Examining the Role of base Arc in Panj-O-Haft Arch in Structural functionality in Karbandi-16 2-leg

Abstract

The inherent limitations of brick and mortar necessitate the strategic use of geometry to overcome their weaknesses. This paper is specifically centered on discerning the role of geometry in the Panj-O-Haft arch and the Karbandi vault within Persian architectural practice. Notably, the study seeks to explore the intricate correlation between the base arc angle and the structural functionality of the Karbandi, emphasizing the profound influence of varying angles on the dimensions and strength of architectural elements. This study utilizes parametric and algorithmic design methods to analyze the Panj-O-Haft arch and its application as ribs for the Karbandi. A structural analysis algorithm is developed to connect with the modeling algorithm, allowing for the examination of various base arc angles and their impact on the structural analysis results. By selecting a base angle range of 20 to 70 degrees, the study generates 50 different Karbandi analysis results, which are then compared based on axial force in Karbandi elements and the thrust vector amount in supports. The research employs linear models and utilizes the Karamba3D plug-in for analysis. The Karbandi features interconnected rib geometry, with all ribs dividing into 72 sub-elements. Altering the base arch angle impacts the geometry of these sub-elements and the Shamseh (a type vault) above them, leading to varying ranges of axial force in the sub-elements across different Karbandi models. A smaller range of axial force in the sub-elements indicates a more even force distribution. The study reveals that base arc angles within the 50 to 53 range result in the lowest range of axial force and are the most suitable option for the Panj-O-Haft arch as a rib in the Karbandi. Notably, the traditional base arc degrees for this arch (45 and 54.7) closely align with the optimized range for the base arc. In every two-leg Karbandi, there are a total of 8 supports, regardless of its division. Due to the symmetrical geometry and topology of the Karbandi, all supports exhibit an equal amount of thrust in different directions within a horizontal plane. A specific support is chosen for comparing thrust amounts in various Karbandi models. The lowest thrust within the 20-to-70-degree angle range is observed at 20 degrees, as this smaller angle tends to straighten the Panj-O-Haft, reducing its curvature and enabling it to withstand higher force. Conversely, within the 42 to 51-degree range, the thrust amount remains relatively consistent and even slightly decreases. This paper presents structural evidence supporting the drawing logic and geometry of the Panj-O-Haft arch. In addition to other factors such as aesthetics, construction technique, material, and dimensions, structural functionality is a crucial aspect linked to the arch's geometry. The selected arch features two base arc angles, namely 45 and 54.7 degrees. The results indicate that these angles are positioned close to the optimal range and exhibit lower thrust amounts at the support location compared to higher angles. While these two arch types may not excel in a single factor, they demonstrate multifaceted functionality and achieve an overall high rating..

Keywords: arch geometry, axial force, karamba3d plugin, panj-o-haft arch, parametric modeling, structural functionality

Received: 26 Dec 2023
Received in revised form: 04 Oct 2024
Accepted: 14 Aug 2025

Hamed Hayaty[1] iD
Assistant Professor, Department of Architecture, Faculty of Engineering Technology, University of Qom, Qom, Iran.
E-mail: hamedhayaty@yahoo.com

Muhammad Shahriyari[2] iD
Master in Architectural Engineering, Department of Architecture, Faculty of Engineering Technology, University of Qom, Qom, Iran.
E-mail: architize@gmail.com

Marzieh Moradi Nafchi[3] iD (Corresponding Author)
Master Student in Islamic Architecture, Department of Architecture, Faculty of Engineering Technology, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: Marzieh.khm92@yahoo.com

https://doi.org/10.22059/jfaup.2025.369628.672932

Citation: Hayaty, Hamed; Shahriyari, Muhammad, & Moradi Nafchi, Marzieh. (2025). Examining the role of base arc in panj-o-haft arch in structural functionality in karbandi-16 2-leg. *Journal of Fine Arts: Architecture and Urban Planning*, *30*(3), 89-102. (in Persian)

© Authors retain the copyright and the full publishing. Publisher: University of Tehran Press.

نشریه هنرهای زیبا: معماری و شهرسازی● دوره ۳۰، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۴

تحلیل تأثیر تغییر زاویه پاکار قوس پنج‌اوهفت بر عملکرد سازه‌ای کاربندی ۱۶ دوپا

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۰۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۳
تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۵/۲۳

حامد حیاتی[۱]: استادیار گروه معماری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.
E-mail: hamedhayaty@yahoo.com

محمد شهریاری[۲]: کارشناس ارشد معماری، گروه معماری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.
E-mail: architize@gmail.com

مرضیه مرادی نافچی[۳] (نویسنده مسئول): دانشجوی کارشناسی ارشد معماری اسلامی، گروه معماری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.
E-mail: marzieh.khm92@yahoo.com

https://doi.org/10.22059/jfaup.2025.369628.672932

چکیده

در میانِ مطالعاتِ مختلف در معماریِ ایران، پژوهش‌هایی نیز به بررسیِ تأثیرِ هندسه بر عملکردِ سازه‌های سنتی پرداخته‌اند. کاربندی به‌عنوانِ یک عنصرِ سازه‌ای، هم نقشِ فنی و هم وجهِ زیبایی‌شناسانه دارد. در برخی کاربندی‌های موجود در ایران از قوسِ پنج‌اوهفت برای ساختِ لنگه‌تاق‌ها استفاده شده است. این قوس دو حالتِ تند و کند دارد که زاویه‌ی پاکارِ آن‌ها به‌ترتیب ۴۵ و ۵۴/۷ درجه است. پژوهشِ حاضر، با بهره‌گیری از منابعِ کتابخانه‌ای و راهبردِ شبیه‌سازی و مدل‌سازیِ پارامتریک، تأثیرِ تغییرِ زاویه‌ی پاکار بر رفتارِ سازه‌ایِ کاربندی را بررسی می‌کند. این تحقیق از نوعِ پژوهش‌هایِ کاربردی است و ابتدا با استفاده از الگوریتم‌نویسی، قوسِ پنج‌اوهفت را به‌صورتِ پارامتریک، به‌عنوانِ لنگه‌تاقِ کاربندیِ شانزده‌دوپا تعریف می‌کند. سپس در محیطِ نرم‌افزار، اثرِ تغییرِ زاویه بر عملکردِ سازه‌ای تحلیل خواهد شد. مطالعات نشان می‌دهند که تغییرِ زاویه‌ی پاکارِ قوس، مستقیماً بر جرمِ نهاییِ شمسه و در نتیجه بر نیرویِ وارده به کاربندی تأثیر می‌گذارد. با استفاده از تحلیلِ سازه‌ای می‌توان بازه‌ای از زوایا را شناسایی کرد که با توجه به نیرویِ ناشی از وزنِ شمسه، حالتِ بهینه‌ای ایجاد می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد که در بازه‌ی زوایایِ ۰۵ تا ۳۵ درجه، توزیعِ نیرو بینِ اعضایِ کاربندی یکنواخت‌تر است. از طرفی، میزانِ رانش در محلِ تکیه‌گاه در بازه‌ی ۲۴ تا ۱۵ درجه کم‌تر تغییر می‌کند؛ بنابراین، دو شیوه‌ی ترسیمِ سنتیِ قوسِ پنج‌اوهفت در نزدیکیِ بازه‌ی بهینه‌ی عملکردِ سازه‌ای قرار دارند.

واژه‌های کلیدی: سازه‌های سنتی ایرانی، قوس پنج‌اوهفت، کاربندی، مدل‌سازی پارامتریک، نیارش، هندسه کاربندی

استناد: حیاتی، حامد؛ شهریاری، محمد و مرادی نافچی، مرضیه (۱۴۰۴). تحلیل تأثیر تغییر زاویه پاکار قوس پنج‌اوهفت بر عملکرد سازه‌ای کاربندی ۱۶ دوپا. *نشریه هنرهای زیبا: معماری و شهرسازی*، ۳۰(۳)، ۸۹-۱۰۲.

© نگارندگان، حق تکثیر و امتیاز کامل انتشار مقاله خود را حفظ می‌کنند.
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

ایرانیان طی سال‌ها رشد و گسترش معماری، میراث گران‌بهایی از هندسه، سازه، فنون و شیوه‌های ساختمان‌سازی از خود برجای گذاشته‌اند. ازاین‌رو، مطالعه‌ی معماری سنتی ایران از وجوه مختلف اهمیت دارد؛ اول آنکه این معماری از بُعد مفهومی بالایی برخوردار بوده و با اعتقادات دینی ایرانیان پیوند خورده است (احمدی، ۱۳۸۸؛ طاهباز، ۱۳۹۹). دوم، تجلّی هنر اصیل ایرانی در آن نمایان است. سوم، فنون و تکنیک‌هایی که برای ساخت برخی از اجزای یک ساختمان به‌کار گرفته می‌شده تا امروز نیز قابل‌اتکا هستند. چهارم، نظم هندسی خاصی در تمام بنا حکم‌فرما است؛ چه در نگاه کلی و ساماندهی فضاها و چه در ریزترین جزئیات، ردپای هندسه و نقوش هندسی همواره قابل‌مشاهده است. پژوهش‌های مختلفی در هر یک از این حوزه‌ها انجام شده است؛ اما تعداد کم‌تری از آن‌ها به تکنیک‌ها و روش‌های ساخت پرداخته‌اند. از طرفی، می‌توان گفت هندسه آغازگر هر نوع پژوهشی در معماری ایران است؛ زیرا ابزار اصلی معمار ایرانی در طراحی یا ساخت المان‌های مختلف، هندسه است (خویی، ۱۳۸۶). قوس‌ها در عناصر مختلف معماری ایران استفاده می‌شده‌اند؛ از تاق‌ها و گنبدها تا پوشش‌هایی که حاصل گسترش یا ترکیب این قوس‌ها هستند. یکی از موارد کاربرد قوس‌ها، ایجاد پوشش برای آسمانه‌ی بنا (سقف) یا همان تاق‌زنی است. در معماری ایران شیوه‌های مختلفی برای تاق‌زنی وجود دارد که همگی بر پایه‌ی ایجاد یک قوس هندسی شکل گرفته‌اند. از مجموع این تاق‌ها می‌توان کاربندی را نام برد (معماریان، ۱۳۹۱، ۳۳۶). در این پژوهش، با استناد به پژوهش نژاد ابراهیمی (نژاد ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۶)، به آن دسته از کارها (لنگه‌تاق‌ها) که نقش باربری را در بنا ایفا می‌کنند و طی یک هندسه‌ی ستاره‌ای با یکدیگر برخورد دارند، کاربندی گفته می‌شود. کاربندی نوعی سقف است که از چند لنگه‌تاق تشکیل شده و این لنگه‌تاق‌ها در یک هندسه‌ی ستاره‌ای با یکدیگر تلاقی دارند. برای ساخت، ابتدا دو یا چهار طاق کامل به‌عنوان تویزه‌ی اصلی یا باربر با مصالح بنایی اجرا می‌شود و سپس بقیه‌ی لنگه‌تاق‌ها به آن متصل می‌شوند. پس از آنکه تمام لنگه‌ها یا تویزه‌ها آماده شدند، روی آن‌ها تاق زده می‌شود. این نوع تاق می‌تواند هندسه‌های پایه‌ی مختلف را خرد کند و در نهایت به هندسه‌ی دایره نزدیک شود (آیدینی و همکاران، ۱۴۰۰). همان‌طور که گفته شد، این تاق متشکل از لنگه‌تاق‌ها است که هندسه‌ی آن‌ها منطبق بر قوس پنج‌اوهفت است. در اغلب کاربندی‌های موجود در معماری ایرانی، از قوس پنج‌اوهفت برای ساخت لنگه‌تاق‌ها استفاده می‌شده است (بزرگمهری، ۱۳۸۵). قوس پنج‌اوهفت یکی از زیباترین و رایج‌ترین قوس‌های موجود در معماری سنتی ایران است که هندسه‌ای چهارپرگاری[1] دارد (گلچین، ۲۰۱۵).

