

Vaultings in Iranian Historical Architecture: A New Framework for Classification

Hadi Safaeipour, PhD.* 

Assistant Professor, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: May 07, 2023

Accepted: June 20, 2023

(Pages: 119-139)

Hadi Safayipour, 2025. Vaultings in Iranian Historical Architecture: A New Framework for Classification. *Soffeh* 35 (3): 119-139.

DOI: [10.48308/SOFEH.2023.231602.1255](https://doi.org/10.48308/SOFEH.2023.231602.1255)

Abstract:

Background and objectives: Vaulted coverings in historical Iranian architecture hold a central role in terms of form, spatial quality, and meaning, exhibiting a remarkable diversity compared to vaulted architecture in other architectural traditions. Throughout different periods of Iranian architecture, especially from the Islamic Middle Ages onwards, the shape and structural system of vaults continuously evolved, appearing in various forms and combinations across different buildings. Within this context, accurately identifying and categorising vaulting types is both essential and challenging. Accordingly, this study poses the question: 'What is the appropriate framework for comprehensive and definitive identification and classification of vaults in historical Iranian architecture?'

Keywords:

Vault, Classification, Structural form, Brick structures, Iranian historical architecture.

Materials and Methods: To address this question, contemporary scholars' viewpoints are examined through a descriptive-analytical method employing a twofold categorisation strategy. The first category encompasses studies in the field of Iranian historical architecture by scholars such as André Godard, Myron Bement Smith, Donald Wilber, Lisa



SOFEH

Soffeh Journal, Shahid Beheshti University, Vol. 35, Issue 3, No. 110, 2025  ISSN: 1683-870X

*. Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

*. Corresponding Author Email Address: h_safaeipur@sbu.ac.ir
[http://dx.doi.org/10.48308/SOFEH.2023.231602.1255](https://dx.doi.org/10.48308/SOFEH.2023.231602.1255)

Golombek, Mohammad Karim Pirnia, Gholam-Hossein Me'marian, and Hossein Zomorshidi. These studies introduce the theoretical geometry of vaults, their spatial relationships, construction methods, and applications, demonstrating the diversity of vault designs. Typically grounded in extensive fieldwork, these works align well with the characteristics of vaults in Iranian architecture; however, they generally do not propose a clear, comprehensive, and exclusive classification framework. The second category includes studies on structural systems by scholars like Robin Engels, Rowland J. Mainstone, and Bjørn N. Sandaker, who analyse and classify structural systems based on morphological features and structural behaviour. The thematic scope of these studies typically lies outside the realm of Iranian historical architecture. While this category offers a systematic and clear method for classifying vault structures by concurrently considering morphological and structural criteria, it lacks the necessary comprehensiveness, precision, and clarity to effectively address the diverse vaulting types in Iranian architecture.

Results & Conclusion: This article proposes an integrated, novel framework for classifying vault types in Iranian architecture, synthesising findings from both categories through logical reasoning. This framework coheres with the remarkable variety of vault designs in historical Iranian architecture and, by simultaneously considering morphological and structural criteria, provides a clear methodology and rationale. Vaults are classified based on two concurrent criteria: the presence and configuration of structural elements and the form of these structural elements. According to the first criterion, vaults are divided into three groups: 'without ribs,' 'with peripheral ribs,' and 'with peripheral and intersecting ribs. According to the second criterion, the vault is composed of brick shells (with an overall planar structural form) and ribs (with an overall linear structural form). Consequently, vaults consist of subcategories as follows: 1) Vaults without ribs featuring single-curved shells (barrel vault) or double-curved shells (squinch and domical vaults); 2. Vaults with peripheral ribs and single-curved shells (barrel), double-curved shells (squinch and domical, and Kajaveh), intersection of two single-curved shells (groin and crossed vault), or combinations of single- and double-curved shells (Khunecheh-poush); 3. Vaults with peripheral and intersecting ribs where shells are parts of single- or double-curved surfaces. These vaults are formed either through a sequential geometry of lines and planes (Karbandi vault), a sequential geometry of lines with non-sequential planes (ribbed vault), or a non-sequential geometry of lines and planes (Patkaneh or muqarnas vault).

Overlapping structural and morphological components forms the basis for dividing vaults into two categories: a) Planar vaults (including single-curved, double-curved, intersection of two single-curved shells, and combinations of single- and double-curved shells); b) Linear and planar vaults (which, depending on the sequential or non-sequential order of lines and planes, are subdivided into three groups). In planar vaults, the shell plays a central role as the main structural element responsible for stability and shape, whereas in linear and planar vaults, the shell's role diminishes, and ribs primarily shape and stabilise the vault to the extent that this type of vault cannot be constructed without intersecting ribs. Accordingly, this article presents a systematic and integrated framework for identifying and introducing vaults in Iranian historical architecture by simultaneously considering morphological and structural components. Employing this framework not only offers a more comprehensive classification of vaults but also reveals challenges faced by designers and builders of vaulted structures, thereby opening a new window for designing innovative vaults in the contemporary architecture.

چارچوبی نوین برای دسته‌بندی طاق‌ها در معماری تاریخی ایران



هادی صفائی‌پور

استادیار دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

دریافت: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۲

پذیرش: ۳۰ خرداد ۱۴۰۲

(صفحه ۱۳۹-۱۱۹)

هادی صفائی‌پور. ۱۴۰۴. چارچوبی نوین برای دسته‌بندی طاق‌ها در معماری تاریخی ایران. فصلنامه علمی معماری و شهرسازی ص ۳۵ (۳): ۱۳۹-۱۱۹.

کلیدواژگان: طاق، دسته‌بندی، شکل سازه‌ای، سازه‌های آجری، معماری تاریخی ایران.

چکیده

اهداف و پیشینه: پوشش‌های طاقی در معماری تاریخی ایران از لحاظ کالبدی، فضایی، و معنایی نقشی محوری و جایگاهی ویژه دارند و در مقایسه با معماری تاریخی دیگر سرزمین‌ها از تنوع کم‌نظیری برخوردارند. در ادوار مختلف معماری ایران و به‌خصوص از قرون میانی اسلامی به بعد، شکل و سازه طاق‌ها از دوره‌ای به دوره‌ای و از بنایی به بنایی دیگر مدام تغییر می‌کند و در صورت‌ها و ترکیب‌های تازه پدیدار می‌شود. در چنین زمینه‌ای شناخت دقیق گونه‌های طاقی و دسته‌بندی آنها امری مهم و دشوار است. بر این اساس، هدف در این مقاله یافتن چارچوب مناسبی برای بازشناسی و دسته‌بندی جامع و مانع طاق‌ها در معماری تاریخی ایران است.

مواد و روش‌ها: برای نیل به این هدف، به‌سراغ آراء دانشوران معاصر می‌رویم و آنها را به روش توصیفی - تحلیلی و با راهبرد دسته‌بندی در دو دسته بررسی می‌کنیم: دسته نخست شامل «مطالعات حوزه معماری تاریخی ایران» نزد دانشورانی چون آندره گدار، مایرون بمنت اسمیت، دانا وایلیز، لیزا گلمبک، محمدکریم پیرنیا، غلامحسین معاریان، و حسین زمرشیدی است. در این مطالعات هندسه نظری

طاق‌ها، ارتباط آن با ویژگی‌های فضایی، روش ساخت، و کاربرد آنها و تنوع طرح طاق‌ها معرفی می‌شود. این مطالعات معمولاً متکی بر بررسی‌های میدانی مصادیق متعدد هستند و از این‌رو با ویژگی‌های طاق‌ها در معماری ایران تناسب دارند، اما معمولاً بدون چارچوب مدون و روشن و جامع و مانعی برای دسته‌بندی طاق‌ها هستند. دسته دیگر شامل «مطالعات حوزه نظام‌های سازه‌ای» نزد دانشورانی چون انگلز، مین‌استون، و سنداکر هستند. در این پژوهش‌ها انواع سیستم‌های سازه‌ای را بر اساس ویژگی‌های شکلی و رفتار سازه‌ای آنها مطالعه و دسته‌بندی می‌شوند. قلمرو موضوعی این مطالعات معمولاً خارج از محدوده معماری تاریخی ایران و فارغ از آثار آن است. در این دسته از مطالعات، با توجه هم‌زمان و روشمند به مؤلفه‌های شکلی و سازه‌ای طاق‌ها، روشی روشن برای دسته‌بندی سازه‌های طاقی عرضه می‌گردد؛ اما برای مواجهه با انواع طاق در معماری ایران، جامعیت، دقت، و وضوح لازم را ندارد. بر این اساس در مقاله پیش رو با ارزیابی، تحلیل، و پیوند یافته‌های این دو دسته مطالعات با روش استدلال منطقی، چارچوب یکپارچه نوینی برای دسته‌بندی انواع طاق در معماری ایران پیشنهاد می‌شود؛ چارچوبی که هم با تنوع چشمگیر طرح طاق‌ها در معماری تاریخی ایران همخوانی دارد و هم، با توجه هم‌زمان به ملاک‌های شکلی و سازه‌ای، از منطق و روشی روشن برخوردار است.

1. h_safaeipour@sbu.ac.ir



۱۱۰ شماره ۳، پیاپی: ۱۴۰۴، سال سی‌وپنجم، پاییز ۱۴۰۴
*. Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

فصلنامه علمی معماری و شهرسازی؛ سال سی‌وپنجم، پاییز ۱۴۰۴، شماره ۳، پیاپی: ۱۱۰
*. Corresponding Author Email Address: h_safaeipour@sbu.ac.ir
<http://dx.doi.org/10.48308/SOFEH.2023.231602.1255>

پرسش‌های تحقیق

۱. چارچوب مناسب برای بازشناسی و دسته‌بندی جامع و مانع طاق‌ها در معماری تاریخی ایران چیست؟

۲. از نظر تاریخی غیاث‌الدین جمشید کاشانی دو واژه «طاق» و «زج» را به کار برده است (نک: غیاث‌الدین جمشید کاشانی، رساله طاق و زج (تهران: سروش، ۱۳۶۶)، ۲۷). او «طاق» را اندام منحنی‌شکلی می‌داند که اندازه طول آن از عمقش بیشتر و کاربرد آن پوشاندن دهانه درگاه است و اندام‌های منحنی‌شکلی که عمق آنها از طولشان بیشتر است و برای پوشاندن فضا به کار می‌روند را «زج» به معنای سَغ (سقف یا پوشش خمیده) می‌خوانند (نک: لغتنامه دهخدا، ذیل «سغ»).

۳. امروزه واژه «طاق» معمولاً به معنی اندام منحنی پوشش فضا به کار می‌رود؛ اما این واژه در بعضی کلمات مانند «چهارطاقی» و «طاق‌بندی» به معنایی که کاشانی اشاره کرده به کار می‌رود. بر این اساس چهارطاقی فضایی متشکل از چهار قوس و نه چهار سقف منحنی است.

۴. پیرنیا در واژه‌نامه مقاله‌اش هر چهار واژه فوق را برای معرفی پوشش منحنی درگاه استفاده می‌کند (محمدکریم پیرنیا، «چفدها و طاق‌ها»، اثر، ش. ۲۴ (۱۳۷۳): ۱۴۶). با این حال به نظر می‌رسد او واژه «چفد» واژه اصلی خود برگزیده است و آن را در نوشته‌ها و گفته‌های خود بیشتر به کار می‌برد (همان؛ پیرنیا، «ارمغان‌های ایران به جهان: معماری گنبد»، هنر و مردم، ش. ۱۳۶ و ۱۳۷ (زمستان ۱۳۵۲): ۳). معماریان نیز با پیروی از او، این اندام را «چفد» می‌خوانند (غلامحسین معماریان، معماری ایرانی ←

نتایج و جمع‌بندی: در این مقاله با توجه هم‌زمان به دو مؤلفه «موقعیت و ترکیب عناصر سازه‌ای» و «شکل عناصر سازه‌ای» طاق‌ها دسته‌بندی می‌شود: بر اساس مؤلفه اول، طاق‌ها به سه دسته «بدون تویزه»، «با تویزه‌های محیطی» و «با تویزه‌های محیطی و مقاطع» تقسیم می‌شوند. بر مبنای مؤلفه دوم، طاق ترکیبی از پوسته‌های آجری (با شکل سازه‌ای کلی صفحه‌ای) و تویزه‌ها (با شکل سازه‌ای کلی خطی) است. بر اساس این دو مؤلفه، طاق‌ها از دسته‌های خردتری نیز تشکیل می‌شوند: (۱) طاق بدون تویزه و با پوسته‌های تک‌انحنایی (طاق آهنگ) یا دوانحنایی (چهاردوری و کلبو)؛ (۲) طاق با تویزه‌های محیطی و پوسته‌های تک‌انحنایی (آهنگ)، دوانحنایی (چهاردوری، کلبو و کزاوه)، تلاقی دو تک‌انحنایی (ترکین و چهاربخش) یا ترکیبی از تک‌انحنایی و دوانحنایی (خوانچه‌پوش)؛ (۳) طاق‌های با تویزه‌های محیطی و مقاطع که در آنها پوسته‌ها جزئی از صفحات تک یا دوانحنایی هستند. این طاق‌ها با هندسه ترتیبی از خط و صفحه (کاربندی) یا هندسه ترتیبی از خط و غیرترتیبی از صفحه (طاق با باریکه طاق) یا هندسه غیرترتیبی خط و صفحه (پتکانه) شکل گرفته‌اند. با هم‌پوشانی مؤلفه‌های سازه‌ای و شکلی، مؤلفه‌ای کلی‌تر و اصلی‌تر و تعیین‌کننده‌تری موسوم به «شکل سازه‌ای کلی» مبنای تقسیم‌بندی طاق‌ها به دو دسته می‌شوند: الف) طاق‌های «صفحه‌ای» (شامل تک‌انحنایی، دوانحنایی، تلاقی دو تک‌انحنایی، ترکیب تک‌انحنایی و دوانحنایی)؛ ب) طاق‌های «خط و صفحه‌ای» (که بسته به ترتیبی یا غیرترتیبی بودن نظم خطوط یا صفحات خود شامل سه دسته است). در طاق‌های «صفحه‌ای»، پوسته طاق نقشی محوری و عمده دارد و عامل اصلی ایستایی و شکل طاق است. درحالی‌که در طاق‌های «خط و صفحه‌ای»، از نقش پوسته‌ها کاسته می‌شود و تویزه نقش اصلی در شکل دادن به طاق و ایستایی آن دارد تا حدی که این دسته طاق، بدون استفاده از تویزه‌های مقاطع قابل اجرا نیست. بدین ترتیب در این مقاله با توجه هم‌زمان و روشنند به مؤلفه‌های شکلی و سازه‌ای طاق‌ها در معماری ایران، آنها در یک چارچوب یکپارچه بازشناسی و معرفی می‌شوند. بهره‌گیری از این چارچوب ضمن معرفی جامع‌تر طاق‌ها می‌تواند ما را با مسائل پیش روی طراحان و سازندگان پوشش‌های منحنی مواجه کند و از این طریق پنجره‌ای برای اندیشیدن به طراحی آسمانه‌های نو بگشاید.

