



یکپارچگی فرم معماری و سازه در شکل‌گیری ساختار کالبدی بناهای تاریخی با استفاده از قوس‌های ایرانی

جمال‌الدین مهدی‌نژاد^{۱*}، علی شرقی^۲، فائزه اسدپور^۳

۱۳۹۸/۰۵/۰۷

تاریخ دریافت مقاله :

۱۳۹۹/۰۹/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله :

چکیده

بیان مساله: اجزای سازه‌ای در یک بنا در کنار فرم و عملکرد، نقش موثری در مطلوبیت کیفیت فضای معماری دارد. در بناهای تاریخی ایران سیستم‌های سازه‌ای مانند گنبد و طاق که عمدتاً دارای ارتفاع و دهانه‌های بزرگ هستند، به وسیله‌ای قوس‌هایی ساخته شدند که رفتار سازه‌ای مناسبی را در پی بارهای وارده، نشان می‌دهند. یکی از مهم‌ترین این قوس‌ها، چقد و قوس‌های پنج‌اوهفت است که در مقاومت و یکپارچگی کلیه اعضای سازه‌ای یک بنا بسیار موثر است.

سوال تحقیق: نحوه ساخت و عملکرد این قوس از لحاظ سازه‌ای در شکل‌گیری کالبد بناهای تاریخی چگونه است؟

اهداف تحقیق: شناسایی و تحلیل سازه‌ای ساختار شکل‌دهنده بناهای مورد مطالعه در این پژوهش با استفاده از قوس پنج‌اوهفت در جهت یکپارچگی و تطابق معماری با سازه در بناهای امروزی

روش تحقیق: این پژوهش از نوع توصیفی - تحلیلی است که با مطالعه اسنادی - کتابخانه‌های و برداشت داده‌های میدانی از طریق نرم‌افزار اتوکد و اسکچ‌آپ، ساختار سازه‌ای شکل گرفته با استفاده از قوس (چقد)های پنج‌اوهفت بناهای مسجد حکیم اصفهان، بقعه میربزرگ آمل، بقعه درب امام اصفهان مدل‌سازی شده است.

مهم‌ترین یافته‌ها و نتیجه‌گیری تحقیق: نتایج نشان داده است در این بناها، تعامل میان سازه و معماری زمانی برقرار می‌شود که شیوه ساخت مناسب استفاده شود که در سه بنای مورد مطالعه با حفظ تناسب ابعاد در ارتفاع، دهانه و احجام معماری در طاق‌ها با انواع قوس‌های پنج‌اوهفت با سه دهانه‌ی $(L) 2/5 m$ و $4/5 m$ و $6/5 m$ و سه ارتفاع پایه $(h) 3/5 m$ ، $5 m$ و $6/5 m$ و سه ابعاد مقطع پایه $(a) 1/5 m$ ، $2/5 m$ و $3/5 m$ ، زمانی طاق در حالت بهینه و پایدار قرار دارد که ضریب پایداری قوس‌های پنج‌اوهفت تند، معمولی و کند در آن به ترتیب $2/4$ و $1/95$ و $1/6$ باشد. در واقع معماران سنتی بدین صورت ماهرانه جنبه‌های سازه‌ای و فنی بنا را با استفاده از طاق‌های متشکل از قوس‌های پنج‌اوهفت در راه نیل به فضایی زیبا و با کیفیت به خدمت گرفته‌اند و توانستند قناسی‌ها و ناموزونی‌هایی که در آرایش جرزها به‌عنوان تهدید قلمداد می‌شد را با بهره‌گیری از این نوع قوس به فرصتی جهت بروز و ظهور جنبه‌های زیبایی‌شناسانه طراحی فضا بدل کنند.

کلمات کلیدی: فرم معماری، سازه، ساختار کالبدی، قوس پنج‌اوهفت، کیفیت فضا.

^{۱*} دانشیار، دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران. ایمیل: mahdinejad@sru.ac.ir

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران. ایمیل: sharghi@sru.ac.ir

^۳ دانشجوی دکتری معماری، دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران. ایمیل: Faezeh.Asadpour@sru.ac.ir

۱- مقدمه

همکارانش، (۱۳۹۱: ۳۹). در ساختمان‌هایی با معماری اسلامی و سنتی، حفظ تناسب ابعاد در ارتفاع، دهانه و احجام معماری یکی از مهم‌ترین قیدهای طراحی هستند که می‌توانند به‌صورت کاذب ساخته و به‌عنوان اجزای الحاقی به سازه اصلی متصل شوند و یا می‌توان، سازه را با این احجام هماهنگ نمود و حجم معماری را توأم با اجرای سازه، ایجاد کرد. از این حیث در این پژوهش، ساختار و عناصر و اجزا تکنیک‌ها، شیوه‌های معماری بناهای مسجد حکیم اصفهان، بقعه میربزرگ، بقعه درب امام اصفهان با استفاده از قوس(چفد)های پنج‌اوهفت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

یکی از مهم‌ترین عناصر مورد استفاده در بخش‌های مختلف معماری ایران، قوس می‌باشد که در طول دوره‌های مختلف رشد و گسترش یافته است. قوس‌ها از جنبه‌های گوناگونی مانند کیفیت تحمل وزن(باربر و غیرباربر)، چگونگی تیزه، میزان خیز و همچنین از منظر ریخت و فرم دسته‌بندی می‌شوند. یکی از مهم‌ترین این قوس‌ها در ایران خانواده‌ی قوس پنج‌اوهفت است که از دیدگاه خیز، به صورت‌های تند، معمولی و کند (این چفد گونه تیز ندارد) در بخش‌های باربر و غیرباربر یک بنا، مخصوصاً بناهای دوره اسلامی مورد استفاده قرار گرفته است. در احداث بناهای عظیم این دوران، آنچه که برای معماران ایرانی همواره حائز اهمیت بوده، رفتارهای سازه‌ای این قوس‌ها و نحوه توزیع بار در طاق و تویزه‌هایی مورد استفاده‌ی بخش‌های مختلف یک بنا بوده که در چگونگی آسیب‌پذیری و مقاومت و یکپارچگی کلیه اعضای سازه‌ای آن بنا اثرگذار است. بدین صورت شناخت توان باربری این قوس‌ها و تحلیل نقش سازه‌ای آن در بناهای با مصالح سنتی دوره اسلامی که عمدتاً با ارتفاع و دهانه‌های بزرگ و احجام سنگین ساخته می‌شدند، از ضروریات انجام این پژوهش است. لذا نگارندگان از طریق مدل کردن بخش‌هایی از ۳ بنای منتخب این پژوهش که قوس‌های پنج‌اوهفت در آن به کار برده شده است به تحلیل رابطه این عناصر سازه‌ای با معماری پرداختند.

در معماری اسلامی ایران معنا، زیبایی، شکل و سازه چهار عامل اساسی هستند که با ترکیبی متناسب از آن‌ها معمار سنتی قادر است نقشی از جهان معنا را در عالم مادی متجلی سازد. وجود یک ارتباط منطقی و منسجم بین این عوامل بوده که در دوره اسلامی، معماری ایران را در موقعیتی ممتاز قرار داده است (حجازی و مهدی‌زاده سراج، ۱۳۹۳: ۷). از این حیث بررسی و مطالعه تاریخ معماری، یک سری اصول ثابت و ماندگار را بیان می‌کند که همواره در طول حیات معماری با آن عجین بوده و می‌توان آن‌ها را جزء ذات معماری به‌شمار آورد. رابطه معماری با سازه‌اش، از این نوع است (خلیل‌نژاد، ۱۳۹۵: ۱). سازه در معماری به‌عنوان اولین مسئله‌ی مهم برپاسازی فضا مطرح است(بقایی، ۱۳۸۷: ۲۸)، هرگاه سازه با معماری یکی شد و به صورت مکمل همدیگر عمل کرد به میزان زیادی به مطلوبیت نزدیک و هنگامی که این دو، از یکدیگر دور شدند هدف نیز چندان حاصل نیامد(خلیل‌نژاد، ۱۳۹۵: ۱). از نظر منطقی، هنگامی که فرم‌های مناسب برای انتقال بار در معماری به کار می‌روند می‌توان تطابق سازه با معماری را دنبال نمود به عبارت دیگر برای تطابق سازه با معماری سه عامل تعیین‌کننده است: فرم، مصالح و سیستم (عزیزیان و همای، ۱۳۹۴: ۳). در گذشته محدودیت‌های سازه‌ای، اغلب عاملی بود که معماری با سازه تطابق پیدا می‌کرد، به‌عنوان مثال شکل‌گیری فرم‌های قوس و گنبد، به احتمال قوی ابتدا، منتج از محدودیت‌های باربری مصالح و روش‌های ساخت بوده و فرم‌های چشم‌نوازی که برای آن‌ها خلق شده است ممکن است تلاش معماری برای تطابق با سازه تلقی گردد (عزیزیان و همای، ۱۳۹۴: ۱). در سقف‌های بناهای تاریخی که اکثراً به صورت طاق‌پوش هستند، توسط تیر طاق‌هایی با قوس‌های معین پوشش داده و فشار حاصله از پوشش سقف در ناحیه پاکار (شروع قوس) فوق‌العاده زیاد می‌باشد و از این میان یکی از قوس‌های ایرانی که مبنای بسیاری از طاق‌ها به حساب می‌آید قوس(چفد) پنج‌اوهفت است (پارسا و فخار تهرانی، ۱۳۹۲: ۵) از این چفد در تویزه‌های باربر بسیاری استفاده می‌شود(ولی بیگ و