در این پژوهش، تأثیر تغییر زاویه‌ی پاکار قوس پنج‌اوهفت در عملکرد سازه‌ای کاربندی بررسی می‌شود. برای این کار ابتدا هندسه‌ی قوس به‌صورت دقیق و پارامتریک در محیط نرم‌افزار مدل‌سازی می‌شود، زیرا تغییر زاویه‌ی پاکار قوس به‌طور مستقیم بر شکل‌گیری هندسه‌ی کلی و مسیر انتقال عمودی و افقی نیروها اثر می‌گذارد. سپس این قوس به‌عنوان لنگه‌تاق با کاربندی اتخاذشده تطابق پیدا می‌کند تا در نهایت هندسه‌ی سه‌بُعدی کاربندی ایجاد شود. بعد از وابسته کردن تمامی پارامترهای ایجادکننده‌ی یک کاربندی به یکدیگر، می‌توان با تغییر یک پارامتر، یعنی زاویه‌ی پاکار قوس، تأثیر آن تغییر را در عملکرد انتقال نیرو این عنصر تحت نیروهای وارده با استفاده از تحلیل‌های سازه‌ای مشاهده کرد. تمامی مراحل ذکرشده در محیط نرم‌افزار راینو[2]، افزونه‌ی گرس‌هاپر[3] و افزونه‌ی کارامبا[4] که قابلیت مدل‌سازی پارامتریک[5] و الگوریتم‌نویسی تصویری[6] را ارائه می‌دهند، انجام شده است. در این صورت، به دلیل وجود کنترل بر پارامترهای ایجادکننده‌ی مدل نهایی و نیز قابلیت تغییر نتیجه‌ی نهایی در صورت تغییر زاویه‌ی پاکار قوس، می‌توان کاربندی متناظر آن را بدون نیاز به طی مجدد مراحل مدل‌سازی تحلیل و بررسی کرد.

کاربندی انتخابی برای این پژوهش، کاربندی ۱۶ دوپای است. بر اساس تعریف ذکرشده، فرض پژوهشگران این است که حضور این کاربندی در بناهای مختلف ایران، از جمله مسجد حکیم اصفهان، مسجد جامع شهرکرد، شاه‌چراغ شیراز و غیره، صرفاً به دلیل زیبایی‌شناسانه و تبدیل هندسی نبوده و نقش باربری نیز ایفا می‌کرده است.

روش پژوهش

این پژوهش از نوع پژوهش‌های کاربردی است که با راهبرد شبیه‌سازی و مدل‌سازی و با استفاده از منابع کتابخانه‌ای صورت می‌پذیرد. پژوهش حاضر به دنبال یافتن چرایی انتخاب قوس پنج‌اوهفت برای ساخت اغلب کاربندی‌های موجود در ایران است. کاربندی‌ها دارای تقسیمات متنوعی هستند که از آن‌ها به‌عنوان المان باربر سازه‌ای استفاده می‌شود. در این پژوهش، کاربندی ۱۶ دوپا برای بررسی انتخاب شده است. این تحقیق با نگاهی تحلیلی به بررسی نقش هندسه در عملکرد قوس پنج‌اوهفت در کاربندی ۱۶ دوپا خواهد پرداخت. به‌طورکلی، در سنت دو نوع کند و تند برای ترسیم قوس پنج‌اوهفت وجود دارد که تفاوت این دو نوع قوس در زاویه‌ی قوس پاکار آن‌ها است.

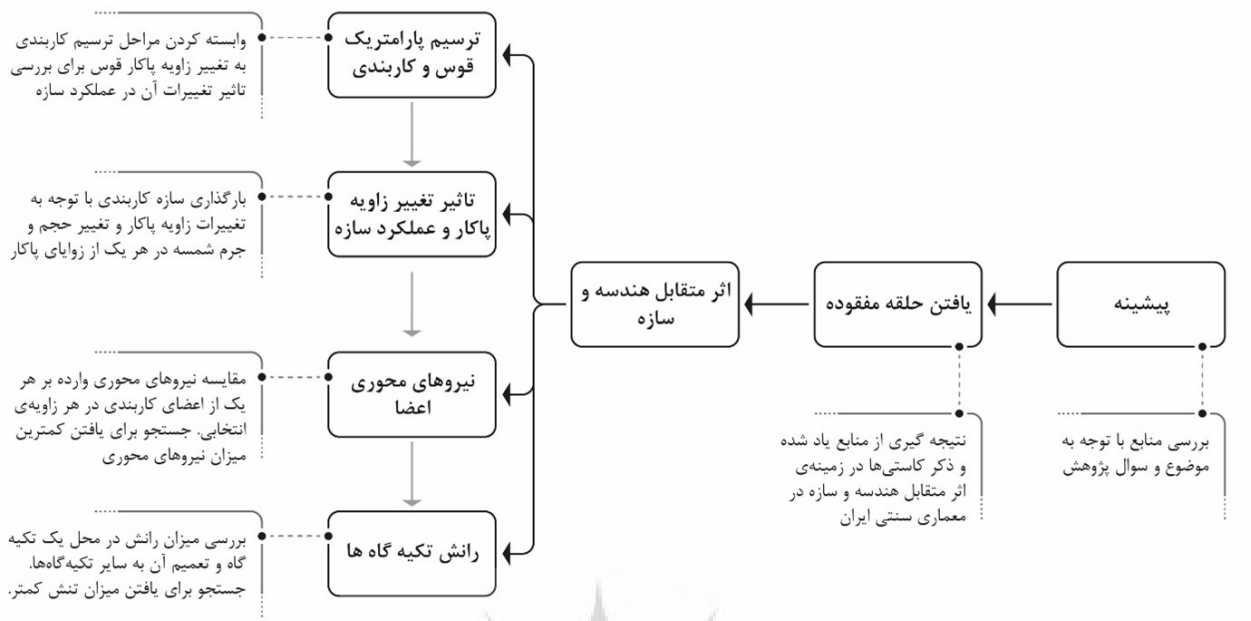
در این پژوهش، شیوه‌ای ارائه می‌شود تا قابلیت انتخاب تمامی زوایای ممکن و نه‌فقط دو زاویه‌ی خاص در ترسیم قوس پنج‌اوهفت وجود داشته باشد. در نتیجه، می‌توان عملکرد این قوس را با خیزهای مختلفی در کاربندی انتخابی آزمود. لازم به ذکر است که در این پژوهش، تمامی مدل‌سازی‌ها از نظرگاه هندسه‌ی نظری و نه هندسه‌ی عملی بررسی خواهد شد. بعدازآنتخاب کاربندی، نیاز است تا تمامی مراحل ایجاد یک قوس و تبدیل آن به لنگه‌تاق‌های کاربندی به‌صورت پارامتریک مدل‌سازی شود. در این صورت، می‌توان تأثیر ایجاد تغییر در زاویه‌ی قوس پاکار را در عملکرد سازه‌ای کاربندی مشاهده کرد. نمونه‌ها یا همان مدل‌های سه‌بُعدی برای این بررسی با استفاده از افزونه‌ی برنامه‌نویسی تصویری گرس‌هاپر در نرم‌افزار راینو الگوریتم‌نویسی شده‌اند. برای تحلیل سازه‌ای این مدل‌ها نیز از افزونه‌ی کارامبا بهره گرفته شده است.

پرسش اصلی این پژوهش این است که با توجه به استفاده از قوس پنج‌اوهفت در اغلب کاربندی‌های موجود در ایران، آیا رابطه‌ای میان هندسه‌ی این قوس و عملکرد سازه‌ای کاربندی نهایی وجود دارد؟ این رابطه چگونه تعریف می‌شود؟ تصویر ۱ خلاصه‌ای از فرایندهای طی‌شده در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

پیشینه‌پژوهش

کاربندی به علت دستوری‌بودن[7]، سرعت اجرای نسبتاً بالاتری داشته و به دلیل ترکیب هندسی خود در بعضی موارد، نیاز به آمود (پوشش

تصویر ۱. *نمودار فرایندهای طی‌شده در فرایند پژوهش*



تزیینی/ثانویه) را از بین می‌برده است. درنتیجه از این ترکیب هندسی به شیوه‌های مختلفی استفاده می‌شده و انواع مختلفی برای آن موجود است که نشان‌دهنده‌ی محبوبیت و گسترش استفاده از آن در سنت است. در اینجا، پژوهش‌های پیشین در دو بخش بررسی می‌شوند؛

۱. پژوهش‌های مرتبط با کاربندی یا قوس پنج‌اوهفت

۲. پژوهش‌هایی با نگاه تحلیلی و سازه‌ای به معماری ایرانی

تاکنون تحقیقات و بررسی‌های متنوعی بر روی عنصر کاربندی در معماری ایرانی صورت گرفته است که ناظر بر وجوه هندسی آن بوده است. محمدی (محمدی و همکاران، ۲۰۱۸) بر روی دسته‌بندی انواع کاربندی مطالعه کرده است. وی بعد از شرح و بررسی انواع مرسوم کاربندی و توضیح شیوه‌ی ساخت و هندسه‌ی ساخت هرکدام، از نظر هندسه‌ی پایه آن‌ها را دسته‌بندی می‌کند. سپس روش هندسی جدیدی را ارائه می‌دهد که بتوان بر روی هندسه‌های پایه‌ای هم که اقلیدسی نیستند، هندسه‌ی منظم کاربندی را اجرا کرد (محمدیان منصور و فرامرزی، ۱۳۹۰). در پژوهشی، در پی آن است که با تحقیق بر روی ساختار هندسی کاربندی، به گونه‌شناسی آن بپردازد و انواع مختلف آن را معرفی و دسته‌بندی کند. امجد محمدی (امجد محمدی و همکاران، ۱۳۹۹) هم سعی کرده بر اساس روش ترسیم هندسی، روشی را ارائه دهد که بتوان کاربندی رسمی[۸] را از نوع اختری[۹] متمایز کرد. وی همچنین انواع مختلف کاربندی رسمی و اختری را دسته‌بندی می‌کند. نژادابراهیمی (نژادابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۶) نیز سعی در متمایز کردن کاربندی از رسمی‌بندی دارد. او در انتها، علاوه بر گونه‌بندی رسمی‌بندی و کاربندی، بیان می‌دارد که شاخصه‌ی رسمی‌بندی، نداشتن نقش باربری سازه‌ای در ساختمان است. گاروفالو (گاروفالو، ۲۰۱۶) هم بر روی هندسه‌ی کاربندی مطالعه کرده است. وی اعتقاد دارد با بررسی سیستم نظام‌بخشی هندسی عناصر معماری سنتی ایران می‌توان قواعد حاکم بر معماری ایران را که در زیر این کالبد پنهان‌شده، دریافت. وی با بررسی بنای باغ دولت‌آباد یزد، مدول‌ها و الگوهای مختلف را از دل این بنا بیرون کشیده و به تشریح آن‌ها می‌پردازد و عناصر مختلف آن را بررسی می‌کند. آئینه‌چی و ولی‌بیگ بر روی روش ترسیم هندسی کاربندی پژوهش کرده‌اند. آن‌ها علاوه بر بررسی روش‌های ترسیم مختلف موجود در سنت با یکدیگر و تبیین کاستی‌های آن‌ها، روش نوینی را برای ترسیم کاربندی ارائه می‌دهند (آئینه‌چی و ولی‌بیگ، ۱۴۰۲).

پژوهشگران دیگری نیز بر وجه تزییناتی کاربندی تأکید می‌کنند. زمرشیدی (زمرشیدی و زمرشیدی، ۱۳۹۳) در بررسی تزیینات قدسی مساجد، برخی از مساجد سده‌های نخستین تا مساجد امروزی را بررسی می‌کند و از انواع تزیینات آن‌ها صحبت می‌کند. وی بر وجه زیبایی‌شناختی و تزییناتی کاربندی تأکید دارد. این تألیفات و مطالعات مشابه، اغلب به دسته‌بندی و یا معرفی هندسی کاربندی می‌پردازند و تعداد کم‌تری از آن‌ها به دنبال گسترش آن چیزی هستند که در گذشته وجود داشته است. بدیهی است که در راستای شناخت صحیح معماری ایران، رجوع به چنین تألیفاتی لازم است؛ اما در قدم‌های بعدی، کمبود نگاه تحلیلی نسبت به معماری ایران مشاهده می‌شود. در ادامه برخی پژوهش‌ها ذکر می‌شود که با نگاهی تحلیلی، سعی دارند عملکرد عناصری از معماری ایرانی را بیازمایند.

