سینا فرامرزی[1]، فرهاد تهرانی[2]

ویژگی‌های هندسی و سازه‌ای در کاربندی‌های دورهٔ قاجار

چکیده

کاربندی یا رسمی‌بندی ساختاری هندسی در بسیاری از سقف‌های ایرانی است که از تقاطع چفدهایی همسان طبق قواعد هندسی در فضا پدید می‌آید. این ساختار در اصل باربر است و باید بتواند سقف را پوشش دهد و بر پای خود بایستد. رسمی‌بندی گاهی به حد پوستهٔ دوم و آمود تقلیل می‌یابد، اما، برخلاف مقرنس و یزدی‌بندی، علاوه بر ماهیت هندسی متکامل خود، ماهیتی سازه‌ای دارد. پژوهش بر هندسه این‌گونه سقف‌ها تاحدی صورت گرفته است، اما رفتار سازه‌ای آن، مانند اغلب عناصر معماری ایرانی، نادیده و ناپژوهیده است. رابطه میان کارشیو کاربندی و سازه باربر آن چندان بررسی نشده و اینکه بار از چه جاهایی بیشتر انتقال می‌یابد یا هر آلت و لقطی در چه تنشی قرار دارند، نادانسته و مغفول است.

این مقاله، نخست اجمالاً به هندسه کاربندی می‌پردازد؛ سپس، تکامل تاریخی هندسه و سازه آن را تا آخرین دوره نمو (عهد قاجار یا مکتب اصفهان دوم) بررسی می‌کند. آن گاه، در چندین نمونه موردی از عهد قاجار، سازه کاربندی را بررسی و بیشتر تبیین می‌کند. این بررسی نشان می‌دهد که دوره قاجار برای کاربندی، چه از نظر هندسی و چه سازه‌ای، یک دوره تکامل است. شمار کاربندی‌های باربر در این دوره و پیچیدگی هندسی و ظرافت سازه‌ای این سازه‌ها، در قیاس با نمونه‌های کهن‌تر، گزاره مذکور را تأیید می‌کند. هرچند نمونه‌های بسیار متکامل سازه‌ای و هندسی از عهد تیموری و صفویه یا به طور کل مکتب اصفهانِ نخست نیز باقی است، روند تکامل در دوره قاجار ادامه یافته و بهترین نمونه‌های قرون پیش تکرار یا نمونه‌هایی بهتر ابداع شده است. کار بندی‌های آمودی نیز که سازه‌ای مستقل و مستحکم ندارند، مانند دوره نخست مکتب اصفهان، ادامه یافته است. در پایان، با شبیه‌سازی رفتار سازه‌ای، سنت سازه کاربندی تحلیل شده و باربری اجزای آن و نحوه انتقال بار بررسی شده است.

کلیدواژه‌ها: رسمی‌بندی، کاربندی، چفد متقاطع، رفتار سازه‌ای

مقدمه

کاربندی یا رسمی‌بندی، رایج‌ترین گونه از پوشش‌های دارای اصول اربعه در ایران است. منطق این رواج را، علاوه‌بر زیبایی و هندسهٔ ساده‌تر، باید در کاربرد سازه‌ای آن جستجو کرد. با این حال، در میان اصول اربعه، یزدی‌بندی، کاسه‌سازی و مقرنس به‌ندرت و با شرایط ویژه ممکن است باربر باشند. درواقع، در بیشتر نمونه‌ها، این سه صرفاً آمودی‌اند و جز نمای زیبا کاربرد سازه‌ای ندارند.

نخستین کاربرد اصطلاح کاربندی به‌قلم زهره بزرگمهری در نشریهٔ اثر (ش ۶) است که تدوینی از درس‌های مرحوم پیرنیاست. نخستین کاربرد اصطلاح رسمی‌بندی نیز در کتاب معماری تیموری ویلبر،[3] سپس احیای هنرهای ازیادرفتهٔ لرزاده[4] و بعد از آن گره و کاربندی استاد شعرباف[5] است. استاد حسین لرزاده، مجموع هنرهای سقف‌سازی مقرنس (کاسه‌سازی یا شمسه زیاد، رسمی‌بندی و ذیل آن یزدی‌بندی) را به‌همراه گره‌سازی اصول اربعه در معماری برشمرده است.[6] استاد اصغر شعرباف، کاسه‌سازی، یزدی‌بندی و رسمی‌بندی را مجموعاً کاربندی خوانده و در برابرْ گره (گره‌سازی) را که منحصر به سقف نیست طرح کرده است. بدین ترتیب، این مجموعه را با عنوان گره و کاربندی آورده است.[7] استاد محمدکریم پیرنیا آنچه را دو استاد پیشین رسمی، رسمی‌بندی یا رسمی‌سازی گفته‌اند کاربندی خوانده است.[8] به‌عقیدهٔ وی، رسمی‌بندی گونه‌ای از کاربندی است که بیشتر مرسوم و دستوری‌تر بوده است.[9]

به‌نظر می‌رسد در پژوهش‌های پیشین، بُعد سازه‌ای کاربندی نسبتاً مغفول مانده است. این نوشتار می‌کوشد جایگاه سازه‌ای کاربندی‌های دورهٔ قاجار را در قیاس با نمونه‌های پیشین بررسی کند.

بحث و بررسی

منابع گوناگونی که به کاربندی یا رسمی‌بندی اشاره داشته‌اند کم‌وبیش دربارهٔ هندسهٔ آن سخن گفته‌اند. منابعی که پیش‌تر بدان اشاره شد برای بررسی هندسهٔ کاربندی طبق تقسیم‌بندی‌های استادکاران معاصر مفید است. ورود به جزئیات آن‌ها خود مقاله‌ای جداگانه

ت۱. سقف‌سازی هندسی در ایران از راست به چپ: رسمی‌بندی، یزدی‌بندی، کاسه‌سازی و مقرنس.

ت۲ راست: ایوان جامع ساوه. پوستهٔ گچی مقرنس باربر نیست و پس از مورزدگی چوب‌های پشت آن فرو ریخته است. مأخذ: پورنادری، شعرباف و آثارش، ص ۵۶.
چپ: کاربندی ایوان جامع همدان. پوستهٔ کاربندی باربر است و، با وجود فرسایش، همچنان ایستا مانده‌است.

جدول ۱. چکیده‌ای از هندسهٔ ترسیم و گونه‌شناسی کاربندی طبق منابع اولیهٔ ایرانی.

نام پژوهنده	شیوهٔ ترسیم	گونه‌ها
لرزاده	اخراج شعاع از مرکز زمینه	رسمی کامل: گوشه‌بندی چشمهٔ مربع، گوشه‌بندی چشمهٔ مستطیل، فیل گوش‌دار. رسمی نیم‌کار: مربع، تنک، نقل، دوپا.
بزرگمهری و پیرنیا	تقسیم دایره و اتصال نقاط	غیرشاقولی و شاقولی، شاقولی: رسمی و اختری. اختری: گسسته و پیوسته، رسمی: درهم، پرور، نیم‌کار، حذف شاپرک.
شعرباف	اخراج شعاع از مرکز زمینه	رسمی شاقولی: یک‌پا یا کنه‌بندی و دوپا، رسمی سرسفت: یک‌پا و دوپا، نیم‌کار.

