of the samples. Sample B2 exhibits the highest specific weight, followed by sample B4, while sample B1 has the lowest specific weight. Additionally, samples B1 and B2 display the highest and lowest moisture content, respectively. Sample B3 has the highest percentage of water absorption, followed closely by sample B1, while sample B2 shows the lowest water absorption. The results of the compressive and bending strength tests on the brick samples are relatively consistent. Sample B2 demonstrates the highest compressive and bending strength, followed by sample B4, whereas sample B1 exhibits the lowest mechanical resistance. Furthermore, fundamental characteristics such as specific weight, moisture percentage, and water absorption are correlated with the mechanical structure of the bricks (as shown in Figure 5). From the examination of the brick samples, it can be concluded that an increase in specific weight corresponds to a decrease in moisture content and water absorption, which in turn enhances the compressive and bending strength of the bricks. In other words, a higher specific weight indicates greater density and compressibility, fewer voids, and consequently lower moisture and water absorption, leading to increased compressive and bending strength. Chemical testing using the XRD method revealed that quartz is the dominant phase in the samples. The significant presence of gypsum and a small amount of quartz in sample B1 has resulted in reduced mechanical resistance. Conversely, the presence of anorthite in sample B2 has improved its mechanical resistance, while the increased levels of albite in samples B3, B4, and B5 have also contributed to their enhanced mechanical resistance (Figure 6).

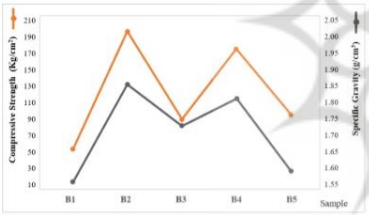


Figure 5. Comparison of two graphs of compressive strength and specific weight of samples according to time period

Sample	Basic test				Mechanical testing (Kg/ cm²)		Chemical testing
	Density	Specific Gravity (g/ cm³)	Moisture Content (%)	Water Absorption (%)	Compressive Strength	Bending Strength	Mineralogy (XRD)
B1	2.82	1.60	2.08	17.14	53.12	11.62	gypsum, diopside & albite
B2	2.63	2.14	0.60	9.3	195.27	125.83	anorthite, quartz & gypsum
B3	2.42	1.91	1.62	18.5	88.91	101.09	quartz, calcite and albite
B4	2.70	2.06	1.04	11.5	173.86	113.59	quartz, calcite and albite
B5	2.88	1.66	0.88	13.4	95.03	36.81	quartz, calcite and albite
Average	2.69	1.87	1.24	14.02	138.26	77.78	-

Figure 6. The results of tests performed on brick samples of Kashan historical monuments

Conclusions

This research examined the fundamental, mechanical, and chemical characteristics of brick samples from Kashan's historical buildings across four historical periods. The test results indicate that the foundational characteristics significantly influence the mechanical resistance of the bricks. Specifically, there is a direct relationship between specific weight, compressive strength, and bending strength, while these parameters exhibit an inverse relationship with moisture content and water absorption. As the specific weight and volume density of the samples increase, the internal voids decrease, leading to reduced moisture content and water absorption. Additionally, higher density correlates with increased compressive and bending strength. Over time, the physical and mechanical properties of the brick samples do not show a consistent upward or downward trend; in other words, the age of the samples does not appear to affect their quality. Based on these findings, it can be concluded that the age and historical period have minimal impact on the quality of the bricks. Instead, the characteristics of the raw materials, the skill level of the artisans, and the methods used in production and processing are more influential factors in determining the quality of the bricks.

[Downloaded from jhre.ir on 2024-11-20]

[DOI: https://doi.org/10.22034/43.186.6]

مسکن و محیط روستا
شاپا چاپی: ۴۹۹۴ - ۲۰۰۸ شاپا الکترونیکی: ۶۲۱۵ - ۲۵۸۸
Homepage: https://jhre.ir

تحلیل ویژگی‌های فنی آجر در بناهای تاریخی کاشان

فاطمه پارچه‌باف‌مطلق[۱]، امیرحسین صادقپور[۲]✉، بابک عالمی[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی‌ارشد تکنولوژی معماری، گروه فناوری معماری، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران. رایانامه: fparchebaf@yahoo.com
۲. نویسندهٔ مسئول، دانشیار، گروه فناوری معماری، دانشکدهٔ معماری و هنر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران. رایانامه: sadeghpour@kashanu.ac.ir
۳. دانشیار، گروه فناوری معماری، دانشکدهٔ معماری و هنر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران. رایانامه: alemi@kashanu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۴
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹

کلیدواژه‌ها:
آجر،
شهر تاریخی کاشان،
مقاومت مکانیکی،
آزمایشات آزمایشگاهی،
آزمایش شیمیایی.

چکیده

هدف: خودبسندگی و تکیه بر مصالح بوم‌آورد یکی از اصول معماری ایرانی بوده و آجر از جمله مصالح بومیِ اقلیمی با میزان دسترسی بسیار بالا در ایران است. با گذشت زمان بناهای آجری به تدریج نیازمند مقاوم‌سازی، تقویت، مرمت و بهسازی بوده و برای شناخت بیشتر و اصولی آجر و مقاوم‌سازی آن، تحلیل و بررسی آجرهای تاریخی ضروری به نظر می‌رسد تا از تجاربِ ساخت آجر و راهکارهای گذشتگان در گذر زمان استفاده شود. هدف این پژوهش مطالعه ویژگی‌های فنی آجرهای به‌کار رفته در بناهای تاریخی شهر کاشان در دوره‌های زمانی مختلف است.

روش پژوهش: در همین راستا، پنج نمونه‌ی آجری از بناهای تاریخی کاشان، انتخاب شده و مورد بررسی قرارگرفته‌اند. روش پژوهش کمی و مبتنی بر مطالعات میدانی و آزمایشات آزمایشگاهی است. آزمایش‌های انجام‌شده به سه دسته تقسیم می‌شوند. دسته‌ی اول، آزمون‌های پایه شامل چگالی، وزن مخصوص، درصدرطوبت و جذب آب هستند. دسته‌ی دوم آزمون‌های مکانیکی شامل مقاومت فشاری و خمشی بوده و دسته سوم آزمایش شیمیایی، از نوع آنالیز شیمیایی به روش XRD است. با توجه به آزمایش‌های انجام شده، وزن مخصوص نمونه‌ها در محدوده‌ی ۱/۶ تا ۲/۱۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده و جذب آب نمونه‌ها از ۹/۳ تا ۱۸/۵ درصد به‌دست آمد. همچنین مقاومت فشاری آن‌ها در بازه‌ی ۵۳/۱۲ تا ۱۹۵/۲۷ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع بوده و مقاومت خمشی آن‌ها نیز در محدوده‌ی ۱۱/۶۲ تا ۱۲۵/۸۳ حاصل شد.

یافته‌ها: با توجه به نتایج به دست‌آمده، می‌توان‌گفت مشخصات پایه، بر مشخصات مکانیکی مؤثر است. با افزایش وزن مخصوص و تراکم حجمی نمونه‌ها، خلل و فرج داخل آن‌ها کاهش یافته و درصد رطوبت موجود در آن و جذب آب نیز کاهش می‌یابد. به علاوه هرچه تراکم نمونه بیشتر شود مقاومت فشاری و خمشی آن‌ها نیز افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری: ترکیب شیمیایی غالب در نمونه‌ها نیز کوارتز بوده و وجود گچ در نمونه‌ها سبب کاهش مقاومت مکانیکی شده و افزایش کوارتز، آنورتیت و آلبیت سبب مقاومت نمونه‌ها شده‌است. با گذشت زمان نیز مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های آجری تغییر معناداری ندارند؛ بنابراین در مجموع به نظر می‌رسد که پارامترهای مقاومتی نمونه‌ها بیشتر به کیفیت مصالح اولیه و میزان چگالی نمونه‌ها و نحوه تولید وابسته بوده و قدمت و سن نمونه‌ها تاثیر قابل توجهی ندارد.

DOI: https://doi.org/10.22034/43.186.6
© نویسندگان.
ناشر: پژوهشکده سوانح طبیعی.

[Downloaded from jhre.ir on 2024-11-20]
[DOI: https://doi.org/10.22034/43.186.6]

مقدمه

ایران کشور پهناوری با مناطق مختلف آب‌وهوایی است، روش طراحی معماری سنتی ایران از زمان‌های گذشته به نحوی بوده است که بر مشکلات محیط‌زیستی در معماری فایق امده و دارای سامانهٔ ویژه‌ای برای طراحی معماری روستایی در هر منطقه است. این معماری کاملاً منطبق بر اقلیم و فرهنگ مردم هر منطقه ساخته شده و به حداقل مصرف انرژی نیاز داشته و آسایش محیطی در این نوع معماری بسیار بالاست. یکی از اصول رایج در معماری سنتی برای ساخت خانه در معماری روستایی، استفاده از مصالح بومی و در دسترس است. خاک یکی از قدیمی‌ترین، گسترده‌ترین، در دسترس‌ترین و ارزان‌ترین مصالح ساختمانی مورد استفاده توسط انسان در طول تاریخ بوده و هنوز در بسیاری از شهرها و روستاها مصالح اصلی ساختمان است. مصالح خاکی مورد استفاده در ساخت‌وساز به دلیل تنوع منابع محلی و تکنیک‌های ساختمانی بسیار متنوعند. آجر از رایج‌ترین مصالح خاکی است که انسان برای ساخت بنا از آن استفاده می‌کرده و هنوز در بسیاری از مناطق کویری به‌خصوص در روستاها کاربرد دارد. بنابراین شناخت مصالح خاک بررسی تجربیات سنتی نه تنها باعث حفظ فرهنگ، تمدن و هویت معماری می‌شود، بلکه با توجه به کمبود منابع انرژی در جهان، پاسخ مناسبی به مسائل زیست‌محیطی بوده و زمینه‌ای برای ارائهٔ راهکارهای مقاوم‌سازی خواهد بود.

