

بازشناسی تعریف و نقش سازه‌های خشخاشی در گنبدهای دوپوسته گسسته رُک؛ شهر تاریخی کاشان

چکیده

خشخاشی یا پره یکی از اندام‌های سازه‌ای در گنبدهای دوپوسته است که در فضای بین دوپوسته ساخته شده‌اند. مطالعات پیشین معمولاً این اندام را در گنبدهای دوپوسته نار (پیازی شکل) مطالعه کرده و کمتر به مطالعه آن در گنبدهای رُک (هرمی یا مخروطی شکل) پرداخته‌اند؛ حال آنکه با توجه به تفاوت‌های شکلی و سازه‌ای پوسته خارجی گنبدهای دوپوسته رُک، طرح و نقش سازه‌های خشخاشی‌ها در آن‌ها متفاوت است. از این رو مقاله پیش رو بر آن است که با مطالعه ریخت‌شناسانه خشخاشی در گنبدهای دوپوسته گسسته رُک، تعریفی تازه متکی بر نمونه‌ها از آن عرضه و بر این اساس نقش سازه‌های خشخاشی‌ها در گنبدهای دوپوسته گسسته رُک را معرفی کند. این کار با انتخاب شهر تاریخی کاشان - پهنه‌ای که تعدد و تنوع نمونه‌ها در آن قابل توجه است - و بررسی ده اثر واقع در داخل و خارج حصار تاریخی شهر انجام شده است. در مرحله اول از میان این نمونه‌ها، شش اثر که در پژوهش‌های تک‌نگاری مطالعه و مستندسازی شده‌اند، امکان مشاهده و برداشت مستقیم میدانی داشته‌اند و در بردارنده ترکیب‌ها و طرح‌های متنوع خشخاشی بودند، انتخاب شد. در گام بعد، اطلاعات مربوط به طرح معماری و ویژگی‌های ساختمانی انواع خشخاشی در نمونه‌های انتخاب‌شده با مشاهده و برداشت مستقیم میدانی و مطالعات تکمیلی کتابخانه‌ای گردآوری شد. پس از آن، شکل کالبدی نمونه‌ها مدل‌سازی سه‌بعدی و با استفاده از اسناد ترسیم‌ی تازه بازنمایی گردید تا امکان مقایسه طرح سازه خشخاشی در نمونه‌ها فراهم شود. در گام بعد با استفاده از روش توصیفی تحلیلی، طرح خشخاشی‌ها از منظر تعداد، موقعیت، ابعاد، شکل و فن ساخت مقایسه شد. بر این اساس، خشخاشی در گنبدهای دوپوسته رُک در قالب سه شکل سازه‌ای متمایز که هر یک نقش سازه‌ای متفاوت دارد، تعریف شد. با نگاهی کلی و در مقایسه با گنبدهای نار، در گنبدهای رُک، از نقش خشخاشی به‌عنوان پشت‌بند کاسته شده و نقش غالب آن سخت‌کننده گریو و پوسته خارجی است. نتایج به‌دست‌آمده تنها برای فهم کلی رفتار خشخاشی در گنبدهای رُک کاربرد دارد و نمی‌توان از آن‌ها به‌صورت مستقیم برای تحلیل یک نمونه مشخص بهره برد.

کلیدواژه‌ها:

خشخاشی، گنبد دوپوسته رُک، سازه‌های تاریخی، معماری ایرانی.

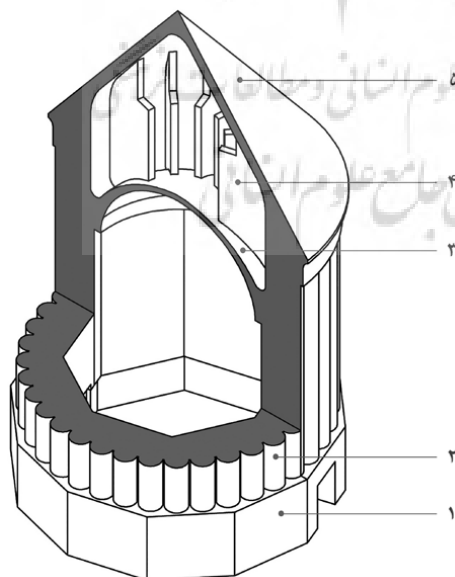
پرسش‌های پژوهش

۱. با مطالعه ریخت‌شناسانه خشخاشی در گنبد‌های دوپوسته گسسته رک، چه تعریفی از این عنصر می‌توان عرضه کرد؟
۲. با تکیه بر تعریف عرضه‌شده، نقش سازه‌ای خشخاشی در گنبد‌های دوپوسته گسسته رک چیست؟

مقدمه

یکی از نوآوری‌های سازه‌ای در سنت کهن و مستمر گنبدسازی در معماری فلات ایران، طرح گنبد‌های دوپوسته است. بر اساس این ایده با قرارگیری دوپوسته بر روی هم، گنبدی با ساختار سازه‌ای نوین و ویژگی‌های فضایی تازه خلق می‌شود که کیفیت فضاهای داخلی گنبدخانه، صحن و سیمای شهری بناها را دگرگون می‌کند. از میان آثار معماری باقی‌مانده، گنبد قابوس قدیمی‌ترین بنایی است که بر حضور ایده اولیه گنبد‌های دوپوسته در قرن چهارم هجری دلالت دارد. پس از آن، از نیمه قرن پنجم برج‌های خرقان قزوین (۴۶۰ ق) و (۴۸۶ ق) (Stronach and Young 1966, 6)، خبر از به‌کارگیری این ایده به‌صورت طرحی قوام‌یافته در معماری ایران می‌دهد. به این ترتیب، حدود ۳۸۰ سال پیش از آنکه معماری غرب برای نخستین بار از ایده گنبد‌های دوپوسته سازه‌ای در کلیسای جامع فلورانس بهره‌گیرد، معماری ایران برای معرفی چنین طرحی به تاریخ فناوری معماری پیش‌قدم می‌شود.

مطالعات پیشین این گنبدها را بر مبنای ساختار سازه‌ای و ویژگی‌های ساختمانی‌شان به دو دسته تقسیم کرده‌اند: گنبد‌های دوپوسته پیوسته میان‌تهی و گنبد‌های دوپوسته گسسته. در دسته اول دو پوسته تا ناحیه شکرگاه^۱ به هم متصل‌اند و سازه‌ای یکپارچه می‌سازند؛ اما در دسته دوم پوسته‌ها از تراز پاکار گنبد از هم جدایند، باهم فاصله دارند و معمولاً دیواره‌های عمودی بین آن‌ها قرار دارد (پیرنیا ۱۳۷۰، ۶۴ و ۷۹). در اولین نمونه‌های گنبد‌های دوپوسته گسسته، پوسته‌ها نیم‌رخ مشابه دارند و فاصله آن‌ها از هم از نیم متر تجاوز نمی‌کند؛ اما در نمونه‌های بعدی (همچون گنبد مسجدجامع یزد، گنبد مقبره سلطان بخت‌آغا و گنبد حرم مطهر امام رضا ع)، گنبد‌های دوپوسته‌ای که دو پوسته آن‌ها نیم‌رخ متفاوت دارد و فاصله میان دو پوسته در آن‌ها زیادتر است، پدیدار می‌شوند. این ویژگی ایجاب می‌کند که در این گنبد‌ها دو دسته عنصر ساختمانی تازه تعبیه شود:



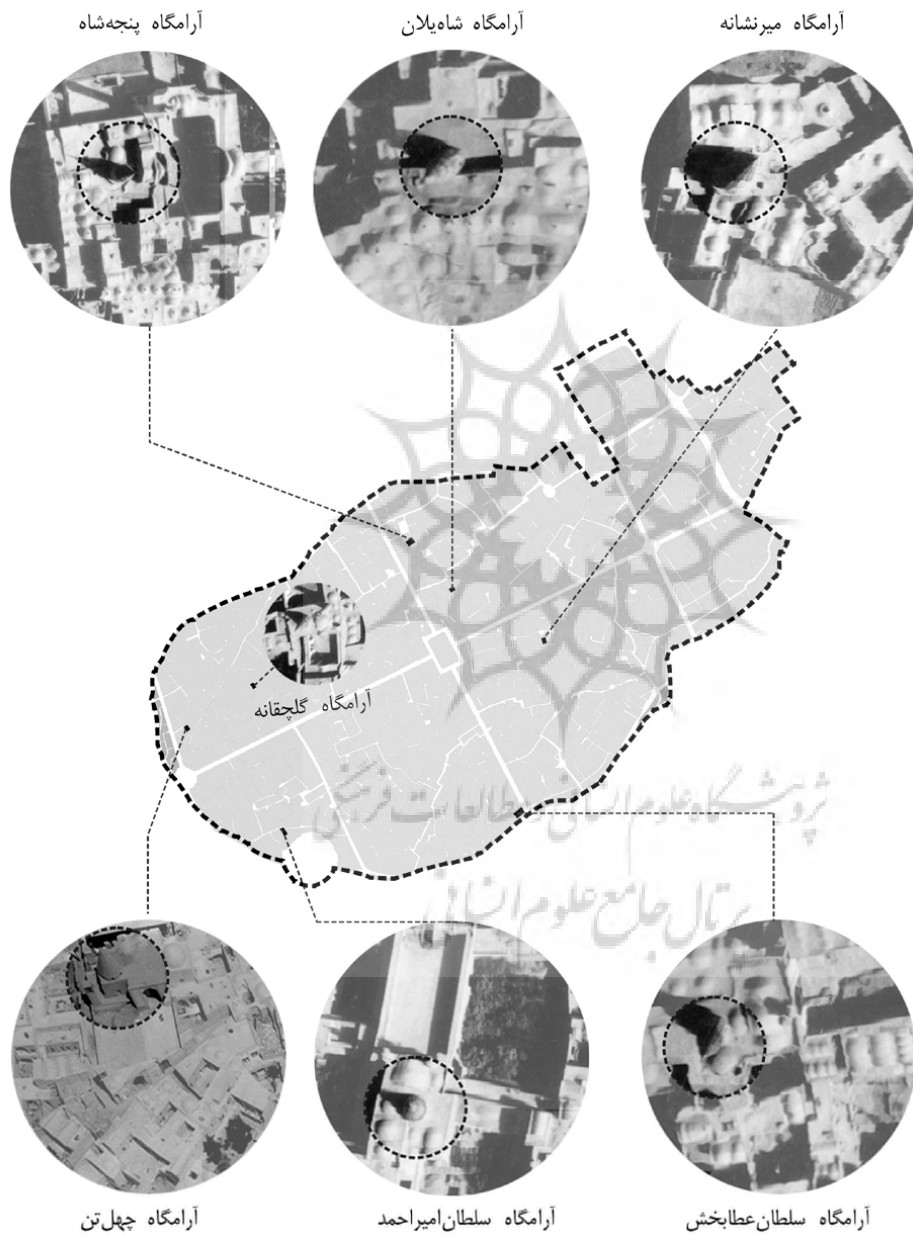
تصویر ۱: معرفی عناصر گنبد دوپوسته گسسته رک (نمونه گنبد میل رادکان خراسان)
۱. آزاره؛ ۲. بشن؛ ۳. پوسته داخلی؛ ۴. خشخاشی؛ ۵. پوسته خارجی (معماریان ۱۳۹۱، ۵۱۹)

۱. خشخاشی‌ها، دیوارهای آجری که به صورت شعاعی بر روی پوسته داخلی قرار می‌گیرند؛ ۲. کلاف‌های چوبی که خشخاشی‌ها را به هم و به دو پوسته وصل می‌کنند (صفائی‌پور ۱۴۰۱، ۱۱۶ و ۱۱۷). پیش از این، دانشوران مختلفی مطالعات مفصلی درباره ساختار سازه‌های گنبد‌های نار (سازه گنبدی با نیم‌رخ پیازی) و نقش خشخاشی‌ها در آن‌ها انجام داده‌اند؛ اما در این میان، ساختار سازه‌های گنبد‌های رک (سازه گنبدی با نیم‌رخ مخروطی یا هرمی) و ویژگی‌های خشخاشی در آن‌ها کمتر شناخته شده‌اند. بر این اساس، این مقاله بر شناخت ویژگی‌های سازه‌ای و ساختمانی خشخاشی در گنبد‌های رک متمرکز است.