ایزدپناه پایداری لرزه‌ای سه‌قوس از معماری سنتی ایران را بررسی می‌کند (ایزدپناه و سرداری، ۱۳۹۹). وی پس از بررسی این سه‌قوس و مقایسه‌ی عملکرد آن‌ها با یکدیگر، نتیجه می‌گیرد که قوس پنج‌اوهفت نسبت به دو قوس دیگر در شرایط مشابه، پایداری لرزه‌ای مناسب‌تری دارد. آیتا در پژوهشی (آیتا و همکاران، ۲۰۰۷) به مقایسه‌ی دو نوع قوس یک‌پرگاری[۱۰] و قوس دوپرگاری[۱۱] از معماری گوتیک و رمانسک پرداخته است. وی در انتها بیان می‌دارد که در ابعاد دهانه‌ی یکسان و نیز ضخامت یکسان، قوس دوپرگاری می‌تواند دیواری با ارتفاع بیشتری را در بالای خود تحمل کند. نکته‌ی مهمی که در این پژوهش وجود دارد، اثبات عملکرد بهینه‌تر قوس‌های چندپرگاری نسبت به قوس‌های یک‌پرگاری (قطاع دایره) است. پور امینیان (پورامینیان و همکاران، ۱۳۹۱) نیز ۶ چفد مختلف را از نظر

استاتیکی و دینامیکی بررسی کرده که در نهایت آن‌ها را از نظر عملکرد استاتیکی و دینامیکی مرتب می‌کند. این پژوهش‌ها با نگاهی تحلیلی، سعی در یافتن علت رواج برخی قوس‌ها (مانند پنج‌اوهفت) یا تنوع استفاده از انواع قوس داشته‌اند. آن‌ها در کنار مسائلی مانند زیبایی‌شناسی و یا سرعت ساخت، عملکرد بهینه‌ی سازه‌ای یا پایداری لرزه‌ای را نیز شاهدی بر ادعاهای پیشین دانسته‌اند.

برخی پژوهشگران هم با نگاهی مشابه به ارزیابی المان‌های دیگری از این معماری پرداخته‌اند. لنگیل (لنگیل و باگی، ۲۰۱۵) روی عملکرد سازه‌ای تویزه‌ها کار کرده است. وی یک چهارتاقی را انتخاب کرده و پایداری آن را در دو حالت، بدون وجود تویزه و با وجود تویزه در محل برخورد تاق‌ها، بررسی کرده است. او بیان می‌دارد که وجود تویزه بر استحکام تاق می‌افزاید و از میزان تنش در سازه‌ی تاق و ستون‌ها می‌کاهد. ایده‌ی کلی سیستم تاقی که در این پژوهش بررسی می‌شود، همانند تاق کاربندی ایرانی است با این تفاوت که در کاربندی، تویزه‌ها در مرکز تاق برخوردی ندارند و در پلانی ستاره‌مانند با یکدیگر تلاقی می‌کنند.

مینویی (مینویی و همکاران، ۱۳۹۳) به سراغ عملکرد گنبدها رفته و به دنبال رسیدن به جواب این سؤال است که آیا گنبدهای ایرانی در دوره‌های مختلف دارای سیر تحولی و کارکردی می‌باشند؟ گنبدهای انتخابی در این پژوهش عملکرد سازه‌ای متناسبی را از خود بروز می‌دهند که نشان از تسلط معمار بر علوم نیارشی و فنون ایستایی دارد. از آنجایی که گنبدها نیز حاصل دوران یک قوس حول مرکز خود هستند، نتیجه‌ی این پژوهش نیز می‌تواند تأییدی بر تعریف هندسه‌ی صحیح قوس‌های ایرانی باشد، اما تأثیر هندسه‌ی این قوس‌ها بر عملکرد گنبد در این پژوهش در نظر گرفته نشده است.

حجازی (حجازی و قادری، ۱۳۸۳) هم با انتخاب پنج گنبد از ساختمان‌های سنتی ایران، به سراغ تحلیل عملکرد آن‌ها به هنگام زلزله رفته است. در تمامی این گنبدها، تنش سازه‌ای به‌طور مطلوب گزارش شده است. پژوهش‌های مشابه دیگری نیز یافت می‌شوند که به تحلیل عملکرد سازه‌ای عناصری از معماری ایران پرداخته باشند، اما در اغلب آن‌ها توجه به هندسه‌ی المان و تأثیر آن در نقش و عملکرد سازه‌ای المان به‌چشم نمی‌خورد، حال‌آنکه این دو عامل ارتباط متقابلی با یکدیگر دارند.

مبانی نظری پژوهش

کاربندی ۱۶ دوپا و قوس پنج‌اوهفت

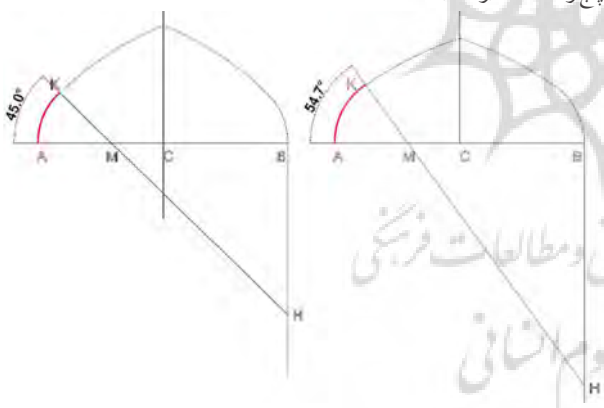
همان‌گونه که پیش‌تر یاد شد، کاربندی انتخابی برای تحلیل سازه‌ای، کاربندی ۱۶ دوپا، قالب شاقولی است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش اکبری، هندسه‌ی کاربندی‌های دوپای قالب شاقولی انطباق بیشتری با مسیر انتقال نیرو در بین انواع تاق‌های کاربندی دارد (اکبری، ۱۴۰۱، ۸۴–۹۴). به عبارتی دیگر، این دسته از کاربندی‌ها قابلیت باربری بسیار بیشتری نسبت به سایر کاربندی‌های موجود در معماری ایران دارند.

از طرفی، بر اساس ادعای پژوهشگران مختلف، قوس سازنده‌ی لنگه‌تاق‌ها در اغلب کاربندی‌ها، قوس پنج‌اوهفت است. از این‌رو، قوس مبنا برای مدل‌سازی کاربندی در این پژوهش، قوس پنج‌اوهفت در نظر گرفته شد (بزرگمهری، ۱۳۸۵، ۱۰؛ تهرانی و دیگران، ۲۰۱۲، ۳۹). این قوس، یکی از انواع قوس‌های چهارپرگاری و از نوع چفدهای باربر[۱۲] است که به دلیل باربری متناسب و نسبت دهانه به ارتفاع آن، از متداول‌ترین قوس‌های معماری سنتی ایران است (شیخ دارانی و رستمی، ۱۳۹۵، ۷).

ترسیم پارامتریک قوس پنج او هفت و کاربندی ۱۶ دو پا

طبق کتاب معماری ایرانی (معماریان، ۱۳۹۱)، برای ترسیم قوس پنج‌اوهفت دو روش موجود است که یکی ارتفاع بیشتر (پنج‌اوهفت تند) و دیگری ارتفاع کم‌تری (پنج‌اوهفت کند) دارد. تفاوت این دو نوع قوس در زاویه‌ای است که در مرکز پاکار وجود دارد. تصویر ۲، ترسیم دو قوس یادشده را قبل از پاک‌شدن خطوط اضافی نشان می‌دهد که بخش قرمزرنگ کمان اول قوس یا همان پاکار قوس است. این بخش، قطاعی از یک دایره به مرکز M است که در این پژوهش، پاکار نامیده می‌شود. تغییر در قطاع زاویه‌ی پاکار، ارتفاع قوس اصلی را متغیر می‌کند، یا به عبارتی هرچه قطاع بزرگ‌تری از پاکار انتخاب شود، ارتفاع قوس پنج‌اوهفت کاهش می‌یابد. حال باید ترسیم قوس را به گونه‌ای تغییر داد که زاویه‌ی قوس پاکار به‌جای فقط دو حالت تند و کند بتواند هر مقداری را دریافت کند و بعد از آن، مراحل ترسیم این قوس به انتخاب زاویه‌ی پاکار وابسته شود. استفاده از الگوریتم‌نویسی این قابلیت را به وجود می‌آورد که بتوان مراحل طراحی و ایجاد نتیجه‌ی نهایی در یک طرح را به هم وابسته کرد. در اینجا نیز می‌توان مراحل ترسیم قوس را به گونه‌ای تغییر داد که تمامی مراحل مدل‌سازی کاربندی تنها وابسته به انتخاب زاویه‌ی پاکار قوس باشند. لازم به ذکر است که منطق ترسیمی و تحلیلی تمامی مراحل این پژوهش با استفاده از افزونه‌ی گرس‌هاپر و زبان پایتون[۱۳] الگوریتم‌نویسی شده است.

تصویر ۲. *تفاوت زاویه‌ی قطاع دایره در پاکار در دو قوس پنج‌اوهفت تند (چپ) و پنج‌اوهفت کند (راست)*



همان‌گونه که در تصویر ۲ مشخص است، با جابه‌جایی نقطه‌ی H بر روی عمود اخراج‌شده از نقطه‌ی A، میزان زاویه‌ی قوس پاکار نیز تغییر پیدا می‌کند. یا به‌عکس، با تغییر زاویه‌ی قوس پاکار (زاویه‌ی KMB)، محل نقطه‌ی H بر روی عمود اخراج‌شده از نقطه‌ی A تغییر می‌کند. از طرفی، طبق روش ترسیم قوس پنج‌اوهفت، نقطه‌ی H مرکز کمان دوم قوس است که در نتیجه با تغییر آن، شعاع این کمان متفاوت شده و ارتفاع نهایی قوس پنج‌اوهفت تغییر خواهد کرد. با استفاده از این شیوه می‌توان به خیزهای بیشتری از قوس پنج‌اوهفت تند و یا به خیزهای کم‌تری از قوس پنج‌اوهفت کند دست پیدا کرد (تصویر ۳). حال می‌توان بخشی از این دامنه‌ی موجود برای انتخاب زاویه‌ی پاکار قوس را برای تحلیل سازه‌ای انتخاب کرد.

در ادامه، الگوریتم ایجادکننده‌ی رسمی ۱۶ دوپای قالب شاقولی طبق شیوه‌ی شعرباف (شعرباف، ۱۳۷۲، ۱۱۳) ایجاد می‌شود (تصویر ۴). با انطباق

الگوریتم ایجادکننده‌ی قوس بر الگوریتم ایجادکننده‌ی رسمی ۱۶، کاربندیِ متناظر با آن ایجاد خواهد شد. تصویر ۵ زوایای مختلف قوس و کاربندیِ متناظر با آن را نشان می‌دهد. بعد از ایجاد این الگوریتم، تمامی مراحل ایجاد یک کاربندی به‌صورت الگوریتمیک[۱۴] و کاملاً وابسته به هم شکل گرفته است و با تعیین دهانه‌ی اصلی کاربندی و نیز زاویه‌ی پاکار قوس، کاربندیِ موردنظر ایجاد خواهد شد. حال می‌توان با اتصال مراحل ایجادشده به الگوریتم تحلیل سازه‌ای، به بررسی تأثیر هندسه‌ی قوس پنج‌اوهفت در عملکرد سازه‌ای کاربندی پرداخت.

با توجه به اینکه ترسیم قوس پنج‌اوهفت در منابعی که پیش‌تر معرفی گردید، به روش‌های مختلفی که در بالا ترسیم شده، معرفی شده است، بنابراین پژوهشگران فرض خود را بر این نهاده‌اند که همه‌ی حالت‌های بالا قوس پنج‌اوهفت هستند و اختلاف زاویه‌ی *KMB* صرفاً ناشی از شیوه‌ی متفاوت ترسیم آن‌ها می‌باشد و هیچ کدام ارجحیت شناخته‌شده‌ای نسبت به دیگری ندارند. از همین روی، پژوهش حاضر در پی کشف بهترین حالت زاویه‌ی پاکار برای کاربندی می‌باشد.