آجر در منابع مختلف آجور، آغر، آگر، آگور و ساغ نامیده شده است. کلمهٔ آجور یا آگور از واژهٔ یونانی به معنای خشتِ خامِ پخته‌شده است (Hosseini & Seyedain Khorasani, 2015). در لغت‌نامهٔ دهخدا، آجر معرب آگور و به معنای خشتِ پخته است (Dehkhoda, 1998). در فرهنگ معین نیز علاوه بر این تعریف، آجر به معنی خشتی است که در کوره پخته شده و در اندازه‌های معمول ۲۰×۲۰ و ۲۵×۲۵ سانتیمتر است که در ساختمان‌سازی با انواع مختلف همچون نظامی، خطایی، فشاری، قزاقی و غیره کاربرد دارد (Arianpour, 1991). در کل آجر در فرهنگ ایران گلِ پخته و خشتِ مکعب‌مستطیلِ پخته نامیده می‌شود و در فرهنگ لغات انگلیسی، BRICK نامیده شده است (Harris, 2002). استفاده از آجر به دلیل ظرفیت حرارتی بالای آن عاملی مهم در استفادهٔ بهینه از انرژی بوده و زندگی سخت و طاقت‌فرسا در مناطق کویری را در تابستان‌های گرم‌وخشک و همچنین زمستان‌های سردوخشک، بهبود می‌بخشد. علاوه بر این برای تولید آن نیاز به مهارت و تکنولوژی بالایی نیست. انتظار می‌رود با توجه به پیشینهٔ طولانی معماری آجری در ایران، پژوهش‌های مرتبط با این موضوع زیاد باشد، ولی با وجود این، پیوسته با کمبود منابع و مراجع مفید و قابل استفاده برای حفاظت، مرمت و استحکام‌بخشی بناهای آجری روبه‌رو هستیم (Rahimnia et al., 2011). در حالی که با توجه به پیشرفت‌های علمی گسترده در زمینه‌های متفاوت مهندسی و نظر به محدودیت منابع انرژی در جهان، کشورهای پیشرفتهٔ صنعتی بر آن شده‌اند تا با نگاه متمرکز به کاهش مصرفت انرژی و بهینه آن، کلیهٔ مطالعات خود را مجدداً برنامه‌ریزی و طرح کنند؛ آن‌ها معتقدند برآوردن نیازهای عظیم برای ساخت با مصالح ساختمانی صنعتی، مانند بتن و فولاد و همچنین با تکنیک‌های ساختمانی جدید، غیرممکن است و هیچ منطقه‌ای دارای ظرفیت تولیدی یا منابع مالی موردنیاز برای برآوردن این تقاضا نیست. در صورتی که گِل و فراورده‌های آن از قبیل خشت و آجر، مصالح ساختمانیِ طبیعی در دسترس است و از این نظر بر مصالح ساختمانی صنعتی مانند بتن، آهک، ماسه و سنگ برتری دارد و کشورهای پیشرفته به منظور استفاده از این مصالح و مقاوم‌سازی آن‌ها در تلاشند (Minke, 2006).

علاوه بر این با توجه به برجای‌ماندن برخی بناهای آجریِ تاریخی، به نظر می‌رسد تحلیل و بررسی مصالح موجود در این ابنیه ضروری است تا بتوان از تجارب و تکنیک‌های گرانبهای ساخت آجر در دوره‌های تاریخی مختلف استفاده کرد. به همین جهت می‌توان گفت استفاده از آجر و ارائهٔ راهکارهای مقاوم‌سازی آن بدون تحلیل و بررسی نمونه‌های تاریخی اصولی نبوده و بهتر است در ابتدا، مصالح تاریخی بررسی شود و زمینه‌ای برای ساخت و پژوهش‌های بعدی در این حوزه باشد. علاوه بر این، با توجه به تعدد شهرهای تاریخی ایران، در این پژوهش کاشان، که بخشِ کوچکی از ابنیهٔ تاریخی موجود در پهنهٔ وسیع ایران است، مطالعه می‌شود. شهر تاریخی کاشان در مرکز ایران و دارای بناهای تاریخیِ آجری بسیار است که قدمت برخی از آنان چندصد سال است. این پژوهش در نظر دارد با نگاه به گذشتهٔ شهر کاشان و بهره‌گیری از عناصر مطلوب و پایدار باقیمانده از

[Downloaded from jhre.ir on 2024-11-20]

[DOI: https://doi.org/10.22034/43.186.6]

بناهای آجری، به بررسی انواع آجرهای استفاده‌شده در ابنیهٔ سنتی کاشان در ادوار تاریخی مختلف بپردازد. همچنین تاریخچه، مشخصات ظاهری، ترکیبات شیمیایی، خصوصیات فیزیکی و تکنیک‌های ساخت و پارامترهای مقاومتی، از طریق مطالعات میدانی و آزمایش‌های آزمایشگاهیِ مختلف مورد تحلیل و بررسی قرارگرفته است. علاوه‌براین برای تحلیل صحیح سازه در بناهای تاریخی اطلاع از خصوصیات فنی و رفتار مصالح آجر به عنوان جزء اصلی تشکیل دهنده سازه الزامی است و تحقیق حاضر با این هدف انجام شده و در نهایت نتایج این تحقیق می تواند برای تحلیل صحیح سازه و مقاوم سازی بناهای تاریخی به کار می‌رود.

ـ مشخصات پایه و فیزیکی مصالح آجری در ابنیهٔ تاریخی کاشان چیست؟

ـ پارامترهای مقاومتی نمونه‌های آجر در بناهای تاریخی در چه محدوده‌ای است؟

ـ با تغییر دوره‌های تاریخی مشخصات نمونه‌های آجری چگونه تغییر می‌کند؟

پیشینه پژوهش

استفاده از آجر و معماریِ خاکی در چند دهه‌ی اخیر در کشورهای مختلف جهان به شدت رشدکرده‌است. این تحول در مجموعه‌ای از کنفرانس‌های بین‌المللی که در سراسر جهان برگزارشده ، نمایان است. از سال ۱۹۷۲ کنفرانس‌های زیادی در ایران برگزارشده و کمکِ زیادی به درک و فهم زمین به‌عنوان یک مصالح ساختمانی مناسب و بادوام کرده که از نظر تاریخی، استفاده از آن یک انتخاب عمدی بوده است. از جمله همایش‌های برگزار شده در ایران، همایش ملی آجر و آجرکاری در هنر و معماری ایران در بهمن ماه سال ۱۳۹۵ است. این همایش جهت جمع‌آوری پژوهش‌ها و تحقیقات پراکنده و غیر مستمر در حوزه آجر بوده تا در این حوزه دستاوردهای پژوهشی افزایش یابد. در واقع نیاز، به‌نوبهٔ‌خود، درک مفهوم حمایتِ موردنیاز برای انجامِ پژوهش‌ها در زمینهٔ آجر را ایجاد کرده است (Avrami et al., 2008; Cruces, 1990). وزارت راه و شهرسازی و معاونت مسکن و ساختمان نیز، مبحث هشتم مقررات ملی ساختمان ایران را تدوین کرده که شامل اصول و قواعدی برای ساختمان‌های بنایی خشتی، آجری و سنتی است (Ministry of Roads, Urban Development, 2013). علاوه بر این در حوزهٔ شناخت و تکنیک‌های ساخت آجر، در داخل و خارج کشور پژوهش‌هایی صورت گرفته است. زمرشیدی در کتاب خود با عنوان *معماری ایران، اجرای ساختمان با مصالح سنتی*، بر فنون مختلف ساختمان‌سازیِ اصیل در اقلیم‌های متنوعِ کشور با مصالحی از قبیل خشت و آجر پرداخته و معتقد است با توجه به کمبود مصالح جدید از قبیل سیمان و انواع فولادهای ساختمانی و روش‌های خاص فنی و اجرایی و تکنولوژی آن‌ها و با توجه به توان مالی افرادِ نیازمند به فضاهای مسکونی در شهرها و روستاها، با استفاده از مصالح محلی مانند خاک رس، خشت و آجر می‌توان بناهایی کاملاً مقاوم و باربر حتی مرتفع و ضدزلزله با اجرای کامل عایق رطوبتی ساخت (Zemorshidi, 2012). مینک در کتاب خود با عنوان *ساختمان با طراحی زمین و فناوری یک معماری پایدار* به زمین به عنوان مصالح ساختمانی پرداخته و دستورالعمل‌های موردنیاز را طبق تحقیقات علمی و تجربیات عملی برای استفاده از آن در زمینه‌های مختلف ارائه کرده است (Minke, 2006). حسن رحیمی در کتاب خود با نام مصالح ساختمانی، به بررسی مشخصات فنی و فیزیکی انواع مصالح از جمله خشت و آجر پرداخته و نحوهٔ ساخت انواع مختلف آن‌ها را بیان کرده است (Rahimi, 2006). حامی نیز در کتاب خود به ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مصالح از جمله آجر به طور مفصل پرداخته است (Hami, 2019). مطهری‌تبار در پژوهش خود با توجه به کاربرد آجر از گذشته تا به امروز و ضرورت آسیب‌شناسی آن، به بررسیِ آسیب‌های طبیعی و شیمیاییِ آجر پرداخته و راهکارهایی به منظور بهبودِ وضعیت بناهای تاریخی آجری که دچار آسیب شده‌اند، ارائه کرده است (Motahari Tabar, 2014). خواجه‌نوری و همکاران به بررسی چگونگی شکل‌گیری و روند تکامل آجر در معماری ایران پرداخته‌اند و خواص فیزیکی و شیمیایی آن و عناصر ساختاری ابنیهٔ آجری را، که در پاسخ به نیازهای استاتیکی در معماری ایران شکل گرفته‌اند، به منظور احیای دوبارهٔ آجر در معماری معاصر ایران بررسی و تحلیل کرده‌اند (Khaja Nouri, Flameki, Kobudar Angi, 2016). زمرشیدی و صادقی حبیب‌آباد نیز به بیان چگونگیِ روند تولید آجر و انواع آن و بررسی تزیینات آجری در معماری اسلامی ایران پرداخته‌اند (Zemorshidi & Sadeghi Habibabad, 2017). لوپز و همکاران نیز در پژوهش خود به بررسی استفاده از فیبر کربن، یک افزودنی در تولید آجرهای جدید، پرداخته‌اند و آن‌ها را از نظر کانی‌شناسی،