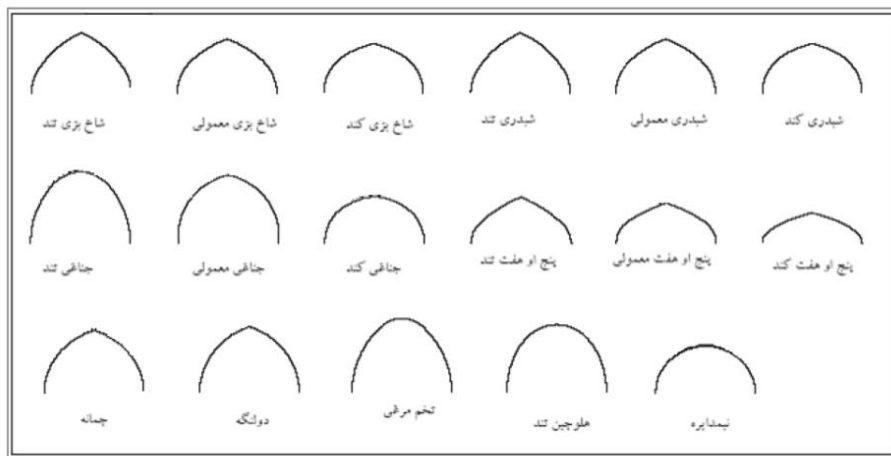


تزیینی (زمرشیدی، ۱۳۸۹: ۲۷) ۳- قوس‌های غیرباربر. با توجه به آنچه در جدول ۱ آمده است، می‌توان چفدها را از جنبه‌های گوناگونی مانند کیفیت تحمل وزن، چگونگی تیزه، میزان خیز و همچنین از منظر ریخت و فرم دسته‌بندی نمود. (ولی بیگ و همکاران، ۱۳۹۱: ۴۱) چفدهای باربر گروهی هستند که از تکرارشان طاق‌های باربر و از دورانشان گنبدهای وسیع به وجود می‌آیند. در ایران بعد از اسلام این چفدها تا دهانه‌های بالاتر از ۱۶ گز را نیز در بر گرفته‌اند (گز کوچک + ۹۴ سانتیمتر و گز سطلانی = ۱۰۶/۶ سانتیمتر) و همان‌طور که از نامشان پیداست، قادرند بارهای وارده را بر خود به خوبی تحمل کنند (شیخ‌دارانی و رستمی، ۱۳۹۵: ۷).

تویزه در لغت به معنی قوس و قزح و شاخه‌های خمیده می‌باشد و در اصطلاح معماری سنتی، باریکه‌های باربری از سقف‌های قوسی شکل است که عامل انتقال بارهای فشاری به دیواره‌های جانبی و پایینی می‌باشد، مطابق شکل ۱، هر تویزه متشکل از دو لنگه گچی در دو طرف تویزه بوده که بین این دو لنگه با آجرکاری پر می‌شود (معماریان، ۱۳۶۷: ۵۶).

۲-۶- انواع چفدهای معماری و اجزای آن

چفدهای گوناگونی در بناهای معماری ایران مورد استفاده قرار می‌گیرد که نمونه‌هایی از آن در شکل ۲ آمده است. قوس‌هایی که در آثار ایران به کار گرفته، بر سه دسته می‌باشند: ۱- قوس‌های باربر ۲- قوس‌های



شکل ۲- گونه‌هایی از چفدهای به کار رفته در معماری ایرانی (ولی بیگ و همکاران، ۱۳۹۱: ۴۱)

جدول ۱- دسته‌بندی چفدها از دیدگاه‌های گوناگون (ولی بیگ و همکاران، ۱۳۹۱: ۴۱)

از دیدگاه باربری	از دیدگاه تیزه	از دیدگاه خیز	از دیدگاه ریخت‌شناسی
۱. باربر	۱. مازه‌ای (بیز)	۱. تند	۱. شادری
۲. غیر باربر	۲. تیزه‌دار (جناغی)	۲. تیز	۲. سه‌بخشی
	۳. کللیل (آمیزه مازه‌ای و تیزه‌دار)	۳. کند	۳. پنج او هفت
	۴. شکنجی	۴. گفته	۴. ...

بناهای تاریخی از ادوار گوناگون مشاهده کرد، کهن‌ترین نمونه‌های یافت شده از این چفد را می‌توان در هفت تپه و چغازنبیل دید (پیرنیا، ۱۳۷۳: ۹). از این چفد در بسیاری از تویزه‌های باربر استفاده می‌شود. در کاربردی‌ها نیز چفد

۳-۳- نحوه ترسیم انواع قوس پنج‌اوهفت

یکی از قوس‌های ایرانی که مبنای بسیاری از طاق‌ها به حساب می‌آید قوس (چفد) پنج‌اوهفت است. (پارسا و فخار تهرانی، ۱۳۹۲: ۵) چفد پنج‌اوهفت تند را می‌توان در



۲-۳-۶- ترسیم قوس پنج‌اوهفت تند (روش دوم)

در این روش، قوس پنج‌اوهفت تند مطابق مراحل زیر ترسیم می‌گردد (زمرشیدی، ۱۳۷۸: ۲۰۶).

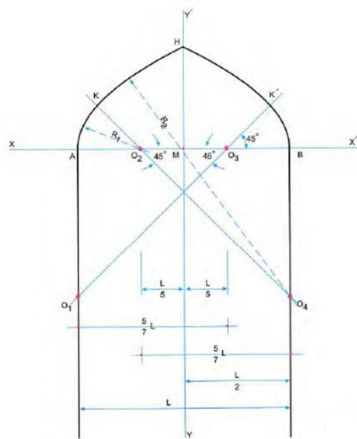
۱- محورهای عمودی و افقی و امتداد دو ستون ترسیم می‌شود.

۲- طول NN' روی محور عمودی به اندازه $L/2$ استخراج می‌شود.

۳- به شعاع BN' و AN' و مراکز A و B دو قوس زده می‌شود تا محور افقی در نقاط O_2 و O_3 و امتداد ستون‌ها در نقاط O_1 و O_4 قطع شود.

۴- نقاط O_2 به O_4 و O_3 به O_1 وصل می‌شود.

۵- به مرکز O_2 و O_3 و شعاع O_2A و O_3B کمانی رسم می‌شود. امتداد خطوط O_4O_2 و O_3O_1 در نقاط K و K' قطع می‌شود و به شعاع O_1K و O_4K و مراکز O_1 و O_4 ادامه‌ی کمان تا محل تقاطع محور عمودی رسم می‌شود (شکل ۴).



شکل ۴- قوس پنج‌اوهفت تند (روش دوم) (زمرشیدی، ۱۳۷۸: ۲۰۶)

۳-۳-۶- ترسیم قوس پنج‌اوهفت معمولی

ترسیم قوس پنج‌اوهفت معمولی مطابق مراحل زیر انجام می‌شود (زمرشیدی، ۱۳۷۸: ۲۰۸).

مورد استفاده چفد پنج‌اوهفت است (ولی بیگ و همکاران، ۱۳۹۱: ۳۹). بسیاری از چفدها از دیدگاه خیز خود به چند دسته تقسیم می‌شوند. چفد پنج‌اوهفت نیز با توجه به خیز آن به سه دسته تقسیم می‌شود؛ تند، کند و گفته این چفد گونه تیز ندارد (ولی بیگ و همکاران، ۱۳۹۱: ۳۹).

۱-۳-۶- ترسیم قوس پنج‌اوهفت تند (روش اول)

در این روش، قوس پنج‌اوهفت تند مطابق مراحل زیر ترسیم می‌گردد (زمرشیدی، ۱۳۸۹: ۳۱).

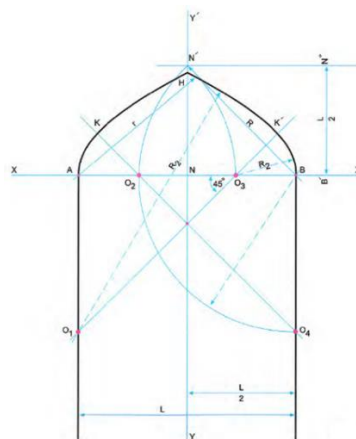
۱- محور عمودی و افقی و امتداد دو ستون رسم می‌شود.

۲- نقاط O_2 و O_3 روی محور افقی به فاصله $L/5$ از محور عمودی جدا می‌شود.

۳- خطوطی با زاویه ۴ درجه از این دو نقطه رسم می‌شود تا امتداد ستون‌ها را در نقاط O_1 و O_4 قطع کند.

۴- به شعاع O_2A و مرکز O_2 و O_3 قسمتی از کمان قوس رسم می‌شود تا خطوط O_2O_4 و O_3O_1 را به ترتیب در نقاط K و K' قطع نماید.

۵- ادامه کمان قوس به مرکز O_1 و O_4 و O_1K و O_4K تا نقطه H محل تلاقی کمان و محور عمودی رسم می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳- قوس پنج‌اوهفت تند (روش اول) (زمرشیدی، ۱۳۷۸: ۲۰۶)

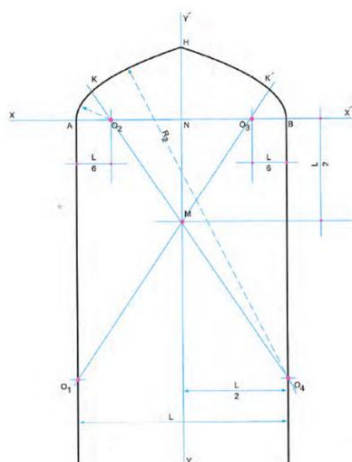


۳- نقطه M به فاصله $L/2$ از محل برخورد دو محور یعنی نقطه‌ی N روی محور عمودی تعیین می‌شود.

۴- نقاط O_1 و O_4 از تقاطع خطوط O_2M و O_3M با امتداد دو ستون به دست می‌آید.

۵- دو کمان به شعاع O_2A و مراکز O_2 و O_3 رسم می‌شود تا خطوط MO_2 را در نقاط K و K' قطع کند.