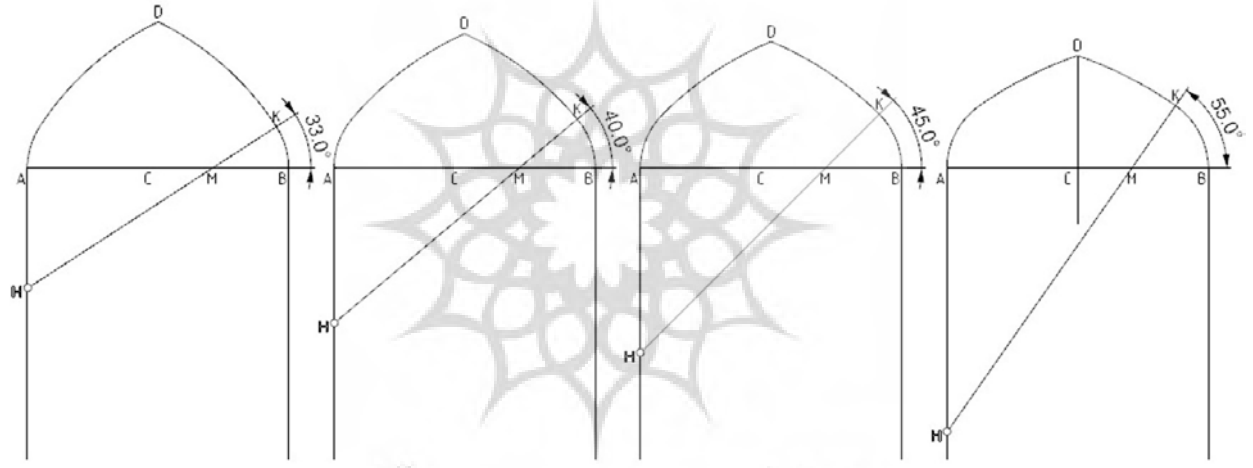
در ترسیم‌های فوق، نهنبن[۱۵] بالای رسمی به این دلیل ترسیم شده که بر وجه باربربودن کاربندی بیشتر تأکید شود؛ زیرا در پژوهش حاضر، بیان وجه باربر بودن اجزا اهمیت بیشتری دارد؛ اول اینکه ترسیم رسمی هندسه به‌تنهایی نمی‌تواند مسیرهای اصلی انتقال بار را آشکار کند، دوم اینکه با نمایش باربر بودن، رابطه بین اجزا و نحوه‌ی هم‌پیوستگی آن‌ها در برابر نیروها بهتر درک می‌شود، سوم اینکه امکان مقایسه‌ی عملکردی نمونه‌های مختلف کاربندی در شرایط بارگذاری متفاوت فراهم می‌گردد و چهارم اینکه چون نهنبن بر زمینه‌ی شمسه قرار می‌گیرد، در نتیجه شمسه جزئی از کاربندی به حساب می‌آید.

بحث

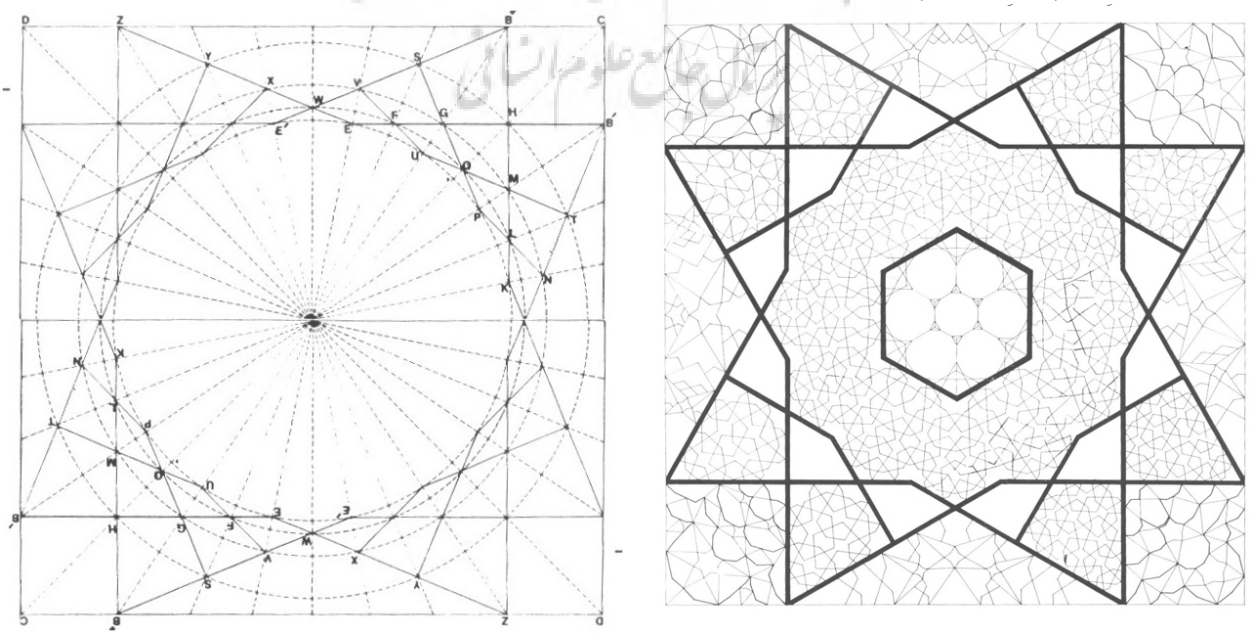
بررسی تأثیر تغییر زاویه پاکار قوس در عملکرد سازه‌ای کاربندی

همان‌گونه که ذکر شد، در سنت فقط از دو قوس پنج‌اوهفت تند و

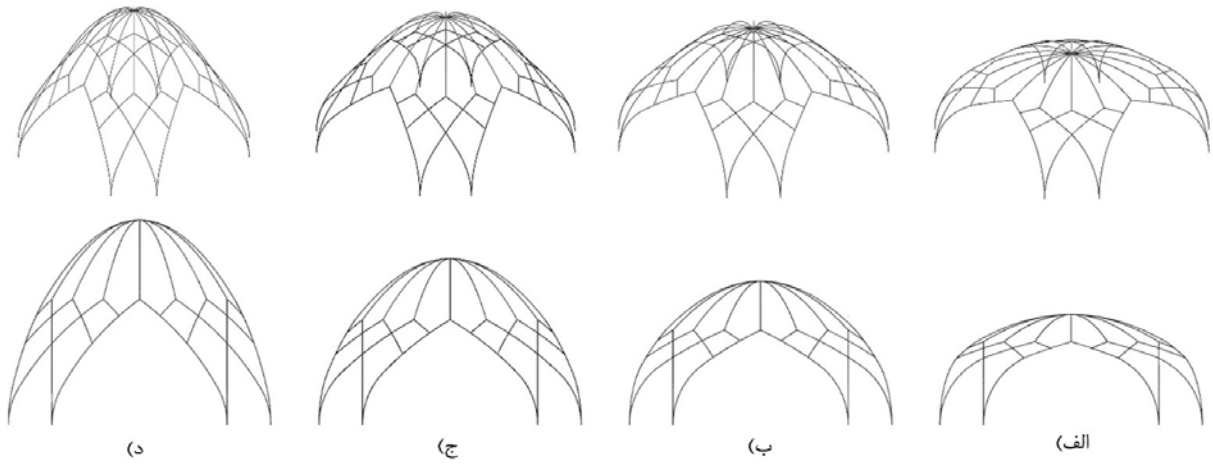
تصویر ۳. *زوایای دلخواه (KMB) و دستیابی به ارتفاع‌های مختلفی از قوس پنج‌اوهفت. در این حالات، با توجه به زاویه‌ی پاکار، نقطه‌ی H جابه‌جا می‌شود.*



تصویر ۴. *کاربندیِ ۱۶ دوپا، قالب شاقولی در پلان (شعرباف، ۱۱۳ و ۱۶۰)*

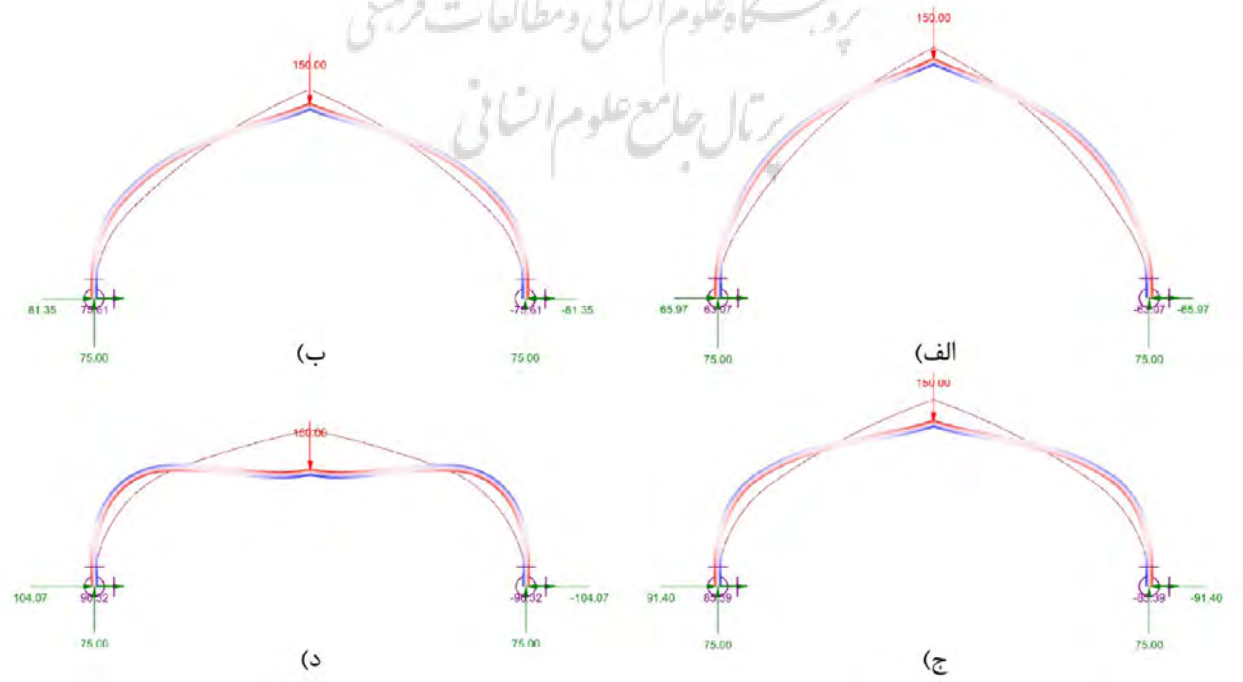


تصویر ۵. *تغییر در زاویه‌ی پاکار قوس پنج‌اوهفت و مدل‌سازی کاربندی‌های متناظر با زاویه‌ی انتخابی. الف) زاویه ۷۰ درجه، ب) زاویه ۵۴٫۷ درجه (پنج‌اوهفت کُند)، ج) زاویه ۴۵ درجه (پنج‌اوهفت تند) و د) زاویه ۳۰ درجه*



پنج‌اوهفت کُند برای ساخت کاربندی استفاده می‌شده است، درحالی‌که از لحاظ تئوری می‌توان طبق الگوریتم ایجادشده، انتخاب هر زاویه‌ای برای پاکار قوس را امکان‌پذیر نمود. هرچند عدول از مدل‌های مرسوم جایز نیست، اما در پژوهش حاضر فرض بر تغییر زاویه‌ی پاکار گذاشته شده و می‌توان با کمک مجموعه‌ای از آنالیزهای کامپیوتری به بررسی تأثیر تغییرات زاویه‌ی پاکار پرداخت. در این پژوهش تنها یک شمسه بر روی کاربندی قرار گرفته و با توجه به تصویر ۵، در صورت تغییر در زاویه‌ی پاکار لنگه‌تاق، خیز شمسه تغییر یافته و با تغییرات در ابعاد و اندازه‌ها، تغییر در جرم آن بدیهی خواهد بود. در صورت کاهش زاویه‌ی پاکار، شمسه ارتفاع و در نتیجه جرم بیشتری خواهد داشت و در مقابل، بدیهی است که افزایش زاویه باعث کاهش جرم شمسه می‌شود. از طرفی، جرم بیشتر باعث واردآمدن نیروی محوری بیشتری به هر یک از لنگه‌تاق‌ها می‌شود. تصویر ۶، چهار قوس پنج‌اوهفت را تنها با زاویه‌ی پاکار متفاوت و واردآمدن نیرویی یکسان نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، هرچه زاویه‌ی پاکار کم‌تر باشد، قوس به سمت تبدیل به خطوطی عمودی و موازی پیش می‌رود و تنش در آن کم‌تر خواهد بود. با در نظر گرفتن تنها این عامل، هرچه زاویه‌ی پاکار مقدار کم‌تری داشته باشد، قوس عملکرد بهتری خواهد داشت؛ اما به هنگام ترکیب این قوس در لنگه‌تاق‌ها در یک کاربندی، منطق متفاوتی وجود خواهد داشت. همان‌طور که بیان شد، تغییر در زاویه‌ی پاکار، جرم شمسه را نیز تغییر می‌دهد. در نتیجه، در یک کاربندی، انتخاب مقدار عددی بیشتر برای زاویه‌ی پاکار قوس، انتخاب متناسب‌تری از دیدگاه سازه‌ای است؛ زیرا در نهایت نیروی حاصل از جرم

تصویر ۶. *بارگذاری قوس پنج‌اوهفت با تعریف نیروی ثابت ۱۵۰ کیلونیوتن ۱۶ و انتخاب زوایای مختلف برای پاکار قوس. الف) زاویه ۷۰ درجه، ب) زاویه ۵۴٫۷ درجه (پنج‌اوهفت کند)، ج) زاویه ۴۵ درجه (پنج‌اوهفت تند) و د) زاویه ۳۰ درجه*



پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

شمسه کم‌تر خواهد بود. تصویر ۷ نمودار تغییرات حجم شمسه به ازای تغییرات زاویه‌ی پاکار را نمایش می‌دهد.