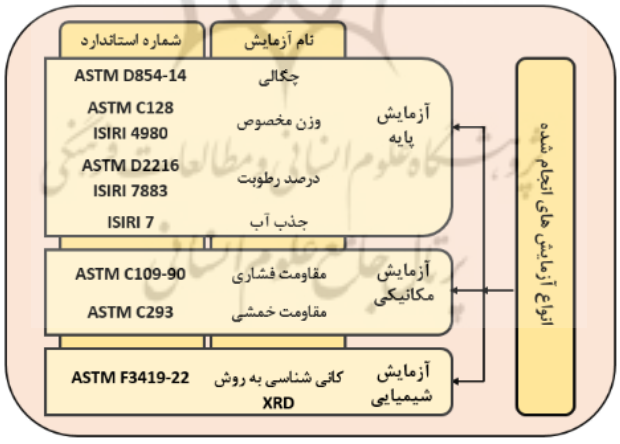
[Downloaded from jhre.ir on 2024-11-20]

[DOI: https://doi.org/10.22034/43.186.6]

فیزیکی و مکانیکی برای تعیین مناسب‌بودن آن‌ها را برای استفاده در صنعت ساختمان، تجزیه‌وتحلیل کرده‌اند (L´opez et al, 2023). شیرگیره و همکاران به بررسی خاکستر چوب، مواد افزودنی به آجر، پرداخته‌اند و انواع آزمایش‌های فنی را روی آن انجام دادند (Shirgire et al, 2023). جاوِد و همکاران در پژوهش خود به بررسی دقیق مقاومت فشاری سه نمونه آجر و ترکیب ملات‌های مختلف با آن‌ها پرداخته‌اند (Javed et al, 2024). رشنویی و همکاران نیز روی دوام آجر و تاثیر چرخه های انجماد و آب شدن بر خصوصیات فیزیکی (تخلخل و جذب آب) و مکانیکی آن کار کرده‌اند (Reshnooi, Jamshidi & Ajal Luian, 2023). یداللهی و جهانگیری نیز در پژوهش خود با افزودن مواد افزودنی روی خواص مکانیکی و حرارتی آجر کار کرده‌اند (Yadollahi & Jahangiri, 2023). خانلری و همکاران ویژگی‌های مهندسی خاک‌های رسی مناطقی از استان همدان را به منظور استفاده در تولید آجر، مورد مطالعه قرار داده‌اند و روی نمونه‌های آجری آن منطقه آزمایش‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی را مطابق با استانداردهای جهانی انجام داده‌اند (Khanlori, Namazi & Abdi lor, 2012). در نهایت با توجه به پژوهش‌های ذکرشده در زمینهٔ آجر، این پژوهش در نظر دارد با توجه به ضرورت مطالعه و استفاده از این مصالح در اکثر مناطق ایران به‌خصوص در روستاها، به آنالیز و بررسی آجرهای موجود در بناهای تاریخی کاشان بپردازد تا از تجارب گرانبهای ساخت و پرداخت آن‌ها در دوره‌های مختلف بهره بگیرد و زمینه‌ای برای پژوهش‌های بعدی به منظور ارائهٔ راهکارهای مقاوم‌سازی آجر باشد.

روش‌شناسی پژوهش

در این تحقیق به منظور مطالعه‌ی خصوصیات فنیِ آجر در دوره‌های مختلف با بررسی سوابق بناهای تاریخیِ منطقه از چهار بنا مربوط به ادوار متفاوت نمونه‌گیری شده و در وهله‌ی اول مشخصات ظاهری آن‌ها مورد بررسی قرارگرفته‌است. در ادامه آزمایش‌های مختلف، مطابق با استانداردهای ASTM و همچنین استاندارد ملی ایران (ISIRI)، روی نمونه‌ها انجام‌شده و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌است. به طور کلی آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، سه دسته‌ی آزمایش‌های پایه، آزمایش‌های مکانیکی و آزمایش شیمیایی هستند. در شکل ۱، برنامه انجام مطالعات آزمایشگاهی به همراه شماره استاندارد آن‌ها ارائه شده‌است.



شکل ۱. دسته‌بندی آزمایش‌های انجام‌شده در پژوهش

قبل از تحلیل و بررسی آزمایش‌ها و نتایج به‌دست‌آمده، ضرورت دارد برخی مفاهیم به‌کاررفته در پژوهش، تحلیل و بررسی شود. بنابراین ضمن تعریف آجر، مشخصات پایه و مشخصات مکانیکی آن به‌اختصار توضیح داده شده و نحوهٔ انجام آزمایش شیمیایی نیز ارائه شده تا تحلیل‌ها و نتایج به‌دست‌آمده از این آزمایش‌ها، قابل فهم باشد.

مشخصات پایه

مشخصات پایهٔ آجر شامل پارامترهای چگالی، وزن مخصوص، درصد رطوبت و میزان جذب آب است که در ادامه به‌اختصار به آن پرداخته شده‌است.

[Downloaded from jhre.ir on 2024-11-20]
[DOI: https://doi.org/10.22034/43.186.6]

چگالی: چگالی یا وزن مخصوص نسبی، بیان‌کنندهٔ نسبت جرم واحد حجم آن ماده به جرم واحد حجم آب در ۴ درجهٔ سانتیگراد است. مشخصهٔ چگالی روی خاکِ نمونه‌های آزمایشی انجام می‌شود و محدودهٔ چگالیِ خاک‌های مختلف بین ۲/۴ تا ۲/۹ است (Sarmd nahri, & Kardan, 2009).

وزن مخصوص: وزن مخصوص آجرهای مختلف بر حسب نوع، ساخت و روش ساخت و نوع مصالحی که در آن استفاده شده، متفاوت است. مثلاً در آجرهای سوراخ‌دار با ابعاد و مصالح مساوی، آجری که تعداد کمتری سوراخ دارد دارای وزن مخصوص بیشتری است و یا اگر مقدار دانه‌های سنگی در مصالح اولیهٔ آجر بیشتر باشد وزن مخصوص آن بالاتر است. به طور متوسط وزن مخصوص آجر مرغوب در حدود ۱/۸ گرم بر سانتیمتر مکعب است و نباید از ۱/۷ گرم بر سانتیمتر مکعب کمتر باشد (Amiri, Kalantari & Mehri, 2015).

درصد رطوبت: خصوصیات انتقال رطوبت در آجر به گونه‌ای است که آن را یکی از مناسب‌ترین مصالح ساختمانی می‌دانند، زیرا آجر دارای قدرت جذب سطحی بسیار پایین و رطوبت کمی است و زمانی که رطوبت در آن نفوذ می‌کند، سریع دفع می‌شود. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که آجرهای مرغوب تقریباً۰/۵درصد رطوبت دارند و میزان جذب رطوبت و دفع آن تقریباً با یکدیگر برابر است (Hosseini & Seyedain Khorasani, 2015).

جذب آب: میزان یا قابلیت جذب آب در آجرها یکی از معیارهای مهم ارزیابیِ کیفیت و دوام آن‌هاست. جذب آب آجر برحسب درصد بیان‌شده و برابر با نسبت وزن آب جذب‌شده به وسیلهٔ آجر، تقسیم بر وزن خشک همان آجر است. میزان جذب آب مطابق با استاندارد ایران در آجرهای دستی حداکثر ۲۰درصد، در آجرهای ماشینی ۱۶درصد و حداقل برای هر دو نوع آجر ۸درصد مشخص شده است. میزان جذب آبِ کم، باعث خوب نچسبیدن ملات به آجر و جذب آب زیاد سبب یخ‌زدگی آجر می‌شود. بهترین درصد جذب آب برای آجر بین ۱۳ تا ۱۵ درصد است (ISIRI 7, 2004).

