رفتار لرزه‌ای طاق‌ها و گنبدها با مصالح بنایی - ایاصوفیه در استانبول و سن‌فرانسیس در آسیس

نویسنده: جورجو کروچی[1]
مترجمه: مینا راداحمدی[2]، دکتر رضا ابویی[3]

چکیده

مباحث مورد بررسی در این مقاله دارای سه‌بخش کلی است. ابتدا گذر مختصری بر تاریخ گنبدها خواهد شد و برداشتی کلی از وضعیت تعدادی از آن‌ها از جمله، پانتئون در رم، ایاصوفیه در استانبول، سانتاماریا دلفیوره در فلورانس و سن‌پیترو در رم ارائه می‌گردد. سپس رفتار لرزه‌ای و استاتیکی بنای ایاصوفیه و وضعیت آسیب‌های آن به کمک مدل‌های ریاضی آنالیز می‌گردد. در این راستا چگونگی فروریختن این گنبد، از زمان ساختش طی چندین زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش سوم، فروریختن دو طاق باسیلیکای سن‌فرانچسکوی آسیسی در اثر زمین‌لرزه‌ی شدید ۲۶ سپتامبر ۱۹۹۷ میلادی، با استفاده از مدل‌های ریاضی و تصاویر مطالعه می‌شود. در نهایت، پایدارسازی و تقویت طاق‌های تغییرشکل‌یافته‌ی آن به کمک مواد مرکب (تارهای آرامید) مورد بحث قرار می‌گیرد.

گذری بر تاریخ گنبد

قوس، طاق، گنبد

بدون‌شک ساخت قوس یکی از مهم‌ترین نوآوری‌های بشر در تاریخ معماری بوده است، چرا که حتی اگر مقاومت خمشی زیاد باشد، برای برقرارساختن شکلی پایدار می‌توان به کمک انحنای قوس، نیروهای رانشی و در نتیجه لنگر خمشی نیروهای فشاری را به پاطاق منتقل نمود. اگرچه با مقایسه‌ی قوس، طاق و گنبد خواهیم دید که مزایای رفتار فشاری- خمشی در طاق و گنبد بسیار بهبود یافته‌است. این موضوع به‌ویژه زمانی‌که اثر خمش، به‌دلیل انحنای متفاوت پوسته‌های خارجی و داخلی گنبدها عملاً بسیار ناچیز می‌شود، اهمیت بیش‌تری دارد؛ چراکه به این طریق مقاومت کلی گنبد افزایش می‌یابد. با این اوصاف اگرچه مصالح بنایی عموماً در مقابل کشش ضعیف هستند، اما در سازگاری با چنین تدابیر سازه‌ای می‌توانند به‌عنوان موادی ایده‌آل عمل نمایند. هرچند، لازم به ذکر است رفتار طاق در مقابل نیروهای ناشی از زلزله، بسیار متفاوت و بیش‌تر به طرح طاق و نوع قوس بستگی دارد.

با وجود این، ضعف طاق‌های دوره‌ی گوتیک، نه‌تنها به‌علت ضخامت کم و اتصال ناقص تویزه‌ها و شبکه‌ی تیرهایشان، بلکه عمدتاً به‌دلیل لاغری و قابلیت تغییرشکل ستون‌هایی است که تنها تا حد کمی توسط جرزهای حائل پشتی حمایت می‌شوند. از سویی در گذشته و به‌ویژه در ایتالیا، معماری کلیساهای جامع گوتیک هنوز همچون کلیساهای شمال اروپا توسعه نیافته بود. در این خصوص می‌توان علاوه‌بر شرایط فرهنگی- اجتماعی متفاوت این کشور (به پیروی از سبک کلاسیک روم و یونان)، زلزله‌خیزی آن را دلیل دیگری بر آسیب‌پذیری بیش‌تر کلیساهای جامع آن، در زمین‌لرزه‌های مورد بررسی به‌شمار آورد. در فصل آخر با تمرکز بر باسیلیکای سن‌فرانچسکو در آسیسی[4] بر این امر تأکید بیش‌تری خواهد شد.

همان‌طورکه پیش از این ذکر شد، درعمل رفتار لرزه‌ای گنبد، بسیار قوی‌تر از رفتار طاق و قوس در برابر لرزه است. ضعف احتمالی آن‌ها می‌تواند به سختی و مقاومت سازه‌های باربر زیر آن‌ها ارتباط داشته باشد. چنان‌چه در بخش دوم خواهیم دید، علت آسیب و فروریختن ایاصوفیه نیز تغییرشکل پایه‌های اصلی و قوس‌های باربر بوده است.

در ادامه‌ی بحث می‌توان از تالار هشت‌گوشه‌ی دموس اوریا[5] یا همان سرای طلایی نرو[6]، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین آثار در تاریخ گنبد اروپا در قرن اول میلادی نام

بر بدنه خارجی رنوندا (چپ به راست)

برد. این تالار نه‌تنها بر طرح پانتئون[7]، در قرن بعدی تأثیر گذاشت، بلکه ۱۳۵۰ سال پس از ساختش، در حل مسأله‌ی گنبد با پایه‌ی هشت‌وجهی، منبع الهامی برای برونلسکی[8] در ساخت گنبد سانتاماریا دلفیوره[9] به‌شمار می‌رفت.

پانتئون

معماری پانتئون از نظر ظاهری دارای ساختاری ساده، مرکب از گنبدخانه و گنبدی نیم‌کروی با قطری در حدود ۴۳ متر است. ساخت آن به زمان پادشاهی آدریانو[10] در قرن دوم بعد از میلاد مسیح مربوط می‌شود(تصویر۱). با کمی دقت خواهیم دید که نوآوری‌های به‌کارگرفته شده در ساختار بنا، بسیار پیچیده‌تر از آنچه در وهله‌ی اول به نظر می‌رسد، می‌باشد.

نسبت میان گنبدخانه و گنبد در داخل و خارج بنا بسیار متفاوت می‌نماید، چراکه مقطع داخلی گنبد از جایی که پاکار قوس از سطح داخلی استوانه‌ی این گنبدخانه به سمت بالا امتداد می‌یابد، به‌وضوح یک نیم‌کره است. اما از بیرون چنین به نظر می‌رسد که استوانه‌ای بالاتر قرار دارد و گنبد با انحنا و خیز کم‌تری نمایان می‌شود. همچنین این بنا از بیرون شبیه به دیوار آجری عظیمی است که ردیف‌های

قوس در ضخامت آن تعبیه شده باشند. این قوس‌های بدلی، در حقیقت همان فضاهای خالی و فرورفتگی‌هایی هستند که در دل مصالح بنایی شکل گرفته‌اند و بیش‌تر بیان‌گر علاقه‌ی خاص رومی‌ها در به‌کارگیری تجارب بزرگشان، در ساخت سازه‌های قوسی، مانند کانال‌های آب و آمفی‌تئاترهاست. به کمک این روش، در چنین دیوار پیوسته‌ی بزرگی، کنترل جریان نیروها (که تحت‌تأثیر نشست خاک و پدیده‌ی ویسکوزیته می‌توانسته است باعث بروز مشکلات بیش‌تری شود)، آسان می‌گردد.