همچون دیگر بناهای گنبددار، گنبدخانه‌های پوشیده‌شده با گنبد رک، از بشن (بدنه) و گنبد تشکیل شده‌اند که با اندام چپیره (منطقه انتقال) به هم پیوند خورده‌اند. ساختار سازه‌ای گنبد‌های رک شامل پوسته داخلی، پوسته خارجی، گریو، خشخاشی و گاه کلاف‌های چوبی است. (تصویر ۱). در معماری ایران، استفاده از این نوع پوشش در برج‌مقبره‌های آرامگاهی و میل‌ها در دامنه‌های شمالی و جنوبی البرز و در مناطق مرکزی ایران چون قم، کاشان و نطنز رواج دارد. قدیمی‌ترین نمونه به‌جامانده را در گنبد قابوس (۳۹۷ق) می‌توان یافت که در آن دو پوسته تا نزدیکی تیزه یکپارچه‌اند (مشکوئی ۱۳۴۵، ۶۶؛ صفائی‌پور ۱۳۹۷). نمونه بعدی به‌جامانده، میل رادکان غربی در گلستان (۴۰۷ق) (مشکوئی ۱۳۴۵، ۳۹) است. بعد از آن و تا پیش از حمله مغول، تعدادی برج آرامگاهی در ایران ساخته شده‌اند. برج طغرل در شهر ری (۵۳۴ق) (پوپ ۱۳۹۰، ۹۱)، گنبد سرخ (۵۴۲ق) (حاجی قاسمی ۱۳۸۹، ج. ۱۳: ۵۶) و گنبد کبود (۵۹۳ق) (گذار و دیگران ۱۳۶۷، ج. ۳: ۳۰۳) در مراغه متعلق به این دوران است که از گنبد آن‌ها چیزی باقی نمانده است؛ اما با توجه به رواج گنبد‌های رک از دوران آل‌زیار به بعد، چنین به نظر می‌رسد که گنبد بیرونی آن‌ها رک بوده است. پس از حمله مغول، تعداد زیادی برج‌مقبره در نقاط مختلف ایران ساخته شد. میل رادکان شرقی در خراسان (۶۷۹-۷۰۰ق) (حاجی قاسمی ۱۳۸۹، ج. ۱۲: ۲۰۸) از این دست نمونه‌هاست که قدیمی‌ترین نمونه گنبد‌های گسسته رک را که در آن از خشخاشی استفاده شده، معرفی می‌کند. از اواخر قرن هفتم، مقبره برج علاءالدوله در ورامین (۶۷۵ و ۶۸۸ق) (همان، ج. ۱۳: ۱۷۰)، امامزاده عبدالله دماوند (حدود ۷۰۰ق) (ویلبر ۱۳۶۵، ۱۴۳)، گنبد‌های سبز قم (۷۱۵، ۷۶۱، ۷۹۱ق) (حاجی قاسمی ۱۳۸۹، ج. ۱۲: ۱۹۸)، مقبره شیخ عبدالصمد در نطنز (۷۰۷ق) (هنر فر ۱۳۴۴، ۸۷۵ و ۸۷۸)، مقبره حمدالله مستوفی در قزوین (۷۴۰ق) (ویلبر ۱۳۶۵، ۱۹۶) و مقبره بابا قاسم در اصفهان (۷۴۱ق) (هنر فر ۱۳۵۰، ۳۱۰) بر جای مانده‌اند. مقبره برج عمادالدین (۷۹۲ق) (پوپ ۱۳۹۰، ۱۸۵) و برج اخنجان (گلمبک و دیگران ۱۳۷۴، ۳۹۸ و ۳۹۹) نمونه‌های منتسب به عصر تیموری هستند. از دوره تیموریان به بعد و به‌خصوص در عصر صفویان، ساخت گنبد‌های دوپوسته گسسته رک برای پوشش گنبدخانه آرامگاه‌ها و امامزادگان در فلات مرکزی ایران رواج یافت.

مرور این نمونه‌ها گویای آن است که حداقل از قرن چهارم هجری، طراحی و ساخت گنبد‌های دوپوسته گسسته رک، یکی از سنت‌های ساختمانی مستقر در معماری تاریخی ایران بوده است. با توجه به پراکندگی وسیع و تنوع طرح این گنبد‌ها، لازم است که شناخت خشخاشی‌ها ابتدا در پهنه‌ای مشخص و محدود انجام شود. در این مقاله، کاشان به‌عنوان پهنه‌ای که تعدد و تنوع نمونه‌ها در آن قابل توجه است، انتخاب شده است. گنبد‌های دوپوسته گسسته رک در خارج و داخل حصار تاریخی شهر کاشان، با توجه به آنچه در اسناد تصویری و کتب تاریخی آمده، شامل ده مورد است. آرامگاه شاهزاده اسماعیل در شمال غربی مزار فیض، آرامگاه شاهزاده ابراهیم^۱ و آرامگاه ابولؤلؤ^۲ در محدوده جاده کاشان-فین مواردی هستند که خارج از حصار تاریخی در شهر کاشان قرار دارند. در این مطالعه، فهرستی از تمام نمونه‌های گنبد‌های دوپوسته گسسته رک که در کاشان قدیم یعنی در داخل حصار تاریخی شهرند، تهیه و سپس شش نمونه از هفت نمونه که در پژوهش‌های تک‌نگاری مطالعه و مستندسازی شده‌اند و امکان مشاهده و برداشت مستقیم میدانی داشته‌اند، انتخاب شدند (تصویر ۲). در گام بعد، این نمونه‌ها به‌صورت دقیق‌تر مطالعه شده و اطلاعات مربوط به طرح معماری و ساختمانی خشخاشی‌ها در آن‌ها با مشاهده و برداشت مستقیم میدانی (بازدید از فضای میان دوپوسته) و انجام مطالعات تکمیلی کتابخانه‌ای گردآوری شدند. پس از آن برای دستیابی به تعریف خشخاشی، ساختار سازه‌ای نمونه‌ها مدل‌سازی سه‌بعدی شده و با استفاده از اسناد ترسیمی تازه بازنمایی شدند. استفاده از این ابزار، امکان مقایسه طرح خشخاشی‌ها در

نمونه‌ها را فراهم ساخت و موجب شد که در گام بعد با استفاده از روش توصیفی تحلیلی، طرح آن‌ها از منظرهای تعداد، موقعیت، ابعاد، شکل و فن ساخت مقایسه شود و تعریفی تازه که متکی بر نمونه‌هاست، درباره چستی خشخاشی‌ها، طرح و نقش سازه‌های آن‌ها در گنبد‌های رک دوپوسته گسسته تبیین شود.



تصویر ۲: جانمایی آرامگاه‌های با گنبد رک در حصار تاریخی شهر کاشان در نقشه تاریخی شهر در دوره قاجار (مهندسان مشاور شهر و خانه ۱۳۷۶) و در تصویر هوایی شهر در سال ۱۳۳۵ (با تصرف نگارندگان)

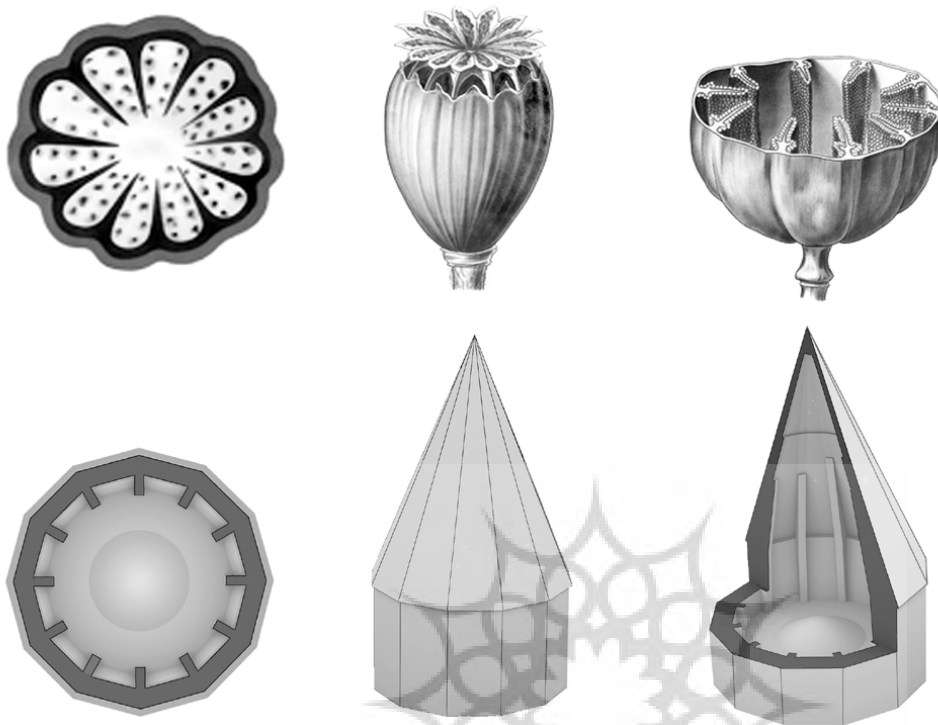


تصویر ۳: تصاویر فضای میان دو پوسته گنبدهای مطالعه شده: ۱. گنبد میرنشانه؛ ۲. گنبد سلطان امیراحمد؛ ۳. گنبد پنجه‌شاه؛
 ۴. گنبد سلطان عطابخش؛ ۵. گنبد چهل تن؛ ۶. گنبد شاه یلان

۱. تعریف و نقش خشخاشی در پژوهش‌های پیشین

پژوهش‌های پیشین درباره خشخاشی در گنبد‌های دوپوسته را می‌توان در دو گروه «پژوهش‌های مقدماتی» و «پژوهش‌های تکمیلی» معرفی کرد. «پژوهش‌های مقدماتی» اولین مواجهه‌های علمی با خشخاشی است که آن را به صورت کلی معرفی می‌کند. برای نمونه، مطالعات رابرت بایرون و محمدکریم پیرنیا از این جمله‌اند.^۶ بایرون از گنبد‌های دوپوسته بسیاری بازدید کرده است^۷ و با اشاره به نمونه‌های شاخصی چون گور امیر در سمرقند و مسجد شاه مشهد، خشخاشی را «حلقه‌ای از پشت‌بندهای شعاعی»^۸ در میان دو پوسته گنبد‌های دوپوسته می‌داند و وظیفه آن‌ها را امکان‌پذیر کردن ایجاد انحنا و آوگون گنبد بیرونی^۹ از طریق اتصالی مرکزی می‌داند؛ اتصالی که با تیرک‌هایی چوبی تقویت می‌شود.^{۱۰} (Byron 1981, 1332).

پیرنیا در مقاله «گنبد در معماری ایران» برای اولین بار واژه و مفهوم «خشخاشی» یا «پره» را در منابع فارسی معرفی می‌کند (پیرنیا ۱۳۷۰، ۸۶). این نام که گویا برگرفته از گیاه خشخاش است، به شباهت ساختاری گل خشخاش و تیغه‌های آجری در گنبد دوپوسته گسسته اشاره دارد و شامل دیوارک‌هایی است که در این گنبد‌ها روی آهیانه، پوسته داخلی گنبد، می‌سازند تا خود، پوسته خارجی، روی آن سوار شود (همان، ۷۹) (تصویر ۴).



تصویر ۴: مقایسه ساختار گنبد‌های دوپوسته گسسته رک با ساختار گیاه خشخاش

«پژوهش‌های تکمیلی»، این یافته‌ها را در دو محور گسترش می‌دهند: گروهی با مطالعه نمونه‌های شاخص، شواهد و اطلاعات بیشتری گردآوری کرده و ضمن مستندنگاری آن‌ها سطح شناخت ما از خشخاشی‌ها را افزایش داده‌اند. یافته‌های این گروه با وجود گستردگی و تنوع نمونه‌ها منجر به دستیابی به تعریفی جامع و مانع از خشخاشی نشده است. گروهی دیگر با تمرکز بر بعضی نمونه‌های شاخص، خشخاشی‌ها را از منظرهایی خاص چون تحلیل رفتار سازه‌ای یا مطالعه ویژگی‌های ساختمانی به صورتی عمیق‌تر مطالعه می‌کند. از آنجاکه انتخاب نمونه‌ها در این مطالعات به صورتی نیست که معرف انواع طرح‌های خشخاشی باشد، امکان تعمیم آن‌ها وجود ندارد. مقاله «خشخاشی در گنبد‌های دوپوسته گسسته نار: تعریفی تازه براساس مطالعه شکل سازه‌ای» با پیوند این دو محور مطالعاتی از هشت نمونه که انواع طرح‌ها و ترکیب‌های خشخاشی را در بر می‌گیرند بهره گرفته و با تکیه بر مطالعه ریخت‌شناسانه آن‌ها، تعریف خشخاشی در گنبد‌های نار را در سه شکل سازه‌ای متمایز و سه نقش سازه‌ای متناظر آن عرضه می‌کند (Safaeipour, Afghani, and Alizadegan 2022, 23).