مقاومت مکانیکی

مشخصات مکانیکی آجر شامل مقاومت آن در برابر نیروهای مختلف از جمله فشار، کشش، برش و خمش است. از میان این تنش‌ها میزان مقاومت فشاری آجر از مشخصه‌های فنی مهم آن بوده و به کیفیت مواد خام و شرایط پخت آن وابسته است که امروزه با بهبود شرایط ساخت آجر و افزایش سطح کیفی مواد خام و اولیهٔ آن، مقدار مقاومت فشاری آن افزایش یافته است. جدول ۱، مقاومت فشاری به‌دست‌آمدهٔ آجرها را در منابع مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۱. مقاومت فشاری آجر در منابع مختلف

منبع تحقیقاتی	مقاومت فشاری (kg/cm^2)
Rahimi, 2006	۲۷۰ـ۱۴۰
Hakimi, Ganji Dost, Mokhtarani, 2012	۱۸۰ـ۱۴۰
Khanlori, Namazi & Abdi lor, 2012	۲۰۰ـ۶۰
Hejazi, Baranizadeh, Dai, 2013*	۵۰ـ۲۰
Fahmi et al, 2022	۲۱۰ـ۱۴۰
محدودهٔ تغییرات	۲۷۰ـ۲۰

* مربوط به نمونه‌های آجر بناهای تاریخی

آزمایش شیمیایی

روش پراش‌سنجی پرتو ایکس[1] روش مستقیمی برای تعیین نوع فازها و ساختار بلورین مواد است. در این آزمایش دراثر برخورد پرتوهای اشعهٔ ایکس با اتم‌ها یا مولکول‌های یک ماده طبق رابطهٔ براگ ($\lambda= 2d\sin\theta$)، پرتوها پراکنده می‌شوند. شرط پراش یا پراکنده‌شدن پرتوها آن است که طول موجی کمتر از ۶ آنگستروم داشته باشند. در این صورت مطابق با رابطهٔ براگ با دردست‌داشتن طول موج (λ) و زاویهٔ تابش (θ) فاصلهٔ بین صفحات بلوری (d) به دست می‌آید. برای آنالیز مواد با این روش، نمونه‌ها به وسیلهٔ آسیاب به صورت پودر با قطر ۷۵ میکرون مهیا شده و تقریباً ۲۰میلی‌گرم از نمونهٔ پودری روی صفحهٔ

1. (XRD : X- ray diffraction)

[Downloaded from jhre.ir on 2024-11-20]

[DOI: https://doi.org/10.22034/43.186.6]

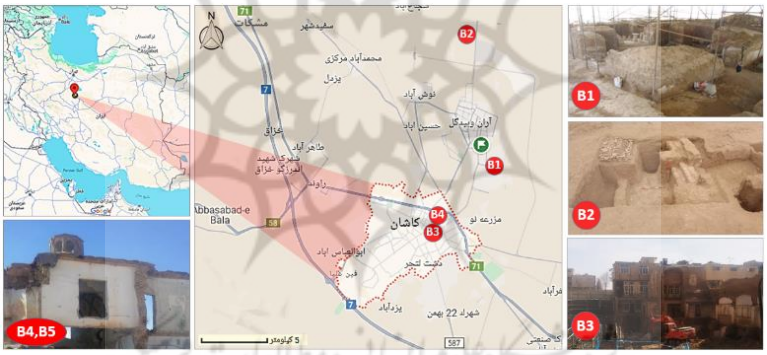
شیشه‌ای نمونه‌گیر قرار می‌گیرد، سپس آنالیز نمونه‌های پودرشده به وسیلهٔ دستگاه XRD انجام می‌شود (Golestanifard, Bahrevar, & Salahi, 2004).

معرفی نمونه‌های آزمایشی

در این تحقیق ۵ نمونه آجر از ۴ بنای تاریخی کاشان در دوره‌های مختلف زمانی، آزمایش شده‌اند و مشخصات آن‌ها در جدول ۲، ذکر شده است. نحوهٔ نام‌گذاری نمونه‌ها بدین صورت است که این نمونه‌ها با حرف انگلیسی B (ابتدای کلمهٔ Brick به معنی آجر) نشان داده شده‌اند و به ترتیب دورهٔ زمانی از گذشته تا کنون شماره‌گذاری شده‌اند. علاوه بر دورهٔ تاریخی و قدمت نمونه‌ها، محل دقیق نمونه‌ها و بنای آن‌ها در بررسی و تحلیل نمونه‌های آزمایشی بسیار حائز اهمیت است. بنابراین موقعیت نمونه‌های آجری، در شکل ۲، روی نقشه نشان داده شده است.

جدول ۲. مشخصات عمومی نمونه‌های آجری پروژه

شمارهٔ نمونه	دورهٔ تاریخی	سال	موقعیت نمونه	سن نمونه (سال)	منبع شناسایی دوره تاریخی
نمونهٔ B1	دورهٔ ساسانی	۲۰۰ـ۶۵۰ میلادی	آتشکدهٔ وی‌گل	۱۳۵۰ـ۱۸۰۰	(در حال مطالعه)[۲]
نمونهٔ B2	دورهٔ خوارزمشاهیان و ایلخانیان	۵۰۰ـ۸۰۰ هجری شمسی	ارگ حکومتی فیض‌آباد	۶۰۰ـ۹۰۰	(در حال مطالعه)[۳]
نمونهٔ B3	دورهٔ قاجار	۱۱۰۰ـ۱۳۰۰ هجری شمسی	خانهٔ تاریخی مجاور بازار کاشان	۱۰۰ـ۳۰۰	Bagh Sheikhi, 2021
نمونهٔ B4 و B5	دورهٔ پهلوی	۱۳۱۳هجری شمسی	بنای کارخانهٔ قدیمی ریسندگی کاشان	۵۰ـ ۱۰۰	Shirinkam, 2010



شکل ۲. موقعیت تهیهٔ نمونه‌های آجری در نقشه و عکس بنای آن، (Google Map)

مشخصات ظاهری نمونه‌ها به درک بهتر و شناخت مشخصات فنی آن‌ها کمک می‌کند. در واقع نمای آجرها، بستر و زمینهٔ مناسب برای مطالعات آسیب‌شناسی و فن‌شناسی نمونه‌ها را فراهم می‌کند. در جدول ۳، مشخصات ظاهریِ نمونه‌ها شامل ابعاد، بافت، رنگ، فرم و عملکرد ذکر شده است. مطابق با این جدول، بافت همهٔ آجرها همگن و یکدست است. رنگ اکثر نمونه‌ها نیز قهوه‌ای بوده و فقط نمونهٔ B2 نسبت به نمونه‌های دیگر رنگ متفاوتی دارد و متمایل به قرمز است. به نظر می‌رسد دلیل قرمزبودن این نمونه، وجود ترکیبات آهن در خاک مصرفی این آجر است. علاوه بر این نمونهٔ B5 فرسایش‌نیافته و دارای فرم مشخص است در صورتی که سایر نمونه‌ها فرسایش‌یافته‌اند. بافت سطحی نمونهٔ B2 نیز دارای نقوش است که می‌توان گفت به‌عمد مضرس شده و این کار برای چفت‌وبست‌شدن بهتر آجرها روی یکدیگر انجام شده است.

جدول ۳. مشخصات ظاهری نمونه‌های آجری

مشخصات	B1	B2	B3	B4	B5
ابعاد(cm)	۱۵×۷×۴*	۳۰×۱۶×۴/۵	۲۰×۱۰×۶	۲۰×۱۰×۶	۲۲×۲۲×۵
بافت	همگن و یکدست	همگن و یکدست	همگن و یکدست	همگن و یکدست	همگن و یکدست

۲ و ۳. این دو بنا در حال حاضر توسط گروه باستان شناسی دانشگاه کاشان در مرحله کاوش و مطالعه قرار دارد و بر اساس اظهارات مدیر گروه مطالعات نتایج به دست آمده تا این مرحله، دوره تاریخی تعیین شده را نشان می دهد و مطالعات در حال ادامه وتدقیق است.

[Downloaded from jhre.ir on 2024-11-20]
[DOI: https://doi.org/10.22034/43.186.6]

رنگ	قهوه‌ای روشن	متمایل به قرمز	قهوه‌ای روشن	قهوه‌ای روشن	قهوه‌ای روشن
فرم	فرسایش‌یافته با فرم مشخص	فرسایش‌یافته با فرم مشخص خطوط عمدی روی سطح آجر	فرسایش‌یافته با فرم مشخص	فرسایش‌یافته با فرم مشخص	تغییرنکرده با فرم مشخص
عملکرد	احداث دیوار باربر	برپاسازی کالبد بنا در قالب جرز	احداث دیوار باربر	برپاسازی کالبد بنا در قالب جرز	برپاسازی کالبد بنا در قالب جرز
تصویر آجر					

* بخشی از آجر

یافته‌های پژوهش

در این بخش مشخصات فنی نمونه‌ها شامل مشخصات فیزیکی و مکانیکی کامل شرح داده شده است. مشخصات فیزیکی نمونه‌ها شامل چگالی، وزن مخصوص، درصد رطوبت و جذب آب است. مشخصات مکانیکی در این پروژه نیز شامل مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌هاست. علاوه بر این، ترکیبات شیمیایی نمونه‌ها به روش XRD ارائه شده است. آزمایشات تعیین مشخصات پایه و خصوصیات مکانیکی نمونه ها در آزمایشگاه مصالح و بتن و آزمایش تعیین ترکیبات شیمیایی نمونه‌ها در آزمایشگاه XRD دانشگاه کاشان انجام گردید.

آزمایش پایه

چگالی

مطابق با استاندارد ASTM D854-14، چگالی نمونه‌های این تحقیق به دست آمده و داده‌های آن‌ها در جدول ۴، ارائه شده است. نمونهٔ دورهٔ قاجار (B3) کمترین مقدار و نمونهٔ دورهٔ پهلوی (B5)، بیشترین مقدار چگالی را در میان نمونه‌ها دارند.

