34

Journal Homepage: http://journal.richt.ir/mbp/
P-ISSN: 2645-5048 & E-ISSN: 2645-5706
Parseh Journal of Archaeological Studies || Vol. 9 || No. 34 || 2026 ||

Technical Analysis and Stability Measures in Vaulted Structures of Khuzestan from Elamite to Late Sasanian Periods

Hani Zarei[1], Shahriar Nasekhian[2], Mohammad Hassan Talebian[3]

Type of Article: **Research**
Pp: 145-183
Received: 2025/07/14; Revised: 2025/10/06; Accepted: 2025/11/06
https://doi.org/10.61882/PJAS.1290.902.1

Abstract

Khuzestan, a primary center of mudbrick and fired-brick architecture in ancient Iran, witnessed the evolution of vaulted construction from the Elamite to the Late Sasanian periods. Among these, arched vaults served not only as structural elements but also as a demonstration of systematic engineering practices tailored to the region's warm and semi-humid climate. Despite the abundance of surviving monuments, no comprehensive study has analyzed their technical and structural features to uncover the underlying stability principles. This study aims to examine the structural performance and recurring patterns of stability in arched vaults of Khuzestan. Field surveys, documentation of accessible structures, analysis of 111 identified vaulted buildings, and detailed examination of 21 selected representative examples were conducted. The study focused on the interaction of materials, geometric proportions, construction technology, and human craftsmanship in achieving long-term stability. Results indicate that vault stability depended on: 1) the type and geometry of bricks, consistent mortar thickness, and interlocking strategies; 2) diverse construction techniques, including corbeling, radial arrangements, and combination methods; 3) geometric proportions such as span, rise, and vault thickness; 4) adaptation to climatic conditions; and 5) the skill and experience of the builders. This research highlights the presence of a systematic engineering logic in pre-Islamic vault construction and provides a framework for restoration, conservation, and potential adaptation in contemporary architectural practice. The findings demonstrate that these vaults were not merely empirical or accidental in design but reflect deliberate, replicable, and coherent structural strategies.

Keywords: Structural Stability, Vaulted Architecture, Arched Vaults, Pre-Islamic Iran, Khuzestan.

1. Asistant Profeessor, Conservation of Historical Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.
2. Associate Professor, Department of Conservation of Historical Monuments, Faculty of Conservation and Restoration, Art University of Isfahan, Iran (Corresponding Author). ***Email:*** s.nasekhian@aui.ac.ir
3. Professor, School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran, Tehran, Iran.

Citations: Zarei, H., Nasekhian, S. & Talebian, M. H., (2026). "Technical Analysis and Stability Measures in Vaulted Structures of Khuzestan from Elamite to Late Sasanian Periods". *Parseh J. Archaeol. Stud.*, 9(34): 145-183. https://doi.org/10.61882/PJAS.1290.902.1
Homepage of this Article: https://journal.richt.ir/mbp/article-1-1290-en.html

Parseh Journal of Archaeological Studies (PJAS)
Journal of Archeology Department of Archeology Research Institute, Cultural Heritage and Tourism Research Institute (RICHT), Tehran, Iran

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

Copyright © 2026 The Authors. Published by Cultural Heritage and Tourism Research Institute (RICHT). This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

© The Author(s)

Introduction

Khuzestan has historically played a pivotal role in the development of vaulted architecture within ancient Iranian civilizations. Vaults represent one of the most sophisticated elements of traditional construction, combining technical mastery, material understanding, and adaptation to environmental conditions. From the Elamite through Late Sasanian periods, vaulted buildings in Khuzestan reveal an evolution in construction techniques, reflecting the accumulation of knowledge and local innovation. Arched vaults, in particular, served as primary structural and functional components in ritual, funerary, administrative, and sometimes military architecture.

The study of these vaults provides insight into the strategies employed by ancient builders to achieve stability over centuries. Stability in traditional architecture encompasses not only physical durability but also cultural, climatic, and technical resilience. Builders utilized local materials, precise geometric proportions, and structured load distribution to respond to environmental and functional challenges. Despite extensive archaeological documentation, there has been limited focus on the technical principles underpinning vault stability, particularly in arched vaults.

This research addresses this gap by systematically analyzing recurring structural features, material properties, construction technology, and geometric patterns that contributed to vault durability. The study examines both historical continuity and the adaptation of techniques over time, demonstrating that pre-Islamic vaulting practices in Khuzestan were informed by deliberate engineering logic rather than trial-and-error. Understanding these principles is critical for bridging knowledge gaps in architectural conservation, informing restoration efforts, and inspiring contemporary applications of traditional construction methods.

Discussion

Analysis of arched vaults in Khuzestan indicates that their long-term stability resulted from a combination of material selection, construction technology, geometric design, and human skill. Key aspects include:

Materials and Mortar: Builders employed trapezoidal, square, and rectangular bricks, wider and thicker at structural bases to distribute loads effectively. Mortars, including clay, gypsum, and bitumen, were chosen according to moisture conditions, ensuring cohesion and stability.

Construction Techniques: Techniques included inclined corbeling, radial arrangements, and hybrid approaches. Temporary wooden or reed supports facilitated precise execution, while multi-layer vaults with controlled thickness enhanced overall strength. Adjacent vaults were often coordinated to reduce lateral stresses.

Geometric Proportions: Ratios between span, rise, and thickness were carefully maintained across periods. Numerical proportional systems guided vault dimensions, while precise interlocking of bricks ensured efficient load transfer.

Human Skill: Mastery in aligning bricks, controlling mortar thickness, integrating vaults with walls, and designing stress-relief features such as recesses and buttresses reflected high craftsmanship.

The historical evolution from Elamite to Sasanian periods shows gradual refinement. Early Elamite vaults utilized simple rectangular cross-sections and limited brick types, while Late Sasanian vaults displayed sophisticated high-rise arches, modular brick use, and multi-layer arrangements. These developments indicate a cumulative knowledge system that informed construction practices and responded to functional and climatic challenges.

The study highlights that stability was never accidental; rather, it emerged from repeated, rationalized engineering practices. Such findings provide an empirical basis for restoration and reconstruction, enabling the preservation of architectural integrity and informing contemporary design strategies that draw upon historical methods.

Conclusion

This research demonstrates that arched vaults in Khuzestan were underpinned by systematic engineering principles rather than empirical trial-and-error. Stability resulted from the integrated interaction of materials, construction technology, geometric design, environmental adaptation, and craftsmanship. The study identifies:

- Strategic use of brick types and mortar selection to optimize structural cohesion.
- Refined construction techniques, including corbeling, radial arrangements, multi-layer vaulting, and controlled thickness.
- Geometric proportionality ensuring balanced distribution of forces.
- Adaptation to climate and environmental constraints.
- High-level craftsmanship in aligning elements and controlling structural behavior.

Historical analysis reveals a continuous technological development, culminating in Late Sasanian vaults that exemplify peak structural refinement. Documenting these features provides a foundation for preservation, restoration, and potential adaptation in modern architectural practice. Future studies may compare these vaults with contemporary structures in neighboring regions or explore the influence on early Islamic architecture in southwestern Iran.

The study confirms that pre-Islamic vault construction in Khuzestan represents a coherent, replicable, and sophisticated engineering tradition, offering valuable lessons for both conservation and contemporary design.

Acknowledgments

The author thanks field collaborators, local heritage authorities, and research assistants for their contributions to data collection and documentation of vaulted structures in Khuzestan.

Observation Contribution

The author conducted field surveys, structural documentation, data analysis, and interpretation of vaulted structures across Khuzestan.

Conflict of Interest

The author declares no conflict of interest.

فصلنامهٔ علمی مطالعات باستان‌شناسی پارسه || شمارهٔ ۳۴ || سال نهم || ۱۴۰۴ ||
نشانی پایگاه نشریه: http://journal.richt.ir/mbp
P. ISSN: 2645-5048 & E. ISSN: 2645-5706

بررسی فنی و تمهیدات پایداری در بناهای دارای طاق‌آهنگ خوزستان از ایلام تا پایان ساسانی

هانی زارعی[I]، شهریار ناسخیان[II]، محمدحسن طالبیان[III]

نوع مقاله: پژوهشی
صص: ۱۸۳ - ۱۴۵
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۵
شناسهٔ دیجیتال (DOI): https://doi.org/10.61882/PJAS.1290.902.1

چکیده

استان خوزستان، یکی از خاستگاه‌های اصلی معماری خشتی-آجری در ایران باستان، از دورهٔ ایلام تا پایان ساسانی شاهد تکوین و تحول شیوه‌های متنوع طاق‌زنی بوده است. در این‌میان، طاق‌های آهنگ به‌مثابه ساختاری بنیادین، نه‌تنها عملکردی سازه‌ای، بلکه معرف نظامی مهندسی‌شده از تمهیدات پایداری در بستر اقلیم گرم و نیمه‌مرطوب منطقه‌اند. باوجود غنای آثار موجود، تاکنون پژوهشی جامع برای تحلیل فنی و ساختاری این طاق‌ها و استخراج منطق پایداری آن‌ها انجام نشده است. هدف از پژوهش حاضر تحلیل سازه‌ای و خوانش الگوهای پایدار و تکرارشونده در ساخت طاق‌های آهنگ از دورهٔ ایلام تا ساسانی در خوزستان است؛ بدین‌منظور، به بررسی ویژگی‌های مصالح، فناوری ساخت و تناسبات هندسی مرتبط با پایداری این سازه‌ها توسط معماران آن دوران پرداخته شده است. پرسش اصلی این است که، چه تدابیر فنی و اجرایی در پایداری این طاق‌ها نقش داشته‌اند و چه روابطی میان فرم، مصالح و اقلیم در این روند دیده می‌شود؟ روش پژوهش مبتنی‌بر ترکیب مطالعات میدانی، مستندسازی سازه‌های قابل دسترس، تحلیل نمونه‌های شاخص، بررسی منابع باستان‌شناسی و گونه‌شناسی ساختاری است. انتخاب ۱۱۱ بنای طاق‌دار دارای اطلاعات و تصاویر ثبت شده در مرحلهٔ اول و انتخاب ۲۱ نمونهٔ منتخب دارای داده‌های عددی و اسناد ترسیمی مناسب روش دستیابی به داده‌ها را شامل می‌شود. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که پایداری طاق‌های آهنگ در این منطقه، نتیجهٔ تعامل چندلایه میان: ۱) مصالح (نوع و شکل هندسی مصالح، توجه به ضخامت ثابت ملات و نحوهٔ اتصال مصالح مربع و ذوزنقه‌ای‌شکل برای دستیابی به شل بهینهٔ اجرای طاق)، ۲) دقت در فناوری ساخت شامل تنوع شیوهٔ رج‌چینی و ترکیب چینش ضربی و رومی در دوران پیش از اسلام، ۳) تناسبات هندسی (ثبات در نسبت‌های دهانه، افراز و ضخامت طاق به اجزای سازه در هر دوره و تغییر نسبت به دوران دیگر)، و ۴) شرایط اقلیمی و ۵) مهارت نیروی انسانی بوده است. یافته‌های این پژوهش، نظامی مهندسی‌شده و قابل بازخوانی در فن طاق‌سازی پیش از اسلام را آشکار می‌سازد و می‌تواند چارچوبی تحلیلی برای بازشناسی، مرمت و تداوم اصول فنی طاق‌سازی تاریخی ایران فراهم می‌آورد.

کلیدواژگان: پایداری سازه‌ای، معماری طاق‌دار، طاق‌آهنگ، دورهٔ ایلام تا ساسانی، خوزستان.

I. استادیار گروه مرمت بناهای تاریخی، دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران.
II. دانشیار گروه مرمت بناها و بافت‌های تاریخی، دانشکدهٔ حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران (نویسندهٔ مسئول). *Email:* s.nasekhian@aui.ac.ir
III. استاد گروه مرمت، دانشکدگان هنرهای زیبا، دانشکدهٔ معماری، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

ارجاع به مقاله: زارعی، هانی؛ ناسخیان، شهریار؛ و طالبیان، محمدحسن، (۱۴۰۴). «بررسی فنی و تمهیدات پایداری در بناهای دارای طاق‌آهنگ خوزستان از ایلام تا پایان ساسانی». مطالعات باستان‌شناسی پارسه، ۹ (۳۴): ۱۸۳-۱۴۵. https://doi.org/10.61882/PJAS.1290.902.1
صفحهٔ اصلی مقاله در سامانهٔ نشریه: https://doi.org/10.61882/PJAS.1290.902.1

فصلنامهٔ علمی مطالعات باستان‌شناسی پارسه
نشریهٔ پژوهشکدهٔ باستان‌شناسی، پژوهشگاه میراث‌فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران

ناشر: پژوهشگاه میراث‌فرهنگی و گردشگری

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسنده(گان) آن است. © ۱۴۰۴ ناشر این مقاله، پژوهشگاه میراث‌فرهنگی و گردشگری است. این مقاله تحت گواهی زیر منتشرشده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.
Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

© The Author(s)

مقدمه

در گسترهٔ تمدن‌های باستانی ایران، استان خوزستان همواره جایگاهی کلیدی در شکل‌گیری و تحول معماری، به‌ویژه معماری طاق‌دار، داشته است. طاق، به‌عنوان یکی از پیچیده‌ترین عناصر سازه‌ای در معماری سنتی، نه‌تنها نمودی از مهارت‌های فنی و اجرایی معماران باستان است، بلکه معرف درک عمیق آنان از رفتار سازه‌ای، مصالح بومی و شرایط اقلیمی نیز به‌شمار می‌رود. در این‌میان، مطالعهٔ تمهیدات پایداری در طاق‌های معماری پیش از اسلام، به‌ویژه از دورهٔ ایلام تا پایان ساسانی، می‌تواند چشم‌اندازی نو از فرآیندهای فن‌شناختی، ساختاری و تحولی در معماری بومی ایران ارائه دهد (Sauvage, 1998; Hnaihen, 2020)؛ که می‌تواند در تداوم و تکامل دانش فنون، ازسویی به‌کارگیری در خلأهای موجود ناشی از حفاظت و مرمت سازه‌های طاق‌دار فروریخته و پابرجای پیش‌از دوران اسلامی در ایران به‌عنوان یک چالش همیشگی که یک بخش آن وابسته به شناخت و درک فن‌آوری ساخت چنین آثاری است؛ تأثیر به‌سزایی داشته باشد. یکی از موارد کمتر پرداخته شده در مبحث بناهای دارای طاق‌آهنگ این دوران، بررسی تمهیدات پایداری توسط سازندگان گذشته است.

پایداری در معماری سنتی، مفهومی چندلایه است که نه‌فقط به دوام فیزیکی، بلکه به پایداری فرهنگی، اقلیمی و فنی یک بنا اشاره دارد. بناهای طاق‌دار خوزستان در دوره‌های ایلامی، الیمایی، اشکانی و ساسانی، نمونه‌هایی ممتاز از سازه‌هایی هستند که در طول قرون متمادی با بهره‌گیری از مصالح محلی، فنون اجرایی متنوع، و نگرش ساختارمند نسبت به انتقال نیروها، پاسخ‌هایی بومی به چالش‌های محیطی و عملکردی داده‌اند (Moorey, 1994؛ علیزاده، ۱۳۸۷؛ کارتر، ۱۹۸۴).

یکی از ویژگی‌های بارز معماری این دوره‌ها، تطور تدریجی شیوه‌های اجرای طاق‌آهنگ است؛ از طاق‌های سادهٔ دورهٔ ایلام با مقطع مستطیلی، آجرهای ذوزنقه‌ای و چینش ضربی، تا فرم‌های پیشرفته‌تر در دورهٔ ساسانی که در آن نسبت افراز به دهانه افزایش می‌یابد، قوس‌ها با دقت بیشتری اجرا می‌شوند و استفاده از آجرهای مدولار بزرگ‌تر و رج‌چینی‌های منظم، به استحکام بیشتر سازه کمک می‌کند (رهبر، ۱۳۷۳؛ مهران‌پور و دیناروند، ۱۳۹۰). این سیر تکاملی نشان‌دهندهٔ انتقال مستمر دانش فنی، تکرار تجربیات موفق، و سازگاری با نیازهای عملکردی و اقلیمی منطقه است که رفته‌رفته به تثبیت سنت‌های ساخت طاق در معماری ایرانی انجامیده است. در این‌میان دستیابی به شکل هندسی بهینه با حداکثر اتصال وجوه مصالح به یک‌دیگر نظیر هندسهٔ ذوزنقه‌ای‌شکل (خزالی و مترجم، ۱۴۰۰)، دقت در به‌کارگیری ملات‌ها، تناسبات هندسی اجزای طاق، در کنار مسائل اقلیمی و مهارت استادکاران ماهر و نیمه‌ماهر و سایر مسائل کالبدی، در ایجاد پایداری سازه تأثیر به‌سزایی داشته است که کمتر مورد بررسی دقیق قرار گرفته است. بیشتر بررسی‌ها توسط پژوهش‌گران ایرانی و غیرایرانی نظیر: «پیرنیا»، «گدار»، «گیرشمن» و دیگران به پیشینهٔ ساخت و نوع چینش تمرکز داشته است و بیشتر در یک دورهٔ تاریخی اشاره شده است و توسط افراد بعدی به تبعیت از آن گفته‌ها تکرار شده است که گاهی دچار نواقصی نیز می‌باشد و به جنبه‌های پایداری چنین سازه‌هایی کمتر پرداخته شده است.

مطالعات انجام‌شده در حوزهٔ معماری باستانی خوزستان، از کاوش‌های نخستین شرق‌شناسانی چون: «دیولافوا»، «گیرشمن»، «دمورگان» و «لفتوس» گرفته تا پژوهش‌های معاصرتر هم‌چون آثار: «نگهبان» (۱۳۷۲)، «علیزاده» (۱۳۸۷)، «ملک‌زاده» (۱۳۷۳) و «سبحانی» (۱۴۰۰)، هرچند اطلاعات باستان‌شناختی ارزنده‌ای دربارهٔ لایه‌های فرهنگی، الگوهای استقرار و عناصر معماری بناها فراهم آورده‌اند، اما کمتر به تحلیل دقیق فنی-سازه‌ای طاق‌ها پرداخته‌اند. این درحالی است که طاق‌ها، به‌ویژه طاق‌های آهنگ، نقش بنیادی در شکل‌دهی به فضاهای اصلی بناهای آئینی، تدفینی،

خدماتی و گاه نظامی ایفا کرده‌اند و بدون تحلیل دقیق آن‌ها، درک کاملی از معماری دوره‌های یادشده حاصل نخواهد شد (پاتس، ۱۹۹۹؛ پوپ، ۱۳۶۵).

تحلیل‌های صورت‌گرفته در این پژوهش بر این فرض استوار است که طاق، به‌عنوان یک واحد سازه‌ای و فضایی، تجلی‌گاه عقلانیت مهندسی و پاسخ‌گویی به نیازهای محیطی و کارکردی است؛ و پایداری آن، حاصل تعامل میان مصالح، فناوری اجرا، هندسه، و نهایتاً مهارت نیروی انسانی است. بر این‌اساس، مطالعهٔ حاضر با بهره‌گیری از داده‌های میدانی گردآوری‌شده از بناهای تاریخی طاق‌دار در خوزستان، از دورهٔ ایلام تا ساسانی، تلاش دارد با رویکردی تحلیلی و تطبیقی، ابعاد گوناگون پایداری طاق‌های آهنگ را واکاوی کند. درنهایت، این پژوهش با هدف پر کردن خلأ موجود در ادبیات فن‌شناسی طاق‌های باستانی، روایتی ساختاریافته و مستند از سیر تاریخی و تمهیدات پایداری در معماری طاق‌دار خوزستان از دورهٔ ایلام تا پایان ساسانی ارائه می‌دهد. لازم به ذکر است به‌دلیل وجود حجم مطالعات مربوط به دورهٔ تاریخی ایلام، و وجود اختلاف‌نظری که میان پژوهشگران ایرانی در معنا، ریشه و شکل نگارش نام ایلام، به‌ویژه در شیوهٔ نگارش آن با «الف»/ «ع» وجود دارد (میرقادری و رضایی‌باغ‌بیدی، ۱۴۰۲). ریشه‌شناسی نام «ایلام» (سرزمین، کشور [KI]) "NIM" «بلند، مرتفع»، که برای نخستین‌بار در منابع سومری از میانهٔ هزارهٔ سوم پیش‌ازمیلاد دیده می‌شود. زبان اکدی این واژه را به‌شکل "KUR elamtu/elammatum" (سرزمین ایلام) بیان کرده است، که کلمه‌ای مرتبط با اکدی "Elum"«بلند، بالا» است، اما احتمالاً از واژهٔ ایلامی Ha(l)tamti [hal] مشتق شده است (Álvarez-Mon, 2020: 260)؛ لذا در این پژوهش از «ایلام» استفاده شده است.

در پایان، رویکرد میان‌رشته‌ای پژوهش، با ترکیب داده‌های تاریخی، باستان‌شناختی، معماری و مهندسی، می‌تواند بستری برای توسعهٔ نظریه‌های جدید در حفاظت سازه‌ای، بازآفرینی فرم‌های تاریخی، و شناخت عقلانیت سازه‌ای معماران ایران باستان فراهم آورد؛ به‌ویژه آن‌که بسیاری از این بناها به‌دلیل فرسایش، تخریب و مرمت‌های ناصحیح در معرض نابودی‌اند، و بازخوانی تمهیدات اصیل پایداری، ضرورتی انکارناپذیر در فرآیند حفظ و بازسازی آن‌ها به‌شمار می‌رود.

بر این‌اساس، اهداف کلی پژوهش پس از شناسایی و مستندسازی انواع طاق‌های آهنگ موجود در منطقهٔ خوزستان باستان، از منظر فرم، مصالح، شیوهٔ اجرا و تناسبات ابعادی، به‌صورت مشخص بدین‌شرح است: فهم تمهیدات پایداری ازطریق خوانش پیوندها و روابط هندسی تکرارشوندهٔ چینش طاق‌های آهنگ خشتی-آجری از ایلام تا پایان دورهٔ ساسانیان در استان خوزستان.