احتمالاً اولین‌بار با مقایسه‌ی ساختار کلسئوم و پانتئون این دو بنا کاملاً متفاوت به‌نظر می‌رسند، اما در عمل سازندگان پانتئون، روندا[۱۱] یا گنبدخانه‌ی مدور را بسیار شبیه‌تر از آن‌چیزی که انتظار می‌رود و به احتمال قوی، تحت‌تأثیر ان ساخته‌اند. مدل‌سازی ریاضی رفتار سازه‌ای پانتئون، به‌خصوص آنالیز لرزه‌ای، نشان داده است که تنش‌ها آن‌قدر کم هستند که نمی‌توانند موجب آسیب‌های سازه‌ای جدی شوند. از سویی این بنا باتوجه به انحنای دوگانه‌ی قوس گنبد در بیرون و در داخل، همچنین شکل استوانه‌ای پایه‌اش، در مجموع دارای ساختاری ایستا و پایدار است. نیروها به‌طورمستقیم از بالا تا زمین انتقال می‌یابند. البته تعدادی ترک (بیش‌تر ترک‌های عمودی) در بیرون رونتدا و داخل گنبد پدیدار شده است که به‌احتمال قوی در اثر نشست‌های جزئی در خاک ایجاد شده‌اند.

اپاصوفیه

وضعیت کنونی اپاصوفیه در دوران حکومت جوستینیانو[۱۲] در قرن۶ بنا گردیده و در ساخت این بنا از معماری پانتئون (معبد خدایان) الهام گرفته شده است. البته نحوه‌ی انتقال بار گنبد در اپاصوفیه با پانتئون تفاوت دارد؛ چراکه در این گنبد چهارستون عظیم، در گوشه‌های پلان اصلی مربع‌شکل کار گذاشته شده که بار گنبد را حمل می‌کنند. این مسأله توجه ما را به دو مورد مهم معطوف می‌دارد:

۱) چگونگی مقاومت در برابر نیروهای جانبی وارد بر کناره‌های گنبد؛

۲) چگونگی انتقال نیروهای عمودی به پایه‌ها.

راه‌حل مشکل اول، احداث نیم‌گنبدها و جرزهای حائل آن‌ها و نیز پایه‌هایی برای تعدیل اثر رانش است. درعین‌حال با وجود پاندانتیوها در چهار گوشه، جریان نیرو از بالا تا پایین انتقال می‌یابد و مشکل دوم نیز برطرف می‌شود. ابداعاتی از این دست بسیار حائز اهمیت است، چراکه ساخت اکثر گنبدهایی که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد شد، از چنین اصول و ابداعاتی الهام گرفته است. با این وجود اگرچه این راه‌حل‌ها بسیار چشمگیر هستند، اما می‌توان گفت که ساختمان اپاصوفیه به اندازه‌ی ساختمان گنبددار پانتئون مقاوم و مستحکم ساخته نشده است. چنان‌چه به آن اشاره خواهد شد، اپاصوفیه به‌علت نیروهای دینامیکی وارده در اثر زمین‌لرزه، تغییرشکل‌های فراوانی کرده است.

کلیسای سانتاماریا دلفیوره

گنبد کلیسای سانتاماریا دلفیوره (اثر برونلسکی، قرن پانزدهم میلادی) اولین نمونه‌ی یک گنبد بزرگ دوپوسته بر روی نقشه‌ی هشت‌ضلعی است. این گنبد با قطر ۴۳متر، مشابه با بنای پانتئون و با بهره‌گیری از سبک معماری طاق‌های گوتیک ساخته شده است. به‌منظور کاهش اثر رانش در این گنبد، شکل قوس آن به‌صورت تیزه‌دار و برای کاهش اثر وزن، سازه‌ی باربر از هشت تویزه‌ی اصلی، در گوشه‌ها و نیز شانزده تویزه‌ی فرعی، در میان تیرهای

اصلی شبکه (یا قسمت پوسته) شکل می‌گیرد. اتصالات جانبی توسط چهار تویزه‌ی سنگی (که با بست‌های فولادی تقویت شده‌اند) و نیز قطاربندی چوبی میسر می‌گردد. به‌علاوه قوس‌های افقی کوچک، ارتباط میان تویزه‌های اصلی و تویزه‌های میانی را تقویت می‌کنند (تصویر۲).

مشکل اصلی برونلسکی در ساخت چنین گنبدی استفاده‌نکردن از داربستی بود که قطعاً می‌توانست بسیار سنگین و بزرگ باشد. احتمالاً در چنین شرایطی برونلسکی نه‌تنها از بنای پانتئون و دوموس اوریا، بلکه از طاق‌ها و گنبدهای ایرانی نیز الهام گرفته و حتی احتمالاً به ایران سفر کرده است؛ زیرا در ایران به پیروی از روش‌های سنتی، استحکام بنا درحین ساخت از طریق بررسی دقیق طرح اولیه و نیز چیدمان آجرها تأمین می‌شده است.

به‌طور کلی رفتار سازه‌ای گنبد، به مقاومت کششی چوب و ردیف‌های سنگی که بر مقطع هشت‌وجهی پلان قرار گرفته‌اند بستگی دارد. اما این مسأله خود به‌نوعی نقطه‌ی ضعف سازه نیز محسوب می‌شود، چراکه به نظر نمی‌رسد این ردیف‌ها به‌طورکامل قادر به تأمین مقاومت کششی پیرامونی باشند. وجود ترک‌های ایجادشده بر روی پوسته، در قسمت‌های بالای پنجره‌ها نیز بیان‌گر همین مسأله است.

به هر حال، شکل هشت‌وجهی گنبد که در هماهنگی با شکل و ساختار گریوار و نیز طرح کلیسای زیرین می‌باشد، از لحاظ منطقی این تصور را ایجاد می‌کند که رفتار لرزه‌ای بنا نباید با مشکل مواجه باشد. البته همان‌طور که قبلاً ذکر شد، این امر در صورتی است که ردیف‌های سنگی یا زنجیرهای فولادی تقویتی قادر به تأمین مقاومت کششی باشند.