بعد از مدل‌سازی شمسه برای زوایای مختلفی از پاکار قوس، رابطه‌ی ریاضی ۱ برای محاسبه‌ی حجم شمسه با استفاده از پایتون به دست آمد. این معادله می‌تواند حجم شمسه را در واحد مترمکعب به ازای هر مقدار از زاویه‌ی پاکار قوس به‌صورت تجربی محاسبه کند. نمودار تصویر ۷ نیز مقادیر واقعی حجم شمسه را به ازای برخی از زوایای انتخابی زاویه‌ی پاکار نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، میزان حجم محاسبه‌شده برای شمسه از طریق رابطه‌ی ریاضی ۱ با مقدار واقعی آن اختلاف کمی دارد. در نهایت، با توجه به چگالی متریال آجر، نیروی وارده از شمسه به کاربندی نیز قابل محاسبه خواهد بود. در این رابطه، x همان زاویه‌ی پاکار و v حجم شمسه در واحد مترمکعب است. با استفاده از این معادله می‌توان میزان بارگذاری را در الگوریتم بارگذاری و تحلیل سازه‌ای به مقدار عددی زاویه‌ی پاکار قوس وابسته کرد.

رابطه ریاضی ۱ $v=(2.62\times10^{-4})x^3-0.033x^2+x+26.8$

این معادله یک تابع چندجمله‌ای درجه‌ی سوم است که تغییرات حجم شمسه را بر حسب زاویه‌ی پاکار قوس بیان می‌کند. بدین‌ترتیب، با واردکردن مقدار زاویه، حجم به‌صورت مستقیم و تقریبی با دقت مناسب به دست می‌آید. ازآنجاکه حجم مستقیماً در محاسبه‌ی وزن و در نتیجه بار وارد بر کاربندی نقش دارد، این معادله امکان می‌دهد بارگذاری سازه به‌صورت تابعی از زاویه‌ی پاکار در تحلیل لحاظ شود. دلیل اینکه فرم درجه‌ی سوم انتخاب شده این است که می‌تواند رفتار غیرخطی تغییر حجم نسبت به زاویه را با دقت مناسب تقریب بزند. ازآنجاکه انتخاب رابطه بر اساس نگرش تحلیلی–تجربی صورت پذیرفته، بنابراین مقایسه‌ی مقادیر محاسبه‌شده با داده‌های واقعی نشان می‌دهد که اختلاف ناچیز است و رابطه‌ی ریاضی از اعتبار بالایی برخوردار است. ازآنجاکه وزن شمسه برابر حاصل‌ضرب حجم در چگالی مصالح (مانند آجر) است، این تابع اجازه می‌دهد نیروی وارد بر کاربندی به‌طور مستقیم به زاویه‌ی پاکار وابسته شود و در الگوریتم بارگذاری و تحلیل سازه‌ای به‌کار رود.

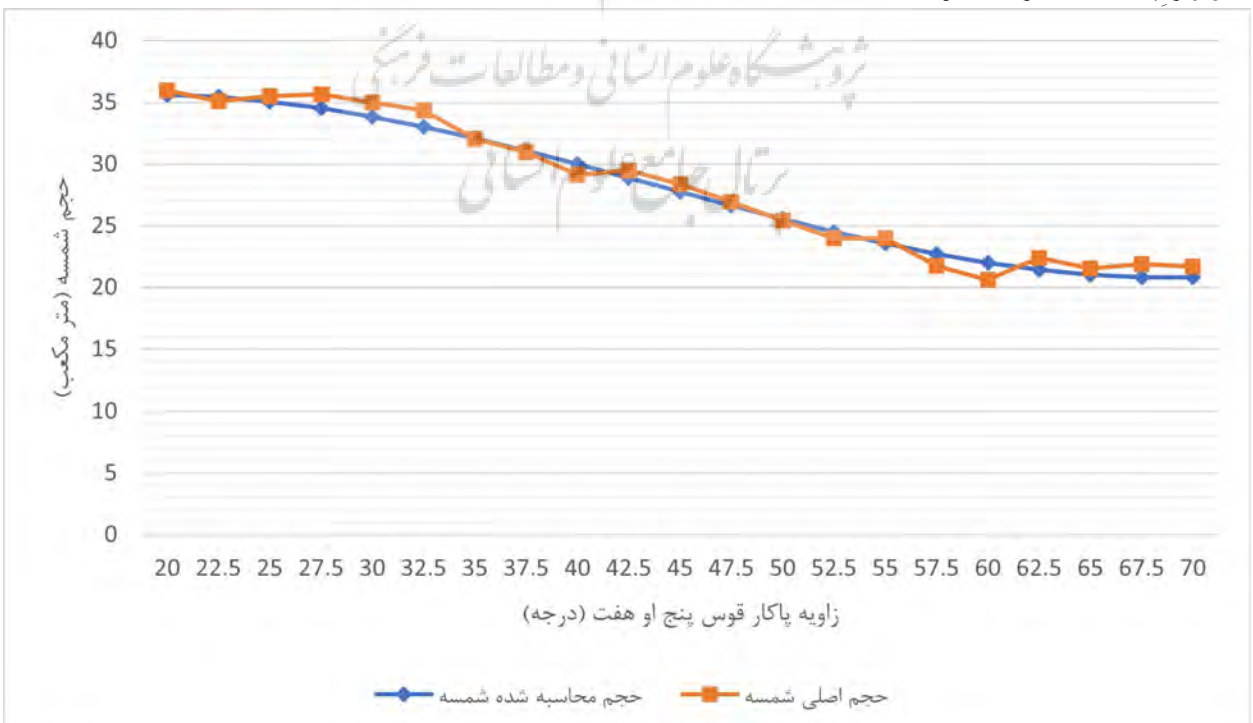
حال باید بر مبنای توضیحات ارائه‌شده، به بررسی و تحلیل کاربندی‌ها پرداخت. این بررسی به دو صورت انجام می‌پذیرد؛ نخست، کاربندی‌ها از نظر میزان نیروهای محوری وارده به اعضا و میزان یکنواختی توزیع نیرو در بین آن‌ها بررسی می‌شوند و سپس وضعیت تکیه‌گاه‌ها در کاربندی‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

بررسی نیروهای محوری وارده بر هر یک از اعضای کاربندی

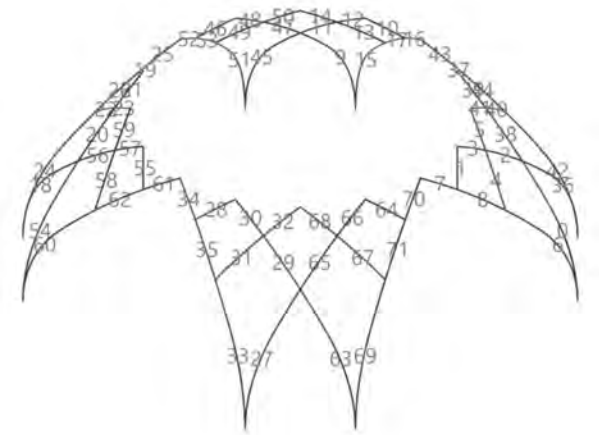
برخورد لنگه‌تاق‌ها در یک کاربندی باعث تبدیل این لنگه‌تاق‌ها به اعضایی خردتر شده که در نهایت کاربندی را تشکیل می‌دهند. طبق تصویر ۸، در کاربندی مدل‌سازی شده، ۷۲ عضو وجود دارد که هر یک از این اعضا بخشی از یک قوس پنج‌اوهفت هستند. در نتیجه، ایجاد تغییر در قوس مبنای سازنده‌ی این کاربندی باعث ایجاد تغییر در تمامی این ۷۲ عضو خواهد بود.

مشخص است که اگر بار وارده به کاربندی مقداری ثابت باشد، هرچه قوس خیز بیشتری داشته باشد، یعنی زاویه‌ی پاکار کم‌تر باشد، نیروهای محوری کم‌تری در راستای عمود بر اعضا وارد می‌شود؛ زیرا وقتی بار وارد بر کاربندی مقدار ثابتی داشته باشد، شکل هندسی قوس تعیین‌کننده‌ی نحوه‌ی توزیع نیروها در اعضا خواهد بود. در قوسی که خیز بیشتری دارد، یعنی زاویه‌ی پاکار کوچک‌تر است، مسیر انتقال بار به سمت تکیه‌گاه‌ها عمودی‌تر می‌شود؛ در نتیجه سهم نیروهای فشاری قائم افزایش‌یافته و

تصویر ۷. *نمودار حجم شمسه در کاربندی ۱۶ دوپای انتخابی بر اساس تغییر زاویه‌ی پاکار قوس پنج‌اوهفت. وزن اصلی شمسه بر اساس مدل‌سازی سه‌بُعدی و نیز حجم محاسبه‌شده بر اساس فرمول به‌دست‌آمده در نمودار مشخص شده‌اند.*



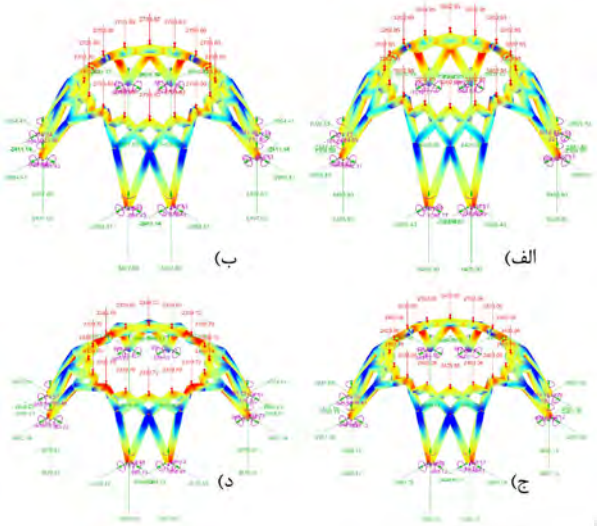
تصویر ۸. *اعضای کاربندی ۱۶ دوپا، قالب شاقولی. این کاربندی در مجموع ۷۲ عضو دارد (از ۰ تا ۷۱)*



مؤلفه‌های افقی یا رانش جانبی و همچنین نیروهای محوری در امتداد اعضا کاهش می‌یابند. برعکس، اگر قوس کم‌خیزتر باشد، یعنی زاویه‌ی پاکار بزرگ‌تر شود، مؤلفه‌های افقی بار بیشتر شده و اعضای کاربندی ناچارند نیروهای کششی و فشاری بزرگ‌تری را تحمل کنند؛ بنابراین، تغییر زاویه‌ی پاکار قوس مستقیماً بر توزیع تنش‌ها، مقدار رانش جانبی و سطح پایداری سازه تأثیر می‌گذارد؛ اما همان‌گونه که گفته شد، ارتفاع بیشتر و زاویه‌ی کم‌تر پاکار قوس، شمسه‌ی بزرگ‌تر و سنگین‌تری را ایجاد می‌کند؛ یا به عبارتی، با افزایش ارتفاع، بار وارده نیز افزایش پیدا می‌کند. در نتیجه می‌توان به دنبال زاویه‌ای از پاکار قوس بود که منجر به بهینه‌ترین حالت در طراحی شود. در این پژوهش، برای زاویه‌ی پاکار بازه‌ای بین ۲۰ تا ۷۰ درجه انتخاب شده که با استفاده از افزونه‌ی کارامبا، تأثیر تغییر زاویه‌ی پاکار در این بازه بر روی عملکرد کاربندی بررسی می‌شود.