پرسش و فرضیهٔ پژوهش: ویژگی‌های تکرارشونده در تمهیدات پایداری در چینش طاق‌های آهنگ خشتی-آجری از ایلام تا پایان دورهٔ ساسانیان در استان خوزستان کدامند؟

با توجه به پرسش و هدف پژوهش، فرضیهٔ چنین مطرح می‌گردد: این پژوهش با تکیه‌بر تحلیل ساختاری، فن‌شناختی و تطبیقیِ طاق‌های آهنگ در معماری پیش از اسلام خوزستان (از دورهٔ ایلام تا پایان ساسانی)، مدعی است که این سازه‌ها واجد نظام‌های هندسی، تناسبات ابعادی و الگوهای فن‌شناختی خاصی بوده‌اند که در بستری از پیوستگی تاریخی، شرایط اقلیمی، نوع مصالح و تجربه‌های بومی معماران سنتی بنیان نهاده شده‌اند؛ نظام‌هایی که برخلاف تصور رایج، نه‌تنها تصادفی یا تجربی نبوده‌اند، بلکه واجد انسجام منطقه‌ای و قابلیت بازخوانی علمی هستند. این الگوهای شناسایی‌شده، در صورت مستندنگاری دقیق و تحلیل نظام‌مند، می‌توانند پایه‌ای برای تدوین روش‌های اصالت‌محور در مرمت طاق‌های تاریخی و هم‌چنین بازآفرینی فنون بومی در معماری معاصر باشند و بدین‌ترتیب، شکاف موجود میان دانش تاریخی-باستان‌شناختی و عمل‌گرایی مرمتی را تا حد زیادی برطرف سازند.

روش‌شناسی پژوهش: با توجه به این‌که در پژوهش‌های کاربردی هدف، کشف دانش تازه‌ای است که کاربرد مشخصی دربارهٔ فرآورده یا فرآیندی در واقعیت را دنبال می‌کند (جین و

همکاران، ۱۳۸۱: ۱۲)، و هدف پژوهش کاربردی توسعهٔ دانش کاربردی در یک زمینهٔ خاص است (حبیبی، ۱۳۹۱) است؛ پژوهش پیش‌رو، ازلحاظ هدف یک پژوهش کاربردی است و براساس ماهیت داده‌ها در قالب مطالعهٔ کیفی و کمّی و براساس پرسش‌های پژوهش (کی‌بین، ۱۳۷۸: ۱۷) و براساس روش، تکیه‌بر روش‌های ترکیبی (تاریخی-تفسیری)، (گروت و وانگ، ۱۳۹۶: ۱۳۷؛ معماریان، ۱۳۹۳) با مطالعه، درک و شرح رویدادهای گذشته، به دریافت معانی و مفاهیم پنهان و ناپیدا و پیام‌های نهفته در سیر حوادث تاریخی می‌پردازد و با بررسی ویژگی‌های عمومی و مشترک پدیده‌ها و حوادث تاریخی، سعی‌در تحلیل دلایل بروز آن‌ها دارد، شکل گرفته است (حافظ‌نیا، ۱۳۸۱: ۵۳). روش داده‌اندوزی به‌صورت میدانی-کتابخانه‌ای بوده و جامعهٔ آماری شامل بناهای طاق‌دار با ویژگی بیان شده در ادامهٔ دوران تاریخی استان خوزستان است که دارای اطلاعات میدانی و یا کتابخانه‌ای (پیشینه، نقشه‌های بنا (پلان-نما-برش) در دسترس باشند. براساس شکل هندسی آجر، مجموعاً ۱۱۱ اثر تاریخی دارای اطلاعات و تصاویر ثبت شده توسط پژوهشگران و باستان‌شناسان قبلی در محدودهٔ استان خوزستان، از دورهٔ ایلامی تا پایان دورهٔ ساسانی، مورد شناسایی قرار گرفته است. در مرحلهٔ بعد به‌منظور دستیابی به داده‌های دقیق‌تر، ۲۱ نمونه که دربرگیرندهٔ تمامی دوران تاریخی مدنظر باشند و دارای اطلاعات عددی ثبت‌شده توسط کاوشگران یا پژوهشگران، شامل: ابعاد و نوع چیدمان طاق بناها، هم‌چنین دارا بودن پلان و نقشه‌های موردنیاز به‌منظور بررسی‌های دقیق‌تر بعدی توسط نویسندگان و دستیابی به ابعاد و اندازه‌های دیگر موردنیاز درخصوص دهانه، افراز؛ نوع و ابعاد و شکل هندسی مصالح و مقایسهٔ نمونه‌ها با یک‌دیگر به‌منظور دستیابی به ویژگی‌های ساختاری مرتبط با تمهیدات از پیش اندیشیده شدهٔ پایداری توسط سازندگان در هر دورهٔ تاریخی از منظر: ۱) نوع مصالح، ۲) تناسبات هندسی، ۳) فناوری ساخت؛ انتخاب و براساس دورهٔ تاریخی و شواهد ساختاری طبقه‌بندی و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. آن‌چه به‌عنوان روش تجزیه و تحلیل در این پژوهش موردتوجه بوده است، ترکیبی از دو روش استقرایی و قیاسی است که به شیوهٔ تجربی معطوف به زمان گذشته‌نگر انجام شده است.

پیشینه و چارچوب نظری و مفهومی

از آنجایی‌که طاق‌های آهنگ خشتی و آجری در دوران تاریخی دارای ویژگی‌هایی در فن ساخت هستند که پس از شکل‌گیری، دارای تداوم و همراه با تطور و دگرگونی بوده که مسیر تکاملی خود را نیز در هر دوره طی کرده است و در دوران پس از خود دچار دگرگونی و گاهی تداوم در اجزا به‌واسطهٔ نوع کاربری، تحولات تکنولوژی، مهارت، سرعت و غیره شده است؛ لذا با توجه به ماهیت پیچیده و میان‌رشته‌ای موضوع، بررسی تحولات یک عنصر سازه‌ای مانند طاق‌آهنگ، به‌تنهایی از مسیر تحلیل تاریخی یا صرفاً نظری میسر نیست. مطالعهٔ این سازه در بستر معماری تاریخی، وابسته به مجموعه‌ای از عوامل: فنی، اقلیمی، فرهنگی و فناوری‌های بومی است؛ عواملی که در سایهٔ فقر نسبی اسناد و شواهد مستقیم، دستیابی به تصویر کامل از روند شکل‌گیری و تکامل آن‌را دشوار می‌سازند؛ با این‌حال، امکان تحلیل سیر دگرگونی، شناسایی عناصر تداوم‌یافته، و درک چگونگی تحولات و تکامل این فن ساخت، ازطریق تلفیق شواهد میدانی، متون تاریخی، و تحلیل‌های نظری، وجود دارد و از اهمیتی ویژه در شناخت معماری و حفاظت برخوردار است؛ بدین‌منظور، به‌سبب پیشینهٔ شکل‌گیری این نوع طاق در جغرافیای خوزستان و تداوم در دوران مختلف تاریخی، روند بررسی این عنصر سازه‌ای در دوران تاریخی از ایلام تا پایان ساسانیان در این محدودهٔ جغرافیایی مورد کنکاش فنی قرار گرفته است.

تعریف طاق‌آهنگ

«طاق‌آهنگ» از امتداد دادن یک چفد در راستای پاکارها پدید می‌آید؛ طاق‌آهنگ از امتداد یک خط در راستای چند سازندهٔ طاق پدید می‌آید. از دیدگاه هندسه‌عملی، طاق‌آهنگ از پوشاندن یک سطح با دو دیوار در دو سو، با و یا بدون کمک دیوار پشت‌بند به فرمی نیم‌استوانه‌ای‌مانند در بخش میانی در کل کار ساخته می‌شود (ولی‌بیگ، ۱۳۹۴: ۱۵)؛ درواقع، طاق‌آهنگ در اینجا بر روی یک سطح افقی زده می‌شود (معماریان، ۱۳۹۴: ۲۵۸). طاق‌آهنگ یا لوله‌ای که ساده‌ترین طاق ایرانی است؛ درواقع، ادامهٔ یک نوع چفت در امتدادی معین است. نام دیگر آن «گهواره‌ای» است. فرانسوی‌ها به این نوع طاق، «برسو» یعنی «گهواره» می‌گویند و نظر به شکل سادهٔ پوشش آهنگ در بعضی نقاط «لوله‌ای» نامیده می‌شود. به‌طورکلی طاق‌آهنگ در بناهایی که در دو طرف دو دیوار ممتد دارند، مناسب‌ترین پوشش است (پیرنیا، ۱۳۷۳: ۵۸). در خوزستان به این‌گونه طاق«پَی‌کو» یا «پیکو» گفته می‌شود. از نظر شیوهٔ چینش طاق‌های آهنگ؛ به‌صورت چینش: کوربل یا رگ‌چین، ضربی یا پر، رومی یا ایلامی، چپیله و ترکیب رومی و ضربی می‌باشد که هرکدام از شیوه‌ها خود در اجرا ازلحاظ نوع چینش، زاویهٔ قرارگیری مصالح، شکل هندسی مصالح، بهره‌گیری از قالب و عدم قالب دارای تنوع نیز هستند.

پیشینهٔ تاریخی طاق‌آهنگ در معماری ایران پیش از اسلام

پیشینهٔ شکل‌گیری طاق‌آهنگ در معماری ایران پیش از اسلام را می‌توان در سه حوزهٔ کلیدی بررسی کرد: داده‌های باستان‌شناسی، دیدگاه‌های پژوهشگران ایرانی، و تحلیل‌های تطبیقی پژوهشگران غربی. نخستین شواهد باستان‌شناسی طاق‌های آهنگ به هزاره‌های هفتم و ششم پیش‌ازمیلاد در تپه زاغه بازمی‌گردد، جایی‌که از پوشش‌های گهواره‌ای ساده با خشت‌های بزرگ استفاده شده است. در تپه نوشیجان نیز طاق‌های گهواره‌ای خشتی دورهٔ ماد، به‌ویژه در معبد دوم، شناسایی شده‌اند که با قالب‌های چوبی ساده اجرا شده و فرم‌هایی مشابه طاق‌های ضربی دارند (استروناخ، ۱۳۵۶؛ ملازاده، ۱۳۹۰). هم‌چنین، در شهرهای باستانی چون: شوش، چغازنبیل و هفت‌تپه، شواهدی از طاق‌های خشت و آجری دیده می‌شود که عملکردی اقلیمی داشته‌اند و متناسب با نیاز به پایداری در برابر نیروهای رانشی ساخته شده‌اند (گیرشمن، ۱۹۶۶؛ سرفراز، ۱۳۸۹). «مون» (Álvarez-Mon, 2020) با استناد به یافته‌های آکروپل شوش، پیشینهٔ این ساختارها را به حدود ۲۱۰۰–۲۰۵۰پ.م. می‌برد و آن‌را بی‌نظیر در منطقهٔ بین‌النهرین می‌داند. ازسویی می‌توان در مطالعات مربوط به معماری بین‌النهرین، روم و مصر باستان، نمونه‌های فراوانی یافت که پژوهشگران برجسته‌ای هم‌چون: «بزنوال» و همکاران (۲۰۱۸ و ۲۰۲۰)، «مارتین‌سواچ» و «کوامی» (۱۹۷۶)، «وان‌بیگ» (۱۹۸۶)، «روسی» (۲۰۱۹ و ۲۰۲۰) با دقت علمی به تحلیل و بررسی عوامل تعیین‌کننده در ساخت بناها پرداخته‌اند (مفیدی‌نصرآبادی به‌نقل از: Álvarez-Mon, 2020: 512)؛ به‌وجود تمهیدات سازه‌ای و عملکردی در خانه‌های مسکونی در هفت‌تپه و دروازه‌های چغازنبیل اشاره می‌کند (همان: ۵۱۸). این پژوهشگران، سابقهٔ تولید مصالح، فنون ساخت و تأثیرات متقابل این فنون در مناطق همجوار را به‌تفصیل بررسی کرده‌اند. در اینجا برخی از این موارد به‌کاررفته در بین‌النهرین از نگاه صاحب‌نظران به‌صورت اجمالی در زیر بیان می‌شود (جدول ۱).

درمیان پژوهشگران ایرانی، پیرنیا طاق‌آهنگ را جزء بنیادی ساختار معماری سنتی دانسته و آن‌را منشأیی برای گنبد و ایوان معرفی کرده است (پیرنیا، ۱۳۷۳). «محمدی» و «معماریان» (۱۳۹۴) نیز بر نقش مصالح، ملات و روش خشت‌چینی در شکل‌گیری این طاق‌ها تأکید داشته‌اند. از سوی دیگر، «گدار» و «گیرشمن» به نقش طاق‌های گهواره‌ای در معماری ایلامی و استمرار آن در دورهٔ ساسانی اشاره کرده‌اند (Goddard, 1966; Grishman, 1969). «پوپ»، در تحلیلی سازه‌ای،

جدول ۱: فنون ساخت و تمهیدات پایداری در طاق‌ها و سازه‌های آجری معماری باستان (نگارندگان، ۱۴۰۴).

Table 1: Construction techniques and stability measures in vaulted and brick structures of ancient architecture (Author, 2025).

محور بررسی	تمهیدات پایداری طاق و بنا	تکنیک‌های ساخت با آجر
نوع آجر	آجر گوه‌ای و ضخیم‌تر در پایه‌ها برای توزیع بهتر نیرو	آجر گوه‌ای، ذوزنقه‌ای، مستطیلی؛ متناسب با قوس و طاق (Sauvage, 1998; Delougaz, 1933)
ملات	ملات قیر در فضاهای مرطوب، ملات گل مرغوب در فضاهای عادی، نقش عایق و تثبیت. ملات چسبندهٔ گل و گچ	ملات گل، قیر یا ترکیبی؛ بسته به شرایط و عملکرد (Moorey, 1994; Rashid, 1981)
نحوهٔ اجرای طاق	چینش دورچین یا زاویه‌دار برای توزیع بار؛ طاق‌های دولایه در فضاهای سنگین	طاق گهواره‌ای بدون قالب یا با تکیه‌گاه موقت، رج‌به‌رج و زاویه‌دار (Sauvage, 2016)
نقش استادکار	استفاده از آزمون‌وخطا، تغییر اندازهٔ آجر، تثبیت با لایه‌های میانی، اجرای تراز دقیق	دانش تجربی استادکار در تنظیم انحنا، رطوبت ملات، و زاویه رج‌ها (Hnaihen, 2020)
تناسبات و فرم هندسی	تناسب میان نوع آجر و عملکرد سازه‌ای؛ فرم گوه‌ای برای قفل‌کنندگی در طاق	استفاده از قالب‌های خاص و آجر سفارشی برای فرم‌گیری دقیق قوس‌ها
ترکیب مصالح	آجر پخته در لایه‌های بیرونی برای مقاومت؛ خشت در لایه میانی برای حفظ حرارت	آجر پخته در نما یا قوس و خشت در بدنه، ترکیب عملکردی و اقتصادی
تأثیر اقلیم	پوشش دوم، زهکشی و انتخاب مصالح بر اساس اقلیم و کاربرد موضعی	در مناطق مرطوب آجر پخته و ملات قیر، در مناطق خشک خشت‌خام

طاق‌های اشکانی و ساسانی را نمونه‌هایی برجسته از این سنت می‌داند (Pope, 1965). «دالای» نیز به ویژگی‌های ساده، اما مؤثر این سازه‌ها هم‌چون: هندسهٔ ابتدایی، قالب‌های چوبی و مصالح بومی پرداخته است (Dallai, 2017). «بیر»، در مطالعات خود بر نیسا، به طاق‌های آهنگ و شعاعی اشاره کرده و آن‌ها را پایه‌گذار گسترش منطقه‌ای این سنت دانسته است (Bier, 1986)؛ هم‌چنین، «آرسه» (۲۰۰۸) چینش ترکیبی طاق‌های رومی و ضربی را محدود به دورهٔ اشکانی می‌داند، اگرچه شواهدی از آن در دورهٔ ایلام نیز در شوش وجود دارد.

درمجموع، این داده‌ها نشان می‌دهند که طاق‌آهنگ سابقه‌ای دیرینه و تحول‌یافته در بستر معماری بومی ایران دارد و ایران نقشی محوری در گسترش آن در خاور نزدیک ایفا کرده است. اجماع پژوهشگران داخلی و خارجی بر این اهمیت، زمینه را برای مطالعات تطبیقی و فنی دقیق‌تر فراهم می‌سازد.

مطالعات انجام‌شده درخصوص بناهای طاق‌دار خوزستان

خوزستان، به‌ویژه در دورهٔ ایلام، یکی از مهم‌ترین مناطق تمدنی ایران پیش از اسلام بوده است که پژوهشگران بسیاری چون: «ملک‌زاده» (۱۳۷۳)، «نگهبان» (۱۳۷۲)، «ارفعی» و «آمیه» (۱۳۷۲)، «مجیدزاده» (۱۳۷۰)، «هینتس» (۱۳۷۰)، «علیزاده» (۱۳۸۷)، «کارتر» (۱۹۸۴) و «پاتس» (۱۹۹۹) به بررسی آن پرداخته‌اند. کاوش‌های میدانی خاورشناسانی چون: «لفتوس»، «دیولافوا»، «دمورگان»، «گیرشمن» و «آدامز» نیز از قرن ۱۹ تا اواسط قرن ۲۰م. در این منطقه انجام شده است.

در بررسی پیشینهٔ مطالعات دربارهٔ بناهای طاق‌دار پیش از اسلام در خوزستان، می‌توان مشاهده کرد که باوجود سابقهٔ کهن معماری ایران و اهمیت خوزستان در تحولات معماری منطقه، پژوهش‌های موجود بیشتر پراکنده و توصیفی‌اند و کمتر به تحلیل‌های ساختاری و فن‌شناختی پرداخته‌اند (نگهبان، ۱۳۷۲؛ پوپ، ۱۳۶۵). از نخستین منابع غربی، دیولافوا در قرن ۱۹م. به بررسی ایوان کرخه پرداخت و طاق‌آهنگ عرضی را نوآوری ساسانی دانست؛ دیدگاهی که بعداً مورد نقد گدار قرار گرفت. پژوهشگرانی چون: «گیرشمن»، «هوگی»، «مصطفوی» و «زلقی» نیز در آثار خود به معماری طاق‌دار خوزستان اشاره‌هایی داشته‌اند.

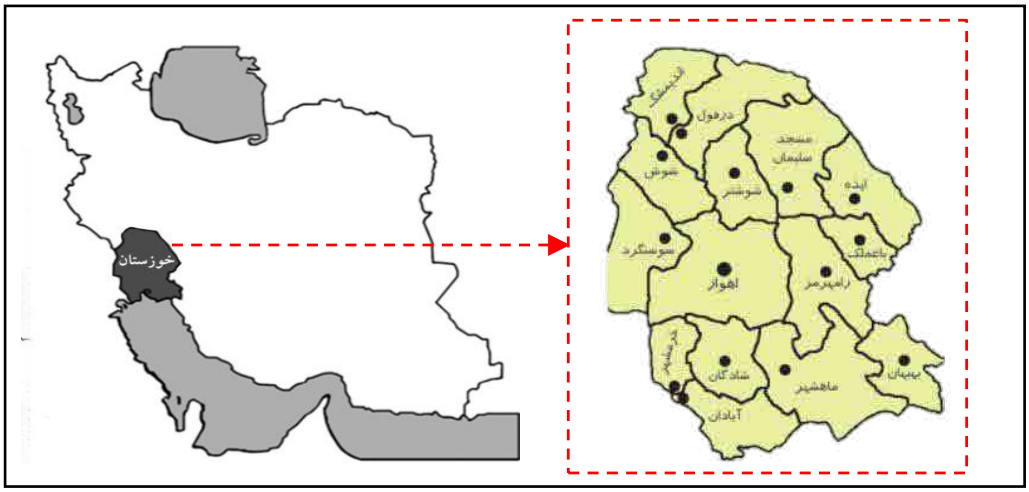
مطالعات بعدی به‌ویژه در حوزهٔ مقابر طاق‌دار، هم‌چون: «رهبر» (۱۳۷۳ و ۱۳۷۸) و «سبحانی» و «رضایی‌نیا» (۱۴۰۰)، به تحلیل‌هایی دربارهٔ فرم، سازه و سبک این مقابر پرداخته‌اند. در این‌میان، تحلیل‌های هندسی و تناسبات خیز و دهانه، تنها در آثار محدود و برجسته‌ای چون پژوهش «بوشارلات» (Boucharlat & Haerinck, 2011) دربارهٔ مقابر شوش دیده می‌شود. بررسی‌های «مهرکیان» (۲۰۱۹) دربارهٔ آرامگاه‌های کل‌چنار نیز به تکنیک پوشش سنگی توجه کرده است. «مقدم» (۱۳۹۷ و ۱۴۰۴) در بررسی‌ای به مقابر چگاسفلی پرداخته است و ویژگی معماری آن‌ها را بیان نموده است. در پژوهشی دیگر «محمدی‌فر» و همکاران (۱۴۰۲) به بررسی مقابر دورهٔ الیمایی پرداخته‌اند و آن‌ها را از جنبهٔ زیست‌محیطی مورد بررسی قرار داده و بدون اشاره به ویژگی‌های معماری آن‌ها به دو دستهٔ کوه و دشت، تقسیم کرده است. در کنار این موارد، کاوش‌های کلاسیکی چون: «گیرشمن»، «دمورگان» و «دومکنم» اطلاعات ارزنده‌ای از معماری مقابر در شوش، هفت‌تپه و چغازنبیل فراهم آورده‌اند.

با این‌حال، اغلب مطالعات موجود، محدود به داده‌های باستان‌شناسی، ترسیم نقشه، یا ابعاد مصالح بوده و تحلیل‌هایی چون نوع طاق، روابط هندسی، چینش مصالح، و فنون ساخت کمتر موردتوجه قرار گرفته‌اند. حتی در تاریخ‌گذاری مقابر، بیشتر بر شواهدی چون اشیائ درون گورها تکیه شده است، که خود احتمال خطای تحلیلی دارد. تحلیل‌های نرم‌افزاری نیز مانند پژوهش «حسینی» و همکاران (۲۰۲۰) فاقد بررسی چینش طاق‌اند. درمجموع، خلأیی جدی در بررسی ساختارهای طاق‌دار از منظر فن‌شناسی، تناسبات سازه‌ای، و روش‌های اجرایی سنتی در پژوهش‌های پیشین مشهود است. پژوهش حاضر بر آن است تا با رویکردی ترکیبی و تحلیلی، این نقیصه را جبران کرده و درکی ژرف‌تر از فناوری ساخت و تحولات معماری طاق‌دار در خوزستان پیش از اسلام ارائه دهد.

بررسی طاق‌های آهنگ در استان خوزستان

- مقدمه و معرفی منطقه

استان خوزستان جنوبی‌ترین استان کشور و از شمال به ایلام و لرستان، از شرق به چهارمحال‌وبختیاری و کهگیلویه‌وبویراحمد، از جنوب‌شرقی به استان بوشهر، از جنوب به خلیج‌فارس و از غرب به عراق، محدود است (اطلس راهنمای استان‌های ایران، ۱۳۸۴)، (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت خوزستان در ایران و شهرهای دارای طاق‌آهنگ آجری و خشتی (نگارندگان، ۱۴۰۴).

Table 2: Construction characteristics of barrel vaults in examined tombs of the Elamite period (2nd millennium BCE: 1900–1500 BCE), (Author, 2025).