پایه‌ی هشت‌وجهی گنبد، از چهارستون بسیارقوی در گوشه‌ها و چهارطاق و قوس در میان آن‌ها تشکیل می‌شود. ساختار آن از استحکام کافی برخوردار است، چراکه با بهره‌گیری از ایده‌ی نیم‌گنبدهای کوچکی که برگرفته از معماری ایاصوفیه ساخته شده‌اند، حتی محکم‌تر از آن‌ها هستند.

زمانی‌که درکی از ایستایی بنا فراهم شود، مشکلات فنی جلوگیری از لغزش آجرها به داخل، هنگام قرارگیری بر بستری از ملات تازه اجراشده نیز حل می‌شود. روزنی که بر فراز پانتئون وجود دارد، بدون نیاز به وجود پیوستگی سازه‌ای در رأس گنبد، تعادل را نشان می‌دهد. این موضوع از طریق به‌کارگیری خلاقانه چیدمان ردیف‌های آجر میسر گردیده است؛ به این طریق که آجرهایی عمودی و افقی به‌طور یک در میان، واقع شده‌اند و رفتاری همچون حائل‌هایی موقتی از خود بروز می‌دهند. لذا این امکان فراهم می‌شود تا در عملیات ساخت، با ایجاد ارتباط میان مصالح بنایی تازه اجرا شده، اثری قوس‌گونه داشته باشند.

با توجه به این‌که تویزه‌ها نسبت به بنای پانتئون، خیز بیش‌تری به سمت لبه‌ی فوقانی روزن رأس گنبد دارند، برای حفظ پایداری این گنبد، ساختاری، همانند یک کلاه فرهنگی، در آن طراحی شده است.

کلیسای سن‌پیترو

قطر گنبد سن‌پیترو (اثر میکل‌آنجلو[۱۲]، قرن شانزدهم میلادی) ۴۳ متر و قابل‌مقایسه با بنای پانتئون و سانتاماریا دلفیوره می‌باشد. اگرچه الهاماتی از معماری کلاسیک نیز در این بنا به‌چشم می‌خورد، با وجود این به‌عنوان آخرین بنایی که عمیقاً تحت‌تأثیر معماری سبک گوتیک ساخته شده است، شناخته می‌شود. لکن در مجموع هارمونی و هماهنگی جالبی دارد.

پروژه‌ی ساخت گنبد سن‌پیترو قبل از رسیدن به طرح نهایی میکل‌آنژ، دست‌خوش تحولات گوناگونی گردید. تفاوت اساسی گنبد برونلسکی و گنبد میکل‌آنژ در مقطع مدور پایه‌ی گنبد است. گنبد توسط شانزده تویزه ساخته شده است. در این بنا ردیف‌های سنگی پیرامونی گنبد سانتاماریا دلفیوره، جای خود را به تویزه‌هایی فولادی داده‌اند.

از نظر رفتار لرزه‌ای، ایاصوفیه و سن‌پیترو شباهت‌های خاصی دارند؛ زیرا در هر دو بنا نیروهای وارده باید از سطحی مدور به چهار ستون، در گوشه‌های یک زمینه‌ی ایده‌آل مربع منتقل شوند که این امر از طریق اجرای چهار طاق و پاندانتیوهای مربوط به آن‌ها صورت گرفته است. چنان‌چه در بخش بعد خواهیم دید تفاوت‌های اساسی، بین این دو بنا وجود دارد. در واقع ایاصوفیه، نه‌تنها گنبد مستحکم سن‌پیترو را ندارد، بلکه پایه‌ی گنبد آن نیز به‌دلیل وجود ردیف پنجره‌های متوالی بسیار ضعیف‌تر از پایه‌ی گنبد سن‌پیترو است. از سویی طرح کلیسای سن‌پیترو به‌صورت صلیبی است و ازاین‌رو کل سازه، در مقابل هرگونه حرکت افقی پایداری می‌کند. لذا رفتار سن‌پیترو در برابر زلزله بسیار مطلوب‌تر از ایاصوفیه است، چراکه نیروهای فشاری از تویزه‌ها تا ستون‌ها در جریان بوده و تنش‌های کششی به مقدار پایین باقی می‌مانند. شاید به‌همین دلیل در اثر زمین‌لرزه‌ای که در سال ۱۷۰۳ میلادی

شهر رم را لرزاند، بر بدنه‌ی ساختمانی که در آن زمان دچار مشکلات رطوبتی (به‌علت سرعت زیاد در ساخت این بنا) و نشست پی (احتمالاً به‌دلیل لایه‌های بناهای قدیمی موجود در محل) نیز بوده است، ترک‌های بسیاری به وجود آمد. البته این امر در نیمه‌ی قرن هجدهم، اضطراب و هراس شدید پاپ بندتتو چهاردهم[۱۵] را به‌همراه داشت و باعث شد وی دستور دهد تویزه‌های فولادی این گنبد را استحکام‌بخشی نمایند.

ایاصوفیه

بنای ایاصوفیه در استانبول توسط کنستانتین[۱۶] در محلی مشرف بر تنگه‌های باریک بوسفورو[۱۶] ساخته شده است. این بنا در سال ۵۲۲ میلادی، بر اثر آتش‌سوزی به‌طور جدی آسیب دید. در پی این حادثه، تنها چیزی که از ساختمان اصلی باقی‌ماند، شالوده و پی آن بود. پس از آن امپراطور جوستینیان[۱۷] از این فرصت استفاده کرده و کلیسایی کاملاً جدید بنا کرد. کار ساخت آن تحت‌نظر دو معمار، به‌سرعت پیش رفت و در کم‌تر از پنج‌سال به اتمام رسید؛ و در نهایت کلیسای جامع جدید در ۲۴ دسامبر سال ۵۳۷ میلادی افتتاح شد. دوباره در سال ۵۵۸ میلادی، زلزله صدمات شدیدی به ساختمان جدیدالاحداث وارد کرد که به‌سرعت مورد مرمت قرار گرفت. در طول ۹۰۰ سال بعد و در زمان امپراطوری روم شرقی این گنبد بار دیگر، در بخش‌هایی از خود دچار تخریب‌هایی جزئی گردید و البته نه‌تنها سازه‌ی اصلی، بلکه قسمت‌های ثانوی الحاقی پیرامون آن نیز بارها و بارها تغییر یافت تا این‌که به‌شکل کنونی درآمد.

ایاصوفیه در شکل کنونی بر پلان تقریباً مستطیل‌شکل با ابعاد ۷۵×۶۰ مترمربع استوار است. ابعاد فضای مرکزی، جایی‌که گنبد بر آن واقع شده است، نیز مربعی با ابعاد ۳۲×۳۲ مترمربع می‌باشد. گنبد اصلی ارتفاعی در حدود ۵۴ متر دارد و توسط چهار نیم‌گنبد و چهار قوس بزرگ در چهارگوشه نگاه داشته می‌شود (تصویر ۳). قطر کره‌ی فرضی که شامل گنبد و پاندانتیوها می‌شود (محور قطری زیربنای مربع‌شکل)، در حدود ۴۳ متر است که از این لحاظ با قطر گنبد پانتئون که به‌عنوان الگوی مرجع توسط معماران بیزانس مورد استفاده قرار می‌گرفته، قابل مقایسه است.