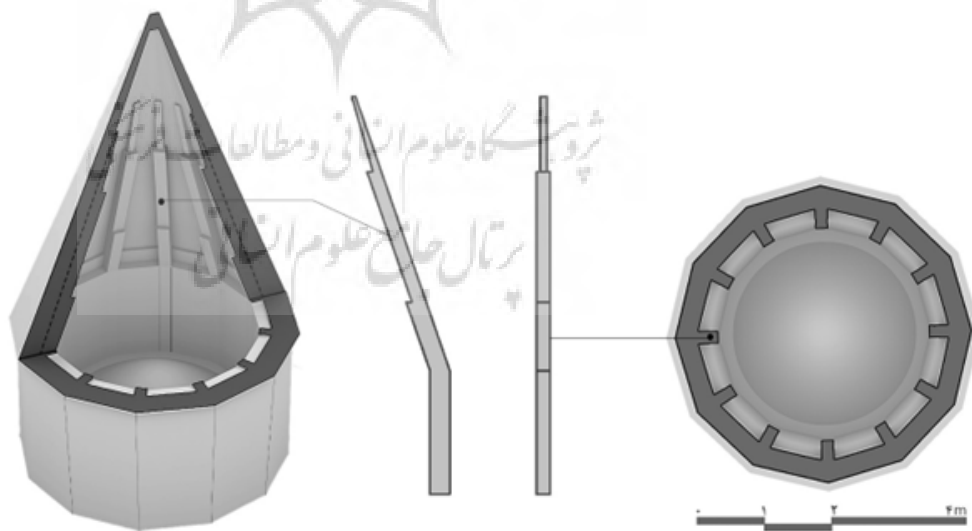
در میان مطالعات پیشین، مطالعات دیگری با محوریت بررسی چپستی خشخاشی در گنبد‌های رک و نقش سازه‌ای آن‌ها در دسترس نیست.^{۱۱} این درحالی است که با توجه به تفاوت شکل و سازه پوسته خارجی گنبد‌های رک، نقش خشخاشی در آن‌ها می‌تواند نسبت به گنبد‌های نار بسیار متفاوت باشد و از دسته‌بندی‌های معرفی شده پیروی نکند. بر این اساس، در مقاله حاضر با تکیه بر مطالعات پیشین درباره خشخاشی و با بهره‌گیری از تعریف این اندام در گنبد‌های نار، به بررسی تعریف و نقش خشخاشی در گنبد‌های رک پرداخته شده است. به بیان دقیق‌تر، این مقاله سه شکل سازه‌ای شناخته شده خشخاشی و رفتار سازه‌ای آن‌ها در گنبد‌های نار را در محدوده موضوعی تازه‌ای و در میان گزیده‌ای از گنبد‌های رک مطالعه و ارزیابی می‌کند.

۲. مطالعه نمونه‌ها

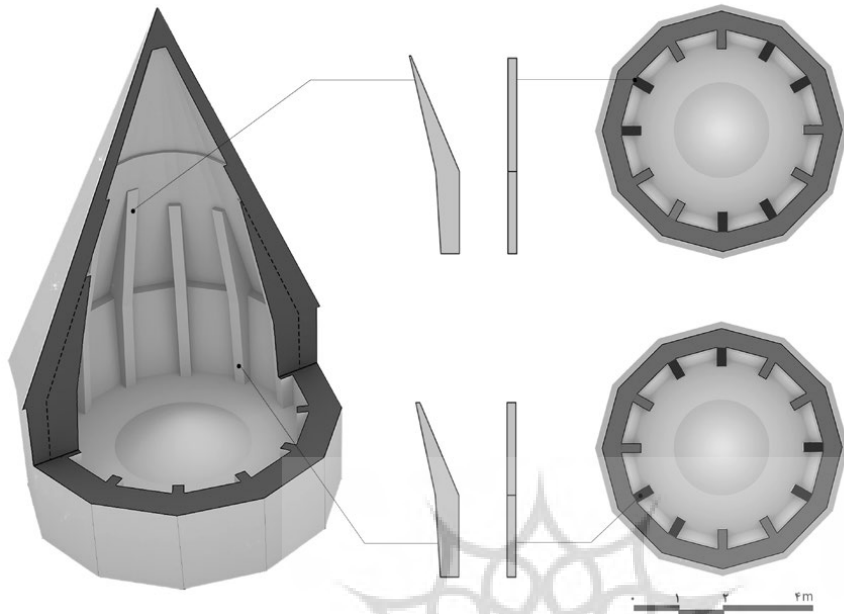
چنان‌که ذکر شد، برای شناخت خشخاشی در گنبد‌های رک در کاشان، شش نمونه از انواع گنبد‌های دویوسته گسسته رک انتخاب و اطلاعات میدانی و کتابخانه‌ای مربوط به آن‌ها گردآوری شدند. در ادامه، جمع‌بندی این مطالعات در قالب مدارک ترسیمی تازه عرضه شده و مشخصات خشخاشی شامل تعداد، اندازه‌ها، شکل و نحوه ترکیب آن‌ها در هر نمونه معرفی گردیده است.

جدول ۱: معرفی نمونه‌های موردی

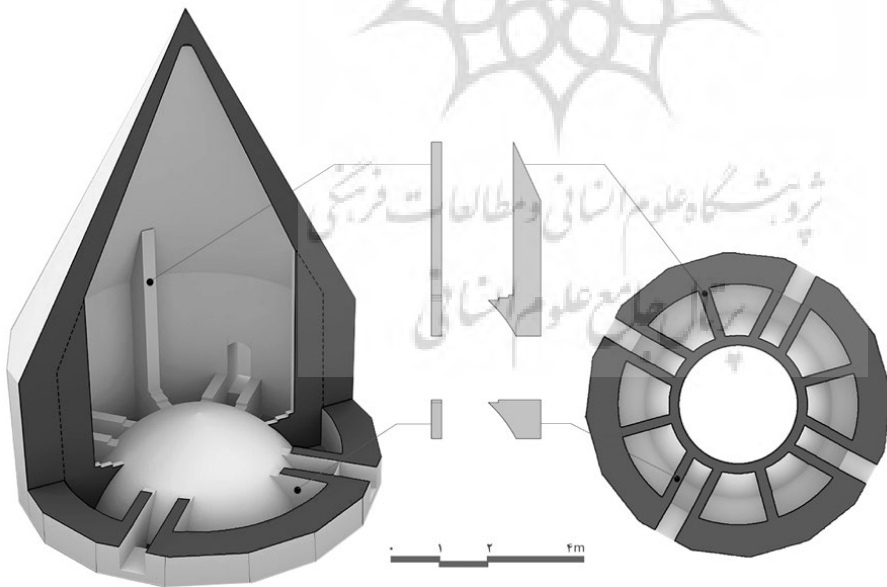
نام نمونه	تاریخ	موقعیت	ابعاد	
			دهانه داخلی (متر)	ارتفاع دو پوسته (متر)
۱ گنبد آرامگاه سلطان عطابخش	(۳۲۰-۴۴۷ق) (نزاقی ۱۳۴۸، ۱۶۰)	انتهای غربی خیابان دروازه اصفهان	۳/۵	۷
۲ گنبد آرامگاه پنجه‌شاه	قرن هفتم مق (حاجی قاسمی ۱۳۸۹، ج. ۱۲: ۲۴۶)	مجموعه پنجه‌شاه ^{۱۳} در خیابان باباافضل	۴/۳	۷
۳ گنبد آرامگاه سلطان امیراحمد	۱۴(ق۹۴۱)	مرکز محله سلطان امیراحمد	۴/۶۰	۶/۲۰
۴ گنبد آرامگاه شاه یلان	۱۵(ق۹۰۲) (نزاقی ۱۳۴۸، ۱۷۴)	در بازار بزرگ کاشان و در ابتدای بازار زرگرها	۳	۶/۵
۵ گنبد آرامگاه چهل تن	دوران صفوی (Petruccioli 2018, 110)	محله دروازه‌فین	۶	۶/۵
۶ گنبد آرامگاه میرنشانه	(ق۹۷۸) (نزاقی ۱۳۴۸، ۱۷۶)	محله یاقیان و گذر سه‌سوک	۷	۸



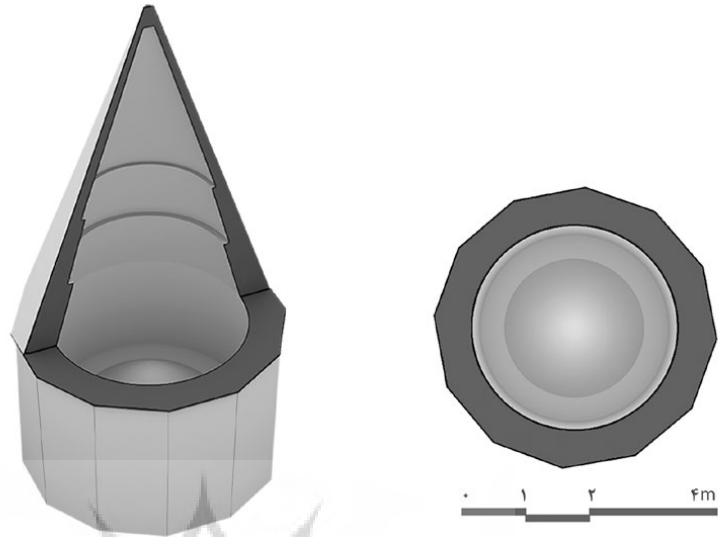
تصویر ۵: برش افقی، نماهای روبه‌رو و جانبی، مدل سه‌بعدی برش‌خورده گنبد آرامگاه سلطان عطابخش (اطلاعات پایه برگرفته از: بیگی و پاکدل، مستندنگاری آرامگاه سلطان عطابخش کاشان). ویژگی مهم این سازه کاهش ضخامت خشخاشی‌ها از یک آجر^{۱۹} در تراز بالای گریو به نیم آجر در تراز نزدیک تیزه پوسته خارجی است. به‌علاوه، عرض خشخاشی‌ها نیز در سه تراز کاهش می‌یابد.



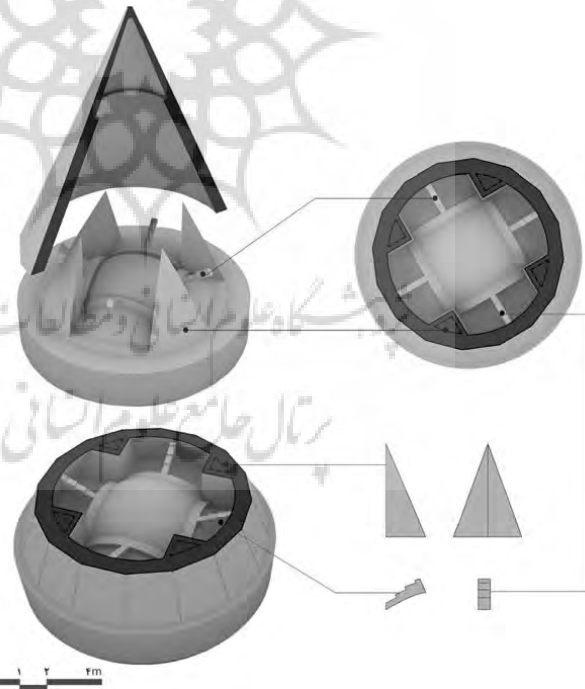
تصویر ۶: برش افقی، نماهای روبه‌رو و جانبی، مدل سه‌بعدی برش خورده گنبد آرامگاه پنجه‌شاه. هر دو خشخاشی فرعی مجاور هم هستند و مابین دو خشخاشی اصلی قرار گرفته‌اند. مشاهده میدانی نگارندگان نشان داد که آجر چینی خشخاشی‌ها به دیوار گریو و پوسته خارجی اتصال هشت‌و‌گیر ندارد. این امر که در سایر نمونه‌های مطالعه‌شده در کاشان دیده نشده، احتمالاً بر هم‌زمان نبودن ساخت گنبد و خشخاشی‌ها دلالت دارد.