ازسویی در این محدوده به‌سبب ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی که شامل بخش کوهستانی زاگرس با مصالح سنگی و بخش پست و جلگه ای دشت خوزستان با اولویت مصالح آجری و خشتی به‌سبب پیشینهٔ این نوع مصالح وجود دارد و تقریباً در همهٔ دوران تاریخی کاربرد داشته است؛ لذا در این پژوهش مصالح آجری و خشتی با توجه به پیشینهٔ ساخت طاق‌آهنگ با این نوع مصالح، ویژگی اقلیمی و فراوانی این ماده در ساخت بناهای طاقی در دوره‌های مختلف درنظر گرفته شده و بر بخش جلگه‌ای و پست استان، شهرهای محل کشف آثار طاقی خشتی و آجری، هم‌چون شهرستان دزفول، شوش، شوشتر و نواحی مجاور آن‌ها تمرکز بیشتری شده است. با توجه به این‌که بناهای دورهٔ ماد در این محدوده کشف نشده است و ازسویی فاقد بناهای دورهٔ هخامنشی دارای ویژگی‌های مدنظر برخورداری از طاق‌آهنگ است؛ لذا به‌طور ویژه بر دوره‌های ایلامی، اشکانی، الیمایی و ساسانی تمرکز شده است.

- معرفی آثار دارای طاق‌آهنگ

همان‌گونه که در بخش روش پژوهش بیان شد؛ در این پژوهش آثار دارای طاق‌آهنگ براساس شکل هندسی آجر، آثار تاریخی در محدودهٔ استان خوزستان، از دورهٔ ایلامی تا پایان دورهٔ ساسانی، مورد شناسایی، دسته‌بندی و بررسی قرار گرفته است. در مرحلهٔ بعد براساس ویژگی دستیابی به داده‌های عددی تعداد ۲۱نمونه دارای اسناد موردنیاز ترسیمی و تصویری، براساس کاربری، دورهٔ تاریخی و شواهد ساختاری طبقه‌بندی شده‌اند. جامعهٔ آماری شامل بناهایی با حضور طاق‌گهواره‌ای (طاق‌آهنگ) است که یا به‌طور کامل حفظ شده‌اند یا شواهدی از وجود طاق در ساختار آن‌ها باقی‌مانده است که در ادامه به تفکیک دورهٔ تاریخی بیان شده است.

۱. دورهٔ ایلام (هزارهٔ دوم پیش‌ازمیلاد: ۱۹۰۰-۱۵۰۰پ.م. سلسلهٔ سوکل‌مخ

پوشش‌های طاق‌دار، مشابه آن‌چه در ایران دیده می‌شود، از هزارهٔ سوم پیش‌ازمیلاد به‌صورت پراکنده در بین‌النهرین گزارش شده‌اند و به‌دلیل پیچیدگی سازه‌ای، نیازمند دانش فنی ویژه‌ای بوده‌اند (Dalai, 2018: 154). در ایران، قدیمی‌ترین شواهد طاق‌زنی تدفینی در گورستان پیشاتاریخی تل چگاسفلی در دشت شوشان شناسایی شده است که قدمت آن به حدود ۴۲۰۰ تا ۳۸۰۰پ.م. می‌رسد (مقدم، ۱۳۹۷). گورهای این محوطه با مصالح بومی نظیر آجر، خشت و چینه، ساخته شده‌اند و تنوع قابل‌توجهی در پلان، ابعاد، نوع چیدمان و فن ساخت دارند. در نمونه‌هایی نیز استفاده از آجرهای کم‌پخته و خشت‌های بزرگ همراه با پشت‌بندهای درونی و بیرونی، نمایانگر طراحی هدفمند برای مقابله با فشارهای رانشی است. این الگوهای ابتدایی طاق‌زنی، زمینه‌ساز توسعهٔ معماری تدفینی طاق‌دار در دوره‌های بعد شدند. گورهای جمعی در چگاسفلا از تنوع بالایی ازنظر ساختار معماری، مصالح به‌کار رفته در ساخت گورها و شمار اموات دفن‌شده برخوردار است. همهٔ گورهای جمعی دارای ساختاری مستطیل‌شکل با جهت شمال‌غربی-جنوب‌شرقی هستند، به‌نحوی‌که به‌نظر می‌رسد در برپایی گورهای جمعی نوعی استانداردسازی رعایت شده است (مقدم، ۱۴۰۴: ۵۳). بنابر نظر باستان‌شناسان آغازایلامی اولین‌بار در شوش، که به‌طور سنتی یکی از پایتخت‌های حکومت ایلام پذیرفته شده، یافت شده است (نیکنامی و همکاران، ۱۳۹۸: ۲۶). در دورهٔ ایلام، به‌ویژه در شوش، گونه‌های متنوعی از مقابر طاق‌دار (Ghirshman & Stève, 1966: 4) با طاق‌های گهواره‌ای، ضربی، رومی و ترکیبی مشاهده شده‌اند (گیرشمن، ۱۳۷۵؛ دومنکم، ۱۹۴۶). یکی از تکنیک‌های خاص، چینش ضربی متمایل است. این شیوه، به‌ویژه در مقابر ایلامی رواج داشته و نشان از تکامل در دانش طاق‌زنی دارد. نیز در کاوش‌های شوش، انواع مختلفی از قبور طاق‌دار با طراحی‌های متفاوت مشاهده شده‌اند که شامل طاق‌های گهواره‌ای با چینش رگ‌چین

(کوربل) ضربی، رومی و ترکیبی می‌شوند (دومنکم، ۱۹۴۶). در نیمهٔ دوم هزارهٔ دوم پیش‌ازمیلاد، شوش شاهد نوع جدیدی از طاق‌های هلالی بود. در این طاق‌ها از همان ابتدای قوس، آجرها به‌صورت راسته چیده شده و بر روی آن‌ها آجرهای دیگری به‌تدریج اضافه می‌شدند تا به‌شکل قوس‌های پشت‌سر هم درآیند. این قوس‌ها به‌تدریج که از دیوار دور می‌شوند، به حالت عمودی نزدیک می‌شوند. این شیوهٔ اجرایی که به -شیوهٔ ضربی متمایل- معروف است، به‌طور خاص در مقابر ایلامی دیده می‌شود (گیرشمن، ۱۳۷۵)، (جدول ۱).

۲. دورهٔ ایلام میانه (۱۵۰۰-۱۲۵۰پ.م.)

برخی از جالب‌ترین و اسرارآمیزترین سازه‌ها در ایلام، بناهای خشتی با مقبره‌های زیرزمینی آجری پخته هستند که به‌عنوان محل دفن افراد درگذشته از نخبگان طراحی شده‌اند. این ساختمان‌ها هم‌چنین برای انجام آئین‌های تدفین منظم و دوره‌ای مورداستفاده قرار می‌گرفتند (Álvarez-Mon, 2018 :519). بررسی مقابر ایلام میانه (۱۵۰۰-۱۲۵۰پ.م.) شامل مقابر هفت‌تپه و چغازنبیل نشان‌دهندهٔ ویژگی‌های خاص و تحولاتی در فن ساخت طاق‌های آهنگ آجری است که در آن دوره به‌کار گرفته شده است. براساس جداول ۴ و ۵، در دورهٔ ایلام میانه، دو مقبره از هفت‌تپه (۱۵۰۰پ.م.)، و پنج مقبره از چغازنبیل (۱۲۵۰پ.م.) مورد بررسی قرار گرفته است. طاق آرامگاه ضربی و به‌صورت قوسی بیضی است، اگر بقایای معماری هفت‌تپه همان‌گونه که مدارک نشان می‌دهد به قرن ۱۴پ.م. تعلق داشته باشد طاق آرامگاه تپتی‌اهر در نوع خود قدیمی‌ترین است (مجیدزاده، ۱۳۷۰: ۷۰). این مقابر با دیوارهای خشتی محکم احاطه شده است (Álvarez-Mon, 2018 :519). طاق‌های کشف‌شده در هفت‌تپه از شاهکارهای معماری ایلامی به‌شمار می‌روند و نشان‌دهندهٔ تداوم و پیش‌رفت در فنون ساخت طاق‌ها در این منطقه هستند (نگهبان، ۱۳۷۲: ۷۵). طاق‌ها از آجرهای مربعی‌شکل ساخته شده و برای به‌هم چسباندن این آجرها از ملات تندگیر گچ استفاده شده است (جدول ۲).

در مقابر چغازنبیل (جداول ۴-۵) که مربوط به دورهٔ ایلام میانه و حدود ۱۲۵۰پ.م. است، شیوهٔ ساخت طاق‌ها به‌طور قابل‌توجهی متفاوت از هفت‌تپه است. طاق‌ها در چغازنبیل بر دیوارهای طولی مقبره تکیه دارند و بر روی دیوار انتهایی مقبره که قوس طاق را شکل می‌دهد، می‌پیوندند (گیرشمن، ۱۳۷۵: ۸۶-۸۸). این دو دیوار انتهایی نقش قالب ثابت را دارا هستند. در این طاق‌ها، آجرهای استفاده‌شده، آجرهای معمولی مربع‌شکل هستند و هیچ‌گونه آجر قالب‌گیری شده با شکل هندسی ویژه (ذوزنقه) برای ساخت طاق‌ها به‌کار نرفته است. چینش طاق‌ها به شیوهٔ رومی (ایلامی) اجرا شده است. شیوهٔ اجرای طاق در چغازنبیل نشان‌دهندهٔ انتقال دانش معماری بین ایلام و بین‌النهرین است (Sauvage, 2009)، (جدول۳).

۳. دورهٔ ایلام‌نو

دورهٔ ایلام‌نو با نام‌های مختلفی هم‌چون: «دوران بابلی»، «ایلام متأخر»، «انحطاط ایلامی» و «پیش از هخامنشیان» معرفی شده است (Miroschedji, 1981: 25). قابل‌توجه‌ترین تدفین این دوره، مقبره‌ای زیرزمینی با پوشش طاق‌دار در شهر شاهی شوش است. این مقبره دارای ورودی با طاق کوربل بوده و در اضلاع بلند آن، آجرها به‌صورت ضربی و مستقیماً بر روی کف‌سازی قرار گرفته‌اند. هم‌چنین، پهنای دیوار پشتی بیشتر از دیوار جلویی است (جدول ۴).

۴. دورهٔ اشکانی

در دورهٔ اشکانی، که به‌عنوان دوره‌ای انتقالی میان معماری هخامنشی و ساسانی شناخته می‌شود،

شیوه‌های نوینی در ساخت‌وساز پدید آمد که ازجمله مهم‌ترین آن‌ها توسعهٔ تکنیک‌های طاق‌سازی است (معماریان، ۱۳۶۷: ۲۰؛ لنکستر، ۲۰۰۹). طاق‌های گهواره‌ای ضربی با آجرهای بزرگ و ملات گچ، بدون نیاز به قالب موقت اجرا می‌شدند و پایداری بالایی داشتند (Kawami, 1976: 61). در این دوره، استفاده از آجرهای استاندارد مربع‌شکل و ترکیب چینش ضربی و رومی در اجرای طاق‌ها رایج شد (Lancaster, 2010: 459-464). ازجمله مراکز مهم اشکانی در خوزستان، شوش بود که آثار متعددی ازجمله گورستان‌ها و طاق‌های ضربی در آن کشف شده است (کابلی، ۱۳۷۳: ۱۳۱؛ سرفراز، ۱۳۸۹: ۱۹۷-۲۰۳). براساس آن‌چه در جدول ۵ آمده است، مطالعات انجام‌شده دربارهٔ معماری آرامگاهی دورهٔ اشکانی در خوزستان، به‌ویژه شوش، نشان می‌دهد که بیشتر مقابر این دورهٔ زیرزمینی و با مصالح آجر پخته ساخته شده‌اند و ارتفاع داخلی آن‌ها معمولاً بیش از ۲ متر است (Boucharlat, 2011: 64).

۵. دورهٔ الیمایی

همان‌طورکه در جدول ۶ آمده، پنج مقبرهٔ گلالک شوشتر متعلق به دورهٔ الیمایی هستند که از این‌میان، سه مقبره (۱، ۲ و ۳) دارای پوشش طاق‌دار هستند. این مقابر کاملاً ایرانی بوده و به‌طور چشمگیری تحت‌تأثیر هنر ایلامی قرار دارند، به‌گونه‌ای که می‌توان به‌وضوح استمرار ساختارهای معماری بومی از دورهٔ ایلام میانه تا دوران الیمایی را در آن‌ها مشاهده کرد (رهبر، ۱۳۷۳). این تأثیرات نه‌تنها در شیوه‌های ساخت، بلکه در نوع خاکسپاری و باورهای مذهبی مرتبط با آن‌ها نیز دیده می‌شود که در محوطهٔ باستانی صالح‌داوود مربوط به دوران اشکانی-الیمایی به‌طور خاص نمایان است (آقاعلی‌گل، ۱۳۹۸: ۱۴۶). براساس پژوهش‌های انجام‌شده، آرامگاه‌های دورهٔ ایلامی به دو دستهٔ کلی کوهستانی و دشت تقسیم می‌شوند؛ آرامگاه‌های کوهستانی به آرامگاه‌های زیرزمینی، نیمه‌زیرزمینی و ساخته‌شده در سطح و آرامگاه‌های دشت الیمائیان به دو گونهٔ آرامگاه زیرزمینی (سرداب‌های) و آرامگاه نیمه‌زیرزمینی تقسیم شده‌است که آرامگاه‌های دشت در ساخت آن‌ها از آجر استفاده شده است (محمدی‌فر و همکاران، ۱۴۰۲: ۱۱۳). بررسی آرامگاه‌های شوشتر، صالح‌داوود و سایر نمونه‌های مرتبط نشان می‌دهد که تمامی مقابر گلالک شوشتر به‌صورت زیرزمینی ساخته شده‌اند و دارای طاق‌های آهنگ آجری هستند. دیوارها و پوشش طاق‌ها با آجرهای مربع‌شکل پخته ساخته شده‌اند و ملات استفاده شده در این ساختارها گچ است (جدول ۶).

۶. دورهٔ ساسانی

با آغاز سلطهٔ ساسانیان در قرن سوم میلادی و تداوم سنن ساخت‌وساز اشکانی، فن طاق‌سازی وارد مرحله‌ای پیشرفته‌تر شد. ساسانیان، نه‌تنها تکنیک‌های آجرچینی عمودی و ضربی شیب‌دار را حفظ کردند، بلکه آن‌ها را در مقیاس‌های بسیار بزرگ و پیچیده‌تری به‌کار گرفتند (معماریان، ۱۳۸۹: ۹۲)؛ هم‌چنین، استفاده از ملات گچ با گیرایش سریع‌تر نسبت به ملات آهک، امکان ساخت طاق بدون نیاز به قالب چوبی را در فواصل زمانی کوتاه‌تری فراهم می‌کرد، که این‌امر در اقلیم گرم و کم‌چوب منطقه بسیار کارآمد بود (Lancaster, 2009: 372؛ عسگری‌چاوردی، ۲۰۱۸). بررسی مجموعه‌ای از نمونه‌های معماری برجای‌مانده از دورهٔ ساسانی در خوزستان شامل پنج مقبرهٔ طاق‌دار (در شوش)، یک کانال هدایت آب (سیفون در جندی‌شاپور)، ایوان کرخه (کاخ ساسانی) و یک پل، نشان‌دهندهٔ پویایی و تنوع تکنیکی در طراحی و اجرای طاق‌های آهنگ است (جدول ۷)؛ در عین‌حال، این طاق‌ها اشتراکاتی ساختاری و شکلی دارند که می‌توان آن‌ها را نشانه‌ای از نظام اجرایی نسبتاً تثبیت‌شده و انتقال‌یافته در این منطقه تلقی کرد. ترکیب فرم‌های ضربی، رومی و ترکیبی، در کنار استفادهٔ

دقیق از مصالح مدولار (آجرهای مربعی) و رعایت نسبت‌های هندسی پایدار، بیانگر یک مرحلهٔ پیش‌رفته از دانش سازه‌ای و معماری بومی در جنوب‌غرب ایران در دورهٔ ساسانی است. مصالح غالب در طاق‌های این دوره، آجرهای مربع پخته است. ملات مصرفی اغلب گچ بوده که در اقلیم گرم و خشک خوزستان عملکرد مناسبی داشته است.

جدول ۲: مشخصات اجرای طاق‌آهنگ مقابر بررسی شدهٔ دورهٔ ایلام (هزارهٔ دوم پیش‌ازمیلاد: ۱۹۰۰–۱۵۰۰ پ.م.)، (نگارندگان، ۱۴۰۴).
Table 2: Construction characteristics of barrel vaults in examined tombs of the Elamite period (2nd millennium BCE: 1900–1500 BCE) (Author, 2025).

ردیف	نوع بنا	پلان	موقعیت و محل قرارگیری	دوره تاریخی	نوع چینش آجر تدفین		جنس مصالح	ضخامت دیواره زیر تاق	سطح تاق	دیوار زیر تاق (عمود- مایل)	جهت قرار گیری تاق	تعداد دیوار اصلی با زیر آجر تدفین	تعداد لایه های تاق	ابعاد آجر تدفین		
					در پایه تا شکن گاه	از شکن گاه تا راس			آجر تدفین					طول	عرض	ارتفاع
۱	مقبره شماره ۱ KS 53		شوش	ایلام هزاره دوم ق.م	ضربی شیبدار	ضربی شیبدار	آجر مربع	یک آجر	مسطح	عمود	محور طولی اتاق	سه دیوار	یک لایه	۲.۲۵	۱.۳۰	–
۲	مقبره شماره ۲ KS 53		شوش	ایلام هزاره دوم ق.م	ضربی شیبدار	ضربی شیبدار	آجر مربع	یک آجر	مسطح	عمود	محور طولی اتاق	سه دیوار	یک لایه	۲.۴۰	۲.۱۰	–
۳	مقبره شماره ۳ شوش		شوش (گریشمن 1963-1964.	عیلام هزاره دوم- سوکل مخ	ضربی شیبدار	ضربی شیبدار	آجر مربع	یک آجر	مسطح	عمود	محور طولی اتاق	سه دیوار	یک لایه	۱.۵۱	۰.۹۵	۰.۵۳

جدول ۳: مشخصات اجرای طاق‌آهنگ مقابر بررسی‌شدهٔ دورهٔ ایلام میانه (۱۵۰۰–۱۱۰۰ پ.م.، هفت‌تپه)، (نگارندگان، ۱۴۰۴).
Table 3: Construction characteristics of barrel vaults in examined tombs of the Middle Elamite period (1500–1100 BCE, Haft Tappeh), (Author, 2025).

ردیف	تصویر	موقعیت و محل قرارگیری	دوره تاریخی	نوع چینش آجر تدفین		جنس مصالح چینش تاق	ضخامت دیواره زیر تاق	سطح تاق تدفین	دیوار زیر تاق (عمود- مایل)	نحوه قرار گیری دو تاق راه پله و تدفین	جهت قرار گیری تاق	تعداد دیوار اصلی با زیر آجر تدفین	تعداد لایه های تاق اتاق تدفین	ابعاد آجر تدفین		
				در پایه تا شکن گاه	از شکن گاه تا راس									طول	عرض	ارتفاع
۱		هفت تپه	ایلام میانه ۱۵۰۰ ق.م	ضربی شیب دار	ضربی شیب دار	آجر پخته مربعی ۷*۲۷*۲۷	نامعلوم- دیوار دور آرامگاه: ۱.۳۰: دو دیوار طولی ۱.۴۰: دوردیوار عرضی	مسطح	عمود به ارتفاع ۱.۵۰ متر	در امتداد هم تک محور	محور طولی اتاق و رو به دیوار روبروی ورودی	۳ دیوار	یک آجر ۷*۲۷*۲۷	۱۰.۱۲	۳.۲۲	۲.۷۰ – ۲.۷۵
۲		هفت تپه	ایلام میانه ۱۵۰۰ ق.م	ضربی شیب دار	تخریب شده طبق شواهد موجود ضربی شیب دار است	آجر پخته مربعی ۷*۳۲*۳۷ – ۸	یک آجر مربع حدود ۳۰ سانتی متر	مسطح	عمود	تک محور	محور طولی اتاق و رو به دیوار روبروی ورودی	۳ دیوار	یک آجر ۸-۷*۳۸-۳۷	۳.۸۰	۱.۸۵	

جدول ۴: مشخصات اجرای طاق‌آهنگ مقابر بررسی‌شدهٔ دورهٔ ایلام میانه (چغازنبیل ۱۲۰۰ پ.م.)، (نگارندگان، ۱۴۰۴).
Table 4: Construction characteristics of barrel vaults in examined tombs of the Middle Elamite period (Chogha Zanbil, 1200 BCE), (Author, 2025).

ردیف	تصاویر	موقعیت و محل قرارگیری	دوره تاریخی	نوع چینش آجر تدفین		جنس مصالح		ضخامت دیواره زیر تاق	سطح تاق		دیوار زیر تاق (عمود- مایل)	نحوه قرار گیری دو تاق	جهت قرار گیری تاق	تعداد دیوار اصلی با زیر آجر تدفین	ضخامت تعداد لایه های تاق		ابعاد آجر تدفین		
				در پایه تا شکن گاه	از شکن گاه تا راس	ملات	مصالح چینش		راه پله: اتاق اول	اتاق تدفین					اتاق اول	اتاق تدفین	طول	عرض	ارتفاع
۱		چغازنبیل	ایلام میانه	رومی راهرو: ضربی	رومی	آهک- قیر	آجر پخته مربعی ۱۰*۲۷*۲۷	یک و نیم آجر مربع	مسطح	مسطح	مایل	در امتداد هم و در راستای محور مرکزی تدفین	محور طولی اتاق	چهار دیوار	یک لایه و یک و نیم آجری	یک لایه و یک و نیم آجری	۱۲.۶۰	۳.۰۰	۳.۷۸
۲		چغازنبیل	ایلام میانه	رومی	رومی	آهک- قیر	آجر پخته مربعی ۱۰*۲۷*۲۷	یک و نیم آجر مربع	مسطح	مسطح	مایل	عمود بر هم و راه پله و اتاق اول در راستای هم.	محور طولی اتاق	چهار دیوار	یک لایه و یک و نیم آجری	یک لایه و یک و نیم آجری	۶.۸۵ ۶.۲۵	۳.۰۸ ۳.۰۸	۳.۹۰ ۳.۹۰
۳		چغازنبیل	ایلام میانه	رومی	رومی	آهک- قیر	آجر پخته مربعی ۱۰*۲۷*۲۷	یک و نیم آجر مربع	مسطح	مسطح	مایل	عمود بر هم و راه پله و اتاق اول در راستای هم.	محور طولی اتاق	چهار دیوار	یک لایه و یک و نیم آجری	یک لایه و یک و نیم آجری	۶.۱۵ ۶.۱۵	۳.۱۵ ۳.۱۵	۳.۱۹ ۴.۱۹
۴		چغازنبیل	ایلام میانه	رومی	رومی	آهک- قیر	آجر پخته مربعی ۱۰*۲۷*۲۷	یک و نیم آجر مربع	مسطح	مسطح	مایل	عمود بر هم	محور طولی اتاق	چهار دیوار	یک لایه و یک و نیم آجری	یک لایه و یک و نیم آجری	۱۵	۳.۶۲	۳.۸۵
۵		چغازنبیل	ایلام میانه	رومی	رومی	آهک- قیر	آجر پخته مربعی ۱۰*۲۷*۲۷	تدفین: یک و نیم آجر مربع اتاق اول: دو آجر مربع.	مسطح	مسطح	مایل ۸۶ درجه	عمود بر هم و راه پله و اتاق اول در راستای هم.	محور طولی اتاق	چهار دیوار	یک لایه و یک و نیم آجری	یک لایه و یک و نیم آجری	۸.۳ ۷.۶۸	۳.۱ ۳.۱	۳.۹۲ ۳.۵

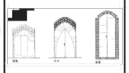
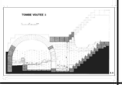
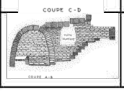
جدول ۵: مشخصات اجرای طاق‌آهنگ مقابر بررسی‌شدهٔ دورهٔ ایلام نو (نگارندگان، ۱۴۰۴).