مقدمه: اهمیت دسته‌بندی طاق‌ها در معماری ایران

در معماری ایران اندام‌های منحنی‌شکلی که برای پوشاندن درگاه و فضا به کار می‌رود، با نام‌های مختلفی خوانده می‌شوند. صرف‌نظر از نام‌های تاریخی^۱ این اندام‌ها، که امروزه استفاده از آنها به چنین معنایی معمول نیست،^۲ دانشوران اندام منحنی پوشاننده درگاه را معمولاً «چَفَد»، «چَفْتَه»، «قوس» و «دور» و اندام منحنی پوشاننده دهانه را «طاق» می‌نامند. هرچند برای انتخاب واژه «طاق» وحدت نظر نسبی وجود دارد؛ انتخاب واژه مناسب برای اندام منحنی پوشاننده درگاه امری پرمناقشه است.^۴ هیچ‌یک از این واژه‌ها در لغت‌نامه دهخدا دقیقاً به معنای اندام پوشاننده درگاه ضبط نشده؛^۵ بلکه از مطالعات میدانی درباره دانش شفاهی معماری سنتی و مصاحبه با استادکاران معمار معاصر به‌دست



پشتوانه‌های معنایی این عنصر در فرهنگ معماری ایران دلالت دارد. این واژه مفهوم این پوشش‌ها را از سقف و سرپناهی که صرفاً تأمین‌کننده آسایش اقلیمی فضاست، به آسمان معنایی طراحان و باشندگان فضا ارتقا می‌دهد و استعداد آن را برای حمل معانی باطنی چون هستی، کیهان، افلاک، و آسمان طبیعی بازگو می‌کند. در متن کتیبه‌ها^۱ و نقوش تزئینی کارشده بر آسمانه‌ها^۲ و در متون ادبی و تاریخی فارسی^۳، قرائن زیادی وجود دارد که به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر چنین معانی باطنی دلالت دارد.

چنین است که طاق‌ها در معماری ایران کمتر رنگ تکرار می‌گیرند و با تنوع و غنایی خیره‌کننده در گستره‌ای از طرح‌های سازه‌ای و تزئینی ظاهر می‌شود. این تنوع چنان است که گویا همواره، و به‌ویژه در بناهای یادمانی، طاق‌ها از موضوعات کانونی طراحی هستند و مسابقه‌ای بی‌پایان برای خلق پوشش‌های طاقی تازه در صحنه معماری تاریخی ایران در جریان است. نمود طراحی متنوع و بدیع طاق‌ها را می‌توان در شبستان‌های مساجد جامع مشاهده کرد؛ فضاهایی که در آنها طاق‌ها در زمینه‌هایی کم‌وبیش مشابه و هم‌اندازه با طرح‌هایی گوناگون برپا شده‌اند؛ به‌طور مثال مسجد جامع اصفهان با در داشتن بیش از ۴۷۰ طاق از انواع مختلف، نمایانگر نمونه برجسته و موزه‌گونه از هنر طاق‌زنی در معماری ایران است.

موضوع دیگر ابهام در نقش سازه‌ای و تزئینی پوشش‌های طاقی در معماری ایران است. یکی از هنجارهای معمول در معماری اسلامی عناصری است که در ابتدا مبتنی بر الزامات سازه‌ای پدید می‌آیند و در گذر زمان، گاه با پالایش فرم‌ها، به شکل‌های تزئینی تبدیل می‌شوند؛ این امر موجب می‌شود که معمولاً ابهامی همیشگی درباره نقش اندام‌های سازنده بنا باقی بماند و مشخص نباشد که آیا آنها عنصری کاملاً تزئینی‌اند یا عملکردی سازه‌ای دارند؛ یا آنکه گاه مانند بسیاری از نمونه‌ها

آمده است. با توجه به این ناهمگونی، و همچنین تفاوت واژگان در لهجه‌ها و دگرگونی‌های زبانی در طول زمان، انتخاب یک واژه مشخص دشوار است. از این‌رو صرف‌نظر از قضاوت درباره درستی یا نادرستی هریک از این نام‌ها، در این نوشته از دو واژه «چفد» و «طاق»، که در بیان دانشوران این حوزه رواج بیشتری دارد، استفاده می‌شود. بر این اساس، واژه «طاق» مُعرفِ اندام منحنی پوشاننده فضا و واژه «چفد» مُعرفِ اندامی منحنی متشکل از یک یا چند کمان است که برای پوشاندن درگاه به کار می‌رود.^۴

نگاهی گذرا به پیشینه طراحی و ساخت این اندام گویای آن است که طاق‌ها در معماری ایران، در مقایسه با دیگر نقاط جهان، نقشی محوری و جایگاهی ویژه در طراحی فضا داشته‌اند. معمولاً فارغ از نوع بنا یا دوره‌بندی تاریخی و محدوده جغرافیایی، طاق عنصر بلامنازع فضاهای داخلی است و در مقایسه با دیگر عناصر سازنده فضا، سهم بسیار بیشتری در شکل دادن فضا دارد. این امر، به‌ویژه از قرون میانی دوران اسلامی به بعد، در آثار معماری نمودی چشمگیر دارد و به بخشی از زبان طراحی در معماری دوران اسلامی ایران تبدیل می‌شود. ابوالقاسمی مبحث پوشش در معماری ایرانی را اساس معماری و پیش‌اندیشیده‌ترین عامل مؤثر در شکل‌یابی بنا می‌داند و تأکید می‌کند که مسائل نیارشی، فنی، و اجرایی بر نوع پوشش کل ساختمان نیز تأثیر دارد و بنابراین اساسی‌ترین عامل شکل‌دهی به اندام‌های باربر و فضاهای معماری است.^۵ به بیان دیگر، در بیشتر آثار معماری تاریخی ایران، شکل‌گیری فضا از پوشش آغاز می‌شود و بر هنجارهای طراحی دیگر اجزا، مانند اندازه زمینه، قاب‌بندی جداره‌ها، موقعیت، و اندازه گشودگی‌ها، اثر می‌گذارد.^۶

وجه دیگر اهمیت طاق‌ها در معماری تاریخی ایران، معنای آنهاست. انتخاب واژه «آسمانه» برای پوشش‌های منحنی، بر

→ نیارش (تهران: گنج‌نام، ۱۳۹۷)، ۸۸-۸۹. استفاده از واژه «قوس» و «دور» در گفته‌ها و نوشته‌های استادکاران معمار معاصر مانند حسین لرزاده (مهنار رئیس‌زاده و حسین مفید/احیای هنرهای از یادرفته مبانی معماری سنتی در ایران به روایت استاد حسین لرزاده (تهران: مولی، ۱۳۷۴)، ۳. غلامرضا فرزانه محمدی و رحمت‌الله رضایت (هادی صفایی‌پور، روش‌شناسی فهم و تبیین مراجع طراحی معماران سنتی معاصر ایران) (دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۹۴)، ۱۲۵، ۱۷۶، ۱۸۴؛ حسین زمرشیدی (حسین زمرشیدی، طاق و قوس در معماری ایران (تهران: کیهان، ۱۳۷۳))، و اصغر شعراف (اصغر شعراف، گره و کاربردی (تهران: سبجان نور، ۱۳۸۵)) رواج دارد.

۵. در لغت‌نامه دهخدا واژه «چَفْت» به معنای چوب‌بندی که تاک انگور و بیارة کدو و امثال آن را بر بالای آن اندازند، ذکر شده است. این واژه همچنین مجازاً به معنای «تالار» و سقفی خمیده مانند طاق و آن معرفی شده است. به این ترتیب در این لغت‌نامه «چَفْت» به معنای اندام پوشاننده فضا و نه درگاه ضبط شده است. با وجود این، در فهرست واژه‌های مصوب فرهنگستان هنر، واژه «چَفْت» برای معرفی اندام منحنی پوشاننده درگاه استفاده شده است؛ انتخابی که به نظر می‌رسد با لغت‌نامه دهخدا و تألیفات دانشوران قبلی و به‌ویژه پیرنیا همخوانی ندارد.

عطف به این معنا در زبان انگلیسی arch و کمان‌های سازنده آن arc خوانده می‌شوند.

۷. علی عمرانی‌پور، هنر و معماری اسلامی: یادنامه دکتر لطیف ابوالقاسمی (تهران: سازمان عمران و بهسازی شهری، ۱۳۸۴)، ۳۶۲.

۸. به‌طور نمونه استاد نعمت‌الله رضایت نیز هماهنگی ابعاد فرش‌ها با اندازه دهانه را چنین تشریح می‌کند: «اندازه قالب ساخت تاق، بر اساس {واحد} زرع بود. به یاد دارم که هر سه زرع، ۱۲ سانت از سه متر بیشتر بود. ... {از آنجاکه} معماران طول قالب را سه زرع می‌گرفتند، ابعاد پشت‌به‌پشت ستون‌ها و اندازه عرض فرش‌ها هم همین مقدار بود» (نعمت‌الله رضایت، مسجد جامع اصفهان، مصاحبه توسط هادی صفایی‌پور، ۱۳۹۱/۵/۱۷، آرشیو شخصی مصاحبه‌کننده).

۹. متن چنین کتیبه‌هایی گاه آیات قرآنی است که بر آسمان و نور و ستارگان دلالت دارند، مانند کتیبه حاوی آیه نور (۳۵:۲۴) حک‌شده در سردر مقرنس مجموعه سلطان حسن قاهره یا شعر کتیبه سردر بنای درب امام اصفهان که چنین است: «کنایه است بدین دور گنبد افلاک / ... ببین به عین بصیرت که آن که ایوانش / گذشته بود ز کیوان چگونه شد در خاک» (گلرو نجیب‌اوغلو، هندسه و تزیین در معماری اسلامی / طومار توقایی)، ترجمه مهرداد قیومی بیدهندی (تهران: روزنه، ۱۳۷۹)، ۱۶۳ و ۱۶۶.

دارای نقشی ترکیبی می‌شوند.^{۱۲} این وضعیت تشخیص عناصر سازنده طاق و در نتیجه دسته‌بندی آنها را دشوار می‌کند.

این زمینه‌ها شناخت طاق‌ها در معماری ایران را به موضوعی گسترده و پیچیده تبدیل کرده و این امر باعث شده است که نتوان به‌سادگی اقسام طاق‌ها را در دسته‌هایی مشخص با مرزهای روشن و دقیق جای داد و به تصویری جامع و مانع از صورت‌های مختلف طاق در معماری ایران دست یافت. دستیابی به یک نظام یکپارچه، جامع و مانع، و متکی بر ویژگی‌های شکلی و سازه‌ای برای بازشناسی و دسته‌بندی طاق‌ها هدف اصلی در این مقاله است. برای این منظور، با بهره‌گیری از روش توصیفی - تحلیلی، پژوهش دانشوران قبلی در این زمینه را بررسی می‌کنیم و با ارزیابی انتقادی آنها در پی یافتن کاستی‌ها یا تعارض‌های آنها هستیم. در ادامه با روش استدلال منطقی، چارچوب تازه‌ای برای صورت‌بندی طاق‌ها در معماری تاریخی ایران پیشنهاد و با به‌کارگیری این چارچوب جدید، انواع طاق‌ها و مشخصه‌های آنها در معماری تاریخی ایران را به‌اختصار معرفی کنیم.

۱. پیشینه دسته‌بندی طاق‌ها در معماری تاریخی ایران

پیشینه این پژوهش را، بنا بر حوزه موضوعی مطالعات پیشین، می‌توان شامل دو دسته کلی شامل «مطالعات حوزه معماری تاریخی ایران» و «مطالعات حوزه نظام‌های سازه‌ای» دانست. در ادامه برای بهره‌گیری از این پیشینه و رسیدن به یک چارچوب جامع‌تر، ساختار و مبنای این دو دسته مطالعات را درمی‌یابیم.

۱.۱. مطالعات حوزه معماری تاریخی ایران

دسته نخست پیشینه شامل پژوهش‌هایی در حوزه مطالعات

معماری تاریخی ایران است. آندره گدار، مایرون بمنت اسمیت^{۱۳}، دانالد ویلبر، لیزا گلمبک^{۱۴}، محمدکریم پیرنیا، غلامحسین معماریان، و حسین زمرشیدی از جمله دانشورانی هستند که گاه در سایه مطالعاتی تاریخی یا سبک‌شناسانه به‌صورت غیرمستقیم و گاه در پژوهش‌هایی متمرکز بر شناخت طاق‌ها به‌صورت مستقیم، به بررسی و دسته‌بندی انواع طاق در معماری ایران پرداخته‌اند. در «جدول ۱» خلاصه‌ای از این انواع طاق در نگاه هریک از این دانشوران آمده است.

در میان این دانشوران، گدار با نگاهی کل‌نگرتر و موجز طاق‌ها را به پنج دسته آهنگ، گنبدی، چهاربخشی، خرپشته‌ای^{۱۵}، و مقرنس تقسیم می‌کند. او بسیاری از انواع پیچیده‌تر طاق (همچون طاق ترکین، کژاوه، و ...) را در نظر نگرفته است و از میان طاق‌های تویزه‌دار نیز تنها به نوعی خاص موسوم به خرپشته‌ای نظر دارد و دیگر انواع طاق‌های تویزه‌دار را بررسی نمی‌کند. پیرنیا همچون گدار دسته‌های کلی طاق آهنگ، کلبو (گنبدی)، چهاربخش، و طاق با تویزه را معرفی می‌کند؛ اما دسته‌بندی مفصل‌تری عرضه می‌کند و به زیردسته‌های بعضی از انواع طاق نیز می‌پردازد؛ به‌طور نمونه دو زیردسته کژاوه و خوانچه‌پوش را برای دسته طاق با تویزه می‌آورد، باین‌حال دسته‌بندی او نظامی روشن و یکپارچه ندارد؛ زیرا هرچند به نقش تویزه در دسته‌بندی می‌پردازد، اما تأکید او بر تویزه‌های محیطی است و جایگاه گونه‌هایی مثل ترکین، پتکانه، چهاردوری، طاق با باریکه‌طاق^{۱۶} در چارچوب دسته‌بندی او روشن نیست؛ هرچند با توجه به پیشینه پژوهشی او می‌دانیم که با این گونه‌ها نیز آشنایی دارد و حتی برخی را برای اولین بار معرفی کرده است.

اسمیت و معماریان در دسته‌بندی‌هایشان یک قدم جلوتر، متنوع‌تر، و دقیق‌تری هستند. چارچوب پیشنهادی این دو تا حد زیادی شبیه به هم است؛ اما تفاوت‌هایی در برخی از دسته‌ها

فصلنامه علمی معماری و شهرسازی؛ سال سی‌ونهم، پاییز ۱۴۰۴، شماره ۳، پیاپی: ۱۱۰ —————

چارچوبی نوین برای دسته‌بندی طاق‌ها در معماری تاریخی ایران: هادی صفایی‌پور

۱۰. به‌طور نمونه تزئینات رایج عصر تیموری به بعد، شامل شبکه‌ای از ستاره‌های چندضلعی است که بر سطوح پوشش‌های کاربندی یا مقرنس نقش بسته و می‌تواند دربردارندهٔ اشاراتی به آسمان طبیعی یا مثالین باشد. نجیب‌اوغلو در تفسیر نقوش کارشده در طومار توپکایی این موضوع را چنین شرح می‌دهد: «از میان نقش‌های هندسی، آنها که دارای ستاره یا شمسه‌اند بیشتر تداعی‌کنندهٔ آسمانند. شبکه دواپر هم‌مرکز مدارگونه‌ای که زیرنقش گره‌های ستاره‌ای است یادآور مدارات ستارگان است و شعاع‌های هم‌فاصله شمسه‌ها همچون پرتوهایی است که در آسمان پرستاره از ستارگان می‌تابد.» (همان، ۱۶۱).