جدول ٤. داده‌های آزمایشی چگالیِ نمونه‌های آجری پروژه

شماره نمونه	B1	B2	B3	B4	B5	میانگین
چگالی (G_S)	۲/۸۲	۲/۶۳	۲/۴۲	۲/۷۰	۲/۸۸	۲/۶۹

وزن مخصوص (دانسیته)

وزن مخصوص نمونه‌های آجری مطابق با استانداردهای ASTM C128 و ISIRI 4980 به دست آمده و نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است. مطابق با این جدول، آجر ساسانی (B1) با عدد ۱/۶۰ گرم بر سانتیمتر مکعب پایین‌ترین و آجر خوارزمشاهیان (B2) با عدد ۲/۱۴ گرم بر سانتیمتر مکعب بالاترین میزان دانسیته را دارند و این داده‌ها با گذر زمان ارتباط مستقیمی ندارند.

جدول ۵. وزن مخصوص یا دانسیتهٔ نمونه‌های آجری پروژه

شمارهٔ نمونه	B1	B2	B3	B4	B5	میانگین
وزن مخصوص (g/cm^3)	۱/۶۰	۲/۱۴	۱/۹۱	۲/۰۶	۱/۶۶	۱/۸۷

درصد رطوبت

جدول ۶، داده‌های آزمایشگاهی و درصد رطوبت نمونه‌های آجری را نشان می‌دهد. این نتایج آزمایشگاهی مطابق با استانداردهای ASTM D2216 و ISIRI 7883 به دست آمده‌اند. مطابق با این جدول در نمونه‌های آجری، کمترین میزان درصد رطوبت، آجر دورهٔ خوارزمشاهیان (B2) و بیشترین مقدار، آجر دورهٔ ساسانی (B1) است. البته درصد رطوبت به شرایط جویِ محلِ نمونه‌ها و فصل برداشتِ آن‌ها نیز بسیار وابسته است.

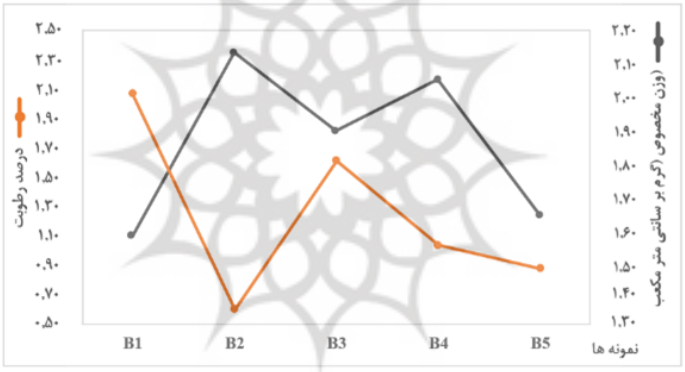
[Downloaded from jhre.ir on 2024-11-20]

[DOI: https://doi.org/10.22034/43.186.6]

شکل ۳، نمودار درصد رطوبت آجرهای آزمایشی به ترتیبِ دورهٔ زمانی به همراه نمودار وزن مخصوص آن‌ها را نشان می‌دهد. مطابق با این تصویر، درصد رطوبت آجرها بر اساس دورهٔ زمانی، سیر نزولی یا صعودی ندارند، ولی به‌جز نمونهٔ دورهٔ خوارزمشاهیان به نظر می‌رسد که با بهبود کیفیت آجر در دوره‌های جدیدتر میزان درصد رطوبت نمونه‌های آجری کاهش یافته که به نظر می‌رسد دلیل آن، استفاده از ابزارهای مناسب به منظور تراکم و فشرده‌سازی آجر بوده و آجرها با گذشت زمان دارای خلل‌وفرج کمتری شده‌اند. علاوه بر این، با مقایسهٔ دو نمودار وزن مخصوص و درصد رطوبت نمونه‌ها، می‌توان گفت دو پارامتر مذکور با یکدیگر تقریباً رابطهٔ عکس دارند. این رابطه در دو نمونهٔ B1 و B2 بسیار مشخص است. در واقع نمونهٔ دورهٔ ساسانی (B1) به‌ترتیب دارای بیشترین و کمترین درصد رطوبت و دانسیته است. همچنین نمونهٔ دورهٔ خوارزمشاهیان (B2) نیز به‌ترتیب بیشترین و کمترین مقدار دانسیته و درصد رطوبت را دارد و نشان‌دهندهٔ این است که افزایش تراکم سبب کاهش درصد رطوبت می‌شود و بالعکس. در دوره‌های دیگر نیز تقریباً این رابطه به چشم می‌خورد، ولی روند دقیقی ندارد و به نظر می‌رسد محل نمونه‌برداری و شرایط نگهداری آن در میزان درصد رطوبت تأثیرگذار است. به عنوان مثال در نمونهٔ B2 با توجه به اینکه این نمونه از بخش بیرونی دیواره در حال مرمت بنای تاریخی فیض‌آباد اخذ شده و این دیواره در معرض وزش باد و تابش آفتاب قرار داشته میزان رطوبت موجود در نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها کمتر است.

جدول ٦. داده‌های آزمایشی درصد رطوبت نمونه‌های آجری پروژه

شمارهٔ نمونه	B1	B2	B3	B4	B5	میانگین
درصد رطوبت (W)	۲/۰۸	۰/۶۰	۱/۶۲	۱/۰۴	۰/۸۸	۱/۲۴



شکل ۳. مقایسهٔ روند تغییرات میزان رطوبت و وزن مخصوص نمونه‌های آجری به‌ترتیب دورهٔ زمانی

جذب آب

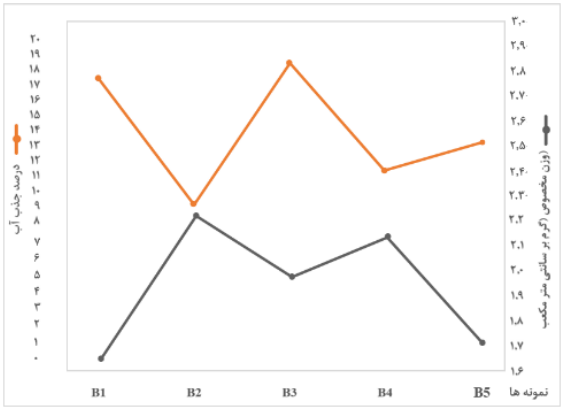
آزمایش جذب آب برای نمونه‌های آجری مطابق با استاندارد ملی شمارهٔ ۷ (ISIRI 7)، انجام شده و نتایج آن در جدول ۷، آمده است. مطابق با استاندارد مذکور، درصد جذب آب برای آجر دستی در بازه ۸ تا ۲۰ درصد است. مطابق با جدول ۷، درصد جذب آب نمونه‌های آزمایشگاهی از ۹/۳۰ تا ۱۸/۵۰ است و ملاحظه می‌شود که با وجود قدمت نمونه‌های آجری از نظر کیفیت با محدودهٔ استانداردهای فعلی مطابقت دارند.

جدول ۷. جذب آب برای نمونه‌های آجری

شمارهٔ نمونه	B1	B2	B3	B4	B5	میانگین
درصد جذب آب	۱۷/۴	۹/۳	۱۸/۵	۱۱/۵	۱۳/۴	۱۴/۰۲

شکل ۴، نمودار جذب آب نمونه‌های آجری را به‌ترتیب دورهٔ زمانی به همراه نمودار وزن مخصوص نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، جذب آب نمونه‌های آجری به دورهٔ زمانی بستگی ندارد. با مقایسهٔ دو نمودار جذب آب و دانسیتهٔ نمونه‌ها می‌توان نتیجه گرفت وزن مخصوص آجرها با جذب آب رابطهٔ عکس دارد؛ یعنی با افزایش میزان وزن مخصوص و تراکم نمونه‌ها، جذب آب آن‌ها کاهش یافته است.

[Downloaded from jhre.ir on 2024-11-20]
[DOI: https://doi.org/10.22034/43.186.6]



شکل ٤. نمودار جذب آب نمونه‌های آجری به‌ترتیب دورهٔ زمانی

مقاومت مکانیکی

مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری در این پژوهش طبق استاندارد ASTM C109-90 انجام شده و در آزمایش مقاومت فشاری از دستگاه جک ملات‌شکن اتوماتیک ایتالیایی با ظرفیت ۳۰ کیلونیوتن (Controls- Model 65) استفاده شده است. مطابق با استاندارد مذکور، ابتدا نمونه‌های آزمایشی به ابعاد ۵×۵×۵ سانتیمتر برش داده شده و سطوح آن صاف و هموار شده تا داخل دستگاه قرار گیرد و نیرو توسط جک ملات شکن بر نمونه‌های آجری اعمال شود. آزمایش به روش کنترل بار و با سرعت بارگذاری ۰/۱ مگاپاسکال بر ثانیه انجام گردید. شکل ۵ به‌ترتیب، دستگاه مورد استفاده و نحوهٔ قرارگیری نمونه را در فک‌های دستگاه نشان می‌دهد.

شکل ۵. راست: دستگاه جک ملات‌شکن اتوماتیک ایتالیایی با ظرفیت ۳۰ کیلونیوتن (Controls- Model 65)
چپ: قرارگیری نمونهٔ فشاری در فک‌های دستگاه

جدول ۸، مقاومت فشاری نمونه‌های آجری را نشان می‌دهد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری آجر دورهٔ خوارزمشاهیان (B2)، از نمونه‌های دیگر بیشتر است و مقاومت فشاری آجر دورهٔ ساسانی (B1)، برابر ۵۳/۱۲ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع بوده و از سایر آجرها کمتر است.