سازه‌ها با مصالح بنایی، از جمله آجر ساخته شده‌اند. ملات مورداستفاده اساساً از نوع سیمان پوزولانی است. در این ملات کارایی مواد پوزولانی به کمک قراردادن خرده‌های آجری (با ابعاد تقریبی هم ضخامت با خود آجرها) در میان لایه‌های ضخیم ملات (از ۵ تا ۷ سانتی‌متر) افزایش یافته است. گنبد، راهروها و بسیاری از ارکان سازه‌ای همچون قوس‌ها، قرنیزها و ستون‌ها، در طرح هندسی خود بی‌نظمی‌هایی را نشان می‌دهند که یادآور تحولات سازه‌ای بنا در طول تاریخ خود می‌باشد و نشانه‌های ارزشمندی از روند بازسازی بنا تا وضعیت فعلی محسوب می‌شوند.

پس از تجدید بنای کامل این کلیسا توسط ژوستینیان، مستندات و شواهد، توجه ما را به زمین‌لرزه‌های سال ۵۵۷

میلادی، به‌ویژه شدیدترین این زلزله‌ها که در ماه دسامبر رخ داد، معطوف می‌سازد. در آن واقعه ساختمان مذکور، به‌خصوص قسمت گنبد و بخش شرقی آن به‌شدت آسیب دید. سپس در ۷ مه سال بعد، بخشی از گنبد به‌همراه نیم‌گنبد و قوس شرقی فروریخت. برای تعمیر آن یکی از دو معماری که مسؤولیت پروژه‌ی اصلی ساخت این بنا را به عهده داشت و در آن زمان هنوز در قید حیات بود، فراخوانده شد. با وجود این‌که تنها در حدود یک‌سوم بخش غربی این بنا هنوز برجای مانده بود، گنبد آن بین سال‌های ۵۰۸ تا ۵۶۲ میلادی به‌طور کامل بازسازی گردید، ولی ارتفاع آن، حدود ۲۰فوت کم‌تر از گنبد قبلی درآمد (هر فوت رومی، تقریباً معادل با ۳۱ سانتی‌متر است). دومین آسیب جدی که در تاریخ ۲۶ دسامبر سال ۹۸۹ میلادی رخ داد، بخش غربی این بنا را به‌همراه قوس و یک‌چهارم طول محیط گنبد، یعنی دامنه‌ی تخریبی در حدود ۱۴۰درجه را دربرمی‌گرفت. بازسازی این قسمت‌ها در زمان حکومت امپراطور بازیل دوم[۱۸] صورت گرفت. بازسازی قسمت غربی شش‌سال به‌طول انجامید تا در حین عملیات بازسازی گنبد، بخش توسعه داده شده برای تحمل رانش داخلی وارده از طرف نیمه‌ی دیگر گنبد استحکام‌سازی گردد. به عبارت دیگر بازسازی این قسمت در حالی انجام شد که گنبد اصلی هنوز کامل نشده بود.

سومین آسیب و تخریبی که به‌دلیل وقوع زمین‌لرزه بود، در تاریخ ۱۹ مه ۱۳۴۶ میلادی رخ داد. این بار در حدود یک‌سوم بخش شرقی گنبد و قوس اصلی باربر آن آسیب دید. بازسازی این قسمت تا سال ۱۳۵۴ میلادی به‌طول انجامید، اما به دلیل کمبود بودجه کارهای صورت‌گرفته محدود و بی‌دقت انجام شد. به‌طوری‌که نشانه‌هایی از بی‌توجهی بر این بنا به‌جای مانده است. این دو مرحله‌ی آسیب و بازسازی آن‌ها از مهم‌ترین موضوعاتی است که تحت‌تأثیر شرایط لرزش رفتار خاصی از خود نشان می‌دهد.

هم‌اکنون در این گنبد، چهار خط انفصال در راستای ترک‌های گنبد مشخص است. این چهارخط بیان‌گر ناهمگون‌بودن بخش‌هایی است که طی دوره‌های مختلف ساخته شده‌اند (تصویر ٤ ـ الف). بخش‌های شمالی و جنوبی این بنا، دو قسمت از گنبد قرن ششم میلادی است. در قسمت‌های شرقی و غربی می‌توان به‌ترتیب بخش‌های بازسازی‌شده در قرن‌های دهم و چهاردهم میلادی را دید که البته این قسمت‌ها کم‌وبیش به‌لحاظ تقارن، با بازسازی اولیه، هم‌گونی و پیوستگی ندارند و فضای آن‌ها (که از نظر اندازه و شکل یکسان است) تقریباً دوبرابر قسمت‌هایی است که از قرن ششم به‌جا مانده‌اند. همچنین می‌توان خطوط و نقاط نامنظمی از ناپیوستگی را در انحنای گنبد، قوس‌ها و پاندانتیوها ببینیم. این ناپیوستگی درواقع نشان‌گر خطوط اتصال بخش‌های به‌جامانده از اسیب‌ها (که هم‌اکنون کاملاً تغییر شکل یافته‌اند) و قسمت‌های بازسازی‌شده هستند. بدیهی است که حفظ پیوستگی و یکنواختی خطوط اتصال بین این بخش‌ها غیرممکن است؛ چراکه لازمه‌ی آن تعمیر بخش‌های تغییریافته‌ی فعلی یا تغییر طرح هندسی بخش‌های بازسازی شده است (شکل ٤ـ ب).

مدل‌سازی ریاضی و تحلیل سازه‌ای

تحلیلی که با همکاری پروفسور آلبرتو ویسکوویچ[۱۹] و مهندس فدریکو کروچی[۲۰] انجام شده است، وضعیت کلی مجموعه‌ی ایاصوفیه و کلیه‌ی عوامل و عناصری را که می‌توانند در نمایش ساختار واقعی مجموعه اهمیت داشته باشند، در نظر گرفته است. در مطالعات و بررسی‌هایی که با استفاده از مدل‌سازی‌های جزئی صورت می‌گیرند، فراهم‌آوردن اطلاعات کافی و دقیق از طریق ایجاد یک شبکه‌بندی مفصل یا مش ضروری است.

برخی از عوامل فرعی نیز به‌طور قابل‌توجهی در وضعیت کلی سازه نقش دارند؛ به‌ویژه زمانی‌که بنا دچار ارتعاشات افقی و در نتیجه ایجاد تنش‌هایی بشود که بروز آسیب‌های سازه‌ای را به‌همراه دارند. تحلیل‌ها و تحقیقات مختلفی در این زمینه صورت گرفته و نتایج به‌دست آمده که بیان‌گر توزیع این تنش‌ها بر سازه هستند در تصاویر ۴ـ۹ گزارش شده است.