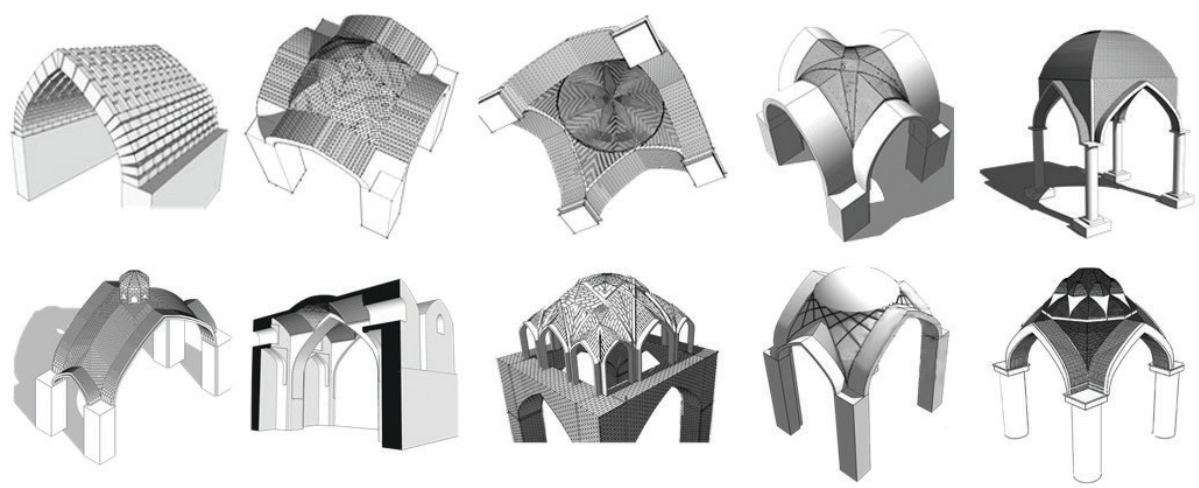
۱۱. به‌طور نمونه اصطلاحاتی چون «خیمهٔ دهر»، «چتر مینا»، «گنبد دهر»، «سقف مقرنس»، و «طاق مقرنس» در متون تاریخی فارسی بر معانی باطنی آسمانه دلالت می‌کند؛ موضوعی که قطعاً به تمامی آسمانه‌ها قابل تعمیم نیست؛ اما در بعضی برهه‌ها و بناها نمودی قابل توجه دارد.

جدول ۱. پیشینهٔ دسته‌بندی طاق‌ها، گردآوری و تدوین: نگارنده.

هست؛ به‌طور مثال اسمیت چهاردوری و کژاوه را در یک دسته با عنوان طاق‌های سه‌کنجی جای می‌دهد و کلنبو را در دسته‌ای جداگانه معرفی می‌کند؛ درحالی‌که معماریان کژاوه را دسته‌ای جداگانه می‌داند و چهاردوری را، با عنوان فرعی کلنبوی نوع دو، یکی از زیرشاخه‌های کلنبو می‌داند. معماریان طاق خوانچه‌پوش را جداگانه و اسمیت آن را ذیل دستهٔ

دانشور	مبنای دسته‌بندی	دسته‌ها
آندره گدار: گدار و دیگران، <i>آثار ایران</i> .	گدار انواع طاق را راه حل‌های فرمی مختلفی برای پوشاندن فضا می‌داند و در هر دسته بر اساس نمونه‌های تاریخی، سیر رسیدن به انواع راه حل‌های سازه‌ای انواع طاق را توصیف می‌کند. در این راستا به شیوهٔ اجرا و ویژگی‌های شکلی، سازه‌ای، و کاربردی طاق‌ها اشاره می‌کند.	آهنگ (tunnel vaults)، گنبدی (و مخروطی)، چهاربخش، خرپشته‌ای (نوعی از طاق با باریکه‌طاق*)، مقرنس.
مایرون بمنت اسمیت: <i>Smith, The Vault In Persian Architecture: A Provisional Classification, with Notes on Construction.</i>	اسمیت در هر دسته شکل و هندسهٔ نظری طاق، ساختار سازه‌ای، و نمونه‌های تاریخی آن طاق را شرح می‌دهد. او برای هر دسته زیرشاخه‌هایی معرفی می‌کند؛ مثلاً برای طاق توپزه‌دار زیرشاخه‌های طاق چهاربخشی توپزه‌دار، طاق با توپزه‌های متقاطع، طاق گنبدی توپزه‌دار را می‌آورد.**	آهنگ، ترکیب (cloister vaults)، چهاردوری (squinch vaults)، عرقچین سوار بر در معازه (calottes on pendentives) (کلنبو)، چهاربخشی (groined vaults)، توپزه‌دار (ribbed vaults)، ترکیبی (compound vaults)، استالاکتیت (stalactite vaults).
محمدکریم پیرنیا: پیرنیا، «چفدا و طاق‌ها».	پیرنیا طاق‌ها را به دوستهٔ کلی تقسیم می‌کند. در هر دسته هندسهٔ نظری و قابلیت‌های سازه‌ای و کاربردی آن نوع طاق را بیان می‌کند.	دستهٔ اول شامل آهنگ، کلنبو و چهاربخشی به‌همراه طاق‌های زیرمجموعهٔ آنهاست. دستهٔ دوم طاق و توپزه است که خود شامل کژاوه و خوانچه‌پوش است. طاق‌های دستهٔ دوم می‌تواند با انواع طاق‌های معرفی شده در دستهٔ اول نیز ترکیب شود. در ادامه انواع معاصرتر طاق همچون طاق قمی‌پوش*** را نیز معرفی می‌کند.
ویلبر و گلمبک: ویلبر، <i>معماری اسلامی ایران در دوره ایلخانان</i> ؛ ویلبر و دیگران، <i>معماری تیموری در ایران و توران</i> ؛ Golombek and Wilber, <i>The Timurid Architecture of Iran and Turan</i> , Vol. 1.	آنها در هر دسته به توصیف شکل انواع طاق بر اساس نمونه‌های تاریخی آن می‌پردازند و در خلال آن به قابلیت‌های کاربردی و سازه‌ای آن نوع طاق و در مواردی شیوهٔ اجرای طاق اشاره می‌کنند.	انواع طاق‌های دورهٔ ایلخانی و تیموری را در دسته‌های طاق ضربی، رومی، نیم‌گنبد، مقرنس، طاق با توپزه‌های متقاطع، خوانچه‌پوش جای می‌دهد.
معماریان: معماریان، <i>معماری ایرانی نیارش</i> ، ۱-۳۶۳.	در هر دسته شکل طاق، نظام انتقال نیرو، روش ساخت و نمونه‌های تاریخی آن طاق را شرح می‌دهد.	آهنگ، ترکیب، چهاربخش، کلنبوی نوع یک و دو (کلنبو و چهاردوری)، کژاوه، خوانچه‌پوش، طاق با باریکه‌طاق، پتکانه، و کاربندی.
زمرشیدی: زمرشیدی، <i>طاق و قوس در معماری ایران</i> ، ۳۳۶-۳۵۲.	به شرح آجرچینی و جزئیات شکلی چند گونه از طاق می‌پردازد. در برخی دسته‌ها به ویژگی‌های شکلی و در برخی دیگر به نحوهٔ اجرای طاق اشاره می‌کند.	چهارطاقی (چهاربخشی)، عرق‌چین، کاسه‌ای، ضربی، خفته‌راسته و تیه‌ای.

*طاق با باریکه‌طاقی که توپزه‌های آن چیدمانی عرضی و صلیبی دارند؛ چیدمانی شبیه گنبد تالار مدرسهٔ غیاثیهٔ خرگرد.
** بر اساس تعریفی که اسمیت از هر طاق عرضه کرده است، نام فارسی معادل طاق‌ها بر اساس نام‌های پیشنهادی پیرنیا برگزیده شده است.
*** قمی‌پوش از نظر هندسی یکی از انواع معاصرتر طاق آهنگ محسوب می‌شود.



12. C. Edwards and D. Edwards, "The evolution of shouldered arch in medieval Islamic architecture", *Architectural History*, no. 42 (1999): 68.

13. Myron Bement Smith

14. Lisa Golombek

۱۵. بر اساس تعریف گذار طاق خریشته‌ای نوعی طاق با باریکه‌طاق‌های صلیبی و شکلی گنبدی است (Andre Godard, "Voutes Iraniennes", In *Āthār-e Īrān (Annales du Service Archéologique de (L'Iran)*, IV (1949): 187-370

۱۶. در این دسته‌بندی طاق با تویزه متفاوت از طاق با باریکه‌طاق است. پیرنیا در مقاله‌اش نام دیگر طاق با تویزه را طاق و چشمه معرفی می‌کند؛ همچون طاق چشمه‌های سلسله‌وار در بازارها (پیرنیا، «چفدها و طاق‌ها»، ۹۲).

ت ۱. انواع طاق در دسته‌بندی معماریان: از چپ به راست، طاق‌های آهنگ، چهاردوری، کلنبو، چهاربخش، ترکیب، کژاوه، خوانچه‌پوش، طاق با باریکه‌طاق، کاربندی، و پتکانه، مأخذ: معماران، معماری ایرانی نیارش، ۱-۳۶۳.

جزء‌نگر است؛ مثلاً در گونه چهاربخشی، ابتدا شیوه آجرچینی این طاق را ضربی می‌داند و بعد در معرفی طاق ضربی، خفته‌راسته، و تیغه‌ای، دیگرام طاق آهنگ را تصویر می‌کند. همچنین از میان انواع گنبدی طاق تنها عرقچین و کاسه‌ای که شامل چند طاق ترکیب به هم چسبیده است را معرفی می‌کند.^{۱۹} در همه این دسته‌بندی‌ها طاق گهواره‌ای، چهاربخش، و طاق گنبدی یا زیرشاخه‌های آن (عرقچین، کلنبو، چهاردوری، و کژاوه) معرفی شده‌اند. طاق ترکیب را اسمیت و معماریان و طاق خوانچه‌پوش را پیرنیا، اسمیت، ویلبر، و معماریان معرفی کرده‌اند. طاق با تویزه‌های میانی یا یکی از زیرشاخه‌های آن نیز در همه دسته‌بندی‌ها، به‌جز زمرشیدی، آمده است. به‌این ترتیب، در این پژوهش‌ها گاه طاقی در هیچ دسته‌ای نمی‌گنجد و گاهی یک طاق را می‌توان در چند دسته متفاوت جای داد. این دسته از مطالعات معمولاً متکی بر مطالعه میدانی مصادیق متعدد است و از این‌رو دسته‌بندی‌های آنها با ویژگی‌های طاق‌ها در معماری ایران تناسب دارد؛ اما در اکثر آنها جای طراحی با چارچوبی روشن و روشمند برای دسته‌بندی طاق‌ها و دسته‌بندی بر اساس آنها خالی است. به‌همین علت، گاه این دسته‌بندی‌ها جامع و مانع نیست و گاه با وجود جامعیت، ملاک‌ها و مرزهای

دسته‌بندی‌های ویلبر و گلمبک برگزیده و محدودتر و متکی بر نمونه‌هاست و به‌همین علت از تنوع و جزئیات بیشتری برخوردار است؛ اما جامعیت دسته‌بندی‌های معرفی‌شده را ندارد؛ به‌طور مثال ویلبر طاق آهنگ را بر اساس انواع شیوه‌های آجرچینی دسته‌بندی می‌کند.^{۱۷} درحالی‌که از طرفی این شیوه‌های آجرچینی در انواع دیگر طاق نیز به کار می‌رود و از طرف دیگر ویلبر این شیوه‌ها را به‌صورت جامع معرفی نمی‌کند. بنابراین در اینجا نگاه جزئی‌نگر مانع از دستیابی به ساختاری جامع و مانع می‌شود. هرچند همین ریزینی موجب معرفی انواعی از طاق تویزه‌دار می‌شود که در دیگر دسته‌بندی‌ها به آنها کمتر پرداخته شده است.

گالدیری نیز نمونه‌های مختلف طاق‌های تویزه‌دار را معرفی می‌کند؛^{۱۸} اما به دسته‌بندی این نمونه‌ها نمی‌پردازد و ساختاری برای آنها معرفی نمی‌کند. این موضوع می‌تواند دلالتی بر این باشد که او همه طاق‌های با باریکه‌طاق را متعلق به یک دسته می‌داند و درعین حال پیچیدگی این طاق‌ها به او مجال دسته‌بندی جزئی‌تر را نمی‌دهد. از این‌رو نام او را در جدول پیشینه دسته‌بندی طاق‌ها نیاوردیم. دسته‌بندی زمرشیدی به دوره تاریخی خاصی محدود نیست و نگاه او در دسته‌بندی‌اش

فصلنامه علمی معماری و شهرسازی؛ سال سی‌ونهم، پاییز ۱۴۰۴، شماره ۳، پیاپی: ۱۱۰
چارچوبی نوین برای دسته‌بندی طاق‌ها در معماری تاریخی ایران: هادی صفائی‌پور

۱۷. ویلبر و دیگران، معماری تیموری در ایران و توران، ترجمه کرامت‌الله افسر و محمدیوسف کیانی (تهران: سازمان میراث فرهنگی کشور، ۱۳۷۴)، ۱۵۸-۱۶۱.

18. E. Galdieri, "Contributi Alla Conoscenza Delle Strutture a Nervature Incrociate", *Rivista degli Studi Orientali*, 57 (1983): 61-80.

۱۹. زم‌رشیدی، طاق و قوس در معماری ایران، ۳۳۶-۳۵۲.

۲۰. رولان بز‌نوال، فناوری تاق در خاور کهن (تهران: سازمان میراث فرهنگی کشور، ۱۳۷۹)، ۴۴.

ت ۲. دسته‌بندی شکل‌های سازه‌ای از دیدگاه انگل، مأخذ: هینو انگل، سیستم‌های سازه، ۳۳۱.