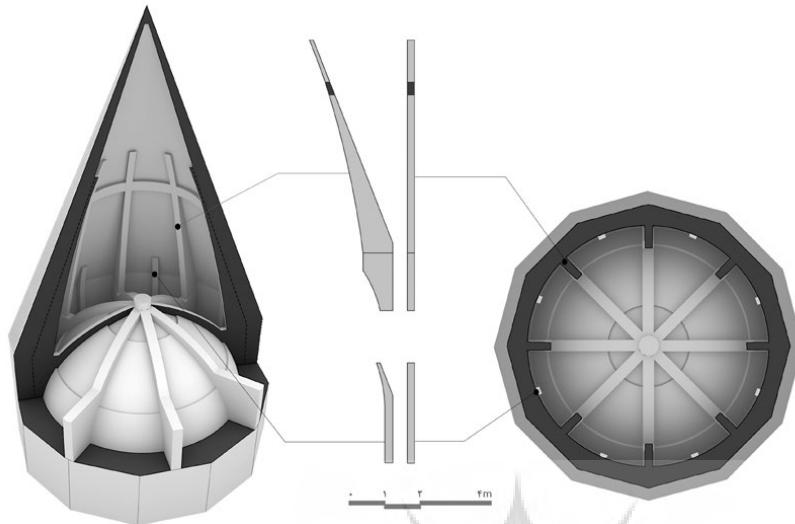
تصویر ۷: برش افقی، نماهای روبه‌رو و جانبی، مدل سه‌بعدی برش خورده گنبد آرامگاه سلطان امیراحمد. عرض خشخاشی‌های اصلی در پایین حدوداً ۹۰ سانتی‌متر است و در تراز تقریبی شکرگاه پوسته داخلی به صورت پلکانی کاهش یافته و به ۵۰ سانتی‌متر رسیده است. خشخاشی‌ها با دیوار گریو و پوسته خارجی به صورت هشت‌و‌گیر متصل شده‌اند. دسته دوم خشخاشی‌ها شامل هشت خشخاشی دیگر در محدوده گریو است که از دسته اول کوچک‌ترند و با ضخامت یک آجر و ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر و در دو طرف نورگیرهای چهار سوی پوسته خارجی قرار دارند.



تصویر ۸: برش افقی، نماهای روبه‌رو و جانبی، مدل سه‌بعدی برش‌خورده گنبد آرامگاه شاه یلان (اطلاعات پایه برگرفته از: صبا و همکاران، مستندنگاری آرامگاه شاه یلان کاشان). این نمونه از کوچک‌ترین گنبد‌های رک در کاشان است. احتمالاً این ابعاد باعث شده است که گنبد بدون بهره‌گیری از هر نوع خشخاشی و صرفاً با پوسته خارجی با نیم‌رخ پلکانی طراحی و اجرا شود.



تصویر ۹: برش افقی، نماهای روبه‌رو و جانبی، مدل سه‌بعدی برش‌خورده گنبد آرامگاه چهل تن (اطلاعات پایه برگرفته از: حسن‌زاده و همکاران، مستندنگاری آرامگاه چهل تن کاشان). پوسته داخلی بر روی چهار تویزه برابر با ضخامت یک‌ونیم آجر نشسته است و پای هر تویزه بر روی خشخاشی‌ها قرار دارد. علاوه بر آن، چهار نیم‌تویزه عمود بر تویزه‌های برابر پوسته داخلی، آن‌ها را به پوسته خارجی متصل می‌کنند. خشخاشی‌های این گنبد با نمونه‌های دیگر تفاوت دارد. برخلاف نمونه‌های دیگر، خشخاشی‌ها تیغه‌ای به‌موازات پوسته خارجی یا عمود بر آن نیست؛ بلکه یک شبه‌هرم مثلث‌القاعده است.



تصویر ۱۰: برش افقی، نماهای روبه‌رو و جانبی، مدل سه‌بعدی برش خورده گنبد آرامگاه میرنشانه در میانه گنبد با افزایش ضخامت پوسته خارجی یک کمربند آجری شکل گرفته و همه خشخاشی‌های اصلی را به هم متصل کرده است. علاوه بر آن، خشخاشی‌های اصلی بر روی هشت تویزه پوسته داخلی نشسته و ساختاری سازه‌ای یکپارچه را به وجود آورده‌اند. عرض خشخاشی‌ها ثابت نیست و حداقل عرض آن در بالای کمربند آجری، نیم آجر است.

۳. تحلیل مشخصات و نقش خشخاشی در گنبد رک

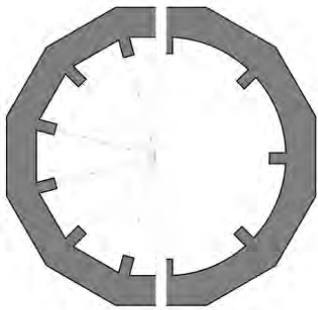
در این بخش مستندات جمع‌آوری شده درباره نمونه‌های مطالعه‌شده از منظر تعداد، ابعاد، موقعیت، شکل و فنون ساخت مقایسه می‌شود. بیان تفاوت‌ها و شباهت‌های نمونه‌ها امکان طبقه‌بندی انواع خشخاشی و عرضه تصویری جامع‌تر درباره هنجارهای طراحی این اندام در گنبد‌های دویپوسته رک را فراهم می‌کند. نمونه چهل تن متفاوت‌ترین نمونه است که با شکل سازه‌ای خشخاشی کاملاً منحصر به فرد باید جداگانه بررسی شود.

جدول ۲: مقایسه تعداد، ابعاد، هندسه خشخاشی‌ها در نمونه‌های مطالعه‌شده (به ترتیب ابعاد دهانه)

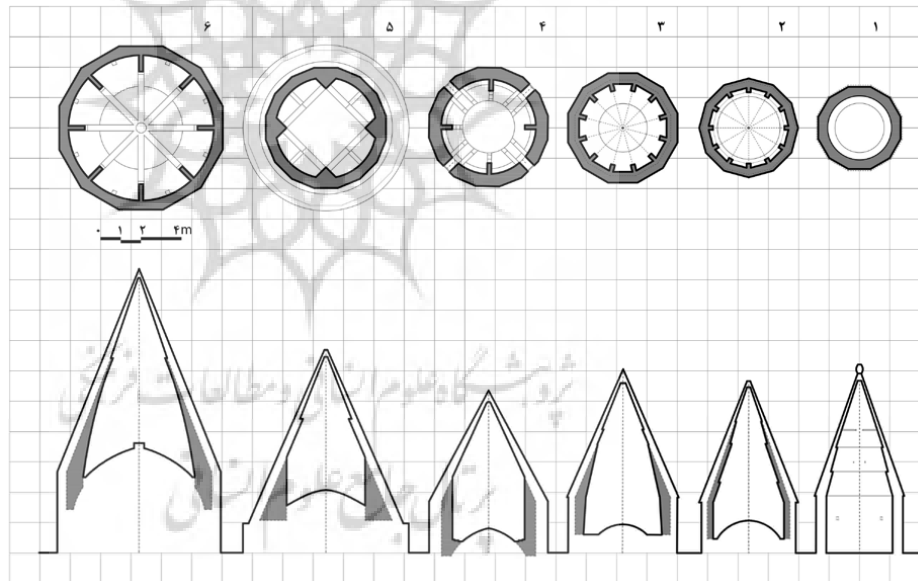
نام نمونه	ابعاد دهانه (متر)	نوع خشخاشی	هندسه محیطی گنبد		ابعاد خشخاشی	
			داخلی	خارجی	ارتفاع (متر)	عرض (متر)
۱ گنبد آرامگاه شاه یلان	۳	ندارد	دایره	دوازده‌وجهی	-	-
۲ گنبد آرامگاه سلطان عطایخش	۳/۵	اصلی	دوازده‌وجهی	دوازده‌وجهی	۵/۸	۰/۳
۳ گنبد آرامگاه پنجه‌شاه	۴/۳	اصلی	دوازده‌وجهی	دوازده‌وجهی	۴/۴	۰/۴
		فرعی			۳/۹	۰/۴
۴ گنبد آرامگاه سلطان امیراحمد	۴/۶	اصلی	دایره	شانزده‌وجهی	۳/۸	۰/۹
		فرعی			۰/۸	۰/۹
۵ گنبد آرامگاه چهل تن	۶	اصلی	دایره	دوازده‌وجهی	۳	۱/۶
		فرعی			۰/۹	۰/۲۲
۶ گنبد آرامگاه میرنشانه	۷	اصلی	دایره	دوازده‌وجهی	۵/۹	۰/۸
		فرعی				۰/۸

۱.۳. تعداد خشخاشی‌ها

در گنبد‌های مطالعه‌شده، تعداد خشخاشی‌ها زوج و مضربی از عدد چهار (۱۲ و ۱۶) است. به نظر می‌رسد این تعداد تابع ابعاد دهانه و هندسهٔ جدارهٔ داخلی است. در این باره می‌توان به این هنجارها اشاره کرد: الف) با نگاهی کلی، از خشخاشی در نمونه‌های با دهانهٔ بزرگ‌تر از ۳ متر استفاده شده است و نمونه‌های کوچک‌تر (گنبد آرامگاه شاه یلان) خشخاشی ندارد (تصویر ۱۱ مورد ۱)؛ ب) در این نمونه‌ها اگر هندسهٔ محیطی داخلی گنبد رک پیرو هندسهٔ بیرونی آن یک چندضلعی منتظم باشد، (مشابه گنبد آرامگاه سلطان عطابخش و گنبد آرامگاه پنجه‌شاه) تعداد خشخاشی‌ها برابر با تعداد وجوه پوستهٔ خارجی است (تصویر ۱۲ و ۱۱ مورد ۲ و ۳). در صورت مدور بودن محیط داخلی گنبد رک، تعداد کمینه و بیشینهٔ خشخاشی‌ها متناسب و متأثر از ابعاد دهانه و شکل خشخاشی‌هاست. برای مثال در نمونه‌های مطالعه‌شده، کمترین تعداد خشخاشی ۴ (گنبد آرامگاه چهل‌تن) و بیشترین تعداد آن ۱۶ (گنبد آرامگاه میرنشانه) (تصویر ۱۱ مورد ۵ و ۶) است. در این میان، گنبد آرامگاه چهل‌تن تنها نمونه‌ای است که با وجود دهانهٔ ۶ متری تنها ۴ خشخاشی دارد؛ امری که دلیل آن می‌تواند سطح مقطع بزرگ خشخاشی‌ها در این بنا باشد که نیاز به تعداد بیشتر خشخاشی را برطرف می‌کند؛ ج) تعداد خشخاشی‌ها می‌تواند متأثر از تعداد و جای بازشوهای گریو یا پوستهٔ خارجی نیز تغییر کند. برای مثال در گنبد آرامگاه سلطان امیراحمد به نظر می‌رسد ایجاد بازشو در قسمت‌های پایینی گنبد، موجب شده است که در آن نقطه، از خشخاشی‌های کوتاهی به‌مثابهٔ سخت‌کننده‌های شعاعی بهره گرفته شود (تصویر ۱۱ مورد ۴).