۶- ادامه‌ی قوس به مراکز O_1 و O_4 و شعاع O_1K و O_4K' تا نقطه H رسم می‌شود (شکل ۶).



شکل ۶- قوس پنج‌اوهفت کند (زمرشیدی، ۱۳۷۸: ۲۱۴)

۴-۶- رفتار سازه‌ای طاق‌های چهاربخش ساخته شده با استفاده از انواع قوس پنج‌اوهفت

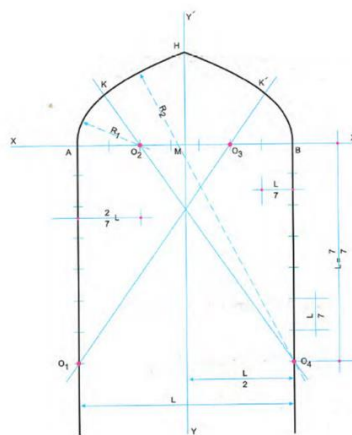
تا زمانی که قوس‌ها مشابه فرم‌های منحنی طنابی رفتار می‌کنند پایدار خواهند بود، منطبق بودن بر منحنی طنابی با سه شرط معلوم بودن دهانه، خیز و نیروی مشخص امکان‌پذیر خواهد بود که در فرض فوق دهانه و خیز برای یک سازه مشخص ثابت می‌باشد. ولی تغییر شرایط بارگذاری می‌تواند باعث تغییر شکل منحنی طنابی حاصله شود و در آن صورت دیگر وضعیت موجود منطبق بر منحنی طنابی جدید نخواهد بود. برای ممانعت از چنین امری شکل قوس باید به قدری فشرده گردد که هیچ‌گونه خمش رو به بالا در آن وجود نداشته باشد.

۱- پس از رسم دو محور افقی و قائم امتداد دو ستون زیر ترسیم می‌شود.

۲- محور افقی در فاصله‌ی بین دو ستون به هفت واحد مساوی تقسیم می‌شود. و دو مرکز O_2 و O_3 به فاصله‌ی دو واحد از هر ستون روی آن مشخص می‌شود.

۳- از نقاط A و B، محل تقاطع محور افقی با ستون‌ها، دو نقطه به فاصله‌ی دهانه روی ستون‌ها انتخاب می‌شود تا نقاط O_1 و O_4 به دست آید.

۴- به شعاع O_2A و O_3B و مراکز O_2 و O_3 دو کمان ترسیم می‌شود تا امتداد خطوط O_1O_3 و O_4O_2 در نقاط K و K' قطع شود. سپس به مراکز O_1 و O_4 شعاع O_1K و O_4K' در کمان دیگر رسم می‌شود تا محور عمودی را در H قطع کند (شکل ۵).



شکل ۵- قوس پنج‌اوهفت معمولی (زمرشیدی، ۱۳۷۸: ۲۰۸)

۴-۳-۶- ترسیم قوس پنج‌اوهفت کند

ترسیم قوس پنج‌اوهفت کند مطابق مراحل زیر انجام می‌شود (زمرشیدی، ۱۳۷۸: ۲۱۴).

۱- دو محور افقی و عمودی و امتداد دو ستون رسم می‌شود.

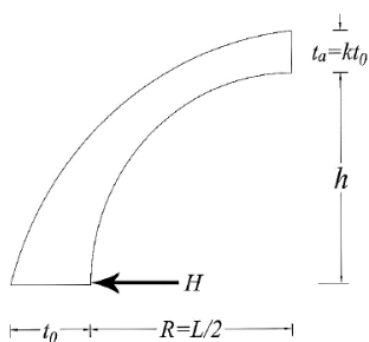
۲- دو مرکز O_2 و O_3 به فاصله‌ی $L/6$ از دو ستون روی محور افقی تعیین می‌شود.



عنوان فرم‌های فعال) تفاوت زیادی دارند، این امر باعث می‌گردد تا نقش اعمال نیروی ثقلی طاق‌ها، روی توپزه‌ها و ممانعت از ایجاد خمش رو به بالا در توپزه‌ها پررنگ‌تر گردد. روش‌های دیگری نیز برای مهار خمش رو به بالا وجود دارد که می‌توان به مهار کردن قوس در بین دیوار و یا پر کردن شانه‌های قوس در محدوده زاویه شکرگاهی (کونال قوس) به وسیله کونوها اشاره کرد.

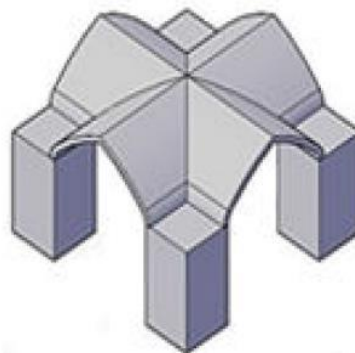
رفتار سازه‌ای طاق‌های چهاربخش مطابق شکل ۸، در سه دهانه‌ی (L) ۲/۵ m و ۴/۵ m و ۶/۵ m و سه ارتفاع پایه (h) ۳/۵ m، ۵ m و ۶/۵ m و سه ابعاد مقطع پایه (a) ۱/۵ m، ۲/۵ m و ۳/۵ m مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است ابعاد و اندازه‌های انتخاب شده با توجه به ابعاد چارطاقی‌های^۲ موجود در بناهای مذهبی دوره اسلامی در کشور ایران می‌باشد^۳ که در این پژوهش از این شیوه ساخت در نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش شامل: مسجد حکیم، مسجد امام و مقبره میربزرگ استفاده شده است.

مطابق شکل ۸ در طاق چهاربخش از مناسب‌ترین نسبت ضخامت رأس قوس (ta) به ضخامت پایه قوس (t0) (که این نسبت با $k = t a / t_0$ نشان داده می‌شود) استفاده می‌شود. در این پژوهش جهت به دست آوردن مناسب‌ترین نسبت k در طاق‌های چهاربخش مورد نظر، از تحقیق حجازی (حجازی، ۱۳۸۶: ۴؛ مرادی غیاث‌آبادی، ۱۳۸۹: ۴۵) استفاده می‌شود.



شکل ۸- پارامترهای قوس (حجازی، ۱۳۸۶: ۴)

اگر قوس‌ها را بتوان به گونه‌ای مهار کرد که هیچ نقطه‌ای در طول منحنی اجازه کمانش رو به بالا را نداشته باشد، قوس پایدار خواهد ماند. به همین دلیل یک قوس با مصالح بنایی با ضخامت کم (که در برابر کشش و خمش مقاومت ندارد) تحت شرایط بارگذاری متغیر، ناپایدار است. ولی قوس‌هایی با همان شکل که قسمت بالایی آن با مصالح بنایی پر شده‌اند در برابر کمانش رو به بالا مقاوم بوده و به طور ذاتی پایدار می‌باشند. به همین دلیل، قوس‌های بدون فرم منحنی طنابی می‌توانند به طور موفقیت‌آمیزی در سازه‌های با مصالح بنایی که به وسیله مصالحی که در اطراف آن قرار گرفته‌اند مهار می‌شود، مورد استفاده قرار گیرند (سالوادوری، ۱۳۹۵: ۳۰).



شکل ۷- طاق چهاربخش با استفاده از قوس پنج‌وهفت (نگارندگان)

با استفاده از خطوط و انواع قوس‌ها مانند قوس پنج‌وهفت یا ساده‌ترین آن‌ها که می‌تواند یک نیم‌دایره باشد، می‌توان طاق‌های مختلف و ترکیب‌های آن‌ها را ساخت که هر کدام بر اساس هندسه نظری خاص خود تعریف می‌شود. شکل ۷ ترکیبی از طاق‌های چهاربخش با استفاده از قوس‌های پنج‌وهفت را نشان داده است. در مورد چهارطاقی‌هایی با پوشش طاق در توپزه، چون توپزه تکیه‌گاهی برای طاق محسوب می‌شود، لذا نیرویی که از طرف بالا به پایین روی سطح توپزه اعمال می‌گردد مانع ایجاد خمش رو به بالا در توپزه‌ها می‌شود.

در پژوهش حاضر به دلیل بررسی نقش توپزه‌های با قوس‌های کند و با توجه به اینکه قوس‌های کند از نظر ظاهری با سازه‌های با فرم منحنی طنابی (شناخته شده با



۰/۰۸۱	۰/۳	۰/۲۷	۰/۱۲	
۰/۱۴۸۵	۰/۵۵	۰/۲۷	۰/۱۲	پنج‌اوهفت
۰/۱۶۲	۰/۶	۰/۲۷	۰/۱۲	معمولی
۰/۱۷۵۵	۰/۶۵	۰/۲۷	۰/۱۲	
۰/۲۲۹۵	۰/۸۵	۰/۲۷	۰/۱۲	
۰/۲۷	۱	۰/۲۷	۰/۱۲	
۰/۱۰۱۲	۰/۲۵	۰/۴۰۵	۰/۱۸	
۰/۲۲۲۷	۰/۵۵	۰/۴۰۵	۰/۱۸	پنج‌اوهفت
۰/۳۴۴۲	۰/۸۵	۰/۴۰۵	۰/۱۸	تند
۰/۳۸۴۷	۰/۹۵	۰/۴۰۵	۰/۱۸	

بررسی جدول ۳ نشان داده است در دهانه‌های ۴/۵ متر با قوس‌های پنج‌اوهفت کند که ضخامت پایه قوس ۰/۳۳۷۵ و ضخامت راس قوس ۰/۱۲۸۲ و ۰/۱۴۱۷ است مقدار K بهینه است. در قوس‌های پنج‌اوهفت معمولی با ضخامت پایه قوس ۰/۲۷ و ضخامت راس قوس ۰/۱۴۸۵ و ۰/۱۷۵۵ مقدار K بهینه است و در قوس‌های پنج‌اوهفت تند با ضخامت پایه قوس ۰/۴۰۵ و ضخامت راس قوس ۰/۲۲۲۷ مقدار K بهینه است.