Table 5: Construction characteristics of barrel vaults in examined tombs of the Neo-Elamite period (Author, 2025).

ردیف	نوع بنا	پلان	موقعیت و محل قرارگیری	دوره تاریخی	نوع چینش اتاق تدفین: در پایه تا شکن گاه	نوع چینش اتاق تدفین: از شکن گاه تا راس	جنس مصالح	ضخامت دیواره زیر تاق	سطح تاق: اتاق تدفین	دیوار زیر تاق (عمود- مایل)	جهت قرار گیری تاق	تعداد دیوار اصلی باربر اتاق تدفین	تعداد لایه های تاق	ابعاد اتاق تدفین: طول	ابعاد اتاق تدفین: عرض	ابعاد اتاق تدفین: ارتفاع
۱	مقبره شماره ۱ KS 53		Ville Royale IIشوش	نئو ایلامی	ضربی شیبدار	ضربی شیبدار	خشت مربعی ۳۷×۳۷×۸-۷	یک خشت	مسطح	فاقد دیوار و اجرای تاق از روی زمین	محور طولی اتاق و رو به دیوار پشتی روبروی ورودی	سه دیوار	یک لایه	۲.۸۰	۲.۷۵ ۲.۵۰ ذوزنقه	۲متر عمق گودال ۱.۳۰ ارتفاع تاق

جدول ۶: مشخصات اجرای طاق‌آهنگ مقابر بررسی‌شدهٔ دورهٔ اشکانی (نگارندگان، ۱۴۰۴).

Table 6: Construction characteristics of barrel vaults in examined tombs of the Parthian period (Author, 2025).

ردیف	نوع بنا	تصویر	موقعیت و محل قرارگیری	دوره تاریخی	نوع چینش اتاق تدفین: در پایه تا شکن گاه	نوع چینش اتاق تدفین: از شکن گاه تا راس	جنس مصالح: ملات	جنس مصالح: مصالح چینش	ضخامت دیواره زیر تاق	سطح تاق: راه پله	سطح تاق: اتاق تدفین	دیوار زیر تاق (عمود- مایل)	نحوه قرار گیری دو تاق راه پله و تدفین	جهت قرار گیری تاق	تعداد دیوار اصلی باربر اتاق تدفین	تعداد لایه های تاق: راه پله	تعداد لایه های تاق: اتاق تدفین	ابعاد اتاق تدفین: طول	ابعاد اتاق تدفین: عرض	ابعاد اتاق تدفین: ارتفاع
۱	مقبره زیرزمینی		شوش	اوایل اشکانی به سبک مقابر ایلامی ص: ۲۵	تاق بخش تدفین تخریب شده است، به نظر رومی بوده است	اتاق تدفین: تخریب راهرو: ضربی	؟	آجر پخته مریعی	پک آجر مربع	پله پله	مسطح	عمود	در امتداد هم و در راستای محور مرکزی تدفین	محور طول اتاق	اتاق تدفین سه دیوار راه پله: دو دیوار	یک لایه سه لایه سه لایه	تخریب شده	۲.۹۶	۲.۵	۲
۲	مقبره زیرزمینی		شوش	اوایل اشکانی ص: ۲۵	حفر شده خاک طبیعی	–	؟	زمین طبیعی	زمین	مسطح شیب دار	مسطح	عمود	L شکل و عمود برهم (بالی ورود به اتاق تدفین در مور مرکزی)	طاق در جهت طول اتاق کنده شده است	–	–	–	۲.۵	۱.۹۰	۱.۵۰
۳	مقبره زیرزمینی		شوش	اواخر اشکانی ص: ۲۵	نویسنده در بازسازی رومی قرار داده است. راهرو: ضربی	رومی	؟	آجر پخته مربعی ۳۲ ×۳۲	۳۲ سانتی متر پک آجر مربع	پله پله	مسطح	عمود	L شکل و عمود برهم هم	در جهت محور طول اتاق	دودیوار زیر تاق	یک لایه	یک لایه	۲.۲۶	۲.۸	۲.۲۱
۴	مقبره زیرزمینی		شوش	اشکانی ص: ۲۵	ادامه ان تخریب شده است. (از سه آجر موجود به نظر می رسد ضربی)	رومی	؟	آجر پخته مربعی	پک آجر و نیم	احتمالا مسطح	مسطح	مایل	عمود بر هم	در جهت محور طول اتاق	سه دیوار زیر تاق هم دیوار انتهایی زیر تاق شکن منحنی است)	یک لایه	یا لایه	۳.۵	۳.۲۵	۲۵ احتمالا
۵	مقبره زیرزمینی		شوش	اواخر اشکانی ص: ۲۵	تدفین: ضربی بدون شیب راهرو: رومی	رومی	؟	آجر پخته مربعی ۲۸ – ۲۷×۲۷ – ۲۸	پک آجر مربع	مسطح	مسطح	عمود	در امتداد هم و در راستای محور مرکزی تدفین	در جهت محور طول اتاق	دو دیوار زیر تاق	یک لایه	یک لایه	۲.۸	۲.۱	حدود ۲۵ پخش بالایی تخریب شده
۶			شوش	اشکانی ص: ۲۵	تدفین: ضربی بدون شیب راهرو: رومی	رومی	؟	آجر پخته مریعی	یک آجر مربع	مسطح	مسطح	مایل	L شکل و عمود برهم هم	عمود بر جهت محور طول اتاق	دودیوار	یک لایه	یک لایه	۲.۲۵	۱.۹	۲

جدول ۷: مشخصات اجرای طاق‌آهنگ مقابر بررسی‌شدهٔ دورهٔ الیمایی (نگارندگان، ۱۴۰۴).

Table 7: Construction characteristics of barrel vaults in examined tombs of the Elymaean period (Author, 2025).

ردیف	تصاویر	موقعیت و محل قرارگیری	دوره تاریخی	نوع چینش اتاق تدفین و راهرو: در پایه تا شکن گاه	نوع چینش اتاق تدفین و راهرو: از شکن گاه تا راس	جنس مصالح	ضخامت دیواره زیر تاق	سطح تاق اتاق تدفین	دیوار زیر تاق (عمود- مایل)	نحوه قرار گیری دو تاق راه پله و تدفین	جهت قرار گیری تاق	تعداد دیوار اصلی باربر اتاق تدفین	تعداد لایه های تاق	ابعاد اتاق تدفین: طول	ابعاد اتاق تدفین: عرض	ابعاد اتاق تدفین: ارتفاع
۱		شوشتر مقبره زیرزمینی شماره ۱	الیمایی	رومی راهرو: تخریب شده سکوها: رومی	اتاق تدفین: تخریب شده است، بر اساس بخش موجود به نظر ضربی بوده است. سکوها: ضربی	آجر پخته مربعی ۲۶×۲۶×۶-۷	پک آجر	مسطح	مایل یکپارچه	در امتداد هم و در راستای محور مرکزی تدفین	محور طول اتاق	دودیوار	پخش رومی دو آجر پخش ضربی یک و نیم آجر	۳.۶۰	۲.۸۵	۲.۰۰ ۲.۷۰
۲		شوشتر مقبره زیرزمینی شماره ۲	الیمایی	تدفین: رومی مایل راهرو: تخریب شده سکوها: رومی	اتاق تدفین: تخریب شده راهرو: تخریب سکوها: ضربی	آجر پخته مربعی ۲۶×۲۶×۶-۷ (رهبر) ۲۹×۲۹×۶-۷	پک آجر	مسطح	مایل یکپارچه	در امتداد هم و در راستای محور مرکزی تدفین	محور طول اتاق	دودیوار زیر تاق و تاق تدفین روی یک تویزه رومی اجرا شده است.	یک لایه آجر مریعی	۴.۲۰	۳.۳۴	–
۳		شوشتر مقبره زیرزمینی شماره ۳	الیمایی	ضربی شیب دار راهرو: ضربی شیب دار سکو تاق ندارد.	ضربی شیب دار راهرو: ضربی شیب دار	آجر پخته مربع ۲۶×۲۶×۶-۷	پک آجر	مسطح	مایل اجرای تاق روی زمین	در امتداد هم و در راستای محور مرکزی تدفین	محور طول اتاق شیب به سمت دیوار روبروی ورودی	سه دیوار	یک لایه آجر مریعی	۳.۸۲	۲.۲۰	۱.۷۳
۴		صالح داوود مقبره زیرزمینی	الیمایی	تدفین: رومی راهرو: رومی	تدفین: ضربی شیب دار راهرو: رومی	آجر پخته مربع ۳۲×۳۲×۷ ۲۱×۳۱×۶	پک آجر	بدون شیب مسطح	عمود	عمود بر هم	محور طول اتاق	سه دیوار	یک لایه آجر مریعی	۴.۲۰	۲.۲۰	۲.۲۰

تحلیل تطبیقی شیوه‌های چینش طاق‌های آهنگ در دوران مختلف

به‌طورکلی با درک و شناخت ویژگی‌های تکرارشونده در شیوه‌های چینش طاق‌های آهنگ و دستیابی به گونه‌های مختلف چینش و ارتباط اجزاء آن، امکان مرمت بخش‌های فرو ریخته که گاهی ممکن است نمونهٔ مشابه آن نیز به‌ندرت یافت شود؛ براساس بخش‌های باقی‌ماندهٔ پوشش طاقی آن، به‌وسیلهٔ دقت در ویژگی‌های ثابت و گاهی تکرار شوندهٔ این‌گونه، نظیر روابط خاص پیوند اجزا و یا روابط هندسی دهانه و خیز طاق و غیره می‌تواند فراهم گردد. دیگری، خوانش این ویژگی‌ها، کمک بسیاری در حفاظت و ارزش‌گذاری یک اثر مبتنی‌بر فهم اصالت کالبدی آن و گاهی کمک به تاریخ‌گذاری از نگاه ویژگی‌های معماری یک اثر تاریخی می‌کند. بر این‌اساس و در ادامهٔ مطالب ذکر شده در قبل ویژگی‌های تأثیرگذار در فن ساخت طاق‌آهنگ در خوزستان قابل‌ذکر است.

۱. ویژگی فن ساخت طاق‌آهنگ از نظر روابط هندسی تکرار شونده و پیوند اجزاء

در روند تحول طاق‌های آهنگ از دوران ایلام تا پایان ساسانی، عوامل متعددی چون: هندسهٔ طاق، نسبت افراز به دهانه، ضخامت چفد، نوع چینش آجر و جنس مصالح نقشی اساسی در پایداری سازه‌ای ایفا کرده‌اند. در معماری ایلامی، به‌ویژه در خوزستان، طاق‌ها غالباً با پلان مستطیل‌شکل، ضخامت یکنواخت و نسبت افراز به دهانهٔ حدود ۱٫۳ ساخته می‌شدند که نشان از دقت در تحلیل سازه‌ای و تمایل به پایداری بالا دارد (فخارتهرانی، ۱۳۷۱؛ ایزدپناه و کمالی، ۱۴۰۳). این نسبت‌ها در طول زمان با هدف افزایش مقاومت در برابر نیروهای رانشی و جابه‌جایی پای قوس بهینه شده‌اند. طاق‌های ایلامی معمولاً تک‌لایه و با آجرهای مربع‌شکل اجرا می‌شدند. آجرهای ذوزنقه‌ای نیز در دهانه‌های کوچک‌تر کاربرد داشتند. ملات مصرفی نیز نقش کلیدی در انسجام سازه داشته است. ثبات ضخامت چفد در سراسر قوس، از ویژگی‌های بارز طاق‌های این دوره است که به توزیع یکنواخت نیرو و افزایش دوام کمک کرده است. در دوره‌های بعدی، ازجمله: اشکانی، الیمایی و ساسانی، ضمن حفظ الگوی کلی پلان مستطیل‌شکل، تغییراتی در نسبت طول به عرض، افراز به دهانه و ضخامت قوس مشاهده می‌شود. در دوران الیمایی، کاهش نسبت افراز به دهانه و افزایش ضخامت طاق تا نسبت ۱۲، نشان‌دهندهٔ تلاش برای تقویت پایداری در دهانه‌های بزرگ‌تر است؛ اما در دوره‌های اشکانی و ساسانی مجدداً نسبت افراز افزایش می‌یابد و به بیش از یک می‌رسد. به‌طورکلی، این تحولات بیانگر تداوم سنت‌های فنی همراه با نوآوری‌های سازه‌ای و انطباق با نیازهای اقلیمی و عملکردی هستند. معماری طاق‌دار پیش از اسلام در ایران، به‌ویژه در خوزستان، نه‌تنها تداوم یک الگوی بومی را نمایان می‌سازد، بلکه حاکی از سطح بالایی از شناخت ساختاری و دانش فنی معماران باستان است.

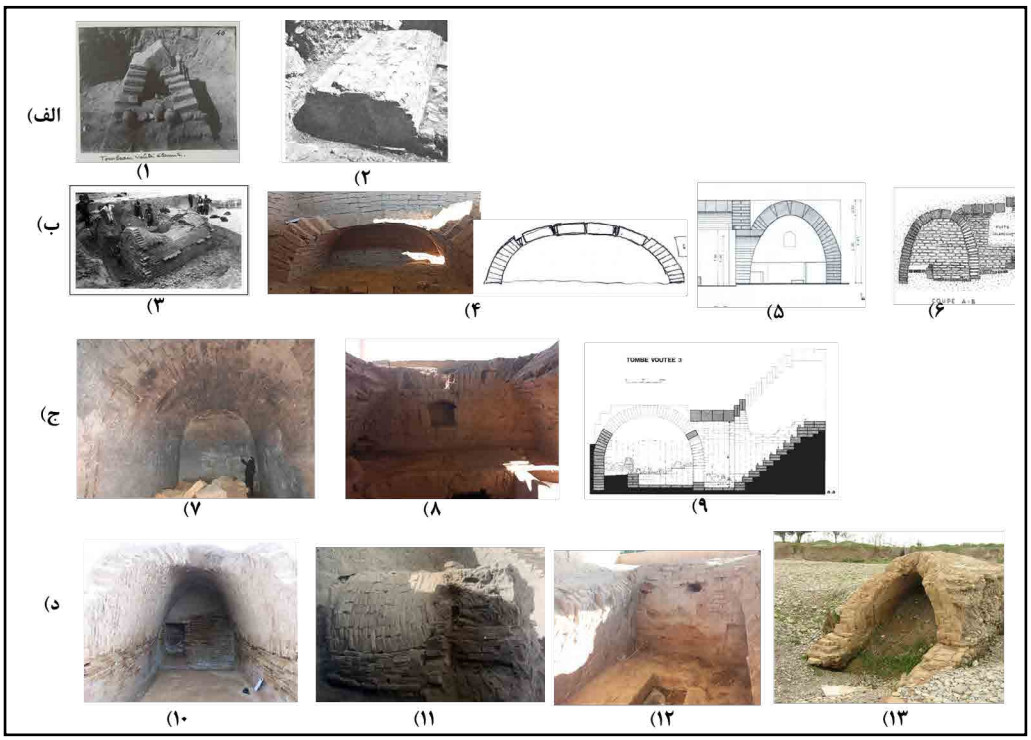
۲. ویژگی فن ساخت طاق‌آهنگ ازنظر فن ساخت از نظر شیوهٔ چینش

در دورهٔ ایلام تا پایان ساسانی، شیوه‌های چینش طاق‌آهنگ در معماری ایران باستان به تنوعی چشمگیر دست‌یافته که حاصل تلفیق تجربهٔ استادکاران، مصالح بومی و تحلیل فنی سازه‌هاست. اصلی‌ترین شیوهٔ مورداستفاده، طاق ضربی بوده که در دو نوع متمایل به دیوار عقب و عمود بر سطح اجرا می‌شده است. در کنار آن، چینش رومی، کوربل، و ترکیب‌های پیچیده‌تر مانند «رومی-ضربی» و «کوربل-رومی» نیز در ساختار طاق‌ها به‌کار رفته‌اند. این تنوع گویای تکامل تدریجی فناوری ساخت و درک دقیق از رفتار نیروها در طاق‌های خمیده است.

مطالعات نشان می‌دهد که درمجموع، هشت نوع چینش طاق‌آهنگ از ترکیب روش‌های ضربی، رومی و کوربل قابل شناسایی است. این چینش‌ها برپایهٔ عواملی چون: نوع مصالح (آجرهای مربع، ذوزنقه‌ای یا مستطیل)، جهت‌گیری دیوار زیرین (عمود یا متمایل)، نحوهٔ رج‌چینی، و نقطهٔ

تغییر روش در قوس (به‌طور مثال، تغییر از رومی به ضربی) شکل‌گرفته‌اند. در برخی موارد، طاق از پایه با روش رومی آغاز شده و در ناحیهٔ کمان دوم با روش ضربی ادامه یافته است. این ترکیب در آرامگاه‌های ایلامی، به‌ویژه در چغازنبیل و هفت‌تپه، دیده می‌شود.

وجه اشتراک همهٔ این شیوه‌ها، استفاده از دیوار زیرطاق (به‌عنوان تکیه‌گاه اولیه یا جرز) و اجرای طاق در امتداد محور طولی فضای معماری است. وجود چنین الگوهای منسجم و متنوعی، بیانگر درک بالای سازندگان از پایداری، انتقال نیرو و چگونگی سازگاری فرم با عملکرد و اقلیم است. این شیوه‌ها به‌مرور در دوره‌های اشکانی، الیمایی و ساسانی به‌صورت دقیق‌تری به‌کار رفته‌اند و پایه‌ای برای طاق‌های وسیع‌تر و پیچیده‌تر بعدی فراهم کرده‌اند (شکل ۲ و ۳) و (جدول ۷).

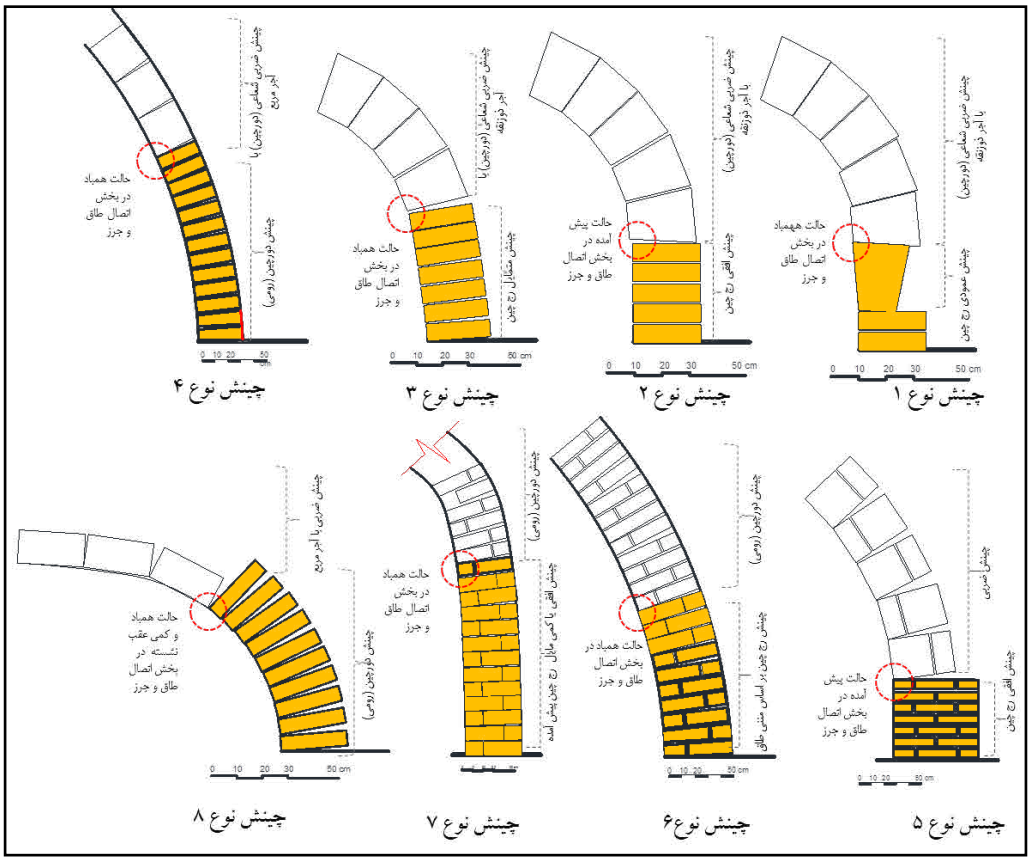


شکل ۲: گونه‌های طاق‌آهنگ برپایهٔ شیوهٔ چینش آجرها در خوزستان؛ الف) شیوهٔ چینش کوربل در: ۱) شوش دورهٔ ایلام و ۲) تخت‌جمشید. ب) شیوهٔ چینش ترکیبی در: ۳) شوش دورهٔ ایلام، ۴) شوشتر (دستوا) دورهٔ الیمایی، ۵) شوش دورهٔ اشکانی و ۶) صالح‌داوود دورهٔ الیمایی. ج) چینش رومی در: ۷) چغازنبیل دورهٔ ایلام میانه، ۸) دستوا دورهٔ الیمایی و ۹) شوش دورهٔ اشکانی. د) چینش ضربی در: ۱۰) هفت‌تپه دورهٔ ایلامی، ۱۱) شوش دورهٔ ایلامی، ۱۲) دستوا دورهٔ الیمایی و ۱۳) سیفون جندی‌شاپور دورهٔ ساسانی (نگارندگان، ۱۴۰۴).