جدول ۲.
گونه‌شناسی محمدیان منصور-فرامرزی از کاربندی‌های ایران

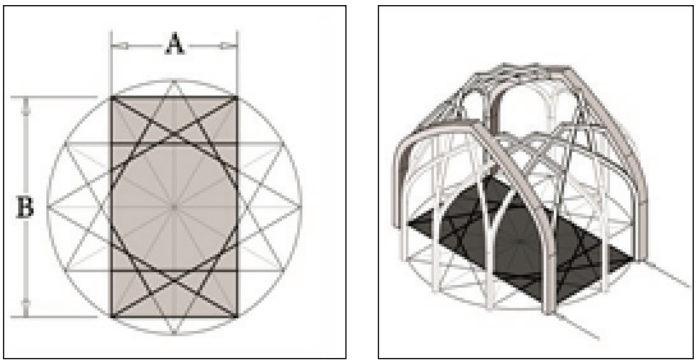
کاربندی	ساده	رسمی	منفرد یک‌پا
			منفرد دوپا
			مرکب
			خاص
		سرسفت (قالب غیرشاقولی)	
	غیرساده	پرور	
		سوار	
		دوچفدی	
		گسترده	
		درون‌زا	

می‌خواهد، اما اینجا با اشاره‌ای مختصر در قالب جدول بیان می‌گردد.

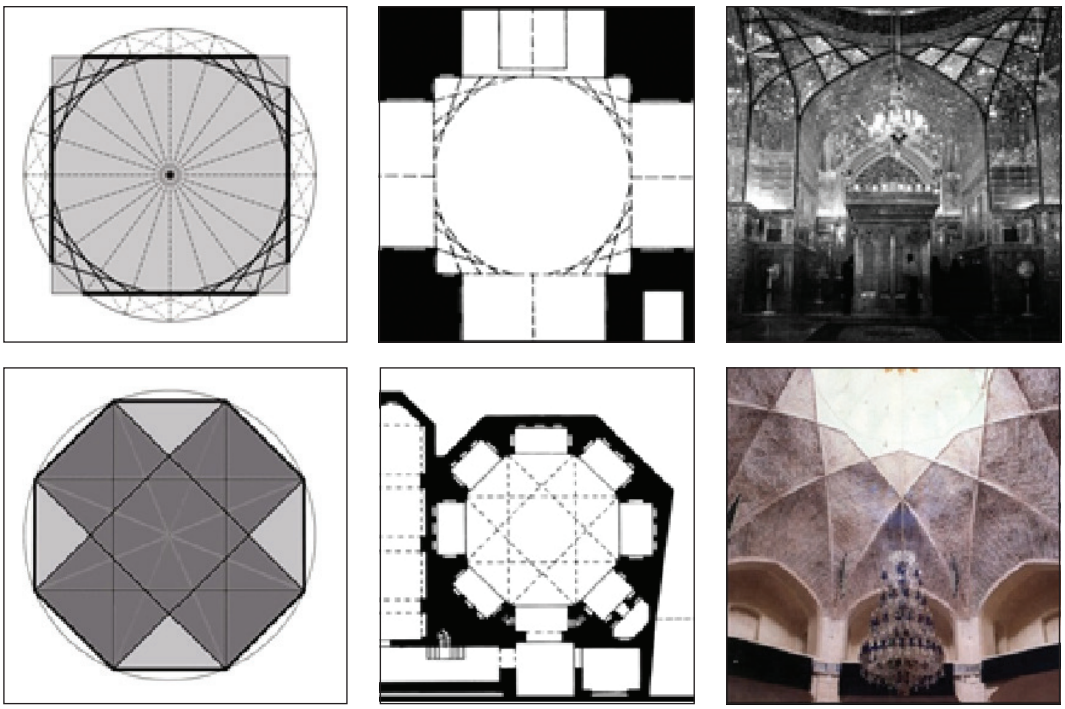
گونه‌بندی جامع‌تری نیز در مقالهٔ «گونه‌شناسی و تدوین ساختار هندسی کاربندی در معماری ایران» صورت یافته که مبنای مقالهٔ حاضر قرار گرفته و بخشی از مطالب آن به‌اختصار در پی می‌آید.[۱۰]

- **کاربندی رسمی منفرد یک‌پا:** زمانی که کاربندی رسمی (قالب شاقولی) دارای حداقل دو تیرطاق دوپا بر زمین موازی با یکدیگر باشد و در زمینهٔ مستطیل یا مربع قرار گیرد، کاربندی به‌دست‌آمده را کاربندی رسمی منفرد یک‌پا گوییم.

- **کاربندی رسمی منفرد دوپا:** در کاربندی رسمی (قالب شاقولی)، زمانی که کاربندی دارای حداقل چهار تیرطاق دوپا بر زمین (دوبه‌دو موازی) در زمینهٔ مربع و ندرتاً هشت‌ضلعی قرار گیرد و همچنین دایرهٔ پاطاق



ت ۳.



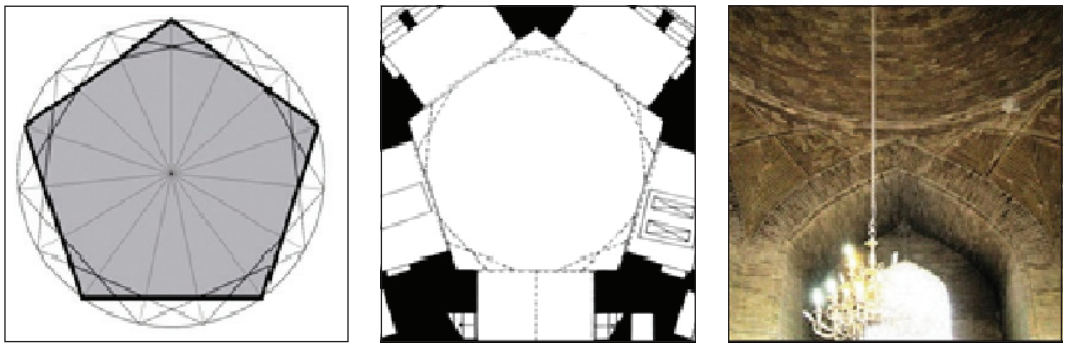
ت ۴.

ت ۵.

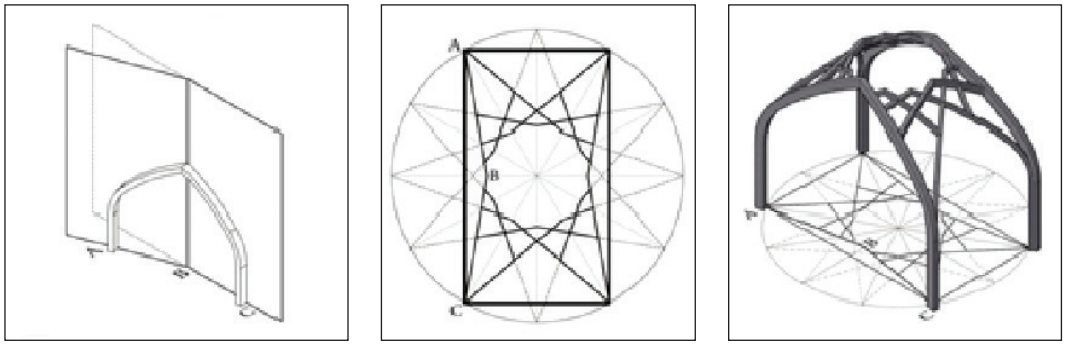
ت ۳. هندسهٔ کاربندی منفرد یک‌پا. کاربندی ۱۲، ۴ به ۴.

ت ۴. هندسهٔ کاربندی منفرد دوپا. شاه‌چراغ. کاربندی ۲۰، ۴ به ۴.

ت ۵. کاربندی رسمی مرکب، حسینیهٔ بالامحلهٔ نایین. کاربندی ۸، ۳ به ۳.