جدول ۴- مشخصات هندسی قوس‌های مدل‌های مختلف طاق با انواع قوس پنج‌اوهفت و دهانه ۶/۵ m (نگارندگان)

طاق	t_0 / R	$t_0 (m)$	$k = ta / t_0$	$ta (m)$
پنج‌اوهفت	۰/۱۵	۰/۴۸۷۵	۰/۲۵	۰/۱۲۱۸
کند	۰/۱۵	۰/۴۸۷۵	۰/۳۸	۰/۱۸۵۲
	۰/۱۵	۰/۴۸۷۵	۰/۴	۰/۱۹۵
	۰/۱۵	۰/۴۸۷۵	۰/۴۲	۰/۲۰۴۷
	۰/۱۵	۰/۴۸۷۵	۰/۶	۰/۲۹۲۵
پنج‌اوهفت	۰/۱۲	۰/۳۹	۰/۳	۰/۱۱۷
معمولی	۰/۱۲	۰/۳۹	۰/۵۵	۰/۲۱۴۵
	۰/۱۲	۰/۳۹	۰/۶	۰/۲۳۴
	۰/۱۲	۰/۳۹	۰/۶۵	۰/۲۵۳۵
	۰/۱۲	۰/۳۹	۰/۸۵	۰/۳۳۱۵
	۰/۱۲	۰/۳۹	۱	۰/۳۹
پنج‌اوهفت	۰/۱۸	۰/۵۸۵	۰/۲۵	۰/۱۴۶۲
تند	۰/۱۸	۰/۵۸۵	۰/۵۵	۰/۳۲۱۷
	۰/۱۸	۰/۵۸۵	۰/۸۵	۰/۴۹۷۲

بررسی جدول ۳ نشان داده است در دهانه‌های ۶/۵ متر با قوس‌های پنج‌اوهفت کند که ضخامت پایه قوس

جدول ۲، ۳ و ۴ مقادیر t_0 و ta مربوط به نسبت‌های k برای طاق‌هایی که با قوس پنج‌اوهفت با دهانه‌های ۲/۵ و ۴/۵ m و ۶/۵ ساخته شده را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مشخصات هندسی قوس‌های مدل‌های مختلف طاق با انواع قوس پنج‌اوهفت و دهانه ۲/۵ m (نگارندگان)

طاق	t_0 / R	$t_0 (m)$	$k = ta / t_0$	$ta (m)$
پنج‌اوهفت	۰/۱۵	۰/۱۸۷۵	۰/۲۵	۰/۰۴۶۸۷۵
کند	۰/۱۵	۰/۱۸۷۵	۰/۳۸	۰/۰۷۱۲۵
	۰/۱۵	۰/۱۸۷۵	۰/۴	۰/۰۷۵
	۰/۱۵	۰/۱۸۷۵	۰/۴۲	۰/۰۷۸۷۵
	۰/۱۵	۰/۱۸۷۵	۰/۶	۰/۱۱۲۵
پنج‌اوهفت	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۳	۰/۰۴۵
معمولی	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۵۵	۰/۰۸۲۵
	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۶	۰/۰۹
	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۶۵	۰/۰۹۷۵
	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۸۵	۰/۱۲۷۵
	۰/۱۲	۰/۱۵	۱	۰/۱۵
پنج‌اوهفت	۰/۱۸	۰/۲۲۵	۰/۲۵	۰/۰۵۶۲۵
تند	۰/۱۸	۰/۲۲۵	۰/۵۵	۰/۱۲۳۷
	۰/۱۸	۰/۲۲۵	۰/۸۵	۰/۱۹۱۲۵
	۰/۱۸	۰/۲۲۵	۰/۹۵	۰/۲۱۳۷۵

بررسی جدول ۲ نشان داده است در دهانه‌های ۲/۵ متر با قوس‌های پنج‌اوهفت کند که ضخامت پایه قوس ۰/۱۸۷۵ و ضخامت راس قوس ۰/۰۷۸۷۵ و ۰/۰۷۱۲۵ است مقدار K بهینه است. در قوس‌های پنج‌اوهفت معمولی با ضخامت پایه قوس ۰/۱۵ و ضخامت راس قوس ۰/۰۸۲۵ و ۰/۰۹۷۵ مقدار K بهینه است و در قوس‌های پنج‌اوهفت تند با ضخامت پایه قوس ۰/۲۲۵ و ضخامت راس قوس ۰/۰۸۲۵ مقدار K بهینه است.

جدول ۳- مشخصات هندسی قوس‌های مدل‌های مختلف طاق با انواع قوس پنج‌اوهفت و دهانه ۴/۵ m (نگارندگان)

طاق	t_0 / R	$t_0 (m)$	$k = ta / t_0$	$ta (m)$
پنج‌اوهفت	۰/۱۵	۰/۳۳۷۵	۰/۲۵	۰/۰۸۴۳
کند	۰/۱۵	۰/۳۳۷۵	۰/۳۸	۰/۱۲۸۲
	۰/۱۵	۰/۳۳۷۵	۰/۴	۰/۱۳۵
	۰/۱۵	۰/۳۳۷۵	۰/۴۲	۰/۱۴۱۷
	۰/۱۵	۰/۳۳۷۵	۰/۶	۰/۲۰۲۵



بناهای مورد مطالعه این پژوهش نیز بیشتر از این قوس استفاده شده است.

۷- مطالعات و بررسی‌ها

در این پژوهش ساختار سازه‌ای ۳ بنای مسجد حکیم اصفهان، بقعه درب امام اصفهان، بقعه مشهد میربزرگ آمل (بقعه میرقوام‌الدین مرعشی آمل) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است که در ادامه نتایج آن بیان شده می‌گردد.

۸- یافته‌های تحقیق

۸-۱- مسجد حکیم اصفهان

مسجد حکیم بنایی بزرگ و چهار ایوانی با مساحتی نزدیک به ۸۰۰۰ مترمربع است که در کنار بازار اصفهان و در نزدیکی میدان نقش جهان جای دارد (الاصفهانی، ۱۳۶۸: ۹۴) با توجه به شکل ۹ قوس‌های به کار رفته در ایوان‌های آن، از نوع پنج‌اوهفت تند می‌باشند.

مسجد حکیم، ۵ سازه گنبدی دارد که سه گنبد، مربوط به شبستان تابستانی، یک گنبد در شبستان زمستانی و گنبدی دیگر پوشش فضای مدرس یا همان کلاس درس می‌باشد. در گنبد فضای مدرس که در گوشه شمال غربی بنا جای دارد، یک کاربردی ساده‌ای وجود دارد که از یک پاباریک و یک ردیف شاپرک تشکیل شده (شکل ۱۰) که مطابق شکل ۱۱ در این کاربردی از قوس‌های باربر پنج‌اوهفت تند استفاده شده است.

گنبد اصلی در این بنا که در شبستان جنوبی جای دارد نسبت به گنبدهای رایج دیگر دوره صفوی در در اصفهان، تفاوت‌هایی دارد. در زیر این گنبد، کاربردی یزدی ساده با گوشه‌سازی سنگنج وجود دارد (شکل ۱۲) که این گوشه‌سازی از تقاطع دو قوس شکل می‌گیرد و شیوه تقسیمات منطقه انتقالی در آن پیچیده است، بدین صورت که در میان چهار تویزه اصلی باربر گنبدخانه، دو باریکه قوس که همدیگر را قطع کرده، شکل جدیدی از کاربردی را به نمایش گذاشته‌اند، یعنی دو پاباریک در کنار یکدیگر. (شکل ۱۳) هوشیاری و فرشته‌نژاد، ۱۳۹۲: ۵).

۰/۴۸۷۵ و ضخامت راس قوس ۰/۱۸۵۲ و ۰/۲۰۴۷ است مقدار k بهینه است. در قوس‌های پنج‌اوهفت معمولی با ضخامت پایه قوس ۰/۳۹ و ضخامت راس قوس ۰/۲۱۴۵ و مقدار k بهینه است و در قوس‌های پنج‌اوهفت تند با ضخامت پایه قوس ۰/۵۸۵ و ضخامت راس قوس ۰/۳۲۱۷ مقدار k بهینه است.

جدول ۵- نتایج حاصل از بررسی شکل بهینه انواع قوس پنج‌اوهفت (نگارندگان)

نوع قوس	W/H	k	t_0/R
پنج‌اوهفت تند	۲/۴	۰/۵۵	۰/۱۸
پنج‌اوهفت معمولی	۱/۹۵	۰/۱۰-۵۵/۶۵	۰/۱۲
پنج‌اوهفت کند	۱/۶	۰/۳۸-۰/۴۲	۰/۱۵

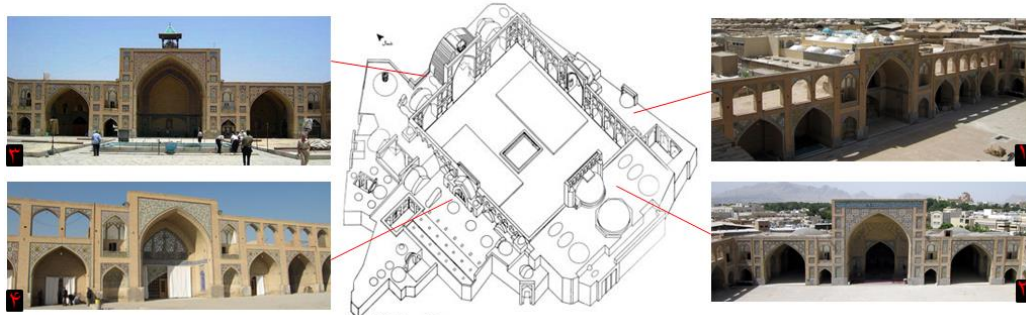
نتایج حاصل از جداول ۲، ۳ و ۴ در جدول ۵ ارائه شده است، مطابق جدول ۵؛ مقادیر بهینه برای نسبت ضخامت پاکار قوس به نصف دهانه (t_0/R)، نسبت ضخامت راس قوس به ضخامت پاکار قوس k و نسبت وزن نصف قوس به نیروی افقی (نیروی رانش) پاکار قوس (W/H) (به آن ضریب پایداری قوس نیز گفته می‌شود) می‌باشد. در این جدول با استفاده از محدوده و مقادیر k برای قوس‌های به کار رفته در طاق‌های چهاربخش مورد نظر، طاق‌ها با نسبت‌های k داخل و خارج از محدوده‌ی ارائه شده، آنالیز شده‌اند و نسبت k استفاده شده در طاق با بهترین عملکرد به‌عنوان مناسب‌ترین نسبت k در سایر مدل‌ها در نظر گرفته شده‌اند.