Fig. 2: Types of barrel vaults based on brick-laying techniques in Khuzestan. a) Corbelled technique in 1) Shush, Elamite period and 2) Persepolis. b) Combined technique in 3) Shush, Elamite period, 4) Shushtar (Dastva), Elymaean period, 5) Shush, Parthian period, and 6) Saleh Davood, Elymaean period. c) Roman technique in 7) Chogha Zanbil, Middle Elamite period, 8) Dastva, Elymaean period, and 9) Shush, Parthian period. d) Rafter/straight-laid technique in 10) Haft Tappeh, Elamite period, 11) Shush, Elamite period, 12) Dastva, Elymaean period, and 13) Siphon, Jundi Shapur, Sasanian period (Author, 2025).

۳. ویژگی معماری و سازه‌ای طاق‌آهنگ

ویژگی‌های معماری و سازه‌ای طاق‌آهنگ در معماری ایلامی و پساایلامی خوزستان، بیانگر تحول نظام‌مند در طراحی و ساخت این پوشش‌هاست. پلان فضاهای طاق‌دار عمدتاً مستطیلی است و در دورهٔ ایلامی طول پلان بیش از دو برابر عرض آن بوده، حال‌آن‌که در ادوار بعد این نسبت کاهش یافته است. طاق‌ها در امتداد محور طولی اجرا شده‌اند و در فضاهای متوالی تنها با تویزه



شکل ۳: انواع چینش در دوران تاریخی خوزستان (نگارندگان، ۱۴۰۴).
Fig. 3: Vault-laying techniques across historical periods in Khuzestan (Author, 2025).

جدول ۸: انواع چینش در دوران تاریخی خوزستان (نگارندگان، ۱۴۰۴).
Table 8: Classification of vault-laying techniques across historical periods in Khuzestan (Author, 2025).

نوع چینش	عیلام هزارهٔ دوم تا ۱۱۰۰پ.م.	ایلام‌نو	اشکانی	الیمایی	ساسانی	مصالح چینش
ضربی	✓	✓	✓	✓	✓	آجر مربع و ذوزنقه
رومی	✓	✓	✓	✓	✓	آجر مربع
رومی+ ضربی متمایل به دیوار عقب	✓	✓	✓	✓	✓	آجر مربع و ذوزنقه
رومی+ ضربی عمود بر سطح	✓	–	✓	✓	✓	آجر مربع و ذوزنقه
رگ‌چین (کوربل)–رومی	✓	–	–	–	–	آجر مربع
رگ‌چین (کوربل)	✓	✓	–	–	–	آجر مربع
طاق و تویزه	–		–	–		آجر مربع

از یک‌دیگر جدا می‌شوند. دیوارهای زیر طاق، به‌صورت عمود یا مایل، نقش باربر دارند و گاه طاق مستقیماً بر روی کف و بدون جرز اجرا شده است. سه گونهٔ سازه‌ای در تعداد دیوارهای باربر شناسایی شده است: طاق با دو دیوار و چینش عمود؛ طاق با سه دیوار (شامل: پشت‌بند یا تیغهٔ باربر)؛ و طاق با چهار دیوار باربر در چینش رومی، که دیوارهای سوم و چهارم به‌صورت منحنی و نقش قالب دائم دارند. این روش اخیر، تنها در چغازنبیل و در دورهٔ ایلام میانه مشاهده شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که نسبت میان ضخامت، دهانه، و افراز، همراه با روش چینش آجر و نوع

چفد، نقشی کلیدی در پایداری طاق داشته و مبنایی علمی برای مرمت سازه‌های تاریخی فراهم می‌آورد (ایزدپناه و کمالی، ۱۴۰۳).

۴. طاق‌آهنگ بر مبنای ویژگی‌های دیوار انتهایی و نحوهٔ اتصال به آن

یکی از ویژگی‌های کمتر موردتوجه در مطالعات مستقل، ولی حائز اهمیت در ساخت طاق‌آهنگ، نوع و نقش دیوار انتهایی در ساختار این طاق‌هاست. اشارات پراکنده‌ای ازسوی پژوهشگرانی چون: گیرشمن (۱۳۷۵)، نگهبان (۱۳۷۲) و مجیدزاده (۱۳۷۰) به این مسئله شده است. بررسی ساختارهای طاق‌دار در دوره‌های ایلامی تا ساسانی سه گونهٔ اصلی در نحوهٔ تعامل طاق و دیوار انتهایی را نشان می‌دهد؛ نخست، در طاق‌های رومی، طاق مستقیماً بر روی دیوار انتهایی قرار گرفته و این دیوار به‌مثابه تکیه‌گاه اصلی نقش باربر ایفا می‌کند. دوم، در طاق‌های ضربی، دیوار انتهایی صرفاً نقش پشت‌بند داشته و بار عمودی طاق را منتقل نمی‌کند، بلکه در برابر فشار جانبی مقاومت می‌نماید. سوم، دیوارهای امتداد یافته‌ای که در پشت طاق قرار گرفته و گاه از ارتفاع طاق نیز فراتر می‌روند، در طاق‌های رومی بخشی از بدنهٔ قوس اصلی و در طاق‌های ضربی، نقش مهار رانش را دارند. این تنوع عملکردی، نه‌تنها از نظر سازه‌ای، بلکه در شکل‌گیری فضا، تهویه، نورگیری و سازمان پلان نیز اثرگذار است و درک عمیق‌تری از منطق ساختاری معماری پیش از اسلام ایران فراهم می‌آورد.

۵. ویژگی عمومی جرزطاق‌ها

تحلیل تطبیقی داده‌های مربوط به اجرای جرز در طاق‌های آهنگ دوره‌های ایلامی، اشکانی، الیمایی و ساسانی، نشان‌دهندهٔ تنوع ساختاری و انطباق این عنصر باربر با شرایط اقلیمی و فنی هر دوره است. در معماری ایلامی، اجرای طاق بدون جرز و تکیهٔ مستقیم بر خاک، نشانگر شیوه‌ای بومی و ساده‌تر است، درحالی‌که در دوره‌های بعد، استفاده از جرزهای سازه‌ای با رج‌چینی افقی یا عمودی رواج‌یافته و بیانگر پیچیدگی‌های بیشتر در مهندسی ساخت است. جرزهای با تراز مایل و رج‌چینی عمودی در دورهٔ ایلامی (پیرنیا، ۱۳۷۳: ۵۳)، روشی منحصربه‌فرد برای انتقال نیرو به زمین ارائه می‌دادند؛ درحالی‌که در دوره‌های اشکانی و ساسانی، رج‌چینی افقی و تراز عمود متداول‌تر بود. نحوهٔ اتصال منحنی طاق با زمین به چند شیوهٔ مختلف انجام شده است: ۱) متصل به یک دیوارهٔ عمود کوتاه با رج‌چینی افقی که در چینش رومی و ضربی با مصالح مربع و ذوزنقه استفاده شده است، ۲) متصل به زمین با یک دیوارهٔ عمود و رج‌چینی یک ردیف عمودی آجر. در دو حالت اول، امتداد نیرو به‌صورت عمود به زمین منتقل می‌شود. این دو حالت در تمامی دوره‌ها دیده می‌شود. ۳) قرارگیری طاق روی زمین بدون دیواره عمود، و ۴) متصل به یک دیوار مایل (چغازنبیل)؛ در این حالت، شیب دیواره در امتداد حرکت نیروی رو به بیرون طاق قرار دارد که در این حالت برای مهار نیروها، پشت طاق خاک و زمین مستحکم قرار دارد؛ هم‌چنین، تعداد جرزهای باربر متناسب با نوع چینش طاق از دو تا چهار عدد متغیر بوده است.

۶. جایگاه جغرافیا در میان عوامل مؤثر بر شیوهٔ ساخت طاق‌های آهنگ

عوامل دیگری نیز بر این فنون تأثیرگذار بوده‌اند؛ ویژگی‌های تکرارشونده‌ای که در بستر زمان استمرار یافته و تکامل یافته‌اند، حکایت از روندی دارند که در طی قرون، با آزمون و خطا و تجربه‌اندوزی، مسیر ارتقاء و بهینه‌سازی شیوه‌های پیشین را پیموده است. قابل‌ذکر است که دانش ساختمان شرقی کهن بیانگر دانشی آگاهانه و خاص مبتنی‌بر تجربه است (Sievertsen & Uwe, 2014). این روند توأم با تجربه و دانش، گاه با ابداع و نوآوری همراه بوده و گاه با حذف شیوه‌ای پیشین و جایگزینی آن با روشی نو، در محدوده‌ای مشخص از زمان و مکان استمرار یافته است.

هم‌چنین در مواردی ارتباط معماران سرزمین‌های همجوار و دوردست به‌واسطهٔ خواست خود، مهاجرت اجباری یا سفر، حضور در ارتش هنگام لشکرکشی به سرزمینی دیگر و غیره (اسدپور، ۱۴۰۲؛ لنکستر، ۲۰۰۹؛ پیرنیا، ۱۳۸۷) که در تطور یا دگرگونی و انتقال یک فن از جایی به‌جای دیگر، نقشی مهم داشته است؛ در این‌میان، برخی از این خصوصیات نیز، برخاسته از بستر جغرافیایی و اقلیمی خاص هر منطقه بوده‌اند و در عین تأثیرپذیری، به نوبهٔ خود در مناطق جدید، تأثیرگذار نیز ظاهر شده‌اند. نمونه‌هایی هم‌چون انتقال مصالح و فنون اجرا میان ایران و بین‌النهرین در طول سده‌ها به‌وضوح مؤید این تعامل تاریخی است. کما این‌که تنوع در روش‌های چینش آجرها نیز به‌دلایل مختلفی، ازجمله استحکام، دسترسی به مصالح، و تأثیرات فرهنگی وجود داشته است؛ بر این‌اساس، باید اذعان‌داشت که جغرافیا و اقلیم، به مثابه بستری برای تحولات، نقش تعیین‌کننده‌ای در فراز و فرود قدرت‌ها و انتقال فنون معماری ایفا می‌کند؛ به‌طور مثال، بررسی آرامگاه‌های دورهٔ اشکانی نشان می‌دهد میان وابستگی به کانون قدرت و مرتبهٔ اجتماعی و نوع و کیفیت ساخت آرامگاه‌ها رابطه وجود دارد (سبحانی، ۱۴۰۰: ۲۹). تمامی این موارد نشان می‌دهند که تحلیل روندهای تاریخی در حوزهٔ فنون ساخت، بدون درنظر گرفتن جغرافیا و بستر طبیعی و فرهنگی آن، تحلیلی ناقص و ناتمام خواهد بود؛ از همین‌رو، برخی محققان، تنوع الگوهای معماری در طول زمان را نَه صرفاً حاصل تقدم و تأخر تاریخی، بلکه برآمده از زمینه‌های جغرافیایی آن‌ها دانسته‌اند (Bloom, 2009: 94).

۷. ویژگی برمبنای نوع و کیفیت ملات

از آنجایی‌که یکی از عوامل مؤثر در ارتقاء مقاومت طاق، نوع و کیفیت ملات است (فخارتهرانی و توکلو، ۱۳۹۶: ۴۱)، در دوران مختلف ملات‌های متفادتی براساس نوع سازه و ابعاد آن برای اجرای طاق به‌کار رفته است. در طاق‌های دوران ایلامی در شوش بیشتر از ملات گل برای ساخت مقابر استفاده شده است و در مقابر چغازنبیل (گیرشمن، ۱۳۷۳) و هفت‌تپه (نگهبان، ۱۳۷۵) و آثار دورهٔ ساسانی از ملات تندگیر گچ. دلیل اصلی این موضوع می‌تواند بزرگ‌تر شدن ابعاد دهانهٔ طاق و تلاش برای حذف قالب از زیر طاق با چسبندگی و تندگیری و ایجاد امکان سرعت در اجرای طاق بوده باشد. «فخارتهرانی» و «توکلو» ضخامت بند ملات مناسب در طاق‌های ضربی و رومی را ۱ تا ۲ سانتی‌متر می‌دانند که بندهای ملات کمترین مقاومت در مقابل نیروهای برشی و رانشی دارند (بنزوال، ۱۳۷۹: ۶۵)؛ لذا ضخامت ملات بین آجرها در مقاومت نهایی طاق بسیار تأثیر گذار است. به‌نظر می‌رسد به‌همین دلیل، ضخامت ملات در سراسر دوران ایلامی و پس از آن به‌صورت نسبتاً ثابت و در حدود یک‌ونیم تا دو سانتی‌متر باقی‌مانده، به‌طوری‌که حتی با کاهش تدریجی ضخامت آجرها، این میزان ملات تغییر محسوسی نداشته و نقش مهمی در انسجام سازه ایفا کرده است. از آنجایی‌که در طاق‌ها مقدار ملات بین آجرها و خشت‌ها نباید از یک سانتی‌متر کمتر و دو سانتی‌متر بیشتر بشود، هر زمان‌که بیشتر می‌شد از قطعات گاز بین آجرها استفاده می‌شود.

در طاق‌های آهنگ پیش از اسلام خوزستان، ملات به‌عنوان یکی از عناصر کلیدی در پایداری و دوام سازه، نقش اساسی دارد. مطالعات باستان‌شناختی و فنی، مانند پژوهش‌های «گاس ون‌بیک»، «سرفراز» و «حجازی» نشان می‌دهد که در سازه‌های خشتی و آجری ایلامی تا ساسانی، ملات نه‌تنها عامل چسبندگی مصالح، بلکه تنظیم‌کنندهٔ انتقال نیروهای فشاری و هم‌راستایی طاق نیز بوده است. این‌امر، به این‌دلیل است که از ارکان مهم در استخوان‌بندی انواع تاق، به‌کار بردن، انواع ملات با مصالح مورداستفاده در طاق است؛ به‌همین دلیل، هرچه اجزای سازندهٔ طاق همگن‌تر باشد تغییر فرم و بی‌تعادلی یکنواخت‌تر و کمتر رخ می‌دهد (فخارتهرانی و توکلو، ۱۳۹۶: ۵۲). ملات‌های رایج شامل گل‌رس، گل و کاه، و در دوره‌های متأخر ترکیبات گچ و آهک بوده‌اند

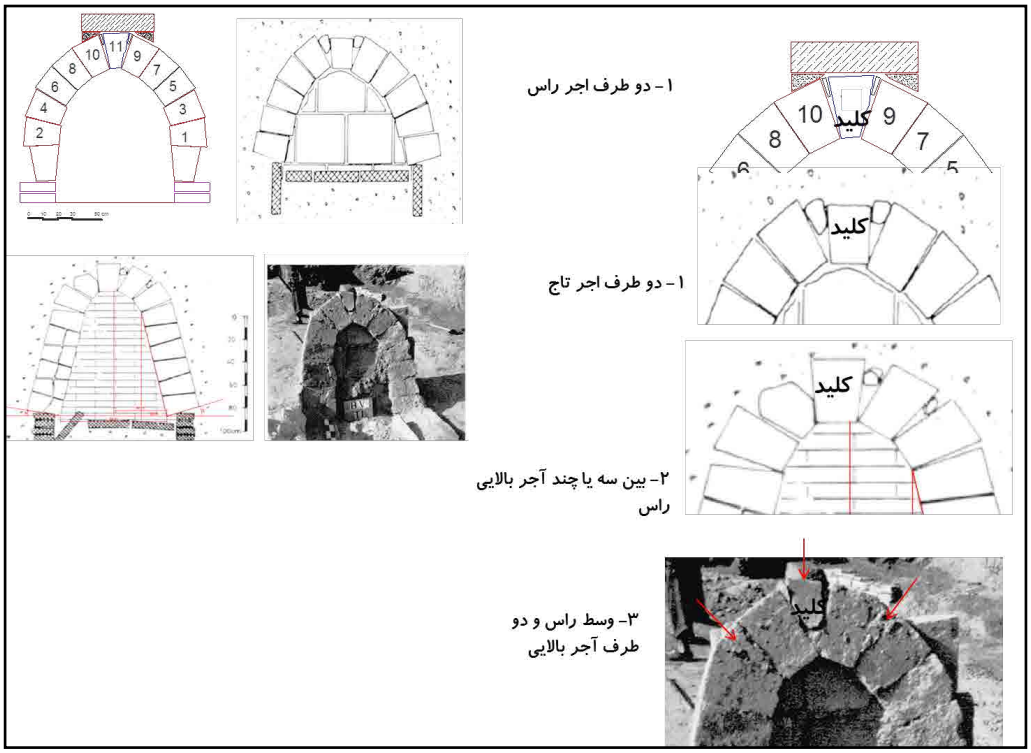
که هر یک متناسب با اقلیم گرم و مرطوب خوزستان و نوع مصالح انتخاب می‌شدند. ویژگی‌های فیزیکی ملات، ازجمله میزان چسبندگی، تراکم‌پذیری و مقاومت در برابر رطوبت به‌طور مستقیم در شکل‌گیری فرم، تناسبات هندسی و پایداری طاق‌ها تأثیر داشت. افزون‌بر این، تنوع ترکیب ملات‌ها بیانگر سازگاری تدریجی فنون ساخت با محیط و تداوم دانش بومی معماران سنتی است؛ در این‌میان، مهارت استادکاران در تنظیم نسبت خاک، آب و افزودنی‌های گیاهی مانند: کاه، نقشی تعیین‌کننده در کاهش ترک، بهبود پیوستگی لایه‌ها و افزایش مقاومت حرارتی بنا داشته است؛ به‌گونه‌ای که کیفیت ملات، شاخصی از بلوغ فنی و شناخت سازه‌ای در معماری پیش از اسلام خوزستان به‌شمار می‌رود.

نکتهٔ حائز اهمیت دیگر، نقش و استفاده از گاز در اجرای طاق است. در بخش بالایی طاق در نمونه‌های کاوش شده در کاوش‌های گیرشمن در چغازنبیل (۱۳۷۳: ۸۶)، در مقبرهٔ شمارهٔ ۱ از وجود تکه سفال‌هایی گوه‌ای‌شکل در پشت آجرهای طاق مقبره سخن گفته است و از آنجایی‌که گاز به‌عنوان یک نگه‌دارندهٔ مهم آجرهای طاق عمل می‌کند تا طاق یکپارچه پیش برود (پیرنیا، ۱۳۷۳: ۵۶)، این موضوع نشان‌دهندهٔ سابقهٔ استفاده و درک اهمیت و نقش استحکام‌بخشی گاز پشت آجرها و در زمانی‌که معمار قصد ایجاد انحنای بیشتر قوس را داشته، در دورهٔ ایلامیان دارد. آن‌چه درمیان نظرات پژوهشگران پیشین از آن سخن گفته نشده است، استفاده از گاز در آجرهای با شکل‌های هندسی مربع و ذوزنقه است. درمیان نمونه‌های بررسی‌شده از ایلام تا پایان ساسانی گاز در هر دو نوع مصالح به‌صورت تکه‌ای سفال، گاهی تکه آجر و یا سنگ به‌کاررفته است. ازسویی دیگر، به‌نظر می‌رسد شاهد سه گونهٔ متفاوت قرارگیری گاز و بستن بخش بالایی طاق به‌صورت: ۱) قرارگیری یک آجر در رأس طاق، ۲) استفاده از گاز یا تکه آجر شکسته در رأس و یک آجر کوچک‌تر ذوزنقه در رأس است (شکل ۴).

اگر بخواهیم بررسی جامع‌تری از چگونگی تداوم و دگرگونی شیوه‌های چینش طاق‌آهنگ در دوران تاریخی به‌دست بیاوریم، می‌بایست پیشینه و انواع آن‌را در دورهٔ ایلامی جستجو کرد. در بررسی شیوه‌های چینش طاق‌های آهنگ در معماری دورهٔ ایلامی، تنوع قابل‌توجهی از روش‌های اجرایی قابل‌مشاهده است که نشان‌دهندهٔ درک فنی و خلاقیت سازندگان این دوره در بهره‌گیری از مصالح و فرم‌های سازه‌ای است. مهم‌ترین شیوه، چینش ضربی است که خود به دو گونهٔ متمایز شیب‌دار متمایل به عقب و عمود بر سطح تقسیم می‌شود. این طاق‌ها با بهره‌گیری از مصالحی با اشکال هندسی مختلف هم‌چون: مستطیل افقی، مستطیل عمودی، مربع و ذوزنقه، و در حالت‌هایی با یا بدون دیوار کوتاه زیر طاق اجرا شده‌اند. دیوار انتهایی نیز به‌صورت‌های متنوعی مانند قوس با تویزه، دیوار منحنی با رج‌چینی افقی یا تیغهٔ نازک آجری ساخته شده است.

اکثر این طاق‌ها تک‌لایه بوده و ازنظر تکنیک اجرا، با توجه به محدودیت‌ها و خواص فیزیکی مصالح خشت و آجر، از انسجام و کارآمدی مناسبی برخوردارند. علاوه‌بر شیوهٔ ضربی، ترکیباتی از این فن با سایر روش‌ها نیز به‌کار رفته است؛ ازجمله ترکیب ضربی شیب‌دار با رومی، ترکیب ضربی عمود با رومی، طاق‌های کوربل، و طاق‌های صرفاً رومی. این تنوع، نه‌تنها بیانگر شناخت عمیق سازندگان از رفتار سازه‌ای طاق‌هاست، بلکه از تعامل تجربه‌محور میان روش‌های بومی و گاهی شکل‌های معماری وارداتی نیز حکایت دارد.

در پایان آن‌چه از محتوای یافته‌ها و تفسیر آن‌ها استنتاج می‌گردد، می‌توان بدین‌شکل بیان نمود که در جنوب‌غربی ایران (استان خوزستان)، سیر تاریخی اجرای طاق‌های آهنگ از دورهٔ ایلام تا پایان دورهٔ ساسانی، روندی پیوسته اما متنوع ازنظر فنون، تناسبات هندسی، نوع مصالح و شیوه‌های اجرایی را نشان می‌دهد. در دورهٔ ایلام، نخستین الگوهای طاق‌آهنگ با مصالح خشتی-آجری شکل‌گرفتند که با چینش ضربی یا ترکیبی از ضربی و رومی، در قالب پلان‌های مستطیلی و



شکل ۴: شیوه‌های اجرای آجر در رأس و گاز در مقابر طاق‌دار دورهٔ ایلام با مصالح ذوزنقه‌ای‌شکل (نگارندگان، ۱۴۰۴).

Fig. 4: Brick-laying techniques at the vault crown and springing in vaulted tombs of the Elamite period using trapezoidal bricks (Author, 2025).