ت ۶. کاربندی رسمی خاص. کاربندی ۱۵، ۳ به ۳. زمینهٔ این کاربندی پنج‌ضلعی است.



ت ۷. هندسهٔ کاربندی سر سفت.

مرکزی در بزرگ‌ترین حالت خود، یعنی مماس با اضلاع زمینه باشد، کاربندی حاصله را کاربندی رسمی منفرد دوپا می‌نامیم. واژهٔ دوپا که در عنوان این کاربندی به کار رفته بدین معناست که در ربع پلان کاربندی دو عضو باربر وجود دارد و این مسئله اصلی‌ترین تمایز این گونه با کاربندی رسمی منفرد یک‌پاست. یکی از ویژگی‌های این کاربندی قابلیت باربری بسیار آن، به‌سبب هشت پای نگهدارنده، است. ویژگی مهم دیگر این کاربندی، قابلیت احداث گنبد در بزرگ‌ترین حالت ممکن، یعنی مماس به اضلاع زمینه، است. بنا به این دو ویژگی، بسیاری از بزرگ‌ترین گنبدهای معماری ایران روی این نوع از کاربندی استوار شده‌اند.

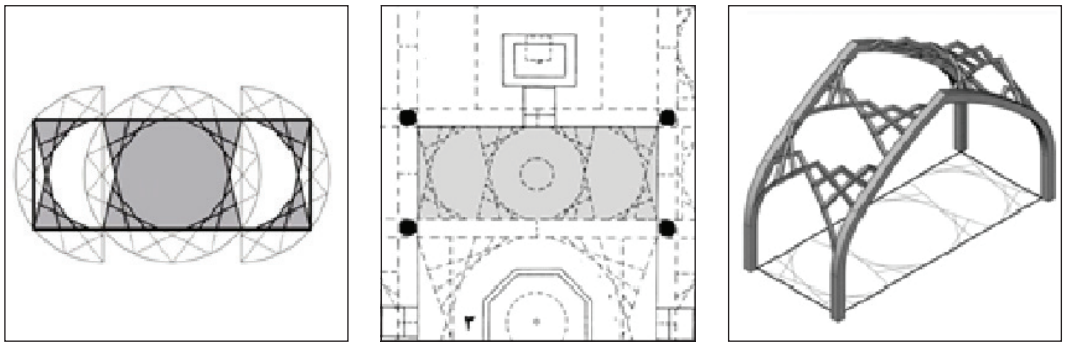
- **کاربندی رسمی مرکب:** از ترکیب دو یا چند کاربندی رسمی منفرد یک‌پا کاربندی رسمی مرکب ایجاد می‌شود. می‌توان گفت کاربندی رسمی مرکب بعد از کاربندی رسمی منفرد یک‌پا بیشترین فراوانی را در بین انواع کاربندی داراست. کاربندی‌های رسمی مرکب در بیشتر اقسامشان مانند کاربندی رسمی منفرد دوپا در ربع پلان خود دو پا دارند، اما تمایز اصلی این گونه با کاربندی رسمی منفرد دوپا آن است که در کاربندی رسمی مرکب دایرهٔ پاطاق مرکزی بر اضلاع زمینه مماس نیست، اما در کاربندی رسمی منفرد دوپا دایرهٔ پاطاق مرکزی بر اضلاع زمینه مماس است.

- **کاربندی رسمی خاص:** کاربندی‌های طراحی‌شده در زمینهٔ غیرمربع و مستطیل یا با اضلاع فردْ خاص نام دارند.

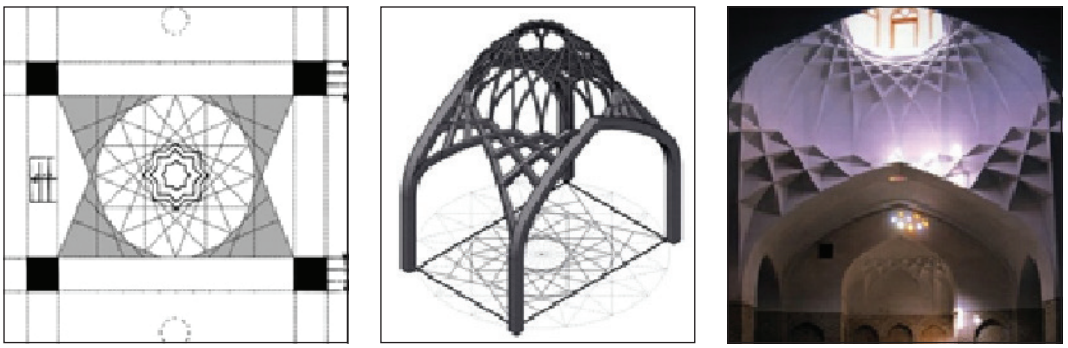
- **کاربندی سرسفت (قالب غیرشاقولی):** چنان‌چه دو نیمهٔ تیرطاق بر یک صفحه واقع نباشند، کاربندیِ تشکیل‌شده از این تیرطاق را سرسفت (قالب غیر شاقولی) می‌گویند. عدم قرارگیری این دو نیمهٔ تیرطاق در امتداد یکدیگر سبب خواهد شد که این دو نیمه تیرطاق نتوانند به‌صورت قوس کامل بار را به دو طرف تکیه‌گاه‌ها منتقل کنند. بنابراین، می‌بایست به شمسهٔ مرکزی (نهنبن) یا گنبدی که روی کاربندی قرار می‌گیرد تکیه کنند. بدین سبب، کاربندی سرسفت، در مقایسه با کاربندی رسمی، ایستایی و باربری کمتری دارد.[۱۱]

- **کاربندی پرور:** هرگاه نسبت طول به عرض زمینهٔ کاربندی نسبتاً زیاد باشد، می‌توانیم در میانهٔ دهانهٔ یک کاربندی رسمی منفرد یک‌پا اجرا و در هر طرف آن یک نیمه کاربندی از همان نوع یا از نوعی دیگر پیاده کنیم. کاربندی حاصل از این روش را کاربندی پرور می‌نامند.

- **کاربندی سوار:** هرگاه دو کاربندی روی هم سوار شوند، کاربندی به‌دست‌آمده را سوار گویند.

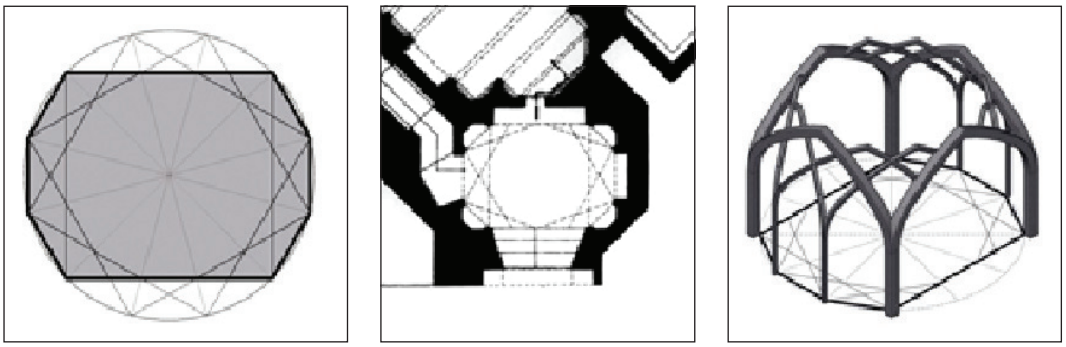


ت ۸. هندسهٔ کاربندی پرور، حمام خسروآقای اصفهان.



ت ۹. هندسهٔ کاربندی سوار، سربینهٔ حمام خان یزد.