آنالیز تحت اثر بار مرده[۲۱]: آنالیز استاتیکی که تنها وزن بخش‌های مختلف بنا را در نظر می‌گیرد، نشان داده است این تنش‌ها به‌مقدار کم باقی می‌مانند (تصویر ۵). همچنین تحقیقات بیش‌تر در مورد این گنبد بااستفاده از مدلی ویژه و با بهره‌گیری از المان‌های سه‌بعدی آجر انجام شد. با فرض آن‌که در پای گنبد، المان‌ها ثابت شده باشند (به عبارت دیگر با این فرض که سازه‌ی باربر از استحکام کافی برخوردار باشد)، برای مدل‌سازی گنبد، حدوداً بخشی متشکل از یک‌چهارم کل المان‌ها در نظر گرفته شده است. آنالیز استاتیکی نشان می‌دهد در گنبد، نقاط بحرانی وجود ندارد. تنها در قسمت‌هایی که کاملاً تحت‌فشار هستند، تنش‌های محدودی به‌میزان ۱۰۰ -۲۵۰ kN/m^2 در پایه‌ی تویزه‌ها وجود داشت (تغییر مکان رأس گنبد تنها به میزان ۳/۵mm بوده است).

آنالیز الاستیکی لرزه‌ای[۲۲]: آنالیز مدال[۲۳] در ارتباط با الگوی کلی ساختمان نشان می‌دهد که اساساً رفتار بنا در دو طرف محور اصلی متقارن است. همین مسأله متعاقباً استفاده از مدلی برای نصف این بنا را در بررسی‌های غیرخطی موجه و امکان‌پذیر می‌سازد. در این مدل، شبیه‌سازی زلزله از طریق به‌کارگیری طیف رنگی صورت می‌گیرد که در آن شتاب، مستقل از دوره‌ی تناوب به‌میزان ۰/۳g (۰/۱۵g در سطح زمین با ضریب تقویت[۲۴] برای مصالح بنایی) اندازه‌گیری شده است.

به این ترتیب دو ارتعاش اول، به‌ترتیب یکی در راستای نیم‌گنبدها (طولی=جهتY) و دیگری در راستای جرزهای حائل (عرضی= جهتX)، بالاترین مقادیر اندازگیری شده در این نمونه هستند (تصویر ۶). همچنین ارتعاش ششم که بخش بالای گنبد را در جهت طولی تحت‌تأثیر قرار می‌دهد، از همین نوع است. بررسی ارتعاشات با ادغام دو عامل وزن ساختمان و مد ارتعاش، به شیوه‌های مختلف نشان می‌دهد که ساختمان در مواجهه با این عوامل چگونه به نقطه‌ی بحرانی می‌رسد و درعین‌حال بر نقش مهم عوامل ثانوی در جبهه‌ی کلیسا تأکید می‌نماید (تصویر ۷). این تأثیر زمانی‌که زلزله در جهت طولی عمل می‌کند، انچنان مهم است که فروریختن این جبهه، می‌تواند موجب فروریختن کل بنا شود.

آنالیز لرزه‌ای غیرخطی مرحله‌به‌مرحله[۲۵]: در بررسی غیرخطی مرحله‌ای، تأثیر زمین‌لرزه به‌وسیله‌ی نیروهای استاتیکی معادل آن سنجیده می‌شود که شتاب این نیروها در هر مرحله ۰/۱g افزایش می‌یابد تا به ۰/۵g برسد. اولین مرحله باتوجه به وزن بنا برای نیروهای عمودی استفاده می‌شود. این بررسی با مدل‌سازی رفتارِ کششی

و تغییرپذیری سازه به تشخیص نواحی تحت کشش که در آن‌ها امکان ترک‌خوردگی المان‌های سازه‌ای وجود داشته باشد، کمک می‌کند. لذا می‌توان این وضعیت را با شرایط واقعی و به‌ویژه حوادثی که در قرن دهم و چهاردهم رخ داده است مقایسه و انطباق داد. در تصویر ۸ ـ الف نتایج به دست آمده از عملکرد زلزله در جهت طولی Y (در راستای نیم‌گنبدها) قابل ملاحظه است.

توالی نیروهای در حال افزایش گویای این واقعیت است که فروریختن طاق، تنها بعد از خراب‌شدن جبهه‌ی کلیسا اتفاق می‌افتد. همان‌طور که پیش از این اشاره شد، این جبهه به‌عنوان عاملی پشتیبان عمل می‌کند. البته باید تأکید کرد که صدمات وارده به ساختمان و نیز تغییرشکل‌هایی که از طریق مدل‌سازی ریاضی به‌دست آمده، به‌هیچ وجه قابل مقایسه با وضعیت موجود و یا شکل آسیب‌هایی که در قرن‌های دهم و چهاردهم حادث شده است، نمی‌باشد. اما در عین حال هنگامی‌که با استفاده از این الگوها رفتار سازه‌ای بنا را تحت‌تأثیر زمین‌لرزه‌ای که در جهت عرضی x عمل می‌کند بررسی‌کنیم، به ارتباط و تشابهی درست و منطقی میان تئوری و واقعیت دست می‌یابیم (تصویر ۸ ـ ب). در این حالت تمرکز تنش، در پاندانتیوها و قوس‌های باربر گنبد که به‌دلیل نبود جبهه‌ی سردر، دیگر مستحکم نیستند، ایجاد می‌شود و لذا این گنبد را دست‌خوش تغییرشکل‌های شدید می‌کند. همان‌گونه که در تصویر ۹ مدل دقیق آن نشان داده شده، این تغییرات ممکن است باعث سست‌شدن یا حتی انحراف سنگ کلید قوس بشود و در نتیجه منجر به فروریختن آن گردد. گفتنی است آسیب‌های قابل‌مشاهده، در مدلی که رفتارِ سازه‌ای گنبد را در حین زلزله و در جهت نیم‌گنبدها شبیه‌سازی می‌کند، شرایط واقعی فروریزش این بنا را در قرون دهم و چهاردهم نشان می‌دهد.