با استفاده از آجرهای ذوزنقه‌ای یا مربعی در دهانه‌های کوچک اجرا می‌شدند. دیوارهای تکیه‌گاه در این دوره، نقش سازه‌ای مهمی در اجرای طاق‌ها ایفا می‌کردند. در دوره‌های الیمایی و اشکانی، استمرار ویژگی‌های دورهٔ ایلام دیده می‌شود، با این تفاوت که تنوع بیشتری در ابعاد دهانه، ارتفاع و نسبت افراز به دهانه مشاهده می‌شود. نمونه‌های الیمایی هم‌چنان نسبت‌هایی کمتر از یک را حفظ کرده‌اند؛ درحالی‌که در دورهٔ اشکانی، برخی طاق‌ها از این نسبت فراتر رفته‌اند. تفاوت در تکنیک‌های اجرا، استفاده از آجر پخته و شکل‌گیری گونه‌های ترکیبی از طاق‌های ضربی، رومی و کوربل، گویای تعامل فرهنگی و افزایش مهارت فنی است. دورهٔ ساسانی، نقطهٔ اوج بلوغ ساختاری طاق‌های آهنگ است. در این دوره، با بهره‌گیری از آجرهای مدولار بزرگ، تناسبات دقیق هندسی، و فنونی چون قوس کامل، تویزه‌سازی و رج‌چینی منسجم، طاق‌ها به ساختاری پایدار، بلند و پیچیده تبدیل شدند. این طاق‌ها علاوه‌بر جلوهٔ بصری، کارکرد سازه‌ای بالایی نیز داشتند. پیوستگی میان دیوار و طاق، که از دورهٔ ایلام آغاز شده بود، در بناهایی دوران بعد از آن تثبیت و تکامل یافت.

درمجموع، حداقل هشت گونهٔ متمایز در چینش طاق‌های آهنگ از ایلام تا ساسانی شناسایی می‌شود که از فرم‌های سادهٔ اولیه تا ساختارهای پیش‌رفتهٔ ساسانی را دربر می‌گیرد. این سیر تحول، بیانگر انتقال دانش فنی میان‌دوره‌ای، خلاقیت بومی، و سازگاری تدریجی با نیازهای فضایی، مصالح در دسترس و الزامات اقلیمی است.

به‌طورکلی نتایج پژوهش نشان می‌دهد که اجرای طاق‌آهنگ با چینش ضربی، رومی و ترکیبی، وجود روابط بین مصالح و دهانهٔ طاق، ارتباط معنادار میان افراز و دهانه، ثابت بودن ضخامت طاق، و تناسب میان ضخامت و تعداد لایه‌های طاق و ابعاد دهانه از مهم‌ترین ویژگی‌های این طاق‌ها هستند؛ هم‌چنین هندسهٔ طاق، ضخامت، نسبت دهانه به افراز و روش چینش آجرها

تأثیر مستقیمی بر پایداری و مقاومت طاق‌های آهنگ دارند و درک صحیح این عوامل می‌تواند در بازسازی طاق‌های فروریختهٔ این دوران تاریخی نقش مؤثری ایفا کند. برپایهٔ تحلیل‌های انجام‌شده دربارهٔ شیوه‌های چینش طاق‌آهنگ، تناسبات هندسی و ویژگی‌های مصالح در گسترهٔ جغرافیایی خوزستان و مناطق پیرامونی، نتایج پژوهش حاکی از بهره‌گیری آگاهانهٔ معماران کهن از تمهیداتی فنی برای پایداری و تقویت طاق‌های خشتی و آجری است. این تمهیدات که در ادامه ارائه می‌شوند، به‌عنوان مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق قابل‌طرح‌اند و می‌توان از آن‌ها در مداخلات حفاظتی و مرمت‌های معاصر بهره برد. از تکرار الگوهای پیش‌تر تحلیل‌شده در فصل‌های پیشین در این بخش پرهیز شده است.

تمهیدات پایداری و مقاوم‌سازی در خوزستان پیش از اسلام

۱. تمهیدات پایداری و مقاوم‌سازی در طاق‌آهنگ در خاور باستان

در معماری باستانی، بقا و دوام یک بنا به عوامل متعددی وابسته بود که فراتر از انتخاب مصالح صرف، شامل: درک دقیق از نحوه انتقال نیرو، رطوبت، تهویه، نشست و عملکرد بلندمدت عناصر سازه‌ای می‌شد؛ به‌ویژه در طاق‌ها که تحت کشش و فشارهای متقابل قرار می‌گیرند، اتخاذ تدابیر فنی ویژه برای پایداری اهمیت مضاعفی می‌یافت (Sauvage, 1998; Hnaihen, 2020). این‌امر در تمدن‌هایی چون: سومر، آکد، آشور و بابل، کمبود سنگ ساختمانی و فراوانی گل رس سبب شد آجر به‌عنوان مصالح اصلی در ساخت بناها انتخاب شود. این انتخاب صرفاً اقتصادی نبود، بلکه به گسترش مهارت‌های بنایی در قالب‌گیری، پخت، چینش و پوشش فضاهای داخلی منجر شد (Moorey, 1994). در اینجا برخی از این موارد به‌کاررفته در بین‌النهرین از نگاه صاحب‌نظران به‌صورت اجمالی در ادامه بیان می‌شود.

-مواد اولیه و آماده‌سازی خشت: مواد پایه، شامل: گل رس، کاه خردشده، شن ریز، و در مواردی فضولات حیوانی برای بهبود چسبندگی بود و در دوام آجر نقش مؤثری داشته است. ضخامت آجر در ارتباط مستقیم با کاربری و شرایط اقلیمی تنظیم می‌شد؛ برای نمونه، در طاق‌ها از آجرهای سبک‌تر با ضخامت کمتر و گاه فرم گوه‌ای استفاده می‌شد (Hnaihen, 2020, 74). انتخاب ملات مناسب از دیگر موارد قابل‌توجه است؛ ملات، یکی از مهم‌ترین عوامل در پایداری طاق است. مطالعات (Fernandes et al.,2010) نیز نشان می‌دهد که ترکیب مناسب ملات و آجر پخته، افزایش چشمگیری در دوام سازه به‌همراه دارد. از دیگر موارد می‌توان به شکل هندسی آجر و تناسبات فنی ان اشاره کرد؛ اشکال هندسی آجر از فرم‌های مستطیلی اولیه تا آجرهای گوه‌ای، ذوزنقه‌ای و خمیده برای کاربرد خاص در طاق‌ها و قوس‌ها متحول شدند. آجر گوه‌ای (Wedge-shaped) مهم‌ترین نوآوری برای طاق‌سازی بود؛ زیرا باعث هم‌گرایی نیرو و جلوگیری از واژگونی می‌شد (Sauvage, 1998). هم‌چنین، در بخش‌های پایه‌ای دیوار و طاق، آجرهای ضخیم‌تر با چگالی بالاتر به‌کار می‌رفت تا از نشست جلوگیری شود (Hnaihen, 2020, 75). نظام‌های سنجشی و تناسبات هندسی در معماری باستان، به‌مثابه ابزاری بنیادین در شکل‌دهی به فضای معماری، در تمدن‌هایی چون: میان‌رودان (بین‌النهرین)، مصر، روم و ایران، نقشی انکارناپذیر داشته‌اند. این واحدها، که برابر با طول ساعد یا کف دست تعریف می‌شده‌اند، مبنای تعیین ابعاد آجر، ارتفاع دیوار، پهنای دهانه‌ها و ضخامت جرزها را تشکیل می‌داده‌اند (Haddad, 2016: 153; Arnold, 2003; LANCASTER, 2015). در معابد و آرامگاه‌های مصری، رابطه‌ای دقیق و تکرارشونده میان طول آجر، ضخامت ملات و تناسبات فضایی دیده می‌شود که نشان از وجود یک نظام طراحی مدولار دارد. مطالعات نشان می‌دهند که ساخت طاق‌آهنگ در مصر و بین‌النهرین تحت‌تأثیر چندین عامل، ازجمله: چینش آجرها، تعداد لایه‌ها، ضخامت دیوارها، نوع مصالح، شرایط زمین‌شناسی و نحوهٔ توزیع بار بوده است

و تنوع در روش‌های چینش آجرها به‌دلایل مختلفی ازجمله استحکام، دسترسی به مصالح و تأثیرات فرهنگی وجود داشته است.

تجربهٔ استادکار و دانش اجرایی از دیگر موارد بسیار تأثیرگذار بوده است؛ به‌نحوی‌که اجرای موفق طاق و سازه‌های آجری، نیازمند تجربهٔ عملی و شناخت شهودی از رفتار سازه بود. استادکاران سنتی با آزمون و خطا و انتقال دانش شفاهی، تکنیک‌هایی چون: تغییر تدریجی اندازهٔ آجر، استفاده از آجرهای مخروطی در کنج، و بارگذاری تدریجی برای تثبیت قوس را به‌کار می‌بردند (Hnaihen, 202:, 94). گاه در طاق‌های سنگین، لایه‌های تقویتی بین دو ردیف طاق ایجاد می‌شد تا پایداری افزایش یابد. برای افزایش دوام طاق‌ها، استفاده از آجر پخته در لایه‌های زیرین و نقاط بحرانی متداول بود (Fernandes et al., 2010). گاه از آجرهای بزرگ‌تر در پای طاق برای انتقال نیرو به دیوار استفاده می‌شد؛ و در این‌میان، ترکیب مصالح پخته و خام در لایه‌های سازه به‌کار برده می‌شده است. در بسیاری از بناها، استفاده هم‌زمان از خشت‌خام در لایه‌های میانی و آجر پخته در لایه‌های باربر یا نما دیده می‌شود. این ترکیب باعث صرفه‌جویی اقتصادی و حفظ عملکرد حرارتی ساختمان می‌شد و در عین‌حال لایهٔ بیرونی از آسیب رطوبتی و فرسایش مصون می‌ماند. در برخی نمونه‌ها نیز استفاده از دو لایهٔ طاق با مصالح متفاوت دیده شده است.

۲. تمهیدات پایداری براساس چگونگی مهار نیروی رانشی و ایجاد پایداری طاق در خوزستان

نکتهٔ قابل‌توجه دیگر رانش طاق به بیرون و چگونگی خنثی نمودن آن است؛ به‌طورکلی، یکی از ویژگی‌های فرم‌های قوسی، رانشی است که در تکیه‌گاه‌های قوس وجود دارد و خنثی کردن این رانش جانبی است که ضامن حفظ تعادل قوس و عامل جلوگیری از ویران شدن آن به‌شمار می‌رود. برای این‌منظور روش‌های متنوعی توسط معماران گذشته به‌کار رفته است؛ «شوازی»، «نگهبان»، «پیرنیا»، «فرشاد» و «معماریان» به برخی شیوه‌ها نظیر ایجاد پشت‌بندهای عمود بر دیوارهٔ طاق در چگاسفلی (مقدم، ۱۳۹۴: ۱۰۵ و ۷۱)، قراردادن یک آجر بر روی رأس طاق در مقابر ایلامی شوش، پرکردن پشت طاق از شروع تا شانهٔ طاق با مصالح بنایی و گاهی خاک، ایجاد دیوار ضخیم و مرتفع در پشت طاق در آرامگاهای هفت‌تپه دورهٔ ایلامی (نگهبان، ۱۳۷۲: ۱۰۴ و ۷۷)، ایجاد ضخامت در بخش ایوارگاه طاق (گیرشمن، ۱۳۷۵: ۹۸ و ۲۵۹)، اجرای طاق‌های عرضی و به‌کارگیری تویزههٔ میان طاق‌آهنگ در ایوان کرخه (مصطفوی و همکاران، ۱۳۹۴)، بهره‌گیری از طاق‌های در جهت خلاف طاق اصلی (فرشاد، ۱۳۶۲: ۳۶۵) در دوران باستان ایران اشاره کرده‌اند که در نمونه‌های محدود است. این درصورتی است که بررسی تصاویر ثبت شدهٔ بناها و استاد مکتوب برخی دیگر از شیوه‌های استحکام‌بخشی و پایداری طاق را بر ما روشن می‌نماید، نظیر استفاده از: پشت‌بند، ایجاد دیوارهای ضخیم طرفین، دقت در هندسهٔ قوس و اجرای طاق، دقت در نحوهٔ اتصال طاق به تکیه‌گاه و دیوار، ضخامت طاق و نوع چینش آن و تغییر جهت اجرای طاق بر روی دیوار، استفاده از طاق‌های پشتیبان در جهت عمود بر طاق اصلی و شیوه‌های دیگر. هم‌چنین «آلوارز مون» به‌نقل از: «مفیدی نصرآبادی» (۲۰۱۸: ۵۱۲) به‌وجود تمهیدات سازه‌ای و عملکردی در پیوند و اتصال یا عدم اتصال خانه‌های مسکونی در هفت‌تپه و وجود جنبهٔ استحکام‌بخشی با ایجاد برآمدگی در دیوارهای خشتی و برج‌های مستطیلی در وجه بیرونی دیوارهای میانی و بیرونی دروازه‌های چغازنبیل و احاطه‌شدن مقابر هفت‌تپه با دیوارهای خشتی محکم (مون به نقل از: مفیدی‌نصرآبادی، ۲۰۱۸، ۵۱۹) اشاره می‌کند. وجود رابطهٔ معنادار هندسی میان خشت مربع و ابعاد سازه و یا کاربرد اعداد خاص در تقسیم‌بندی از مواردی است که در بناهای زیگورات چغازنبیل نیز قابل ردیابی است (همان: ۵۲۵)، (شکل ۵ و ۶).

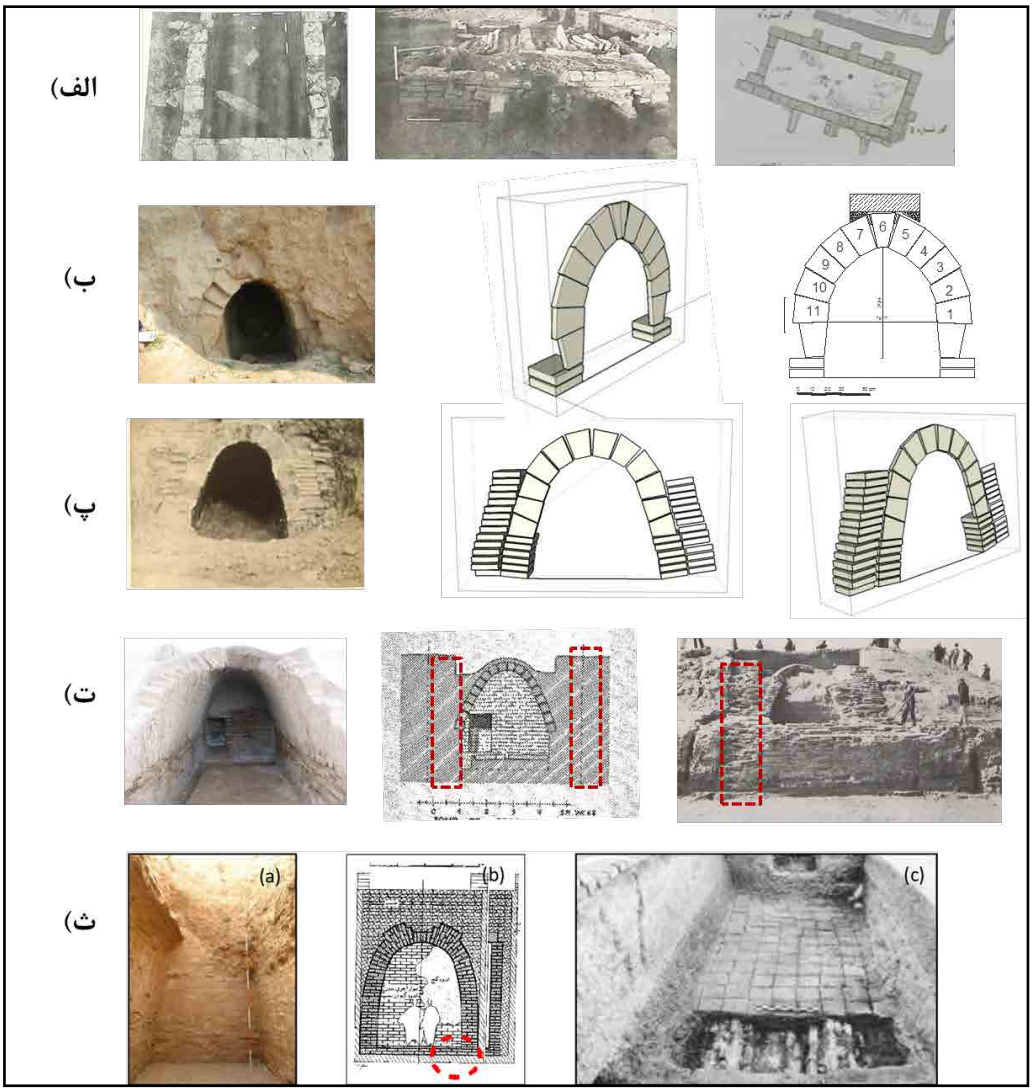
بنابراین، براساس نظر بسیاری از محقیق و صاحب‌نظران نظری (فرشاد، ۱۳۶۲؛ معماریان، ۱۳۶۷ و ۱۳۹۴) و عملی در حوزهٔ فن ساخت طاق‌آهنگ، از مسائل مهم در طراحی طاق‌های آهنگ، کنترل نیروهای رانشی حاصل از قوس و فشار افقی بوده است که در دوران مختلف تاریخی توسط معماران ایرانی به شکل‌های گوناگونی به‌کار رفته است. برای مقابله با این نیروها، معماران و استادکاران با بهره‌گیری از تدابیر ساختاری، مانند چینش هوشمند طاق‌ها، دیوارها و پیوند آن‌ها با زمین، به پایداری سازه‌ای بناها کمک می‌کردند. روش‌های رایج در این‌زمینه را می‌توان بدین‌صورت بیان نمود: ۱) قرارگیری موازی طاق‌های آهنگ، ۲) قرارگیری طاق‌های آهنگ در دو طرف طاق میانی با جهت عمود بر آن- چینش خلاف جهت، ۳) قرارگیری طاق‌های آهنگ در دو طرف طاق میانی با جهت عمود- چینش هم‌جهت، ۴) استفاده از دیوار در انتهای طاق ضربی، ۵) قرارگیری دو دیوار ضخیم در طرفین طاق، ۶) ثابت بودن ضخامت دیوار و طاق روی آن، ۷) چینش طاق‌های عمود بر یک‌دیگر با دو نوع اجرای رومی و ضربی، ۸) اجرای دیوار مورب که بخشی از طاق را شکل می‌دهد، ۹) ایجاد فاصله یا درز و پرکردن آن با خشت شکسته بین دو طاق، ۱۰) استفاده از دیوارهای بسیار بلند در طرفین طاق، ۱۱) طبقه‌بندی و تغییر ضخامت دیوار برای کنترل رانش، ۱۲) به‌کارگیری دیوارهای پشتیبان، ۱۳) اتصال دیوارهٔ طاق زیرزمینی با بدنهٔ خاکی اطراف آن (شکل ۵ و ۶).

در پایان بررسی عناصر فنی و مهارتی این روند، کلید فهم پویایی معماری باستانی در ایران و به‌خصوص محدودهٔ جغرافیایی مورد بحث، یعنی استان خوزستان است. بیان این، زمینهٔ تطبیق و تدقیق و درک بیشتر در دستیابی به تمهیدات حفاظتی توسط معماران دورهٔ تاریخی در استان خوزستان را فراهم خواهد کرد که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد. تحلیل داده‌های میدانی و بررسی نمونه‌های تاریخی طاق‌زنی در معماری دوران تاریخی خوزستان، به‌ویژه در آثار دورهٔ ایلام تا پایان ساسانی، نشان می‌دهد که ساخت طاق‌ها، نه‌تنها تابع شرایط اقلیمی و مصالح در دسترس بوده، بلکه مبتنی‌بر مجموعه‌ای از تدابیر دقیق مهندسی و تجربیات فنی استادکاران نیز شکل گرفته است. دسته‌بندی سه‌گانهٔ عوامل مؤثر در ساخت طاق‌ها به حوزه‌های «مصالح و ملات»، «فناوری ساخت و اجرا» و «هندسه، سازه و تناسبات» نشان‌دهندهٔ آن است که پایداری و دوام طاق‌ها حاصل تعامل مؤلفه‌های متعددی است که در هماهنگی کامل با یک‌دیگر عمل می‌کنند.

در بخش مصالح، انتخاب آگاهانهٔ مصالح سبک، ایجاد شیار برای پیوند بهتر، و استفاده از ملات‌های متناسب با سرعت گیرش (گِل و گچ) نقش کلیدی در تسهیل اجرا و افزایش پایداری ایفا کرده‌اند. در سطح فناوری ساخت، بهره‌گیری از تمهیدات پایداری، تغییر در زاویه و چینش آجرها، و استفاده از تکنیک‌های تقویتی هم‌چون: اجرای چندلایه یا استفاده از طاق‌های مجاور، مؤلفه‌هایی حیاتی برای دستیابی به فرم‌های باثبات و قابل اجرا در مقیاس‌های مختلف بوده‌اند.

در نهایت، در حوزهٔ هندسه و تناسبات، توجه به رابطهٔ میان دهانه، ضخامت، ارتفاع، و پیوستگی دیوار و طاق، نشان از شناخت عمیق استادکاران نسبت به رفتار سازه‌ای طاق‌ها دارد. تنظیم دقیق شیب‌ها، مهار نیروهای مورب، و انتخاب چینش مناسب براساس نوع بار واردشونده، همگی بیانگر نگرشی ساختارمند و خردمندانه به سازهٔ طاق در بستر معماری دوران تاریخی هستند. این تحلیل‌ها می‌توانند مبنایی برای احیای دانش بومی طاق‌زنی و بازآفرینی اصول سازه‌ای در مرمت و ساخت مجدد بناهای تاریخی باشد. نتایج این تمهیدات در جدول ۸، به تفکیک مؤلفه‌های سه‌گانه ذکر شده در بالا، ارائه شده است.