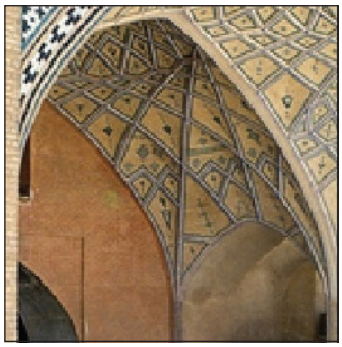
ت ۱۰. هندسهٔ کاربندی دوچفدی، حمام نوبر تبریز.

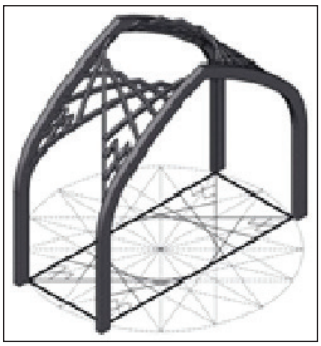


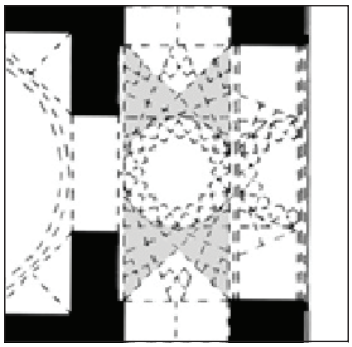
ت ۱۱. هندسهٔ کاربندی گسترده، هشتی مسجد باباولی کاشان.

- **کاربندی دوچفدی:** چنانچه در ساخت یک کاربندی از دو گونه تیرطاق با دو چفد متفاوت استفاده شود، آن کاربندی را کاربندی دوچفدی می‌نامند. چفد دوم را می‌بایست طوری انتخاب کرد که در فضا با تیر طاق‌های چفد اول تلاقی داشته باشد.

- **کاربندی گسترده:** چنانچه در یک کاربندی رسمی منفرد یک‌پا بعضی از تیر طاق‌ها از جهت عرض و یا طول زمینه تا دایرهٔ محیطی کاربندی گسترش یابند، کاربندی حاصل‌شده گسترده نامیده می‌شود.







ت ۱۲. ایوان مسجد نوشیان کاشان.

- **کاربندی درون‌زا:** چنانچه روی آلت‌های یک کاربندی کاربندی دیگری اجرا شود، این نوع را درون‌زا گوییم.

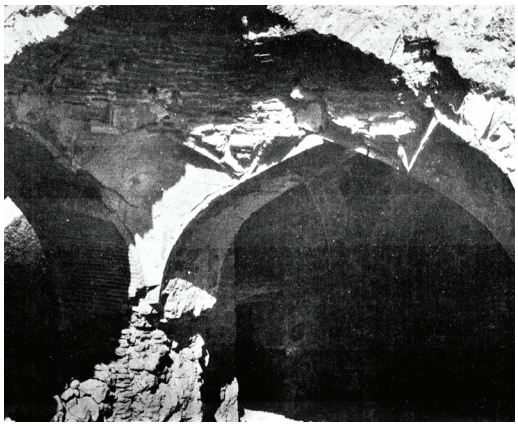
بررسی مختصر سیر هندسه و سازهٔ کاربندی تا پیش از قاجار

این موضوع را با استفاده از دو منبع، یکی کاربندی‌های به‌جامانده و نیز شماری از نقشه‌های میرزا اکبر معمار، می‌توان نشان داد. در اینجا، برای اختصار، تنها نمونه‌ها بررسی شده‌اند.

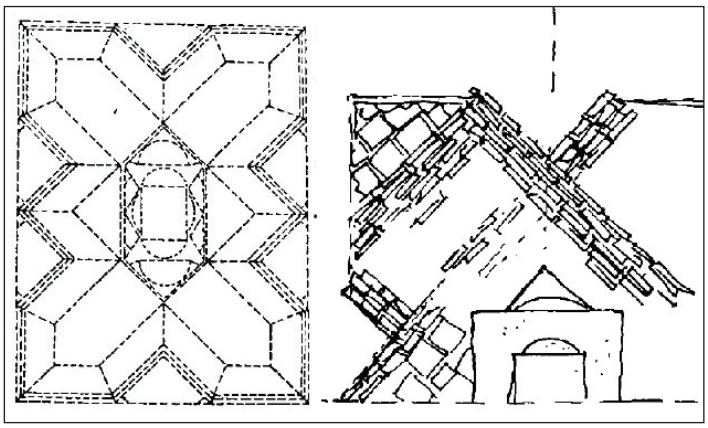
طبق بررسی منابع و نیز مقدمهٔ کتاب هندسه در معماری،[۱۲] کهن‌ترین کاربندی به‌جامانده تا روزگار ما، در جامع عتیق شیراز بوده است که به‌روزگار عمرو لیث صفاری در ۲۶۲ هـ.ق. ساخته شده است. این نمونه یک کاربندی منفرد یک‌پا ۸، ۲ به ۲ است که زمینهٔ مربع را به هشت‌ضلعی تبدیل می‌کند و یکی از پرکاربردترین راه‌ها برای زدن طاق کلمبو تا دورهٔ معاصر است. متأسفانه، به‌سبب تخریب بخش کهن جامع شیراز، امروز نمی‌توان دربارهٔ سازهٔ آن نظر دقیق داد، اما عکس‌های ویلبر بیانگر این است که هم در چهار تیرطاق اصلی و هم چهار تیرطاق کوچک از آجرچینی پر استفاده شده است و گنبد نیز گردچین ساخته شده، که هر دو مورد با نمونه‌های معاصر قاجاری شباهت بسیار دارد.

گالدیری، در مقاله‌ای در سال ۱۹۸۳م، شماری از کهن‌ترین باریکه‌طاق‌های متقاطع ایران را بررسی کرده است.[۱۳] دومین نمونهٔ باقی‌مانده در ایران، در جامع نایین است که بایست در حدود ۳۵۰ هـ.ق. یا ۹۶۰ م. ساخته شده باشد. در این نمونه، که از زیر مقرنس و از بالا همچون کاربندی است، به‌گفتهٔ گالدیری، تیرطاق‌ها کاملاً باربر و مستقل از پوسته‌های میانی عمل می‌کنند. در هندسهٔ این طاق، جفت تویزهٔ متقاطع با یک جفت تویزهٔ دیگر دیده می‌شود. از این نظر، نسبت به نمونهٔ مسجدجامع شیراز که منفرد محسوب می‌شد، این نمونه را می‌توان مرکب برشمرد. آجرچینی این کار نیز پر است.