نتایج

در ادامه‌ی بحث روش مرحله‌به‌مرحله، تحقیقات انجام‌شده در مورد زمین‌لرزه، نقش مهم تغییرشکل‌پذیربودن ستون‌ها و قوس‌های اصلی را نشان می‌دهد و نیز مشخص می‌کند که رفتار بنا بر حسب راستای نیروهای زلزله متفاوت خواهد بود. بسته به جهت و درجات متفاوت شتاب امکان دارد انواع مختلفی از ترک‌خوردگی‌ها ایجاد شوند یا نحوه‌ی فروریختن بخش‌هایی از بنا با بقیه‌ی قسمت‌ها متفاوت باشد. به کمک الگوی نظری، نشان داده شد که آسیب‌های ایجادشده در اثر زمین‌لرزه‌ای در راستای طولی (یعنی موازی با جبهه اصلی کلیسا)، با ترک‌هایی که فروریختن قسمت‌های زیادی از بنا در قرون دهم و چهاردهم را به‌همراه داشته است، مطابقت ندارند. در عوض، تأثیرات زمین‌لرزه در راستای عرضی، از لحاظ تئوریک می‌توانند باعث ایجاد آسیب‌هایی شوند که بسیار مشابه با وضعیت کنونی و قابل‌تطبیق با سوابق تاریخی بنا می‌باشند.

جرزهای موجود که به‌دلیل وجود پلکان‌ها و راهروهای منتهی به رواق‌ها به‌شدت دچار تغییرشکل و خردشدگی شده‌اند، در مقایسه با استحکام نیم‌گنبدها و جبهه‌ی کلیسا به موازات راستای طولی، استحکام کافی از خود نشان نمی‌دهند.

رفتار بنا در راستای عرضی (در جهت جرزها)، به‌علت ضعف احتمالی قوس‌های عرضی، به مراتب بیش‌تر است و حتی احتمال جداشدن قوس‌ها و گنبد نیز وجود دارد. به‌طوری‌که احتمال دارد نیروهای طولی یک زمین‌لرزه باعث ایجاد اثر ضربه بشود (همان‌طور که پروفسور مصطفی اردیک[۲] نیز پیش‌تر به این مطلب اشاره کرده است). این امر اگر چه یک عامل اساسی به‌شمار نمی‌رود اما می‌توان آن‌را به‌عنوان یک عامل ثانویه در نظر گرفت که به‌علت ضخامت کم نیم‌گنبد، در مقایسه با قوس‌های عرضی ایجاد می‌شود. احتمالاً به‌همین علت این ضربات به خود نیم‌گنبد آسیب‌های جدی وارد کرده، حال آنکه به خود قوس، فقط در قسمت سنگ کلید آسیب‌های موضعی وارد شده است. به هر حال گسستگی و عدم ارتباط بین قوس‌های عرضی و نیم‌گنبدهای مربوط به آن‌ها باعث می‌شود که قوس‌های مزبور بیش‌تر در امتداد سطح صافشان مستعد تغییرشکل باشند. نیم‌گنبدها به دلیل فرم دوگانه در مقایسه با قوس‌ها استحکام بیش‌تری دارند در نتیجه بنا در مقابل نیروهای عرضی زلزله ضعیف‌تر عمل می‌کند.

در نهایت این‌که اگر در مورد مشخصات مصالح اولیه، مانند خصوصیات خاک و پی یا فرآیندی که طی آن تغییرشکل‌های دائمی و سست‌شدن مصالح اتفاق افتاده است اطلاع نداشته باشیم، به‌طور قطع نمی‌توانیم بگوییم این‌گونه الگوهای ریاضی وضعیت پیچیده‌ی بنا را به‌طور کامل نشان می‌دهند. با این الگوها حتی در مورد فشارها و نیروهای پس‌مانده در اثر آسیب‌ها و تغییرشکل‌هایی که در گذشته حادث شده‌اند نیز نمی‌توان توضیح قطعی ارائه داد. با تمام این تفاسیر نتایج این تحقیقات، مشاهدات و آنالیزهای سازه‌ای، شرحی موثق و قابل‌اعتماد از رفتار لرزه‌ای سازه و نیز خطراتی که بنا را در شرایط فعلی تهدید می‌کند، ارائه داده است.

با در نظر گرفتن واقعیاتی همچون تغییرشکل‌های دائمی ساختمان، دگرگونی و ازبین‌رفتن انحنای گنبد، پیوسته‌نبودن

بخش‌های اصلی و قسمت‌های بازسازی شده‌ی آن، وضعیت بنا وخیم‌تر شده است؛ به‌طوری‌که می‌توان گفت در مقایسه با نتایج به‌دست آمده از آنالیزهای سازه‌ای، بنا شرایط خطرناک‌تری دارد و سازه بسیار ضعیف‌تر عمل خواهد کرد.

مرمت باسیلیکای سن‌فرانچسکو در آسیبی تاریخچه‌ی آسیب‌های وارده و ریزش آن

باسیلیکای سن‌فرانچسکو در قرن سیزدهم ساخته شده و در طول تاریخ بارها در معرض زلزله قرار گرفته است. زلزله‌های مهمی در سال‌های ۱۲۷۹، ۱۳۲۸، ۱۷۰۳، ۱۷۴۷، ۱۷۸۱، ۱۷۹۹، ۱۸۳۲، ۱۸۵۹، ۱۹۱۷ و ۱۹۷۹ میلادی اتفاق افتادند، اما هیچ‌یک از آن‌ها به اندازه‌ی دو زلزله صدمات و آسیب‌های عمده وارد نکردند. یکی از این دو زلزله در شب ۲۶ دسامبر سال ۱۹۹۷ میلادی در قسمت‌های مرکزی ایتالیا رخ داد و دیگری که در ظهر روز بعد باسیلیکا را لرزاند، باعث تخریب طاق‌های نزدیک به سردر باسیلیکا (جبهه‌ی مقابل) و طاق‌های نزدیک به ترانسپت سمت چپ شد. همچنین ترک‌های عمیق و تغییرشکل‌هایی دائمی در کل طاق‌های باسیلیکا ایجاد کرد که این بخش‌ها را در وضعیت ناپایدار و خطرناکی قرار داد.

علاوه‌بر این زمین‌لرزه‌ها که طی قرن‌ها یکی پس از دیگری اثرات متفاوتی بر باسیلیکا داشته‌اند، عوامل دیگری نیز در آسیب‌پذیری بیش‌تر این بنا اثرگذار بوده‌اند. قطعاً یکی از این عوامل، حجم زیاد آوارهایی بود که طی قرن‌های متوالی هنگام تعمیرات در پاکار طاق‌ها انباشته شده بودند. بیش‌تر این آوارها، شامل کاشی‌های شکسته و مصالح دیگری می‌شدند که در اثر حرکات ارتعاشی زلزله، از یک سوی به دلیل جدایی از سازه، بدون هیچ‌گونه پیوستگی عمل می‌نمودند، و از سوی دیگر همزمان با ارتعاشات و حرکات طاق‌ها در وخیم‌نمودن وضعیت طاق‌ها تأثیر داشتند. به همین جهت باعث تغییرشکل‌های دائمی در این طاق‌ها شدند. به احتمال زیاد هنگامی‌که زلزله‌ی ۲۶ دسامبر بنای باسیلیکا را لرزاند، این تغییرشکل‌ها از انحنای قوس‌ها کاست و در نتیجه ظرفیت باربری تکیه‌گاه کاهش پیدا کرد. البته این مسأله در جریان زمین‌لرزه‌های قبلی آغاز شده بود و در زلزله‌ی مزبور ادامه یافت.