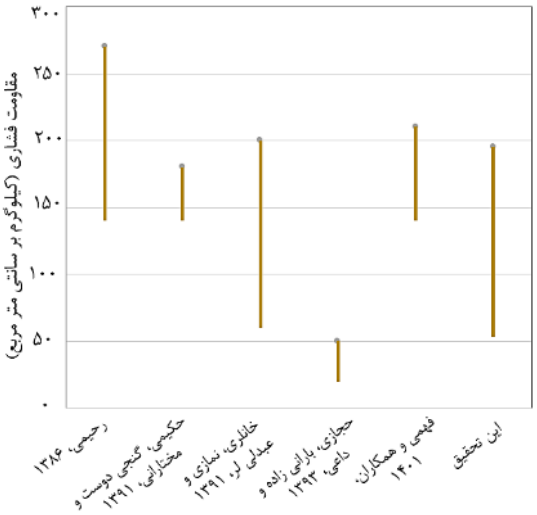
جدول ۸. مقاومت فشاری نمونه‌های آجری

شمارهٔ نمونه	B1	B2	B3	B4	B5	میانگین
مقاومت فشاری (Kg/cm^2)	۵۳/۱۲	۱۹۵/۲۷	۸۸/۹۱	۱۷۳/۸۶	۹۵/۰۳	۱۳۸/۲۶

نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری نمونه‌های آجری از حدود ۵۳ تا ۱۹۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع متغیر است. محدودهٔ مقاومت فشاری آجر در سایر تحقیقات انجام‌شده با مقاومت فشاری به‌دست‌آمده از نمونه‌های آزمایشی این پروژه در شکل ۶ نشان داده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که محدودهٔ مقاومت فشاری نمونه‌های آجری در منابع مختلف در اغلب موارد از

[Downloaded from jhre.ir on 2024-11-20]
[DOI: https://doi.org/10.22034/43.186.6]

۵۰ تا ۲۵۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع است. دامنه نسبتاً گستردهٔ محدودهٔ مقاومت فشاری نمونه‌های آجری در این تحقیق می‌تواند به علت تغییر نسبتاً زیاد سن و کیفیت نمونه‌ها باشد.



شکل ٦. مقایسهٔ مقاومت فشاری آجرها در منابع مختلف با مقاومت فشاری‌های به‌دست‌آمده در این پروژه

شکل ۷، نمودار مقاومت فشاری نمونه‌ها را به‌ترتیب دورهٔ زمانی همراه با نمودار وزن مخصوص آن‌ها نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، مقاومت فشاری آجرها با گذشت زمان، روند صعودی و نزولی ندارند و می‌توان گفت این معیار به دورهٔ زمانی بستگی نداشته، بلکه بیشتر تابع نوع مصالح استفاده‌شده، میزان تراکم خشت اولیه و نحوهٔ تولید آن‌هاست. علاوه بر این، با مقایسهٔ دو نمودار مقاومت فشاری و وزن مخصوص نمونه‌ها می‌توان نتیجه گرفت، دو پارامتر با هم رابطهٔ مستقیم داشته و هر چه تراکم نمونه بیشتر باشد وزن مخصوص آن بیشتر بوده و مقاومت فشاری بیشتری هم دارد.

شکل ۷. مقایسهٔ دو نمودار مقاومت فشاری و وزن مخصوص نمونه‌های آجری به‌ترتیب دورهٔ زمانی

مقاومت خمشی

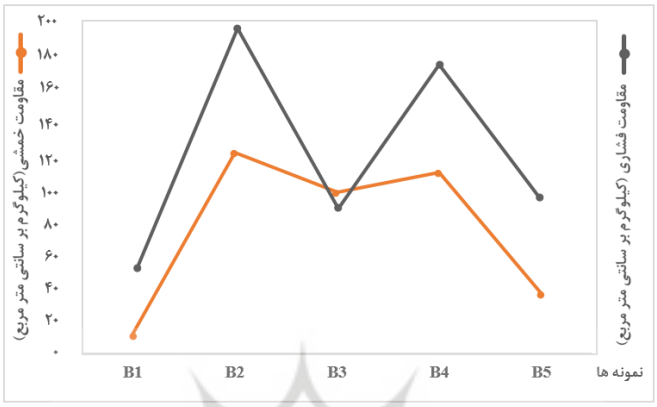
آزمایش مقاومت خمشی، مطابق استاندارد ASTM C 293 انجام شده و از دستگاه جک ملات‌شکن اتوماتیک ایتالیایی با ظرفیت ۳۰ کیلونیوتن (Controls- Model 65)، (همان دستگاه مقاومت فشاری)، با تعویض فک‌های آن استفاده شده است. مطابق با استاندارد ذکرشده، ابتدا نمونه‌های آجری به ابعاد ۱۶×۴×۴ برش داده شده و داخل دستگاه قرار گرفته تا بارگذاری انجام شود. حداکثر سرعت بارگذاری بر نمونه‌ها در این دستگاه برابر ۴۴ نیوتن بر ثانیه تعیین شده تا نیرو یکنواخت بر نمونه‌ها اعمال شود و اعمال نیرو تا لحظهٔ شکست ادامه پیدا کند. در جدول ۹، مقاومت خمشی نمونه‌های آجری آورده شده است. با توجه به این جدول، کمترین مقدار مقاومت خمشی متعلق به آجر دورهٔ ساسانی (B1) و بیشترین مقدار آن متعلق به آجر دورهٔ خوارزمشاهیان (B2) است. شکل ۸، مقاومت خمشی نمونه‌ها را به‌ترتیب دورهٔ زمانی همراه با نمودار مقاومت فشاری آن‌ها نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، مشاهده می‌شود که گذشت زمان تأثیری در میزان مقاومت خمشی نداشته، بلکه چگونگی ساخت و نحوهٔ پخت آجر

[Downloaded from jhre.ir on 2024-11-20]
[DOI: https://doi.org/10.22034/43.186.6]

عامل مؤثر در میزان مقاومت نمونه‌هاست. مقایسهٔ دو نمودار مقاومت فشاری و مقاومت خمشی نیز نشان می‌دهد مقاومت فشاری نمونه‌های آجری با مقاومت خمشی آن‌ها رابطهٔ مستقیم دارد و افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها، به معنای افزایش مقاومت خمشی آن‌هاست.

جدول ۹. مقاومت خمشی نمونه‌های آجری

شمارهٔ نمونه	B1	B2	B3	B4	B5	میانگین
مقاومت خمشی (Kg/cm^2)	۱۱/۶۲	۱۲۵/۸۳	۱۰۱/۰۹	۱۱۳/۵۹	۳۶/۸۱	۷۷/۷۸



شکل ۸. مقایسهٔ دو نمودار مقاومت فشاری و مقاومت خمشی نمونه‌های آجری به‌ترتیب دورهٔ زمانی

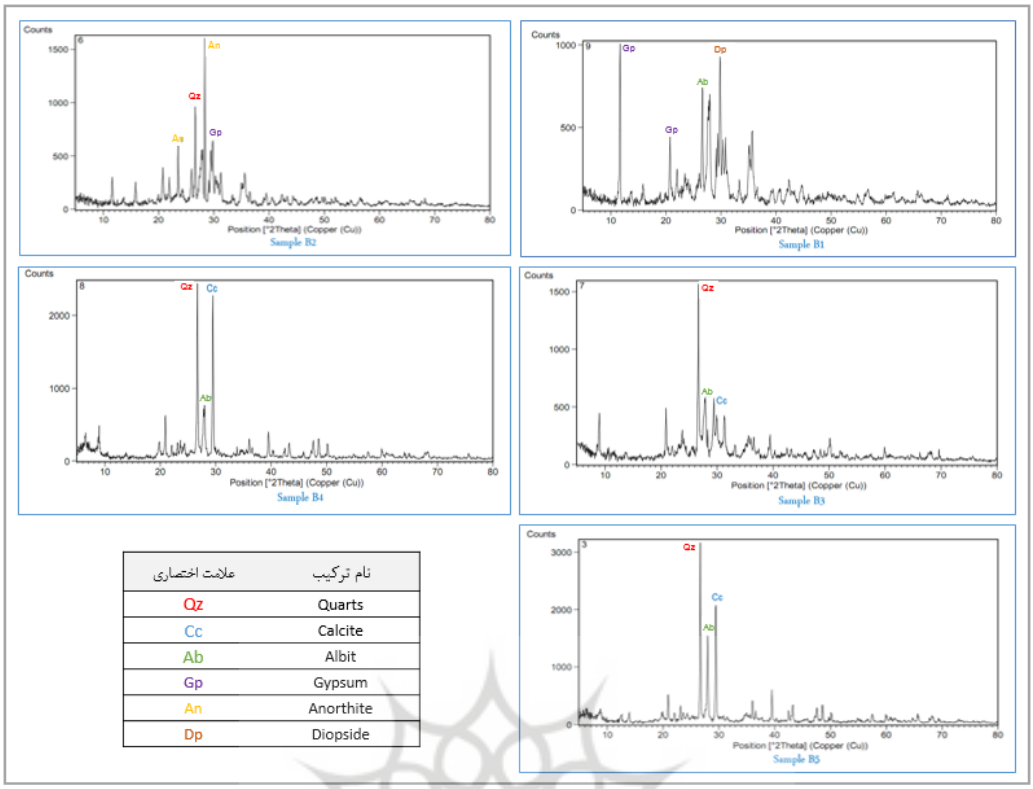
کانی‌شناسی به روش XRD

در آزمایش کانی‌شناسیِ نمونه‌های آجری فاز غالب شناسایی‌شده، کوارتز است. در واقع کوارتز فاز اصلی پرکنندهٔ آجر بوده و بافت غنی از سیلیس در آجرهاست. البته در نمونهٔ B1 این ویژگی مشهود نیست. نمونهٔ B1 میزان کوارتز کمتری نسبت به نمونه‌های آجری دیگر دارد و نبود مقدار زیادی کوارتز سبب کاهش استحکام نمونه می‌شود. همچنین این نمونه دارای دیوپسید، آلبیت و جیپسوم (همان گچ) است. وجود زیاد گچ در نمونه باعث تردشدن و کاهش میزان مقاومت نمونه می‌شود. در نمونهٔ B1 مقدار گچ بسیار زیاد بوده و مقدار کوارتز کم است. از طرفی این نمونه دارای مقاومت مکانیکی کمتری نسبت به نمونه‌های آجری مورد مطالعه است.