لذا بررسی نتایج نشان داده است؛ استفاده از قوس‌های پنج‌اوهفت تند، معمولی و کند با ضریب پایداری ۲/۴ و ۱/۹۵ و ۱/۶ در طاق‌های چهاربخشی، در شکل بهینه و حالت پایدار قرار دارند که از میان آن نیز، قوس پنج‌اوهفت تند نسبت به دو دسته دیگر در وضعیت پایداری قرار دارد (جدول ۵) که در بخش‌های باربر

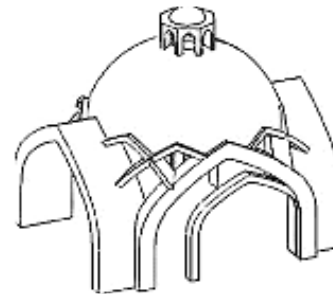


روی چهار قوس اصلی گنبدخانه ساخته شده‌اند بدین صورت که برخی قوس‌ها بزرگتر و در حدود دو برابر قوس‌های کوچکتر هستند.

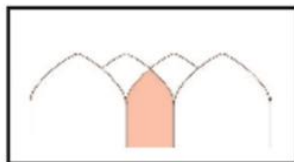
با توجه به شکل ۱۳، سازه کاربندی از روی بام و دیواره بیرونی گنبد قابل مشاهده است و نشان داده است که؛ در بخش انتقالی سازه بام، قوس‌های باربری قرار گرفتند که



شکل ۹- (۱) ایوان شرقی (۲) ایوان جنوبی (۳) ایوان شمالی (۴) ایوان غربی (نگارندگان)



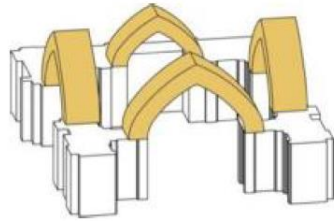
شکل ۱۰- سازه گنبد فضای مدرس در مسجد حکیم (هوشیاری و همکاران، ۱۳۹۲: ۴۱)



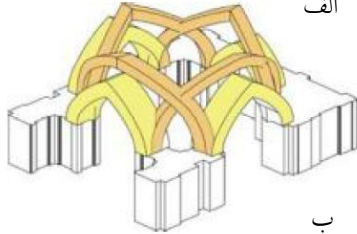
شکل ۱۱- قوس پنج‌اوهفت تند به کار گرفته شده در گنبد (هوشیاری و همکاران، ۱۳۹۲: ۴۱؛ نگارندگان)

شکل ۱۲- (الف) کاربندی یزدی ساده با گوشه سازی سکنج (ب) منطقه انتقالی در گنبدخانه مسجد حکیم (نگارندگان)

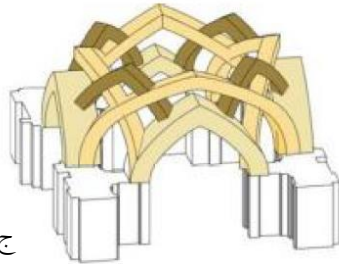




الف



ب



ج

شکل ۱۵- قوس‌های باربر اصلی:

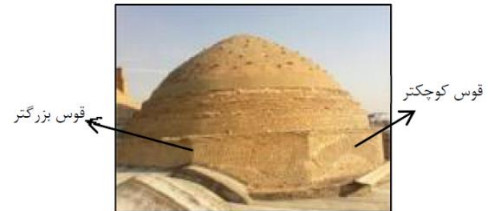
الف) قوس‌های ابتدایی (ب) قوس‌های پسین،
ج) قوس‌های انتهایی (هوشیاری و فرشته‌نژاد، ۱۳۹۲: ۶-۷)



شکل ۱۶- قرارگیری گنبد مسجد بر روی قوس‌های
باربر (هوشیاری و فرشته‌نژاد، ۱۳۹۲: ۷).

اگر رأس قوس‌ها را در بالا به هم وصل کنیم یک هشت ضلعی خواهیم داشت، اما از زیر گنبدخانه با شمارش سنپوسه‌ها خواهیم دید که ۴ ضلعی به ۱۲ ضلعی تبدیل شده و گنبد بر روی آن قرار می‌گیرد. این دوازده ضلعی در روی بام نیز به صورت یک حجم آجری خود را نشان می‌دهد و قوس‌های باربر منطقه انتقالی در درون آن

با توجه به آنچه که در کتاب زمرشیدی اشاره شده، قوس‌های به کار گرفته شده در سازه گنبد از نوع قوس پنج‌اوهفت تند بوده که در کلیه بخش‌ها بنا نیز از همین قوس استفاده شده است (شکل ۱۴). لذا شرح نحوه‌ی به کارگیری قوس‌های پنج‌اوهفت در سازه گنبد مسجد، جهت انتقال نیروهای وارده گنبد به جرزها و تویزه‌ها به شرح زیر می‌باشد.



شکل ۱۳- قوس‌های باربر منطقه انتقالی گنبد: (هوشیاری و فرشته‌نژاد، ۱۳۹۲: ۵)



شکل ۱۴- قوس‌های از نوع پنج‌اوهفت تند
(زمرشیدی، ۱۳۷۳: ۲۰۵)

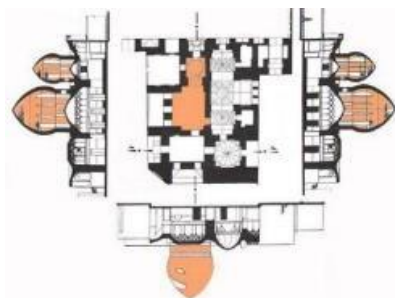
مطابق شکل ۱۵- الف، چهار قوس بزرگ یا تویزه‌های باربر اصلی بر روی جرزهای اصلی گنبدخانه قرار گرفته شده‌اند. پایه‌های این چهار قوس در کنار پایه قوس‌های زیرین که روبروی هم هستند زده می‌شود اما قوس‌هایی که در بالا قرار گرفتند کمی به سمت بیرون متمایل شده‌اند که فاصله میان پایه‌های قوس‌های بزرگ گوشه‌سازی سکنج را شکل می‌دهد (شکل ۱۵- ب).

چهار قوس بعدی که نصف قوس‌های بزرگ‌تر پسین هستند در فاصله میان قوس‌های بزرگ و بر روی آن‌ها زده می‌شود تا زمینه‌ی مناسب برای قرار گرفتن محیط دایره گنبد آماده شود (شکل ۱۵- ج) (هوشیاری و فرشته‌نژاد، ۱۳۹۲ الف: ۷)

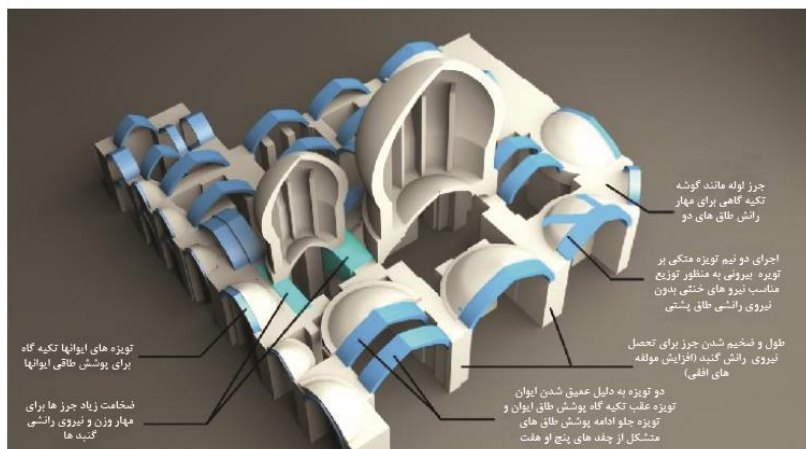
می‌باشد. تنوع در شیوه طرح بنا، هم در برش افقی و هم در برش‌های قائم به خوبی آشکار است (شکل ۱۸).



شکل ۱۷- ساختمان بنای بقعه درب امام اصفهان (نگارندگان)



شکل ۱۸- پلان و مقاطع بنای درب امام (بیرنیا: ۱۳۸۴: ۲۶۴)



شکل ۱۹- تحلیل فنی جبهه غربی و شمالی (مساحی خوراسگانی و تاقی، ۱۳۹۳: ۱۲؛ نگارندگان)

بار و جلوگیری از رانش گنبد کمک می‌کنند. مقداری از نیروهای حاصل از رانش گنبد بزرگ با رانش معکوس گنبد کوچک خنثی می‌گردد (آرشیو میراث فرهنگی شهرستان اصفهان). نیروها به جرزه‌ها و سپس به زمین منتقل می‌شوند و بدین ترتیب بخشی از نیروی رانشی از طریق تویزه‌ها و طاق خوانچه‌پوش با چفدهای پنج‌اوهفت پیرامونی خنثی می‌گردد که راستای نیروهای

دیده می‌شوند. در پایان گنبد نیز به صورت لایه‌های کم شونده بر روی حجم دوازده ضلعی قرار می‌گیرد. و در این صورت بار حاصله از گنبد و مصالح به قوس‌ها منتقل می‌شود و تقسیم‌بندی نیروها و بارها در قوس‌های برابر پنج‌اوهفت تند موجب پایداری کلی سازه بنا در گنبد خانه مسجد حکیم می‌شود (شکل ۱۶).