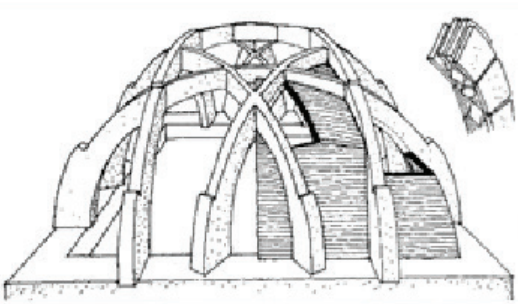
به‌گفتهٔ گالدیری، تویزه‌های ایرانی رفته‌رفته با پیشرفت فناوری به سازه‌ای سه‌بعدی و خودکفا تبدیل شدند، یعنی سطوح میانی بر آن‌ها تکیه دارد و گاه

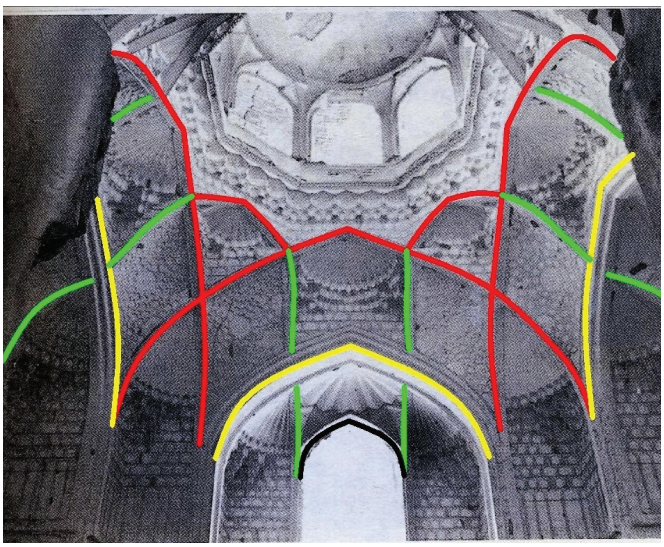


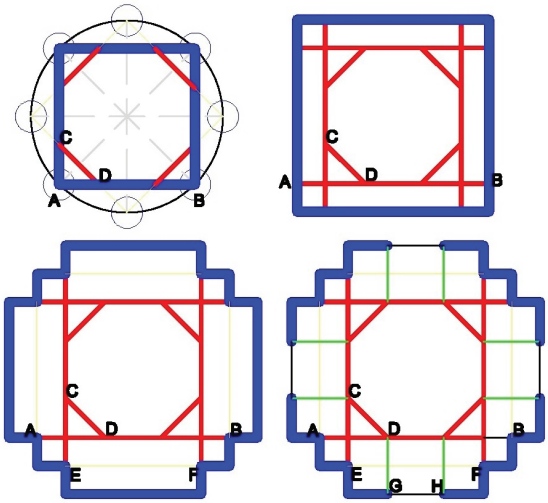
ت ۱۴. دستینه‌ای که گالدیری از طاق کنار محراب جامع نایین کشیده است.



ت ۱۳. کاربندی تخریب‌شده درجامع شیراز مربوط به عهد صفاری.







ت ۱۵. طاق شمارهٔ ۶۰ مسجدجامع اصفهان، سازهٔ آجری که پوسته‌های آن هیچ‌گونه نقش سازه‌ای ندارد.

ت ۱۶. کاربندی مدرسهٔ غیاثیهٔ خرگرد که میان آلات آن با مقرنس بسیار ریزی پر شده است. این کار، با وجود مقرنس بسیار هنرمندانه، هندسهٔ کاربندی ساده‌ای دارد.

بدون حتی کوچک‌ترین آسیبی به سازه و جذب رانش می‌توان آن‌ها را حذف کرد. پس نظریهٔ گدار و مونره، که تویزه‌های ایرانی را فقط جهت‌دهنده و نه باربر می‌دانند، نادرست است.[۱۴]

مهم‌ترین نمونهٔ بسیار قدیمی از دید وی، طاق شمارهٔ ۶۰ جامع اصفهان است. او تاریخ ساخت آن را حدود ۱۰۹۰ م. (۴۸۰ هـ.ق.) می‌داند. طبق مشاهدات و کاوش‌های گالدیری، طاق شمارهٔ ۶۰ سازهٔ کاملاً تویزه‌ای مانند یک اسکلت متعادل فلزی است. نکتهٔ جالب آن است که تویزه‌ها وقتی به‌سوی تکیه‌گاه می‌آیند از مقطع ۴×۱ آجر به‌ابعاد ۲۹×۲۶ به ۴×۲ آجر به‌ابعاد ۲۹×۶۰ می‌رسند.[۱۵] در طاق شمارهٔ ۶۰، علاوه‌بر پیشرفت سازه، می‌توان پیشرفت هندسه را نیز به‌نسبت شیراز و نایین دید. هندسهٔ این طاق به‌سوی ستاره‌ای شدن کامل پیش رفته و می‌توان آن را ۸، ۳ به ۳ و از گونهٔ مرکب دانست. پس از طاق شمارهٔ ۶۰ که در نیمهٔ دوم قرن پنجم بنا شده، در قرن ششم، نمونه‌های بیشتری از کاربندی ساخته شده است. پرداختن به همهٔ آن‌ها خارج از حوصلهٔ این نوشتار است، اما کم‌وبیش ابتکاراتی در نمونه‌ها و کارها می‌توان دید.

به‌گفتهٔ دونالد ویلبر، از نیمهٔ قرن پانزدهم میلادی مقرنس به‌تدریج جای خود را به رسمی داد.[۱۶] این زمان تقریباً برابر با قرن نهم و دورهٔ تیموری است. استاد پیرنیا این دوره را پایان شیوهٔ آذری و آغاز دورهٔ اصفهانی می‌داند.[۱۷] به‌نظر می‌رسد مهم‌ترین دورهٔ رواج کاربندی در همین زمان باشد. اما اغلب نمونه‌های به‌جامانده از این زمان بیشتر یا در گونهٔ منفرد یک‌پا هستند و یا مرکب و برخی نیز هندسه‌ای ابتدایی دارند.

در کوشک نمکدان در گاذرگاه خواجه عبدالله در افغانستان، می‌توان نمونه‌هایی از کاربندی را دید که به نمونه‌های معاصر قاجار چه در سازه و چه در هندسه بسیار شبیه است. در سقف مرکزی، علاوه بر تکامل هندسهٔ ستاره‌ای کاربندی ۸، ۳ به ۳ مرکب، تویزه‌ها، در زیر و رو، دارای لغازند، تا کته‌پوش‌ها (پوسته‌های آجری میانی) بتوانند راحت به آن‌ها متصل شوند. مانند طاق شمارهٔ ۶۰، ارتفاع تیر یک بار

ت ۱۷. کوشک نمکدان در گاذرگاه، افغانستان، نمونه‌ای کامل از یک کاربندی ۸، ۳ به ۳ و مرکب است.

از تکیه‌گاه به‌سوی عرقچین کاهش یافته است تا وزن مرده کاهش یابد. نکتهٔ قابل توجه در این بنا آن است که این کاربندی دوپوسته است و در بام هیچ گنبد یا سقف محافظ دیگری بر بالای آن قرار نگرفته است. این را باید پیشرفتی در اجرای کاربندی دانست. نیش آجرها در زیر سازه با گچ دمگیری شده تا بر هندسه تأکید زیادی شود. از سویی، در ایوانچه‌های پیرامون اشکوب بالا، سقف یک نیم‌کار طاق کلمبو است و کاربندی کاذبی با تویزه‌های گچی زیر آن اجرا شده است. بنابراین، استفاده از همین کاربندی آمودی نیز خود در خور توجه است. می‌توان این‌گونه گفت که فناوری تویزه‌های متقاطع که نخست کاملاً باربر و آجری بود به‌تدریج به‌گونهٔ آمودی نیز اجرا شد و در این انتقال سازه‌ای، انتقال ساختمایه از آجر به گچ نیز رخ داد.