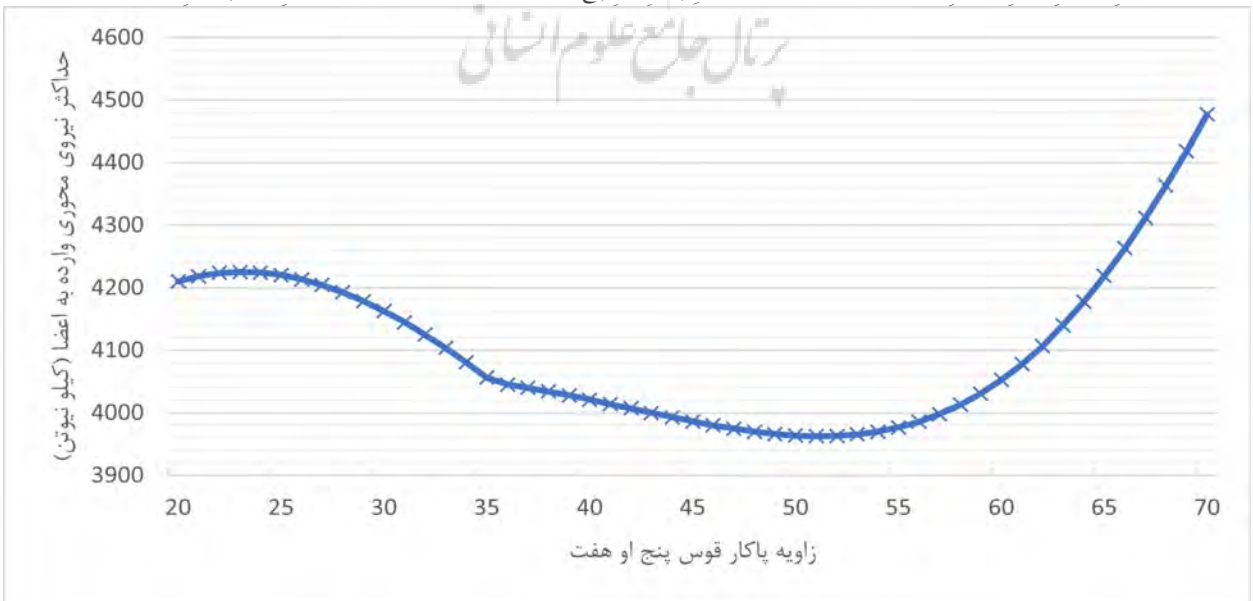
در تصویر ۹، قوس‌هایی با زوایای مختلف تحت نیروی ثقلی وزن شمسه قرار گرفته‌اند. بعد از تحلیل نیروهای وارده به اعضا در بازه‌ی

تصویر ۹. *نمونه‌هایی از تحلیل کاربندی با زوایای پاکار مختلف با استفاده از افزونه کارامبا. الف) زاویه ۳۰ درجه، ب) زاویه ۴۵ درجه (پنج‌اوهفت تند)، ج) زاویه ۵۴٫۷ درجه (پنج‌اوهفت کند) و د) زاویه ۷۰ درجه*



زوایای انتخابی در پاکار قوس، نیروی محوری وارده به هر عضو به ازای هر زاویه‌ی پاکار جمع‌آوری شد. در هر یک از حالات، برخی از ۷۲ عضو کاربندی نیروی بیشتری را نسبت به سایر اعضا تحمل می‌کنند که می‌توان آن را حداکثر نیروی محوری متناظر با زاویه‌ی پاکار انتخابی در نظر گرفت. نمودار تصویر ۱۰، حداکثر نیروی محوری وارده به اعضا را برای هر یک از زوایای انتخابی نشان می‌دهد. بدیهی است که هرچه مقدار عددی حداکثر نیروی محوری اعضا کم‌تر باشد، اختلاف بین حداکثر و حداقل نیروی محوری کم‌تر بوده و در نتیجه نیروی حاصل از وزن شمسه، توزیع بهتری در اعضای سازنده‌ی آن کاربندی دارد. یا به عبارتی دیگر، میزان کم‌تر حداکثر نیروی محوری، تعادل[۱۷] بهتری در مدل کاربندی را باعث خواهد شد. با توجه به نمودار تصویر ۱۰، بازه‌ی زوایای ۵۰ تا ۵۳ درجه‌ی پاکار قوس، کم‌ترین میزان حداکثر نیروی محوری را دارا هستند

تصویر ۱۰. *نمودار حداکثر نیروی محوری وارده به اعضا به ازای زوایای مختلف پاکار قوس پنج‌اوهفت در بازه ۲۰ تا ۷۰ درجه در کاربندی ۱۶ دوپا، قالب شاقولی*



و به بیانی دیگر، این بازه بهینه‌ترین بازه در بازه‌ی زوایای انتخابی است. از طرفی، در دیدی وسیع‌تر، بازه‌ی زوایای ۴۳ تا ۵۶ درجه مقادیری نزدیک به یکدیگر و کم‌تر از سایر حالات کاربندی دارند. با توجه به زوایای سنتی موجود برای قوس پنج‌اوهفت (۴۵ و ۵۴٫۷ درجه)، می‌توان گفت این زوایا بسیار به حالت بهینه‌ی خود نزدیک بوده و معماران و مهندسان ایرانی با آزمون‌وخطاهای خود طی قرن‌ها به انتخاب این زوایا دست یافته‌اند. تصویر ۹ نمونه‌هایی از تحلیل سازه‌ای انجام شده، بارگذاری و نتیجه‌ی نهایی را در چهار زاویه‌ی پاکار مختلف نشان می‌دهد.

بررسی وضعیت تکیه‌گاه‌ها در کاربندی

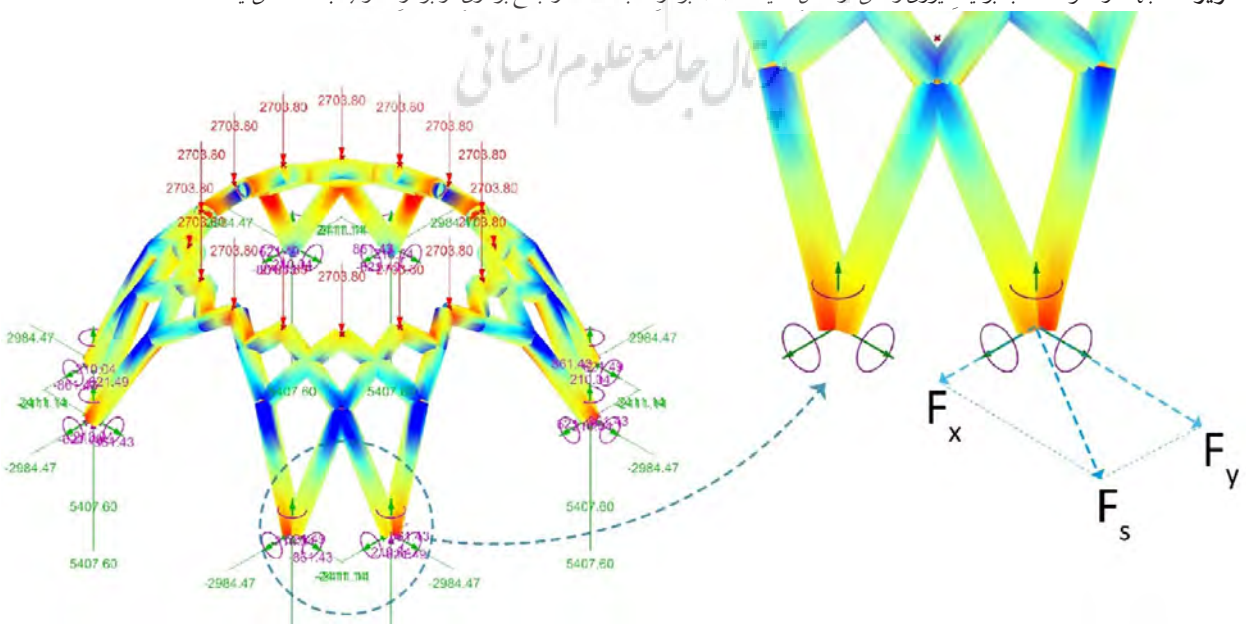
موردی که می‌توان در کاربندی‌های این پژوهش بررسی کرد، وضعیت تکیه‌گاه‌ها و میزان رانش در محل آن‌ها است. آنچه مسلّم است، در تمامی مدل‌های موجود کاربندی، محل هشت تکیه‌گاه ثابت بوده و تغییری ندارد؛ چراکه تغییر در زاویه‌ی پاکار قوس یا همان لنگه‌تاق، فقط ارتفاع کاربندی را متغیر می‌کند و تغییری در راستای طول یا عرض در آن ایجاد نمی‌کند. در نتیجه با بررسی آن‌ها می‌توان دریافت که کدام هندسه‌ی قوس باعث ایجاد رانش کم‌تری در محل تکیه‌گاه می‌شود. از طرفی به دلیل هندسه‌ی قرینه‌ی کاربندی در پلان و بارگذاری قرینه‌ی کاربندی، وضعیت هر هشت تکیه‌گاه مشابه بوده و در نهایت برآیند عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی در آن‌ها یکسان است. در این صورت، با بررسی برآیند عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی در یکی از آن‌ها می‌توان به مقایسه‌ی وضعیت تکیه‌گاه‌ها در حالات مختلف کاربندی رسید. تصویر ۱۱، نحوه‌ی به دست آمدن برآیند نیروهای رانشی را در یک تکیه‌گاه نشان می‌دهد. حاصل جمع برداری میزان رانش در محور طولی (x) و محور عرضی (y)، برآیند نیروی رانشی را در صفحه‌ی افقی به دست می‌دهد.

نمودار تصویر ۱۳، برآیند نیروهای رانشی برای یک تکیه‌گاه را به ازای بازه‌ی زوایای ۲۰ تا ۷۰ درجه نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصویر مشخص است، کم‌ترین نیروی رانشی در تکیه‌گاه، مرتبط با کم‌ترین زاویه در بازه‌ی انتخابی یا همان زاویه‌ی ۲۰ درجه برای پاکار قوس است. پیش‌تر در تصویر ۶، در تحلیل یک قوس به‌تنهایی مشاهده شد که با کم‌تر شدن زاویه‌ی پاکار قوس، میزان رانش در تکیه‌گاه‌ها و تنش در اعضا کاهش می‌یابد. حال‌آنکه در آن حالت، مقدار نیروی برابری به هر یک از قوس‌ها اعمال شده است. حال در تصویر ۱۲، درحالی‌که جرم شمسه و نیروی حاصل از آن دچار تغییر می‌شود، همچنان انتخاب زاویه‌ی پاکار کم‌تر، رانش کم‌تری را نیز به همراه خواهد داشت؛ اما در بازه‌ی زوایای ۴۲ تا ۵۱ درجه، میزان رانش نه‌تنها افزایش پیدا نکرده، بلکه کاهش بسیار جزئی نسبت به زوایای قبل و بعد خود در آن مشاهده می‌شود. گرچه این بازه از زوایا بهترین انتخاب‌ها از نظر میزان رانش در محل تکیه‌گاه نیستند، اما در کنار نتایج بخش قبلی می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که هندسه‌ی دو قوس پنج‌اوهفت تند و پنج‌اوهفت کند، نزدیک به بازه‌ی زوایایی است که هم از نظر برآیند نیروهای رانشی و هم از نظر وضعیت نیروهای محوری، حالت بهینه‌ای دارند. در کنار این موارد، میزان ارتفاع نهایی کاربندی را نیز باید در نظر گرفت. شکی نیست که این عامل نیز در انتخاب زاویه‌ی پاکار قوس مؤثر بوده است. به‌طور مثال، ارتفاع نهایی کاربندی در زاویه‌ی پاکار ۲۰ درجه، ۴۳٪ از ارتفاع کاربندی با قوس پنج‌اوهفت تند بیش‌تر است.