تصویر ۱۲: ارتباط تعداد خشخاشی با هندسهٔ جدارهٔ داخلی گنبد



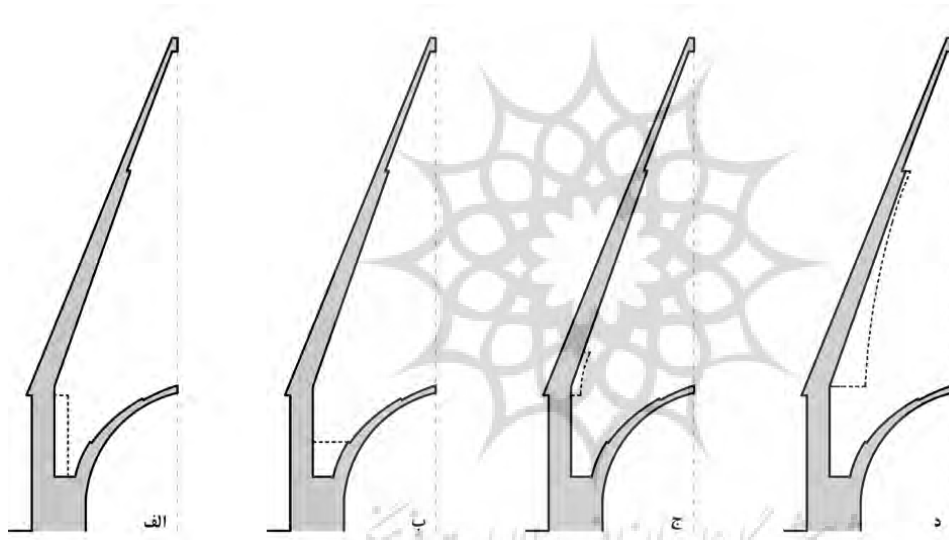
تصویر ۱۱: رابطهٔ ابعاد دهانه با ابعاد و تعداد خشخاشی در نمونه‌های مطالعه‌شده: ۱. گنبد شاه یلان؛ ۲. گنبد سلطان عطابخش؛ ۳. گنبد پنجه‌شاه؛ ۴. گنبد سلطان امیراحمد؛ ۵. گنبد چهل‌تن؛ ۶. گنبد میرنشانه. با نگاهی کلی می‌توان چنین برداشت کرد که با بزرگ شدن ابعاد دهانه، عرض خشخاشی‌ها بیشتر شده و فاصلهٔ آن‌ها افزایش یافته است. البته تعیین رابطه‌ای روشن و قطعی میان تغییر ابعاد دهانه با تغییر اندازهٔ خشخاشی و تعداد خشخاشی به بررسی نمونه‌های بیشتر نیاز دارد.

۲.۳. موقعیت خشخاشی‌ها

موقعیت در نیم‌رخ عمودی گنبد: مقایسهٔ موقعیت خشخاشی در نمونه‌ها، آن‌ها را در چهار موقعیت اصلی نشان می‌دهد: الف) محدودهٔ پشت دیوار گریو وجه اشتراک همهٔ خشخاشی‌های اصلی و فرعی در نمونه‌هاست؛ ب) محدودهٔ پشت پوستهٔ داخلی دومین موقعیتی است که خشخاشی‌ها در آن قرار گرفته‌اند. در بین نمونه‌ها خشخاشی‌های اصلی گنبد

میرنشانه و سلطان امیراحمد بیشتر از دیگر نمونه‌ها پوسته داخلی را پوشش داده و تا پشت منطقه شکرگاه پوسته داخلی ادامه یافته‌اند؛ ج) سومین موقعیت محدوده اتصال گریو به پوسته خارجی است. خشخاشی فرعی گنبد میرنشانه کوچک‌ترین نمونه‌ای است که این موقعیت را در بر می‌گیرد؛ د) گسترش خشخاشی‌ها در محدوده پشت پوسته خارجی و از تراز بالایی گریو گروه آخر است. خشخاشی‌های اصلی همه نمونه‌ها در راستای شیب پوسته خارجی و یا عمود بر آن بالا می‌آیند (تصویر ۱۳).

موقعیت در نیمرخ افقی گنبد: در گنبدهای شاه سلطان عطابخش و پنجه‌شاه که هندسه محیطی داخلی آن‌ها مشابه جداره خارجی با همان تعداد ترک است، خشخاشی‌ها معمولاً در مرز میان هر دو ترک از گنبد قرار می‌گیرند (تصویر ۱۲). در دیگر نمونه‌ها که محیط داخلی گنبد مدور است، خشخاشی‌ها دوبه‌دو روبه‌روی هم و خشخاشی‌های فرعی بین خشخاشی‌های اصلی قرار می‌گیرند. پیوند خشخاشی‌های اصلی با تویزه‌های پوسته داخلی گنبد آرامگاه میرنشانه نحوه چیدمان آن‌ها را در راستای تویزه‌ها نمایش می‌دهد (تصویر ۱۱ مورد ۶).



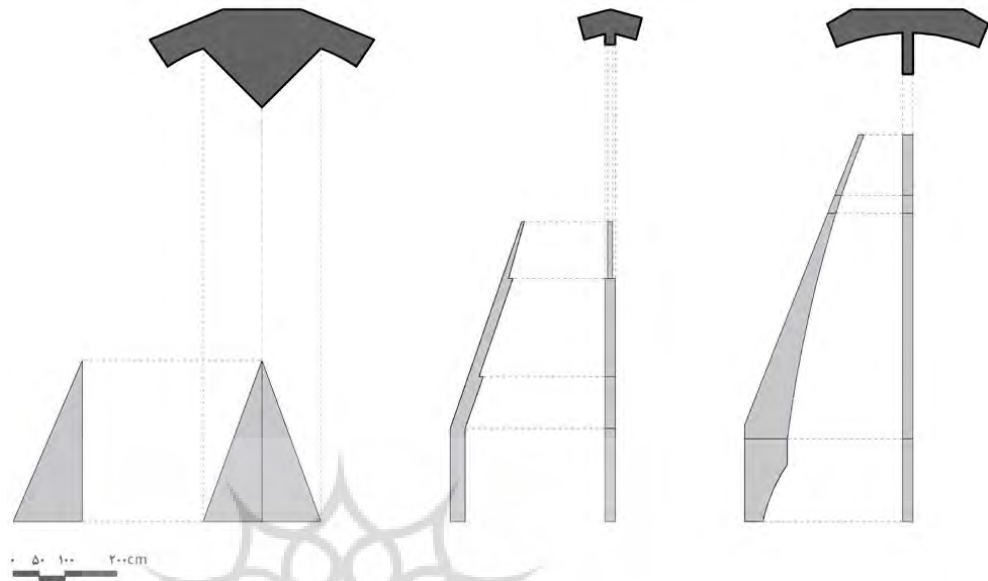
تصویر ۱۳: موقعیت خشخاشی‌ها؛ الف) محدوده پشت گریو؛ ب) محدوده پشت پوسته داخلی؛ ج) محدوده اتصال گریو به پوسته خارجی؛ د) محدوده پشت پوسته خارجی

۳.۳. ابعاد خشخاشی‌ها

اندازه ضخامت خشخاشی‌ها به جز دو نمونه در سایر نمونه‌ها ثابت و یک آجر (حدود ۲۰ سانتی‌متر) است. این اندازه در گنبد آرامگاه سلطان عطابخش در محدوده‌ای بین یک آجر تا نیم آجر متغیر است و خشخاشی‌های گنبد آرامگاه چهل‌تن با بزرگ‌ترین سطح مقطع ضخامتی حدود شش آجر در ضلع جانبی دارند. بلندا و عرض خشخاشی‌ها از تنوع بالایی برخوردار است و متناسب با ابعاد دهانه و بلندای گریو، تعداد و ابعاد نیمرخ خشخاشی‌ها تغییر می‌کند. بیشترین بلندای خشخاشی‌ها در گنبد میرنشانه با ارتفاع ۵/۹ متر و کمترین آن در گنبد سلطان امیراحمد با ارتفاع ۰/۸۰ متر است.

۳.۴. شکل خشخاشی‌ها

شکل نیمرخ گنبدهای مطالعه‌شده تنوعی قابل توجه دارد. برای مطالعه دقیق‌تر شکل خشخاشی‌ها و آشکار شدن تفاوت‌ها و شباهت‌های آن‌ها، شکل خشخاشی‌ها در یک گنبد رک با نیمرخ فرضی ترسیم و باهم مقایسه شد. مقطع



تصویر ۱۴: ابعاد و تناسبات مختلف خشخاشی‌های مطالعه‌شده

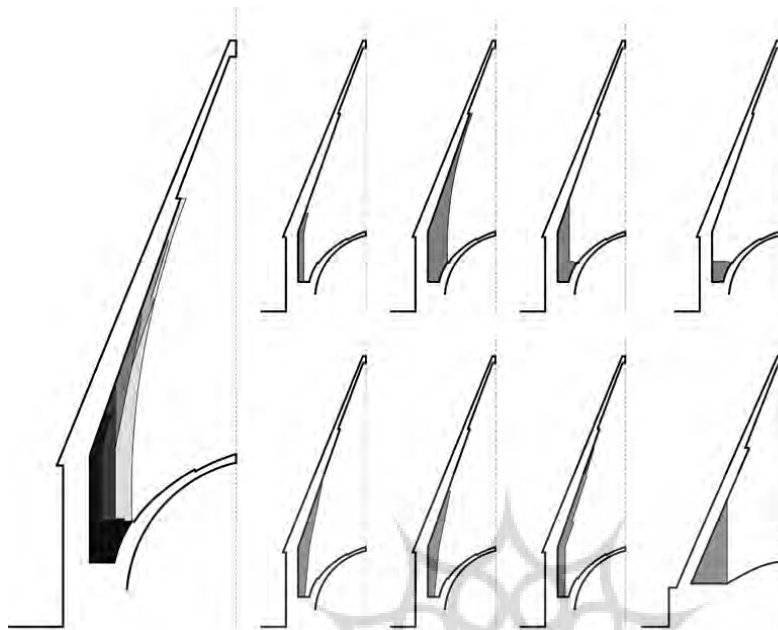
فرضی به‌نحوی انتخاب شد که بتواند گونه‌های مختلف خشخاشی را درون خود جای دهد. بدیهی است که شکل، ضخامت و ابعاد دهانه این مقطع قطعیتی ندارد؛ بلکه صرفاً شرایطی فرضی است که با حذف برخی متغیرها امکان مقایسه انواع خشخاشی را ممکن کند. در نتیجه این بررسی یک شکل سازه‌ای پایه به‌عنوان مولد خشخاشی‌ها، دو شکل سازه‌ای گسترش‌یافته و یک شکل منحصربه‌فرد به شرح زیر شناسایی شد:

- شکل سازه‌ای پایه شامل دیواره‌هایی کم‌عرض، باریک و کوتاه است که در محل اتصال گریو و پوسته خارجی ساخته شده است. خشخاشی‌های فرعی گنبد میرنشانه نمونه این دسته‌اند.

- شکل سازه‌ای دوم از گسترش افقی شکل پایه پدید می‌آید. در این دسته از خشخاشی‌ها، جداره داخلی خشخاشی حداکثر تا نقطه‌ای نزدیک به محل شکرگاه پوسته داخلی به سمت مرکز دهانه پیش می‌رود. خشخاشی‌های گنبد‌های سلطان امیراحمد از این نوع‌اند.

- شکل سازه‌ای سوم، نتیجه گسترش خشخاشی در راستای پوسته خارجی است. این خشخاشی‌ها دیواره‌هایی باریک با ارتفاع زیاد و در امتداد با پوسته خارجی هستند که ضخامت پوسته خارجی را تا نزدیکی رأس آن افزایش می‌دهند. در بعضی از خشخاشی‌های این دسته لبه خارجی به موازات پوسته خارجی گنبد است (مانند گنبد‌های سلطان عطاءبخش و پنجه‌شاه) و در بعضی دیگر این لبه نیم‌رخ منحنی دارد (مانند گنبد میرنشانه). در بین نمونه‌ها، شکل سازه‌ای خشخاشی‌های اصلی میرنشانه ترکیبی از هر دو گسترش است؛ در پایین با شکل سازه‌ای دوم و در بالا با شکل سازه‌ای سوم مطابق است.

- شکل خشخاشی‌های گنبد چهل تن گونه‌ای کم‌نظیر و قابل توجه است که در دیگر شکل‌های سازه‌ای گنبد‌های معماری ایران نادر است.^{۲۰} این اندام‌های سازه‌ای بسیار جسیم و با شکل هندسی متفاوت به‌صورت یک شبه‌هرم مثلث‌القاعده است. استفاده از این شکل باعث شده که سطح مقطع خشخاشی‌های این بنا نسبت به خشخاشی‌های معمول به چندین برابر افزایش یابد. نویسندگان از وضعیت داخل این هرم‌ها مطلع نیستند؛ اما احتمالاً خشخاشی‌های هرمی توپر نیستند و به‌صورت صندوقه‌هایی سبک‌سازی شده‌اند.