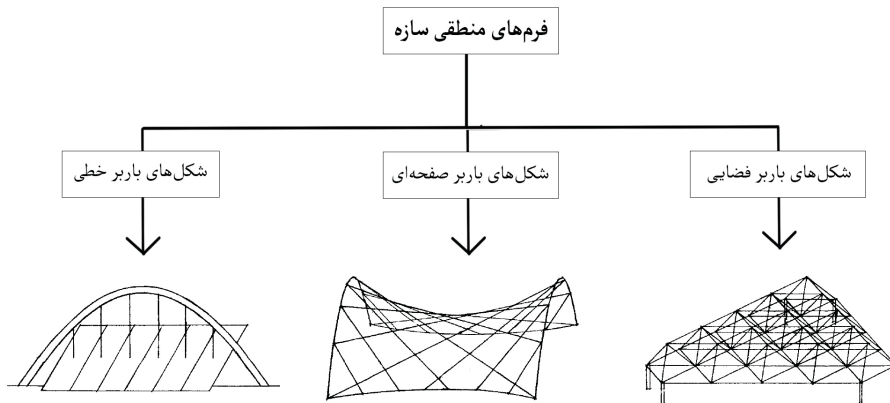
شکل می‌گیرد که نیروها در آن تنها به‌صورت فشاری منتقل می‌شوند و کشش و خمش در آن وجود ندارد.^{۲۴} بنابراین در حوزه مطالعات سازه‌ای، شکل و هندسه طاق و روش اجرای این شکل امری کلیدی برای تعیین رفتار سازه‌ای طاق‌ها و بنابراین عاملی تعیین‌کننده در مرزشناسی و دسته‌بندی طاق‌هاست.

هینو انگل در کتاب سیستم‌های سازه، انواع سیستم‌های سازه‌ای و رفتار سازه‌ای وابسته به آنها را بر مبنای رفتار سازه‌ای‌شان در ۶ دسته معرفی می‌کند.^{۲۵} از میان این دسته‌ها، انگل «سیستم‌های سازه‌ای با عملکرد شکلی» و «سیستم‌های سازه‌ای با عملکرد سطحی» را سازه‌هایی می‌داند که شکل هردوی آنها تابع منحنی طنابی‌اند و از این‌رو با رفتار سازه‌ای و شکل طاق‌ها نیز انطباق دارند. «سیستم‌های شکلی» شامل سازه‌های خطی قوسی‌شکل و «سیستم‌های سطحی»، شامل سازه‌های پوسته‌ای‌شکل استوانه‌ای و گنبدی هستند. همچنین او از نظر منطق سازه‌ای، سه شکل سازه‌ای خطی، صفحه‌ای، و فضایی را معرفی می‌کند (ت ۲). طاق‌های آجری دو شکل خطی و صفحه‌ای را شامل می‌شوند؛ به‌این‌ترتیب که هندسه توزیع‌های منحنی را «خط پیچیده» و هندسه طاق‌هایی با پوسته‌های آجری را «صفحات پیچیده» می‌خواند. او از نظر هندسی، سیستم‌های سطحی طاق‌ها را برگرفته از امتداد

روشنی برای دسته‌بندی ندارند. بنابراین ضمن استفاده از گونه‌های طاقی معرفی‌شده در این دسته از مطالعات، لازم است با بهره‌گیری از مطالعات مربوط به رفتار سازه‌های طاقی، ملاک‌هایی برای دسته‌بندی آنها مشخص شود.

۲.۱. مطالعات حوزه شناخت نظام‌های سازه‌ای

دسته دیگر پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه شناخت نظام‌های سازه‌ای انجام شده‌اند که فارغ از مصادیق طاق در معماری ایران، به مطالعه و دسته‌بندی انواع طاق‌ها اختصاص دارند. روش مشترک میان این دسته از مطالعات، دسته‌بندی طاق‌ها بر اساس رفتار سازه‌ای آنهاست. بر اساس این مطالعات، ساخت‌مایه‌های اصلی چفدهای باربر و طاق‌ها در معماری ایران مصالح بنایی شامل خشت، آجر، سنگ قلوه، و سنگ پاک‌بر هستند که با ملات به هم متصل می‌شوند. این ساخت‌مایه‌ها مقاومت خوبی در برابر فشار دارند؛ اما مقاومت رانشی، برشی، و خمشی آنها ضعیف یا ناچیز است.^{۲۰} برای حل این مشکل، باید شکل نیم‌رخ چفد به‌گونه‌ای باشد که مسیر انتقال نیروها بر اساس منحنی طنابی باشد و از یک‌سوم میانی سطح مقطع چفد عبور کند. بدین‌ترتیب، طاق‌ها راه حل سازه‌ای هستند که متناسب با بهره‌گیری از «فرم ساختمانی بهتر»^{۲۱} خلق شده‌اند؛ سازه‌هایی که رفتار تیرمانند ندارند و به مصالحی با مقاومت کششی بالا نیاز ندارد، راه حلی انقلابی در فن معماری که به جای «مقاومت مصالح» بر «مقاومت شکل» تأکید دارد و بر اساس آن «مقاومت بنا از شکل بخشیدن به ماده به‌دست می‌آید، شکل بخشیدنی منطبق با بارهایی که این شکل باید تحمل کند».^{۲۲} به‌این‌ترتیب اگر شکل نیم‌رخ چفد با شکل «منحنی طنابی»^{۲۳} منطبق باشد، نیروها در امتداد منحنی چفد حرکت می‌کنند. در صورتی که مسیر نیروها از یک‌سوم میانی سطح مقطع بلوک‌های سازنده عبور کند، چفدی پایدار



۲۱. مهدی فرشاد، تاریخ مهندسی در ایران (تهران: میرام، ۱۳۷۶)، ۳۹۹.

۲۲. بزئوال، فناوری تاق در خاور کهن، ۳۷.

۲۳. بسته به شرایط بارگذاری روی یک کابل معلق، به‌طور طبیعی، کابل شکل‌های متفاوتی به خود می‌گیرد. این شکل به «منحنی طنابی» یا «منحنی زنجیره‌ای» کابل موسوم است. متناظر با هر «منحنی طنابی» می‌توان چفدی با فرم معکوس با آن منحنی برپا کرد. در چنین چفدی نیروی خمشی ایجاد نمی‌شود و فقط تحت فشار خواهد بود (فولر مور، درک رفتار سازه‌ها (تهران: دانشگاه تهران، ۱۳۸۲)، ۱۸۳.

۲۴. همان، ۱۸۴.

D.H. Gye, "Arches and Domes in Iranian Islamic Buildings: An Engineer's Perspective", *Journal of the British Institute of Persian Studies*, vol. 26, no. 1 (1988): 136.

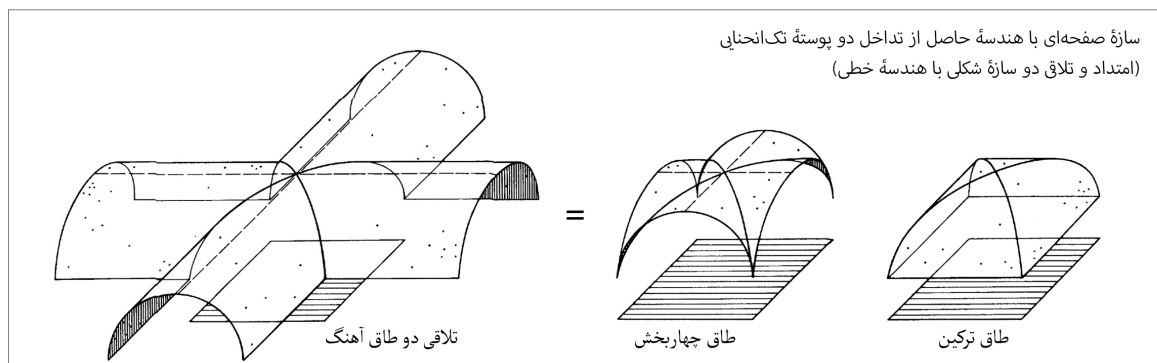
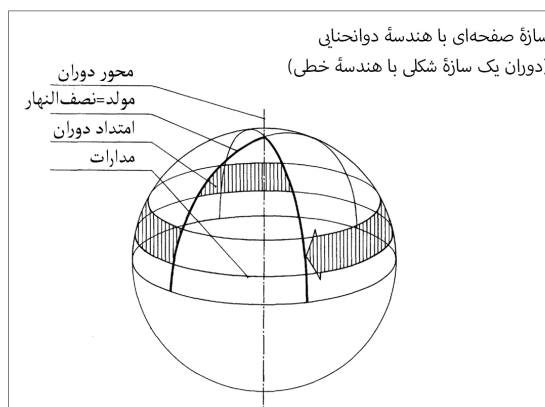
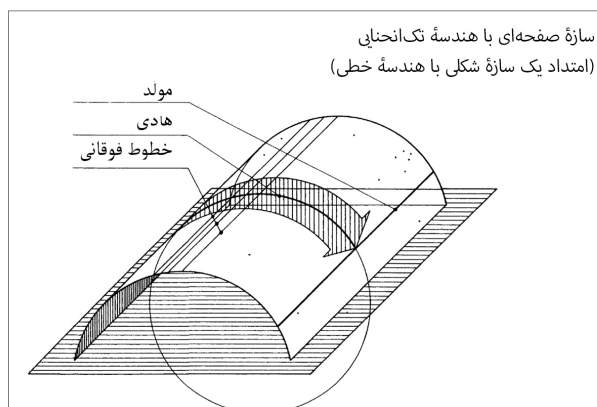
۲۵. این ۶ دسته عبارت‌اند از: سیستم‌های سازه‌ای با عملکرد شکلی، برداری، مقطعی، سطحی، ارتفاعی، و پیوندی.

ت ۳. هندسه سازه‌های صفحه‌ای تاق‌ها از دیدگاه انگل، مأخذ: همان، ۱۳۳ و ۳۴۲-۳۴۴.

یا دوران یک یا چند سیستم شکلی می‌داند و آنها را بر این اساس در سه دسته جای می‌دهد: «پوسته‌های تک‌انحنایی»^{۲۶} یا «گهواره‌ای»، پوسته‌های «دوانحنایی یا گنبدی»^{۲۷}، یا پوسته‌های حاصل از تداخل دو پوسته تک‌انحنایی (ت ۳).^{۲۸} مین‌استون نیز در کتاب خود، تاق را به دو نوع پایه، پوسته‌های تک‌انحنایی و دوانحنایی، تقسیم می‌کند که به‌ترتیب به پوسته‌های گهواره‌ای و گنبدی شکل دلالت دارد (ت ۴).^{۲۹} او این دو شکل پایه را مبنای دسته‌بندی تاق‌ها قرار می‌دهد و دیگر تاق‌ها که مهم‌ترین آنها تاق چهاربخشی و تاق‌های تویزه‌دار^{۳۰} است را ترکیبی از این شکل می‌داند. به این ترتیب مین‌استون تاق‌ها را در سه دسته تاق آهنگ، تاق گنبدی،

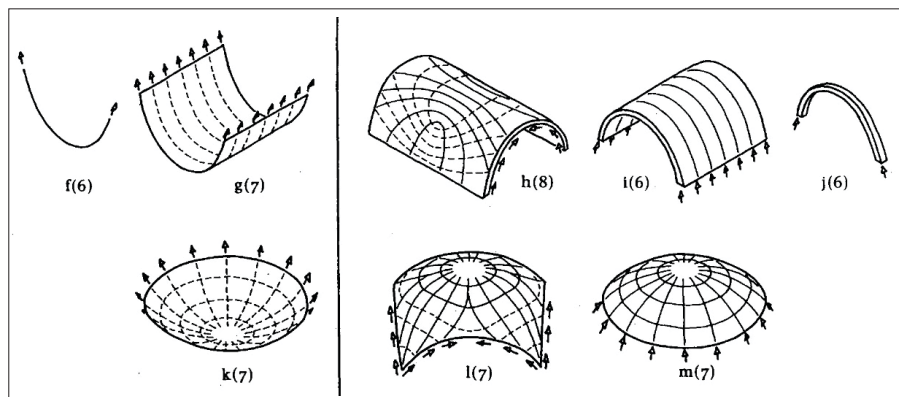
و تاق‌های ترکیبی (چهاربخش و تویزه‌دار و ترکیب) تقسیم می‌کند.^{۳۱}

سنداکر دسته‌بندی‌ای را صحیح می‌داند که هردو عامل شکل و سازه را به‌صورت هم‌زمان در نظر گیرد و بر این اساس مؤلفه‌ای موسوم به «شکل سازه‌ای»^{۳۲} را برای دسته‌بندی سازه‌ها معرفی می‌کند. سنداکر شکل سازه‌ای را به دو مرتبه «شکل سازه‌ای کلی»^{۳۳} و «شکل سازه‌ای جزئی»^{۳۴} تقسیم می‌کند و در امر دسته‌بندی، اولویت را با شکل سازه‌ای کلی می‌داند.^{۳۵} او «شکل سازه‌ای کلی» را مؤلفه‌ای می‌داند که سازه‌ها را بر اساس تویزه هم‌زمان به اندام‌های اصلی سازنده نظام سازه‌ای، هندسه ترکیب این اندام و شکل کلان سازه، و نه

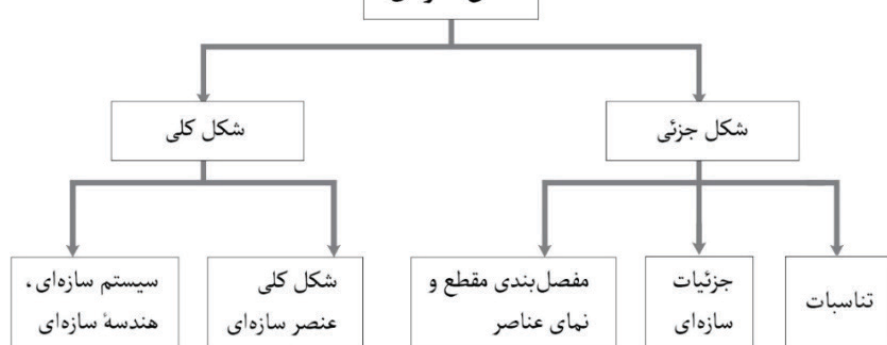


ت ۴ (بالا). شکل‌های سازه‌ای اولیه طاق‌ها از دیدگاه مین‌ستون. خط‌های ممتد نمایانگر بارهای هم‌ارز یا گران‌ش ساده یا واکنش تکیه‌گاه‌ها و خطوط نقطه‌چین نمایانگر تنش‌های عمده است، مأخذ: Mainstone, *Developments in Structural Form*, 86.

ت ۵ (پایین). مراتب شکل سازه‌ای. مأخذ: Sandaker, *On the Span and Space: Exploring Structures in Architecture*, 37



شکل سازه‌ای



با نگاهی جزئی‌نگر (صرفاً ریخت‌شناسانه یا سازه‌ای یا ساختمانی) دسته‌بندی می‌کند (ت ۵).^{۳۶} در این ساختار، ویژگی‌های شکلی طاق تنها در صورتی در دسته‌بندی منظور می‌شوند که بر رفتار سازه‌ای آن و بر جریان اصلی انتقال نیرو در آن مؤثر باشند.