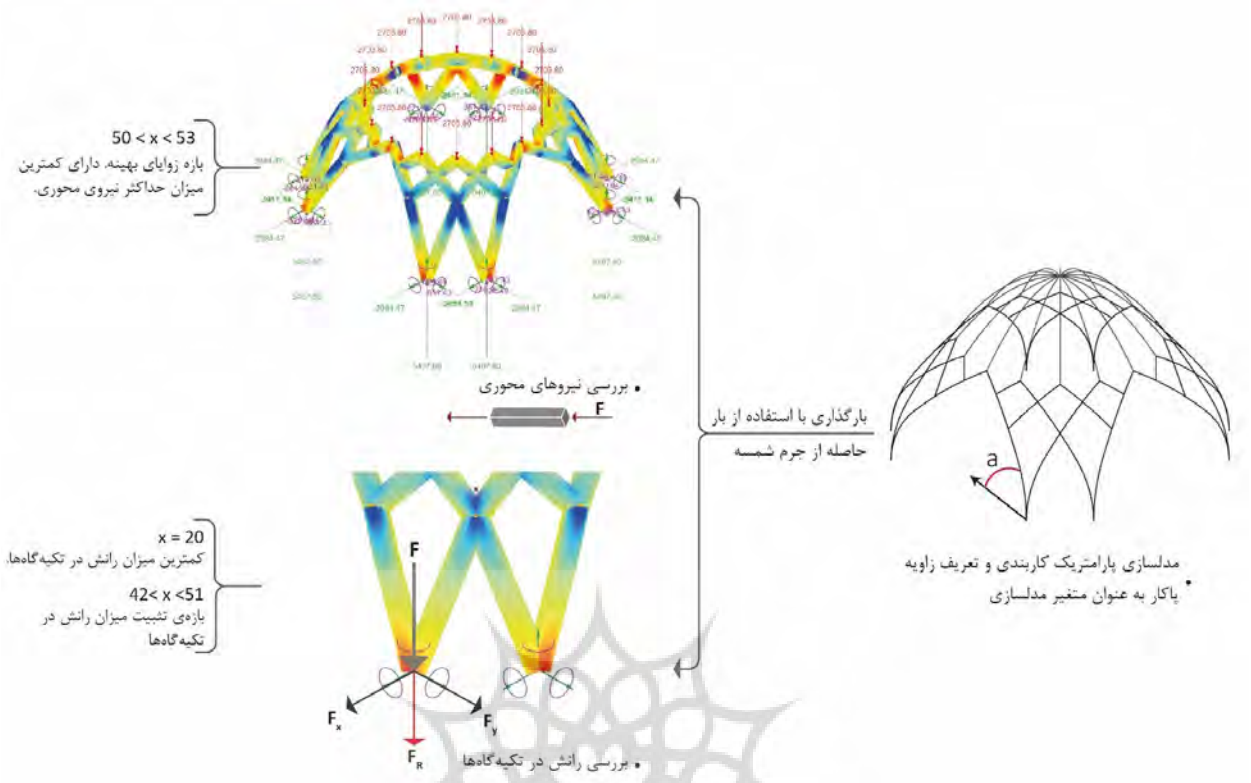
نتیجه‌گیری

این پژوهش بر آن بود تا تأثیر تغییرات هندسی بر عملکرد سازه‌ای عناصر معماری ایرانی را موردبررسی قرار دهد. در این راستا، عملکرد قوس پنج‌اوهفت و تغییر هندسه‌ی آن در کاربندی ۱۶ دوپا تحلیل شد. با توجه به شواهد موجود از عملکرد بهینه‌ی هندسه‌ی قوس پنج‌اوهفت، پژوهش‌های آینده می‌توانند به مقایسه و تحلیل سازه‌ای انواع قوس‌های موجود در معماری ایرانی، به‌ویژه به‌عنوان لنگه‌تاق در کاربندی، بپردازند. برای پاسخ به سؤال پژوهش، بازه‌ی زوایای ۲۰ تا ۷۰ درجه برای تحلیل سازه‌ای انتخاب شد. پس از بارگذاری و تحلیل مدل‌های متناظر با هر زاویه‌ی پاکار، میزان نیروهای محوری در تمامی ۷۲ عضو کاربندی بررسی شد. در هر حالت،

تصویر ۱۱. جهت و نحوه محاسبه برآیند نیروی رانشی در محل تکیه‌گاه (Fs). بردار Fs با استفاده از جمع برداری دو بردار Fx و Fy به دست می‌آید.



تصویر ۱۲. *تصویر دو وجه اصلی بررسی‌شده پس از بارگذاری کاربندی‌ها با زوایای مختلف و خلاصه‌ی نتایج حاصل از آن*



تصویر ۱۳. *برآیند نیروهای رانشی در محل یک تکیه گاه به ازای انتخاب زوایای مختلف پاکار قوس پنج‌اوهفت در بازه ۲۰ تا ۷۰ درجه در کاربندی ۱۶ دوپا، قالب شاقولی*

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

مقدار حداکثر نیروی محوری استخراج شد و با توجه به نمودار تصویر ۱۰ مشخص شد که بازه‌ی زوایای ۵۰ تا ۵۳ درجه کم‌ترین میزان حداکثر نیرو را دارد. در این بازه، تفاوت میان حداقل و حداکثر نیرو کم‌تر بوده و توزیع نیروها یکنواخت‌تر است. همچنین، بر اساس نمودار تصویر ۱۳، انتخاب زاویه‌ی کم‌تر برای پاکار قوس باعث کاهش رانش می‌شود، درحالی‌که با افزایش زاویه‌ی پاکار، میزان رانش در تکیه‌گاه‌ها افزایش می‌یابد. بااین‌حال، در بازه‌ی زوایای ۴۲ تا ۵۱ درجه، نه‌تنها افزایش رانش مشاهده نشد، بلکه کاهش جزئی نسبت به زوایای قبل و بعد نیز دیده شد. از برآیند این نتایج می‌توان چنین نتیجه گرفت که دو زاویه‌ی پاکار موجود برای قوس پنج‌اوهفت، یعنی پنج‌اوهفت تند (۴۵ درجه) و پنج‌اوهفت کُند (۵۴/۷ درجه)، بسیار نزدیک به بازه‌ی زوایای بهینه در هر دو تحلیل هستند. هرچند زوایای مختلفی برای پاکار قوس قابل انتخاب است، اما تنها با دلایل سازه‌ای نمی‌توان یک زاویه را برای ساخت برگزید و عوامل دیگری مانند فن ساخت، ارتفاع نهایی، تکنولوژی ساخت و زیبایی نیز در انتخاب آن مؤثرند؛ بنابراین، می‌توان گفت معماران و مهندسان ایرانی با در نظر گرفتن تمامی عوامل مؤثر، به انتخاب دو زاویه‌ی ۴۵ و ۵۴/۷ رسیده‌اند؛ این انتخاب شاید از نظر یک عامل به‌تنهایی بهترین نباشد، اما در مجموع بهترین انتخاب با در نظر گرفتن تمامی عوامل موجود است.

پی‌نوشت‌ها

۱. روشی در ترسیم و طراحی سنتی معماری ایرانی است که با چهارپرگار (چهار دایره هم‌مرکز یا متقاطع) و بدون نیاز به خط‌کش، شبکه‌ای از تناسبات و اشکال هندسی منظم مانند مربع، هشت‌ضلعی و ستاره‌ها ساخته می‌شود و پایه بسیاری از الگوهای تزئینی و سازه‌ای در بناهاست.

2. Rhino.

3. Grasshopper.

4. Karamba.

۵. *Parametric* در معماری، رویکردی طراحی است که فرم و سازمان فضایی بنا از طریق متغیرها (پارامترها) و روابط ریاضی میان آن‌ها تعریف و کنترل می‌شود؛ به‌گونه‌ای که با تغییر هر پارامتر، کل ساختار به‌صورت پویا تغییر می‌کند.

۶. روشی در طراحی دیجیتال است که به‌جای کدنویسی متنی، از گره‌ها و خطوط دیداری (Visual Nodes) برای بیان مراحل و قواعد الگوریتم استفاده می‌کند؛ این شیوه در معماری رایانه‌ای مانند *Grasshopper* یا *Dynamo* برای تولید فرم‌های پیچیده و پارامتریک به‌کار می‌رود.

۷. در معماری، به معنای تبعیت فرم و فضا از قواعد ازپیش‌تعیین‌شده و صلب است؛ به‌گونه‌ای که طراحی بر پایه‌ی قوانین ثابت و الزام‌آور (نه انتخاب آزاد طراح) شکل می‌گیرد.

۸. شیوه‌ای از پوشش و تزیین در معماری سنتی ایران است که با تقسیم‌بندی منظم طاق یا گنبد به بخش‌های هندسی و ایجاد قاب‌بندی‌های سه‌بُعدی (مانند رسمی‌بندی، مقرنس یا ترنج‌ها) هم نقش سازه‌ای در توزیع نیرو دارد و هم نقش تزئینی در غنای بصری فضا.

۹. نوعی کاربندی در معماری سنتی ایران است که بر پایه‌ی ترسیم ستاره‌ها و چندضلعی‌های منتظم ساخته می‌شود؛ این شیوه با ایجاد شبکه‌های ستاره‌ای در سطح طاق یا گنبد، هم سازه را سبک‌تر می‌کند و هم جلوه‌ی تزئینی پیچیده و هندسی پدید می‌آورد.

۱۰. قوسی ساده در معماری ایرانی که با یک مرکز و یک شعاع ترسیم می‌شود و شکل نیم‌دایره یا بخشی از آن را به‌وجود می‌آورد.

۱۱. قوسی در معماری ایرانی که با استفاده از دو مرکز پرگار ترسیم می‌شود؛ منحنی آن تیزه‌دارتر از قوس یک‌پرگاری است و برای ایجاد دهانه‌های بلندتر و انتقال بهتر نیرو به جرزها به‌کار می‌رود.

۱۲. عنصری در معماری سنتی ایران (به‌ویژه در کاربندی و سقف‌های طاقی) که نقش اصلی آن انتقال و توزیع وزن و نیروهای سازه‌ای از سقف یا گنبد به ستون‌ها و دیوارهاست و اغلب با فرم‌های هندسی منظم طراحی می‌شود.

۱۳. زبان برنامه‌نویسی سطح بالا و همه‌منظوره که ساده و خوانا است و در معماری دیجیتال و طراحی پارامتریک برای الگوریتم‌نویسی، پردازش داده‌ها و تولید فرم‌های پیچیده به‌کار می‌رود.

۱۴. رویکردی در طراحی معماری که فرم و سازمان فضایی بنا بر اساس دستورات و قواعد مرحله‌ای (الگوریتم) تولید می‌شود و امکان تغییر پویا با تغییر پارامترها را فراهم می‌کند؛ پایه‌ی بسیاری از روش‌های پارامتریک و دیجیتال است.

۱۵. پوشش یا طاقچه‌ای کوچک در بالای پنجره یا درگاه‌ها در معماری سنتی ایران که هم برای تهویه و نورگیری و هم برای زیبایی تزئینی به‌کار می‌رود.

۱۶. ۱۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب

17. Equlibrium.

فهرست منابع

Ahmadi, Mehdieh. (2009). Investigating the influence of Islamic philosophy on the traditional architecture of Iran (with a case study of the architecture of Imam Mosque in Isfahan) [Barrasi-ye tasir-e falsafe-ye eslami bar memari-ye sonati-ye Iran (ba barrasi-ye moredi-ye memari-ye masjed-e Emam-e Esfahan)]. *Taammolat Philosophy*, 1(2), 93–136. http://phm.znu.ac.ir/article_19505.html (in Persian)

Aidini, MirAli, Yaser Shahbazi, & Farhad Akhoundi. (2021). Analysis of Repetition Pattern and Geometric Characteristics of Regular Bases in Karbandi [Vakavi-ye mafahim-e moshtarak-e tekrar shavande va moshakhasat-e hendesi-ye zamineh-haye montazam dar karbandi]. *Athar, 42*(2), 194–210. http://athar.richt.ir/article-2-705-fa.html (in Persian)

Aine Chi, Shahrazad, & Vali Beyg, Nima (2023). Analyzing Effect of Arithmetic and Geometrical Features on Karbandis' Drawing Process Based on the Approach of Achieving New Optimal Drawing Methods [Tahlil-e asar-e vizhegi-haye hesabi va hendesi bar farayand-e tarsim-e karbandiha ba ruykard-e dasyabi be raveshhaye tarsim-e behine-ye novin]. *Journal of Research on Archaeometry, 9* (1), 40-25. https://jra-tabriziau.ir/article-1-342-fa.html. (in Persian)

Aita, Danila, Federico Foce, Riccardo Barsotti, & Stefano Bennati. (2007). Collapse of Masonry Arches in Romanesque and Gothic Constructions. In *5th International Conference on Arch Bridges.*

Akbari, Hassan. (2022). *Neighborhood mosque design based on traditional curved coverings* [Tarahi-ye masjed-e mahale bar paye-ye poshesh-haye khamide-ye sonati] [Master's thesis, University of Ghom]. Ghom University Dissertations and Theses (ETDs).

AmjadMohammadi, Amir, Ahad Nejad Ebrahimi, & Yaser Shahbazi. (2020). Karbandi Geometry in Iranian Architecture; A Response to the Challenge of Rasmi and Akhtari Karbandi [Hendese-ye karbandi dar memari-ye Iran; pasokh be chalesh-e karbandi-ye rasmi va akhtari]. *Reaserches in Islamic Architecture, 8*(1), 4–26. http://jria.iust.ac.ir/article-1-1268-fa.html (in Persian)

Bozorgmehri, Zohreh. (2006). *Geometry in Architecture* [Hendese dar memari]. 3rd ed. Tehran: Subhan Noor: Organization of Cultural Heritage of the country.