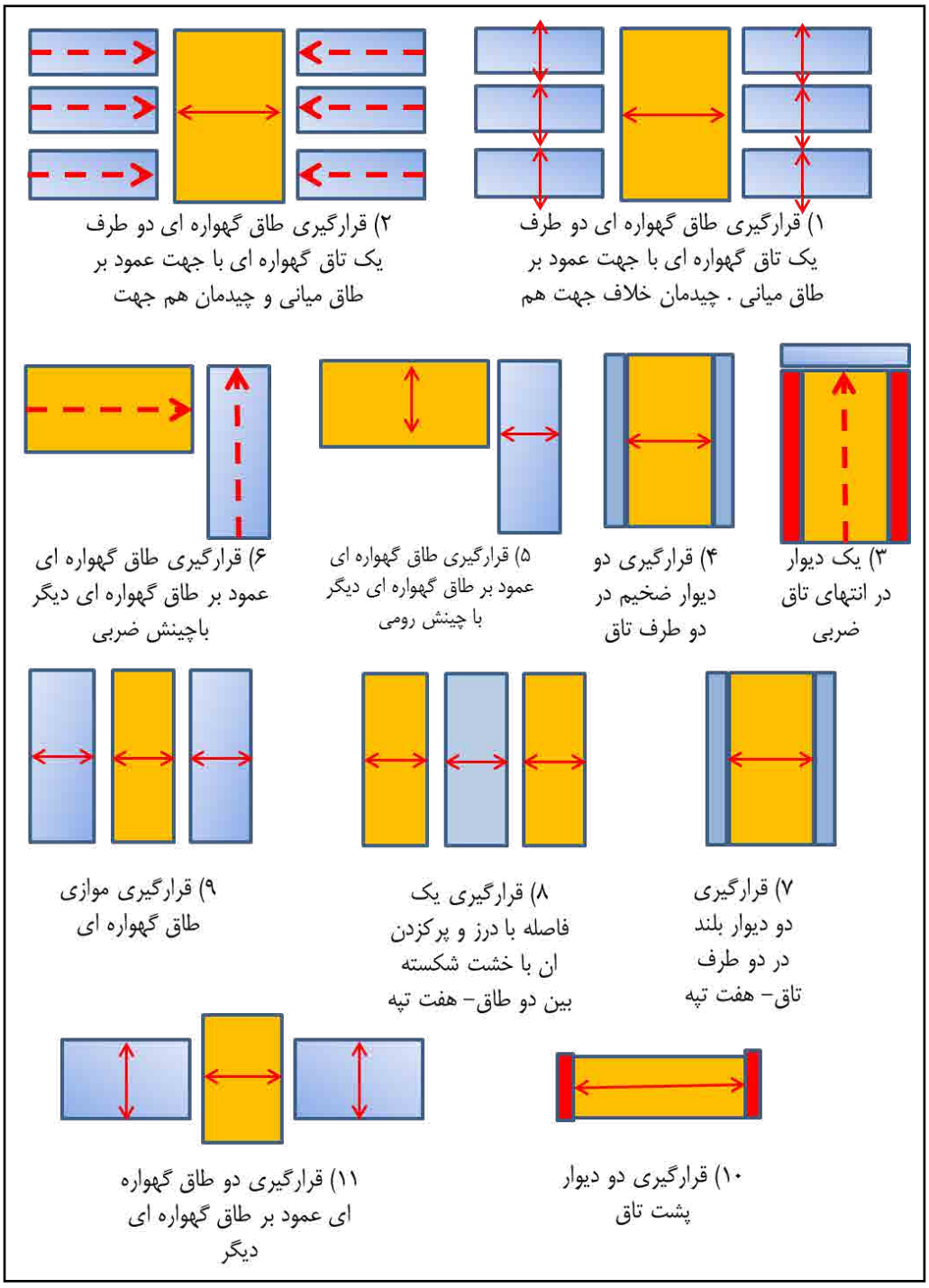
در ادامه و براساس نتایج ارائه شده در دسته‌بندی‌ای دیگر؛ ابعاد گوناگون و درهم‌تنیده‌ای را در بررسی فن‌شناسی، ساخت و پایداری طاق‌آهنگ معرفی می‌کند که شناخت هرکدام برای تحلیل دقیق این عنصر سازه‌ای در معماری پیش از اسلام ضروری است؛ نخست، عوامل مرتبط با مصالح و ملات هم‌چون: نوع، شکل، رطوبت، و کیفیت اتصال مصالح، نقش تعیین‌کننده‌ای



شکل ۵: پنج شیوه از تمهیدات پایداری در طاق‌های آهنگ در دورهٔ ایلام؛ الف) چگاسفلی: ایجاد پشتبندهای عمود بر دیوارهٔ طاق (مقدم، ۱۳۹۴: ۱۰۵ و ۷۱). ب) شوش: قرار دادن یک آجر بر روی رأس طاق (نگارنده، ۱۴۰۳). پ) شوش: پرکردن پشت طاق از شروع تا شانه (Dumckenom, 1931). ت) هفت‌تپه: ایجاد دیوار ضخیم و مرتفع در پشت طاق (نگارنده، ۱۴۰۲؛ نگهبان، ۱۳۷۲، ۱۰۴ و ۷۷). ث) چغازنبیل: ایجاد ضخامت در بخش ایوارگاه طاق (نگارنده، ۱۴۰۳؛ گیرشمن، ۱۳۷۵: ۹۸ و ۲۵۹).

Fig. 5: Five stability measures in barrel vaults of the Elamite period. a) Chogha Sofla: construction of perpendicular buttresses behind the vault wall (Moghadam, 2015: 71, 105). b) Shush: placement of a brick on the vault crown (Author, 2024). c) Shush: filling behind the vault from springing to the shoulder (Dumckenom, 1931). d) Haft Tappeh: construction of thick and elevated back walls behind the vault (Author, 2023; Naghban, 1993: 77, 104). e) Chogha Zanbil: increasing thickness at the vault springing (Author, 2024; Grishman, 1998: 98, 259).

در انتقال نیرو و انسجام طاق دارند. دوم، فناوری ساخت و شیوه‌های اجرایی مانند: نوع چینش، قالب‌بندی و ترتیب رج‌چینی تأثیر مستقیمی بر فرم و عملکرد طاق دارد. سوم، ابعاد سازه‌ای نظیر تناسبات عددی، هندسه قوس و نقطهٔ تعادل نیروها، اساس طراحی ایستای طاق را شکل می‌دهند. چهارم، اقلیم و شرایط محیطی در انتخاب مصالح و دوام سازه نقش دارند؛ ازجمله تأثیر رطوبت، تابش و نوع خاک منطقه. پنجم، نوع کاربری طاق و فشارهای وارده از بالا یا جانبی، در طراحی و تقویت سازه لحاظ می‌شود. ششم، میزان مهارت و تجربه استادکاران محلی و دسترسی به نیروی ماهر، کیفیت اجرا را تعیین می‌کند. نهایتاً، عوامل فرهنگی، سیاسی، اقتصادی و



شکل ۶: شیوهٔ کنترل رانش جانبی سازه (نگارندگان، ۱۴۰۴).

Fig. 6: Techniques for controlling lateral thrust in vaulted structures (Author, 2025).

خصمانه، مانند مرکزیت یا حاشیه‌نشینی، منابع مالی و تبادلات فرهنگی میان دوران مختلف و منطق همجوار چون بین‌النهرین (نیکنامی و همکاران، ۱۳۹۸، ۳۲)، در گسترش یا محدودیت تکنیک‌ها و مصالح مؤثرند. این ابعاد، چارچوبی تحلیلی برای درک جامع پایداری و منطق ساخت طاق‌آهنگ در جهت کاربرد در مرمت و بازسازی بخش‌های فروریخته چنین سازه‌هایی را فراهم می‌سازند (جدول ۹).

جدول ۹: دسته‌بندی تمهیدات پایداری طاق‌های آهنگ بررسی‌شده (نگارندگان، ۱۴۰۴).
Table 9: Classification of stability measures in the examined barrel vaults (Author, 2025).

ردیف	دسته‌بندی کلی	نکات کلیدی و تدابیر اجرایی
۱	مصالح و ملات	ـ کاهش وزن مصالح با کوچک‌سازی ابعاد ـ ایجاد شیار با انگشت روی خشت برای پیوند بهتر ملات و آجر یا خشت ـ استفاده از قالب موقت زیر طاق تا مرحلهٔ خشک شدن به سبب اطمینان از عدم حرکت سازه ـ قرار دادن گاز، سنگ یا آجر کوچک بین آجرها برای استحکام بیشتر و جلوگیری از لغزش رج‌ها ـ ملات‌های چسبنده(گل) و تندگیر (گچ) ـ آجرهای پهن‌تر برای پایداری بیشتر ـ کاهش ضخامت مصالح ـ افزودن کاه برای سبک‌سازی ـ استفاده از نازک‌کاری یا لایه‌گذاری دوم در زیر یا روی طاق برای ایجاد یکپارگی طاق و مقاومت بیشتر
۲	فناوری ساخت و اجرا	ـ دقت در زاویهٔ اجرای آجرهای عمودی: شیب‌دار یا عمود ـ استفاده از آجرهای ذوزنقه‌ای یا منحنی برای اتصال بهتر ـ استفاده از قالب‌های نی خم‌شده برای طاق‌ها ـ بهره‌گیری از چینش ضربی شیب‌دار بدون قالب ـ چند لایه‌چینی برای استحکام بیشتر ـ شیب‌دار کردن لایه‌های طاق ـ استفاده از آجر در بالای رأس طاق برای جلوگیری از کلکن شدن ـ استفاده از طاق‌های مجاور برای کاهش نیروی جانبی ـ اجرای ضخامت یکسان بخش‌های طاق برای بهینه سازی پایداری و تعداد لایه‌ها (یک، دو یا چند رج) ـ پیوستگی ابتدای طاق و پشت آن در شیوه رومی–اتصال پیوسته پشت طاق به دیواره‌ها
۳	هندسه، سازه و تناسبات	ـ تناسب جرز، خشت و آجر با دهانه و ارتفاع دیوار ـ ضخامت ملات ثابت (حدود ۲ سانتی‌متر) ـ رابطهٔ دهانه و ضخامت طاق (زیر ۳ متر = یک آجر) ـ شکل محل اتصال طاق به دیوار (هم‌باد، جلو آمده، عقب‌نشسته) ـ پیوستگی دیوار و طاق ـ ضخیم‌سازی شکن‌گاه برای مهار نیروها ـ انتخاب نوع چینش متناسب با نوع بار(نقطه‌ای/گسترده) ـ زاویهٔ شیب مصالح برای کاهش آسیب نشست ـ استفاده از پیمون و تناسبات بین اجزای طاق ـ بهره‌گیری از آجرهای ضخیم برای مقاومت فشاری بیشتر ـ استاندارد سازی درز مصالح دیوار در حدود ۲ سانتی‌متر ـ وجود دیوارهای نگه‌دارنده به‌موازات دیوارهای اصلی و پرکننده در پشت طاق به‌منظور پایداری طاق. ـ به‌کارگیری دیوارهای پشتیبان در درون یا بیرون فضا به‌صورت عمود بر دیوار زیر طاق علاوه‌بر نقش زمین به‌عنوان پشتیبان ـ اتصال دیوارهٔ تاق زیرزمینی با بدنهٔ خاکی اطراف آن با قرار دادن آجرها به صورت طولی به درون خاک ـ کنترل نیروهای مورب با افزایش تدریجی سطح طاق ـ ایجاد قدرت با دقت در ترسیم و اجرای شکل هندسی طاق ـ توجه به اتصال آجرهای رأس ـ دقت در قالب‌گیری مصالح برای کاهش درز اتصالات

جدول ۱۰: ابعاد مختلف فن‌شناسی، ساخت و پایداری طاق‌آهنگ براساس بررسی‌ها (نگارندگان، ۱۴۰۴).
Table 10: Various dimensions of construction, technology, and stability of barrel vaults based on field investigations (Author, 2025).

دسته‌بندی	جزئیات
۱. عوامل مرتبط با مصالح و ملات	نوع مصالح، شکل، ابعاد، وزن و رطوبت مصالح کیفیت اتصال در درزها نوع ملات (گل، گچ، گچ‌وخاک، گل‌ماسه، گِل‌نی، گِل‌پر، کاهگل، آمیخته‌های محلی) خاصیت شکل‌پذیری، چسبندگی، پرکنندگی و نقش ملات در انتقال نیرو
۲. فناوری ساخت و تکنیک اجرا	نوع چینش عناصر نحوه ایجاد قوس (با یا بدون قالب، با قالب خاکی یا چوبی، با لایه‌چینی تدریجی) ترتیب اجرای رج‌ها (شیب‌دار، پلکانی، افقی)
۳. سازه، هندسه و نسبت‌های عددی	تناسبات بین دهانه، ارتفاع، ضخامت جرزها و ضخامت طاق هندسه قوس محل شکست نیرو (شکن‌گاه)، اصول تعادل نیرو(منحنی فشار، تقارن بار)
٤. نقش اقلیم و شرایط محیطی	نوع خاک منطقه–منابع محلی مصالح تأثیر اقلیم گرم و خشک، رطوبت، یا سیلاب‌های فصلی بر انتخاب ملات و مصالح میزان تابش و انبساط-انقباض
۵. کاربری، عملکرد و فشارهای عملکردی	کاربری آرامگاهی، مسکونی، مذهبی یا صنعتی بار وارد بر طاق از بالا (پوشش، پرکننده، خاک، بار سقف) نحوه کنترل رانش جانبی و نشست طاق‌ها جایگاه طاق در کل سیستم سازه‌ای بنا
٦. نیروهای انسانی، مهارت و تجربهٔ بومی	نقش استادکار و تجربیات محلی–حضور یا فقدان کارگران ماهر در هر منطقه سطح پیچیدگی اجرا در مناطق مرکزی در برابر مناطق پیرامونی یا فقیرتر
۷. زمینهٔ فرهنگی، سیاسی و اقتصادی	مرکزیت یا حاشیه‌نشینی در ساختار حکومتی تأثیر بودجه، منابع مالی و ساخت‌های نمایشی یا کارکردی انتقال تکنولوژی و تأثیر هم‌جواری با تمدن‌های دیگر

نتیجه‌گیری

در راستای پاسخ به پرسش اصلی پژوهش، یعنی ویژگی‌های تکرارشونده در تمهیدات پایداری در چینش طاق‌های آهنگ خشتی-آجری از ایلام تا پایان دورهٔ ساسانیان در استان خوزستان، تحلیل جامع طاق‌های آهنگ از دورهٔ ایلام تا پایان ساسانی در خوزستان نشان می‌دهد که پایداری این سازه‌ها نه براساس آزمون‌وخطا یا تجربه‌گرایی صرف، بلکه برپایهٔ مجموعه‌ای از تمهیدات ساختاری، مصالحی و هندسی نظام‌مند شکل گرفته است. این تمهیدات، که ریشه در شناخت دقیق از رفتار نیروها، شرایط اقلیمی، ویژگی مصالح و تجربهٔ استادکاران داشته‌اند، اساس دوام و انسجام طاق‌ها را در گذر زمان فراهم کرده‌اند. یافته‌های این پژوهش با تکیه‌بر شواهد میدانی، داده‌های باستان‌شناسی و تحلیل ساختاری، نشان داد که: ۱) اجرای طاق‌های آهنگ از آغاز، تابع نظام‌های مشخصی از نسبت‌های ابعادی (نظیر: افراز به دهانه)، ۲) نوع ملات (گل، گچ و قیر)، ۳) شکل هندسی آجر (ذوزنقه، مربع و مستطیل)، و ۴) روش چینش (ضربی، رومی، کوربل و ترکیبی) بوده است. درک استادکاران سنتی از رفتار سازه‌ای، به‌ویژه در توزیع نیرو، مهار تنش‌های مورب، پیوند طاق به دیوار، و تثبیت لایه‌ها، به شکل‌گیری فرم‌هایی انجامیده است که در طول سده‌ها نه‌تنها پایدار مانده، بلکه قابلیت تطبیق با نیازهای فضایی و اقلیمی متغیر را نیز داشته‌اند.

تحلیل روند تاریخی از ایلام تا ساسانی گویای آن است که سنت‌های فنی در اجرای طاق به‌تدریج از فرم‌های ساده و مصالح محدود به ساختارهایی پیچیده و مهندسی‌شده ارتقا یافته‌اند. به‌ویژه در دورهٔ ساسانی، طاق‌های با افراز بلند، اوج بلوغ فنی این سنت را نشان می‌دهند. چنین روندی بیانگر وجود یک پیوستار فناورانه است که می‌تواند مبنای بازآفرینی دانش بومی در مرمت سازه‌های طاق‌دار و طراحی معاصر قرار گیرد؛ بر این‌اساس، نتایج به‌صورت زیر قابل بیان است.

الف) در حوزهٔ مصالح و ملات: ۱) استفاده از آجرهایی با اشکال خاص مانند ذوزنقه‌ای و مربعی برای اتصال و قفل‌شدگی بهتر، ۲) به‌کارگیری آجرهای پهن‌تر و ضخیم‌تر در پایه‌ها برای توزیع نیرو، و ۳) کاربرد ملات‌هایی چون: گل، گچ و قیر بسته به‌شرایط رطوبتی، ازجمله تمهیدات مهم بوده است.

ب) در سطح فناوری ساخت و اجرا: ۱) به‌کارگیری شیوه‌هایی مانند چینش ضربی شیب‌دار به‌منظور حذف قالب زیر طاق یک تحول در ساخت بوده است، ۲) استفاده از قالب‌های نی یا چوبی در زیر طاق با چینش رومی، ۳) ایجاد طاق‌های چندلایه و ضخامت طاق یک و یک‌ونیم آجر برای استحکام بیشتر، ۴) بهره‌گیری از طاق‌های مجاور برای کاهش نیروهای جانبی، و ۵) تنظیم ضخامت یکنواخت در بخش‌های پاکار و رأس چفد، سازوکارهایی برای ایجاد پایداری سازه‌ای محسوب می‌شوند؛ هم‌چنین، ۶) استادکاران با تنظیم دقیق زاویهٔ رج‌ها، ۷) کنترل ضخامت ملات، ۸) ایجاد اتصال پیوسته میان رج ابتدایی طاق و دیواره‌ها، پایداری ساختار را تضمین کرده‌اند، ۹) کاربرد دیوارهای پشتیبان، ۱۰) طراحی شکن‌گاه‌ها برای مهار نیروهای مورب، ۱۱) ایجاد پیوستگی و اجرای هم‌زمان دیوار و طاق در بخش شروع، و ۱۲) کنترل اتصال آجرهای رأس طاق نشان از مهارت بالای معماران در مهار نیرو و حفظ تعادل ایستایی دارد.

ج) در بخش هندسه و تناسبات سازه‌ای: ۱) به‌کارگیری نسبت‌های معنادار میان دهانه، افراز و ضخامت در هر دورهٔ تاریخی، ۲) بهره‌گیری از پیمون‌های عددی نیز ازجمله تمهیدات کلیدی در این‌زمینه است که جزئیات آجر در جداول ۷ و ۹ ارائه شد.

درمجموع، این پژوهش نشان می‌دهد که طاق‌های آهنگ خوزستان واجد نظامی درهم‌تنیده از تدابیر فنی بوده‌اند که پایداری آن‌ها را تضمین می‌کرد. این الگوها، قابلیت بازخوانی برای مرمت اصولی بخش‌های فروریخته و پابرجای این آثار و الهام در طراحی معماری معاصر را نیز دارا هستند. پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی می‌تواند به مطالعهٔ تطبیقی میان طاق‌های آهنگ خوزستان با مناطق هم‌اقلیم در بین‌النهرین، شمال خلیج‌فارس و فلات و یا تحلیل تأثیرپذیری معماری اسلامی اولیه از شیوه‌های ساخت طاق‌های آهنگ پیش از اسلام در خوزستان، به‌ویژه در سیر تحول مساجد اولیهٔ جنوب‌غرب ایران پرداخته شود.

سپاسگزاری

در پایان نویسندگان برخود لازم می‌دانند که از داوران ناشناس نشریه با نظرات ارزشمند خود به غنای متن مقاله افزودند، قدردانی نمایند.

درصد مشارکت نویسندگان

مقالهٔ حاضر بخشی از مطالعات پژوهشی رسالهٔ دکتری نگارندهٔ اول با عنوان «خوانش دگرگونی‌ها در چینش تاق‌آهنگ از عیلام تا پایان دورهٔ ساسانی با رویکرد حفاظت بناها بر مبنای اصالت کالبدی (مطالعهٔ موردی استان خوزستان)» است که با راهنمایی سایر نگارندگان در دانشگاه هنر اصفهان انجام شده است.

تضاد منافع

نویسندگان ضمن رعایت اخلاق نشر در ارجاع‌دهی و دقیق بودن آن در متن و انتهای مقاله، نبود تضاد منافع را اعلام می‌دارند.

کتابنامه

- ارفعی، عبدالمجید؛ و گروه نویسندگان، (۱۳۸۵). کتاب اطلس تاریخ ایران. تهران: سازمان نقشه‌برداری کشور.
- استروناخ، دیوید؛ و رُف، مایکل، (۱۳۹۰). نوشیجان ۱: بناهای بزرگ دورهٔ ماد. ترجمهٔ کاظم ملازاده، همدان: انتشارات دانشگاه بوعلی‌سینا.
- آقاعلی‌گل، داود؛ جعفری‌زاده، مسلم؛ رهبر، مهدی؛ و مردای، محمود، (۱۳۹۸). «کاربرد روش میکروپیکسی جهت آنالیز عنصری مهره‌های شیشه‌ای مکشوفه از آرامگاه‌های صالح‌داود خوزستان: شواهدی از تجارت مصنوعات شیشه‌ای در دورهٔ اشکانی». پژوهه باستان‌سنجی، ۵(۱): ۱۶۶-۱۴۴.
- آمیه، پیر، (۱۳۷۲). تاریخ ایلام. ترجمهٔ شیرین بیانی، تهران: دانشگاه تهران.
- ایزدپناه، فرزین؛ و کمالی، فائزه، (۱۴۰۳)، «بررسی رفتار و میزان حد نهایی پایداری قوس‌های ایرانی پنج وهفت کند و شبدری کند براثر رانش». مطالعات معماری ایران، ۲۵: ۶۲-۴۷.
- بیر، لیونل، (۱۹۸۶). سروستان. ترجمهٔ امیرحسین سلطانی، (۱۳۸۵)، کرباسفروش، تهران: سبحان نور.
- پوپ، ایهام، (۱۹۷۶). معماری ایران. ترجمهٔ کرامت الله افسر، (۱۳۶۵)، تهران: فرهنگسرا.
- پیرنیا، محمدکریم؛ و معماریان، غلام‌حسین، (۱۳۸۲). سبک‌شناسی معماری ایرانی. تهران: نشر پژوهنده.
- پیرنیا، محمد کریم، (۱۳۷۳). «چفدها، و تاق‌ها». اثر، ۲۴: ۵-۳۲۰.
- جین، آر. کی.؛ و تریاندیس، اچ. سی.، (۱۳۸۱). مدیریت بر مدیریت ناپذیر. تهران: مؤسسه آموزشی و تحقیقاتی صنایع دفاع.
- حافظ‌نیا، محمدرضا، (۱۳۸۰). مقدمه‌ای بر روش تحقیق در علوم انسانی. تهران: سازمان مطالعه و تدوین کتب علوم انسانی دانشگاه‌ها (سمت).
- حبیبی، آرش، (۱۳۹۱). انواع روش تحقیق در مدیریت. بازیابی‌شده از: https://parsmodir.com/db/research/research-type.php
- دیولافوا، ژان، (۱۳۶۹). کلده و شوش. ترجمهٔ ع. م. فره‌وشی، تهران: دانشگاه تهران.
- رهبر، مهدی، (۱۳۷۳). «کاوش باستان‌شناسی در گلالک شوشتر». یادنامهٔ گردهمایی باستان‌شناسی شوش: ۱۷۵-۲۰۸.
- رهبر، مهدی، (۱۳۷۳). «آرامگاه‌های گلالک شوشتر». ویژه‌نامه نخستین گردهمایی باستان‌شناسی ایران، ۱۲: ۲۶۸- ۲۶۶.
- رهبر. مهدی، (۱۳۷۸). «فصل اول کاوش‌های باستان‌شناسی صالح داوود». معاونت پژوهشی پژوهشکدهٔ باستان‌شناسی.
- ریاضی، محمدرضا، (۱۳۸۰). بروشور کتابشناسی توصیفی نوشته‌های پژوهشگران فرانسوی در ایران. تهران: موزه ملی ایران.
- زلقی، علی؛ و رفیعی علوی، بابک، (۱۳۹۹). «گزارش مقدماتی گمانه زنی به‌منظور تعیین عرصه و حریم و شناسایی دوره‌های فرهنگی تپه جنگل خوزستان». سالنامهٔ پایگاه میراث جهانی چغازنبیل و هفت‌تپه، ۱: ۶۱-۷۶.