مین‌استون و انگل نیز به هردو عامل سازه و شکل توجه دارند و می‌توان این معیار «شکل سازه‌ای کلی» را به دسته‌های آنها نیز نسبت داد؛ با این حال به نظر می‌رسد مین‌استون عامل سازه را به اندازه شکل و هندسه در دسته‌بندی‌ها دخیل نمی‌کند؛ زیرا در مورد طاق‌های توپزه‌دار، آنها را با قطعیت از طاق‌های پوسته‌ای تفکیک نکرده است. مطابق تعریف سنداگر، هر دسته باید تنها بر یک نوع «شکل سازه‌ای کلی» دلالت کند. پس نمی‌توان طاق‌های پوسته‌ای را با طاق‌های حاصل از ترکیب دو نظام پوسته‌ای و خطی در یک دسته قرار داد؛ به‌طور نمونه، طاق گهواره‌ای با توپزه‌های محیطی با طاق گهواره‌ای بدون توپزه رفتار سازه‌ای متفاوتی دارند؛ درحالی‌که مین‌استون همه اقسام طاق گهواره‌ای را در یک دسته جای داده است.^{۳۷}

همچنین مین‌استون همه انواع طاق چهاربخشی، ترکیب و توپزه‌دار را در یک دسته طاق‌های ترکیبی قرار داده است و بدین ترتیب طاق با توپزه‌های میانی را از طاق چهاربخش جدا نمی‌کند. او در توضیحات این دسته، تنها توپزه‌های طاق‌های چهاربخشی اروپا را توپزه‌های سازه‌ای و برابر می‌داند و معتقد است در طاق‌های گنبدی‌شکل که در ایران رواج دارند، توپزه تنها برای قالب‌بندی به کار می‌رود و بنابراین دسته جداگانه‌ای را به خود اختصاص نمی‌دهند؛^{۳۸} درحالی‌که از دیدگاه پیرنیا، طاق‌های توپزه‌دار در ایران گونه مستقلی هستند که در آن توپزه‌ها نقش اصلی انتقال بار را دارند و بارها را به‌صورت خطی به ستون‌های دو طرف خود وارد می‌کنند.^{۳۹} این موضوع با دیدگاه انگل نیز مطابقت دارد. انگل به‌طور خاص به طاق‌های آجری توپزه‌دار نپرداخته است؛ اما توپزه‌های قوسی‌شکل و

26. singly-curved
27. doubly-cured
۲۸. هینو انگل، سیستم‌های سازه (تهران: کارنگ، ۱۳۷۷)، ۳۴۲-۳۴۴.
29. R.J. Mainstone, *Developments in Structural Form* (Oxford: Taylor and Francis Group, 1998), 115-133.
30. groined and ribbed vaults
31. Ibid.
32. structural form
33. global structural form

ت عر دسته‌بندی طاق‌ها بر اساس نحوه ترکیب توپزه‌ها، ترسیم: نگارنده.

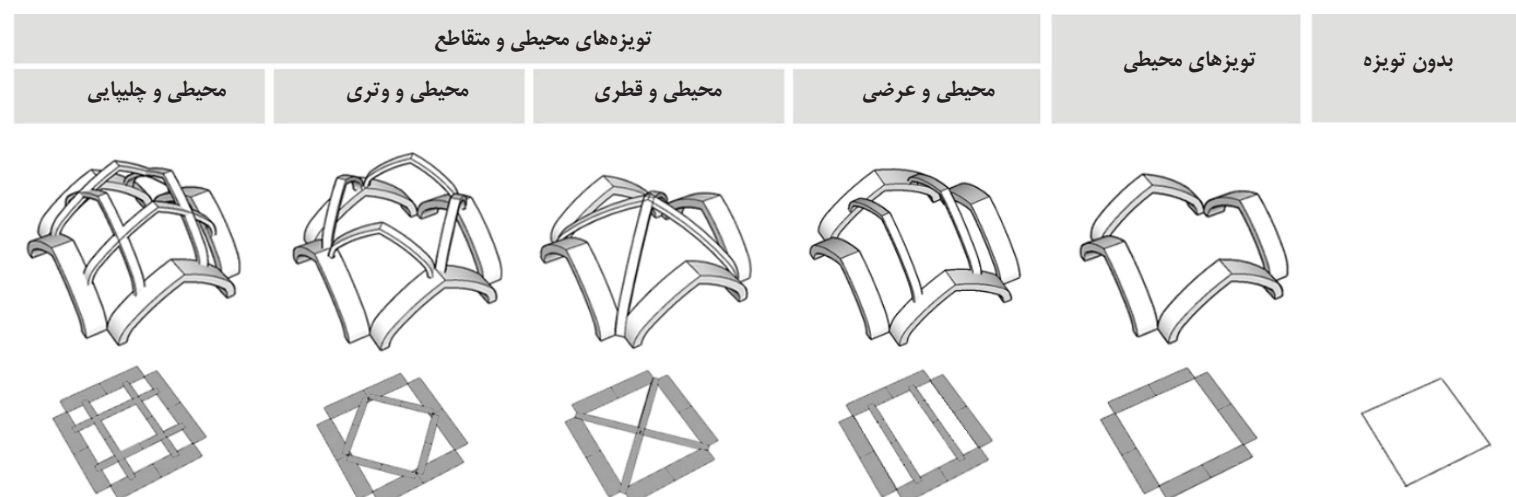
نوبن و به‌اختصار انواع طاق‌ها و مشخصه‌های آنها را معرفی می‌کنیم.

۲. عرضه چارچوبی نوبن برای دسته‌بندی طاق‌ها

با مرور انتقادی دو دسته مطالعات پیشین می‌توان چارچوب تازه‌ای برای دسته‌بندی طاق‌ها تدوین کرد. چارچوب دسته‌بندی جدید و از منظر مفاهیم (در مقیاس کلان) وام‌دار مطالعات دسته دوم و به‌ویژه مفهوم «شکل‌سازهای کلی»^{۴۰} سنداگر است و از منظر مصادیق (در مقیاس خرد) بر یافته‌های مطالعات دسته اول و به‌ویژه گونه‌های متنوع معرفی‌شده از سوی پیرنیا و اسمیت و معماریان تکیه دارد. بر اساس مطالعات دسته دوم، طاق‌ها را می‌توان بر دو مبنای (۱) حضور و موقعیت عناصر سازه‌ای و (۲) شکل عناصر سازه‌ای دسته‌بندی کرد. بر مبنای عناصر سازنده، طاق‌های آجری از دو عنصر سازه‌ای اصلی، شامل «پوسته‌ها»^{۴۱} و «توپزه‌ها»^{۴۲}، تشکیل شده‌اند. پوسته‌های آجری در همه طاق‌ها وجود دارند؛ اما استفاده از توپزه‌ها منحصر

به گروهی از طاق‌هاست. در مرتبه بعدی، بر اساس مطالعات دسته نخست، وجود یا فقدان توپزه‌ها و نیز نحوه ترکیب آنها با یکدیگر و با پوسته‌ها جریان انتقال بار و رفتار سازه‌ای طاق‌ها را تعیین می‌کند (ت ۶). از این منظر، می‌توان طاق‌ها را در سه دسته جای داد: (۱) طاق‌ها با پوسته‌های آجری و بدون توپزه، (۲) طاق‌ها با پوسته‌های آجری و توپزه‌های محیطی، (۳) طاق‌ها با پوسته آجری و توپزه‌های محیطی و متقاطع.

از سوی دیگر، شکل پوسته‌های آجری به‌نحو دیگری رفتار سازه‌ای طاق را تعیین می‌کند. «شکل‌سازهای کلی» این پوسته‌ها، به پنج دسته تقسیم می‌شود: (۱) پوسته تک‌انحنایی (طاق آهنگ)، (۲) پوسته دوانحنایی (طاق‌های کلبو، چهاردوری، و کژاو)، (۳) پوسته‌های متقاطع و ترکیبی همچون: (۴) ترکیبی پوسته تک‌انحنایی (طاق‌های چهاربخش و ترکیب)، (۵) ترکیبی از پوسته‌های تک‌انحنایی و دوانحنایی (طاق خوانچه‌پوش)، (۶) ترکیبی از بریده‌هایی از طاق‌های تک‌انحنایی و دوانحنایی برای پوشاندن دهانه‌های بین شبکه‌ای از توپزه‌ها (طاق‌های کاربردی، پتکانه، و طاق با باریکه‌طاق) (ت ۷). دسته آخر لزوماً



34. local structural form

35. B.N. Sandaker, *On the Span and Space: Exploring Structures in Architecture* (Oxfordshire: Routledge, 2008), 33-36.

36. Ibid, 33-37.

۳۷. البته خود او نیز به نقش توپزه‌ها در شکل‌گیری تفاوت‌هایی در رفتار سازه‌ای پوسته‌ی طاق اشاره می‌کند و برای تفکیک دو نوع نظام انتقال نیرو در پوسته‌های گهواره‌ای و گنبدی (ت ۴) علت این تفاوت را تفاوت در تکیه‌گاه‌های پوسته می‌داند؛ مثلاً طاق A طاق آهنگی است که تنها بر دیوارهای زیرین تکیه دارد؛ اما طاق h علاوه بر دیوارهای دو طرف، بر دیوار یا توپزه‌ی انتهایی طاق نیز تکیه دارد؛ اما با وجود اشاره به این موضوع، طاق پوسته‌ای توپزه‌دار و بدون توپزه را در دو دسته جداگانه قرار نمی‌دهد.

38. Mainstone, *Developments in Structural Form*, 131.

۳۹. پیرنیا اشاره می‌کند که به‌دلیل باربری توپزه‌ها، در هنگام اجرای طاق‌های توپزه‌دار، دیوار میان توپزه‌ها نباید و نمی‌تواند با خود توپزه هم‌ضخامت باشد و بنابه نیاز می‌تواند خالی یا مشبک شود؛ زیرا معماران به‌تدریج متوجه شدند اگر ستون‌های زیر توپزه‌ها و دیوار میان آنها به یک ضخامت اجرا شوند، به‌دلیل اختلاف در میزان باربری و در نتیجه اختلاف در میزان نشست به داخل زمین، میان ستون و دیوار ترک ایجاد می‌شود (پیرنیا، «چفدها و طاق‌ها»، ۹۲).

طاق‌های بدون توپزه معمولاً شکل ساده‌ای نیز دارند و تنها با پوسته‌های تک‌انحنایی (طاق آهنگ^{۴۵} که گهواره‌ای یا لوله‌ای نیز خوانده می‌شود)^{۴۶} یا پوسته‌های دوانحنایی (چهاردوری^{۴۷} و کلنبو^{۴۸}) ساخته شده‌اند. امروزه این طاق‌ها در آثار به‌جامانده از سازه‌های طاقی نخستین^{۴۹} و در معماری بومی سکونتگاه‌های روستایی دیده می‌شود.^{۵۰}

۲.۲. طاق‌ها با توپزه‌های محیطی

این دسته طاق‌ها از دو عنصر اصلی توپزه و پوسته‌ی طاقی تشکیل شده‌اند؛ به‌نحوی که توپزه‌ها بر روی اضلاع قاعده‌ی طاق قرار می‌گیرند و سطح میان آنها با پوسته‌های آجری پر می‌شود. در این ترکیب سازه‌ای، بارها، نه صرفاً با یک پوسته‌ی یکپارچه، بلکه با مشارکت مجموعه‌ای از توپزه‌های باربر محیطی به زمین منتقل می‌شود.^{۵۱} در نتیجه نقش سازه‌ای پوسته‌ی آجری و ضخامت آنها کمتر و آزادی آنها در آفرینش فرم و فضا بیشتر می‌شود. بدین ترتیب طاق‌های با توپزه‌های محیطی از پوسته‌هایی با اشکال متنوع‌تر و پیچیده‌تر برخوردارند. به‌جز پوسته‌های تک‌انحنایی (طاق آهنگ) و دوانحنایی (کلنبو و چهاردوری) که در دسته‌ی نخست به کار می‌روند، پوسته‌های دوانحنایی پیچیده‌تر (کژاوه)، پوسته‌های تک‌انحنایی مضاعف (چهاربخش^{۵۲} و ترکیب^{۵۳})، و پوسته‌های ترکیب تک‌انحنایی و دوانحنایی (خونچه‌پوش) در این دسته طاق به کار می‌روند.

۱.۲.۲. طاق آهنگ

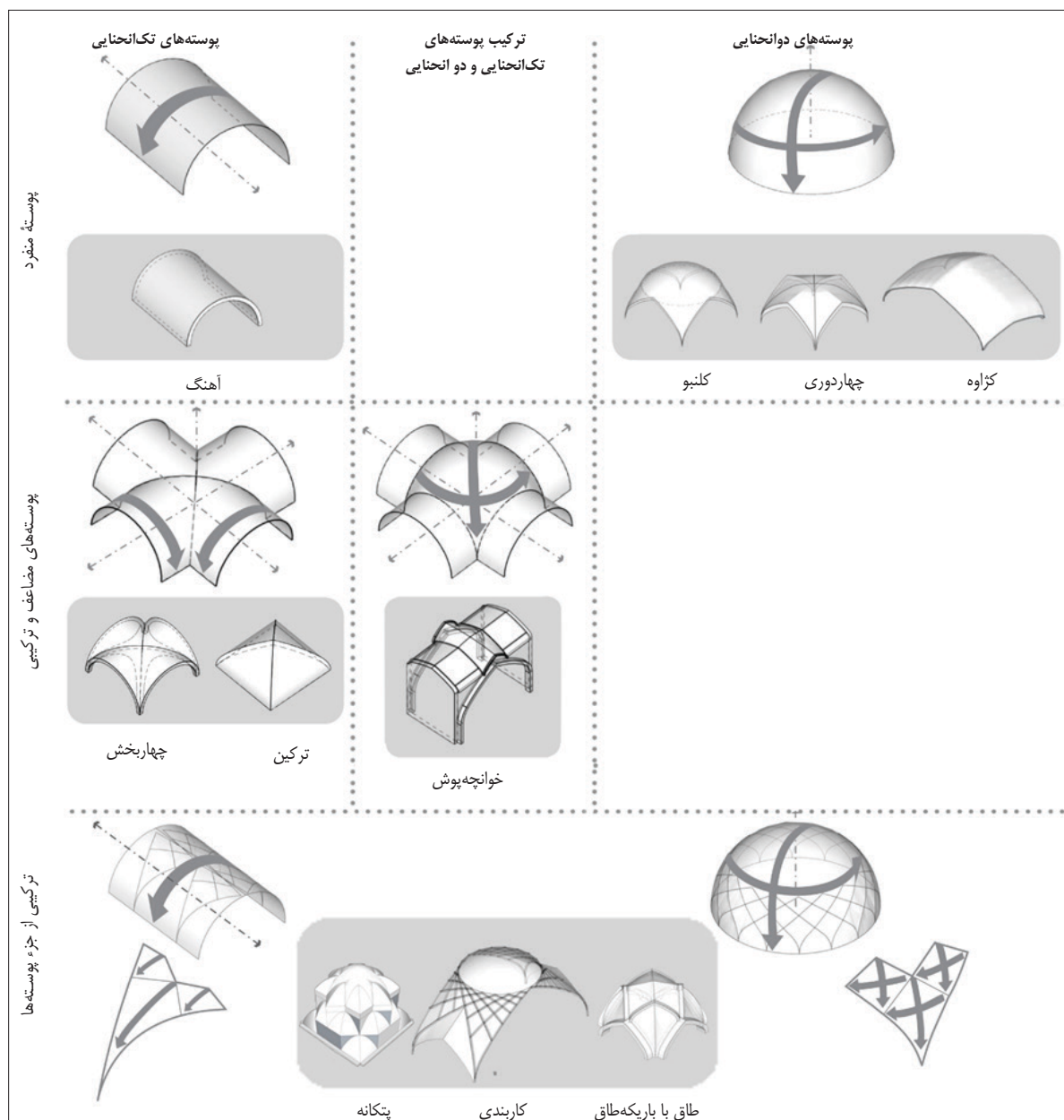
هندسه‌ی نظری این طاق نتیجه‌ی امتداد یک چفد در راستای محور افقی است که آن را هندسه‌ی سطحی تک‌انحنایی می‌نامیم. این هندسه کشیدگی طولی و تأکید صریح در راستای محور طولی این طاق را به گزینه‌ی مناسبی برای پوشش فضاهای کشیده، جهت‌دار، و باشکوه تبدیل می‌کند.^{۵۴} در طاق‌های آهنگ با