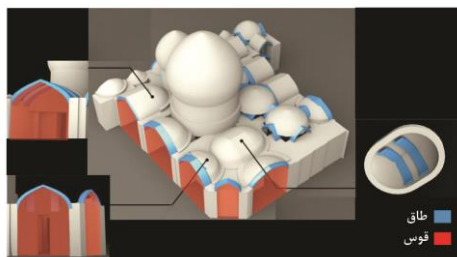
۲-۸- بقعه درب امام اصفهان

ساختمان بنای بقعه درب امام اصفهان در سال ۸۵۷ ه. ق (۱۴۵۳ م) در زمان پادشاهی کوتاه مدت جهانشاه قراقویونلو به فرمان جلال‌الدین صفرشاه ساخته شده و آرامگاه دو امامزاده، ابراهیم بطحا و زین‌العابدین و یادگاری مربوط به دوره ترکمانان در قرن نهم هجری است (خردمند، ۱۳۷۵: ۷۹) (شکل ۱۷).

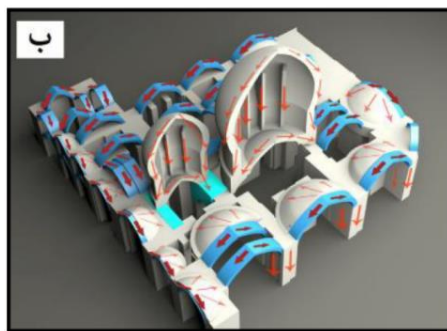
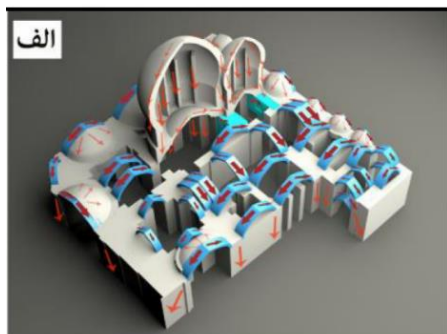
این بنا در اصفهان، خیابان عبدالرزاق، بازارچه حاج محمد جعفر، واقع شده، که شامل دو گنبدخانه بزرگ و اتاق‌هایی در دو طرف گنبدخانه‌ها به مثابه دهلیزهای پیرامونی آن که دارای کیفیت‌های ویژه‌ای است،



در غیر این صورت، بنا از حالت تعادل خارج شده و به یک یا چند طرف مایل می‌شود و ممکن است با خطر ویرانی مواجه گردد. در اینجا برخی جزرها وظیفه خنثی کردن نیروی رانشی حاصل از مجموعه طاق و گنبدها را دارند، به این منظور، در برخی قسمت‌ها جرز ضخیم در نظر گرفته شده تا از طریق افزایش مؤلفه افقی و وزن موجود با نیروی مایل وارده، مقابله شود (شکل ۲۲) (آرشیو میراث فرهنگی شهرستان اصفهان).



شکل ۲۱- طاق و قوس‌های فضاهای داخلی در جبهه جنوبی و غربی (مساحی خوراسگانی و تاکی، ۱۳۹۳: ۱۲؛ نگارندگان).

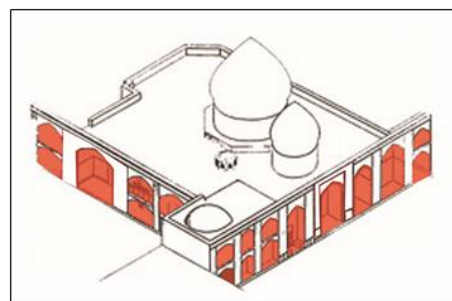


شکل ۲۲- توزیع نیروهای داخلی در: الف) جبهه شرقی و جنوبی (ب) جبهه غربی و شمالی درب امام (مساحی خوراسگانی و تاکی، ۱۳۹۳: ۱۲؛ نگارندگان).

گنبد بزرگ در این بنا، مؤلفه افقی پرقدرتی از مرکز به محیط خود پراکنده می‌کند و گنبد کوچک نیز مؤلفه افقی کوچکتری به نسبت گنبد بزرگ به اطراف وارد

داخلی عناصر سازه‌ای بنا با فرم قوس‌ها نزدیکی دارد (شکل ۱۹ و ۲۰)

در ناحیه غربی گنبد بزرگ، نیروی رانش با نیم گنبدهایی که بارشان را بر تویزه‌های تعبیه شده بر جرزهای ضخیم به‌عنوان پشت‌بند وارد می‌سازند، خنثی می‌گردد. در ایوان شمال غرب به علت عمق زیاد ایوان از دو تویزه استفاده شده و در ایوان جنوب غربی گنبد نیز نیم تویزه‌هایی به تویزه اصلی تکیه داده شده‌اند که فضای بین آن‌ها پوشش داده شده است (مساحی خوراسگانی و تاکی، ۱۳۹۳: ۱۲).



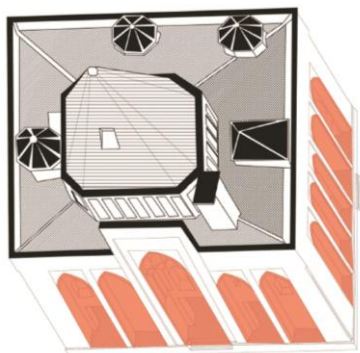
شکل ۲۰- قوس‌های پنج‌اوهفت در جبهه شمالی و شرقی بنا (میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان اصفهان؛ نگارندگان).

در این بنا، طاق خوانچه‌پوش از کنار هم آمدن چفد پنج‌اوهفت تشکیل شده است. علت آن شاید مقابله با نیروی رانشی‌ای باشد که از پوشش فضای پشتی بر آن وارد می‌شود، در قسمت شمالی مجموعه‌ای از نیم گنبدهای متکی بر تویزه که مانند کمربندی، نوار شمالی بنا را در برگرفته، نیروها را خنثی می‌کند. ضلع جنوبی بنا شامل نیم‌گنبدی برای دفع نیروی رانش اتاق پشتی و همچنین جرز ضخیمی برای مقابله با نیروهای رانشی دهلیز الحاقی است (شکل ۲۱).

راستای نیروهای داخلی عناصر سازه‌ای بنا با فرم قوس‌ها نزدیکی دارد. راستای بردار نیرو در گنبدها، نیم‌گنبدها شعاعی، در تویزه‌ها و طاق‌ها دو طرفه است. در چالش بین نیروهای رانشی از گنبد بزرگ و کوچک و نیروهای تدافعی برای مقابله با آن‌ها از طرف گنبدها و طاق و قوس‌های اطراف، باید مجموع نیروهای افقی و عمودی و همچنین گشتاور حاصل از نیروها صفر باشد.



پوشش‌های متنوع منحنی شکل می‌باشد که به شکل پنج اوهفت تند و کند و کمائی ساخته شده‌اند. این قوس‌ها در فضای داخلی، نقش باربر و در جداره‌های خارجی نیز به‌عنوان نما ظاهر می‌شوند. در فضای داخلی پیرامون توپزه‌های گچی را برای تحمل بارطاق با آجر می‌چینند، طاق‌ها در داخل بنا برای پوشش دهانه‌های کم عمق، مانند درگاه‌های در و پنجره، و یا برای پوشش طاق و چشمه استفاده می‌شوند. در جداره‌های خارجی نیز این قوس‌ها به صورت طاق نماهای پشت بسته قابل مشاهده است. نعل سغ با قوس‌های کمائی و پنج‌اوهفت در پنجره‌ها با روش چیدمان رومی خودنمایی می‌کند (شکل ۲۵ و ۲۶).



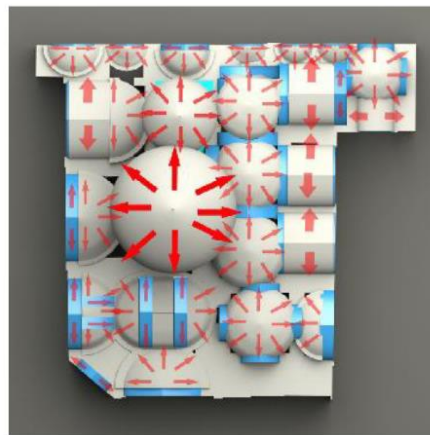
شکل ۲۵- قوس‌های پنج‌اوهفت تند در بدنه جنوبی و شرقی بنا (نگارندگان)

اغلب فضاهای مقبره با سیستم طاق و توپزه (با فضای میانی مستطیل) و طاق و چشمه (با فضای میانی مربع) پوشیده شده‌اند (شکل ۲۶).



الف

می‌کند و بدین صورت قسمتی از رانش گنبد بزرگ در جرز بین این دو، خنثی می‌گردد. (تصویر ۲۳) (مساحی خوراسگانی و تاکی، ۱۳۹۳: ۱۱)



شکل ۲۳- توزیع مولفه افقی نیروها در سازه (مساحی خوراسگانی و تاکی، ۱۳۹۳: ۱۲؛ نگارندگان).

۳-۸- بقعه مشهد میربزرگ آمل (بقعه میرقوام‌الدین مرعشی آمل)

مشهد میر بزرگ عمارت و مقبره‌ای است که مربوط به دوره صفوی - قرن ۸ هـ ق است و در آمل، سبزه میدان، محوطه مصلی آمل واقع شده است (شکل ۲۴).