تصویر ۱۵: مقایسه شکل سازه‌ای نیم‌رخ خشخاشی‌های مطالعه‌شده در گنبدی رک با مقطع فرضی

۳.۵. فن ساخت خشخاشی‌ها

برای بررسی فن ساخت خشخاشی در گنبدهای رک لازم است اتصال آن‌ها با اندام‌های مجاورشان به دقت بررسی شود. این مطالعه شامل بررسی الف) اتصال پوسته خارجی، خشخاشی و گریو؛ ب) اتصال خشخاشی با پوسته داخلی؛ ج) فنون کاهش تدریجی ضخامت خشخاشی‌ها است.

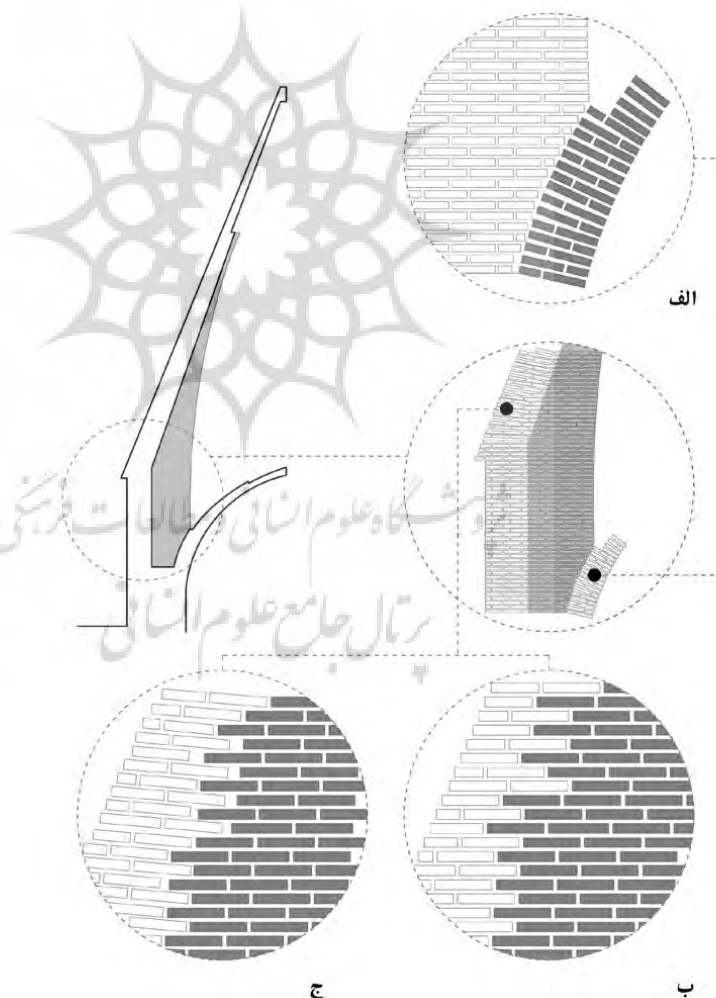
اتصال خشخاشی با پوسته خارجی و گریو در گنبدهای دوپوسته گسسته رک مانند گنبدهای دوپوسته گسسته نار، به صورت هشت‌وگیر است. این کار بر هم‌زمانی ساخت خشخاشی با گریو و پوسته خارجی دلالت دارد. پوسته خارجی گنبدها و خشخاشی‌های گنبد رک معمولاً با روش رگ‌چین اجرا می‌شوند. در این روش رج‌های آجرها به صورت افقی روی هم چیده می‌شوند و به تدریج جلو می‌آیند تا اینکه در رأس مخروط یا هرم به هم برسند (پیرنیا ۱۳۷۰، ۱۱۴). گاه مانند پوسته خارجی گنبد میرنشانه، شیوه آجر چینی به صورت رگ‌چین ولی با یک زاویه ملایم نسبت به افق اجرا شده است؛ با این حال معماران توانسته‌اند با آجرچینی خشخاشی‌ها که رگ‌چین و بدون زاویه است، آن‌ها را به هم متصل کنند. البته این موضوع در گنبدهای نار به دلیل روش اجرای گردچین و چرخش هر آجر نسبت به آجر دیگر، پیچیدگی بیشتری دارد (تصویر ۱۶).

چگونگی اتصال خشخاشی‌ها به پوسته داخلی در نمونه‌های مختلف متفاوت است. در گنبدهای سلطان عطابخش و پنجه‌شاه اتصالی بین آهیانه و خشخاشی‌ها نیست؛ در حالی که در گنبدهایی با دهانه بزرگ‌تر مانند چهل تن، میرنشانه و سلطان امیراحمد، خشخاشی‌های اصلی عمود بر پوسته داخلی بر روی یا پشت آن‌ها قرار گرفته‌اند، اتصال سازه‌ای با آن‌ها ندارند و هشت‌وگیر نیستند (تصویر ۱۶). خشخاشی‌های اصلی گنبد میرنشانه برای توزیع نیروی فشاری بر روی ۸ باریکه تاق پوسته داخلی نشسته‌اند.

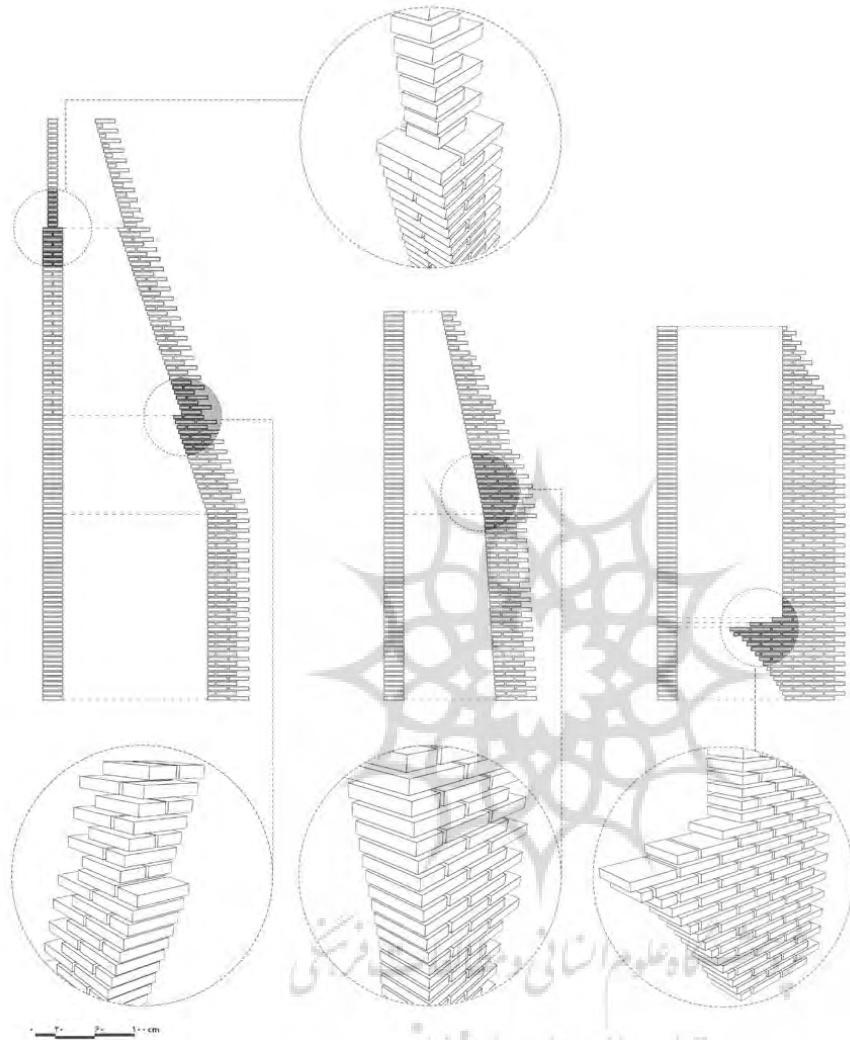
از دیگر فنون اجرایی رایج در ساخت خشخاشی‌های گنبدهای رک مطالعه‌شده، کاهش تدریجی ضخامت و عرض خشخاشی‌ها از تراز پاکار به سمت تراز تیزه گنبد است. بررسی‌ها نشان می‌دهد ضخامت خشخاشی‌ها در مقاطع مختلف برابر نیست و متناسب با نیاز سازه‌ای این عرض تغییر کرده است. تغییر عرض خشخاشی‌ها معمولاً نه

به صورت دفعی، بلکه به تدریج انجام شده است. این کار با بهره‌گیری از فن نشستن تدریجی آجر اجرا شده است. برای مثال در گنبد آرامگاه سلطان عطاءبخش ضخامت و عرض خشخاشی‌ها از یک آجر از بالای گریو به نیم آجر در طول شیب پوسته خارجی کاسته شده است. در گنبد آرامگاه پنجه‌شاه نیز برای افزایش ارتفاع و ضخامت خشخاشی‌ها و شکل‌گیری یک سازه با وزن کمتر آجرچینی خشخاشی‌ها به صورت پیش‌نشسته اجرا شده‌اند. همچنین در گنبد آرامگاه سلطان امیراحمد با کم کردن یک آجر در هر رج (تقریباً چهار رج)، عرض خشخاشی از پایین به تدریج کاهش پیدا کرده است (تصویر ۱۷).

به دلیل تنوع طرح کلاف‌های چوبی به سختی می‌توان الگوی مشخصی برای کلاف‌های چوبی یافت؛ اما با نگاهی کلی، انواع ترکیب کلاف‌ها در گنبد‌های رک به شکل کلاف‌های عمودی (عطاءبخش، پنجه‌شاه، میرنشانه)، قطری (عطاءبخش، پنجه‌شاه، سلطان امیراحمد، یلان، چهل‌تن، میرنشانه)، شعاعی (عطاءبخش، سلطان امیراحمد)، مداری (پنجه‌شاه، میرنشانه، چهل‌تن) و مورب (پنجه‌شاه، میرنشانه) است. در این میان، استفاده از شیوه ترکیب قطری رایج‌تر است.



تصویر ۱۶: چگونگی اتصال عناصر خشخاشی الف) با پوسته داخلی (مماس)، ب) با گریو و پوسته خارجی (هم‌امتداد و هشت‌وگیر)، ج) با گریو و پوسته خارجی (غیرهم‌امتداد و هشت‌وگیر)

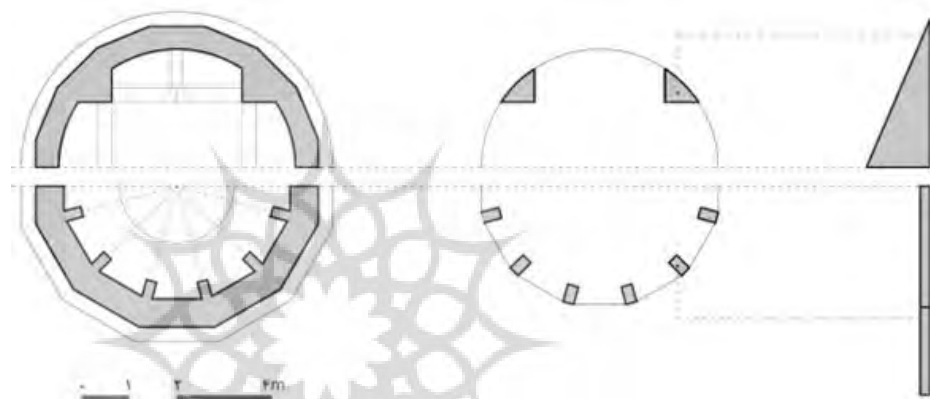


تصویر ۱۷: اشکال متفاوت فن پیش نشستن تدریجی آجر در خشخاشی‌ها از راست: سلطان امیراحمد، پنجه‌شاه، سلطان عتابخس