چگونگی تخریب طاق‌های نزدیک جبهه‌ی مقابل باسیلیکا که تلویزیون اومبریا[۲۷] از آن فیلم‌برداری کرده بود، نشان می‌دهد که طی روندی فعال، ابتدا انحنای تویزه‌ها کم و سپس شکستگی در وسط آن‌ها رخ داده و در نهایت نیز به‌موجب این ترک‌ها، طاق فروریخته است.

مشابه این اتفاق در ناحیه‌ای نزدیک ترانسپت باسیلیکا نیز حادث شد و متعاقباً طاق دوم نیز فروریخت. باتوجه به عمودبودن جهت ارتعاشات زلزله، نسبت به نف باسیلیکا، سیستم طاق‌ها، روی هم رفته، شبیه تیری که جبهه‌ی اصلی و ترانسپت باسیلیکا در دو انتهایش، ایجاد صلبیت کرده

پیشگیرانه‌ای لازم بود تا از فروریختن کامل نمای سردر و طاق‌ها جلوگیری کند. روی طاق‌های به‌جای‌مانده، ترک‌های بزرگی هم در زیر، هم در بیرون قوس پدیدار شده بود (تصویر ۱۰). انحنای قوس همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد، در برخی قسمت‌ها از بین رفته بود. خطر فروریختن احتمالی طاق‌ها و متعاقباً خطرات جانی، امکان پایدارسازی و استحکام‌بخشی طاق‌ها را از زیر غیرممکن می‌ساخت. بنابراین سطحی از سقفی که در بالای طاق‌ها قرار دارد، آویزان شد؛ تا از این طریق هم بررسی‌ها و هم انجام عملیات مرمتی این طاق‌ها امکان‌پذیر باشد (تصویر ۱۱).

اقدامات فوری که در ماه اول پس از زلزله‌ی اصلی انجام شد عبارت بودند از: بیرون‌آوردن حجم سنگین آوارهایی که در پاکار طاق‌ها انباشته شده بود؛ پرکردن ترک‌ها با ملات عاری از نمک؛ استفاده از نوارهایی با الیاف مصنوعی بر روی ترک‌های ایجادشده در قسمت‌های خارجی قوس‌ها (تصویر ۱۲)؛ آویزان‌نمودن طاق‌ها از سقف به کمک میلگردهای اتصالی؛ نصب دو فنر برای برقرارساختن تعادل بین نیروها، به‌نحوی که مستقل از اثرات حرارتی و ارتعاشات خفیف باشد (تصویر ۱۳).

مدل‌های ریاضی

مدل‌های ریاضی مختلفی برای درک رفتار سازه‌ای بنا، تحت‌تأثیر ارتعاشات زمین‌لرزه‌ی عمود بر محورهای باسیلیکا (که بدترین حالت ممکن بود) تهیه شد. این مدل‌ها در زیر توضیح داده شده‌اند:

مدل عمومی باسیلیکا: این الگو نشان می‌دهد که طاق‌های جبهه‌ی مقابل و ترانسپت باسیلیکا (تصویر ۱۴) نه‌تنها متأثر از حضور آوارها هستند، بلکه فشار اضافی ناشی از ممانعت جبهه‌ی سردر و ترانسپت را نیز متحمل می‌شوند.

باشد، عمل نمود. در نتیجه تخریب‌ها عمدتاً در این دو منطقه‌ی خاص اتفاق افتاد و منجربه فروریختن آن‌ها شد. در ادامه به‌صورت واضح، به این رفتار در مدل ریاضی کل بنا اشاره خواهد شد.

اقدامات ضروری

بلافاصله پس از وقوع زمین‌لرزه، ابتدا راهکارهای

مدل قسمت مرکزی نف باسیلیکا با درنظرداشتن حضور آوارها (شرایط پیش از سپتامبر ۱۹۹۷ میلادی): این الگو به وضوح نشان می‌دهد که تحت‌تأثیر بارهای استاتیکی، تنش‌های کششی بالایی در تویزه‌ها ایجاد می‌شوند. حتی در شرایط پایدار نیز خمیدگی تحت‌بار مرده کاهش می‌یابد و باوجود نیروهای افقی به‌میزان ۰/۳g – ۰/۲۵g احتمال فروریزش طاق‌ها وجود دارد (تصویر ۱۵-الف).

مدل قسمت مرکزی نف باسیلیکا بدون در نظر داشتن حضور آوارها: این بررسی نشان می‌دهد که پس از خارج‌کردن آوارها فشارهای وارده به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابند. آنالیز مرحله‌ای با درنظرگرفتن نیروهای افقی هم‌ارز چنین نشان می‌دهد که وقتی ارتعاشات افقی وارد بر طاق‌ها به حدود ۰/٤g می‌رسد، (این میزان با حضور آوار به ۰/۱۸g می‌رسد) در طاق تغییرشکل زیادی ایجاد می‌شود و فروریختن آن بین ۰/۷g – ۰/٦g (در مقایسه با میزان ۰/۳g– ۰/۲۵g با وجود آوار) اتفاق می‌افتد (تصویر ۱۵-ب).

مدل طاق استحکام‌بخشی شده: آنالیز مرحله‌ای چنین نشان می‌دهد که تحت شرایطی که تویزه‌های متصل به قوس‌های خارجی طاق‌ها تقویت و تحکیم گردند، تغییرشکل طاق تا اندازه‌ی زیادی کاهش و رفتار سازه‌ای طاق از نظر ایستایی تا حد زیادی بهبود می‌یابد. وقتی نیروی استاتیکی معادل ۱/۲g می‌شود، تنش قسمت‌های استحکام‌بخشی‌شده به نصف تقلیل می‌یابد. نمودار مربوط در تصویر ١٦ بیان‌گر موقعیت قسمت‌های ذکر شده است.