نمونهٔ B2 نیز علاوه بر کوارتز دارای جیپسوم و آنورتیت است. مقدار گچ موجود در این نمونه نسبت به نمونهٔ B1 بسیار کم‌تر بوده و آنورتیت موجود در این نمونه بسیار زیاد است. آنورتیت از جمله فازهای درجه حرارت بالاست. آنورتیت با نقطهٔ ذوب ۱۵۵۳ درجهٔ سانتیگراد جزو دسته کانی‌هایی است که در درجه حرارت بالا پایدار است (Emami, 2013). فقط در این نمونه آنورتیت، آن هم به مقدار بسیار زیاد وجود دارد و با توجه بالابودن مقاومت مکانیکی این نمونه به نظرمی‌رسد وجود آنورتیت سبب افزایش مقاومت این نمونه شده است.

سه نمونهٔ آجری B3، B4 و B5 دارای ترکیبات مشابه هستند، اما مقدار این ترکیبات در نمونه‌ها متفاوت است. این سه نمونه علاوه بر کوارتز دارای کلسیت و آلبیت هستند. وجود کلسیت در نمونه‌های آجری نشان‌دهندهٔ درجهٔ حرارت پخت آجر در دمای ۸۰۰ درجهٔ سانتیگراد (دمای تجزیهٔ کلسیت) است. بنابراین، می‌توان گفت این سه نمونه در دمای ۸۰۰ درجهٔ سانتیگراد یا کمتر از آن پخته شده‌اند. آلبیت، یک فاز اولیه در بافت آجر، تا ۱۱۸۰ درجهٔ سانتیگراد پایدار است (Hadian, 2016)، از طرفی میزان آلبیت موجود در این سه نمونه از بیشترین تا کمترین به ترتیب نمونه‌های B4، B5 و B3 است که با نتایج مقاومت مکانیکی مشابه بوده و با افزایش آلبیت در نمونه‌ها، مقاومت مکانیکی آن‌ها نیز بیشتر است. شکل ۹، نمودارهای به‌دست‌آمده از آزمایش کانی‌شناسی به روش XRD برای نمونه‌های آجری را نشان می‌دهد. در این نمودارها، فازهای شاخص در بالای پیک به‌اختصار نوشته شده است. در ادامه جدول ۱۰ کانی‌های موجود در نمونه‌های آجری را نشان می‌دهد.

[Downloaded from jhre.ir on 2024-11-20]
[DOI: https://doi.org/10.22034/43.186.6]



شکل ۹. نمودارهای آنالیز شیمیایی به روش XRD برای نمونه‌های آجری

جدول ۱۰. نتایج کانی‌شناسی نمونه‌های آجری با روش XRD

نمونه	کانی
B1	Major phases: Gypsum, Diopside, Albit
B2	Major phases: Anorthite, Quarts Minor phases: Gypsum
B3	Major phases: Quarts, Minor phases: Calcite, Albit
B4	Major phases: Quarts, Calcite Minor phases: Albit
B5	Major phases: Quarts, Calcite, Albit

بحث

جدول ۱۱ نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام‌شده در این پروژه را نشان می‌دهد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که وزن مخصوص یکی از مشخصات پایهٔ مؤثر در مقاومت و کیفیت نمونه‌هاست. وزن مخصوص نمونهٔ B2 از سایر نمونه‌ها بیشتر است و بعد از آن نمونهٔ B4 دارای وزن مخصوص بالایی است. کمترین میزان وزن مخصوص هم متعلق به نمونهٔ B1 است. همچنین B1 و B2 بیشترین و کمترین مقدار رطوبت را دارند. بیشترین درصد جذب آب نیز در نمونهٔ B3 بوده و بعد از آن متعلق به نمونهٔ B1 است. کمترین میزان جذب آب نیز در نمونهٔ B2 است. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی روی نمونه‌های آجری نسبتاً مشابه است. نمونهٔ B2 دارای بیشترین میزان مقاومت فشاری و خمشی بوده و پس از آن نمونهٔ B4 مقاومت بالایی دارد.

کمترین میزان مقاومت مکانیکی نیز برای نمونهٔ B1 است. علاوه بر این، مشخصات پایه از قبیل وزن مخصوص (دانسیته)، درصد رطوبت و جذب آب با ساختار مکانیکی آجر رابطه دارند. با توجه به بررسی نمونه‌های آجری می‌توان گفت با افزایش وزن مخصوص، کاهش درصد رطوبت و کاهش جذب آب، مقاومت فشاری و خمشی آجر افزایش یافته است. به عبارتی، هر چه وزن مخصوص آجر بیشتر باشد تراکم و فشردگی آن افزایش یافته و خلل‌وفرج در آن کاهش می‌یابد و به تبع آن میزان درصد رطوبت و جذب آب کم شده و درنهایت میزان مقاومت فشاری و خمشی آن افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج آزمایش شیمیایی به روش XRD، فاز غالب شناسایی‌شده در نمونه‌ها کوارتز است. وجود مقدار زیادی گچ و مقدار کم کوارتز در نمونهٔ B1، سبب کاهش

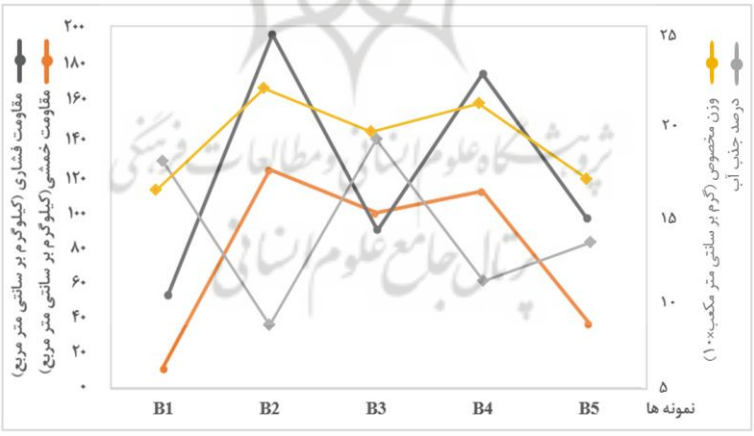
[Downloaded from jhre.ir on 2024-11-20]
[DOI: https://doi.org/10.22034/43.186.6]

میزان مقاومت مکانیکی آن شده است. همچنین وجود آنورتیت در نمونهٔ B2، سبب افزایش مقاومت مکانیکی آن شده و در سه نمونهٔ B3، B4 و B5 افزایش آلبیت، سبب افزایش مقاومت مکانیکی این نمونه‌ها شده است.

شکل ۱۰، مقایسه‌ی نمودارهای به‌دست‌آمده نمونه‌های آجری را به ترتیب دوره‌ی زمانی نشان می‌دهد. مطابق با این تصویر می‌توان گفت ویژگی‌ها و مشخصات فنی نمونه‌ها در گذر زمان به طور تقریبی روند مشابهی دارند. نمودارهای مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و وزن مخصوص حرکت یکسانی داشته و این نشان‌دهندهٔ رابطهٔ مستقیم این سه پارامتر در نمونه‌های آجری است. در این میان نمودار درصد رطوبت و جذب آب نسبت به پارامترهای قبلی روند متفاوتی دارند و می‌توان گفت با سه نمودار دیگر رابطهٔ معکوس دارند. در واقع کاهش رطوبت به معنای عدم وجود فضای خالی در نمونه برای جذب آب بیشتر بوده و این به معنای افزایش تراکم و فشردگی نمونه یا به عبارتی، افزایش وزن مخصوص آن است. با افزایش تراکم و وزن مخصوص نمونه، نمونه در برابر نیروهای وارد بر آن مقاوم‌تر عمل می‌کند و مقاومت فشاری و خمشی بیشتری خواهد داشت. علاوه بر این، با توجه به روند این مشخصات می‌توان گفت کیفیت نمونه‌ها با گذشت زمان روند صعودی یا نزولی نداشته و با یکدیگر رابطهٔ معناداری ندارند. ترکیبات شیمیایی نمونه‌ها نیز با گذشت زمان محدودتر شده و مواد افزودنی آن‌ها نسبت به قبل کاهش یافته است.