نتیجه

خشخاشی یکی از اندام‌های سازه‌ای است که در گنبد‌های دوپوسته گسسته در فضای میان پوسته قرار می‌گیرد. در مطالعات پیشین خشخاشی‌ها در گنبد‌های دو پوسته گسسته نار به صورت سه شکل سازه‌ای متمایز در پنج موقعیت در فضای میان دو پوسته تعریف شده است: ۱. «دیواره‌های کوتاه و قطور»؛ ۲. «تویزه‌ها»؛ ۳. «دیوارهای بلند و باریک». در این مقاله با هدف بسط دامنه مطالعات قبلی، تعریف و نقش سازه‌ای خشخاشی در گنبد‌های دوپوسته گسسته رک بررسی شد. برای این کار نمونه‌های باقی‌مانده در خارج و داخل حصار تاریخی شهر کاشان بررسی شد و از این میان شش نمونه که در پژوهش‌های تکنگاری مطالعه و مستندسازی شده‌اند و امکان مشاهده و برداشت مستقیم میدانی داشته‌اند، انتخاب شد. در گام بعد، اطلاعات مربوط به طرح معماری و ساختمانی خشخاشی‌ها در نمونه‌ها با مشاهده و برداشت مستقیم میدانی و انجام مطالعات تکمیلی کتابخانه‌ای گردآوری شد. پس از آن، برای دستیابی به تعریف

خشخاشی در این نمونه‌ها، ساختار سازه‌ای آن‌ها مدل‌سازی سه‌بعدی و با تکیه بر ترسیمات فنی با استفاده از روش توصیفی تحلیلی، مقایسه شد. بدین ترتیب تعریفی که متکی بر نمونه‌هاست، درباره چستی خشخاشی‌ها به دست آمد. مقایسه تعداد، اندازه، شکل و موقعیت خشخاشی‌ها در گنبدهای رک بررسی شده گویای آن است که همه نمونه‌ها به جز خشخاشی‌های گنبد چهل تن از تعریف مشابهی پیروی می‌کنند که با تعریف این اندام در گنبدهای نار همانندی دارد. بر این اساس، خشخاشی شامل دیواره‌هایی لاغر و کشیده و بسیار سبک است که با پیشروی به سمت تیزه با اشکال متفاوتی از فن پیش نشستن تدریجی آجر از ضخامت آن‌ها کاسته می‌شود. وجه دیگر این تعریف، الگوی توزیع خشخاشی‌ها در پلان است که بارگذاری‌های کوچک، پراکنده و متقارن را ایجاد می‌کند؛ ایده‌ای که در تقابل با ایده بارگذاری‌های متمرکز و سنگین در نقاط محدود (مانند گنبد چهل تن) است (تصویر ۱۸).



تصویر ۱۸: مقایسه الگوی توزیع جرم به دو صورت متمرکز و پراکنده در خشخاشی گنبدهای رک

شکل خشخاشی‌ها می‌تواند متأثر از چند هنجار طراحی از جمله شکل گنبد (هرمی یا مخروطی)، ارتفاع گریو، موقعیت پوسته داخلی نسبت به گریو و ابعاد دهانه باشد؛ اما با نگاهی دقیق‌تر، با تحلیل نمونه‌های مطالعه شده می‌توان خشخاشی‌های مطالعه شده را در سه شکل سازه‌ای پایه که سه موقعیت از فضای میان دو پوسته را در بر می‌گیرند، تعریف کرد (تصویر ۱۹؛ جدول ۳):

- **شکل سازه‌ای اول:** دیواره‌های کوتاه و کم‌عرض و باریک است که پوسته خارجی را به گریو پیوند می‌دهد. این شکل سازه‌ای کمینه خشخاشی‌هاست که در همه نمونه‌های مطالعه شده دیده می‌شود.^{۲۱} از این رو می‌توان آن را مولد و فصل مشترک همه خشخاشی‌ها در گنبد رک دانست.^{۲۲} از منظر رفتار سازه‌ای، این گونه از خشخاشی برای دیواره گریو و محدوده اتصال آن با پوسته خارجی به‌مثابه سخت‌کننده موضعی عمل می‌کند و مقاومت این محدوده را در برابر کمناش افزایش می‌دهد.
- **شکل سازه‌ای دوم:** توسعه عمودی شکل پایه موجب شکل‌گیری «دیواره‌های بلند و کم‌عرض و باریکی» می‌شود که در راستای پوسته خارجی ادامه می‌یابند. ابعاد این دسته از خشخاشی‌ها معمولاً رو به بالا کاهش می‌یابد؛ اما ارتفاعشان به‌ندرت از تراز نیمه ارتفاع پوسته خارجی بالاتر می‌رود. شکل دوم خشخاشی‌ها در گنبدهای رک ضخامت چندان زیادی ندارد و تقریباً با عرض خشخاشی برابر است. با این وصف، این دسته از خشخاشی‌ها هم نقش سازه‌ای «سخت‌کننده» پوسته خارجی را ایفا می‌کنند.^{۲۳} خشخاشی‌های گنبدهای پنجه‌شاه و سلطان عطا بخش از این دسته‌اند.
- **شکل سازه‌ای سوم:** این دسته برگرفته از توسعه افقی شکل پایه است که موجب شکل‌گیری «دیواره‌های کوتاه، باریک و گاه نسبتاً عریض» می‌شود. این گسترش در محدوده‌ای است که از گریو آغاز و به پشت

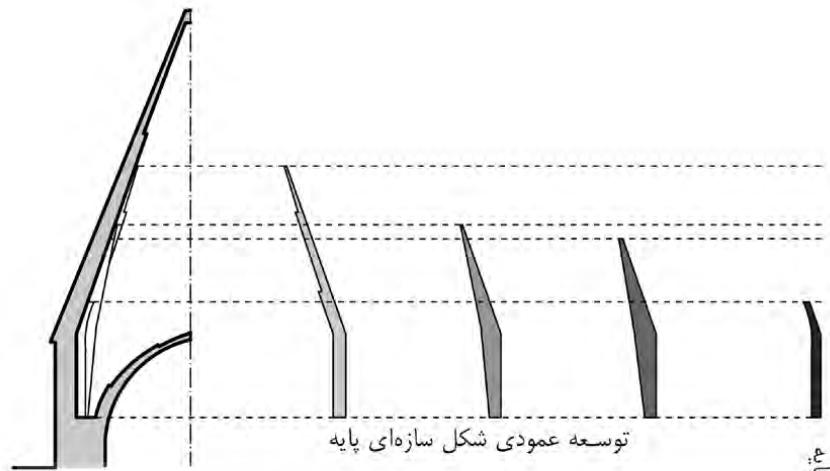
پوسته داخلی تا تراز شکرگاه آن ختم می‌شود. خشخاشی‌های گنبد سلطان امیراحمد از جمله نمونه‌های دسته سوم است. توسعه افقی خشخاشی به امتداد ایوارگاه یا تیزه پوسته داخلی نمی‌رسد، معمولاً نسبت به آن‌ها عرض کمتری دارد و سطح کمتری از فضای میان دو پوسته را پر می‌کند. خشخاشی‌های دسته سوم بسته به عرضشان دو نقش سازه‌ای ایفا می‌کنند:

الف) اگر عرض خشخاشی‌ها زیاد نباشد و خشخاشی به لبه پوسته خارجی نرسد، خشخاشی‌ها صرفاً نقش «سخت‌کننده» پوسته خارجی را دارند و مقاومت پوسته خارجی را در برابر کماتش افزایش می‌دهند. ب) اگر عرض خشخاشی‌ها زیاد باشد و تا حدود نقطه شکرگاه پوسته داخلی ادامه یابند، سطح دیوار آجری پشت پوسته خارجی افزایش قابل توجهی می‌یابد. در این صورت، این اندام به‌مثابه «پشت‌بندی» است که با افزایش سطح مقطع پوسته خارجی باعث تغییر مسیر انتقال بار نیرو به‌سمت داخل دهانه می‌شود؛ امری که موجب افزایش مقاومت خمشی پوسته خارجی می‌گردد. به‌علاوه، این دسته از خشخاشی‌ها همچون صورت‌های دیگر نقش «سخت‌کننده» پوسته خارجی را نیز ایفا می‌کنند و باعث افزایش مقاومت آن در برابر کماتش می‌شوند.^{۲۴}

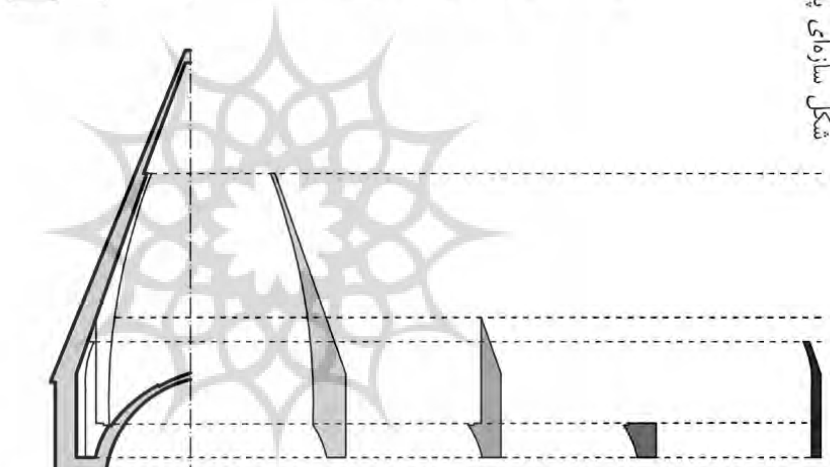
بدین ترتیب، این مطالعه نشان می‌دهد که در هر سه شکل سازه‌های خشخاشی در گنبد‌های رک، از نقش این اندام عنوان «پشت‌بند» کاسته شده و غالباً به «سخت‌کننده» گریو و پوسته خارجی تقلیل یافته است.^{۲۵} برای قضاوت دقیق‌تر در این باره و تفسیر چرایی آن لازم است که پژوهش‌های آتی با مدل‌سازی و تحلیل کمی سازه‌های خشخاشی در گنبد‌های رک پس از افزودن کلاف‌های چوبی، نقش‌های سازه‌ای این عنصر را تحلیل کند و بر وضوح آن بیفزاید.

جدول ۳: تعریف و نقش سازه‌های خشخاشی در گنبد‌های دوپوسته گسسته رک

نقش سازه‌ای	شکل سازه‌ای	موقعیت	الگوی شکل‌گیری
سخت‌کننده گریو که مقطع خمشی و مقاومت کماتشی آن را افزایش می‌دهد.	دیوارهایی کوتاه و باریک با ضخامت و عرض تقریباً برابر	گریو و ناحیه اتصال گریو با پوسته خارجی	شکل سازه‌ای پایه
سخت‌کننده پوسته خارجی که مقطع خمشی و مقاومت کماتشی آن را افزایش می‌دهد.	دیوارهای بلند و باریک با ضخامت و عرض تقریباً برابر	پشت پوسته خارجی	گسترش شکل پایه در امتداد محور افقی به‌سمت مرکز دهانه
سخت‌کننده گریو که مقطع خمشی و مقاومت کماتشی آن را افزایش می‌دهد.		پشت گریو	
به‌جز نقش سخت‌کننده، به‌عنوان پشت‌بند پوسته خارجی است که مسیر انتقال نیرو را به‌سمت مرکز دهانه و گاه بر روی پوسته داخلی هدایت می‌کند.	دیوارهایی کوتاه و باریک با عرض بیشتر از ضخامت	پشت پوسته خارجی	گسترش شکل پایه در امتداد محور افقی به‌سمت مرکز دهانه
دفع نیروی رانش پوسته داخلی و ایجاد تنش نقطه‌ای بر روی آن		پشت پوسته خارجی و رو و پشت پوسته داخلی	



شکل سازه‌ای پایه



توسعه افقی شکل سازه‌ای پایه

تصویر ۱۹: بازنمایی تصویری تعریف خشخاشی براساس سه شکل سازه‌ای متمایز

پی‌نوشت‌ها

۱. زاویه حدود ۲۲/۵ درجه از تراز پاکار گنبد.
۲. برای آشنایی با گنبد‌های گسسته نار و نمونه‌های آن در معماری ایران، نک: پیرنیا ۱۳۷۰؛ معماریان ۱۳۹۱؛ صفائی‌پور ۱۴۰۱؛ ولی‌بیگ، رهروی پوده، و رحیمی آریایی ۱۳۹۵؛ Safaeipour, Afghani Khoraskani, and Safaeipour et al. 2011؛ Alizadegan 2022
۳. بر طبق کتیبه فوقانی در زیر گنبد بنای برج در تاریخ ۴۰۷ق شروع و در سال ۴۱۱ق به پایان رسیده است.
۴. گذار، این برج آرامگاهی را به دوره تیموری منسوب کرده است.
۵. ساختار کلی گنبد آرامگاه شاهزاده ابراهیم کاشان که در خارج از حصار تاریخی قرار دارد نیز مشابه گنبد آرامگاه شاه یلان است.
۶. شرح یافته‌های پژوهش‌های مقدماتی به صورت مفصل در مقاله «خشخاشی در گنبد‌های دوپوسته گسسته نار: تعریفی تازه براساس مطالعه شکل سازه‌ای» (صفائی‌پور ۱۴۰۱) آمده است.