بررسی‌های نگارندگان در مورد سازهٔ کاربندی در مکتب صفوی نشان می‌دهد در عهد صفویه، با افزایش رواج کاشی نسبت به آجر و گچ، اجرای مقرنس تا حدی دشوارتر شده و کاربندی‌های کاذب با توجه به اجرای ساده و کم‌هزینه نسبت به مقرنس رواج می‌یابند. به‌طور کلی، در دوره‌های نخست، تقریباً همهٔ کاربندی‌ها باربرند، اما از دورهٔ تیموری و به‌ویژه صفوی، نمونه‌های آمودی بیشتر می‌شوند. آندره گدار با نادیده انگاشتن شمار زیادی از کاربندی‌های باربر ایران در عصر صفوی و با توجه به نقصان دانش وی در این مورد، برخلاف ویلبر، بیشتر کاربندی‌های صفوی را تنها یک آمود می‌داند: «شبکهٔ باریکه که به‌طرز شایسته‌ای مسئلهٔ انتقال از طرح مربع به طرح مدور گنبد را برای چشم بیننده حل کرده، به‌ندرت چیز دیگری سوای تزیینی ثابت بر روی سفت کاری پس از انجام کار می‌باشد.»[۱۸]

از نمونه‌های عالی کاربندی در دورهٔ صفویه، که هم سازه و هم هندسهٔ متکاملی دارد، چهارسوی گنجعلی‌خان در کرمان است. این کاربندی ۲۴ سوار است. کار پایینی مرکب و حاصل ترکیب سه کار است که هرکدام یک کاربندی منفرد یک‌پا ۲۴، ۶ به ۶ در زمینهٔ مربع است. بنابراین، در یک‌چهارم این کار به‌جای دو پا سه پا وجود دارد. کار بالایی نیز ۲۴ است که باید آن را نیز مرکب و حاصل چرخیدن سه کار در هم دانست. هر کار یک کاربندی منفرد دوپا ۲۴، ۳ به ۳ و در زمینهٔ هشت‌ضلعی منتظم است. این کاربندی پیچیدگی‌های هندسی و ریاضی را به اوج رسانده است و از طرفی یک سازه با درجه‌بندی تویزه‌ها با توجه به مقدار بار وارد بر آن‌ها دارد.

نگاهی به سازه و هندسهٔ کاربندی‌های قاجار

از نظر هندسه، به‌جز گونهٔ دوچفدی، که گونه‌ای نادر و بسیار ویژه از کاربندی است، همهٔ گونه‌های دیگر کاربندی را در دورهٔ قاجار می‌توان یافت. باید گفت برخی از گونه‌ها زاییدهٔ این دوره‌اند یا تعداد به‌جامانده از آن‌ها،

ت ۱۸. کاربندی چهارسوی گنجعلی خان کرمان از بیرون و درون.

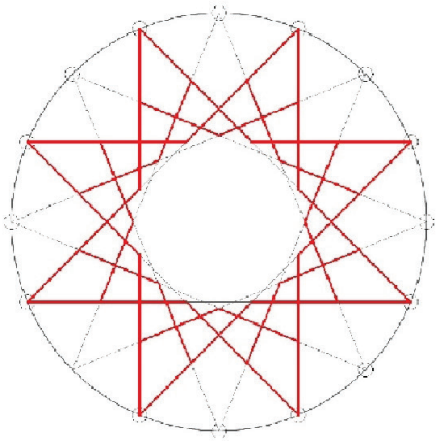
از این دوره بیشتر است. برای نمونه، کاربندی خردشده یا درون‌زا، اگر سابقه‌ای هم در دوره‌های پیشین داشته باشد، در این دوره بیشتر به‌کار رفته است. کاربندی سرسفت نیز، با توجه به رشد تعداد کاربندی‌های آمودی دورهٔ قاجار و باربری کم آن، بسیار به‌کار رفته است. به‌طور کل، می‌توان گفت روند جایگزینی مقرنس با کاربندی همچنان در قاجار نیز ادامه یافته و گونهٔ کاملاً غالبِ سقف‌های هندسی شده است. در دوره‌های پیش از قاجار، چپیرهٔ گنبدها به روش‌های مختلفی ساخته شده است. فیل‌پوش، دمغازه، پتکین، پتکانه و طاق‌بندی از آن جمله‌اند. اما، در دورهٔ قاجار، کمتر می‌توان چپیره‌ای جز کاربندی دید. برای نمونه، گنبد مسجد سپهسالار یا نمونه‌های متعدد از بناهای قاجاری کاشان از این دست است. گویا شیوه‌ای که از دورهٔ تیموری رایج شد و هندسهٔ کاربندی را، از دید زیرین، فارغ از اندازهٔ واقعی تویزه‌ها، تنها با نیش آجر یا جوک کاشی نشان می‌داد، در این دوره نیز همان‌گونه و بی‌تغییر ادامه یافته است.

از نظر سازه‌ای، باید گفت در بیشتر اقسام طاق و نیز گنبدها، توان اجرا در این دوره کاهش یافته است. دهانه‌هایی به‌اندازه‌های قدیم را دیگر نمی‌توانستند پوشش دهند و افت فنی بسیار پدید آمد. برای نمونه، در قیاس با گنبد مسجد امام و شیخ لطف‌الله، گنبد مسجد سپهسالار بسیار کوچک‌تر است. اما در این دوره افت چندانی در دهانه‌های کاربندی دیده نمی‌شود. در واقع، از راهکارهایی که با آن دهانه‌های بزرگ این دوره را اغلب پوشانده‌اند کاربندی است. علت این امر توان باربری موفق و اجرای قاعده‌پذیر این سازه است که، با کاهش هزینهٔ ساخت، آن را همچنان رایج نگه می‌دارد.

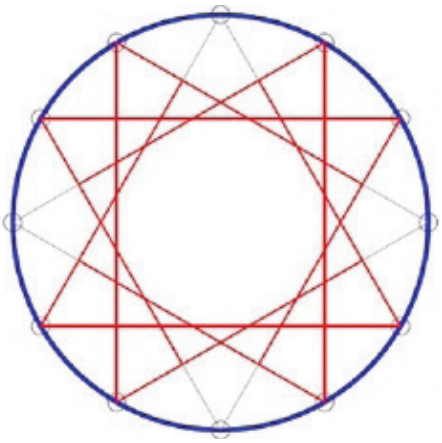
از بهترین مجموعه بناهای قاجاری، که کاربندی‌هایی با دهانهٔ بزرگ دارد، بازار تبریز است. نمونهٔ متکامل هندسی و سازه‌ای آن تیمچهٔ حاج محمدقلی بازار تبریز است که کاملاً سازه‌ای و غیرآمودی است؛ یعنی تقریباً همهٔ تویزه‌هایی که در هندسهٔ زیرین دیده می‌شود در بالا با آجر ساخته شده است. از سویی، با توجه به دهانهٔ کار، درجه‌بندی اندازهٔ تویزه‌ها از شاه‌تویزه تا دوپا در هوا خوب انجام شده است.

هندسهٔ کار اصلی دو کاربندی ۱۶، ۶ به ۶ است که با یکدیگر ترکیب شده‌اند. دو ردیف از آلات بالایی آن حذف شده‌اند که شمسه را بزرگ‌تر می‌نمایاند. در شاه‌تویزه‌ها این حذف تنها از زیر است، یعنی در بالا تویزه‌ها ادامه دارند و سرسفت نشده‌اند، اما در پایین جلوی آن‌ها پوشانده شده است. البته در تویزه‌های

ت ۱۹. سازهٔ تیمچهٔ حاج محمدقلی به‌هنگام مرمت.



ت ۲۰. هندسهٔ نظری کاربندی اصلی تیمچهٔ حاج محمدقلی.



ت ۲۱. هندسهٔ نظری کاربندی چهارسو کلاهدوزان تبریز.

ت ۲۲. نمای چهارسو کلاهدوزان از درون بازار تبریز.