جدول ۱۱. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده روی نمونه‌های آجری بناهای تاریخی کاشان

نمونهٔ آزمایشی	مشخصات فیزیکی (پایه)				مشخصات مکانیکی (Kg/cm^2)		مشخصات شیمیایی/کانی غالب
	چگالی	وزن مخصوص (gr/cm3)	درصد میزان رطوبت	درصد جذب آب	مقاومت فشاری	مقاومت خمشی	آنالیز شیمیایی به روش XRD
B1	۲/۸۲	۱/۶۰	۲/۰۸	۱۷/۴	۵۳/۱۲	۱۱/۶۲	جیپسوم، دیوپسید و آلبیت
B2	۲/۶۳	۲/۱۴	۰/۶۰	۹/۳	۱۹۵/۲۷	۱۲۵/۸۳	آنورتیت، کوارتز و جیپسوم
B3	۲/۴۲	۱/۹۱	۱/۶۲	۱۸/۵	۸۸/۹۱	۱۰۱/۰۹	کوارتز، کلسیت و آلبیت
B4	۲/۷۰	۲/۰۶	۱/۰۴	۱۱/۵	۱۷۳/۸۶	۱۱۳/۵۹	کوارتز، کلسیت و آلبیت
B5	۲/۸۸	۱/۶۶	۰/۸۸	۱۳/۴	۹۵/۰۳	۳۶/۸۱	کوارتز، کلسیت و آلبیت
میانگین	۲/۶۹	۱/۸۷	۱/۲۴	۱۴/۰۲	۱۳۸/۲۶	۷۷/۷۸	–



شکل ۱۰. مقایسه‌ی نمودارهای به‌دست‌آمده نمونه‌های آجری به ترتیب دوره‌ی زمانی

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مشخصات پایه، مکانیکی و شیمیایی نمونه‌های آجری بناهای تاریخی کاشان در ۴ دورهٔ تاریخی بررسی شد. با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده، وزن مخصوص نمونه‌ها در محدودهٔ ۱/۶ تا ۲/۱۴ گرم بر سانتیمتر مکعب به دست آمد. همچنین جذب آب نمونه‌ها از ۹/۳ تا ۱۸/۵ درصد بوده و مقاومت فشاری آن‌ها در بازه ۵۳/۱۲ تا ۱۹۵/۲۷ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع حاصل شد. با توجه به نتایج آزمایش‌ها، مشخص گردید مشخصات پایه در مقاومت مکانیکی آجر مؤثر است. به عبارتی وزن مخصوص، مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها با هم رابطهٔ مستقیم داشته و این پارامترها با درصد رطوبت و جذب آب رابطهٔ عکس دارند. در

[Downloaded from jhre.ir on 2024-11-20]
[DOI: https://doi.org/10.22034/43.186.6]

واقع با افزایش وزن مخصوص و تراکم حجمی نمونه‌ها، خلل‌وفرج داخل آن‌ها کاهش یافته و درصد رطوبت موجود در آن و جذب آب نیز کاهش می‌یابد. به علاوه هر چه تراکم نمونه بیشتر شود مقاومت فشاری و خمشی آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. ترکیب شیمیایی غالب در نمونه‌ها نیز کوارتز بوده و وجود گچ در نمونه‌ها سبب کاهش مقاومت مکانیکی شده و افزایش کوارتز، آنورتیت و آلبیت سبب مقاومت نمونه‌ها شده است. با گذشت زمان نیز مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های آجری روند صعودی یا نزولی ندارند و به عبارت دیگر، تغییر سن نمونه‌ها تأثیری روی کیفیت آن‌ها نداشته است. با این تفاسیر می‌توان گفت قدمت و دورهٔ تاریخی در کیفیت آجر تأثیر زیادی نداشته، بلکه مشخصات مصالح اولیه، میزان مهارت و نحوهٔ تولید و عمل‌آوری نمونه در ساخت آجر مؤثرتر است.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

[Downloaded from jhre.ir on 2024-11-20]

[DOI: https://doi.org/10.22034/43.186.6]

References

Amiri, M., Kalantari, A., Mehri, H. (2015). Knowledge of building materials. Tehran: The future of knowledge. (In Persian)

Arianpour, A. (1991). English-Persian Academic Dictionary, Publishers: Tehran. (In Persian)

ASTM C128. (2023). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. ASTM International, West Conshohocken.

ASTM C109-90. (1990). Historical Revision Information Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). ASTM International, West Conshohocken.

ASTM C293. (2016). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading). ASTM International, West Conshohocken.

ASTM D 854-14. (2023). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM International, West Conshohocken.

ASTM D 2216. (2019). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. ASTM International, West Conshohocken.

ASTM F3419-22. (2022). Standard Test Method for Mineral haracterization of Equine Surface Materials by X-Ray Diffraction (XRD) Techniques. ASTM International, West Conshohocken.

Avrami ,E., Guillaud, H., & Hardy, M. (2008). Terra Literature Review: An Overview of Research in Earthen Architecture Conservation. Conservation of Earthen Archaeological Sites.

Bagh Sheikhi, M. (2021). Studying the exterior decorations of Qajar buildings in Kashan city. Archaeological Researches of Iran, 30, 223-247. (In Persian)

Dehkhoda, A. (1998). Dictionary of Dehkhoda. Tehran: University of Tehran. (In Persian)

Emami, M, A., Arianasab, S., Ahmadi, H., Asgari Chavardi, A., Francesco Caliri, P. (2013). Archaeometric methods for the structural analysis of bricks discovered from the brick mound of Persepolis. Archaeological Studies, 6, 2, 1-18. (In Persian)

Fahmi, A., Babeian Amini, A., Majnooni Totakhane, A., Marabi, Y. (2022). Feasibility of producing geopolymer brick and mortar from the red native soil of Totakhana village in order to protect the organic architectural texture. Environmental Science and Technology, (24) 6, 59-76. (In Persian)

Golestanifard, F., Bahrevar, M., Salahi, I. (2004). Materials identification and analysis methods. Tehran: University of Science and Technology. (In Persian)

Hadian Dehkordi, M. (2016). Geological studies of historical and ancient clay materials in different regions of Iran. Scientific Quarterly: 37(75), 85-96. (In Persian)

Hakimi, B., Ganji Dost, H, Mokhtarani, N. (2012). Investigating the possibility of using water treatment plant sludge in making bricks. Water and Wastewater, 3, 59-65. (In Persian)

Hami, A. (2019). Construction materials. Tehran: University of Tehran. (In Persian)

Harris, C. (2002). Descriptive culture of architecture and construction (translated by Mohammad Reza Afzali). Tehran: Associate Professor. (In Persian)

Hejazi, M., Baranizadeh, S., Dai, M. (2013). Optimal shape, failure load and buckling load of historical Iranian brick domes. Housing and Village Environment, 155, 61-76. (In Persian)

Hosseini, B, Seyedain Khorasani, Z. (2015). Bricks in architecture, beauty and functionality. Tehran: Shahid Rajaee Tarbiat University. (In Persian)

ISIRI 7. (2004). Clay brick - characteristics and test methods. National Standard Organization of Iran. (in persian)

ISIRI 4980. (2017). Determination of density, relative density (specific weight) and water absorption of fine aggregate. National Standard Organization of Iran. (In Persian)

ISIRI 7883. (2005). Determination of soil moisture percentage. National Standard Organization of Iran. (In Persian)

Javed, K., Irfan-ul- Hassan, M., Farooq, M ,A., Sharif, M ,B. (2024). Detailed investigation of compressive and bond strength for sustainable brick masonry developed by using various types of bricks and green morta. Journal of Building Engineering, Volume 84.

-Khaja Nouri, E., Flameki, M., Kobudar Angi, M. (2016). How to form and evolve bricks in Iranian architecture (Physical-chemical structure of bricks). Science and Engineering Elites, 2. (In Persian)

Khanlori, Gh., Namazi, A., Abdi lor, Y. (2012). Studying the engineering characteristics of clay soils

[Downloaded from jhre.ir on 2024-11-20]

[DOI: https://doi.org/10.22034/43.186.6]

as materials for brick production in Hamadan province. Applied Geology Quarterly, 2, 9-98. (In Persian)

L´opez, L., Coletti, C., Ruan, S., C, Giuseppe. (2023). Use of recycled carbon fibre as an additive in the manufacture of porous bricks more durable against salt crystallization. Ceramics International.

Ministry of Roads, Urban Development and Housing and Construction Deputy. (2013). National building regulations, topic 8. Tehran: Development of Iran. (In Persian)

Minke, G. (2006). Building with Earth, Design and Technology of a Sustainable Architecture. Birkhäuser – Publishers for Architecture Basel. Berlin: Boston.

Motahari Tabar, M. (2014). Brick pathology and its effect on the protection of historical monuments in historical contexts. The third international congress on civil engineering, architecture and urban development, Tehran. (In Persian)

Rahimi, H. (2006). Building Materials. Tehran: University of Tehran. (In Persian)

Rahimnia, R., Mahmoodzadeh, A., Tehrani, F., Zamanifard, A. (2011). Recognizing the experiences of native architecture in South Khorasan, in order to protect and restore adobe architecture. Housing and Village Environment, 142, 19-32. (In Persian)

Reshnooi, K., Jamshidi, A., Ajal Luian, R. (2023). Evaluating the durability of brick against freezing process by measuring some of its physical and resistance characteristics. The 42nd National Conference of Earth Sciences. (In Persian)

Sarmd nahri, A., Kardan, M. (2009). A complete reference for knowledge of building materials. Tehran: Motefakeran. (In Persian)

Shirgire, A., Deepak, M., Thenmozhi, S., Sharma, A., Pawar, S., Prakash, A. (2023). Experimental study on brick performance using quartz material and woods ash. Materialstoday.

Shirinkam, F. (2010). The book of industrial entrepreneurs in the Pahlavi era (Hasan Tafzali's life and career). Tehran: Gam Noo Publications. (In Persian)

Yadollahi, A., Jahangiri, A. (2023). Laboratory investigation of the effect of the plant Louis on the mechanical and thermal properties of bricks. The 9th National Conference on New Technologies in Civil Engineering, Architecture and Urban Planning. (In Persian)

Zemorshidi, H. (2012). Iranian architecture: traditional materialism. Tehran: Emerald. (In Persian)

emorshidi, H., Sadeghi Habibabad, A. (2017). Bricks and the art of brickwork from ancient times to today. Iranian Islamic City Quarterly, 9(33), 17-5. (In Persian)

DOI: https://doi.org/10.22034/43.186.6

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

[Downloaded from jhre.ir on 2024-11-20]

[DOI: https://doi.org/10.22034/43.186.6]