- سبحانی، فرزانه؛ و رضایی‌نیا، عباسعلی، (۱۴۰۰). «گونه‌شناسی معماری آرامگاهی در دوره‌ی اشکانی». مطالعات تاریخ فرهنگی-پژوهش‌نامه‌ی انجمن ایرانی تاریخ، ۱۲ (۴۷): ۳۷-۱.
- سرفراز، علی‌اکبر؛ و فیروزمندی، بهمن، (۱۳۸۹). باستان‌شناسی و هنر دوران تاریخی ماد هخامنشی اشکانی ساسانی. چاپ ششم، تهران: انتشارات مارلیک.
- علیزاده، عباس، (۱۳۸۷). شکل گیری حکومت عشایری و کوهستانی ایلام باستان. شهرکرد: سازمان میراث‌فرهنگی چهارمحال و بختیاری.
- کابلی، میرعابدین، (۱۳۷۳). «شوش و میراث باستانی دشت شوشان». ویژه‌نامه نخستین گردهمایی باستان‌شناسی ایران، ۱۲: ۱۱۹-۱۳۹.
- کی‌یین، رابرت، (۱۳۷۸). طرح تحقیق و روش‌های مورد پژوهی-با مقدمهٔ دونالد. تی کمبل. ترجمهٔ هوشنگ نایبی، تهران: مؤسسه فرهنگی آینده، پویان تهران.
- گدار، آندره، (۱۳۶۹). طاق‌های ایرانی. ترجمهٔ کرامت‌الله افسر، تهران: فرهنگسرا.
- گروه نویسندگان، (۱۳۸۴). اطلس راهنمای استان‌های ایران، خوزستان. تهران: سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح.
- گروت، لیندا؛ و وانگ، دیوید، (۱۳۹۶). روش‌های تحقیق در معماری. ترجمهٔ علیرضا عینی‌فر، چاپ نهم، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- گیرشمن، رومن، (۱۳۷۵). چغازنبیل - جلد دوم: تمنوس، معابد، کاخ‌ها، قبور. چاپ اول، ترجمهٔ اصغر کریمی، تهران: سازمان میراث‌فرهنگی کشور.
- فرشاد، مهدی، (۱۳۶۲). تاریخ مهندسی در ایران. چاپ دوم، بی‌جا: انتشارات گویش.
- فخارتهرانی، فرهاد، (۱۳۷۱). «هندسه و ساختار سقف‌های پوسته‌ای سنتی». صفه، ۲(۲): ۵-۲۲.
فخارتهرانی، فرهاد؛ و توکلو، نعیمه، (۱۳۹۶). «تبیین فنون اجرایی مؤثر در ارتقای مقاومت طاق». اندیشه معماری، ۱(۱): ۳۹-۵۳.
- محمدی‌فر، یعقوب، (۱۳۹۳). باستان‌شناسی و هنر اشکانی. چاپ چهارم، تهران: سمت.
- محمدی‌فر، یعقوب؛ روحانی‌رانکوهی، مانا؛ مهرکیان، جعفر؛ و مسینا، ویتو، (۱۴۰۲). «گونه‌شناسی معماری آرامگاه‌های الیمائی». مطالعات باستان‌شناسی پارسه، ۷ (۱۶): ۱۱۸-۹۷.
- مجیدزاده، یوسف، (۱۳۷۰). تاریخ و تمدن ایلام. تهران: کارون.
- مصطفوی، سید محمد تقی، (۱۳۱۸). «ایوان کرخه و جامع دزفول». مجله آموزش و پرورش، ۷-۸: ۶۴-۷۳.
- معماریان، غلامحسین، (۱۳۶۷). نیارش سازه‌های تاقی در معماری اسلامی ایران. تهران: جهاد دانشگاهی.
- معماریان، غلامحسین؛ و صفایی‌پور، هادی، (۱۳۹۴). معماری ایران، نیارش-تاق و گنبد. تهران: مؤسسه انتشارات نغمه نواندیش.
- مقدم، عباس، (۱۳۹۷). گورستان شش هزارساله تا چگاسفلی. تهران: پژوهشگاه میراث‌فرهنگی و گردشگری.
- مقدم، عباس، (۱۴۰۴). «خاتون و دیگر زنانِ ممتاز در گورستان چگاسفلا». پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران، ۱۵ (۴۴): ۴۱-۷۴.
- مفیدی‌نصرآبادی، بهزاد، (۱۳۹۹). «نگرشی بر نتایج کاوشهای باستان‌شناسی و تاریخ شهر باستانی ایلامی در هفت‌تپه». سالنامه پایگاه میراجهانی چغازنبیل و هفت‌تپه، ۱: ۱۱-۳۶.
- ملازاده، کاظم؛ و صاحب‌محمدیان، منصور، (۱۳۹۰). «مطالعه و معرفی شیوه بدیع تاق زنی دورهٔ ماد در تپه نوشیجان-ملایر». مطالعات باستان‌شناسی، ۳ (۲): ۱۱۹-۱۳۸.

- ملازاده، کاظم، (۱۳۹۰). «مطالعه معماری مذهبی دوره ماد و تداوم آن تا دورهٔ اشکانی براساس داده‌های باستان‌شناسی به‌دست آمده از نوشیجان و قومس». نامه باستان‌شناسی ۱ (۱): ۱۲۳-۱۳۶.

- ملک‌زاده، مهرداد، (۱۳۷۳). «غرب و جنوب‌غرب ایران در پگاه تاریخ». میراث‌فرهنگی، ویژه نامه نخستین گردهمایی باستان‌شناسی ایران، ۱۲: ۱۷۲- ۱۹۲.

- میرقادری، محمدامین؛ و رضائی، باغ‌بیدی، بهار، (۱۴۰۲). «ایلام، ایلام یا هلتمتی؟». زبان‌شناخت، ۱۴ (۲): ۲۸۷-۳۰۷.

مهران‌پور، هادی؛ و دیناروند، یوسف، (۱۳۹۰). «باستان‌شناسی خوزستان». مجموعه مقالات هشتاد سال باستان‌شناسی ایران، تهران.

- نگهبان، عزت‌الله، (۱۳۷۲). حفاری هفت‌تپه دشت خوزستان. تهران: سازمان میراث‌فرهنگی.

- نگهبان، عزت‌الله، (۱۳۷۶). مروری بر پنجاه سال باستان‌شناسی ایران. تهران: سازمان میراث فرهنگی

- نیکنامی، کمال‌الدین؛ حصاری، مرتضی؛ و شکری، طاهره، (۱۳۹۸). «شواهد ارتباط فرهنگی آغازایالمی تا ایلام قدیم براساس متون بین‌النهرین». مطالعات باستان‌شناسی پارسه، ۳ (۸): ۳۶-۲۵.

- ولی‌بیگ، نیما؛ و همکاران، (۱۳۹۴)، «تأثیرچیدمان آجرها برشکل‌گیری تاق‌های آهنگ آجری ساخته شده درشیب». سومین کنگره بین‌المللی عمران، معماری و توسعه شهری.

- هینتس، والتر، (۱۳۷۰). دنیای گمشده ایلام. چاپ اول، ترجمهٔ فیروز فیروزنیا، تهران: شرکت انتشارات علمی و فرهنگی.

References

- Aghaali-Gol, D., Jafarizadeh, M., Rahbar, M. & Mardai, M., (2019). "Application of micro-PIXE method for elemental analysis of glass beads from the tombs of Saleh-Davood, Khuzestan: Evidence of glass trade during the Parthian period". *Pazhuhesh-e Bastansanji,* 5(1): 144–166. (In Persian).

- Alizadeh, A., (2008). *Formation of tribal and mountainous governance in ancient Elam.* Shahr-e-Kord: Cultural Heritage Organization of Chaharmahal and Bakhtiari. (In Persian).

- Álvarez-Mon, J., (2020). *The Art of Elam ca. 4200–525 BC*. by Routledge Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon OX14 4RN and by Routledge 52 Vanderbilt Avenue, New York, NY 10017.

- Alvarez-Mon, J., Basello, G. P. & Wicksm Y., (2018). *THE ELAMITE WORLD.* by Routledge 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon OX14 4RN and by Routledge 711 Third Avenue, New York, NY 10017.

- Amiet, P., (1993). *History of Elam.* Shirin Biani, Trans., Tehran: University of Tehran. (In Persian).

- Arce, I., (2008). "Roman vaulting and its origins". *Journal of Roman Architecture*, 14(2): 112–135.

- Arfaei, A. & Author Group, (2006). *Atlas of the history of Iran.* Tehran: National Cartographic Center. (In Persian).

- Author Group. (2005). *Atlas of Iranian provinces: Khuzestan.* Tehran: Geographical Organization of the Armed Forces. (In Persian).

- Beir, L., (1986). *Surostan.* Amir Hossein Soltani, Trans., Tehran: Karbasforoush, Sobhan Noor. (In Persian).

- Bier, L. (1986). *Sarvistan: A study in early Iranian architecture.* College Art Association Monographs, Monograph on the Fine Arts 41. Pennsylvania State University Press.

- Bier, L., (1993). "The Sassanian palaces and their influence in early Islam". *Arts Orientalis,* 23: 57–66.

- Carter, E., (1984). *Elam-Surveys of political history and archaeology.* University of California.

- Dalai, M., (2020). "Vaulted graves in ancient Mesopotamia". In: A. Schneider (Ed.), *Burial Practices in the Ancient Near East* (pp. 130–145). De Gruyter.

- Dallai, M., (2020). "The vaulted funerary hypogea in Mesopotamia between the second and first millennium BC: Localization and architectural features". *West & East*, 4: 153–169. http://hdl.handle.net/10077/30232

- De Mecquenem, R., (1943–44). *Fouilles de Suse, 1933–1939*. Mémoires de la Mission Archéologique en Iran, Paris: Presses Universitaires de France.

- De Mecquenem, R., (1947). *Contribution à l'étude du palais achéménide de Suse.* Mémoires de la Mission Archéologique en Iran. Paris: Ernest Leroux Éditeur.

- De Morgan, J., (1900). *Délégation en Perse-Mémoires.* Tome I-Fouilles à Suse en 1897–1899. Paris: Ernest Leroux Éditeur

- De Morgan, J., (1905). *Trouvaille du masque d'argent.* Mémoires de la Mission Archéologique en Iran, VII. Paris: Ernest Leroux Éditeur.

- Dioulafo, J., (1990). *Kuldeh and Shush,* A. M. Farroushi, Trans., Tehran: University of Tehran. (In Persian).

- Fakhar Tehrani, F., (1992). "Geometry and structure of traditional shell roofs". *Safheh,* 2(2): 5–22. (In Persian).

- Farshad, M., (1983). *History of engineering in Iran.* (2nd ed.), Bija: Gooyesh Publications. (In Persian).

- Ghirshman, R. & Stève, M.-J., (1966). *Campagne de l'hiver 1964-65*. Rapport préliminaire. In: Arts asiatiques, tome

- Ghirshman, R., (1964). *Iran: From the earliest times to the Islamic conquest.* Penguin Books.

- Ghirshman, R., (1970). *Chogha Zanbil*. Vol. 2: *Temenos, Temples, Palaces, Tombs* (A. Karimi, Trans.). Tehran: Cultural Heritage Organization of Iran. (In Persian).

- Godard, A., (1990). *Iranian arches.* K. Afser, Trans., Tehran: Farhangsara. (In Persian).

- Grote, L, & Wang, D., (2017). *Research methods in architecture.* A. Eyni Far, Trans., 9th ed., Tehran: University of Tehran Press. (In Persian).

- Habibi, A., (2012). *Types of research methods in management.* Retrieved from: https://parsmodir.com/db/research/research-type.php (In Persian).

- Hafeznia, M. R., (2001). *Introduction to research methods in humanities.* Tehran: SAMT. (In Persian).

- Hintz, W., (1991). *The lost world of Elam.* Firooz Firooznia, Trans., Tehran: Scientific and Cultural Publishing Company. (In Persian).

- Hnaihen, K. H., (2020). "The Appearance of Bricks in Ancient Mesopotamia". *Athens Journal of History,* 6 (1): 73-96.

- Hnaihen, K. H., (2020). "Mudbrick architecture in Mesopotamia: Typologies and construction techniques". *Near Eastern Archaeological Studies,* 37(2): 107–124.

- Hosseini, S., Niroumand, H., Burcu Gültekin, A., Antonio Barceló, J., Osmadi, A. & Mahdavi, F., (2020). "Structural analysis of earth construction's vaults: Case of underground tombs of Chogha Zanbil". *Revista de la Construcción,* 19 (3): 336-370. http://dx.doi.org/10.7764/rdlc.19.3.366.

- Huff, D., (2006). *Architektur Irans zur Zeit der Sasaniden.* Mainz: Verlag Philipp von Zabern.

- Huff, D., (1986). "Architecture:III:Sasanianperiod". *Encyclopedia Iranica,* 2: 329–334.

- Izadpanah, F. & Kamali, F., (2024). "Study of behavior and ultimate stability of Iranian arches in Pan-o-Vah and Shabderi konds under lateral thrust". *Iranian Architectural Studies,* 25: 47–62. (In Persian).

- Jane, R. K. & Triandis, H. C., (2002). *Managing the unmanageable.* Tehran: Defense Industries Educational and Research Institute. (In Persian).

- Kaboli, Mir-A., (1994). "Shush and the ancient heritage of Shoushan plain". *Special Issue of the First Iranian Archaeology Congress,* 12: 119–139. (In Persian).

- Kayin, R., (1999). *Research design and methods.* D. T. Campbell, Intro.; H. Nayebi, Trans., Tehran: Pooyan. (In Persian).

- Lancaster, L., (2009). "Vaulting in architecture from Mesopotamia to Rome". In: *BYZAS,* 9 (pp. 371–391), Istanbul: German Archaeological Institute.

- Lancaster, L., (2010). *Innovative vaulting in the architecture of the Roman Empire, 1st to 4th centuries CE.* Cambridge University Press.

- Majidzadeh, Y., (1991). *History and civilization of Elam*. Tehran: Karun.

- Malazadeh, K. & Saheb Mohammadian, M., (2011). "Study and introduction of a novel vaulting method in the Median period at Nushijan Hill-Malayer". *Journal of Archaeological Studies,* 3(2): 119–138. (In Persian).

- Malazadeh, K., (2011). "Study of Median religious architecture and its continuation to the Parthian period based on archaeological data from Nushijan and Qoms". *Archaeology Letters,* 1(1): 123–136. (In Persian).

- Malekzadeh, M., (1994). "Western and southwestern Iran at the dawn of history". *Cultural Heritage, Special Issue of the First Iranian Archaeology Congress,* 12: 172–192. (In Persian).

- Mariusz, M. & Partov, D. (2018). "SELECTED ANCIENT STONE BRIDGES WITH CORBELLED FALSE-ARCH STRUCTURE". *Civil and Environmental Engineering Reports,* 28(4): 163-179. https://doi.org/10.2478/ceer-2018-0059.

- Mehr Kian, J. & Messina, V., (2019). "Preliminary Report on the Iranian-Italian Joint Expedition into Khuzestan: Kal-e Chendar; Shami (2013-2016)". *Archaeology,* 2: 1-29.

- Mehranpour, H. & Dinarvand, Y., (2011). *Archaeology of Khuzestan: Papers from eighty years of Iranian archaeology.* Tehran. (In Persian).

- Memarian, Gh. H., (1988). *Structural vaults in Islamic architecture of Iran.* Tehran: Jahad Daneshgahi. (In Persian).

- Memarian, Gh. H. & Safaei Pour, H., (2015). *Iranian architecture: Niarsh-Vaults and domes.* Tehran: Naghmeh Nowandish Publishing Institute. (In Persian).

- Mirghadri, M. A. & Rezaei Baghbidi, B., (2023). "Elam, Elam or Haltamti?" *Biannual Journal of Linguistics,* 14(2): 287-307 (In Persian).

- Miroschedji, P., (1981). "Fouilles du chantier Ville Royale II a Suse(1975-1977). I. Niveaux elamites". *DAFI* (12): 9-197.

- Mofidi Nasrabadi, B., (2020). "A review of archaeological excavation results and history of the Elamite city at Haft Tepe". *Annual of Chogha Zanbil and Haft Tepe World Heritage Site,* 1: 11–36. (In Persian).

- Moghaddam, A., (2018). *Six-thousand-year-old cemetery to Chogha Sofla.* Tehran: Research Institute of Cultural Heritage and Tourism. (In Persian).

- Moghaddam, A., (2025). "Khatun and other distinguished women in Chogha Sofla cemetery". *Iranian Archaeological Studies,* 15(44): 41–74. (In Persian).

- Mohammadifar, Y., Rouhani Rankouhi, M., Mehrakian, J. & Messina, V., (2023). "Typology of Elymaean tomb architecture". *Parseh Archaeological Studies,* 16(7): 97–118. (In Persian).

- Mohammadifar, Y., (2014). *Archaeology and art of the Parthian period.* (4th ed.), Tehran: SAMT. (In Persian).

- Moorey, P. R. S., (1994). *Ancient Mesopotamian materials and industries: The archaeological evidence.* Oxford: Clarendon Press.

- Moorey, P. R. S., (1994). "AncientMesopotamianMaterials and Industries: The Archaeological Evidence". Clarendon Press, Oxford. Huff, D., 2006. Qal'a-ye Dokhtar, *Encyclopedia Iranica* 15. http://www.iranicaonline.org/ articles/qala-ye-doktar.

- Mostafavi, S. M. T., (1939). "Eyvan Karkheh and Jameh Dezful". *Journal of Education,* 7–8: 64–73. (In Persian).

- Naghban, E., (1993). *Excavations at Haft Tepe, Khuzestan plain.* Tehran: Cultural Heritage Organization. (In Persian).

- Naghban, E., (1997). *A review of fifty years of archaeology in Iran.* Tehran: Cultural Heritage Organization. (In Persian).

- Niknami, K., Hessari, M. & Shokri, T., (2019). "Evidence of cultural interaction from Proto-Elamite to Old Elam based on Mesopotamian texts". *Parseh Archaeological Studies,* 3(8): 25–36. (In Persian).

- Perrot, J., (2013). "Decorative glazed bricks in the palace of Darius at Susa". *Iranian Studies*, 46(2): 205–215.

- Pirnia, M. K. & Memarian, Gh. H., (2003). *Stylistics of Iranian architecture.* Tehran: Pazhuhandeh. (In Persian).

- Pirnia, M. K., (1994). *Chehdeha and Taqs.* Publication No. 24. Tehran: Cultural Heritage Organization of Iran. (In Persian).

- Pope, A. U., (1965). *A survey of Persian art: From prehistoric times to the present.* Tehran: Ministry of Culture and Art.

- Pope, A. U., (1987). *Iranian architecture.* K. Afser, Trans., Tehran: Farhangsara. (In Persian).

- Rahbar, M., (1994). "Archaeological excavation at Gelalak, Shushtar". In: *Proceedings of the Shushtar Archaeological Symposium* (pp. 175–208). (In Persian).

- Rahbar, M., (1994). "Tombs of Gelalak, Shushtar". *Special Issue of the First Iranian Archaeology Congress,* 12: 266–268. (In Persian).

- Rahbar, M., (1999). *Volume 1 of the archaeological excavations at Saleh-Davood.* Tehran: Archaeological Research Center. (In Persian).

- Rashid, F., (1981). *Brick production in ancient Iraq.* Oil and Development.

- Riazi, M. R., (2001). *Descriptive bibliography of writings by French researchers in Iran.* Tehran: National Museum of Iran. (In Persian).

- Rossi, C., (2019). "Egyptian cubits and Late Roman architecture: The design of the forts of the Kharga Oasis (Egypt)". *ISAW Papers,* 16. http://hdl.handle.net/2333.1/5tb2rmg1

- Rossi, C., Fiorillo, F. & Zarei, H., (2020). "The vaults of Umm al-Dabadib: Geometric study". *Nexus Network Journal,* 22(4): 1–18. https://doi.org/10.1007/s00004-020-00532-

- S. Kawami, T., (1976). "Parthian Brick Vaults in Mesopotamia". Their Antecedents and Decendants. *Journal of the Ancient Near Eastern Society* (1982): 61-67.

- Sarfaraz, A. A. & Firoozmandi, B., (2010). *Archaeology and art of the Median, Achaemenid, Parthian, and Sassanian periods.* (6th ed.). Tehran: Marlik Publications. (In Persian).

- Sauvage, M., (1998). *La brique et sa mise en œuvre en Mésopotamie: Des origines à l'époque achéménide (Doctoral dissertation).* Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.

- Sauvage, M., (2016). *La construction royale en Mésopotamie.* ArchéOrient-Le Blog.

- Sobhani, F. & Rezaeinia, A. A., (2021). "Typology of funerary architecture in the Parthian period". *Journal of Cultural History Studies-Research Paper of Iranian Historical Society,* 12(47): 1–37. (In Persian).

- Stronach, D., (1978). *Pasargadae: A report on the excavations conducted by the British Institute of Persian Studies from 1961 to 1963.* Oxford University Press.

- Stronach, D. & Roff, M., (2011). *Nushijan 1-Large buildings of the Median period.* K. Malazadeh, Trans., Hamedan: Bu-Ali Sina University Press. (In Persian).

- Vali Beig, N. et al., (2015). "The effect of brick arrangement on the formation of brick arches built on slopes". *3rd International Congress on Civil Engineering, Architecture, and Urban Development.* (In Persian).

- Van Beek, G. W., (1986). *Ancient Mesopotamia: Portrait of a dead civilization.* University of Chicago Press.

- Zalaghi, A., (2018). "Digging up the Past: Revisiting the Elamite Underground Vaulted Tombs at Tappeh 497 (KS 53?)". *Susiana Plain, ELAMICA,* 8: 277-292.

- Zolqi, A. & Rafi'i Alavi, B., (2020). "Preliminary report of test trenches to define extent, boundaries, and cultural periods of Jangal Hill, Khuzestan". *Annual of Chogha Zanbil and Haft Tepe World Heritage Site,* 1: 61–76. (In Persian).