7. See: Byron, Pope, and Ackerman 1981.

8. A ring of radial buttresses

9. Swelling curve of the outer dome

۱۰. او همچنین توضیح می‌دهد که در نمونه‌های عصر تیموری علاوه بر پشت‌بندهای شعاعی، یک ستون آجری یا چوبی تاج گنبد بیرونی را به گنبد داخلی متصل می‌کند (Byron 1981, 1332).
۱۱. می‌توان اطلاعاتی را در مطالعات و پژوهش‌هایی که به مستندنگاری و بررسی نمونه‌های گنبد‌های رک پرداخته و در آن میان خشخاشی‌ها را نیز بررسی کرده‌اند، پیدا کرد. از این جمله فصل گنبد‌های دوپوسته گسسته رک در کتاب معماری ایران: نیارش تألیف غلامحسین معاریان است که با معرفی و بازنمایی مدارک سه‌بعدی برج رادکان به خشخاشی‌های بنا توجه ویژه‌ای داشته و به‌خوبی طرح، موقعیت و تعداد خشخاشی‌ها را در این بنا معرفی کرده است (معماریان ۱۳۹۱، ۵۱۹-۵۲۱).
۱۲. این بنا توسط بیگی، پاکدل و کوچکی با نظارت آقای دکتر رضا فیضی در دانشگاه کاشان مستندسازی شده و مطالعه و برداشت دقیق خشخاشی‌ها توسط نگارندگان انجام شده است.
۱۳. «این بقعه در گذشته بخشی از مرکز محله پنجه‌شاه را تشکیل می‌داده است که علاوه بر بقعه عناصری چون آب‌انبار، کاروان‌سرا، عصارخانه، حمام آقاشاه، گذر یا بازارچه، مسجد و گورستان قدیمی را نیز شامل می‌شده است» (جیحانی و دیگران ۱۳۹۹).
۱۴. از کتیبه کاشی دور گنبد این کلمات باقی مانده است. «... مشرف شدند این گنبد عالی صدر مکرم و معظم امیر نظام بن حسین بن... کاشانی... فی ۹۴۱ ه.ق.»
۱۵. روی دیوار داخلی بقعه یک قطعه کاشی خشتی بزرگ نصب شده است که روی آن پس از آیه‌ای از قرآن نوشته شده است: «عمل سید قطب‌الدین‌الحسینی و غضایری ۹۰۲ ق.»
۱۶. این بنا را ریحانه صبا با نظارت آقای دکتر احمد دانایی‌نیا در دانشگاه کاشان مستندسازی کرده است.
۱۷. این بنا را حسن زاده، بهشتی و سروانی‌پور با نظارت آقای دکتر احمد دانایی‌نیا در دانشگاه کاشان مستندسازی کرده‌اند و مطالعه و برداشت خشخاشی‌ها توسط نگارندگان انجام شده است.
۱۸. همایونفر ۱۳۵۲.
۱۹. هر آجر به‌صورت تقریبی معادل ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.
۲۰. گنبد امامزاده میرمحمد (ع) در شیراز هشت خشخاشی به‌شکل دوزنقه دارد (معماریان ۱۳۹۱، ۵۵۹). این خشخاشی‌ها جزو معدود نمونه‌هایی هستند که با خشخاشی‌های گنبد چهل‌تن مشابه‌اند.
۲۱. شکل مولد در خشخاشی‌های فرعی گنبد سلطان‌امیراحمد دیده نمی‌شود؛ شاید دلیل این امر تعبیه نورگیرهای چهارگانه این گنبد است که شکل منحصر به فردی از خشخاشی فرعی را ایجاد کرده است.
۲۲. موقعیت قرارگیری و شکل خشخاشی‌های حداقلی در گنبد‌های دوپوسته گسسته رک و نار باهم بسیار متفاوت است؛ تفاوتی که متأثر از شکل پوسته خارجی گنبد‌های نار و انحناهای این پوسته در محدوده آوگون است.
۲۳. از این رو رفتار سازه‌ای آن‌ها با نمونه‌های مشابه در گنبد‌های نار که «تویزه‌های داخلی» خوانده شده‌اند، متفاوت است.
۲۴. لازم به تأکید است که شکل‌های سازه‌ای پیوندی نیز در بین نمونه‌ها دیده می‌شود. برای نمونه، طرح خشخاشی‌های گنبد میرنشانه ترکیبی از شکل دوم و سوم است.
۲۵. هرچند شباهت‌های میان طرح خشخاشی در گنبد‌های نار و رک بسیار است، سه تفاوت عمده در طرح و نقش سازه‌ای خشخاشی‌های گنبد رک دیده می‌شود: الف) شکل و موقعیت شکل سازه‌ای پایه؛ ب) کم بودن متوسط عرض و ضخامت خشخاشی و ادامه نیافتن آن‌ها تا ترازهای بالایی در دسته دوم؛ ج) عرض بسیار کمتر خشخاشی در دسته سوم.

منابع

- پوپ، آرتور. ۱۳۹۰. معماری ایران. ترجمه غلامحسین صدری افشار. تهران: دات.
- پیرنیا، محمدکریم. ۱۳۷۰. گنبد در معماری ایران. اثر، ش. ۲۰: ۱۵۵-۵.
- حاجی قاسمی، کامبیز. ۱۳۸۹. گنجنامه: امامزاده‌ها و مقابر (بخش اول). ج ۱۱ تا ۱۳. تهران: دانشگاه شهید بهشتی، مرکز اسناد و

تحقیقات دانشکده معماری و شهرسازی.

- جیحانی، حمیدرضا، محمد مشهدی، حانیه اویسی، و آذین زیلوچیان مقدم. ۱۳۹۹. مطالعه مرکز محله پنجه‌شاه کاشان با تأکید بر نقش زیارتگاه و عناصر معماری و شهری پیرامون کاشان‌شناسی، ش. ۱: ۴۳۳-۴۳۸.

- صفائی‌پور، هادی. ۱۴۰۱. خشخاشی در گنبد‌های دوپوسته گسسته نار: تعریفی تازه براساس مطالعه شکل سازه‌ای. صفه، ۳۳ (۱): ۱۱۵-۱۳۰.

- صفائی‌پور، هادی. ۱۳۹۷. مستندنگاری، شناخت و تحلیل عناصر سازه‌ای و فنون ساختمانی بنای گنبد قابوس. طرح پژوهشی برای پایگاه میراث جهانی گنبد قابوس. سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان گلستان.

- گذار، آندره و دیگران. ۱۳۶۷. آثار ایران، ج ۴. ترجمه ابوالحسن سرومقدم. مشهد: بنیاد پژوهش‌های اسلامی آستان قدس رضوی.

- گلمبک، لیزا و دیگران. ۱۳۷۴. معماری تیموری در ایران و توران. ترجمه کرامت‌الله افسر و یوسف کیانی. تهران: سازمان میراث فرهنگی کشور.

- مرکز اسناد و تحقیقات دانشکده معماری و شهرسازی. عکس هوایی شهر تاریخی کاشان در سال ۱۳۳۵. تهران: دانشگاه شهید بهشتی.

- مشکوتی، نصرت‌الله. ۱۳۴۵. جرجان-گنبد قابوس. هنر و مردم، ش. ۵۱: ۳۳-۹۳.

- معماریان، غلامحسین. ۱۳۹۱. معماری ایران: نیارش. تدوین هادی صفائی‌پور. تهران: گلجام.

- مهندسان مشاور شهر و خانه. ۱۳۷۶. نقشه کاشان قدیم. تهران: دفتر بهسازی و نوسازی شهری وزارت مسکن و شهرسازی.

- نراقی، حسن. ۱۳۴۸. آثار تاریخی کاشان و نطنز. تهران: انجمن آثار و مفاخر فرهنگی.

- ولی‌بیگ، نیما، ساناز رهروی پوده، و افروز رحیمی آریایی. ۱۳۹۵. تحلیل جزئیات هندسی و اجرایی در گنبد‌های دوپوسته گسسته نار شاخص شهر اصفهان نمونه‌های مطالعاتی: گنبد‌های مسجد جامع عباسی، آرامگاه درب امام، مدرسه چهارباغ و کلیسای بیت‌الرحم. صفه ۲۶ (۲): ۸۵-۱۰۴.

- ویلبر، دونالد. ۱۳۶۵. معماری اسلامی ایران در دوره ایلخانان. ترجمه عبدالله فریار. تهران: وزارت فرهنگ و آموزش عالی، شرکت انتشارات علمی و فرهنگی.

- همایونفر، علیرضا. ۱۳۵۲. نقشه مقبره امامزاده حسن بن موسی (میرنشانه) کاشان. کاشان: دفتر فنی سازمان ملی حفاظت از آثار باستانی ایران.

- هنرفر، لطف‌الله. ۱۳۵۰. گنجینه آثار تاریخی اصفهان: آثار باستانی و الواح و کتیبه‌های تاریخی در استان اصفهان. ج ۲. تهران: چاپخانه زیبا.

- Byron, Robert, Arthur Upham Pope, and Phyllis Ackerman (eds.). 1981. Timurid Architecture: General Trends. In *A Survey of Persian Art, from Prehistoric Times to the Present*. Arsha: SoPA.

- Petruccioli, Attilio et. al. 2018. *Kashan an Iranian city in change: religious monumental buildings in Kashan*. Germany, pp. 107-141.

- Safaeipour, Hadi, Akbar H. E. Zargar, and Sajedah Goudarzi. 2011. Typology of Khashkhashies (Stiffeners) in Discontinuous Double-Shell Domes. *Domes in the world conference*, Florence, pp. 1-19.

- Safaeipour, Hadi, Roham Afghani Khoraskani & Afsane Alizadegan. 2022. *Khashkhāshī in the design of Iranian detached double-shell onion domes: classification and preliminary assessment of structural role*. *Architectural Science Review*.

- Stronach, David, and T. Cuyler Young. 1966. Three Seljuq Tomb Towers. *Journal of the British Institute of Persian Studies* 4 (1): 1-20.

Abstract

■ Revisiting khashkhashi's Definition and Structural Role in the Design of Detached Double-shell Pyramidal and Cone-shaped Domes, the Historical City of Kashan

Hadi Safaeipour

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

Parisa Moazeni

Master's Degree in Restoration of Historical Monuments and Urban Fabrics, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University

Stiffeners, known as khashkhāshi in Farsi, are structural elements positioned within the interspace of double-shell domes. While prior studies have focused on stiffeners in onion-shaped double-shell domes, limited research has examined their role in pyramidal or cone-shaped double-shell domes, referred to as rok domes in Farsi. This article addresses this gap by (1) providing a comprehensive definition of stiffeners in detached double-shell rok domes through an analysis of their morphology and (2) identifying their structural role within this dome type. The historical city of Kashan was selected for this study due to the significant number and variety of rok dome cases. Ten cases, located both within and beyond Kashan's historical city walls, were chosen for examination. In the initial phase, six examples documented in monographic research, which allow for direct field observation and demonstrate a variety of khashkhāshi combinations and designs, were selected. Subsequently, data on the architectural design and structural characteristics of khashkhāshi in these selected cases were gathered through direct observation, field surveys, and supplementary library and archival research. In the third stage, a three-dimensional model of the stiffener structures was created using advanced architectural drawings to facilitate comparative analysis. Finally, applying a descriptive-analytical method, the study compares khashkhāshi designs based on quantity, position, dimensions, shape, and construction techniques. This approach introduces a revised definition of khashkhāshi in rok domes, highlighting three distinct structural forms that fulfill varied roles. Unlike onion-shaped double-shell domes, where khashkhāshi often function as buttresses, rok domes predominantly function as stiffeners for the dome's neck and outer shell. These findings enhance the understanding of khashkhāshi structural behavior, specifically in rok double-shell domes, and are not directly applicable to the analysis of individual cases.

Keywords: khashkhāshi, double-shell dome, historical structures, Iranian architecture.