دارای توپزه‌های متقاطع است؛ اما چهار دسته‌ی پیش از آن ممکن است با یا بدون توپزه اجرا شوند. به عبارت دیگر، اندام چهار دسته‌ی اول صفحات پوسته‌ای هستند؛ اما در دسته‌ی پنجم ترکیبی از خط و صفحه شکل سازه‌ای طاق را تشکیل می‌دهد. پیوند این دو مبنای دسته‌بندی ساختاری نوین برای بازشناسی انواع طاق در معماری تاریخی ایران را فراهم می‌کند؛ ساختاری که هم‌زمان به دو مؤلفه «وجود عناصر سازه‌ای و نحوه‌ی ترکیب آنها» و «شکل عناصر سازه‌ای» نظر دارد و انواع طاق‌های شناخته‌شده را بر مبنای رفتار سازه‌ای‌شان دسته‌بندی می‌کند. برای فهم بهتر، ابتدا انواع گونه‌های طاقی در معماری ایران را بر اساس مؤلفه‌ی اول در سه گونه «طاق‌های بدون توپزه»، «طاق‌ها با توپزه‌های محیطی»، و «طاق‌ها با توپزه‌های محیطی و متقاطع» معرفی و سپس چگونگی مؤلفه‌ی دوم را در هریک از این دسته‌ها بررسی می‌کنیم. تنوع شکل و سازه‌ی طاق‌های به‌کاررفته بسیار است و نام‌گذاری آنها تابع وحدت رویه‌ای نیستند. در این نوشتار نام‌گذاری طاق‌ها با تکیه بر آراء پیرنیا و معماریان است؛^{۴۳} اما برای هر طاق نام‌ها و تعاریف متناظر موجود در پیشنهاد‌های دیگر دانشوران را نیز بررسی کرده‌ایم.

۱.۲.۱. طاق‌های بدون توپزه

ساخت طاق‌های بدون توپزه در معماری ایران به زمانی بازمی‌گردد که پوشش‌های منحنی به‌صورت توده‌هایی یکپارچه و جسیم از مصالح بنایی ساخته می‌شدند و صورتی بدوی و اولیه داشتند. نبود توپزه در این دسته طاق‌ها باعث می‌شد که اولاً پوسته‌ها به‌مثابه‌ی عناصر اصلی سازه‌ای بسیار قطور باشند و ثانیاً جرزهای نگهدارنده‌ی آنها بسیار سست‌تر باشد و تعبیه‌ی گشودگی در آنها چندان مقدور نباشد.^{۴۴} بدین ترتیب برخوردار نبودن از توپزه‌ها را می‌توان نوعی محدودیت برای چنین سازه‌هایی به حساب آورد.

تویزه‌های محیطی، وجود تویزه‌ها موجب کاهش نقش سازه‌ای پوسته‌ها و در نتیجه تنوع در روش‌های اجرا می‌شود.^{۵۵}



40. global structural form

41. shells

42. ribs

۴۳. پیرنیا، «چفدها و طاق‌ها»، ۱۴۶؛ معماریان، معماری ایرانی نیارش.

۴۴. بزنیوال، فناوری تاق در خاور کهن، ۷۰؛ معماریان، معماری ایرانی نیارش، ۱۳۸.

45. barrel vault / tunnel vault

۴۶. پیرنیا، «گنبد در معماری ایران»، اثر، ش. ۲۰ (زمستان ۱۳۷۰): ۵۸.

47. squinch vault

48. domical vault

۴۹. بزنیوال، فناوری تاق در خاور کهن، ۳۷۳-۳۸۰.

۵۰. همه این گونه‌ها به همراه تویزه‌های محیطی نیز به کار می‌روند. بنابراین در بخش طاق با تویزه‌های محیطی این طاق‌ها را معرفی می‌کنیم.

ت ۷. طاق‌ها بر اساس هندسه پوسته‌ها (ردیف‌ها) و نحوه ترکیب پوسته‌ها (ستون‌ها) به پنج دسته تقسیم می‌شوند. در خانه‌های بالا هندسه نظری آن دسته و در ردیف پایین طاق‌هایی که برگرفته از آن هندسه شکل می‌گیرند، معرفی شده‌اند. ترسیم: نگارنده.

51. Mainstone, *Developments in Structural Form*, 13;

بر اساس این تعریف دسته دوم طاق‌ها را می‌توان تسامحاً با آنچه «طاق و تویزه» یا «طاق و چشمه» خوانده می‌شود، یکسان دانست.

52. groin vault

53. cloister vault

۵۴. پیرنیا، «گنبد در معماری ایران»، ۵۸؛ معماریان، *معماری ایران نیارش*، ۱۴۳.

55. F. Tehrani, et al., "The Technology of Qomi-poosh Vaults in Iranian Traditional Architectur", *Armanshahr Architecture & Urban Development*, no. 8 (2012): 36.

۵۶. این تعریفی مقدماتی مربوط به طاق‌های ترکیب با چهار ترک با قاعده مربع است؛ اما این طاق می‌تواند با شش یا هشت ترک و یا با قاعده دایره نیز اجرا شود، حتی قاعده مربعی طاق می‌تواند به جای چهار دیوار، بر چهار تویزه بنشیند. همه اینها می‌تواند تعریف طاق ترکیب را دستخوش تغییر کند.

۵۷. معماریان، *معماری ایران نیارش*، ۱۷۴.

۵۸. ایده هم‌خانواده دانستن این طاق کلبو و چهاردوری از دکتر معماریان است. ایشان بر این اساس طاق چهاردوری را «کلبوی نوع ۲» نیز می‌خواند (معماریان، *معماری ایرانی نیارش*، ۲۰۸). در اینجا طاق کژاوه نیز به این خانواده اضافه شده است.

۲.۲.۲. طاق‌های چهاربخش (تاژ) و ترکیب

هندسه نظری این دو طاق نتیجه تلاقی دو صفحه تک‌انحنایی عمودبرهم است. با این تفاوت که در طاق ترکیب پوسته‌ها از رأس تا تراز پاکار و در امتداد چفدهای قطری طاق کشیده می‌شود؛ حال آنکه در طاق چهاربخش پوسته‌ها، به جای چفدهای قطری، در راستای محور افقی میانی دهانه امتداد می‌یابند و به چفدی واقع در صفحه قائم بر اضلاع قاعده ختم می‌شوند.^{۵۶} تلاقی دو سطح تک‌انحنایی باعث می‌شود که در این دو طاق، مرکزگرایی و تأکید بر محور عمودی میانی دهانه تقویت شود. پایین بودن تراز لبه‌های خارجی طاق ترکیب باعث می‌شود که استقلال فضایی بیشتر و پیوستگی فضایی آن با فضاهای مجاور کمتر باشد. در مقابل، طاق چهاربخش بر چهارسو تأکید فضایی دارد و وقتی چندین طاق چهاربخش در کنار هم قرار می‌گیرد، این ویژگی تقویت می‌شود و فضایی لایه‌لایه و پیوسته را شکل می‌دهد. بدین ترتیب فضای زیر طاق در محل تقاطع چفدهای قطری بر سکون و در امتداد محورهای متعامد میانی بر حرکت و گسترش تأکید دارد. تفاوت دیگر دو طاق هندسه سطح پستی آنهاست. درحالی که سطح محدب پشت طاق ترکیب در یک نقطه به پایان می‌رسد، سطح پشت طاق چهاربخش به دو محور متعامد ختم می‌شود که امکان ایجاد یک اشکوب بر بالای طاق را فراهم می‌کند.^{۵۷}

۳.۲.۲. طاق‌های کلبو، چهاردوری، و کژاوه

طاق‌های کلبو، چهاردوری، و کژاوه، هر سه صفحاتی دوانحنایی دارند. طرح این طاق‌ها برآمده از یک راه حل سازه‌ای مشترک است؛ یعنی پوشاندن زمینه‌های مربع (کلبو)، نزدیک به مربع (چهاردوری)، و مستطیل کشیده (کژاوه) با آسمانه‌ای گرد.^{۵۸} در طاق کلبو تحقق این ایده با یک مسئله سازه‌ای - زیبایی‌شناسانه روبه‌روست: با قرارگیری آسمانه گرد بر قاعده مربع، چهار حفره

در گوشه‌ها ایجاد می‌شود که هم برای انتقال بار و هم از نظر شکلی نیاز به ترفندی ویژه دارد. این مسئله، با خلق یک اندام واسط، یعنی گوشه‌سازی، حل می‌شود. پس طاق کلبو سه اندام اصلی دارد: الف) تویزه‌های محیطی، ب) پوشش گرد موسوم به عرق‌چین، پ) گوشه‌سازی.^{۵۹} کلبو به‌خاطر تقارن مرکزی‌اش، در برابر بارهای ثقلی و زلزله مقاوم است،^{۶۰} اجرایی ساده دارد، و در نتیجه گونه‌ای بسیار رایج و کارآمد در معماری ایران است. تفاوت کلبو و چهاردوری در منطقه انتقال طاق است. در چهاردوری از آنجا که زمینه کشیده‌تر از مربع است، نمی‌توان دایره قاعده عرق‌چین را بر آن نشانند. در نتیجه راه حل آن ترکیب کردن عرق‌چین و منطقه انتقال است. به این صورت که زمینه با دو خط که میانه جرزها را به هم وصل می‌کند به چهار قسمت تقسیم و در هر قسمت یک لوزی منحنی^{۶۱} اجرا می‌شود.^{۶۲}

طاق کژاوه «از حرکت دادن یک چفد کوچک‌تر بر روی یک چفد بزرگ‌تر به دست می‌آید». به بیان دیگر کژاوه همان چهاردوری است، اما با تناسباتی کشیده‌تر؛^{۶۳} امری که موجب می‌شود الگوی انتقال بار در آنها متقارن نباشد. کاربرد کژاوه همچون طاق آهنگ در زمینه‌ها کشیده است؛ اما با سه تفاوت عمده: نخست آنکه، طاق آهنگ تنها در عرض دهانه تویزه دارد و از این رو بار طاق بر سرتاسر دیوارهای جانبی وارد می‌شود. از این رو امکان تعبیه گشودگی‌های بزرگ در این دیوارها نیست؛ درحالی که در طاق کژاوه، وجود تویزه‌های اصلی گشودگی‌ها را بیشتر و ارتباط گشایش فضایی در اضلاع جانبی زمینه را ممکن می‌کند. دوم آنکه حضور تویزه‌های اصلی از نقش سازه‌ای پوسته آجری می‌کاهد و در این حالت نیز می‌توان در پوسته گشودگی‌هایی ایجاد کرد. سوم آنکه، طاق آهنگ را می‌توان معمولاً تنها در جهت کشیدگی زمینه برپا کرد؛ درحالی که یکی

۵۹. پیرنیا، «چفدها و طاق‌ها»، ۶۵.

۶۰. همان، ۶۴.

۶۱. به بیان دیگر، شکل هر بخش از پوسته شبیه قیفی است که در راستای محور طولی از وسط دو نیم شده باشد. یا شبیه شکل گوشه‌سازی فیل‌پوش است، که باعث شده بعضی این طاق را «گرده‌پوش» نیز بنامند (فرهاد تهرانی، *جزوه کلاسی آشنایی با سازه‌های سنتی: طاق*، دانشگاه شهید بهشتی، بی‌تا، الف، ۲۰).

۶۲. معماریان، *معماری ایرانی نیارش*، ۲۱۰-۲۱۳.

۶۳. همان، ۲۲۶.

64. structural expression

۶۵. معماریان، *معماری ایرانی نیارش*، ۲۴۲-۲۴۳؛ دیوارهای میانی در دوسوی دو تویزه‌ی اصلی قرار می‌گیرد و تا ارتفاعی نزدیک ایوارگاه آن ادامه می‌یابد. بر سرتاسر این دیوارها دو طاق آهنگ و در میان این دو طاق، یک طاق میانی زده می‌شود.

۶۶. بدین ترتیب طاق خوانچه‌پوش امکان حضور همه انواع طاق را در کنار هم فراهم می‌کند. این ویژگی طاق خوانچه‌پوش را به گونه‌ای مرزی بین «طاق‌ها با تویزه‌های محیطی» و «طاق‌ها با تویزه‌های عرضی و مقاطع» تبدیل می‌کند.

۶۷. فرشاد، *تاریخ مهندسی در ایران*، ۳۰۲-۳۰۳. معماریان، *معماری ایرانی نیارش*، ۲۴۴.

از امکانات فضایی طاق کژاوه آن است که می‌توان چند تا از این طاق را متوالی و عمود بر جهت کشیدگی دهانه برپا کرد؛ آرایشی متفاوت از ترکیب طاق‌های تویزه‌دار در فضا که در آن تویزه‌ها از لبه‌های فضا به درون آن وارد می‌شوند، عرض فضا را قطع می‌کنند و از این طریق کار نمود سازه‌ای^{۶۴} قوی‌تری می‌یابد.

۴.۲.۲. طاق خوانچه‌پوش

هندسه طاق خوانچه‌پوش برآمده از ترکیب صفحه‌های تک و دوانحنایی در زمینه مستطیل است. این طاق، از تویزه‌ها، چهار دیوار روی تویزه‌ها، دو طاق آهنگ، و یک طاق در مربع میانی تشکیل می‌شود.^{۶۵} طاق میانی می‌تواند یکی از انواع طاق‌های ترکین، چهاربخش، کلنبو، یا چهاردوری باشد.^{۶۶} خوانچه‌پوش از هر سه مزیت طاق کژاوه نسبت به طاق آهنگ برخوردار است. سوای آنها، در این طاق با اجرای دو دیوار روی تویزه‌ها و قرار دادن طاق آهنگ روی آنها، بر دو ضلع عرضی دهانه هیچ باری در تراز پاکار وارد نمی‌شود و می‌توان در جداره‌های عرضی نیز از روزن‌های نورگیر بهره برد.^{۶۷} بدین ترتیب خوانچه‌پوش پوششی مناسب برای دهانه‌های کشیده و بزرگ با نورگیری جانبی است.