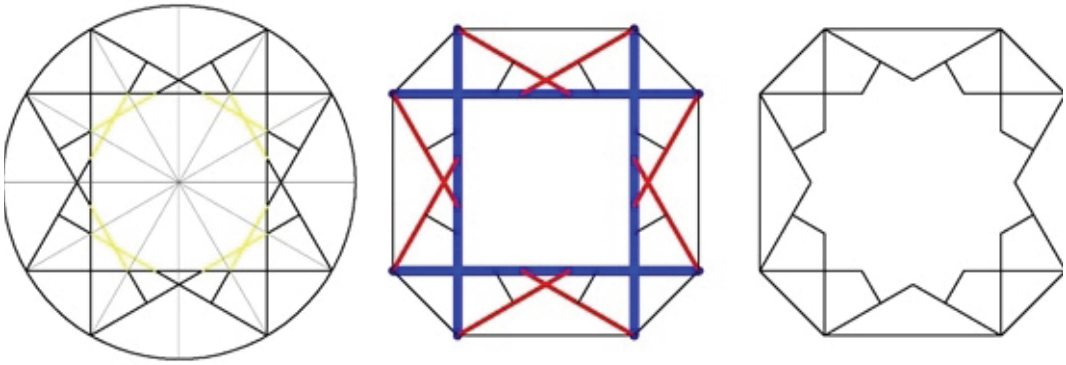
فرعی این حذف کاملاً انجام شده است، زیرا بار چندانی بر آن‌ها نیست و از این رو سرسفت شدن آنان خللی بر سازهٔ اصلی وارد نمی‌سازد. در هریک از گوشه‌ها نیز یک‌چهارم یک کار ۱۲ به‌صورت دستگردان‌شده به‌کار رفته است. جزئیات سازه‌ای و هندسی این کار همچون چهارسوی گنجعلی‌خان و حتی از آن پیچیده‌تر است. یکی از مواردی که در اینجا از چهارسوی گنجعلی‌خان فراتر رفته، اجزای دو لایه کته‌پوش میان تویزه‌ها، یکی از زیر و یکی از رو، است تا فرسایش و رطوبت کار را از بین نبرد. تصویر ۱۹ هنگامی عکاسی شده که این رده کته‌پوش رویی برای مرمت کاملاً برداشته و بعد مجدداً ساخته شده است.

شبیه‌سازی سازه‌ای

شناخت ما از رفتار سازه‌های کهن ایرانی عموماً اندک است. این شناخت به‌ویژه در مورد کاربندی به‌علت پیچیدگی هندسهٔ نظری و غامض بودن هندسهٔ عملی دیریاب‌تر می‌نماید.

یکی از نمونه‌های خوب برای تحلیل، کاربندی چهارسو کلاهدوزان بازار تبریز است. با توجه به قدمت اندک این سازه، مستندات کافی برای سه‌بعدی‌سازی جزئیات آن و در نتیجه تحلیل نرم‌افزاری فراهم است. اگرچه این سازه معاصر است، استاد رضا معماران، که در دورهٔ قاجار تربیت یافته بود، آن را ساخته و پدر وی نیز تعدادی از تیمچه‌های بازار تبریز را بنا کرده است. در زمینهٔ تکنیک و شیوهٔ ساخت، تفاوتی میان ساختار این مورد با نمونه‌های قاجاری وجود ندارد.

این فضا بر کارشیوی هشت و نیم‌هشت واقع است، بدین شکل که اضلاعْ یک‌درمیان کوچک‌تر و بزرگ‌تر می‌شود و حاصل کار به نگینی تراش‌خورده می‌ماند. اضلاع بزرگ به یک راسته بازار متصل‌اند که در جمع چهار راسته بازار در این فضا به هم می‌رسند و



ت ۲۳. از چپ به راست به‌ترتیب: هندسهٔ نظری، هندسهٔ سازه‌ای و هندسهٔ معماری چهارسو کلاهدوزان.

ت ۲۴. آغاز کار که با ساخت چهار شاه‌تویزه شروع شده است. استاد رضا در کنار و پسرش بیوک در میانه ایستاده است.

اضلاع کوچک‌تر دکان است. سقف این فضا پیش از انقلاب فروریخته بود و، بنا به گفته‌ها، سقف پیشین نیز دارای کاربندی بود. همچنین، سقفی سبک با استفاده از چوب به‌جای سقف پیشین بر این فضا ساخته شده بود. فرهاد تهرانی (مسئول دفتر حفاظت از آثار باستانی استان آذربایجان از ۱۳۵۸ تا ۱۳۶۰) بازسازی این سقف را برای احیای بازار تبریز ضرورت دانسته و بر آن نظارت کرده است. طراح، معمار و سازندهٔ بخش مهمی از آن استاد رضا معماران بنام تبریزی بوده است. این بازسازی در سال ۱۳۶۰ در پنج ماه و با ۱۵۰هزار تومان هزینه انجام پذیرفته است.

هندسهٔ نظری چهارسو کلاهدوزان یک کاربندی دوازده چهاربه‌چهار مرکب طبق گونه‌شناسی کاربندی، از محمدیان‌منصور و فرامرزی است که دو رده از بالاترین آلات آن حذف شده و تنها یک رده آلت پاباریک در آن باقی مانده است.

استاد رضا معماران در هندسهٔ نظری این بنا مقداری دست برده و شمسه را در سازهٔ یک مربع و در دید از زیر، با حذف دو ردیف از آلات بالایی، در بزرگ‌ترین حالت ممکن قرار داده است.

خوشبختانه، به‌کمک عکس‌های فرهاد تهرانی و مستندات موجود، شبیه‌سازی این بنا تاحدی شدنی

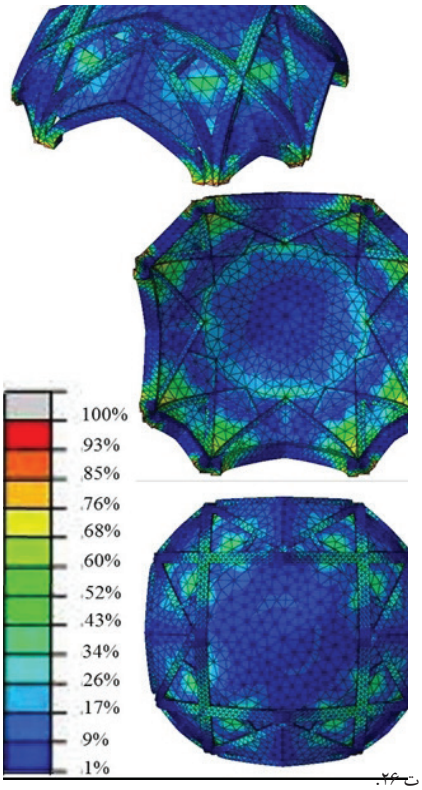
است. نرم‌افزار آباکوس[19] برای کار برگزیده شد. در تحلیل کار، کل سازه به‌صورت حجمی یکپارچه تلقی شده است، یعنی همهٔ حجم یک‌تکه با خواص مکانیکی یکسان و از جنس آجر. خواص مکانیکی آجر طبق مقادیر مقالهٔ مهرداد حجازی[20] اعمال شد:

آجر	خصوصیات مصالح
۱۳۳۰	جرم حجمی: ρ (kg/m³)
۵۳۰۰	مداول الاستیسیته: E (MPa)
۰/۱۷	ضریب پواسون: υ
۰/۵۳	مقاومت کششی مجاز: $\sigma^t a$ (MPa)
۵/۳	مقاومت فشاری مجاز: $\sigma^c a$ (MPa)

جدول ۳. خواص مکانیکی مورد استفاده در شبیه‌سازی سازه‌ای.