شکل ۲۴- جبهه جنوبی مقبره میربزرگ (نگارندگان)

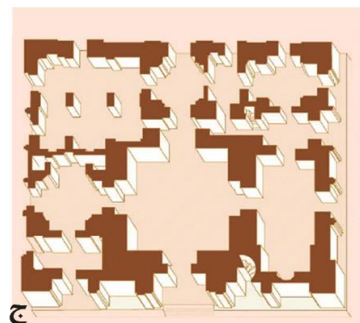
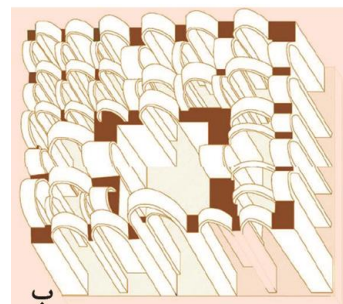
دیوارهای بنا عموماً باربر و آجری می‌باشند. ضخامت دیوارها زیاد است به گونه‌ای که ضخامت دیوارهای بیرونی ۱۲۰ سانتیمتر و دیوارهای درونی از ۸۰ سانتیمتر تا ۱ متر متغیر می‌باشند (آرشینو میراث فرهنگی شهرستان آمل). دیوارهای خارجی در فواصل بین جرز طاق نماها، قرار گرفته‌اند و نقش اسپر را دارند. مقبره میر بزرگ دارای قوس‌های باربر (توپزه‌ها) و غیرباربر و



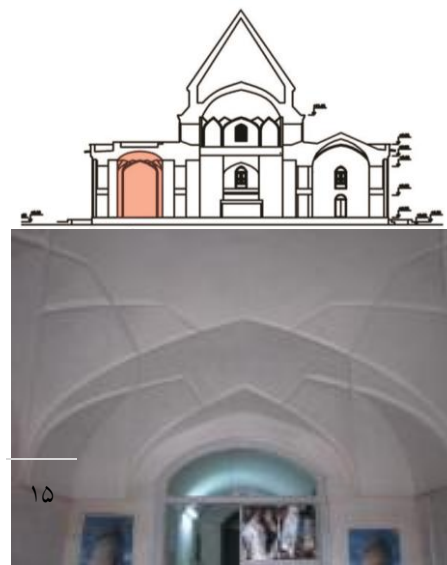
وارد می‌شوند. توپزه‌های باربر از نوع پنج‌اوهفت بوده که با آجر و ملات ساروج بنا شده‌اند (شکل ۲۷).

۹- نتیجه تحقیق

در این پژوهش با بررسی چفد(قوس) پنج‌اوهفت این نتیجه حاصل شد که اندازه چفدهای اشاره شده، دقیقاً با آنچه روی کاغذ در ابعاد متناظر می‌توان کشید کمی تفاوت دارد، البته این تفاوت بسیار اندک است و مطابق آنچه که بررسی شد، برای یک چفد در دهانه چهار و نیم‌متری، در حدود سه یا چهار سانتیمتر می‌باشد، دلیل این عدم انطباق را می‌توان: روش‌های برداشت، دقت ابزار برداشت، سختی برداشت در ارتفاع و همچنین نشست اندک طاق در طول زمان تحت تاثیر بارها یا کشیدن آندود در زیر چفدها دانست که شکل دقیق چفد را پنهان کرده است. لذا سازه‌های سنتی ایرانی در حالی که در پیاده‌سازی هندسه نظری از دقت بالایی برخوردارند، در پیاده‌سازی اندازه‌ها در مواردی نیاز به کاهش یا افزایش دارند. بنابراین در ساختمان‌هایی با معماری اسلامی و سنتی، حفظ تناسب ابعاد در ارتفاع، دهانه و احجام معماری یکی از مهم‌ترین قیده‌های طراحی هستند. در قلمرو بناهای تاریخی ایران کیفیات سازه‌ای نظیر مقاومت، سختی و پایداری را نباید به‌عنوان معیارهای اصلی و تعیین‌کننده طراحی در نظر گرفت، اگرچه معمار سنتی از نیروها، تنش‌های ایجاد شده و خرابی‌های سازه‌ای کاملاً آگاه است اما برای او محاسبه تنش در درجه دوم اهمیت قرار دارد. این عملکرد عناصر سازه‌ای می‌باشد که از شکل کلی بنا پیروی می‌کند، چنانچه خود شکل هم بدون عملکرد درست، هیچ مفهومی ندارد. هر تحلیل سازه‌ای، بررسی و تایید ساختمان‌های تاریخی هنگامی موجه است که آن تحلیل شامل ویژگی‌های هندسی، طبیعی و معنوی‌ای باشد که بتواند سازه و معماری را هماهنگ و یکسو کند لذا در این پژوهش با توجه به تحلیل‌های سازه‌ای صورت گرفته در سه بنای مسجد حکیم اصفهان، بقعه درب امام اصفهان و مقبره میربزرگ آمل این نتیجه حاصل گردید؛ تعامل میان سازه و معماری زمانی برقرار می‌شود که شیوه ساخت مناسب استفاده شود و در سه بنای مورد مطالعه اغلب فضاها با سیستم طاق و توپزه شکل گرفته و دارای



شکل ۲۶- تصاویر سه‌بعدی - الف) قوس‌های پنج‌اوهفت (ب) طاق و توپزه‌های باربر متشکل از قوس‌های پنج‌اوهفت تند (ج) جرزهای باربر (نگارندگان)



شکل ۲۷ - کاربندی رسمی در مقبره میربزرگ (نگارندگان)

پوشش شیستان شمال غربی با طاق و چشمه و پوشش اتاق مستطیل شرقی با طاق و توپزه ساخته شده و با کاربندی تزیین گردیده است، در این شیوه‌های پوشش، بارهای مرده و زنده موجود، به وسیله توپزه‌های باربر به ستون‌ها و جرزهای سنگین منتقل و بعد به پی و زمین



بیننده، کج‌راهی و ناموزونی‌ها، به دور بماند و فضا در نظر او یکدست و با نظمی سنجیده جلوه‌گر شود. بنابراین راه‌حل‌های استادانه و مدبرانه‌ای که در سازه مطرح می‌شوند، وقتی بر پایه یکپارچگی فرم معماری و سازه قرار گیرد، سازه می‌تواند واجد صفاتی باشد که کیفیت فضای معماری را افزایش دهد.

۱۰- تشکر و قدردانی

موردی از نویسندگان ذکر نشده است.

۱۱- پی‌نوشت‌ها

۱- سازه‌هایی هستند که در برابر بارهای وارده از شکل و ترکیبی استفاده می‌کنند که تنش‌های داخلی حاصله فقط به صورت فشار و کشش مستقیم باشد (مور، ۱۳۸۷: ۹۸).

۲- در معماری منظور از چهارطاقی؛ فضایی با پلانی مربعی شکل با چهار ستون یا پایه با پوشش گنبدی شکل بر روی آن بوده است که دارای چهار ورودی طاق‌دار است (دهخدا، ۱۳۷۲: معین ۱۳۶۳؛ گلدار، ۱۳۹۳: ۱)

۳- شاید سرمون بنا با طرح چهارطاقی در فرهنگ ایران پس از اسلام گنبدخانه‌ای در بهشت باشد. بنابر برخی روایت، پیامبر اسلام (ص) در شرح معراج خود از گنبد مروارید عظیمی بر قاعده‌ی مربع سخن گفته که بر چهار ستون در کنج‌ها قرار داشت و رمز چهار پاره‌ی قرآن (بسم، الله، الرحمن، الرحیم) بر آن نوشته دلالت بود (اردلان و بختیار، ۱۳۸۰: ۳۱) این طرح مطابق با چهارطاقی است.

۱۲- منابع فارسی و لاتین

- آرشیو میراث فرهنگی شهرستان آمل.
- آرشیو میراث فرهنگی شهرستان اصفهان.
- آرشیو میراث فرهنگی، صنایع دستی گردشگری استان اصفهان.

قوس‌های باربر (تویزه‌ها) و غیرباربر و با پوشش‌های متنوع به شکل پنج‌اوهفت ساخته شده‌اند که بارهای مرده و زنده موجود به وسیله این تویزه‌های باربر به ستون‌ها و جرزهای سنگین منتقل و بعد به پی و زمین وارد می‌شود. نحوه توزیع بار در این ۳ بنا در طاق‌های با انواع قوس‌های پنج‌اوهفت به گونه‌ای است که موجب هماهنگی در کل ساختار و پایداری بنا شده است در واقع؛ استفاده از طاق‌ها با سه دهانه‌ی (L) ۲/۵، ۴/۵ و ۶/۵ متر و سه ارتفاع پایه (h) ۳/۵، ۵ و ۶/۵ متر و سه ابعاد مقطع پایه (a) ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ متر، در این بناها زمانی در حالت بهینه و پایدار قرار دارد که ضریب پایداری قوس‌های پنج‌اوهفت تند، معمولی و کند در آن به ترتیب ۲/۴ و ۱/۹۵ و ۱/۶ باشد که از میان آن، قوس پنج‌اوهفت تند نسبت به دو دسته دیگر در وضعیت پایدارتری قرار دارد. لذا استفاده از قوس‌های پنج‌اوهفت در طاق و تویزه‌های این ۳ بنا جهت پوشش فضای گنبدخانه، ایوان، تالارها و دهانه‌های کم عمق درگاه‌های در و پنجره، ضمن ایجاد پایداری سازه‌ای موجب افزایش کیفیت معماری و جنبه زیبایی‌شناسانه فضا از طریق ایجاد کاربردی یزدی ساده با گوشه‌سازی سکنج در فضای زیر گنبد مسجد حکیم و یا ایجاد کاربردی رسمی در فضاهای مقبره میربزرگ و بقعه درب امام شده است که همه‌ی این جنبه زیبایی‌شناسانه بر اساس قاعده فنی و ساختمانی، از نوعی بی‌نظمی در عین نظم و قانونمندی تبعیت می‌کند که با نگرشی خلاقانه و مبتکرانه بر دیدگاهی جامع‌نگر مبتنی است که از جهان‌بینی اسلامی معمار سنتی منتج می‌شود. اینگونه که؛ معمار جنبه‌های سازه‌ای و فنی بنا را با استفاده از طاق‌های متشکل از قوس‌های پنج‌اوهفت در راه نیل به فضایی زیبا و با کیفیت به خدمت گرفته است و قناسی‌ها و ناموزونی‌ها موجود در آرایش جرزها که به‌عنوان تهدید قلمداد می‌شد را با بهره‌گیری از این نوع قوس به فرصتی جهت بروز و ظهور جنبه‌های زیبایی‌شناسانه طراحی فضا بدل کرد و جهت دستیابی به این هدف مهم، نه مسائل فنی و نیارشی را نادیده گرفته و نه کیفیت‌های فضایی قربانی فنون و روش‌های ساخت شده است. بلکه در آمیختن هنر و با شیوه ساخت مناسب همان‌طور که در این پژوهش اشاره شد، توانسته فضایی بیافریند که از چشم