۳.۲. طاق‌ها با تویزه‌های محیطی و مقاطع

(عرضی، قطری، وتری، و چلیپایی)^{۶۸}

این دسته از طاق‌ها تنها با استفاده از تویزه‌های محیطی برپا نمی‌شود؛ بلکه بر تویزه‌های مقطعی نیز تکیه دارند؛ تویزه‌هایی که درون دهانه جای می‌گیرند و بر شکل و هندسه پوسته‌های طاقی اثر می‌گذارند.^{۶۹} این طاق‌ها ترکیبی از شکل سازه‌ای کلی صفحه‌ای (تک‌انحنایی یا دوانحنایی) و خطی است. نحوه ترکیب خطوط و صفحه‌ها متفاوت است: تویزه‌های مقاطع

گاه به موازات عرض دهانه کشیده می‌شوند (تویزه عرضی)، گاه وترهای شکل زمینه طاق را تشکیل دهد (تویزه وتری)، و گاهی دیگر به صورت قطری در مرکز طاق به هم وصل می‌شوند (تویزه قطری)، و گاهی نیز دو جفت تویزه عمود بر هم را شکل می‌دهند (تویزه چلیپایی). بدین ترتیب برخلاف دو دسته پیشین، صفحه‌ها هندسه کاملی ندارند و بسته به هندسه خطوط، به صورت جزئی از یک صفحه تک‌انحنایی یا دوانحنایی به کار می‌رود.

وجود این تویزه‌ها باعث تغییر نظام انتقال نیرو می‌شود. به جای آنکه بارها به صورت سطحی و در پوسته طاق توزیع شوند، در این طاق‌ها جریان اصلی توزیع بار به صورت خطی و از درون تویزه‌ها است. این ویژگی چند دستاورد فضایی و شکلی به همراه دارد: نخست آنکه کاهش نقش سازه‌ای پوسته‌ها باعث می‌شود که بتوان سطوح شفاف بیشتری در آنها ایجاد کرد؛ که این بر قابلیت انتقال نور در این طاق‌ها می‌افزاید و از سنگینی و جسمیت عناصر سازه‌ای می‌کاهد. این ویژگی موجب می‌شود که بیان سازه‌ای و جلوه بصری این طاق‌ها تغییر کند و طاق از یک توده متراکم صلب، به شبکه‌ای از لایه‌هایی سبک و شفاف درآمیخته به ستون‌های از نور تبدیل شود. دوم آنکه، ایده ترکیب تویزه‌ها با هم و با پوسته‌های طاقی امکانات فرم‌پردازی و دستمایه‌های طراحانه تازه‌ای را در اختیار معماران قرار می‌دهد تا آسمانهایی با شکل‌های سازه‌ای نوین خلق کنند.^{۷۰} در این سه گونه طاق، گاه پنهان کردن باریکه طاق‌ها در پس پوسته‌هایی با فرم‌های درهم‌تنیده و به هم پیچیده موجب می‌شود که سازه‌هایی سنگین، سیمایی لطیف و سبک ببابند و بدین گونه فضایی خیال‌انگیز خلق شود.^{۷۱} آسمانهایی که عناصر طراحی در آنها افزایش یافته است، از هندسه‌هایی پیچیده‌تر برخوردارند و شکل آنها شکنج بیشتری دارد. سوم آنکه، با حضور تویزه‌ها، سطح پاکار طاق به جای آنکه مانند طاق‌های دو دسته قبلی

۶۸ دانشوران پیشین این فناوری سازه‌ای را به نام‌های مختلف خوانده‌اند. گذار، شوازی، و تراسی آن را nervures و دیگرانی چون اشمیت، پوپ، و شرودر آن را ribbed vault خوانده‌اند (E. Galdieri, "Persian Domes with Crossed Ribs: An Introduction in Domes from Antiquity to the Present", in *Proceedings of the IASS-MSU International Symposium, Istanbul 1988*, 719). با توجه به دسته‌بندی عرضه‌شده در این نوشتار، واژهٔ crossed ribbed vault برای معادل انگلیسی این طاق پیشنهاد می‌شود.

۶۹ طاق‌های ترکیب و چهاربخش و کلبه می‌توانند با توپزهای متقاطع قطری و طاق کژاوه با توپزهای عرضی نیز اجرا شوند.

۷۰ تا حدی که این طاق را یک فناوری خارق‌العاده‌ای خوانده‌اند که تجارب گذشته در امر تسلط بر فضای داخلی پشت را سر گذاشت (معماریان، معماری ایرانی نیارش، ۲۶۹: Galdieri, Ibid).

۷۱ معماریان، معماری ایرانی نیارش، ۱۳۳.

۷۲ این دسته‌بندی سه‌گانه برگرفته از معماریان است (همان، فصل طاق با باریکه‌طاق).

۷۳ همان، ۲۷۵-۲۷۶.

طاقی تشکیل‌شده از عناصر خطی سازه‌ای (توپزهای وتری) دانست که با هندسه‌ای ترتیبی هم را قطع می‌کنند و صفحاتی با شکل مشخص فضاهای میان عناصر خطی را پر می‌کنند.

طاق کاربندی از منظر نوع زمینه، ساختار سازه‌ای، و روش اجرا نیز انواع مختلفی دارد.^{۷۷} از حیث نوع زمینه این طاق برای پوشش فضاهای بسته (کاربندی کامل) و نیمه‌باز (نیم‌کار) و از منظر هندسهٔ زمینه برای پوشش انواع زمینه‌های منتظم و نامنتظم به کار می‌رود.^{۷۸} از منظر سازه‌ای، طاق کاربندی گاه در دهانه‌های کوچک و برای استفادهٔ تزئینی اجرا می‌شود و از یک طاق خودایستای دیگر در بالای خود (پس‌طاق) آویزان است. در این نمونه‌ها کارها معمولاً به اندازهٔ نیم یا یک آجر ضخامت دارند و جزو استخوان‌بندی اصلی بنا نیستند. گاهی نیز در دهانه‌های بزرگ، طاق کاربندی خودایستاست و هم بار بام و هم بار آلت‌های پرکننده را تحمل می‌کند. در چنین مواردی معمولاً برای برپایی کاربندی کامل، توپزهای عرضی یا چلیپایی، و برای برپایی کاربندی نیم‌کار، توپزهای عرضی و شعاعی به‌مثابهٔ سازهٔ تقویتی در بالای پوشش کاربندی به کار می‌روند.^{۷۹}

۳.۳.۲. طاق پتکانه

در مطالعات پیشین، پتکانه کمتر با عنوان پوششی مستقل معرفی گردیده و با نادیده گرفتن اندام‌ها و خواص سازه‌ای آن با نام‌هایی چون مقرنس^{۸۰}، طاقچه‌های تزئینی^{۸۱}، و قوس شانه‌دار^{۸۲} خوانده شده است. نخستین بار پیرنیا این اندام را به‌مثابهٔ گونهٔ طاقی متمایز معرفی کرد.^{۸۳} بر اساس تعریف او و مطالعهٔ نمونه‌های نخستین^{۸۴}، این طاق متشکل از دو عنصر سازه‌ای و متمایز است: عنصر سازه‌ای نخست توپزهای باربر متقاطعی است در پشت پوستهٔ پرشکنج طاق پنهان است. این توپزها، بسته به هندسهٔ پوستهٔ داخلی، می‌توانند عرضی، وتری،

یکدست باشد، تورفته و بیرون‌زده است. این ویژگی امکانی تازه را برای طراحی و قاب‌بندی جداره‌های عمودی و دستیابی به پرداخت‌هایی نوین در فضاهای داخلی پدید می‌آورد.

این طاق‌ها براساس الگوی ترکیب خطوط و صفحات به سه گونهٔ طاق با باریکه‌طاق، کاربندی، و پتکانه تقسیم می‌شوند.^{۷۳} در طاق کاربندی خطوط و صفحات هردو نظمی تکرارشونده و ترتیبی دارند. در انواع طاق با باریکه‌طاق خطوط هندسه‌ای ترتیبی و صفحات هندسه‌ای متنوع و غیرترتیبی دارند. هندسهٔ خطوط و صفحات میان آنها در طاق پتکانه غیرترتیبی و متنوع است.

۱.۳.۲. طاق با باریکه‌طاق

این طاق شامل توپزهای متقاطع (عرضی، وتری، قطری، و چلیپایی) و صفحات آجری میان آنهاست. وجه تمایز این طاق از نمونه‌های بعدی، هندسهٔ توپزهاس است. با نگاهی کلی، توپزها در این طاق گاه با هم موازی‌اند، گاه عمود بر هم هستند، گاهی دیگر به‌صورت مایل همدیگر را قطع می‌کنند، و گاهی نیز آرایشی شعاعی دارند.^{۷۴} پس شکل پوسته‌های میان آنها قاعده و شکلی ثابت و مشخصی ندارند.

۲.۳.۲. طاق کاربندی^{۷۴}

وجه تمایز کاربندی با دیگر انواع طاق با توپزهای متقاطع، برخورداری از نظام هندسی مشخص است. این طاق از به هم بافته شدن منظم چفدهایی یکسان موسوم به «کار» با هندسه‌ای قاعده‌مند^{۷۵} تشکیل می‌شود. در میانهٔ این کارها، سطوحی لوزی‌شکل یا مثلثی موسوم به «آلت» به‌وجود می‌آید.^{۷۶} آلت‌ها با هندسه‌ای شعاعی ردیف‌به‌ردیف بر روی هم قرار می‌گیرند تا آخرین آلت (شمسه) در مرکز دهانه و در بالای همهٔ آلت‌ها بنشینند. بدین ترتیب می‌توان کاربندی را

۷۴. این طاق گونه‌ای برآمده از فرهنگ ساختمانی معماری ایران است و از این رو عبارت انگلیسی دقیقی برای آن نمی‌توان در نظر گرفت. با این حال شاید بتوان از واژه stellate vault به مثابه واژه‌ای نزدیک به آن بهره برد. بعضی از استادکاران معمار معاصر از این واژه در مقابل طراحی اختیاری و دل‌خواهی که برای طاقی چون مقرنس به کار می‌رود، استفاده می‌کنند. درباره تعریف دقیق طاق کاربردی و تمایز و تشابه آن با واژه‌های مشابه چون رسمی‌بندی اختلاف‌نظرهایی وجود دارد که پرداختن به آنها خارج از ظرفیت این نوشتار است (برای اطلاعات بیشتر نک: مهدی رئیسی و دیگران، «بازنگری در مفهوم کاربردی بر مبنای هندسه نظری، عملی و نقش ساختمانی»، مرمت و معماری / ایران، ش. ۵ (بهار و تابستان ۱۳۹۲): ۳۷-۳۸.

۷۵. زهره بزرگمهری، هندسه در معماری (تهران: سازمان میراث فرهنگی کشور، ۱۳۷۱)، ۲.

۷۶. همان، ۱۱؛ این سطوح لوزی شکل همچنین نام‌هایی چون «پاباریک»، «شاپرک» یا «ترنجی»، «سنبوسه»، «سینه‌باز»، یا «سوسنی» دارند.

قطری، یا چلیپایی باشند. عنصر دیگر آلت‌های پوسته‌ای، شامل تاسه‌ها (برگرفته از پوسته‌های تک‌انحنایی) و پرک‌ها (برگرفته از پوسته‌های دوانحنایی) است که بر اساس نظام هندسی مشخصی بر روی هم سوار می‌شوند.

وجه تمایز پتکانه، نسبت به دو گونه طاق معرفی شده در این دسته، ساختار هندسی آن است که هم بر ترکیب توپیزه‌ها و هم شکل آلت‌های سازنده طاق اثرگذار است. هندسه طاق معمولاً برگرفته از یک شبکه با زیرنقش شطرنجی یا شطرنجی - شعاعی است که بر اساس آن دو آلت اصلی شامل تاسه‌ها (طاقچه‌ها) و پرک‌ها (شاپرک‌ها) در ردیف‌هایی موازی از کنج دهانه بر روی هم سوار می‌شوند و تا مرکز دهانه، یعنی شمس، ادامه می‌یابند. این ساختار محدودیت‌های هندسه دستوری کاربردی را ندارد، شکل آلت‌ها لزوماً محدود و یکسان نیست، و ترکیب توپیزه‌های پشت آلت‌ها از قواعد هندسی ثابتی پیروی نمی‌کنند. بدین ترتیب، استفاده از پتکانه آزادی عمل بسیار بیشتری را برای طراحی و فرم‌پردازی موجب می‌شود.

با توجه به پنهان بودن توپیزه‌ها در این طاق و نیز تنوع کم‌نظیر طرح آنها در نمونه‌ها و برهه‌های مختلف، شناخت رفتار سازه‌ای طاق پتکانه بسیار پیچیده است؛ اما با نگاهی کلی می‌توان پتکانه‌ها را به دو گروه شکلی - سازه‌ای و شکلی تقسیم کرد.^{۸۵} در پتکانه شکلی - سازه‌ای، استخوان‌بندی اصلی طاق باریکه طاق‌های باربر است و آلت‌های پرکننده در بین آنها قرار می‌گیرد و بر آنها تکیه می‌کند. این پتکانه‌ها خود به دو گروه تقسیم می‌شود: گروه اول پتکانه‌های دارای باریکه طاق و تاسه و گروه دوم پتکانه‌های دارای باریکه طاق و تاسه و عناصر کششی است.^{۸۶} این گروه معمولاً سازه‌ها و تاسه‌های آجری بزرگ‌تری دارند. در گروه دوم، پتکانه‌های شکلی از طاق‌های پتکانه، پوسته داخلی وجود دارد؛ اما به دلیل کوچک‌تر بودن تاسه‌ها در آنها، ماهیت ترین‌یافته و عدم برخورداری از

توپیزه‌های پشتیبان، از سازه دیگری آویزان است. به این ترتیب در این دسته از طاق‌ها عنصر شکلی طاق پتکانه وجود دارد؛ اما عنصر سازه‌ای آن حذف شده و به همین خاطر، خواص آن به طاق مقرنس نزدیک‌تر است.^{۸۷}

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله با پیوند مفاهیم و تعاریف معرفی شده در حوزه شناخت نظام‌های سازه‌ای با یافته‌های حوزه مطالعات طاق‌ها در معماری تاریخی ایران، چارچوب جدیدی برای دسته‌بندی طاق‌ها تعریف کردیم. با این چارچوب نوین طاق‌ها، با توجه هم‌زمان به دو مؤلفه «حضور و موقعیت عناصر سازه‌ای» و «شکل عناصر سازه‌ای» و با تکیه بر مفهوم «شکل سازه‌ای کلی»، دسته‌بندی می‌شوند.