نتیجه‌گیری

رنگ بیشتر نقاط سازه به‌طور عجیبی یکدست است. به‌طور خلاصه، در دید از بالا توزیع تنش بسیار همگن و بیشتر در ناحیهٔ آبی است. از این رو، تنش اغلب نقاط از ۱۰ درصدِ مجاز تجاوز نکرده است. دید از پایین شبیه به آن بوده، تنها در پاباریک‌ها تنش تا ناحیهٔ سبز یعنی ۶۰ درصد پیش رفته است. در توضیح این پدیده باید گفت، با توجه به اینکه پاباریک در راستای تکیه‌گاه قرار گرفته، کوتاه‌ترین مسیر برای رسیدن بار به تکیه‌گاه و صلب‌ترین راه است. بنابراین، بار از طریق آن، میل به انتقال دارد. شکستی که در سه‌بعدی‌سازی انجام شد تا در نرم‌افزار آباکوس قابل تحلیل باشد این پوسته را از حالت محدب به بیرون درآورده و کمی شکستگی به‌سوی میان داده است. بنابراین، برخلاف آنچه در واقعیت این سازه دیده می‌شود، در تحلیل سه‌بعدی، وضعیت خروج از مرکز روی می‌دهد که منجر به «ممان» و در نتیجه افزایش تنش به‌ویژه کشش در زیر عنصر می‌گردد. در این سازه، پدیده‌ای نیازمند بررسی است: قاعدتاً، تنش باید از بالا به پایین افزایش یابد، به‌ویژه اینکه سازه فشاری است و، با افزایش وزن از بالا به پایین، تنش فشاری نقاط پایین باید بیشتر شود، اما معمولاً هنگامی‌که در یک ناحیه تنش در حال افزایش است، به‌سرعت در نقاط پایین به تعدیل می‌رسد. این پدیده، که به‌صورت رنگِ نسبتاً یکنواخت بروز کرده، شگفت و نیازمند بررسی است. به‌طور خلاصه، رفتار سازه در توزیع یکدست تنش، بسیار موفق و متفاوت از اغلب سازه‌های معمول است.



ت ۲۶.

ت ۲۵.

ت ۲۵. حجم سه‌بعدی چارسو با اتوکد. راست: با هندسهٔ نظری شامل خط و پوسته بی‌بعد. چپ: با هندسهٔ عملی دارای ضخامت و ابعاد.

ت ۲۶. کانتورهای تنش در اثر نیروی گرانش و وزن سازه.

پی‌نوشت‌ها

۱. دانشجوی دکتری معماری اسلامی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز. makeactivemetals@yahoo.com

۲. دانشیار بازنشستهٔ تاریخ معماری و مرمت دانشگاه شهید بهشتی. tehrani1323@gmail.com

۳. ویلبر و همکاران، معماری تیموری در ایران و توران، ص ۱۴۸-۱۵۴.

۴. لرزاده، احیای هنرهای ازیادرفته. این کتاب به خط و ترسیم استاد لرزاده در سال ۱۳۵۸ نگاشته و به‌همت محمد خواجوی چاپ شد. بعدها در سال ۱۳۷۴ کتابی با نام احیای هنرهای ازیادرفته از سوی مهناز رئیس‌زاده و حسین مفید چاپ شد که خلاصه‌ای از همان کتاب با ترسیماتی رایانه‌ای و تدوینی جدید است. در هر دو کتاب واژهٔ رسمی‌بندی به‌کار رفته است. برای نمونه، نک. صفحهٔ ۱۷ از کتاب یکم.

۵. شعرباف، گره و کاربندی. در تمام قسمت‌های این کتاب از لفظ رسمی‌بندی بدان منظور استفاده شده است.

۶. رئیس‌زاده و مفید، احیای هنرهای ازیادرفته، صص ۱۰-۱۴.

۷. شعرباف، گزیده آثار استاد اصغر شعرباف، صص ۱- ۱۱.

۸. پیرنیا، «گنبد در معماری ایران»، ص ۷۳.

۹. بزرگمهری، هندسه در معماری، صص ۱۱-۱۵.

۱۰. محمدیان‌منصور و فرامرزی، «گونه‌شناسی و تدوین ساختار هندسی کاربندی...».

۱۱. شعرباف، گزیده آثار استاد اصغر شعرباف، ص ۹.

۱۲. بزرگمهری، هندسه در معماری، صص ۱-۱۱.

13. E. Galdieri, “Contributi alla conoscenza delle strutture a nervature incrociate”, pp. 61-75.

۱۴. گالدیری، «آشنایی با کاربندی در فناوری طاق‌ها».

۱۵. همان.

۱۶. ویلبر و همکاران، معماری تیموری در ایران و توران، صص ۱۵۲-۱۵۷.

۱۷. پیرنیا، سبک‌شناسی معماری ایرانی، صص ۲۰۴ و ۲۷۰.

۱۸. گدار، طاق‌های ایران، ص ۸۱.

19. ABAQUS

۲۰. حجازی، «تأثیر قرارگیری آجرها در رفتار سازه‌ای قوس‌های نیم‌دایره‌ای آجری».

کتاب‌نامه

بزرگمهری، زهره. هندسه در معماری. تهران: سبحان نور، ۱۳۸۵.

پورنادری، حسین. شعرباف و آثارش. تهران: پژوهشگاه سازمان میراث فرهنگی کشور، ۱۳۷۹.

پیرنیا، محمدکریم. «گنبد در معماری ایران»، اثر، تهران: سازمان میراث فرهنگی، ش ۲۴ (۱۳۷۳).

پیرنیا، محمدکریم. سبک‌شناسی معماری ایرانی. تهران: سروش دانش، ۱۳۸۶.

حجازی، مهرداد. تأثیر قرارگیری آجرها در رفتار سازه‌ای قوس‌های نیم‌دایره‌ای آجری. سومین کنگرهٔ ملی مهندسی عمران، تبریز: دانشگاه تبریز، دانشکدهٔ فنی مهندسی عمران، ۱۳۸۶.

رئیس‌زاده، مهناز و حسین مفید. احیای هنرهای ازیادرفته و معماری سنتی در ایران به روایت استاد حسین لرزاده. تهران: مولی، ۱۳۸۴.

شعرباف، اصغر. گره و کاربندی. تهران: سبحان نور، ۱۳۸۵.

شعرباف، اصغر. گزیده آثار استاد اصغر شعرباف: گره و کاربندی. به‌اهتمام مهدی مکی‌نژاد، تهران: فرهنگستان هنر، ۱۳۸۵.

گالدیری، اوژن. «آشنایی با کاربندی در فناوری طاق‌ها»، ترجمهٔ مجید راسخی (منتشرنشده).

گدار، آندره. طاق‌های ایران. ترجمهٔ کرامت‌الله افسر. تهران: یساولی، ۱۳۶۹.

لرزاده، حسین. احیای هنرهای ازیادرفته. به‌اهتمام محمد خواجوی. تهران: نشر کتاب، ۱۳۵۸.

محمدیان‌منصور، صاحب و سینا فرامرزی، «گونه‌شناسی و تدوین ساختار هندسی کاربندی در معماری ایران»، هنرهای زیبا (معماری و شهرسازی). دورهٔ ۳، ش ۴۸ (زمستان ۱۳۹۱).

ویلبر، دونالد، لیزا گلمبک و رناتا هلد، معماری تیموری در ایران و توران. ترجمهٔ کرامت‌الله افسر و محمدیوسف کیانی. تهران: سازمان میراث فرهنگی کشور، ۱۳۷۴.

Galdieri, E. «Contributi alla conoscenza delle strutture a nervature incrociate», *Rivista degli studi orientali,* Vol. 57, 1983, pp. 61-75.