<https://www.gisoom.com/book/1679942/%D%A9%D8%AA%D8%A7%D8%A8-%D8%AA%D8%AD%D9%82%DB%8C%D9%82-%D8%AF%D8%B1-%D9%85%D8%B9%D9%85%D8%A7%D8%B1%DB%8C-%DA%AF%D8%B0%D8%B4%D8%AA%D9%87-%D8%A7%DB%8C%D8%B1%D8%A7%D9%86%D8%A7>

● پیرنیا، محمد کریم. (۱۳۷۸). تحقیق در معماری گذشته ایران. تهران: دانشگاه علم و صنعت.

<https://www.gisoom.com/book/1679942/%D%A9%D8%AA%D8%A7%D8%A8-%D8%AA%D8%AD%D9%82%DB%8C%D9%82-%D8%AF%D8%B1-%D9%85%D8%B9%D9%85%D8%A7%D8%B1%DB%8C-%DA%AF%D8%B0%D8%B4%D8%AA%D9%87-%D8%A7%DB%8C%D8%B1%D8%A7%D9%86%D8%A7>

● پیرنیا، محمد کریم. (۱۳۸۴). سبک‌شناسی معماری ایران، چاپ چهارم، تدوین غلامحسین معاریان، تهران: سروش دانش.

<https://shahreketabonline.com/Products/Details/257005>

● پارسا، سروناز و فخار تهرانی، فرهاد. (۱۳۹۲). نگاهی بر هندسه نظری گنبد و طاق در معماری ایرانی، نخستین همایش فناوری و سازه‌های سنتی با محور گنبدها، موسسه آموزش عالی آزاد علوم و فنون تهران (ایوان خانه معمار)، تهران، ایران.

<https://civilica.com/doc/205014>

● حجازی، مهرداد. (۱۳۸۶). قوس‌های آجری تحت بار وزن، سومین کنگره ملی مهندسی عمران، تبریز، ایران.

<https://civilica.com/doc/16908>

● حجازی، مهرداد و مهدی‌زاده سراج، فاطمه. (۱۳۹۳). رابطه معنا، زیبایی، شکل و سازه در معماری دوران

● الاصفهانی، محمد مهدی بن محمد رضا. (۱۳۸۶). نصف جهان فی تعریف الاصفهان. تهران: انتشارات امیر کبیر.

<https://ketabnak.com/book/78287/%D9%86%D8%B5%D9%81-%D8%AC%D9%87%D8%A7%D9%86-%D9%81%DB%8C-%D8%AA%D8%B9%D8%B1%DB%8C%D9%81-%D8%A7%D9%84%D8%A7%D8%B5%D9%81%D9%87%D8%A7%D9%86>

● اردلان، نادر و بختیار، لاله. (۱۳۸۰). حس وحدت، سنت عرفانی در معماری ایرانی، ترجمه محمد علی موحد. تهران: آگه.

<https://www.gisoom.com/book/1873374/%D%A9%D8%AA%D8%A7%D8%A8-%D8%AD%D8%B3-%D9%88%D8%AD%D8%AF%D8%AA-%D9%86%D9%82%D8%B4-%D8%B3%D9%86%D8%AA-%D8%AF%D8%B1-%D9%85%D8%B9%D9%85%D8%A7%D8%B1%DB%8C-%D8%A7%DB%8C%D8%B1%D8%A7%D9%86%DB%8C>

● احمدی، سرکوت؛ مسکین، هادی و رضالو، رضا. (۱۳۹۴). تحلیلی بر قوس‌های ایرانی با نگاهی ویژه بر روی قوس‌های پنج‌اوهفت. اولین کنگره علمی پژوهشی افق‌های نوین در حوزه مهندسی عمران، معماری، فرهنگ و مدیریت شهری ایران، تهران، ایران، ۱-۱۰.

<https://civilica.com/doc/419906>

● بقایی، آژنگ. (۱۳۸۸). نقش سازه در ساختار زیبایی‌شناسی معماری معاصر. هویت شهر. ۳(۳): ۲۷-۳۸.

http://hoviatsshahr.srbiau.ac.ir/article_1099.html

● پیرنیا، محمد کریم. (۱۳۷۳). چفدها و طاق‌ها، چاپ اول. تهران: سازمان میراث فرهنگی کشور.

<https://www.naghsh-negar.ir/1395/02/%DA%A9%D8%AA%D8>



<https://www.iketab.com/%D8%B7%D8%A7%D9%82-%D9%88-%D9%82%D9%88%D8%B3-%D8%AF%D8%B1-%D9%85%D8%B9%D9%85%D8%A7%D8%B1%DB%8C-%D8%A7%DB%8C%D8%B1%D8%A7%D9%86-83619>

• زمرشیدی، حسین. (۱۳۹۵). معماری ایران (اجرای ساختمان با مصالح سنتی)، چاپ سیزدهم. تهران: انتشارات زمر.

• <https://www.gisoom.com/book/11265030/%DA%A9%D8%AA%D8%A7%D8%A8-%D9%85%D8%B9%D9%85%D8%A7%D8%B1%DB%8C-%D8%A7%DB%8C%D8%B1%D8%A7%D9%86-%D8%A7%D8%AC%D8%B1%D8%A7%DB%8C-%D8%B3%D8%A7%D8%AE%D8%AA%D9%85%D8%A7%D9%86-%D8%A8%D8%A7-%D9%85%D8%B5%D8%A7%D9%84%D8%AD-%D8%B3%D9%86%D8%AA%DB%8C>

• سالوادوری، ماریو. (۱۳۹۵). سازه در معماری، ترجمه: محمود گلابچی، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

<https://www.gisoom.com/book/1839333/%DA%A9%D8%AA%D8%A7%D8%A8-%D8%B3%D8%A7%D8%B2%D9%87-%D8%AF%D8%B1-%D9%85%D8%B9%D9%85%D8%A7%D8%B1%DB%8C>

• شیخ‌دارانی، رویا و رستمی، راحله. (۱۳۹۵). ترسیم هندسه و سازه (قوس و چفد) در مسجد حکیم اصفهان در دوره صفویه. اواین کنفرانس ملی معماری اسلامی، میراث شهری و توسعه پایدار، تهران، ایران، ۱-۱۱.

<https://civilica.com/doc/553027>

• عزیزیان، مهدی و همای، پیمان. (۱۳۹۴). هماهنگی سازه‌های نوین با معماری اسلامی و سنتی، کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین در مهندسی عمران،

اسلامی. پژوهش‌های معماری اسلامی. سال اول، (۲): ۲۴-۹.

http://iria.iust.ac.ir/browse.php?a_id=142&si_lang=fa

• خلیل‌نژاد، طاهر. (۱۳۹۵). مقایسه نقش عناصر سازه‌ای در معماری مدرن و سنتی، کنفرانس بین‌المللی معماری، شهرسازی، مهندسی عمران، هنر و محیط زیست؛ افق‌های آینده، نگاه به گذشته، تهران، ایران.

<https://civilica.com/doc/607593>

• خردمند، هدی. (۱۳۷۵). پژوهشی در زمینه مجموعه تاریخی درب امام، فرهنگ اصفهان. (۲): ۹۱-۷۹.

<http://emamzadegan.ir/articles/view-20241.aspx>

• دهخدا، علی‌اکبر. (۱۳۷۲). لغت‌نامه دهخدا، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

https://press.ut.ac.ir/book_979.html

• رضوی‌نسب، سید حسین. (۱۳۹۲). قوس‌های بیز و پنج‌اوهفت معماری ایران و تحلیل استاتیکی آن‌ها. همایش ملی معماری، فرهنگ و مدیریت شهری، کرج، ایران، ۱-۱۱.

<https://civilica.com/doc/256066>

• زمرشیدی، حسین. (۱۳۸۹). گنبد و عناصر طاقی ایران، چاپ اول. تهران: نشر زمان.

<https://www.gisoom.com/book/1756703/%DA%A9%D8%AA%D8%A7%D8%A8-%DA%AF%D9%86%D8%A8%D8%AF-%D9%88-%D8%B9%D9%86%D8%A7%D8%B5%D8%B1-%D8%B7%D8%A7%D9%82%DB%8C-%D8%A7%DB%8C%D8%B1%D8%A7%D9%86>

• زمرشیدی، حسین. (۱۳۷۸). طاق و قوس در معماری ایران، چاپ اول. تهران: تندیس نقره‌ای.