بر اساس مؤلفه اول (عناصر سازه‌ای)، بود یا نبود توپیزه‌ها، و نحوه ترکیب آنها با هم، طاق‌ها به سه دسته «بدون توپیزه»، «با توپیزه‌های محیطی»، و «با توپیزه‌های محیطی و مقاطع» تقسیم می‌شوند. در سطح بعدی، بر مبنای مؤلفه دوم (شکل سازه‌ای)، طاق ترکیبی از پوسته‌های آجری (با شکل سازه‌ای کلی صفحه‌ای) و توپیزه‌ها (با شکل سازه‌ای کلی خطی) است. بر این اساس، طاق‌ها از دسته‌های خردتری تشکیل می‌شوند، به این قرار: ۱) طاق بدون توپیزه و با پوسته‌های تک‌انحنایی (طاق آهنگ) یا دوانحنایی (چهاردوری و کلبو)، ۲) طاق با توپیزه‌های محیطی و پوسته‌های تک‌انحنایی (آهنگ)، دوانحنایی (چهاردوری، کلبو و کزاوه)، تلاقی دو تک‌انحنایی (ترکین و چهاربخش)، یا ترکیبی از تک‌انحنایی و دوانحنایی (خوانچه‌پوش)، ۳) طاق‌های با توپیزه‌های محیطی و مقاطع که در آنها پوسته‌ها جزئی از صفحات تک یا دوانحنایی هستند. در این طاق‌ها با هندسه ترتیبی از خط و صفحه (کاربندی) یا با هندسه ترتیبی از خط و غیرترتیبی از صفحه (طاق با

باریکه طاق) یا با هندسه غیر ترتیبی خط و صفحه (پتکانه) شکل بدین ترتیب، با هم پوشانی مؤلفه های سازه ای و شکلی، طاق ها دو دسته هستند: الف) طاق های «صفحه ای» (شامل

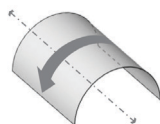
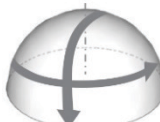
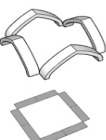
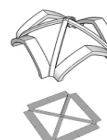
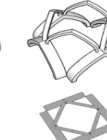
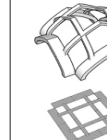
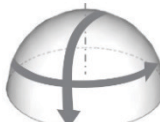
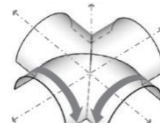
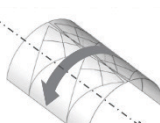
گرفته اند (جدول ۲).

۷۷. گروهی از دانشوران طاق کاربردی را بر اساس سه مؤلفه هندسه نظری، هندسه عملی، و نقش ساختمانی به ۸ دسته تقسیم کرده اند (رئیزی و دیگران، «بازنگری در مفهوم کاربردی بر مبنای هندسه نظری، عملی و نقش ساختمانی»، ۳۳-۵۴).

۷۸. عمده مطالعات پیشین مربوط به طراحی کاربردی در زمینه های منتظم است؛ اما در بعضی مطالعات اخیر به استعداد این طاق برای پوشش زمینه های نامنتظم نیز توجه شده است (نک:

Amir Amjad Mohammadi, et al., "Geometric Design of a Masonry Lattice Space Dome Titled KARBANDI in Persian Architecture", *International Journal of Space Structures*, no. 34 (2019): 1-18; A.A. Mohammadi, et al., "The Geometrical Regularization for Covering Irregular Bases with Karbandi", *Nexus Network Journal*, no. 20 (2018), 331-352.

جدول ۲. چارچوبی برای دسته بندی طاق های ایران بر مبنای شکل سازه ای کلی، تدوین: نگارنده.

نظام سازه						نظام شکل پوسته		نام طاق	
بدون توپزه	توپزه محیطی	توپزه عرضی	توپزه قطری	توپزه وتری	توپزه چلیپایی		تک انحنایی	آهنگ	
									
							دوانحنایی	چهاردوری	
								کژاوه	
								کلنبو	
							تک انحنایی مضاعف	چهاربخش	
								ترکین	
							ترکیب تک و دوانحنایی	خوانچه پوش	
							ترکیبی از جز، پوسته های تک و دوانحنایی	طاق با باریکه طاق	
								کاربندی	
								پتکانه	

۷۹. طرح طاق‌های کاربردی بزرگ‌مقیاس در بازار تبریز از جمله چنین طاق‌هایی هستند (برای اطلاعات بیشتر نک: رئیسی و دیگران، «بازنگری در مفهوم کاربردی بر مبنای هندسه نظری، عملی و نقش ساختمانی»، ۳۷-۳۸؛ محمدرضا لیلیان، «چگونگی تعاملات فضای معماری و سازه در کاربردی‌های با نقش سازه‌ای در بازار تبریز؛ با نگاه ویژه به نمونه موردی تیمچه محمدقلی در بازار تبریز»، اثر، ش ۵۳ (تابستان ۱۳۹۰)، ۱۱۱-۱۲۶؛ فرهاد تهرانی، «نگرشی دوباره بر کاربردی و معرفی کاربردی ویژه در بازار تبریز»، اثر، ش ۵۳ (تابستان ۱۳۹۰)، ۸۵-۹۶.

80. J. Rosintal and E. Schroeder, Squinches, Pendentives, and Stalactites: *A Survey of Persian art from Prehistoric times to the Present*, Vol. III (New York: Oxford University Press, 1977), 1256; A.B. Prochazka, *Determinants of Islamic Architecture (Architecture of the Islamic cultural sphere)* (Zurich: Muslim architecture Research Program, 1988), 118; B. O'Kane, *Studies in Persian art and architecture* (Egypt: American University in Cairo, 2007), 108-133.

81. A. Godard, "Voutes Iraniennes", In *Āthâr-é Īrân (Annales du Service Archéologique de L'Iran)*, IV (1949), 340.

تک‌انحنایی، دوانحنایی، تلاقی دو تک‌انحنایی، ترکیب تک‌انحنایی و دوانحنایی؛ (ب) طاق‌های «خط و صفحه‌ای» (که بسته به ترتیبی یا غیرترتیبی بودن نظم خطوط یا صفحات خود شامل سه دسته است). در طاق‌های «صفحه‌ای»، پوسته طاق نقشی محوری و عمده دارد و عامل اصلی ایستایی و شکل طاق است. درحالی‌که در طاق‌های «خط و صفحه‌ای»، از نقش پوسته‌ها کاسته می‌شود و توزیع‌ها نقش اصلی در شکل دادن به طاق و ایستایی آن را دارند، تا حدی که این دسته طاق، بدون

استفاده از توزیع‌های متقاطع قابل اجرا نیست.

در این مقاله با توجه هم‌زمان و روشمند به مؤلفه‌های شکلی و سازه‌ای طاق‌ها در معماری ایران، آنها در یک چارچوب یکپارچه بازشناسی و معرفی شده‌اند. بهره‌گیری از این چارچوب ضمن معرفی جامع‌تر طاق‌ها می‌تواند ما را با مسائل پیش روی طراحان و سازندگان پوشش‌های منحنی مواجه کند و از این طریق پنجره‌ای برای اندیشیدن به طراحی آسمانه‌های نو بگشاید.

References

- Bezenval, R. *Vault Technology in the Ancient East*. Tehran: Iranian Cultural Heritage Organization, 2000. (In Persian)
- Bozargomehri, Z. *Geometry in Architecture*. Tehran: Iranian Cultural Heritage Organization, 1992. (In Persian)
- Dadkhah, N., et al. "Traditional Complex Modularity in Islamic and Persian Architecture: Interpretations in Muqarnas and Patkâné Crafts, Focusing on their Prefabricated Essence". *Offsite: Theory and Practice of Architectural Production*, 2012, 130-138.
- Edwards, C. and D. Edwards. "The Evolution of Shouldered Arch in Medieval Islamic Architecture". *Architectural History*, 42 (1999): 68-95.
- Engel, H. *Structure Systems*. Trans. A.G. Pahleviyani. Tehran: Karang, 1998. (In Persian)
- Farshad, M. *History of Engineering in Iran*. Tehran: Mirmāh, 1997. (In Persian)
- Galdieri, E. "Contributi Alla Conoscenza Delle Strutture a Nervature Incrociate". *Rivista degli Studi Orientali*, 57 (1983): 61-80.
- _____. "Persian Domes with Crossed Ribs: An Introduction in Domes from Antiquity to the Present". in *Proceedings of the IASS-MSU International Symposium*, Istanbul 1988, pp. 719-732.
- Godard, A., et al., *Athar-e of Iran*, Vol. 3, Trans. A. Sarvqad Moqaddam. Mashhad: Islamic Research Foundation, 1988. (In Persian)
- Godard, A. "Voutes Iraniennes". In *Āthâr-é Īrân (Annales du Service Archéologique de L'Iran)*, IV (1949): 187-370.
- Golombek, Lisa and Donald Wilber. *The Timurid Architecture of Iran and Turan*, Vol. 1, New Jersey, 1988.
- Gye, D.H. "Arches and Domes in Iranian Islamic Buildings: An Engineer's Perspective". *Journal of the British Institute of Persian Studies*, vol. 26, no. 1 (1988): 129-144.
- Kashani, Q.J. *Treatise on Vault and Azaj*. Trans. A. Jazbi. Tehran: Soroush, 1987. (In Persian)
- Leylian, M.R. "Interaction of Architectural Space and Structure in Load-Bearing Karbandis in Tabriz Bazaar: The Case of Mohammad-qoliTimcheh". *Athar*, 53 (2011): 111-126. (In Persian)
- Mainstone, Rowland J. *Developments in Structural Form*. Oxford: Taylor & Francis Group, 1998.
- Memarian, QH. *Iranian Architecture: Niyāresh*, Ed. H. Safaeipour. Tehran: Goljam, 2018. (In Persian)
- Mohammadi, Amir Amjad, et al. "The Geometrical Regularization for Covering Irregular Bases with Karbandi". *Nexus Network Journal*, 20(2) (2018): 331-352.
- Mohammadi, A.A., et al. "Geometric Design of a Masonry Lattice Space Dome Titled KARBANDI in Persian Architecture". *International Journal of Space Structures*. (2019): 1-18.
- Moore, F. *Understanding Structure*. Trans. M. Golabchi. Tehran: University of Tehran Press, 2003. (In Persian)
- Necipoğlu, G. *Geometry and Ornament in Islamic Architecture: The Topkapi Scroll*. Trans. M. Qayoumi Bidehendi. Tehran: Rozaneh, 2000. (In Persian)
- O'Kane, Bernard. *Studies in Persian Art and Architecture*. Egypt: American University in Cairo, 2007.
- Omranipour, A. *Islamic Art and Architecture: In Memory of Dr. Latif Abolqasemi*. Tehran: Urban Renovation and Improvement Organization, 2005. (In Persian)



82. Edwards and Edwards, "The Evolution of Shouldered Arch in Medieval Islamic Architecture", 68-95.

۸۳ پیرنیا، «گنبد در معماری ایران»، ۳۸.

۸۴ هادی صفایی‌پور و دیگران، «فهم چستی پتکانه از طریق تحلیل نمونه‌های نخستین در معماری ایران»، مطالعات معماری ایران، ش ۵ (بهار و تابستان ۱۳۹۳): ۱۶.

۸۵ هادی صفایی‌پور، بررسی توسعه شکل سازه‌ای با تأکید بر پوشش پتکانه در معماری ایران (دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۸)، ۱۱۳-۱۲۱.

۸۶ صفایی‌پور و دیگران، «فهم چستی پتکانه از طریق تحلیل نمونه‌های نخستین در معماری ایران»، ۱۲.

۸۷ از منظر سازه‌ای، میان مقرنس و پتکانه‌های شکلی تمایزی نیست؛ اما از منظر شکلی، مقرنس‌ها از آلت‌های دیگری جز شاپرک و تاسه نیز برخوردارند. مهم‌ترین این آلت‌ها در مقرنس «تخت» است که با عناصر کششی از سازه پشته‌ای آویزان است. وجه تمایز دیگر مقرنس و پتکانه شیوه ساخت آنهاست. در مقرنس ابتدا تخت‌ها از سازه بالایی آویزان می‌شوند و بعد عناصر میانی آنها در جای خود قرار می‌گیرند. حال آنکه تاسه‌های پتکانه از پایین به

Pirnia, M.K. "Architectural Gifts to the World: The Dome". *Honar va Mardom*, no. 136-137 (1973): 2-7. (In Persian)

_____. "The Dome in Iranian Architecture". *Athar*, 20 (1992): 5-139. (In Persian)

_____. "Vault and Arch". *Athar*, 24 (1994): 46-192. (In Persian)

Prochazka, Amjad Bohumil. *Determinants of Islamic Architecture (Architecture of the Islamic cultural sphere)*. Zurich: Muslim architecture Research Program, 1988.

Raeiszadeh, M. and H. Mofid. *Reviving Forgotten Arts: The Principles of Traditional Architecture in Iran According to Master Hossein Lorzadeh*. Tehran: Mowlā, 1995. (In Persian)

Raeisi, M., et al. "Reconsidering the Concept of Karbandi Vault Based on Theoretical and Structural Geometry". *Restoration and Architecture of Iran*, 5 (2013): 33-54. (In Persian)

Rezayat, N. Isfahan Grand Mosque, interview with Hadi Safaeipour, 5/17/2012, personal archive of the interviewer.

Rosintal, J. and E. Schroeder. *Squinches, Pendentives, and Stalactites: A Survey of Persian art from Prehistoric times to the Present*, eds: Pope, A. U. and P. Ackerman. Vol. III. New York: Oxford university press, 1977.

Safaeipour, H. *Interpretations in Morphologic Development: Focusing on Patkâné*. MA Thesis, Tarbiat Modares University, 2009. (In Persian)

_____. *Methodology for Understanding and Explaining the Design Resources of Contemporary Master Masons in Iran*. PhD Dissertation in Architecture, Tehran: Tarbiat Modares University, 2016. (In Persian)

_____. *Studying of Development of Structural Form*

← بالا بر روی هم سوار می‌شوند (صفایی‌پور و دیگران، همان، ۱۶؛

N. Dadkhah, et al., "Traditional Complex Modularity in Islamic and Persian Architecture: Interpretations in Muqarnas and Patkâné Crafts, Focusing on their Prefabricated Essence", *Offsite: Theory and Practice of Architectural Production*, 2012, 131.

Through Analyzing Patkaneh Vaulting in Iran's Architecture. MA Dissertation in Architecture, Tehran: Tarbiat Modares University, 2009. (In Persian)

Safaeipour, H., et al., "Understanding the essence of the petkaneh through the analysis of early examples in Iranian architecture". *Iranian Architectural Studies*, no. 5 (Spring and Summer 2014)

Sandaker, Bjorn Normann. *On the Span and Space: Exploring Structures in Architecture*. Oxfordshire: Routledge, 2008.

Shaarbaf, A. *Girih and Karbandi*. Tehran: Sobhan Noor, 2006. (In Persian)

Smith, Myron Bement. *The Vault in Persian Architecture: A Provisional Classification, with Notes on Construction*. PhD dissertation. John Hopkins University, 1947.

Tehrani, F. "A New Look at Karbandi and a Special Example in Tabriz Bazaar". *Athar*, 53 (2011): 85-96. (In Persian)

_____. *Lecture Notes: Introduction to Traditional Structures - Vault*. Shahid Beheshti University, n.d.-a. (In Persian)

Tehrani, F., et al. "The Technology of Qomi-poosh Vaults in Iranian Traditional Architecture". *Armanshahr Architecture & Urban Development*, 4(8) (2012).

Wilber, D. *Islamic Architecture of Iran in the Ilkhanid Period*. Tehran: Scientific and Cultural Publications, 1986. (In Persian)

Wilber, D., et al. *Timurid Architecture in Iran and Turan*. Trans. K. Afsar & M.Y. Kiani. Tehran: Iranian Cultural Heritage Organization, 1995. (In Persian)

Zomorshidi, H. *Vaults and Arches in Iranian Architecture*. Tehran: Keyhan, 1994. (In Persian)