استحکام‌بخشی طاق‌ها

پس از انجام آزمایش‌های فراوان چنین نتیجه گرفته شد که باید برای تقویت طاق‌ها از مصالح مرکب[۲۸] استفاده شود. برای این منظور با الهام از ساختارهای معماری سبک گوتیک، شبکه‌ای از تویزه‌های کم‌عرض، بر روی قوس‌های خارجی طاق‌ها ایجاد شد، به گونه‌ای که ساختار اصلی همچنان نمایان باشد (تصویر ۱۷). این تویزه‌ها در محل ساخته شد تا به‌این‌ترتیب امکان هماهنگ‌کردن آن‌ها با طاق‌های تغییرشکل‌یافته میسر باشد. لذا در حالی‌که عرض این تویزه‌ها ثابت است، ارتفاع آن‌ها می‌تواند به تناسب تغییرشکل‌ها تغییر کند (تصویر ۱۸). این تویزه‌ها از رشته‌های آرامید[۲۹] بر بستری از یک لایه‌ی رزین اپوکسی به دور تیر مرکزی ساخته شدند. این رشته‌ها سبک اما بسیار محکم می‌باشند، ولی سختی[۳۰] آن‌ها کم‌تر از فولاد است (مقاومت کششی[۳۱] این رشته‌ها ۳۰/۰۰۰ kg/cm² و مقاومت کششی رشته‌های رزین در حدود ۱٤/۰۰۰ kg/cm² اندازه‌گیری می‌شود). همچنین ضریب الاستیسیته این رشته‌ها به مقدار ۱/۲۰۰/۰۰۰ kg/cm² و در مقایسه با ضریب الاستیسیته رشته‌های رزینی که ٦۰۰/۰۰۰ kg/cm² می‌باشد، بیش‌تر است.

تویزه‌های مذکور به کمک اتصال با مجموعه‌ی مفتول مهاربندی، شامل یک دستگاه فنر، محکم به سقف بسته شدند. این روش مشابه راه‌حلی است که در عملیات فوری مرمتی به‌کار گرفته شد (تصویر ۱۹) و به‌منظور کاهش تغییرشکل بنا تحت‌تأثیر نیروهای ارتعاشی زلزله صورت گرفت. در نهایت تحکیم و تقویت طاق‌های ترک‌خورده، از طریق تزریق نوعی ملات بدون نمک کامل شد. این ملات به اندازه‌ی کافی سیال در نظر گرفته شد تا بتواند در همه‌ی ترک‌ها و خرده‌ترک‌ها نفوذ کند. به‌منظور سازگاری بیش‌تر با نقاشی‌های دیواری[۳۲] نیز این قابلیت را داشت که به‌صورت خشک و بدون استفاده از آب تزریق شود

تا با داشتن مقاومت بالا علی‌رغم وجود ترک در سازه، پیوستگی و اتصال مناسب سازه‌ای تأمین گردد.

تصمیمی که درخصوص دیوارهای جانبی تف باسیلیکا گرفته شد این بود که مقاومت و استحکام آن‌ها ارتقا داده شود. از طرفی نقاشی‌های روی این دیوارها در اثر حرکات سازه‌ای ناشی از زمین‌لرزه‌ها، مکرراً متحمل صدمات و ترک‌خوردگی‌های گوناگون شده بود. بنابراین به‌منظور کاهش اثر این مشکل تیر خرپای افقی فولادی، در بالای قرنیز دیوار داخلی باسیلیکا (درست در زیر پنجره‌ها با شیشه‌بندی‌ها[۳۱]) کار گذاشته شد تا به این طریق دیوارهای فرسوده با نگاره‌هایی از جوتو[۳۲] مرمت شوند. این تیر که دورتادور محیط نصب می‌گردید، به وسیله‌ی ابزار خاصی با خاصیت ویسکوزیته به دیوارها مرتبط می‌شد. این ابزار تحت تغییرات حرارتی قادر به تغییر مکان‌های نسبی جزئی[۳۳] ولی تحت تأثیر نیروهای دینامیکی کاملاً سخت می‌شود. با این اوصاف درصورت وقوع زلزله، می‌تواند بسیار مقاوم و مستحکم باشد و ضربه را منتقل نماید (تصویر ۲۰)[۳۴].

بازسازی طاق‌های فروریخته نیز با استفاده از آجرهای جدیدی که از نظر استحکام و مشخصات مشابه با آجرهای اصلی بودند، انجام شد. علاوه‌بر این

4- Basilica of San Francesco or St. Francis in Assisi

5- Octagonal hall of "Domus Aurea" (Latin for "Golden House")

6- Nero (Roman emperor)

7- Pantheon

8- Brunelleschi

9- Santa Maria del Fiore or St. Mary of Flower

10- Adriano

11- Rotunda

12- Giustiniano

13- Michelangelo

14- Pope Benedetto XIV

15- Constantine

16- Bosporus

17- Justinian

18- Emperor Basil II

19- Alberto Viskovic

20- Federico Croci

21- Analysis under the Effect of the Dead Load

22- Seismic Elastic Analysis

23- Modal Analysis

24- Aamplification Coefficient

25- Step by Step non-Linear Seismic Analysis

26- Mustafa Erdik

27- Umbria TV

28- Composite Materials

29- Aramid (Aromatic Polyamide)

30- Tensile Strength

31- Stiffness

32- Fresco

33- Stain glass

34- Giotto

35- Relative Displacements

36- Shock Transmitter

تصویر ۲۰: تیر خرپای فولادی قرار گرفته بر بالای قرنیز داخل باسیلیکا

در بازسازی این طاق‌ها، از جک‌هایی استفاده شد که یکنواختی و پیوستگی دوباره را نه‌تنها به لحاظ سازه‌ای برقرار می‌ساخت، بلکه باعث می‌شد میان بخش‌های جدید و قسمت‌های باقی‌مانده‌ی اولیه نیز جریان فشار برقرار باقی بماند.

منبع

- کروچی، جورجو (۳۰۸ سپتامبر ۲۰۰۶). "رفتار لرزه ای طاق‌ها و گنبدها با مصالح بنایی-باصوفیه در استانبول و سن فرانچسکو در آسیسی". اولین همایش مهندسی زلزله و لرزه شناسی در اروپا ستاد مشترک سیزدهمین کنگره ECEES و سی‌امین مجمع عمومی ESC، شماره مقاله: آدرس راهنما ۶۸ سوئیس، زنو.

Croci, Giorgio. "Seismic Behavior of masonry domes and vaults-Hagia Sophia in Islanbul and St. Frances in Assisi". ECEES, 2006, Swiss Confederation.

پی‌نوشت

۱- استاد مرمت سازه بناهای یادمانی و ساختمان‌های تاریخی دانشگاه رم سپینزا و رییس اسبق کمیته‌ی بین‌المللی انکوموس

۲ دانشجوی کارشناسی‌ارشد مرمت و احیای بناها و بافت‌های تاریخی، دانشکده‌ی مرمت دانشگاه هنر اصفهان، پست الکترونیکی: radahmadi@gmail.com

۳- عضو هیأت‌علمی و استادیار دانشکده‌ی مرمت دانشگاه هنر اصفهان، پست الکترونیکی: r.aboueii@aui.ac.ir