Garofalo, Vincenza. (2016). The Geometry of a Domed Architecture: A Stately Example of Kārbandi at Bagh-e Dolat Abad in Yazd. *Nexus Network Journal,* 18(1), 169–95. https://doi.org/10.1007/s00004-015-0286-0

Golchin, H. (2016). Five and seven or panj o haft? Geometric expression in the structure of compass arches in Iran and clarification of a famous naming ambiguity *[5 va 7 ya panj o haft? Bayan-e hendesi dar sakhtar*-e ghous-haye pergari-ye Iran va raf-e eham-e mojood dar

nam va tarsim-e yeki az dorehaye ma'ruf]. *Athar Quarterly, 35*(67), 67–76. http://journal.richt.ir/athar/article-1-86-fa.html

Hijazi, Mehrdad, & Rasool Mirqadri. (2004). Seismic analysis of Iranian domes [Tahlil-e larzei-ye gonbad-haye Irani]. *Technical Faculty Journal, 38*(6). https://jfe.ut.ac.ir/article_10224.html (in Persian)

Izadpanah, Farzin, & Servanaz Sardari. (2020). Seismic stability analysis of three Iranian arches [Tahlil-e paydari-ye larzei-ye se ghous-e Irani. Motale'at-e Memari-ye Iran]. *Iranian Architectural Studies, 9*(17), 143–63. https://www.sid.ir/fa/Journal/ViewPaper.aspx?ID=553565. (in Persian)

Khoee Hamidreza. (2006). The Nature of Architectural History, Its Role in Understanding and Creating Architecture [Chisti-ye tarikhe memari va jaygah-e an dar fahm va ijad-e asar-haye memari]. *Golestan Honar, 2* (4) :20-27. https://www.magiran.com/paper/450467 (in Persian)

Lengyel, G, & K Bagi. (2015). Numerical Analysis of the Mechanical Role of the Ribs in Groin Vaults. *Computers And Structures*, 158, 42–60. http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2015.05.032

Memarian, Gholamhossein. (2018). *Persian Architecture, Structure* [Memari-ye Irani]. Tehran: Goljam Publication. (in Persian)

Minoui, Farnoosh, Lida Belilan, Farzad Derakhshan, & Vahid Salmasi. (2014). Structural Investigation of the Dome of the Mosques in Different Periods of Iran's History y [Barrasi-ye sazei-ye gonbad-e masajed-e jame dar dorehaye mokhtalef-e tarikhe Iran]. *Design and Symbol, 6*(8), 149–56. http://jfa.iust.ac.ir/article-1-86-fa.html (in Persian)

Mohammadi, Amir Amjad, Maziar Asefi, & Ahad Nejad Ebrahimi. (2018). The Geometrical Regularization for Covering Irregular Bases with Karbandi. *Nexus Network Journal, 20*(2), 331–52. https://doi.org/10.1007/s00004-018-0373-0

Mohammadian Mansour, Sahib, & Sinai Faramarzi. (2011). Typology and compilation of the geometric structure of use in Iranian architecture Guneh shenasi va tadvin-e sakhtar-e hendesi-ye karbandi dar memari-ye Iran]. *Journal of fine arts - architecture and urban planning, 3*(4), 81–96. https://jfaup.ut.ac.ir/article_29680.html (in Persian)

Nejad Ebrahimi, Ahad, Yasser Shahbazi, & Amir Amjad Mohammadi. (2017). Typology of Rasmibandi and Karbandi in Iranian Architecture Based on Construction and Use [Guneh shenasi-ye sakhtari-ye karbandi va rasmi bandi dar memari-ye Iran bar mabna-ye sakhtgah va karbast]. *Architectural Culture and Islamic Urbanism, 3*(1), 25–41. http://ciauj-tabriziau.ir/article-1-175-fa.html (in Persian)

Pouraminian, Majid, Arjang Sadeghi, & Somia Pourbakhshian. (2012). Investigating the seismic stability of Iranian brick arches (research note) [Tarahi-ye masjed-e mahale bar paye-ye poshesh-haye khamide-ye sonati]. *Civil and Environmental Engineering (Technical College), 42*(1), 49–55. https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=247257 (in Persian)

Shaarbaaf, Asghar. (1993). *Girih and Karbandi* [Gereh va karbandi]. Tehran: Iran's Cultural Heritage Organization. (in Persian)

Sheikh Darani, Roya, & Rostami, Rahele. (2016). Drawing of the geometry and structure of the arch and chafd in the Hakim Mosque of Isfahan in the Safavid period [Tarsim-e hendese va saz-e ghous va chafd dar masjed-e Hakim-e Esfahan dar dore-ye Safaviye]. In: *The first national conference of Islamic architecture, urban heritage and sustainable development*. https://civilica.com/doc/553027 (in Persian)

Tahbaz, Mansoura. (2004). Traces of holiness in Islamic architecture of Iran [Raddepa-ye ghadassat dar memari-ye eslami-ye Iran]. *Soffeh, 14*(4–3). https://soffeh.sbu.ac.ir/article_99981.html (in Persian)

Tehrani, Farhad; Mehdizadeh, Fatemeh; Hijazi, Mehrdad, & Wali Beyg, Nima. (2012). Geometrical and mathematical features in the structure of Panj-O-Haft Tond Arch in the cover of the Iranian Barrel Vault [Vizhegi-haye hendesi va riyazi dar sakhtar-e chafd-e panj o haft tond dar poshesh-e taq-e ahang-e Irani]. *Journal of Conservation and Architecture in Iran, 2*(3), 39–50. https://mmi.aui.ac.ir/article-1-804-fa.html (in Persian)

Wikimedia Commons contributors. (2021). File:Khaj Rabi 4.Jpg. *Wikimedia Commons*. https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Khaj_rabi_4.jpg&oldid=608329401 (April 23, 2023).

Wikimedia Commons contributors. (2022). File: Khajeh-Rabi-Tmk ple(10).Jpg. *Wikimedia Commons*. https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:(10)_آرامگاه_خواجه_ربیع.jpg&oldid=696606744 (April 2023 ,23).

Zamrashidi, Hossein, & Zahra Zamrashidi. (2014). The architecture of Iranian mosques and its sacred arts [Memari-ye masajed-e Iran va honar-haye ghodsi-ye an]. *Studies of the Islamic Iranian City*, (15), 5–20. https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?ID=257036. (in Persian)

آئینه‌چی، شهرزاد و ول بیگ، نیما (۱۴۰۲). تحلیل اثر ویژگی‌های حسابی و هندسی بر فرایند ترسیم کاربندی‌ها با رویکرد دستیابی به روش‌های ترسیم بهینه نوین. *پژوهه باستان‌سنجی*، ۹(۱)، ۲۵–۴۰. https://jra-tabriziau.ir/article-1-342-fa.html

آیدینی، میرعلی؛ یاسر شهبازی و فرهاد آخوندی (۱۴۰۰). واکاوی مفاهیم مشترک تکرارشونده و مشخصات هندسی زمینه‌های منتظم در کاربندی. *فصلنامه اثر*، ۴۲(۲)، ۱۹۴–۲۱۰. http://athar.richt.ir/article-2-705-fa.html

احمدی، مهدیه (۱۳۸۸). بررسی تأثیر فلسفه اسلامی بر معماری سنتی ایران (با بررسی موردی معماری مسجد امام اصفهان). *تأملات فلسفی*، ۱(۲)، ۹۳–۱۳۶. https://phm.znu.ac.ir/article_19505.html

اکبری، حسن (۱۴۰۱). طراحی مسجد محله بر پایه پوشش‌های خمیده سنتی [پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه قم]. مخزن پایان‌نامه‌ها و رسالات الکترونیکی دانشگاه قم.

امجد محمدی، امیر؛ نژادابراهیمی، احد و شهبازی، یاسر (۱۳۹۹). هندسه کاربندی در معماری ایران؛ پاسخ به چالش کاربندی رسمی و اختری. *مجله پژوهش‌های معماری اسلامی*، ۸(۱)، ۴–۲۶. http://jria.iust.ac.ir/article-1-1268-fa.html

ایزدپناه، فرزین و سرداری، سروناز (۱۳۹۹). تحلیل پایداری لرزه‌ای سه قوس ایرانی. *مطالعات معماری ایران*، ۹(۱۷): ۱۴۲–۶۳. https://jias.kashanu.ac.ir/article_111844.html

بزرگمهری، زهره (۱۳۸۵). *هندسه در معماری* (ویرایش سوم). سبحان نور: سازمان میراث فرهنگی کشور.

پورامینیان، مجید؛ صادقی، ارژنگ و پوربخشیان، سمیه (۱۳۹۱). بررسی پایداری لرزه‌ای قوس‌های آجری ایرانی. *نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز*، ۴۲ (۶۶)، ۴۹–۵۵. https://ceej.tabrizu.ac.ir/article_3431.html

تهرانی، فرهاد؛ مهدی زاده، فاطمه؛ حجازی، مهرداد و ولی بیگ، نیما (۱۳۹۱). ویژگی‌های هندسی و ریاضی در ساختار چفد پنج او هفت تند در پوشش تاق آهنگ ایرانی. *نشریه علمی مرمت و معماری ایران*، ۲(۳)، ۳۹–۵۰. https://mmi.aui.ac.ir/article-1-804-fa.html

حجازی، مهرداد و میر قادری، رسول (۱۳۸۳). تحلیل لرزه‌ای گنبدهای ایرانی. *نشریه دانشکده فنی*، ۳۸(۶)، ۷۴۷–۷۵۷. https://jfe.ut.ac.ir/article_10224.html

خویی، حمیدرضا (۱۳۸۶). چیستی تاریخ معماری و جایگاه آن در فهم و ایجاد آثار معماری. *فصلنامه گلستان هنر*، ۲(۴)، ۲۰. https://www.magiran.com/paper/450467

زمرشیدی، حسین و زمرشیدی، زهرا (۱۳۹۳). معماری مساجد ایران و هنرهای قدسی

آن. *مطالعات شهر ایرانی اسلامی*، ۱۵(۴): ۵-۲۰. https://www.noormags.ir/view/en/articlepage/1351769
شعرباف، اصغر (۱۳۷۲) *گره و کاربندی*. تهران. سازمان میراث فرهنگی کشور.
شیخ دارانی، رویا و رستمی، راحله (۱۳۹۵). ترسیم هندسه و سازه قوس و چفد در مسجد حکیم اصفهان در دوره صفویه. *اولین کنفرانس ملی معماری اسلامی*، میراث شهری و توسعه پایدار https://civilica.com/doc/553027.
طاهباز، منصوره (۱۳۹۹). ردپای قداست در معماری اسلامی ایران. *صفه*، ۱۴(۴-۳). https://soffeh.sbu.ac.ir/article_99981.html
گلچین، حجت (۱۳۹۵)، ۵ و ۷ یا پنج او هفت؟ بیان هندسی در ساختار قوس‌های پرگاری ایران و رفع ابهام موجود در نام و ترسیم یکی از دورهای معروف، *فصلنامه اثر*، ۳۵(۶۷)، ۶۷-۷۶. http://journal.richt.ir/athar/article-1-86-fa.html
محمدیان منصور، صاحب و فرامرزی، سینا (۱۳۹۰). گونه شناسی و تدوین ساختار هندسی کاربندی در معماری ایران. *نشریه هنرهای زیبا: معماری و شهرسازی*، ۳(۴)، ۸۱-۹۶. https://jfaup.ut.ac.ir/article_29680.html
معماریان، غلامحسین (۱۳۹۱). *معماری ایرانی: نیارش*. نشر نغمه نواندیش.
مینویی، فرنوش؛ بلیلان، لیدا؛ درخشان، فرزاد و سلماسی، وحید (۱۳۹۳). بررسی سازه‌ای گنبد مساجد جامع در دوره‌های مختلف تاریخ ایران. *دوفصلنامه معماری و شهرسازی طرح و نماد*، ۶(۸)، ۱۴۹-۵۶. http://jfa.iust.ac.ir/article-1-86-fa.html
نژاد ابراهیمی، احد؛ شهبازی، یاسر و امجدمحمدی، امیر (۱۳۹۶). گونه‌شناسی ساختاری کاربندی و رسمی‌بندی در معماری ایران بر مبنای ساختگاه و کاربست. فرهنگ *معماری و شهرسازی اسلامی*، ۳(۱)، ۲۵-۴۱. http://ciauj-tabriziau.ir/article-1-175-fa.html

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی