نگاهی به مرمت گنبد در ایران

علی زمانی فرد
با راهنمایی و زیرنظر:
دکتر مهرداد حجازی
دکتر اکبر حاج ابراهیم زرگر

۱- آسیب شناسی گنبدها

۱-۱ بررسی رفتار سازه‌های پوسته‌ای

از ابتدایی‌ترین فرم ساختمانی (قاب متشکل از تیر و ستون) تمام سعی بشر رسیدن به فرم ساختمانی ایده‌الی بوده است، که ضمن جوابگویی به نیاز روز، همگام با فضاها قابل توسعه و گسترش باشد. ضعف موجود در مصالح بنایی[۱] این تلاش را با شکست مواجه می‌کرد و با افزایش دهانهٔ فضاها تنش‌های به وجود آمده[۲] سازه را دچار بحران می‌کرد.

دستیابی به چوب به عنوان مصالح مقاوم در برابر کشش تا حدی می‌توانست مشکل را بر طرف کند، اما کمبود چوب و آسیب پذیری آن از عوامل دیگری چون رطوبت و موریانه این بار مشکل را دو چندان می‌کرد، بنابراین تغییر فرم و رسیدن به فرمهای جدید سازه‌ای به نظر راه حل دیگری بود که معماران قدیمی برای رسیدن به سازه پایدار اندیشیدند. فرم جدید می‌بایست علاوه بر پوشش دهانه‌های بزرگ‌تر خمش و کشش پدید آمده در سازه را به حداقل برساند که ابداع قوس‌ها حاصل این تفکر بود. (تصویر ۱)

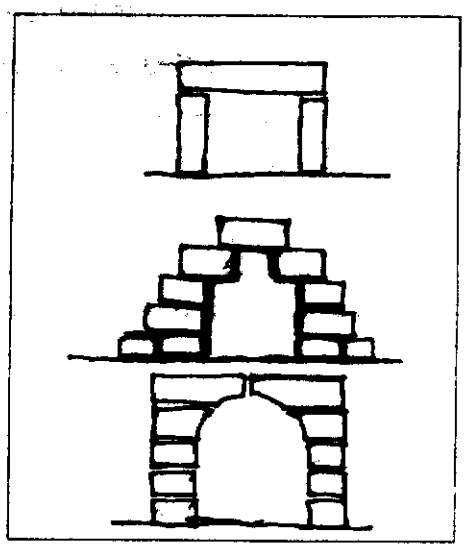
پوشش‌های قوسی شکل دارای سابقه قدیمی بوده، نخستین قوس به جا مانده در معماری ایران مربوط به ورودی‌های زیگورات چغازنبیل است، این فرم‌های قوسی شکل بعدها در معماری ایران به دو شکل طاق و گنبد ظهور و تکامل پیدا می‌کنند.

۱-۱-۱- رفتار سازه‌ای طاق‌ها

طاق‌ها چنانچه تحت بار عمودی یا افقی قرار گیرند نیروها را در امتداد قوس به پا طاق و در نتیجه به پایه‌ها منتقل می‌کنند و چنانچه قوس‌ها تحت تأثیر نیرویی عمود بر میانه‌های آن وارد گردد، بهترین شکل را برای انتقال نیروهای عمودی دارند و می‌توان با انتخاب منحنی مورد نظر دهانه مورد لزوم را با استفاده از مصالح ساده‌ای اجرا نمود. در طاق‌ها چنانچه پا طاق‌ها از حالت تعادل و ایستای خود خارج نشوند هر قسمت و یا هر واحد عرض طاق به

۱- مصالحی چون سنگ، خشت و آجر علیرغم مقاومت خوبی که در مقابل فشار دارند دارای مقاومت کششی کمی می باشند.

۲- خمش ایجاد شده در میانه عضو باربر، باعث بروز تنش‌های فشاری و کششی در محل تکیه گاه‌ها می‌شود



۱) تغییر شکل پوششهای تخت به منحنی

صورت جزء مستقل عمل نموده و به بقیه قسمت‌های طاق بستگی نداشته و عملاً به صورت یک تیر مستقل عمل می‌نمایند [۳] (تصویر ۲)

۱-۱-۲- رفتار سازه‌ای گنبدها

گنبد را می‌توان حالت تعمیم یافته‌ای از قوس‌ها در نظر گرفت، در

این سازه بار وارده بیشتر از طریق نیروهای غشایی (نیروهایی در صفحه) منتقل می‌شود و لنگر خمشی معمولاً بسیار محدود است. این امر سبب می‌شود که ضخامت گنبد برای انتقال بار بسیار کمتر از تیرهای مستقیم باشد.[۴] (تصویر ۳) مزیت دیگر پوسته آن است که معمولاً تحت بارهای وارده تنش‌ها در قسمت اعظم سازه از یک نوع است (فشاری یا کششی)، این امر به خصوص از آن نظر حائز اهمیت است که می‌توان از مصالح بنایی که قابلیت حمل کشش را ندارند به خوبی استفاده نمود.

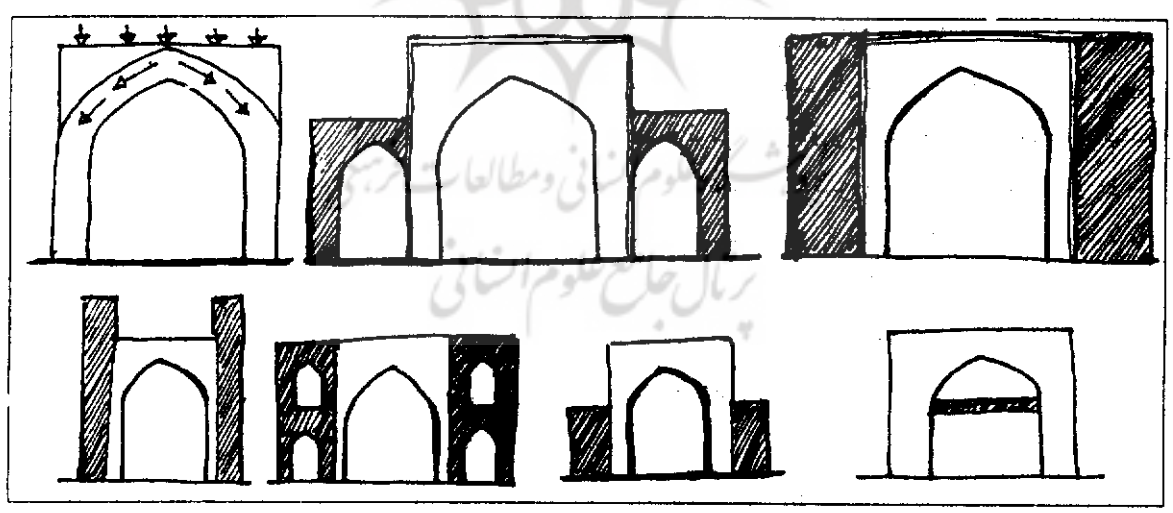
۱-۱-۲-۱- رفتار غشایی در گنبد[۵]

رفتار سازه‌ای گنبد تحت بار وزن که در تمام مرز خود دارای تکیه گاه است، متأثر از خصوصیات هندسی گنبد است. در این نوع

۳-سعیدی، علی اکبر، بررسی اجمالی درباره سازه‌های گنبد در ایران مورد گنبد مدرسه و مسجد سپهسالار تهران، مجموعه مقالات اولین کنگره تاریخ معماری و شهرسازی ایران، ارگ بم ـ کرمان، سازمان میراث فرهنگی کشور، تهران، ۱۳۷۴، ج ۲، ص ۴۰۷.

۴-تخم مرغ نمونه‌ای از پوسته‌های طبیعی است که نسبت طول به ضخامت آن حدود ۱۰۰ می‌باشد ولی دارای ظرفیت باربری قابل ملاحظه‌ای است.

۵-این مبحث خلاصه و برداشتی از: سالوادوری، ماریو، سازه در معماری، ترجمه محمود گلابچی، دانشگاه تهران، تهران، ۱۳۷۴، صص ۲۶۳-۲۵۴.

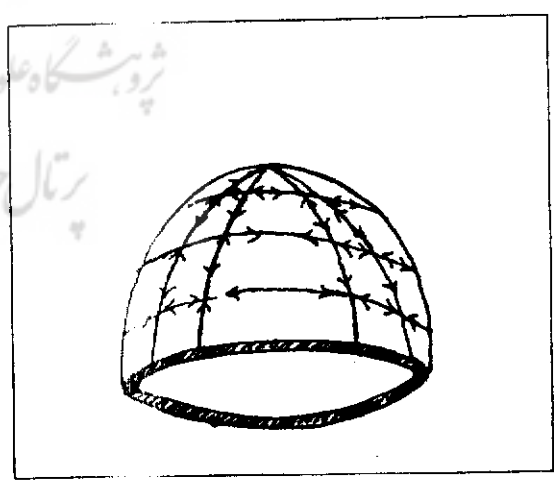


۲) نحوهٔ عمل طاقها در مقابله با نیروهای کششی و بعضی از ترفندها در جلوگیری از رانش پایه‌ها دیده می‌شود

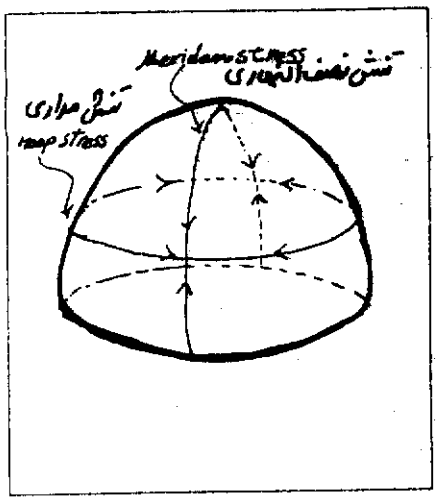
پوسته‌ها که نسبت به محورشان قرینه هستند، مقاطع نصف النهاری و مقاطع مداری آن در واقع مقاطع اصلی برای تنش‌های اصلی می‌باشند، تنش‌ها در این مقاطع تنش‌های ساده کششی یا فشاری هستند که در ضخامت نسبتاً کم پوسته به طور یکنواخت توزیع می‌شوند.

با توجه به شکل ۴ تنش‌هایی که روی مقاطع‌های گنبد به صورت قرینه توزیع می‌شوند در مسیر نصف النهارها تنش‌های فشاری هستند و در طول مدار به طور ثابت اثر می‌کنند زیرا پوسته و بارها نسبت به محور قرینه می‌باشند. هر نصف النهار به شکل یک قوس طنابی برای نیروهای وارده عمل می‌کند و به عبارت ساده‌تر بارها را بدون تنش خمشی تحمل می‌کند.

قوس‌ها صرفاً برای یک سری از بارها به صورت طنابی عمل می‌کنند، در عوض نصف النهارهای یک گنبد برای هر گروه از بارهای متقارن به صورت طنابی عمل می‌نمایند. این اختلاف در رفتار سازه‌ای نتیجه این اصل است که قوس‌های منفرد تکیه گاه جانبی ندارند، در عوض نصف النهارهای گنبد توسط مدارها نگه داشته می‌شوند و با ایجاد تنش‌های حلقوی از جابجایی آنها جلوگیری می‌کنند. رفتار طنابی گنبد تحت اثر هر نوع بار گذاری قرینه باعث می‌شود که گنبد جهت تحمل این بارها تغییر شکل ندهد. در نتیجه سازهٔ استواری برای تحمل این بارها به شمار



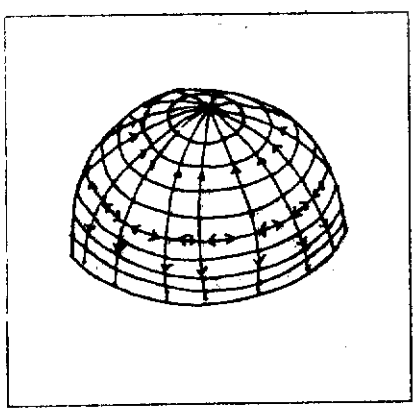
۳) ضخامت گنبدها در مقایسه با پوسته‌ها کم است و بار وارده از طریق نیروهای غشایی منتقل می‌شود.



۴) انواع تنش‌های غشایی در روی گنبد

می‌رود. (تصویر ۵)

تأثیر مدارها در رفتار طنابی گنبد با توجه به تغییر شکل نصف النهارها تحت اثر نیروهای وارده مشخص می‌گردد. در یک گنبد با خیز کم نصف النهارها به علت بروز فشار کوتاه می‌شوند و تحت اثر بارها حرکت کرده به سمت محور گنبد یعنی به داخل متمایل می‌گردند. به عبارت دیگر می‌توان عملکرد یک گنبد قرینه با خیز کم تنش‌های فشاری هم در جهت صف النهارها و هم در جهت مدارها ایجاد می‌شوند، در این حالت می‌توان این قبیل سازه‌ها را از موادی که قابلیت تحمل تنشهای کششی را ندارند مثل آجر و یا مصالح بنایی دیگر ساخت.



۵) رفتار طنابی در گنبد

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

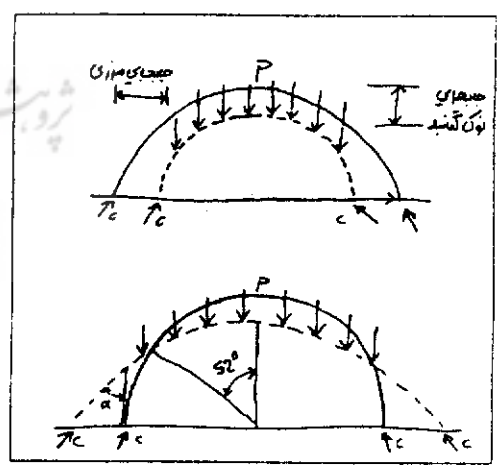
وقتی که گنبد خیز زیادی دارد قسمت بالایی آن مسطح و قسمت پایینی آن باز می‌گردد. نقاطی که در بخش بالایی قرار دارند تحت اثر بارها به سمت داخل حرکت می‌کنند، اما نقاط پایینی به سمت خارج و دور از محور حرکت می‌نمایند. مدارهای قسمت بالایی گنبد کوتاه می‌شوند، در حالی که مدارها در قسمت پایینی گنبد طویل‌تر شده، تنش‌های کششی در آنها ایجاد می‌گردد و به این ترتیب مجدداً حرکت نصف النهارها را محدود می‌کنند. بسته به نوع بار گذاری طول یک مدار خاص ثابت باقی می‌ماند، در حالی که در مدارهایی که در بالای آن قرار دارند تنش فشاری ایجاد می‌شود و در مدارهایی که در پایین قرار دارند تنش کششی پدید می‌آید. در یک گنبد تحت اثر بار مرده، مداری با زاویه ۵۲ درجه با محور اصلی تغییر طول نمی‌دهند، در یک گنبد توزیع شده است. مدار بدون تنش در زاویه ۴۵ درجه نسبت به محور اصلی قرار دارد. (تصویر ۶)

در گنبدها علاوه بر فشار ایجاد شده، اگر تنش‌های مستقیم در طول مدارها و نصف النهارها نتواند کل بار را تحمل کنند، مکانیزم سومی برای ایجاد تعادل وجود دارد که مکانیزم برشی است. در صورتی که تنش‌ها از حد مجاز فراتر نروند، تنش‌های مستقیم (فشاری و کششی) از یک طرف و برش دیگر (بدون ایجاد تغییر شکلی در گنبد) همواره در تحمل کل بار و ایجاد تعادل در یک گنبد شرکت می‌کنند. با در نظر گرفتن مکانیزم برشی، می‌توان تحت هر بار گذاری گنبد را سازه طنابی به شمار آورد و بنابراین گنبد عملاً در هر موقعیتی یک سازهٔ ناپایدار است. برای مثال گنبد بارهای جانبی مانند فشار و مکش باد را با ایجاد هر سه نوع تنش غشایی تحمل می‌کند. (تصویر ۷ و ۸)

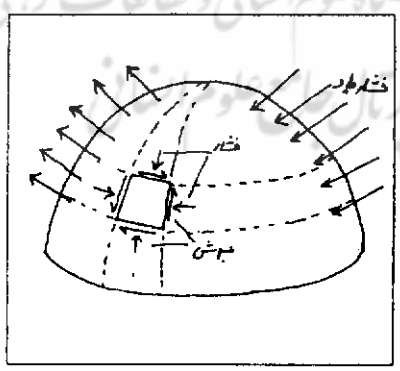
۱-۱-۲-۳- تنش‌های خمشی در گنبدها

همانگونه که گفته شد بخش اعظم تنش‌هایی که در پوسته‌ها به وجود می‌آیند، غشایی (تنش‌های غشایی ممکن است فشاری، کششی یا برشی باشند) است و خمش تنها در نزدیکی لبه‌های آزاد، تکیه گاه‌ها و در مجاورت محل اعمال بارهای منفرد پدید می‌آید، علاوه بر این مقداری خمش ثانویه به دلیل خیز در سازه و تغییر مکان تکیه گاه‌ها به وجود می‌آید که این خمش گسترش بیشتری دارد. برای مثال در سر درهای قوسی که لبهٔ فوقانی آنها آزاد بوده و تکیه گاهها نیز ارتجاعی هستند خمش گسترده‌ای در سازه به وجود می‌آید و این لنگر خمشی غالباً کنترل کننده ضخامت است.

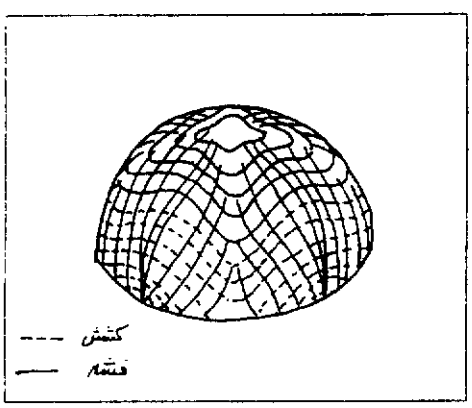
یک گنبد کروی تحت اثر بار در ناحیه مدار استوا باز می‌شود، بنابراین مرزهای آن (هر چند به مقدار ناچیز) به سمت خارج جابجا می‌گردند. به علاوه نیروهای عکس‌العمل گنبد باید در جهت نصف النهارهای دوران یافته، قرار گیرند. از آنجا که قوس‌های نصف النهاری تحت اثر بار باید به صورت منحنی طنابی عمل کنند، نیروهای عکس‌العمل در جهات دیگر در گنبد



۶) تغییر شکل گنبد با خیز کم و زیاد تحت بار وزن



۷) مکانیزم برش در گنبد تحت اثر باد



۸) خطوط اصلی تنش در گنبد تحت اثر باد

خمش ایجاد خواهند کرد. گنبدی که تحت اثر بار تنش‌های غشایی ناشی از بار گذاری در مدار استوا حرکت و دوران می‌کند در مرزش ایجاد می‌شود. آشفتگی‌های خمشی که بدین شکل در مرز تکیه گاه به وجود می‌آید عمیقاً در گنبد نفوذ نمی‌کند و تنها به نوار باریکی در مجاور مرز محدود می‌شوند.(۱)

۱-۲- بررسی رفتار گنبدهای آجری

با آنکه به نظر تئوری سقفهای پوسته‌ای در ارتباط با پوسته‌های بتن آرمه می‌باشد و در رابطه با گنبدهای آجری بی ارتباط تلقی شود، اما از تنشهایی که در گنبدهای آجری ایجاد می‌گردد و سبب ایجاد ترک‌هایی در قسمت تحتانی آنها می‌شود باید نتیجه می‌رسیم که فرم‌های گنبد آجری که دارای انحناء دو جهته می‌باشند در اثر اینکه با مصالح بنایی ایجاد شده‌اند، قابلیت تحمل خمش را ندارند و تنها قابلیت تحمل فشار را دارند، لذا رابطهٔ نزدیکی بین عملکرد فرمهای گنبدی آجری با تئوری سقفهای پوسته‌ای بتنی مشاهده می‌گردد.(۲)

هر چند تفاوت‌های زیادی بین گنبدهای پوسته‌ای و جدار نازک با گنبدهای آجری زیاد می‌باشد ولی تفاوتهای عمده آن به شرح زیر می‌باشد:(۳)

۱) وزن سر بار در گنبدهای آجری نسبت به وزن خود گنبد ناچیز بوده و قابل صرفنظر نمودن است در صورتی که از وزن سر بار در گنبدهای جدار نازک نمی‌توان صرفنظر نمود.

۲) مصالح به کار رفته در گنبدهای جدار نازک مقاوم در مقابل نیروهای کششی بوده ولی در گنبدهای آجری مصالح کشش را تحمل نمی‌کنند.

۳) فرم گنبدهای پوسته‌ای معمولاً نیمکره و یا قسمتی از کره می‌باشند در صورتی که منحنی گنبدهای آجری اغلب از پیوستن چند منحنی و یا از منحنی سهمی شکل به دست آمده است.

و در نهایت اینکه پوسته‌ها معمولاً همگن هستند ولی گنبدهای آجری همگن در نظر گرفته می‌شوند.

حال با در نظر گرفتن سه تفاوت عمده بالا و شباهت‌های موجود میان گنبدهای آجری و بتنی، در اینجا به سه شرط اساسی برای عملکرد واقعی یک گنبد (با مصالح بنایی یا بتنی) در مقابل تنشهای فشاری، کششی و برشی اشاره می‌شود:(۴)

۱) گنبد باید دارای ضخامتی مناسب باشد به طوری که قادر به ایجاد رفتار خمشی قابل توجهی نخواهد بود.

۲) انحناء گنبد باید به طرز صحیحی طراحی شود. در این حالت گنبد به علت فرم مقاومش سخت و مستحکم خواهد بود.

۳) گنبد باید به شکلی دارای تکیه گاه‌های لازم باشد، در این حالت صرفاً مقدار ناچیزی خمش بر سطح محدودی از پوسته ایجاد خواهد شد.

این سه شرط برای ایجاد عملکرد گنبد با هر شکل و تحت هر نوع بار گذاری لازم و ضروری است. هر گاه به دلیل ملاحظات زیبایی یا نیازهای معماری این سه شرط رعایت نشوند، تأثیر رفتار خمشی افزایش یافته و بازده سازه‌ای گنبد کاهش می‌یابد.

۱-۲-۱- انواع گنبدهای آجری ایرانی

مطالعات تاریخی نشان می‌دهد، معماران ایرانی برای رسیدن به سازهٔ پایدار با آگاهی از مسائل ایستایی گنبد و توجه به سه شرط بالا، در طول چندین قرن با بهره‌گیری از انواع قوس‌ها، به گنبدها تنوع گسترده‌ای بخشیدند. تنوعی ناشی از اختلاف دوره‌های تاریخی، تغییر دهانهٔ فضاها، نحوهٔ انتقال مربع به دایره (گوشه سازی)، تغییر ضخامت و استفاده از دو پوشش داخلی و خارجی و... که در یک روند تاریخی به سمت بهینه سازی شکل سازه حرکت کرده است.

«این روند و سیر به نحوی است که از اصول ایستایی گنبد اولیه کمک گرفته و باعث رفتن گامی به جلو شده و در نتیجه نوعی روند ساختمانی با فنون متکامل‌تری را سبب شده و در حالاتی نیز نتیجه نهایی با آنچه در گذشته ساخته شده تفاوتهایی داشته است.

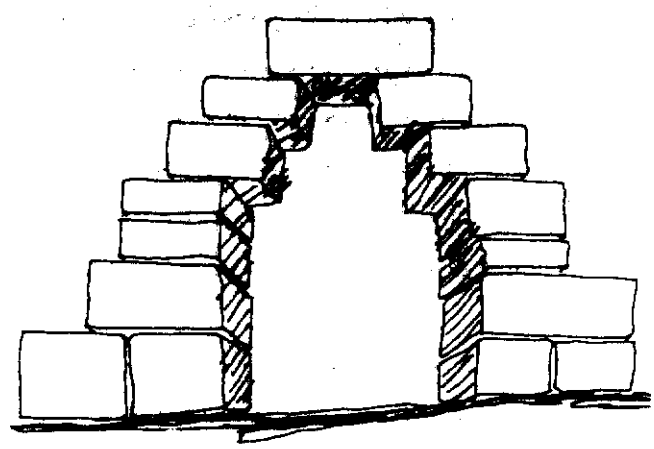
در تاریخ معماری ایران که به دو بخش قبل از اسلام و بعد از اسلام تقسیم می‌شود، می‌توانیم تکامل گنبدها را در زمان‌های مختلف از

۱- همان منبع، ص ۲۶۰-۲۵۹.

۲- گریگوریان، زاره، تحلیلی بر عملکرد سقفهای گنبدی در رابطه با سقفهای پوسته‌ای هنر و معماری، شماره ۳۷ و ۳۸، صص ۷۸-۷۵.

۳- سعیدی، علی اکبر، همان، ص ۴۰۸.

۴-این سه شرط با توجه به سه شرط ذکر شده برای عملکرد پوسته‌های نازک که در: «سالوادوری، ماریو، همان، ص ۲۶۳». ذکر شده، تعیین شده است.



تصویر ۹

نظر ساخت به این نحو بیاوریم:

گنبدهای کاذب، این نوع پوشش‌ها از نظر فن ساختمان و ایستایی عملکردی جدای با گنبد حقیقی دارد. در واقع آن‌ها از به کار بردن مصالح سنگی ـ آجری و قرار دادن آنها به صورت پله‌ای شکل می‌گیرند. در این گنبدها مسئله‌ای به نام راتش وجود ندارد و نیروها به صورت عمودی (فشاری) به تکیه گاه منتقل می‌شوند (تصویر ۹).

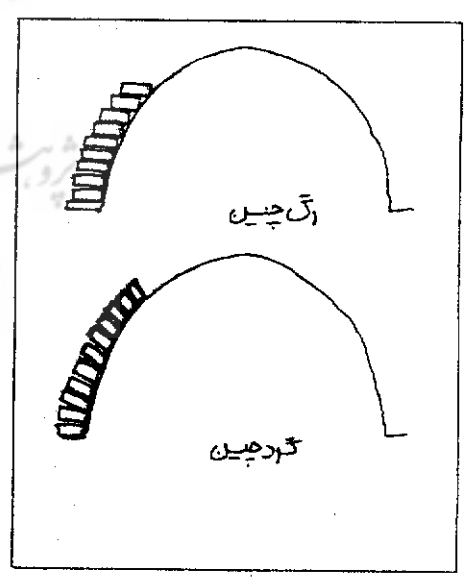
گنبدهای آجری یک پوسته: این نوع گنبد از قرار دادن آجرها به دو صورت رگ چین و گرد چین که در اولی طرز چیدن آجرها با سطح افق موازی می‌باشند و در گرد چین رگهای آجر به صورت شعاعهای که به مرکز گنبد متمایلند قرار می‌گیرند، ساخته می‌شوند. (تصویر ۱۰)

گنبدهای دو پوسته پیوسته: این نوع گنبد در طول تاریخ سازه‌های گنبدی از تکامل و پیشرفت خارق‌العاده‌ای برخوردار است، استفاده از باریکه طاق‌ها و روش ساخت آنها نسبت به قبل از پیشرفت‌های بزرگ سازندگان و معماران دوره اسلامی می‌باشد. (تصویر ۱۱)

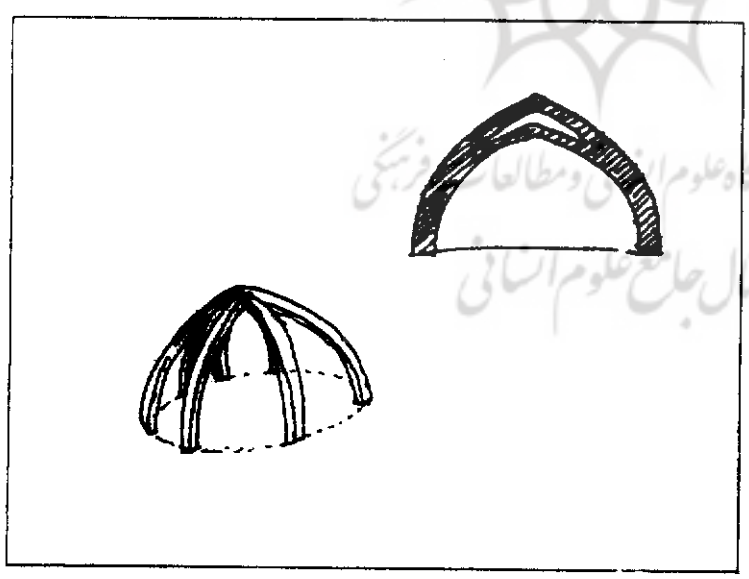
گنبدهای دو پوسته گسسته: که به دو بخش گنبدهای دو پوسته بیرونی رک و گنبدهای با دو پوسته بیرونی نار (منحنی) تقسیم می‌شوند. نوع رک دارای سابقه تاریخی بیشتری نسبت به نوع دوم و در عوض نوع دوم مسائل فنی شکلی پیشرفته‌تری را دارد[۱]. (تصویر ۱۲)

۱-۲-۲- مطالعه سازه گنبدها در ایران

مطالعات بسیاری بر روی سازه‌های پوسته‌ای و تاریخچه آنها صورت گرفته که بررسی گنبدهای آجری نیز هیچگاه دور از نظر نمانده است. اگر چه نتیجهٔ همه این مطالعات ثابت کرده که سازندگان این آثار آگاه به مسائل زیبایی شناسی و قوانینی در ارتباط با ساخت و ایستایی آنها بوده‌اند، اما برای دستیابی به اصول



تصویر ۱۰



تصویر ۱۱

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

ساختمانی، شیوه‌های اجرا و... در نهایت ر... ن به مسائل آسیب شناسی آنها فعالیت‌های مختلفی صورت گر... است.

با آنکه تا کنون بررسی‌هایی در حوزه‌های مختلف، توسط متخصصان معماری، باستان شناسی و مهندسان سازه بر روی انواع گنبدها، ساختار شکلی و سازه‌ای آن‌ها انجام گرفته است. کمبود اطلاعات تاریخی و معماری از یک طرف و فقر اطلاعات سازه‌ای از طرف دیگر باعث شده تا جز تعدادی اندک از گنبدهای ایرانی، آن هم بنا به ضرورت، مطالعات همه جانبه صورت نگیرد. حاصل مطالعات چند دهه اخیر در مورد گنبدها نشان می‌دهد که تا کنون آنچه که به عنوان اطلاعات سازه‌ای منتشر شده است محدود به مطالعات کلی پوسته‌ها و در چند مورد ترجمه آراء و نظرات متخصصان خارجی در مورد گنبدهای غیر ایرانی است. خوشبختانه در چند سال اخیر گرایش متخصصین سازه به معماری ایرانی باعث ارائه چند نمونه خوب در زمینه مطالعات سازه‌ای شده که به طور کلی با توجه اجمالی به انواع روش‌های مختلف آنالیز سازه‌ها، به روش مطلوب در آنالیز سازه‌های سنتی اشاره می‌شود.

با توجه به خصوصیات مصالح بنایی - مقاومت کششی کم و رفتار غیر خطی یا غیر ایزوتروپیک، روش‌های کلی زیر برای آنالیز سازه‌های با مصالح بنایی استفاده می‌شود[۲]:

۱. مطالعهٔ قانون‌های اساسی (رابط تنش-کرنش) حاکم بر مصالح بنایی.

۲. در نظر گرفتن کل سازه به عنوان یک مجموعه از المانها، مانند طاق‌ها و پانل‌ها، و بررسی یک رفتار خاص نظیر Collapse (مثلاً ایجاد مکانیسم در اثر به وجود آمدن مفصل‌های پلاستیک)

۳. آنالیز به روش المانهای محدود:[۳] در این روش سازه تبدیل به قسمت‌های کوچک‌تری (المانهای محدود) می‌شود و معادلات دیفرانسل حاکم بر رفتار هر المان تبدیل به یک دستگاه جبری از تغییر مکان‌ها و نیروها می‌شود. این روش قوی‌ترین و مطمئن‌ترین روش در حال حاضر است.

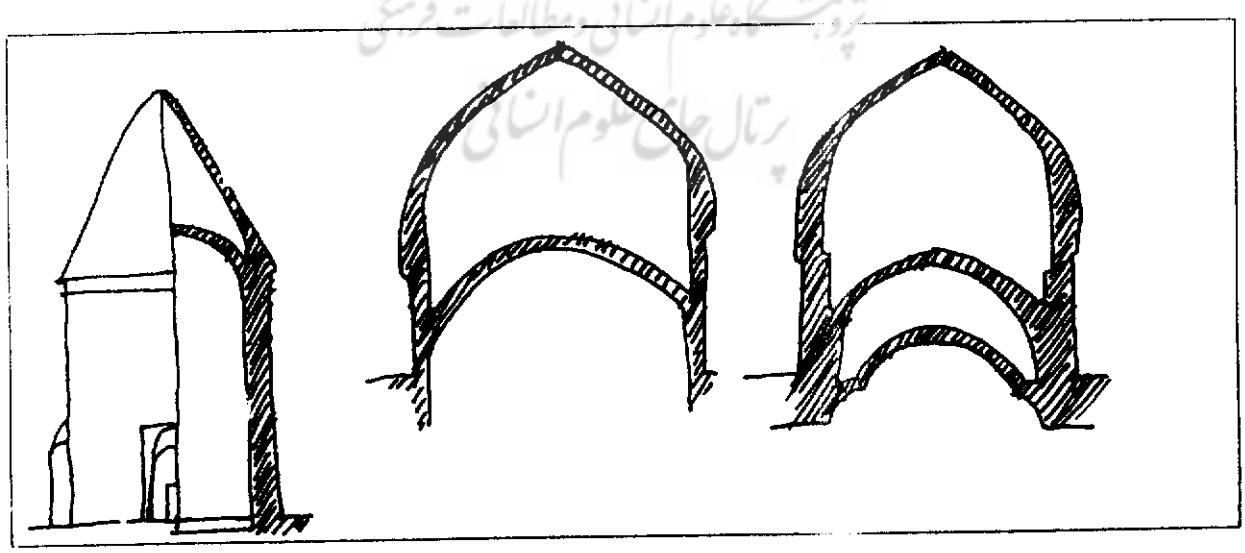
۱- معماریان، غلامحسین، نیارش سازه‌های طاقی در معماری اسلامی ایران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ۱۳۶۷، صص ۱۰۸-۱۰۷.

۲- جزوهٔ «روش‌های نوین در آنالیز و کنترل سازه‌های سنتی»، دکتر مهرداد محمد حجازی، دانشگاه اصفهان و جزوهٔ کاربرد کامپیوتر در آنالیز سازه‌های سنتی، دکتر مهرداد حجازی، دانشگاه هنر، دانشکده پردیس.

نیز نگاه کنید به:

Logan, D. L, A first course in the finite elements metod, 2nd ed, PSW-KENT, Boston, 1992.

3- The Finite Element Metod) F.E.M.



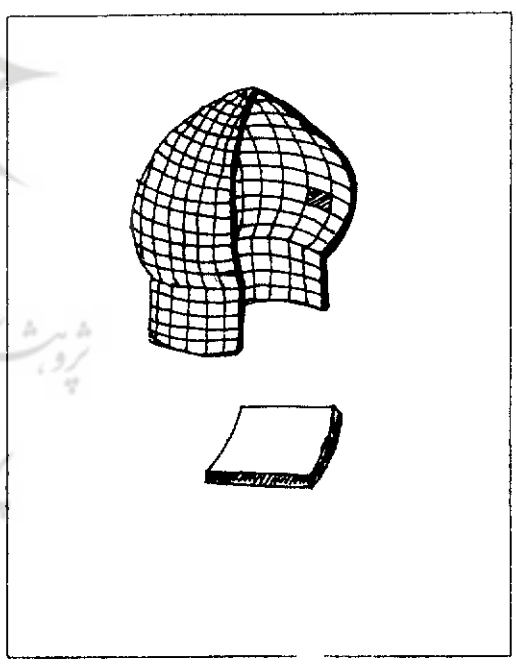
تصویر ۱۲

۱-۲-۲-۱- کاربرد روش المان‌های محدود در آنالیز سازه‌های سنتی:

روش المان‌های محدود یک روش عددی برای حل مسائل مهندسی و فیزیک ریاضی، نظیر آنالیز سازه‌ها، انتقال حرارت، جریان سیال، انتقال جرم و پتانسیل الکترومغناطیسی است. برای به دست آوردن حل دقیق بسیاری از مسائل دشوار و یا غیر ممکن از روش‌هایی نظیر المان‌های محدود استفاده می‌کنند. در این روش به جای حل مسئله برای همهٔ جسم در عمل، معادلات برای هر المان محدود فرموله می‌شود و با ترکیب نمودن آنها حل همهٔ جسم به دست می‌آید.

به طور خلاصه، حل برای مسائل سازه‌ای تبدیل به تعیین تغییر مکان‌ها در هر گره و تعیین تنش در هر المان سازه‌ای را تشکیل می‌دهد که تحت بار گذاری است. (تصویر ۱۳)

در طی چند سال اخیر به همت آقای دکتر حجازی و با استفاده از نرم افزارهای رایانه‌ای از این روش برای آنالیز سازهٔ بناهای تاریخی از جمله منارها، گنبدها و طاقها صورت گرفته است و نگارنده نیز که افتخار شاگردی ایشان را دارد به منظور مطالعهٔ انواع



۱۳) در تصویر گنبد به المان های مختلفی تقسیم شده است

گنبد در معماری ایرانی با هدف دستیابی به مسائل سازه‌ای، آسیب شناسی و در نهایت مقایسهٔ تطبیقی سازهٔ آنها با استفاده از روش المان‌های محدود سازهٔ چند از گنبدها را آنالیز کرده است، که در ادامه خواهد آمد.

۴-۱-۲-۳- آنالیز گنبدهای آجری با روش المان‌های محدود

در آنالیز المان‌های محدود گنبد از برنامه NISA -II استفاده شده است. در استفاده از این روش المان‌های محدود و کاربرد نرم‌افزار مورد نظر مراحل زیر انجام می‌شود:

۱. مدل سازی هندسی: نمایش هندسه سازه به صورت نقاط، خطوط، سطوح و حجمها.

۲. مدل سازی اجزاء محدود: مدل سازی اجزاء محدود همان نمایش مدل هندسی در قالب تعداد محدودی از المانها و گره‌ها است که خواص المان‌ها و جنس ماده به همراه شرایط بار گذاری و شرایط مرزی در این مرحله مشخص می‌شود

آنالیز گنبدهای آجری که در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی صورت پذیرفته است. در آنالیز استاتیکی، بار وزن در نظر گرفته شده و بار برف به عنوان یک ضریب افزایشی به بار وزن اضافه شده است. از آنجا که بار باد در مورد گنبدها بحرانی نمی‌باشد از آن صرف نظر شده است. در آنالیز دینامیکی اثرات زلزله در نظر گرفته شده و آنالیز دینامیکی زلزله فقط برای گنبد مسجد جامع قزوین انجام شده است خصوصاً مصالح و تنش‌های مجاز در نظر گرفته شده برای مصالح آجری در جدول ۱ آمد است. پایه‌های گنبدها کاملاً گیر دار در نظر گرفته شده و UX,UY,UZ,RX,RY,RZ=. است و به این ترتیب گنبد مستقل از سازهٔ تحتانی آنالیز و عکس‌العمل نیروها و لنگرهای حاصل از آنالیز در محل تکیه گاه روی سازه زیرین قرار دارد.

در ادامه تعدادی از قوس‌های ایرانی را که برای اجرای گنبدها استفاده می‌شوند، انتخاب کرده و با توجه به جدول ۱ آنها را مدل و آنالیز کرده است. به منظور ایجاد امکان مقایسه انواع این قوس‌ها با هم و دستیابی به یک شکل بهینه از یک طرف، و از طرف دیگر توجه ویژه به گنبد مسجد جامع قزوین، ضخامت و دهانهٔ اکثر این

مدول الاستیسیته[11] E (N/m۲)	ضریب پواسون[15] ν	دانسیته جرمی[14،16] ρ kg/m۳	ضریب انبساط حرارتی طول α /°c	ضریب استهلاک(۱ در زلزله)	...ش مجاز ...ری F_c	تنش مجاز کششی Ft	تنش مجاز برشی Fv	تنش تحمل فشدگی Fb (N/m۲)
۷ ۳۵۸×۱۰[۹]	۰۱	۱۶۰۰	۰۷۵×۱۰[-۵]	۰۰۷	۷×۱۰	۲×۱۰[۵]	۱×۱۰[۵]	۷×۱۰[۵]

جدول ۱: خصوصیات مصالح بنایی و تنش‌های م... (منبع: دکتر مهرداد حجازی)

مدل‌ها مساوی با گنبد مسجد جامع فزوی... نظر گرفته شده‌اند. این عمل در نهایت می‌تواند در یک توالی ... سخی، ابعادی و فرمی نقاط ضعف و قوت انواع گنبدهای آجری ... نشان داده و در وهلهٔ اول در شناخت سازه‌های سنتی و در مر... دوم در شناخت راه کارهای عملی و تدابیر خاص در مرمت ... کمک نماید.

۱-۲-۳-۱- آنالیز استاتیکی:

۱-۲-۳-۱-۱- گنبد با قوس چیدری تند یا شبدری تند:

از نمونه‌های این گنبدها در بقعه سید رکن‌الدین (یزد) و امامزاده اسمعیل (اصفهان) دیده می‌شود.

قطر خارجی گنبد ترسیم شده برابر با ۱۷/۱ متر، دهانهٔ ۱۴/۵ متر و ارتفاع آن نسبت به پای ۹/۱ متر است. برا... این گنبد یک پوسته ضخامتی معادل ۱/۳ متر در نظر گرفته شده است.

دارای ۱۶۴۰ المان و ۶۴۱ گره که بیشت... تغییر مکان آن بر اثر بار وزن مربوط به گره ۵۴۷ و معادل ۴-E ۱/۵۰... متر در نزدیکی تیزه است تنش‌های اصلی به صورت ما... و همواره کششی می‌باشند که حداکثر مقدار آن ۹۳٪ تنش ... و در نزدیکی شکر گاه به وجود می‌آید.

تنش نصف‌النهاری همواره فشاری و ... ود ۱۹٪ مقدار مجاز است که بیشترین مقدار آن در ناحیه تکیه ...های و پای گنبد است.

بیشترین تنش برشی این گنبد برابر ... تنش مجاز در ناحیه پای گنبد و محل تکیه گاه‌هاست. (تصویر ۱۲)

۱-۲-۳-۱-۲- گنبد با قوس چیدری کند (شبدری کند):

گنبد مسجد جامع یزد یکی از انواع گنبدهایی است که با قوسی شبدری کند اجرا شده است دهانهٔ در نظر گرفته شده برای این گنبد ۱۴/۵ متر، قطر خارجی ۱۷/۱ متر و ارتفاع خارجی ۱۲/۵ متر است. این گنبد با ۶۴۰ المان ۶۴۱ گره تحت بار وزن آنالیز شده بیشترین تغییر مکان مربوط به تیزه و حدود ۴-E ۱/۸۰۴ متر است.

حداکثر تنش‌های اصلی در محل شکر گاه به صورت کششی برابر ۱۳٪ تنش مجاز کششی است.

حداکثر تنش نصف النهاری در مس... نکیه‌گاه به صورت فشاری حدود ۱۸٪ تنش مجاز فشاری است مقدار تنش برشی ایجاد شده در محل تکیه‌گاه و برابر با ۶۰٪ تنش مجاز برشی است. (تصویر ۱۵)

۱-۲-۳-۱-۳- گنبد با قوس نعلی (ناری):

این نوع قوس بیشتر در آثار معماری پیش از اسلام خصوصاً دوره ساسانی (در طاق‌ها و گنبدها) استفاده می‌شده است. دهانهٔ گنبد ۱۴/۵ متر و با توجه به ضخامت ۱/۳ متری آن قطر خارجی برابر ۱۷/۱ متر و ارتفاع خارجی آن ۱۱/۴ متر است.

با ۳۶۰ المان و ۳۶۱ گره بر اثر بار وزن بیشترین تغییر مکان را در ناحیهٔ تیزه به مقدار ۴-E ۲/۳۵۸ متر داراست.

حداکثر تنش‌های اصلی به صورت مداری و کششی است که مقدار آن کمتر از تنش مجاز و ۱۶ درصد آن، در ناحیه شکر گاه گنبد

قرار گرفته است.

حداکثر تنش نصف النهاری به صورت فشاری و برابر ۲۱٪ تنش مجاز، در پای کار و محل تکیه گاه‌ها قرار دارد.

تنش برشی ایجاد شده در پای گنبد نیز حدود ۷۰٪ تنش مجاز می‌باشد و البته این تنش در ناحیهٔ ایوارگاه (۶۷/۵ درجه) نیز افزایش می‌یابد و به حدود ۴۰٪ تنش مجاز می‌رسد. (تصویر ۱۶)

۱-۲-۳-۱-۴-گنبد با قوس شلغمی تخت:

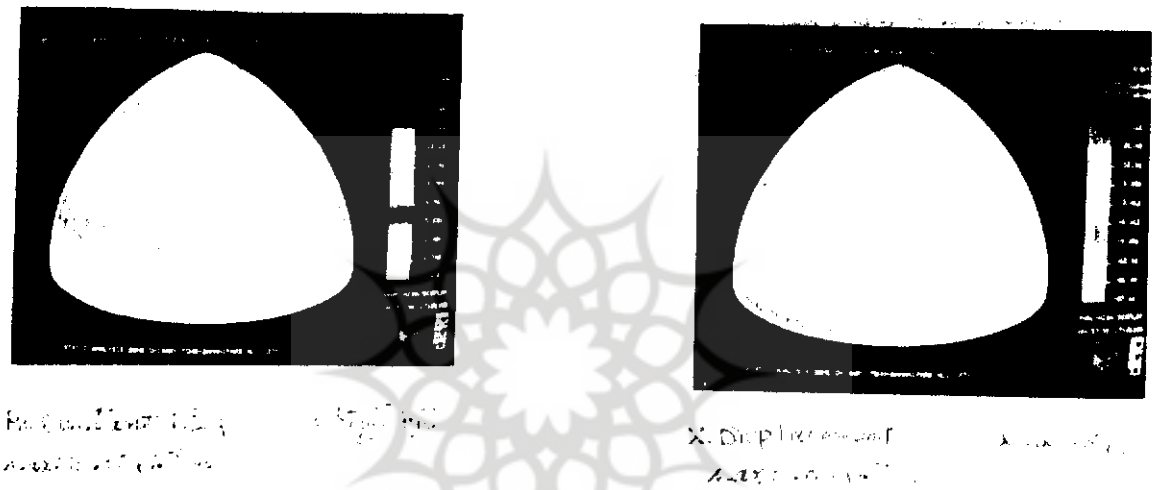
دهانهٔ گنبد ۱۴/۵ متر که با توجه به ضخامت ۱/۳ متری آن، قطر خارجی برابر ۱۷/۱ متر ارتفاع خارجی آن حدوده ۱۵/۵ متر است.

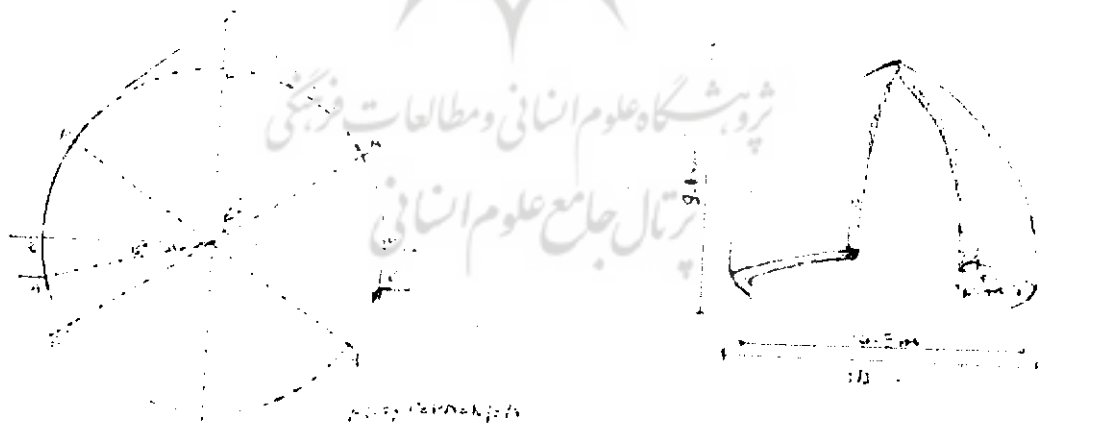
این گنبد با ۲۷۰ المان و ۲۷۱ گره تخت بار وزن آنالیز شده که بیشترین تغییر مکان در حوالی تیزه و برابر با ۴-E ۸/۵۴متر است.

حداکثر تنش‌های اصلی به صورت مداری و کششی است که مقدار آن حدود ۷۵٪ تنش مجاز کششی و در محل آوگون گنبد می‌باشد.

حداکثر تنش نصف النهاری در محل تکیه گاه به صورت فشاری حدود ۳۴٪ تنش مجاز فشاری است.

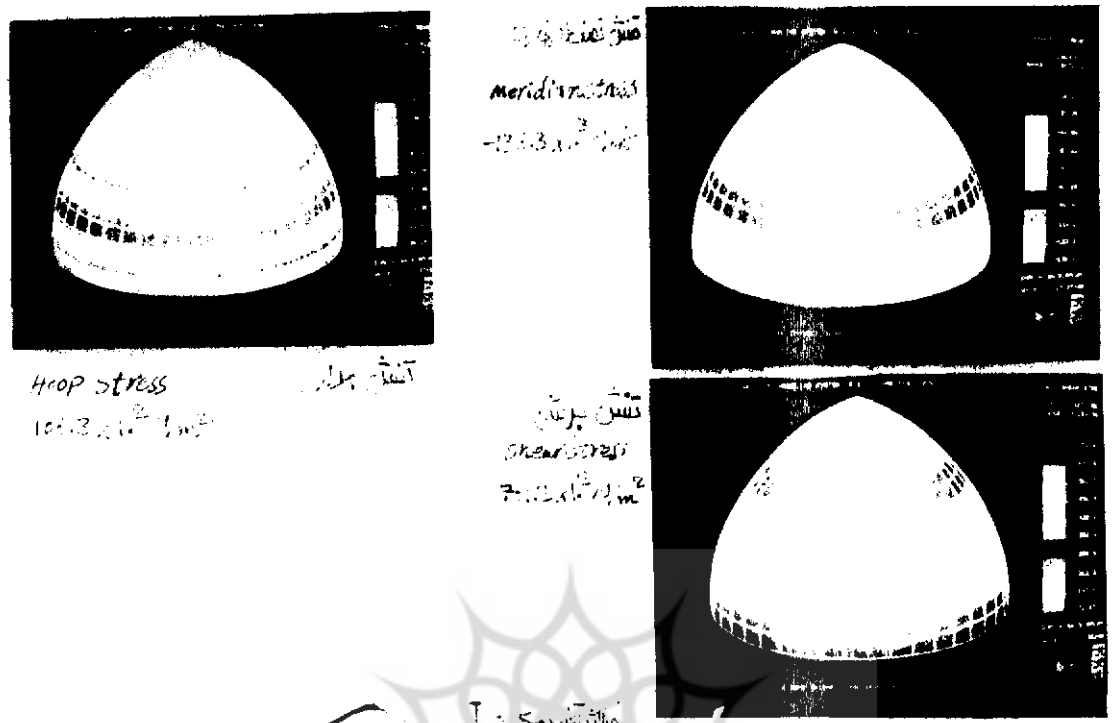
مقدار تنش برشی ایجاد شده در دو نقطه تکیه گاه به حداکثر خود می‌رسد که حدود ۱/۲۴ برابر تنش مجاز برشی است. (تصویر ۱۷)





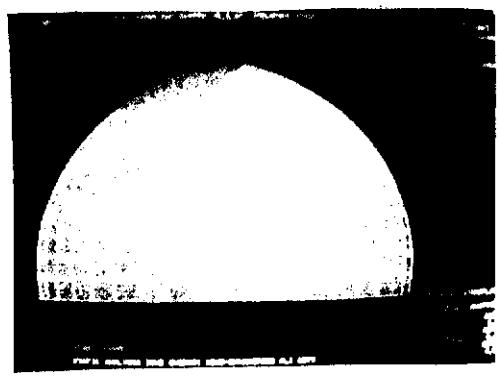
۱۴)نحوه ترسیم قوس شلغمی تخت

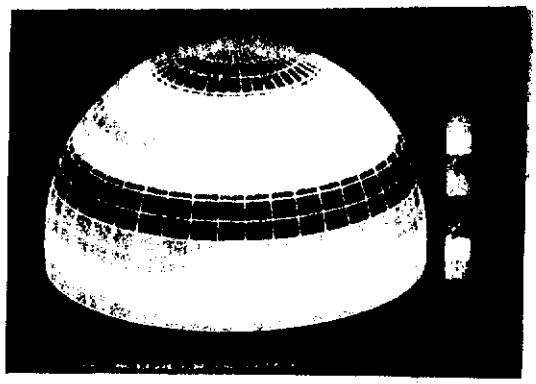
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

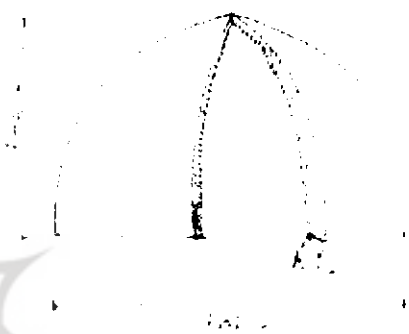


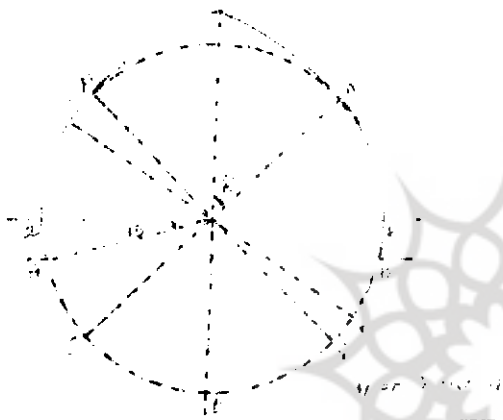
تصویر ۱۴

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی









٤-١٥)نحوه ترسیم قوس شبدری کند

۱-۲-۳-۱-۵- گنبد با قوس شلغمی:

بقعه شاه چراغ شیراز از جمله بناهایی است که دارای گنبد قوس شلغمی است.

دهانهٔ در نظر گرفته شده برای این گنبد ۱۴/۵ متر ضخامت ۱/۳ متر، قطر خارجی ۱۷/۱ متر و ارتفاع خارجی آن حدود ۱۹/۵ متر است.

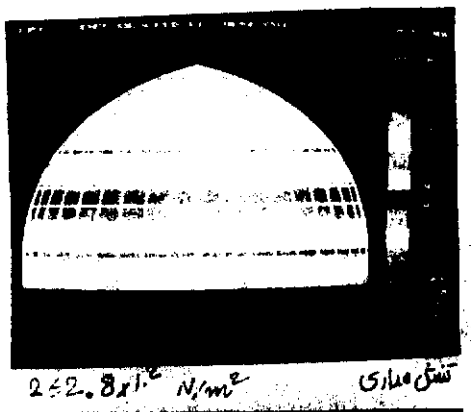
این گنبد با ۴۵۰ المان و ۴۵۱ گره تحت بار وزن آنالیز شده و بیشترین تغییر مکان مربوط به حوالی تیزه و برابر با ۴- E ۷/۷ متر است. حداکثر تنش‌های اصلی به صورت کششی و مداری در ناحیه آوگون گنبد ۸۵٪ تنش مجاز و حداکثر تنش فشاری به صورت نصف النهاری در محل گریو و تکیه گاه گنبد برابر ۴۳٪ تنش مجاز فشاری است.

مقدار تنش برشی نیز در دو نقطه آوگون گریو به حداکثر خود می‌رسد که حدود ۱/۵ برابر تنش مجاز برش است.(تصویر ۱۸)

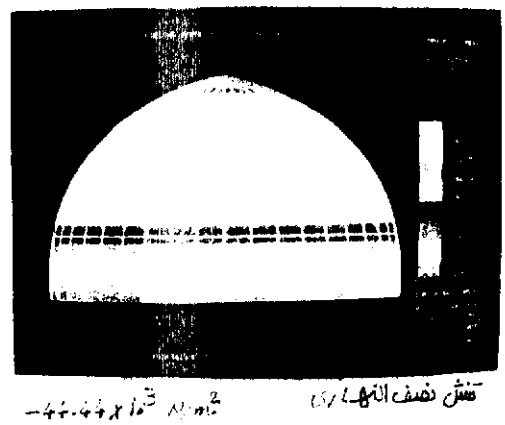
۱-۲-۳-۱-۶- گنبد با قوس شاخ بزی:

نمونه این گنبد در بنای قبرآقا در تهران دیده می‌شود دهانهٔ در نظر گرفته شده برای این گنبد ۱۴/۵ متر با ضخامت ۱/۳ متر و ارتفاع خارجی آن نیز حدود ۱۴/۸ متر است.

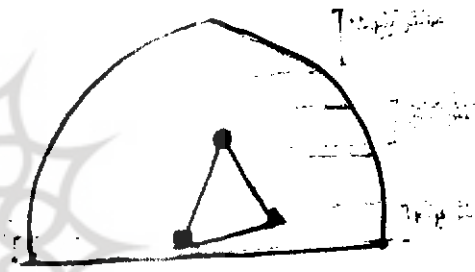
این گنبد با ۳۶۰ المان و ۳۶۱ گره تحت با روزن آنالیز شد که بیشترین تغییر مکان آن مربوط به تیزه و برابر ۴- E ۲/۶۱ است. تنش اصلی به صورت کششی و مداری در ناحیه شکر گاه با مقدار



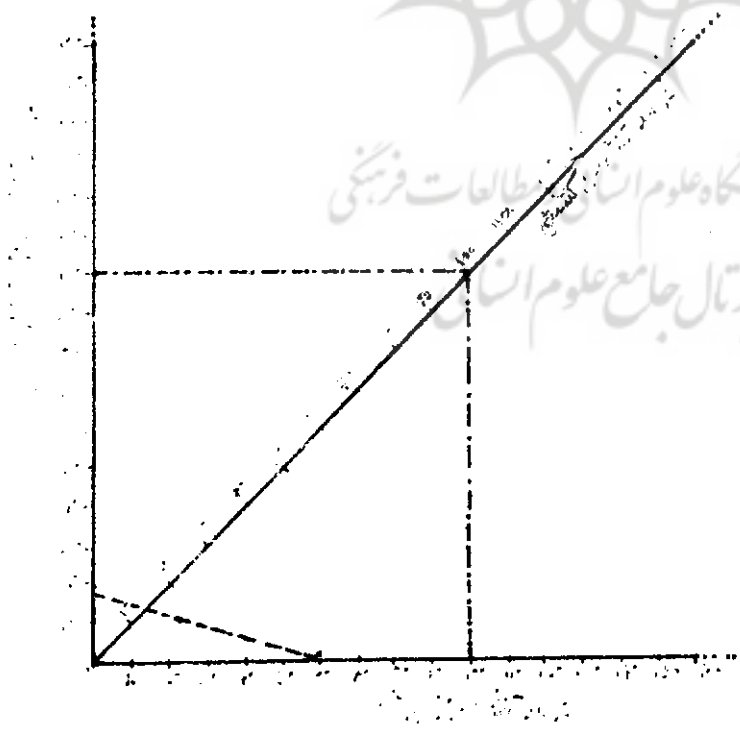
تنش معماری



تنش نصف النهاری



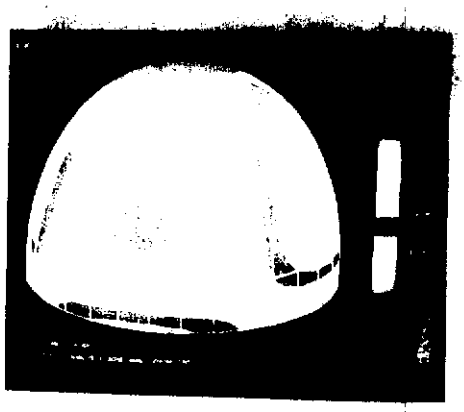
تنش کششی
تنش فشاری
تنش برشی



محدوده تنش مجاز
محدوده تنش موجود

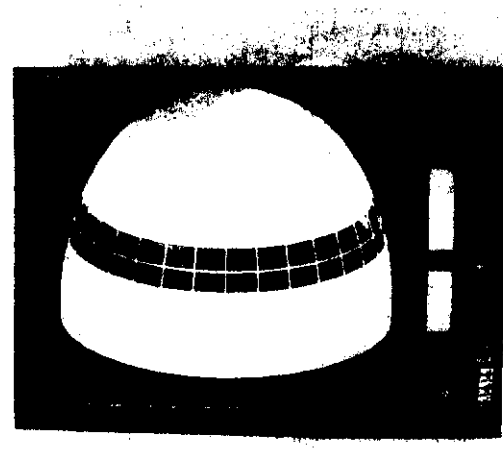
تصویر ۱۵

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی



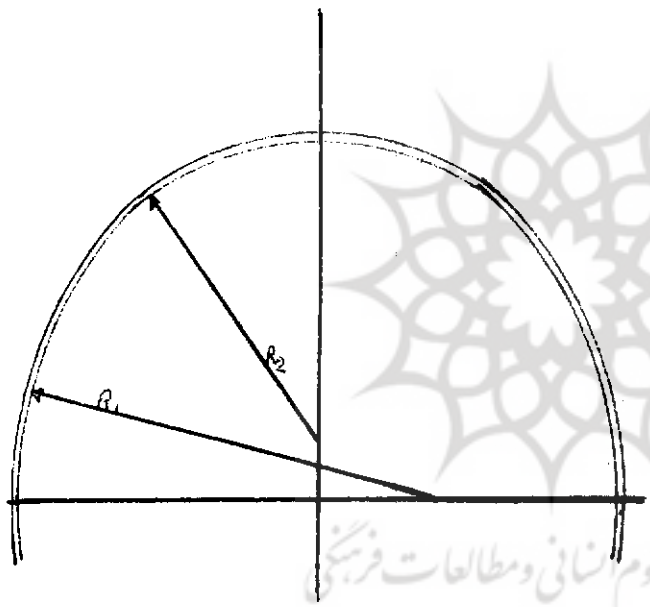
SZX-Stress
+147.4 N/m²x1.²

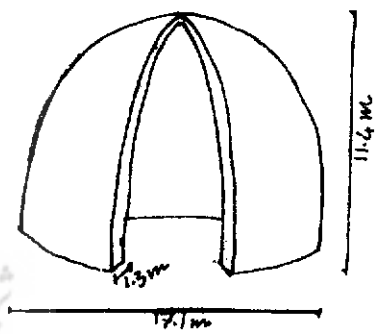
تنش در جهت XZ



Resultant DispL
23.58x1.⁻⁵m

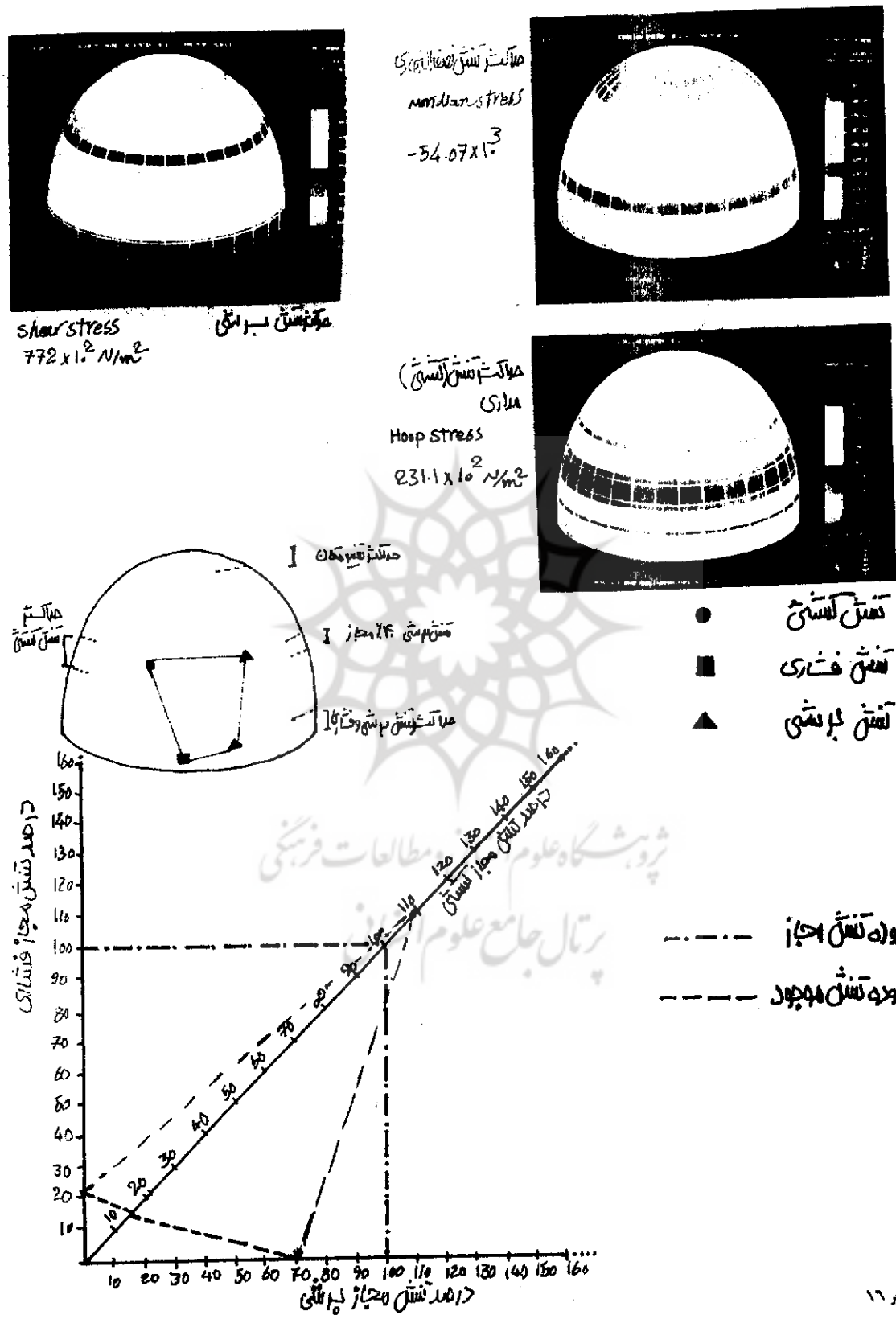
نتیجهٔ تغییر مکان





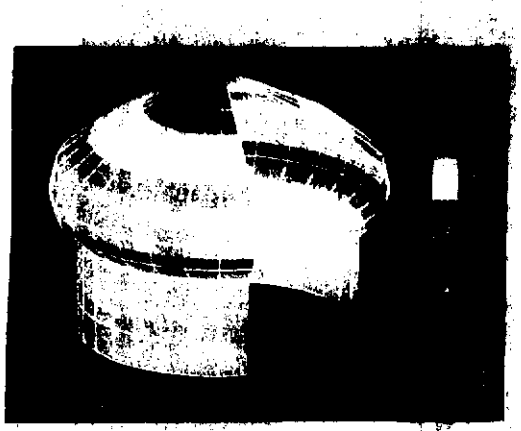
٤-١٦)نحوه ترسیم قوس نعلی

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی



تصویر ۱۶

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

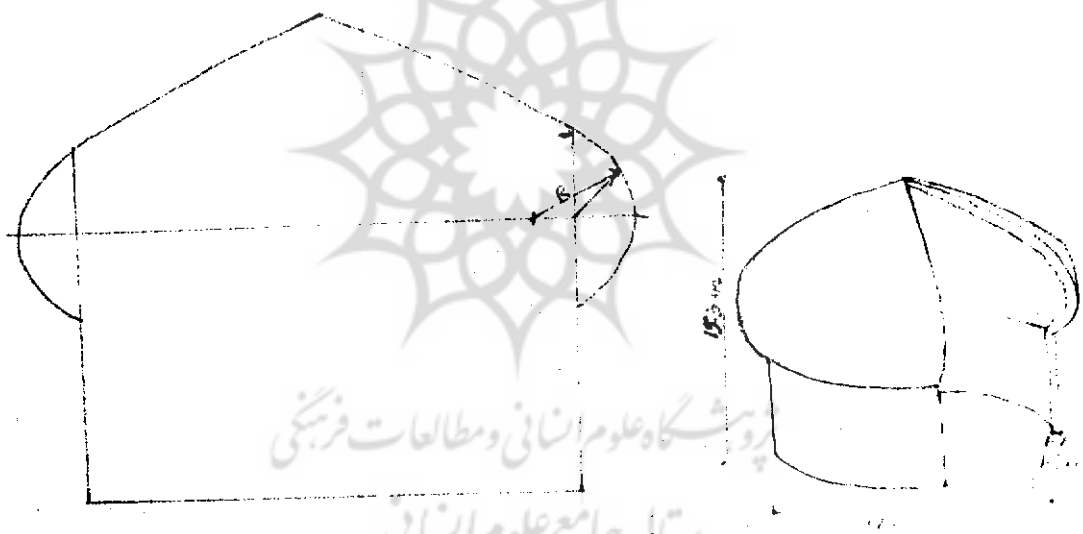


Resultant DispL.
85.43x10^-5 m

منتجهٔ تغییر مکان

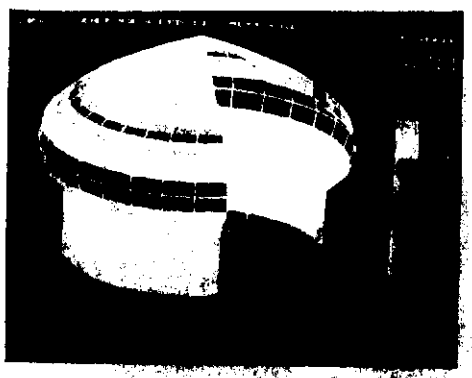
SZX-STress
±733.5x10^2 N/m^2

ZX تنش برشی



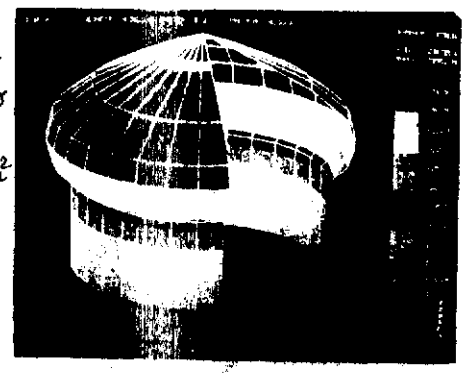
٤-١٧)نحوه ترسیم قوس شلغمی‌تفت

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی



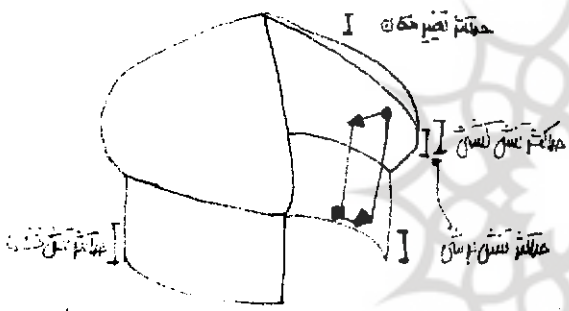
Max. Shear stress
$124.6 \times 10^3 N/m^2$

حداکثر تنش برشی

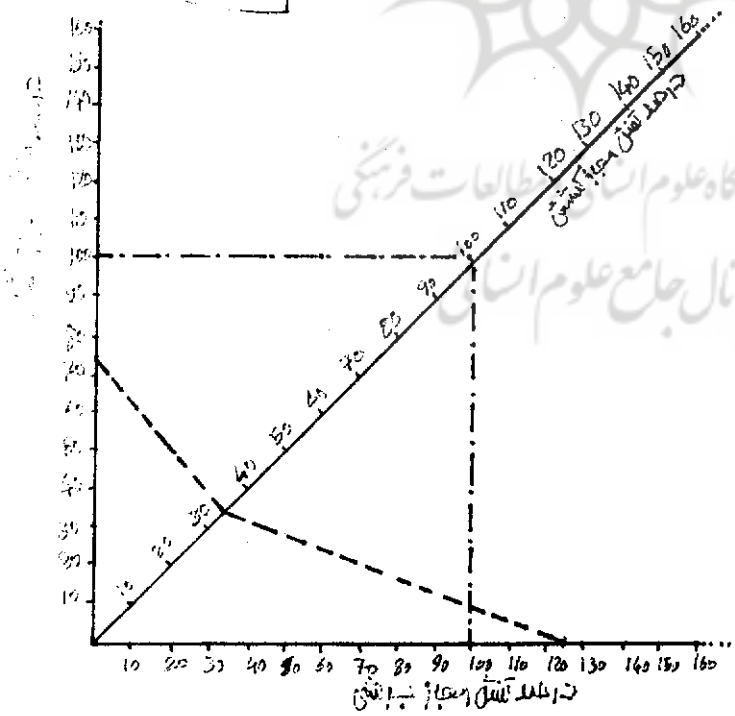


حداکثر تنش نصف النهاری
Meridian stress
$-78.95 \times 10^3 N/m^2$

حداکثر تنش محیطی
Hoop stress
$150.1 \times 10^3 N/m^2$



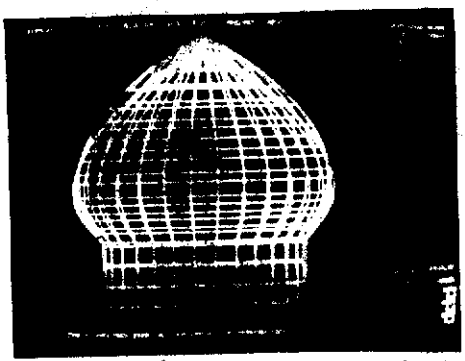
تنش کششی
تنش فشاری
تنش برشی



محدوده تنش مجاز
محدوده تنش موجود

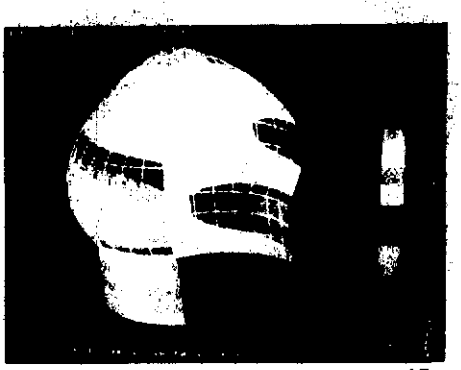
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

تصویر ۱۷



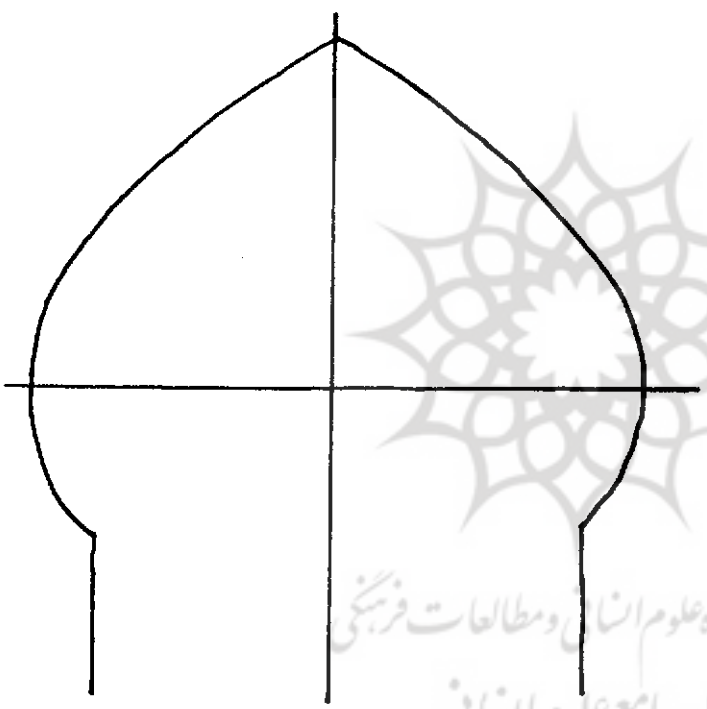
Displaced
$7.75 \times 10^{-5} m$

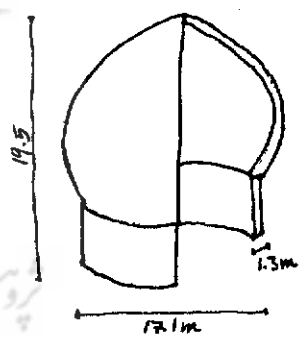
منتجهٔ تغییرمکان



X-DISP
$\pm 22.45 \times 10^{-5} m$

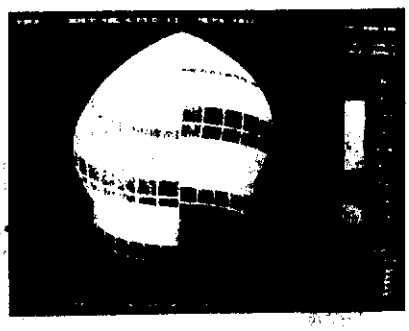
تغییرمکان در جهت X





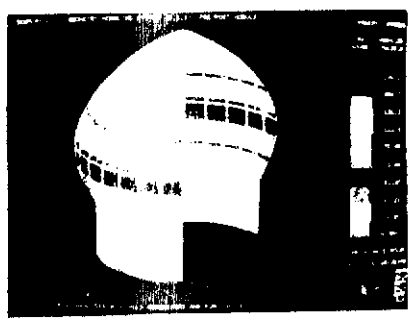
۱۰۸-٤)نحوه ترسیم فوس شلغمی

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

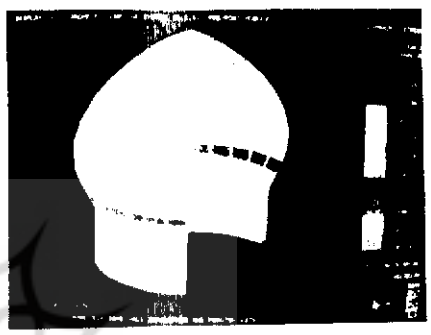


حداکثر تنش برشی

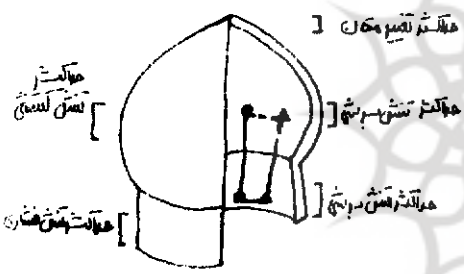
Max. Shear stress
$156.9 \times 10^3 N/m^2$



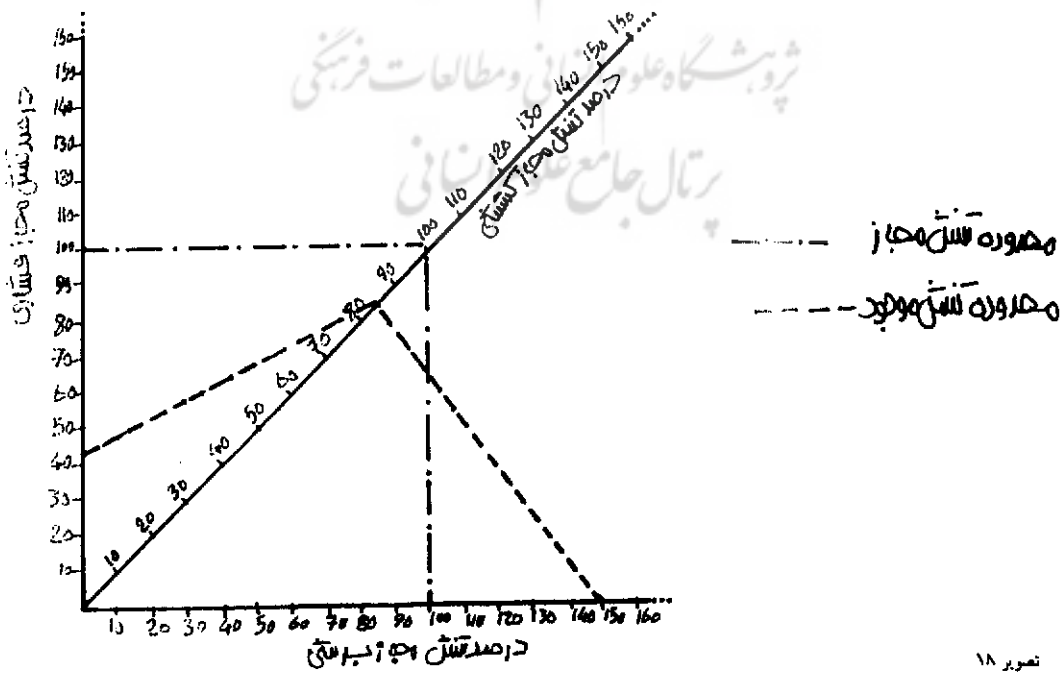
حداکثر تنش محیطی
Hoop stress
$170.1 \times 10^3 N/m^2$



حداکثر تنش نصف النهاری
meridian stress
-307.4×10^3

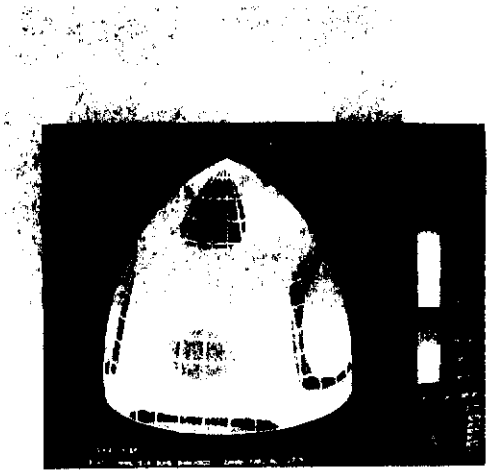


تنش کششی ●
تنش فشاری ■
تنش برشی ▲

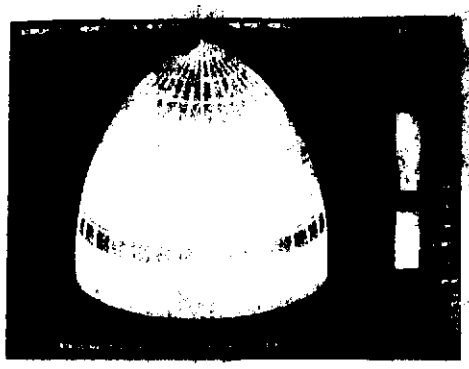


تصویر ۱۸

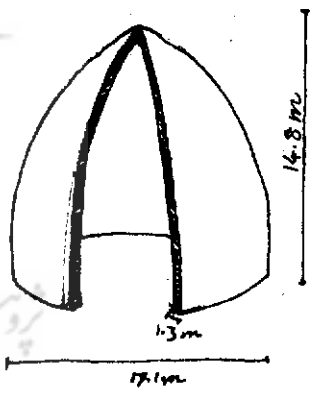
اثر / ۳۳ و ۳۴



تنش در جهت محور X SZX-STRESS
$\pm 135.2 \times 10^{2}\ N/m^{2}$



جابجایی برآیند Resultant Displ
$21.57 \times 10^{-5}\ m$



۱۹-٤)نحوه ترسیم قوس شاخ بزی

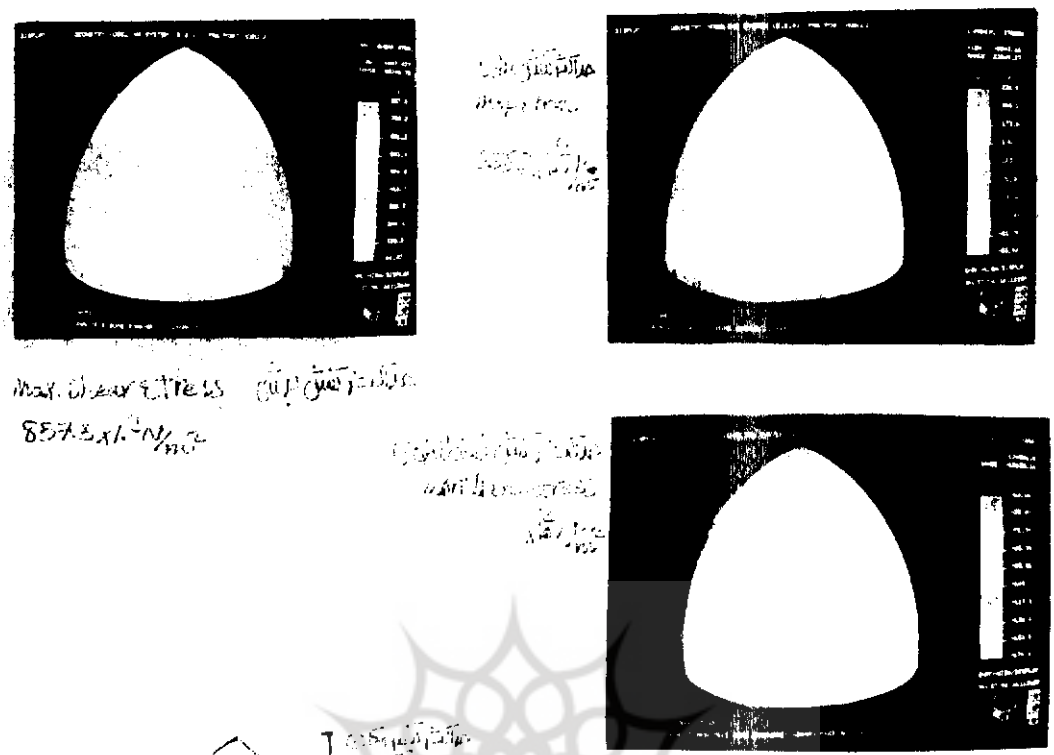
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

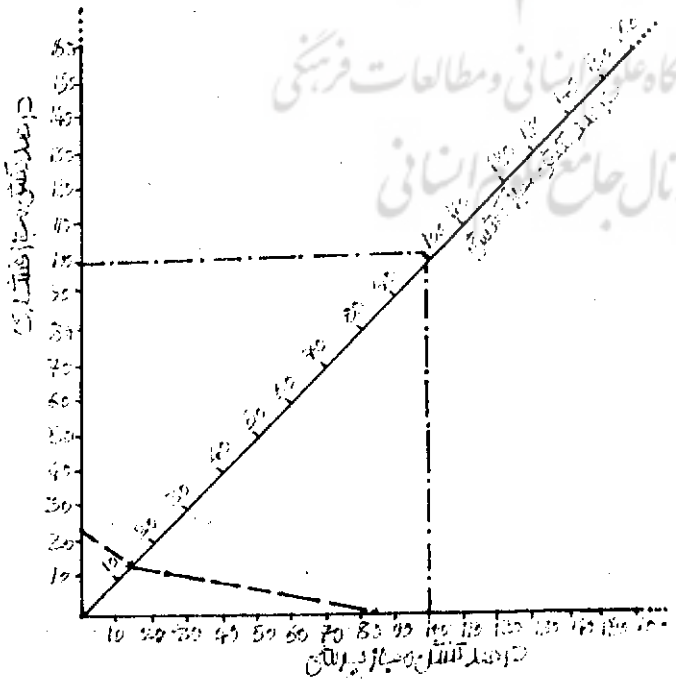
۱۲٪ تنش مجاز ایجاد می‌شود.

تنش نصف النهاری به صورت فشاری در تکیه گاه بیشتری مقدار را داراست که حدود ۲۴٪ تنش مجاز فشاری و تنش برشی نیز در این نقطه برابر با ۸۵٪ تنش مجاز است.(تصویر ۱۹)

۱-۲-۳-۱-۷-گنبد با قوس شاخ بزی تند:

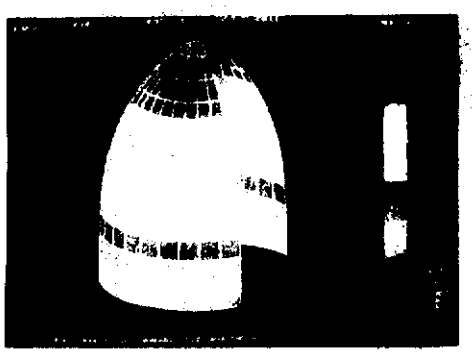
در گنبد بی بی شهربانو از این قوس استفاده شده است. دهانهٔ گنبد ۱۴/۵ متر و قطر خارجی آن ۱۷/۱ متر و ارتفاع خارجی آن ۱۹/۷ متر است.

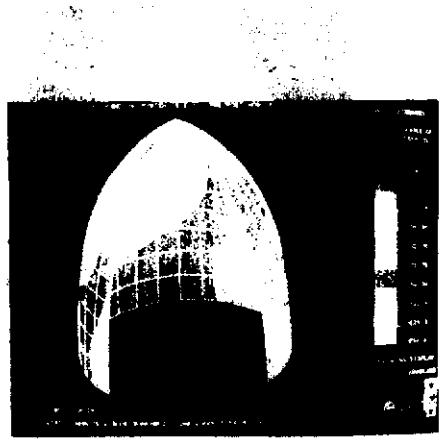


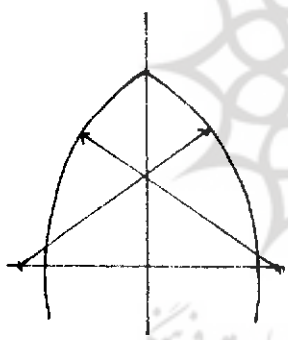


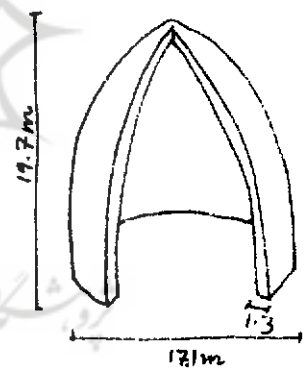
تصویر ۱۹

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی







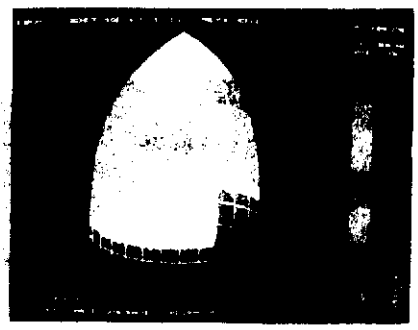


٤-٢٠) نحوه ترسیم قوس شاخ بزی تند

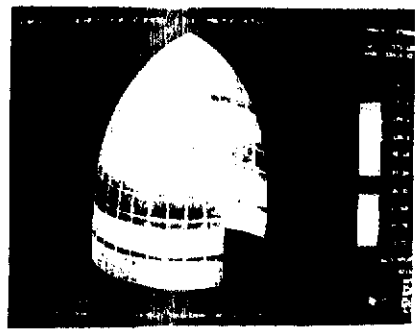
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

این گنبد با ۳۶۰ المان و ۳۶۱ گره تحت بار وزن آنالیز شده که بیشترین تغییر مکان در تیزه و مقدار آن E-۴ ۳/۰۹۶ است.
حداکثر تنش‌های اصلی به صورت مداری و کششی است حدود ۱۳٪ تنش مجاز کششی در محل شکر گاه ایجاد است.

حداکثر تنش نصف النهاری به صورت فشاری حدود ۳۰٪ تنش مجاز فشاری در محل تکیه گاه به وجود آمده است.
مقدار تنش برشی ایجاد شده در محل تکیه‌گاه و تقریباً ۱/۱ تنش مجاز برشی است.(تصویر ۲۰)

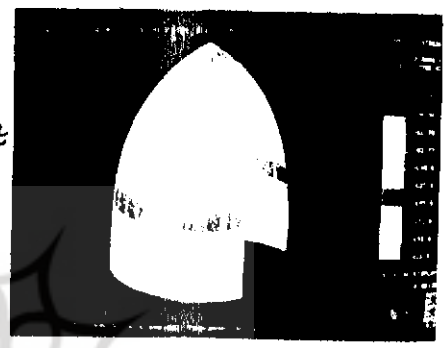


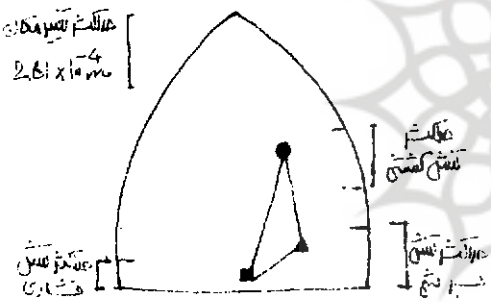
حداکثر تنش مماسی
Hoop stress
$224.1 \times 10^2 N/m^2$



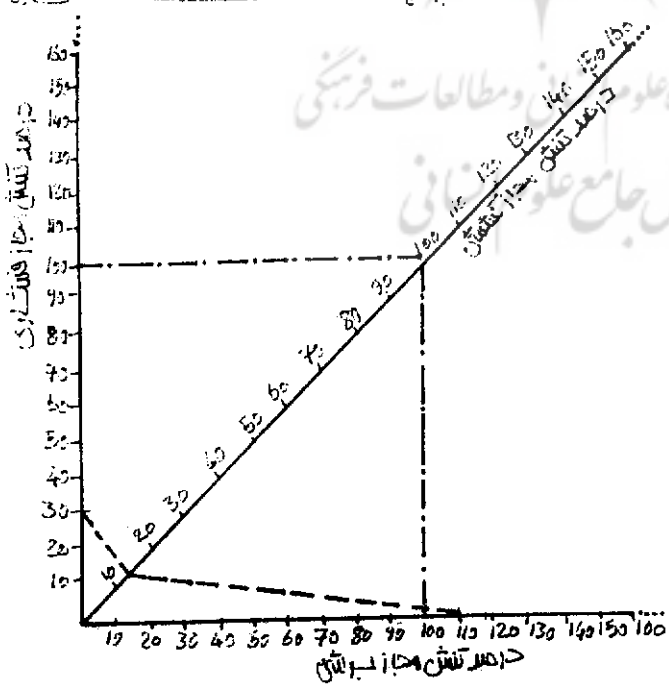
Max. shear stress حداکثر تنش برشی
$107.9 \times 10^3 N/m^2$

حداکثر تنش نصف النهاری
Meridian stress
$-215.9 \times 10^3 N/m^2$





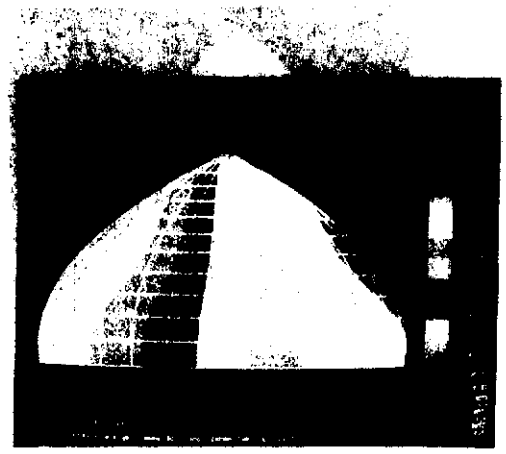
تنش کششی
تنش فشاری
تنش برشی



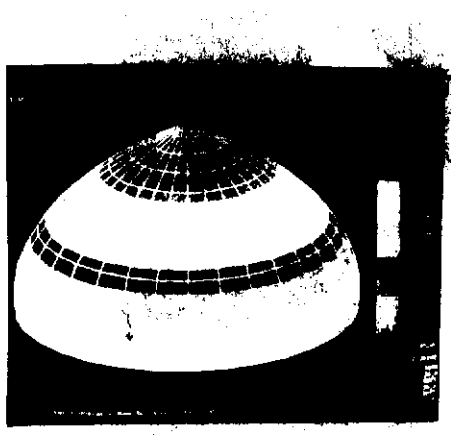
محدوده تنش مجاز
محدوده تنش موجود

تصویر ۲۰

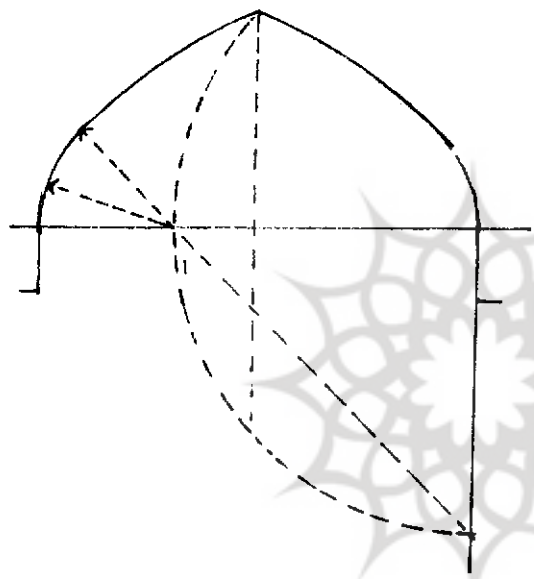
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

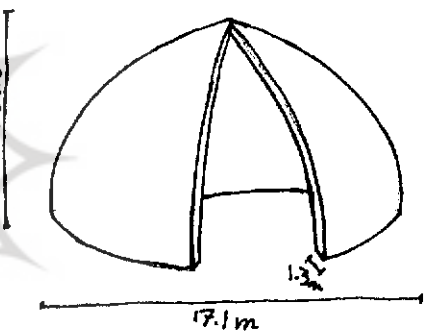


تنش در جهت xy
Sxy-Stress
$\pm 335.0 \times 10^{2} N/m^{2}$



منتجه تغییرمکان Resultant DISPL
$15.06 \times 10^{-5} m$





٤-٢١)نحوه ترسیم قوس پنج وهفت تند.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۱-۲-۳-۱-۸-گنبد با قوس پنج و هفت تند:

مقبره عطار نیشابوری از جمله بناهایی که گنبد آن با استفاده از این نوع قوس ساخته شده است.

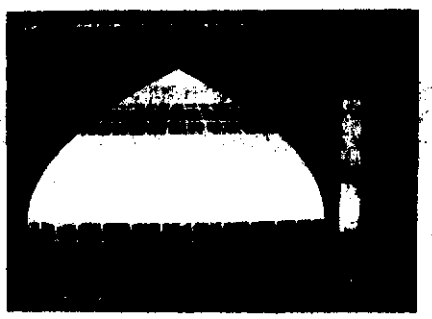
دهانهٔ گنبد مدل شده ۱۴/۵ متر، قطر خارجی ۱۷/۱ متر و ارتفاع خارجی آن حدود ۹/۶ متر است.

این گنبد با ۳۶۰ المان و ۳۶۱ گره تحت بار وزن آنالیز شده که بیشترین تغییر مکان آن در حوالی تیزه و برابر با ۱/۵۱ E-۴ متر است.

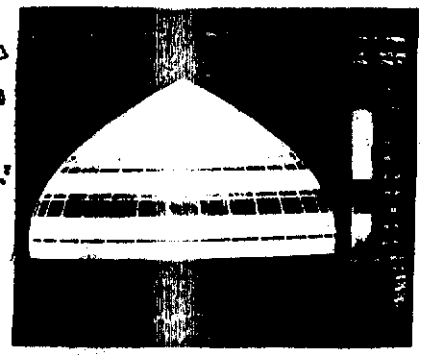
حداکثر تنش‌های اصلی به صورت مداری و کششی در نواحی شکر گاه ایجاد و برابر ۹٪ تنش مجاز است.

در مقابل تنش فشاری به صورت نصف النهاری حدود ۱۶٪ تنش مجاز فشاری در محل تکیه گاه ایجاد شده است.

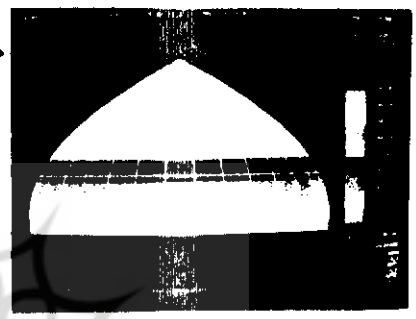
حداکثر تنش برشی برابر با ۲۳٪ تنش مجاز و در محل تکیه گاه قرار دارد. (تصویر ۲۱)



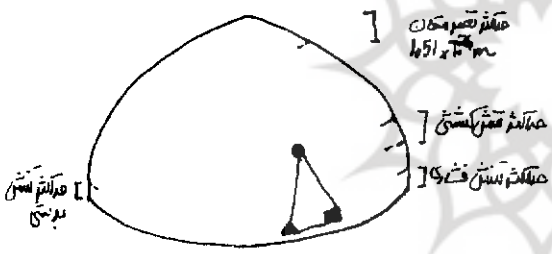
حداکثر تنش برشی
max-shear stress
$599.4 \times 10^{2}\ N/m^2$



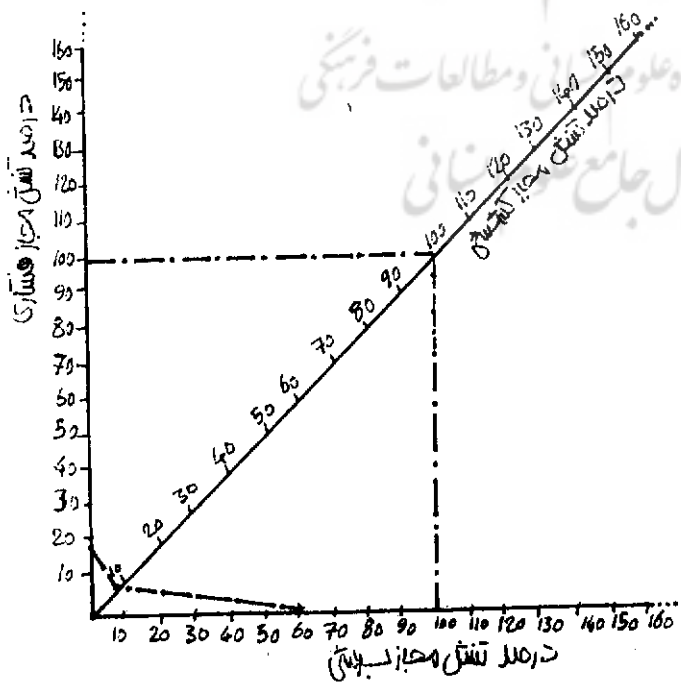
حداکثر تنش محیطی
Hoop Stress
$197.1 \times 10^{2}\ N/m^2$



حداکثر تنش نصف النهاری
Meridian stress
$-1129 \times 10^{3}\ N/m^2$



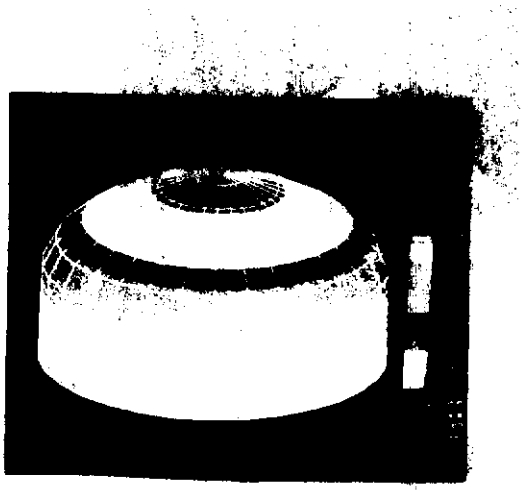
تنش کششی ●
تنش فشاری ■
تنش برشی ▲

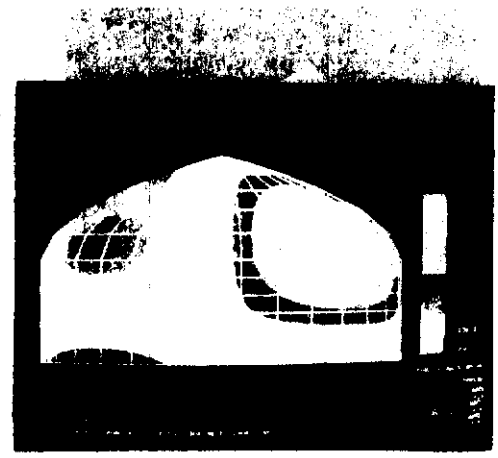


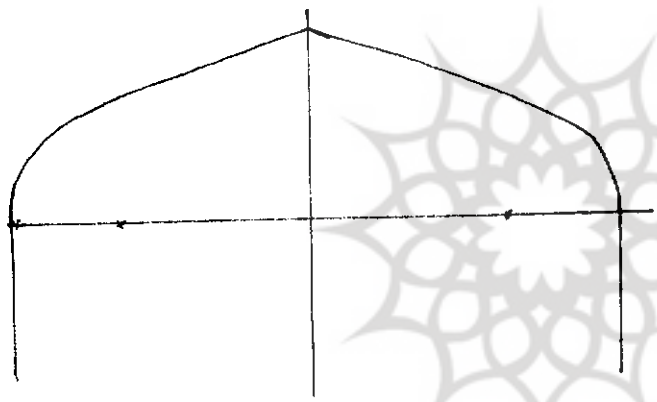
محدوده تنش مجاز
محدوده تنش موجود

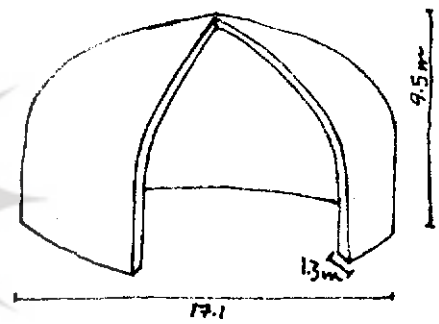
تصویر ۲۱

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی









٤-٢٢)نحوه ترسیم قوس کند شکسته

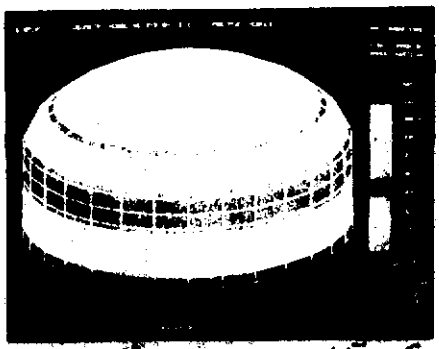
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

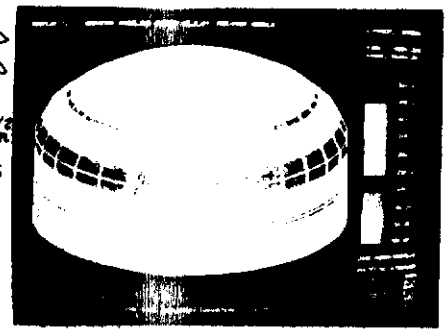
۱-۲-۳-۱-۹-گنبد با قوس کند شکسته:

دهانهٔ در نظر گرفته شده برای این گنبد ۱۴/۵ متر و ضخامت ۱/۳ متر است که به این ترتیب قطر خارجی آن ۱۷/۱ متر، ارتفاع خارجی آن حدود ۹/۵ متر می‌باشد.

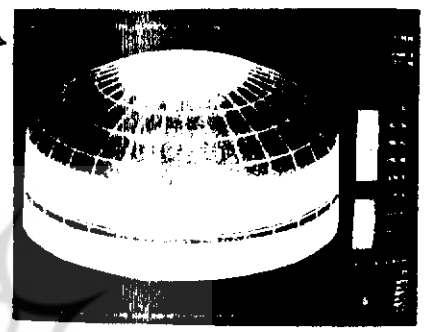
این گنبد با ۳۶۰ المان و ۳۶۱ گره تحت بار وزن آنالیز شده که بیشترین تغییر مکان در تیزه و برابر با ۳/۱ E-۴ متر است.تنش‌های اصلی به صورت مداری در نقطهٔ شکرگاه قوس و برابر با ۳۰٪ تنش مجاز کششی است.

مقدار تنش نصف النهاری که در محل پای کار و تکیه گاه به صورت فشاری و ۱۸٪ تنش مجاز فشاری است و بیشترین تنش برشی در دو نقطه پای کار و شکر گاه حدود ۶۵٪ تنش مجاز برشی را تشکیل می‌دهد.(تصویر ۲۲)





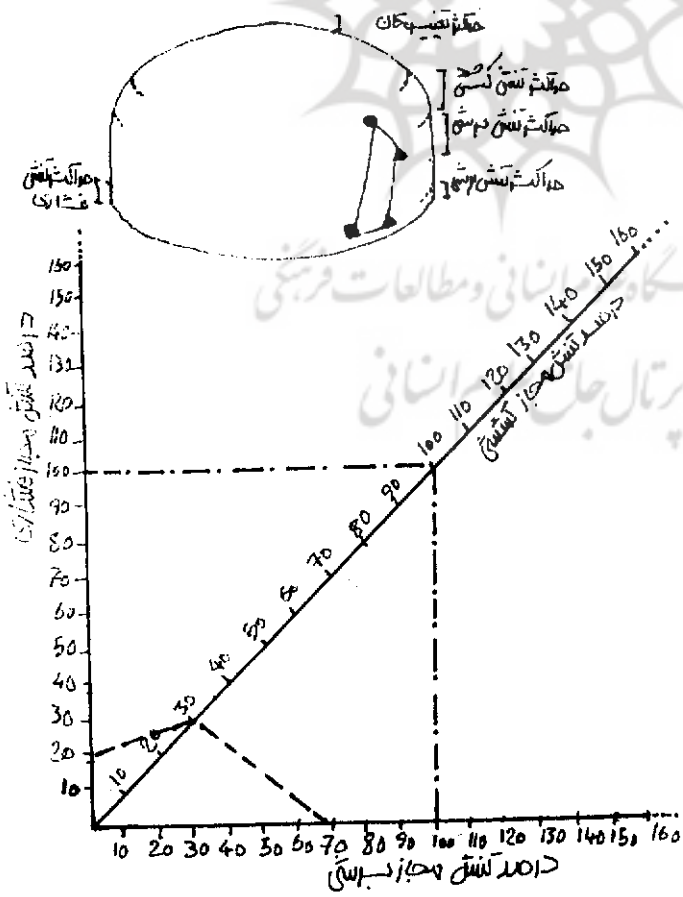
حداکثر تنش هوپ
-560.5×10^2 N/m²
Hoop stress



حداکثر تنش برشی 669.7×10^2 N/m²
max. Shear stress

حداکثر تنش نصف النهاری
-130.7×10^3 N/m²
meridian stress

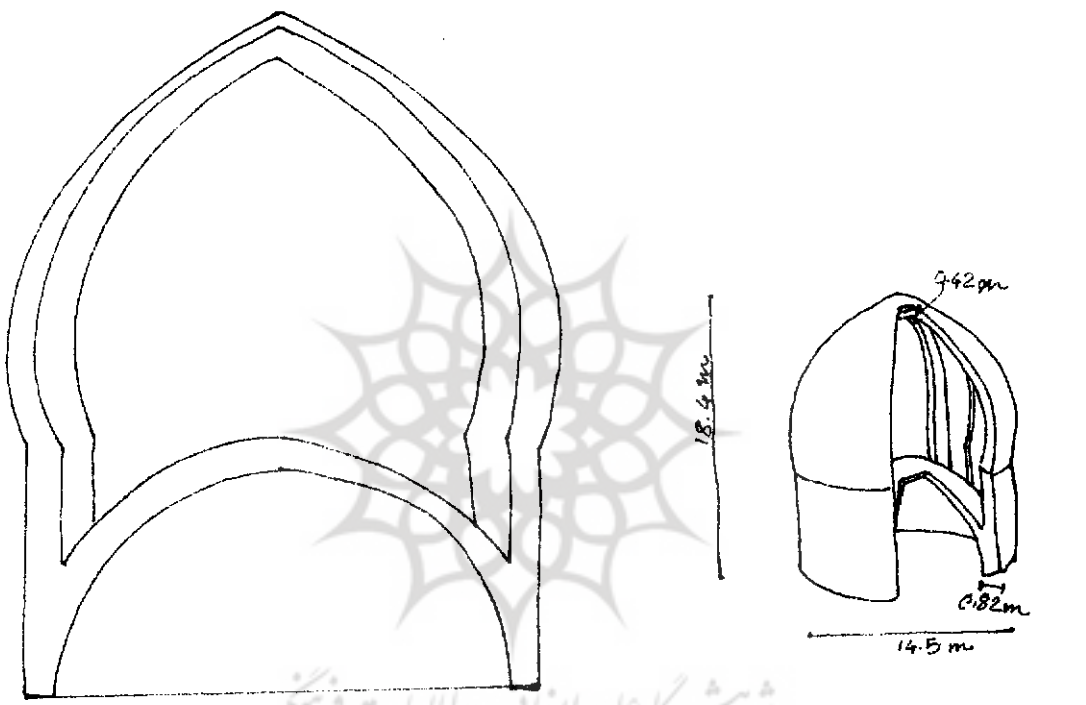
تنش کشش
تنش فشاری
تنش برشی



محدوده تنش مجاز
محدوده تنش موجود

تصویر ۲۲

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی



٤-٢٣)نحوه ترسیم گنبد دوپوش بلند

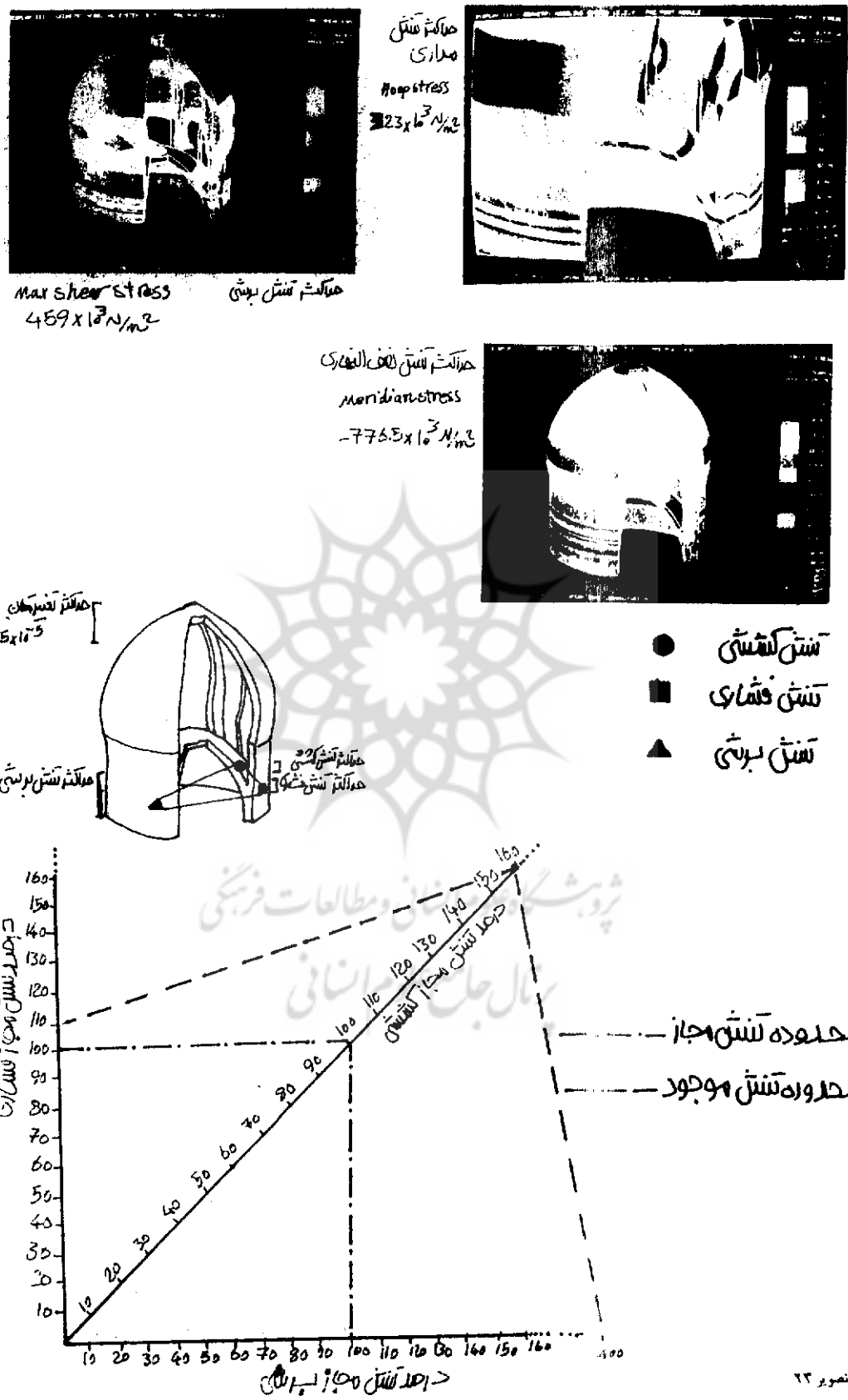
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۱-۲-۳-۱-۱۰-گنبد دو پوش بلند (با خشخاشی):

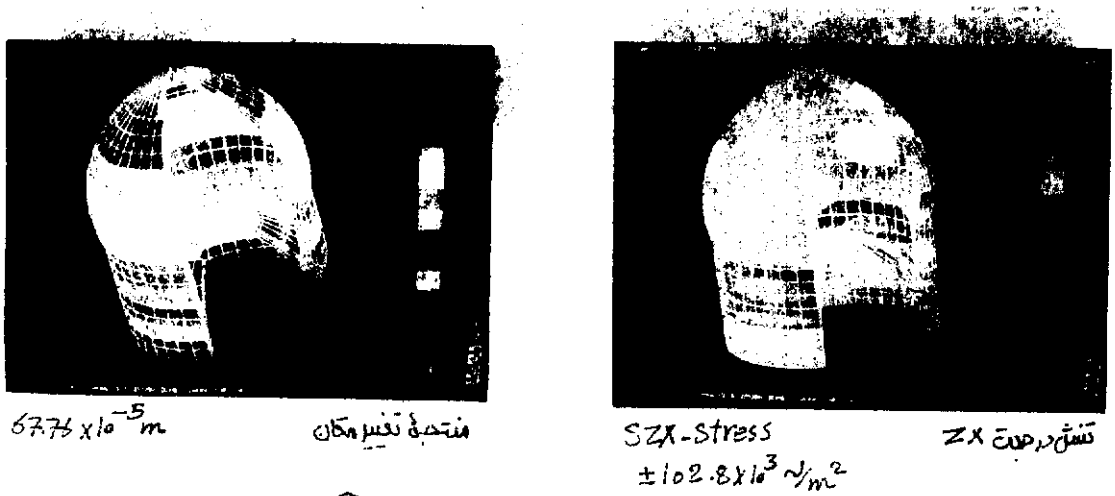
این گنبد که به صورت دو پوش گسسته دارای ۱۰ خشخاشی است دهانه آن ۱۴/۵ متر و ارتفاع آن حدود ۱۸/۴ متر، ضخامت پوسته‌ها از ۸۲ سانتی متر شروع و در تیزه به حدود ۴۰ سانتی متر می‌رسد. این گنبد با ۱۴۳۲۰ المان و ۶۲۹۱ گره تحت با روزن آنالیز شده که بیشترین تغییر مکان آن در تیزه پوشش بیرونی و خشخاشی‌ها به حدود ۴- E ۷/۵ متر می‌رسد.

تنش اصلی آن به صورت مداری و در محل اتصال دو پوسته به هم حدود ۱/۶ برابر تنش مجاز بر روی سطح بیرونی پوسته داخلی است و در مابقی نواحی کمتر از مقدار مجاز است.

تنش نصف النهاری به صورت فشاری، در محل اتصال دو پوش از بیرون به حدود ۱/۱ مقدار مجاز نزدیک می‌شود. مقدار تنش برشی در این گنبد تا ۴ برابر تنش مجاز افزایش می‌یابد که در سطح بیرونی بیشتر قابل مشاهده است. (تصویر ۲۳)


حداکثر تنش مداری
Hoop stress
$23 \times 10^3 N/m^2$
حداکثر تنش برشی
Max shear stress
$459 \times 10^3 N/m^2$
حداکثر تنش نصف النهاری
Meridian stress
$-775.5 \times 10^3 N/m^2$
تنش کششی
تنش فشاری
تنش برشی
حداکثر تغییر مکان
75×10^{-5}
حداکثر تنش برشی
حداکثر تنش کششی
حداکثر تنش فشاری
محدوده تنش مجاز
محدوده تنش موجود
درصد تنش موجود از تنش مجاز
درصد تنش مجاز از تنش نهایی

نصویر ۲۲



۴-۲۴) نحوه ترسیم گنبد [illegible]

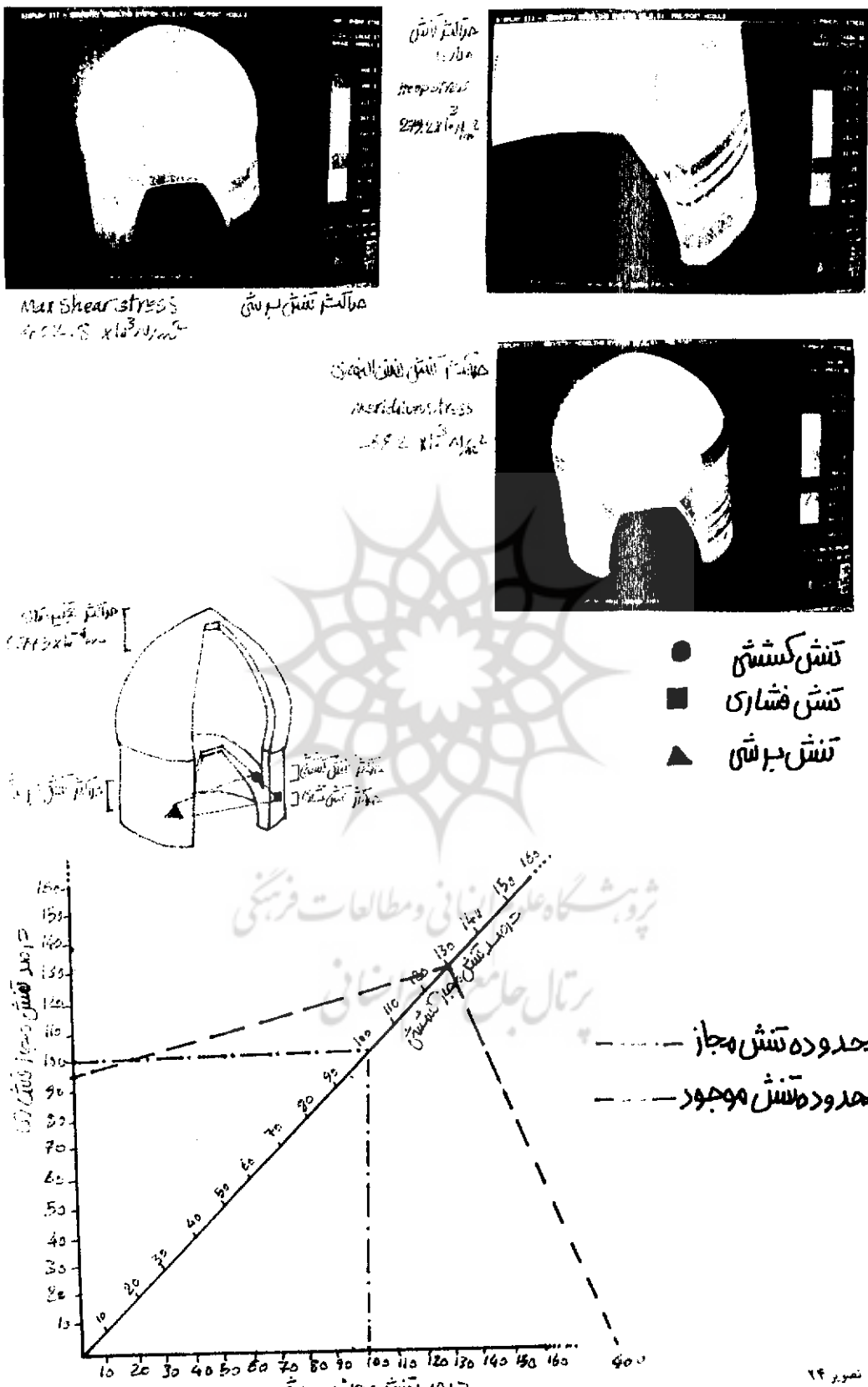
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۱-۲-۳-۱-۱۱- گنبد با دو پوش بلند (بدون خشخاشی):

این گنبد به صورت دو پوش گسسته و بدون خشخاشی است دهانهٔ آن ۱۴/۵ متر و ارتفاع آن حدود ۱۸/۴ متر، ضخامت پوسته‌ها از ۸۲ سانتی متر شروع و در تیزه به حدود ۴۰ سانتی متر می‌باشد.

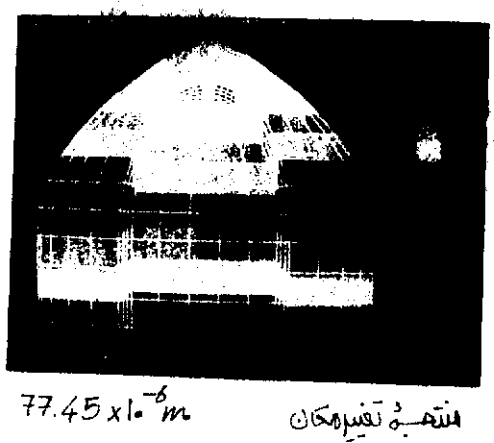
این گنبد با ۲۸۸۰ المان و ۳۸۸۸ گره تحت بار وزن آنالیز شده است. بیشترین تغییر مکان در محدوده تیزه و حدود E-۴ ۶/۷۷۶ متر است.

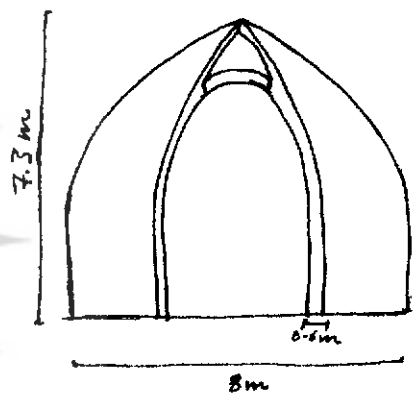
مقدار تنش‌های اصلی که به صورت مداری و کششی در محل [illegible] گاه قوس زیرین - در سطح بیرونی پوشش زیرین - به ۱/۳ [illegible] تنش مجاز نزدیک می‌شود. تنش برشی در محل شکر گاه قوس زیرین - محل اتصال دو پوشش به هم - به حداکثر مقدار خود [illegible] حدود ۴ برابر تنش مجاز است نزدیک می‌شود و در مابقی [illegible] حی در حد مجاز باقی می‌ماند. (تصویر ۲۴)



تصویر ۲۴

اثر / ۳۳ و ۳۴





٤-٢٥)ترسیم گنبد دوپوش تیز

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۱-۲-۳-۱-۱۲-گنبد با دو پوش تیز:

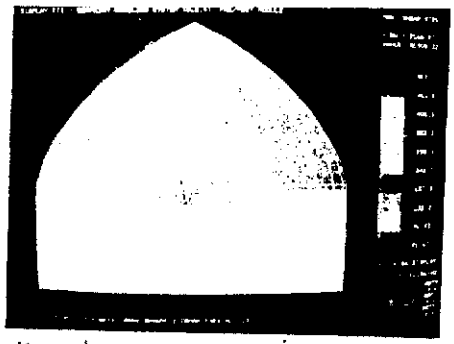
این گنبد به صورت دو پوش با دهانه ۸متر و ارتفاع ۷/۳متر توسط ۲۱۶۰ المان و ۳۰۴۳ المان بر اساس با روزن آنالیز شده است. ضخامت آن در پای گنبد حدود ۶۰ سانتی متر و در تیزه به حدود ۳۰ سانتی متر می‌رسد.

بیشترین تغییر مکان در تیزه پوشش زیرین و حدود ۷/۷ E-۵ متر است.

تنش‌های اصلی به صورت مداری و کششی در محدوده شکر گاه قوس و حدود ۱۲/۵ ٪ تنش مجاز می‌باشد.

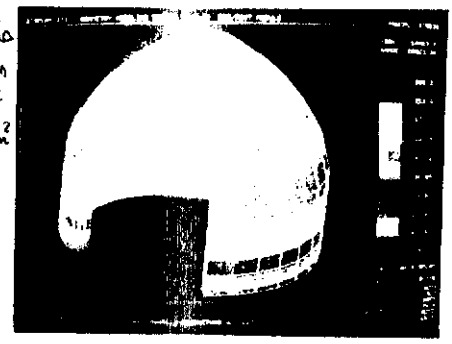
تنش نصف‌النهاری در محل تکیه گاه به حداکثر خود که حدود ۵۲٪ تنش مجاز است نزد یک می‌شود و اما این تنش در سطح بیرونی مشخص نیست.

تنش برشی در محدودهٔ شکرگاه گنبد به حدود ۲۰٪ مقدار مجاز می‌رسد. (تصویر ۲۵)

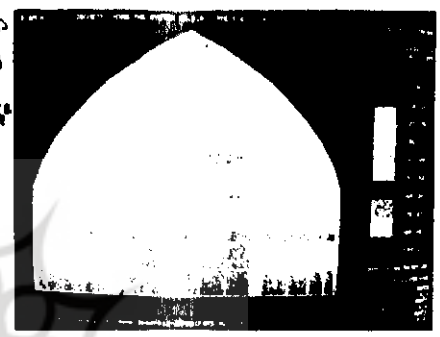


حداکثر تنش برشی

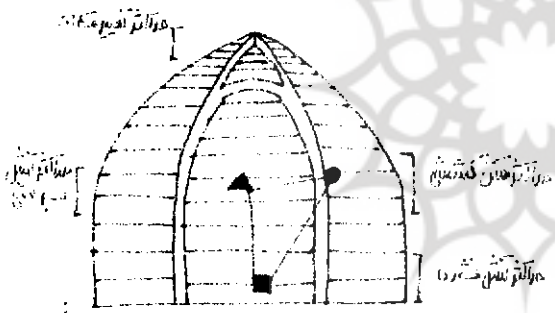
Max. shear stress
519.1×10^{2} N/m^2



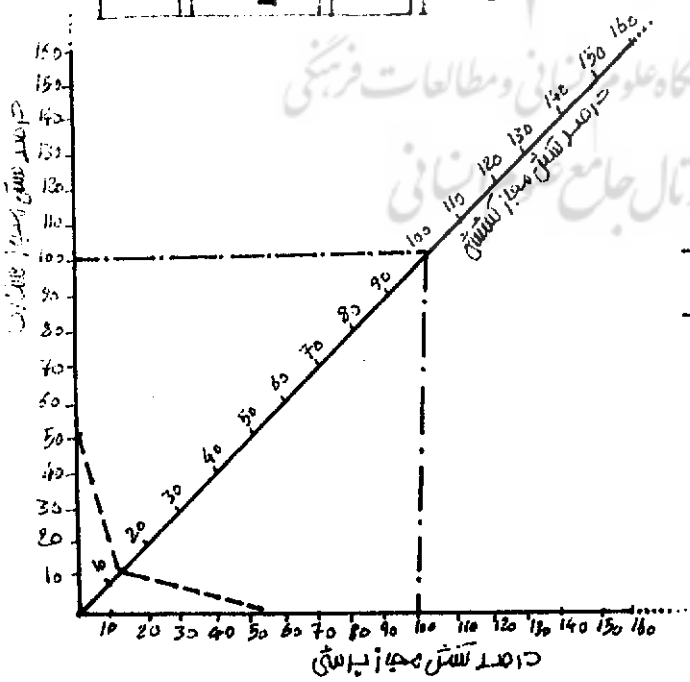
حداکثر تنش کششی
مقادیر
2582×10^{2} N/m^2



حداکثر تنش فشاری
-1001×10^{3} N/m^2

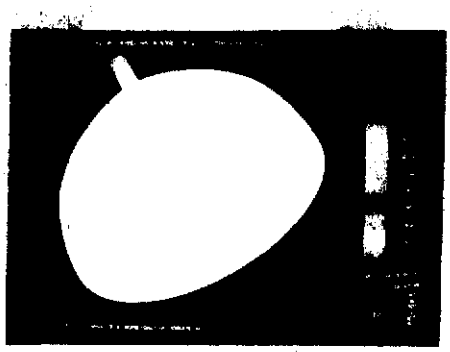


تنش کششی
تنش فشاری
تنش برشی

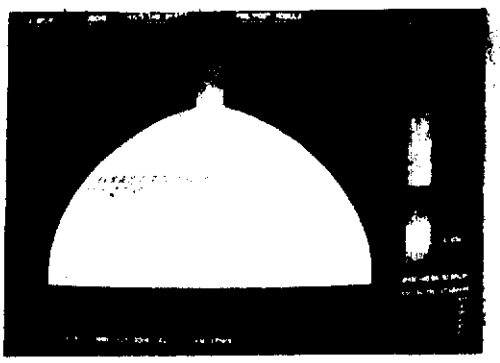


تصویر ۲۵

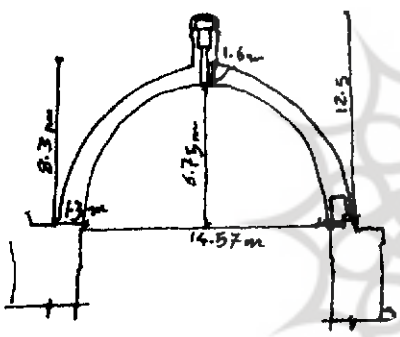
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی



مدل پوسته:
منحنی تغییرمکان
20.71×10^{-5}



مدل حجمی:
منحنی تغییرمکان
20.13×10^{-5} m



٤-٢٦)ابعاد واندازه های گنبدخمارتاشی

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۱-۲-۳-۱-۱۳-گنبد خمار تاشی مسجد جامع قزوین:

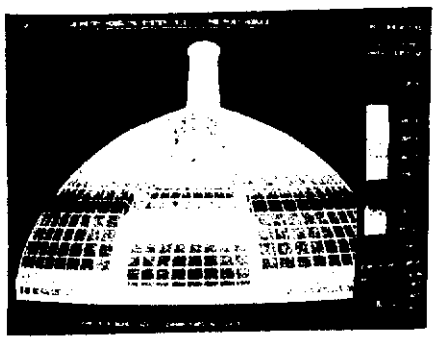
این گنبد در اندازه واقعی خود با استفاده از ۳۹۱۵ المان و ۴۰۳۵ گره تحت بار وزن مدل شده است، به منظور بالا بردن دقت آنالیز و با توجه به ضخامت گنبد، از دو مدل پوسته[1] و حجم[2] استفاده شده و آنالیز استاتیکی گنبد دو بار صورت گرفت. بیشترین تغییر مکان به دست آمده در محل طوق گنبد و برابر ۴- E ۲/۰۷ متر است.

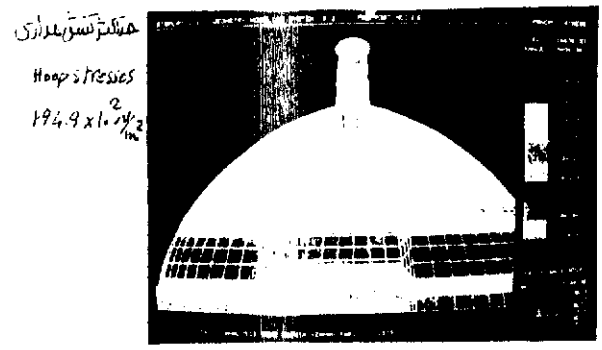
تنش‌های کششی و مداری در محل شکر گاه در بین سطح خارجی - میانی و داخلی از ۱۰٪ تا ۱۵٪ تنش مجاز متغیر است. و تنش نصف النهاری به صورت فشاری در محل تکیه گاه‌ها از ۲۰٪ تا ۳۳٪ تنش مجاز تجاوز نمی‌کند.

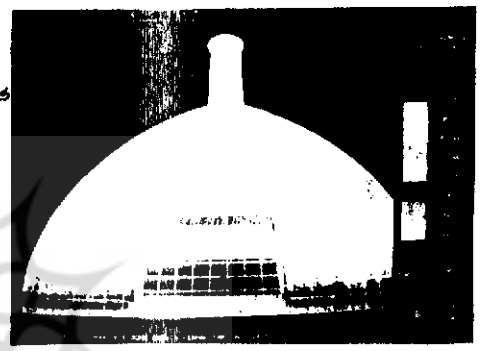
بیشتری تنش نصف النهاری به صورت فشاری در محل تکیه گاه‌ها از ۲۰٪ تا ۳۳٪ تنش مجاز تجاوز نمی‌کند.

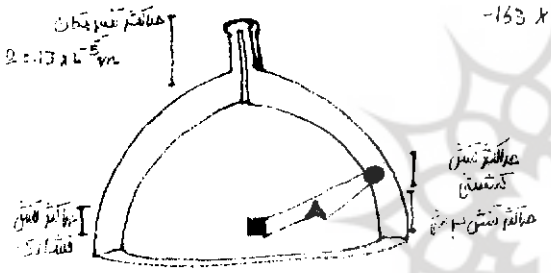
بیشترین تنش برشی در سطح خارجی به اندازه ۸۰٪ تنش مجاز و در سطح داخلی در محل تکیه گاه برابر با تنش مجاز است. (تصویر ۲۶)

1- Shell 2- Solid





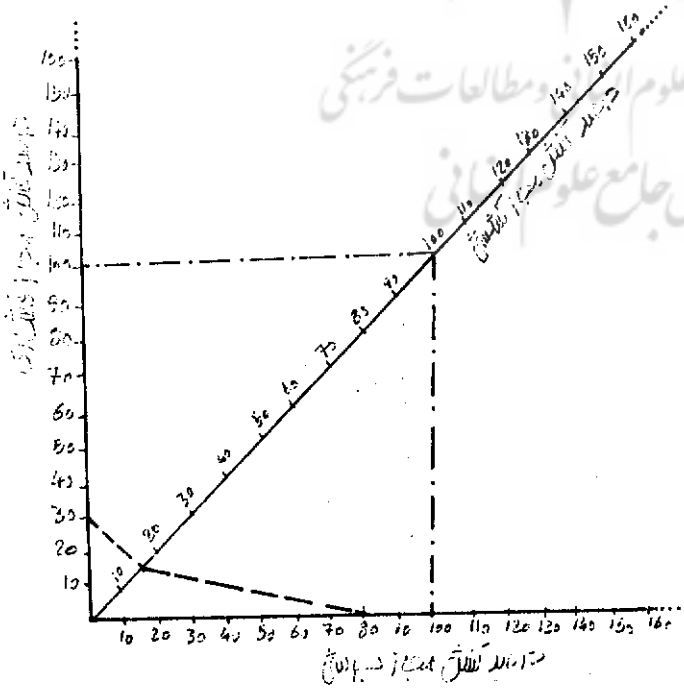




تنش کششی ●

تنش فشاری ■

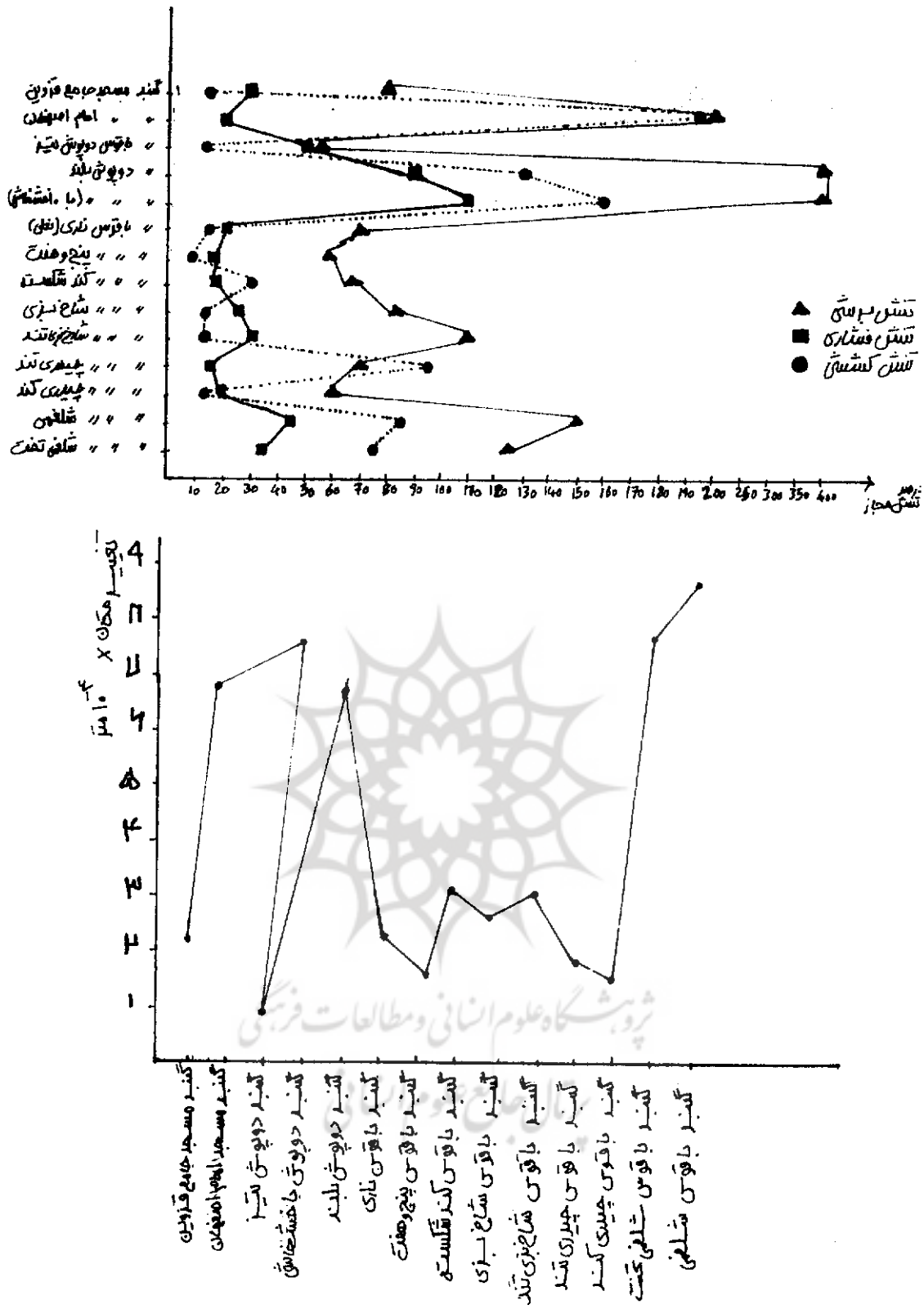
تنش برشی ▲



محدوده تنش مجاز

محدوده تنش موجود

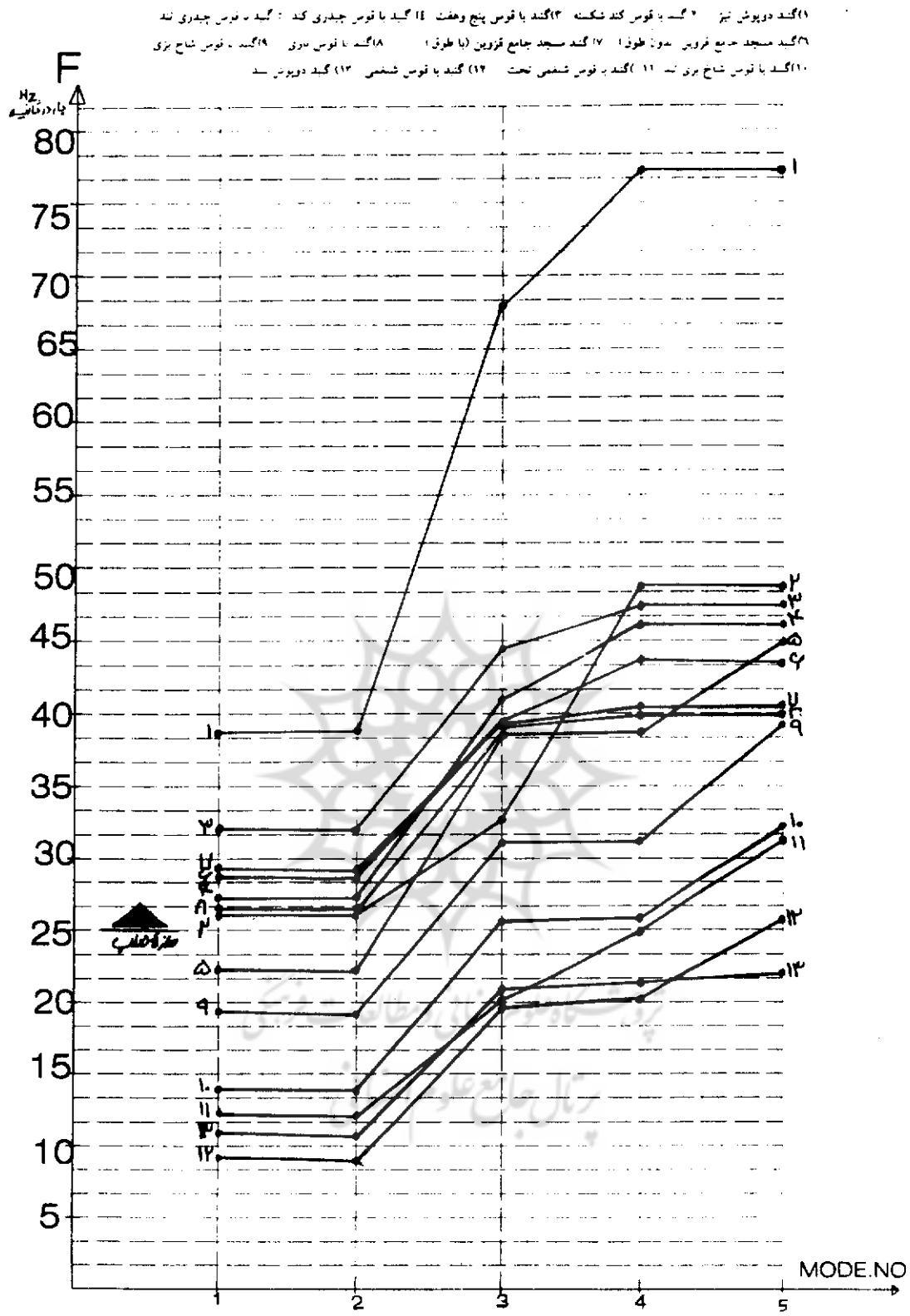
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی



نمودار ۱۱ جدول مقایسه‌ای تنش‌ها و تغییر مکان در گنبدهای ایرانی.

	نوع گنبد	ابعاد (متر)			تعداد المان و گره		ماکزیمم تغییر مکان $\times 10^{-4}$ m	تنش مکزیمم فشاری / تنش مجاز فشاری $\frac{\sigma_{max}}{f_c}$	تنش مکزیمم کششی / تنش مجاز کششی $\frac{\sigma_{max}}{f_c}$	تنش برشی ماکزیمم / تنش مجاز برشی $\frac{\tau_{max}}{f_v}$	نمونه ها
		قطر خارجی (m)	ارتفاع خارجی (m)	ضخامت (m)	المان	گره					
۱.	شلغمی تخت	۱۷/۱	۱۵/۵	۱/۳	۲۷۰	۲۷۱	۸/۵٤	۳٤٪ مجاز	۷۵٪ مجاز	۱۲٤٪ مجاز	
۲.	شلغمی	۱۷/۱	۱۹/۵	۱/۳	٤۵۰	٤۵۱	۷/۷	٤۳٪ مجاز	۸۵٪ مجاز	۱۵۰٪ مجاز	گنبد بقعه شاهچراغ
۳.	چیدری کند	۱۷/۱	۱۲/۵	۱/۳	٦٤۰	٦٤۱	۱/۸۰٤	۱۸٪ مجاز	۱۳٪ مجاز	٦۰٪ مجاز	گنبد مسجد جامع یزد
٤.	چیدری تند	۱۷/۱	۹/۱	۱/۳	٦٤۰	٦٤۱	۱/۵۷	۱۹٪ مجاز	۹۳٪ مجاز	۷۰٪ مجاز	گنبد سید رکن الدین یزد
۵.	شاخ بزی تند	۱۷/۱	۱۹/۷	۱/۳	۳٦۰	۳٦۱	۳/۰۹٦	۳۰٪ مجاز	۱۲٪ مجاز	۱۰۷٪ برابر مجاز	گنبد بی بی شهربانو
٦.	شاخ بزی	۱۷/۱	۱٤/۸	۱/۳	۳٦۰	۳٦۱	۲/٦۱	۲٤٪ مجاز	۱۲٪ مجاز	۸۵٪ مجاز	گنبد قبر آقا [illegible]
۷.	کند شکسته	۱۷/۱	۹/۵	۱/۳	۳٦۰	۳٦۱	۳/۱	۱۸٪ مجاز	۳۰٪ مجاز	٦۵٪ مجاز	
۸.	پنج و هفت	۱۷/۱	۹/٦	۱/۳	۳٦۰	۳٦۱	۱/۵۱	۱٦٪ مجاز	۹٪ مجاز	٦۰٪ مجاز	گنبد مقبره عطار نیشابوری
۹.	ناری (نعلی)	۱۷/۱	۱۱/٤	۱/۳	۳٦۰	۳٦۱	۲/۳۵۸	۲۱٪ مجاز	۱۱٪ مجاز	۷۰٪ مجاز	آثار قبل از اسلام
۱۰.	دوپوش بلند (بدون خشخاشی)	۱٦/۳	۱۸/٤	۸۲.۰/٤	۲۸۸۰	۳۸۸۸	٦/۷۷٦	۹۵٪ مجاز	۱۳۰٪ مجاز	٤۰۰٪ مجاز	
۱۱.	دوپوش بلند (با خشخاشی)	۱٦/۳	۱۸/٤	۸۲.۰/٤	٤۳۲۰	٦۲۹۱	۷/۵	۱۱۰٪ مجاز	۱٦۰٪ مجاز	٤۰۰٪ مجاز	
۱۲.	دوپوش تیز	۹/۲	۷/۵	۰/٦.۰/۳	۲۱٦۰	۳۰٤۳	۰/۷۷	۵۰٪ مجاز	۱۲/۵٪ مجاز	۵۲٪ مجاز	
۱۳.	مسجد امام اصفهان	۲٦/۳	۲٤/٤۵		٦۰۷۲	۵۸۱۰	٦/۹۲	۲۰٪	۲۴۵٪ مجاز	۲۳۵٪ مجاز	
۱٤.	مسجد جامع قزوین	۱۷/۱	۱۲/۵	۱۷.۱/۳	۳۹۱۵	٤۰۳۵	۲/۰۷	۳۳٪	۱۵٪	۸۰٪	

جدول ۲) جدول مقایسه‌ای تطبیقی انواع تنش‌ها در نمونه‌های مورد بررسی



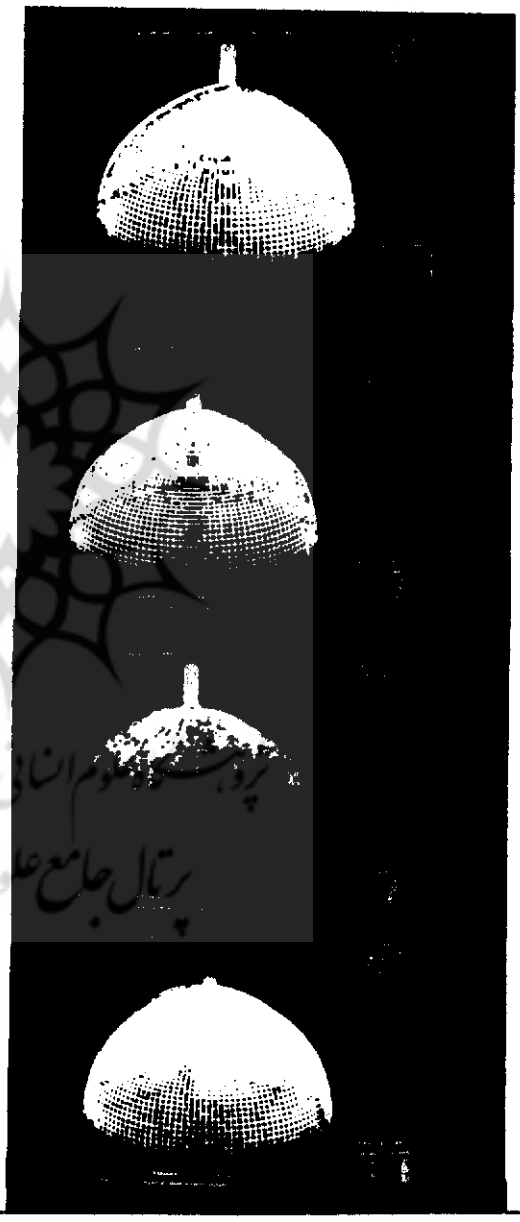
نمودار ۲ ـ آنالیز ارتعاش آزاد انواع فرمهای گنبدی و فرکانس مودهای اول تا پنجم

	نوع گنبد	ابعـــــاد(متر)			تعداد المان و گره		فرکانس تغییر شکل ها در پنج حالت اول (در ثانیه)				
		قطر خارجی	ارتفاع خارجی	ضخامت	المان	گره	مود اول	مود دوم	مود سوم	مود چهارم	مود پنجم
۱	شنعمی نخت	۱۷/۱	۱۵/۵	۱/۳	۲۷۰	۲۷۱	۱۲/۶۲۳۱	۱۲/۶۲۳۱	۲۰/۴۹۱۷	۲۵/۰۱۵۹	۳۰/۱۶۹۵
۲	شنعمی	۱۷/۱	۱۹/۵	۱/۳	۴۵۰	۴۵۱	۹/۱۸۷۱۷	۹/۱۸۷۱۷	۱۹/۹۶۶۳	۱۹/۹۶۹۲	۲۵/۵۱۷۲
۳	چیدری کند	۱۷/۱	۱۲/۵	۱/۳	۶۴۰	۶۴۱	۲۷/۲۶۵۵	۲۷/۲۶۵۵	۴۱/۹۳۶۱	۴۶/۴۲۵۵	۴۶/۴۲۵۵
۴	چیدری تند	۱۷/۱	۹/۱	۱/۳	۶۴۰	۶۴۱	۲۶/۵۰۰۶	۲۶/۵۰۰۶	۳۸/۱۵۵۱	۳۸/۱۵۵۱	۴۴/۳۰۸۱
۵	شاخ بزی تند	۱۷/۱	۱۹/۷	۱/۳	۳۶۰	۳۶۱	۱۴/۳۴۹۲	۱۴/۳۴۹۲	۲۵/۳۸۴۴	۲۵/۳۸۴۴	۳۰/۴۲۸۹
۶	شاخ بزی معمولی	۱۷/۱	۱۴/۸	۱/۳	۳۶۰	۳۶۱	۱۹/۵۳۳۴	۱۹/۵۳۳۴	۳۱/۱۳۹۹	۳۱/۱۳۹۹	۳۸/۷۶۳۱
۷	کند شکسته	۱۷/۱	۹/۵	۱/۳	۳۶۰	۳۶۱	۲۶/۲۶۹۸	۲۶/۲۶۹۸	۳۳/۲۲۹۸	۴۷/۶۴۱۴	۴۷/۶۴۱۴
۸	پنج وهفت	۱۷/۱	۹/۶	۱/۳	۳۶۰	۳۶۱	۳۲/۵۹۶۰	۳۲/۵۹۶۰	۴۴/۸۳۷۰	۴۶/۵۳۳۵	۴۶/۵۳۳۵
۹	ناری(تعلی)	۱۷/۱	۱۱/۴	۱/۳	۳۶۰	۳۶۱	۲۲/۴۴۳۶	۲۲/۴۴۳۶	۳۸/۷۱۲۷	۳۹/۱۸۷۷	۳۹/۱۸۷۷
۱۰	دو پوش بلند(بدون خستخاشی)	۱۶/۳	۱۸/۴	/۸۲،۰/۴	۲۸۸۰	۳۸۸۸	۱۰/۵۰۸۲	۱۰/۵۰۸۲	۲۱/۴۳۵۳	۲۱/۴۳۵۳	۲۱/۸۲۱۳
۱۲	مسجد جامع قزوین	۱۷/۱		۱۷،۱/۳	۳۹۱۵	۴۰۳۵	۲۷/۹۳۰۵	۲۷/۹۳۰۵	۳۹/۳۹۳۰	۴۰/۰۵۸۶	۴۰/۰۵۸۶
۱۳	مسجد جامع قزوین(بدون طوق)	۱۷/۱		۱۷،۱/۳	۳۹۱۵	۴۰۳۵	۲۸/۱۵۰۳	۲۸/۱۵۰۳	۳۹/۹۲۹۶	۴۳/۹۸۳۹	۴۳/۹۸۳۹۴

تغییر شکل های گنبد مسجد جامع قزوین

(آنالیز ارتعاش آزاد)

مود شکل ها با توجه به فرکانس بدست آمده سختی یا نرمی سازه را مشخص می کنند.سازه سخت فرکانس بیشتر را دارا می باشد(بزرگتر یا مساوی ۲۵ هرتز) وسازه نرم فرکانس کمتری دارد (کمتر یا مساوی ۵ هرتز)ودر مقابل بار دینامیکی مخصوصاً زلزله ایستایی ندارد. فرکانس مود اول مبنای محاسبه سختی یا نرمی سازه است ومودهای بعدی می توانند مقدار تشدید احتمالی را مشخص کنند. با توجه به اینکه طوق گنبد دارای فرکانس کمتری می باشد لذا در این آنالیز طوق گنبد حذف شده ومودهای بدست آمده مربوط به گنبد است.



فرکانس مود اول:۲۷/۹۳۰۵هرتز

فرکانس مود سوم:۳۹/۳۹۳هرتز

فرکانس مود چهارم:٤٠/٠٥٨٦هرتز

فرکانس مود ششم:٤٤/٠٦٨هرتز

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۱-۲-۳-۲- آنالیز دینامیکی:

۱-۲-۳-۲-۱- آنالیز در حالت ارتعاش آزاد:

کلیه سازه‌ها تا حد معینی دارای خاصیت ارتجاعی (الاستیک) و به عبارت دیگر دارای خاصیت تغییر شکل پذیری تحت بار و برگشت به حالت اولیه به محض برداشتن بار می‌باشند. پیامد این خاصیت ارتجاعی سازه‌ها، تمایل آنها به نوسان است. این نوسان فقط تابع جرم و سختی سازه است و ارتباط با بارگذاری ندارد. بنابراین نوسان سازه یا مدت زمان رفت و برگشت آن تحت بار دینامیکی (پریودT) معیار مناسبی برای تشخیص صلبیت یک سازه است. به طوری که اگر جرم زیاد شود مدت زمان رفت و برگشت زیاد شده و سازه سخت است و از جایی که در مقابل نیرویی همچون زلزله با زمین حرکت می‌کند مقاومت کمتری دارد و در مقابل سازهٔ نرم ایستا می‌ماند.

با آن که اکثر نیروهای دینامیکی (از جمله زلزله) به نوعی دارای استهلاک می‌باشند در حالت ارتعاش آزاد بر اساس معادله مربوط، نوسان کامل یک سازه[۱] توسط مودهایی[۲] مشخص می‌شود که در اثر نیروهای دینامیکی (مثلاً زلزله) به وجود آمده‌اند.

با توجه به خصوصیات مصالح بنایی (ضریب استهلاک = ۰/۰۷) در صورتی که اولین فرکانس طبیعی (همانطور که داده شدهٔ مودها کوچک‌تر از ۰/۰۵ هرتز ($F1=0.05Hz$[۳]) سازه یا سیستم نرم و فرکانس بیشتر یا مساوی ۲۵ در ثانیه ($F1=25Hz$) سازه یا سیستم صلب یا سخت (مقاوم‌تر) را نشان می‌دهد. در بررسی زیر فرکانس پنج مود اول گنبد ایرانی مشخص شده تا با مقایسه اجمالی سازه نرم‌تر و مقاوم‌تر مشخص شود که این بررسی می‌تواند با توجه به نقشهٔ پراکندگی انواع گنبدها در سطح ایران، مقدار آسیب پذیری آنها را در مقابل زلزله مشخص کند.[۴] (نمودار ۲ و جدول ۳)

۲- مرمت گنبدهای آجری:

ماندگاری آثار ارزشمند معماری در گرو طراحی، اجرا و حفاظت صحیح از آنهاست. بر خلاف امروز، معمار دیروز همهٔ تلاش خود را معطوف حفظ تمام وجوه اثر معماری (کالبدی، زیبا شناختی،...) می‌کرد. او برای حفظ جلوه و جلای معماری پیکره و سازه‌ای مناسب و شایسته در نظر می‌گرفت و قبل از هر چیز به آیندهٔ بنا می‌اندیشید.

بنابراین به جرأت می‌توان اظهار داشت رسیدن به انواع فرم‌های ساختمانی، حاصل کوششی در همین راستا است. معهذا تنوع موجود در گنبدها از این قاعده مستثنی نبوده و با دقت در بخش‌های پیشین این فصل، تلاش کاملاً مشهود است. روش‌های مختلف اجرا، بهره گیری از انواع قوس‌ها، مصالح، تناسبات،... همه و همه در افزایش عمر بنا و حفظ شکل ظاهری آن نقش اول را داشته‌اند و حفاظت قبل از مرمت به عنوان یک اصل همواره در کنار دیگر اصول طراحی معماری حضور داشته است.

۲-۱- حفاظت قبل از مرمت:[۵]

بحث درباره این موضوع به نظر ممکن است غیر منطقی و خالی از فایده باشد ولیکن با قدری تحمل و تأمل در بخش‌های پیشین، این مبحث می‌تواند برای دستیابی به راه حل‌های مرمت گنبدها در نزد خوانندهٔ این سطور اهمیت پیدا کند. در بحث آنالیز سازه‌ای انواع گنبدهای آجری با دقت بر روی انواع تنش‌های به وجود آمده به لحاظ مقدار، موقعیت، فرم گنبد،... تا حدی به آسیب شناسی انواع گنبدها می‌توان پرداخت که بسیاری از آنها پیش از این با تمهیدات معمارانه کنترل شده‌اند. برخی از تمهیدات با توجه به تنش‌ها (بر اساس نوع آنالیز انجام شده) از نظر استاتیکی و دینامیکی قابل بررسی هستند:

الف - تغییر فرم و استفاده از انواع قوس‌ها:

۱- دستیابی به انواع قوس‌های مازه دار و تیزه دار (تصویر ۲۸)

۲- ترکیب قوس‌ها با هم در گنبدهای دو پوش (تصویر ۲۷)

۳- تغییر در تناسبات بین دهانه و خیز

۴- ...

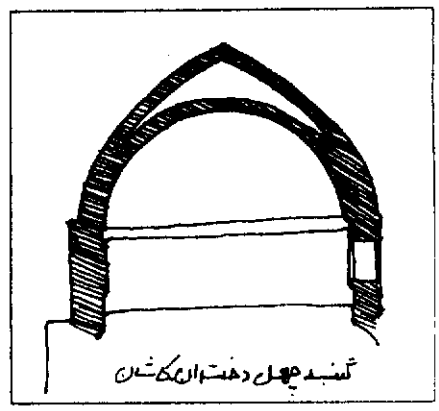
۱- که به آن زمان تناوب یا پریود سازه می‌گویند و با T مشخص می‌شود.

۲- Mode: وقتی یک سازه با یک فرکانس معین (Wi) ارتعاش می‌کند، شکل مربوط به آن ارتعاش یگانه است و اندازهٔ دامنهٔ آن اختیاری است. مود مربوط به یخ Wi «مود i ام» نامیده می‌شود.

۳- $F=\frac{1}{T}$

۴- حجازی، مهرداد، همان منبع.

5- Prevention



۲۸/برگشت نیروهای افقی در گنبد دوپوش

ب ـ تغییر و تصرف در ساختار کالبدی و انتقال نیروها از تیزه تا پاکار گنبد:

۱- استفاده از مصالح مقاوم‌تر در نقاطی که در معرض تنش کششی می‌باشند. استفاده از الوارهای چوبی در شکر گاه گنبدها نمونه‌ای از این اقدام است.[۱] (تصویر ۲۹)

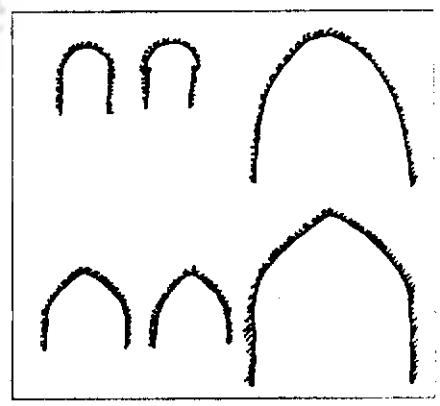
۲- تنوع در شیوه‌های اجرایی همچون ترکین، رگ چین و دور چین

۳- پرهیز از ایجاد روزنه در مناطق بحرانی سازه

۴- کاهش تدریجی ضخامت گنبد از پاکار تا تیزه

۵- استفاده از انواع گنبدهای دو پوسته پیوسته

۶- استفاده از خشخاشی در گنبدهای دو پوسته گسسته برای



۳۰/انواع تزیینات خشخاشی در گنبدهای دوپوسته

مقابله با نیروهای دینامیکی و زلزله

۷- ایجاد رینگ یا حلقهٔ کششی، فشاری در پاکار گنبد

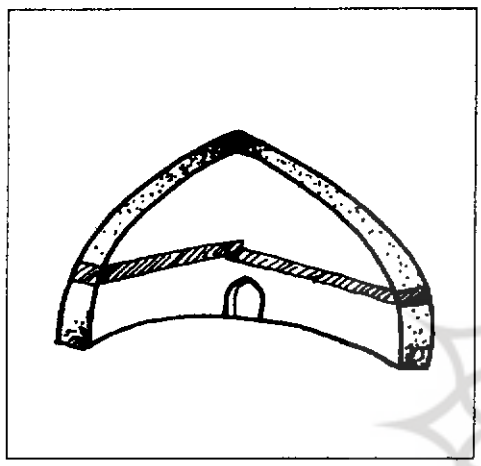
۸- ...

ج ـ کنترل و هدایت صحیح نیروها از پاکار گنبد به زمین:

۱- افزایش نقاط تکیه گاهی کاملاً گیر دار گنبد با استفاده از انواع گوشه سازی‌ها

۲- افزایش ضخامت در محل انتقال نیرو از گنبد به گوشه سازی برای جلوگیری از رانش

۳- تقسیم نیروهای فشاری به واحدهای کوچک‌تر و انتقال



۲۹/مقابله با تنش های کششی با استفاده از کلاف چوبی

متساوی نیروها در پایه گنبد برای جلوگیری از نشست نقطه‌ای (طاق بندی و گوشه سازی) (تصویر ۳۰)

۴- کلاف کردن گوشه سازی‌ها با استفاده از کلاف چوبی به صورت مستتر

۵- ...

به نظر می‌آید بسیاری از موارد ذکر شده بالا نه به عنوان یک راه حل، بلکه به عنوان یک تکنیک در اجرای ساختمان‌های گنبد دار مورد استفاده قرار گرفته‌اند، به نظر نگارنده استفاده از هر تکنیک،

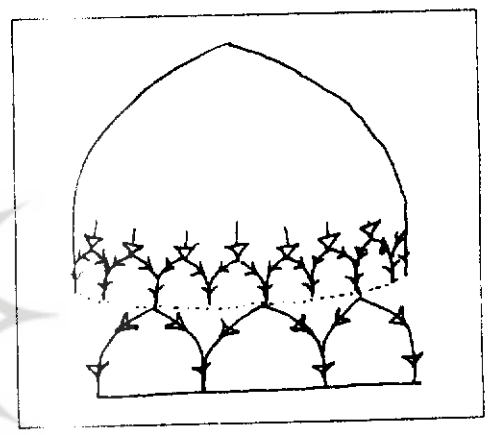
۱- مصالح بنایی در مقایسه با مقاومت فشاری به مراتب دارای مقاومت کششی کمتری هستند.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

تلاشی برای رسیدن به راه‌حل مناسبی است که در طول سالیان دراز معماری پایدارتر را طلب می‌کرده است. این گونه بوده که معماری ایران در طی قرن‌ها همواره پویا و بارور بوده است.

۲-۲- مرمت سنتی:

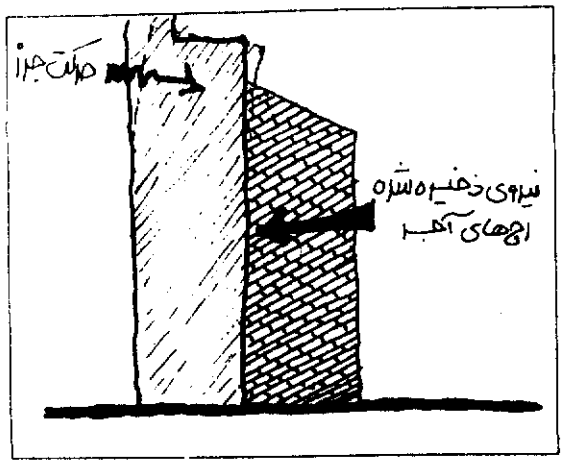
معمولاً اقدامات مرمتی بر روی بناهای تاریخی تا قبل از تشکیل سازمان ملی حفاظت آثار باستانی ایران در سال ۱۳۴۴هش به روش‌های تجربی ـ با همت استادکاران معمار سنتی ـ و در ادامهٔ اقدامات اجرایی حفاظت قبل از مرمت، صورت می‌گرفته است. علیرغم شناخت غیر کلاسیک از سازه گنبد و آسیب‌های آن،



۳۰) تقسیم نیروهای فشاری به دو جزء افقی و

بسیاری از اقدامات مرمتی کاملاً از توجیه سازه‌ای برخوردار هستند ولیکن از نظر دیگر می‌توانسته‌اند خیلی از اشکال نباشند و در اکثر موارد بخش‌های افزوده، باعث از بین رفتن خلوص ظاهری و فرم استتیکی (زیبا شناختی) بنا شده‌اند.(۲)

با دقت بر روی گنبدهای ایرانی و شناخت آسیب‌های آنها به طور کلی می‌توان چند دستهٔ کلی از عوارض را که به صورت ترک و یا نهیدگی در نقاط مختلف گنبدها بروز کرده‌اند، مشاهده کرد. هر کدام از این عوارض متأثر از عواملی همچون نیروهای استاتیکی و دینامیکی راه حل متناسب با خود را می‌طلبیده‌اند. زمین لرزه اکثر مناطق ایران از جمله نیروهای دینامیکی غیر قابل پیش بینی و در عین حال مخرب برای بناهای تاریخی است که در صورت وقوع تأثیرهای متفاوتی را بر روی انواع گنبدها خواهد گذاشت. نشست پی‌ها و جرها، تمرکز تنش در محل روزنه‌های



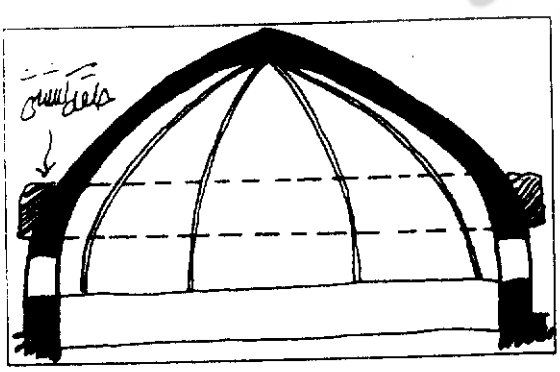
۳۱) فرودن هو با پشت بند درمسجد جمع قزوین و مسجد شیخ لطف الله با استفاده از نرم های مورب آجر

گنبد، ضعف گوشه سازی‌ها و پایهٔ گنبدها به علل مختلف و... از جمله عوامل مخلی هستند که در ادامهٔ آنها عوارض متعددی را بر روی انواع گنبدها به وجود آورده‌اند. به طور کلی می‌توان به برخی از روش‌ها و اقدامات مرمتی در دوران سنتی برای حفظ گنبد بناهای تاریخی اشاره کرد:

الف ـ بازسازی بخش‌های فرو ریخته گنبد، که در اثر زلزله یا علل دیگر فرو ریخته است. (گنبد چلبی اوغلی ـ سلطانیه)

ب ـ تقویت پایه‌ها و جلوگیری از ادامه رانش با افزودن پشت

۲- در نمونه‌ای همچون مسجد جامع اشترجان رینگ افزوده شده در روی گنبد کاملاً منظر گنبد را مخدوش کرده است.



۳۲) فرودن حلقه کششی در گنبد مسجد جمع اشترجان

بند یا هو در نمونه‌هایی همچون گنبد مسجد شیخ لطف الله و مسجد جامع قزوین.(تصویر ۳۱)

ج ـ افزودن حلقه کشتی در محل شکر گاه یا منطقه‌ای که تنش‌های کشتی باعث ایجاد ترک شده‌اند. (مسجد جامع اشتر جان)(تصویر ۳۲)

د ـ افزودن حلقه کشتی یا فشاری در پای گنبدهایی که در محل پای کار که ترک‌های موازی با نصف النهار دارند.

هـ تعویض آجرهای پوسیده و بند کشی برای محافظت مداوم از آن‌ها

و ـ تعویض چوب بالای روزنه‌ها که در طی سالیان دراز پوسیده شده‌اند

ز ـ مسدود کردن روزنه‌هایی که دارای ترک در بالا و امتداد نصف النهاری هستند. (مسجد جامع اشتر جان)

ح ـ افزودن یک یا دو مهار کش چوبی، کابلی یا آهنی به صورت قطری و عمود بر هم در گنبدهایی که ترک عمودی در جهت نصف النهاری دارند. (مسجد استاد و شاگرد، تبریز)

ط ـ تقویت عناصر پیوسته به گنبد خانه که در حال رانش یا نشست هستند (ایوان جنوبی مسجد امام، اصفهان)

ی ـ تعویض خشخاشی‌ها و مهار کش‌های چوبی در گنبدهای دو پوسته گسسته با عناصر فلزی (بقعه آستانه، شیراز)

ک ـ ...

۲-۳- مرمت علمی:

حضور مباحث مرمتی در دانشگاهها و مجامع علمی باعث شد تا بسیاری از فعالیت‌های مرمتی در بناها و شهرهای تاریخی از جمله ایران، با انجام مطالعات جامع و بهره گیری از علوم و فنون ساختمانی صورت گیرد. با تأسیس سازمان ملی حفاظت آثار باستانی در طی سال‌های دهۀ چهل قرن معاصر و بعد از آن که نیروهای متخصص خارجی در گوشه و کنار ایران به فعالیت‌های مرمتی پرداختند، مطالعات جامعی بر روی چند بنای تاریخی انجام شد و مراکز علمی، اجرایی، تحقیقاتی (انستیتو مرمت دانشگاه ملی ایران) به همکاری با آنها پرداختند. گنبد مسجد جامع قزوین، گنبد سلطانیه، گنبد بقعه شیخ صفی الدین اردبیلی، گنبد نظام الملک اصفهان نمونه‌های اصلی فعالیت‌های مطالعاتی و مرمتی است که با حضور نیروهای متخصص غیر ایرانی و با همکاری نیروهای ایرانی شروع و در طی سالیان بعدی ادامه داشته است. با وجود مطالعات مختلف سازه‌ای کالبدی بر روی این نمونه‌ها تنها اقدامات تکمیلی و عملی در زمینه مرمت گنبد سلطانیه صورت گرفت. و در اکثر این فعالیت‌ها مشاوره استادکاران ایرانی و جسارت آنها در تصمیم‌گیری‌ها حرف اول را می‌زد. به طوری که عملاً تجربه دورۀ سنتی مکمل دورۀ جدید فعالیت‌های مرمتی شد.

با گذر از دوره‌ای تقریباً بیست ساله که از فعالیت نیروهای خارجی در ایران گذشت، فعالیت‌های مرمتی در ایران همراه با تحقیقات میدانی و آزمایشگاهی جای خود را کاملاً در سازمان‌های مسئول باز کرد؛ در نمونه‌های موفق مرمت گنبدها محاسبات سازه‌ای اساس کار قرار گرفت و امروز تجربۀ مرمت گنبد مدرسه سپهسالار که توسط استاد ارجمندم آقای مهندس سعیدی به عنوان یک نمونۀ منحصر به فرد قابل طرح در سطح جهان است.

در نهایت به نظر می‌رسد تلاش متخصصین سازه در شناخت گنبدها و طاق‌ها یاریگر متخصصین مرمت در فعالیت‌های اجرایی است و ضریب اطمینان این فعالیت‌ها را به درجۀ اعلای خود نزدیک می‌کند.

۲-۴- معرفی چند نمونه:

راه کارهای به دست آمده در مرمت بعضی از گنبدها با توجه به نوع عارضه و عامل مخل وارده همواره به عنوان یک تجربه قابل استفاده خواهد بود. نمونه‌هایی که در اینجا به آنها اشاره می‌شود صرف نظر از نوع مرمت (علمی یا سنتی) قابل بحث و نقد هستند.

۲-۴-۱- گنبد سلطانیه:

«فعالیت‌های مرمتی بر روی این بنا توسط گروه ایتالیایی به سرپرستی پروفسور سن پائولوزی شروع شده است. وضعیت بنا قبل از مرمت در گزارش منتشر شدۀ گروه آمده است:

«تمام اسکلت بنا از آجر ساخته شده و ملاط به کار رفته در بنایی

ملقمه‌ای است و از گچ تشکیل شده است. به علت وجود ترک‌های وسیع و متعدد و همچنین خرابی تدریجی قسمت‌های خارجی بنا و به دلیل عدم محافظت و صیانت آن بسیار آسیب دیده و ویران به نظر می‌آید.

شدیدترین ترک‌ها بر روی گنبد ظاهر شده و این ترک‌ها در امتداد نصف النهارات وارد شده و ادامه آنها در جهت تقریباً عمودی تا زمین کشیده شده است. حداکثر عرض شکافها در حدود ۵ تا ۶ سانتی متر است و شکافهایی با عرض (؟) در حدود چند سانتی متر زیاد مشاهده می‌شود.(تصویر ۳۲)

در امتداد مداری ترک ندارد مگر قسمت بالای گنبد. مطالعه ترکها حرکات نسبی عمودی را نشان نمی‌دهد بلکه حرکت در رئوس گره‌ها و به طرف خارج بنا می‌باشد. همین علت است که در ارتفاع گره‌ها عرض شکافها به حد ماکزیمم می‌رسد...»[۱]

«در قشر دخلی گنبد تکه‌هایی شکسته شده و از محل خود جابجا شده‌اند مخصوصاً یک درز بزرگ آن در حدود ۱۲ متر مربع وسعت دارد بیش از ۵ تا ۶ سانتی متر از قشر داخل گنبد رانده شده، در حال حاضر قطعه فوق‌الذکر به وسیله دوغاب سیمان که در جدار بین دو پوشش داخلی و خارجی گنبد ریخته شده

۳۳)گنبد سلطانیه قبل از مرمت

محکم گردیده است، این عمل در ده سال پیش ضمن همکاری مرمتی صورت گرفته.

ضمن مطالعه نظری در محل چنین نتیجه گرفته می‌شود که اختلاف فاحشی بین ملات گنبد (البته به استثنای قسمتهایی که اخیراً مرمت شده) و ملات بقیه اسکلت ساختمان وجود دارد. ملات گنبد خیلی مقاوم است (حتی در سطوح خارجی ۹ و در خمیر آن تکه‌های مرمر سفید وجود دارد ولی در عوض ملات مقاومت خیلی کمتری دارند».[۲]

لوکا سن پائولوزی متخصص سازهٔ گروه در ادامه بررسی استاتیکی از بنا به ارائه پیشنهاداتی در زمینه گنبد می‌پردازد:

«به وجود آورد یک حلقه از بتن مسلح در پایه گنبد کافی برای تحمل فشارهای جانبی حاصله از گنبد و در صورت امکان بهتر است حلقه مذکور از بتن مسلح پیش فشرده تهیه گردد تا بدین وسیله تغییر شکل محدودتر گردد، در هر صورت این موضوع چندان مهم نمی‌باشد و استفاده از بتن آرمه معمولی اشکالی ندارد...».[۳]

«تعمیر ترک‌های پوشش داخلی گنبد خصوصاً ترک‌های مهم‌تری که از گنبد به طرف پایه‌های حمال سرازیر شده است. این اعمال که در هر صورت نباید قبل از افزودن حلقه بتنی انجام گیرد، به طریق زیر اجرا می‌گردد: تمیز کردن عمقی ترک‌ها و بیرون آوردن کلیه مصالحی که در داخل این ترک‌ها ریخته شده‌اند مانند آجرها و ملات‌های خورده شده و بعد پوشاندن و مرمت دقیق و کامل ترک‌ها با آجر و سیمان.

در مورد مرمت قطعه جدا شدهٔ قشر داخلی گنبد که حدود ۱۲ متر مربع مساحت دارد و قریب ۵ تا ۶ سانتی متر پایین افتاده باید توجه مخصوص معطوف داریم. بر گرداندن این قطعه به جای خود کار بسیار مشکلی است، زیرا بین ترک‌های این قطعه مقادیر زیادی مصالح خورده شده انباشته شده، و چنانچه بخواهیم این قطعه بزرگ را با فشار به جای خود برگردانیم حتماً باعث شکستگی لبه‌های خود قطعه و یا قطعات مجاور خواهیم شد و در

۱-گزارش مرمت گنبد سلطانیه، انستیتو مرمت دانشگاه ملی، ص ۳۴.
۲-گزارش مرمت گنبد سلطانیه، ص ۳۶.
۳-همان، ص ۴۴.

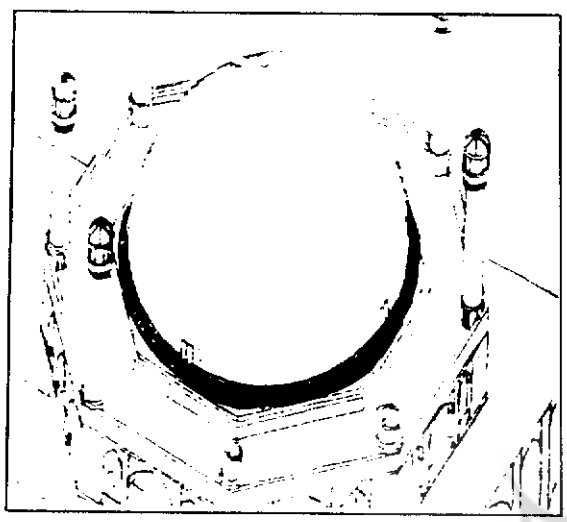
نتیجه خسارات بیشتری به قشر داخلی وارد خواهد آمد. علاوه بر این دوغاب سیمانی هم که در چند سال اخیر در بین ترک‌ها ریخته شده، عمل جدا کردن و جابجا کردن قطعه فوق را مشکل‌تر می‌نماید، شاید راه حل ساده این تعمیر را این طور بتوان پیشنهاد کرد که قشر تزئیناتی قطعه فوق را جدا کنیم و سپس قسمت‌های بیرون آمده را بتراشیم و پس از این که سطح آن با سطوح مجاور هم تراز شد آن را محکم کرده و سپس قشر تزئینی را دوباره روی آن بچسبانیم. مجموعه عملیات پیشنهادی فوق برای تصحیح وضع پیشایی کنونی و اطمینان در حفظ و بقای آتی ساختمانی باید بدون شک اجرا شود».[۱] (تصویر ۳۴)

در حال حاضر با گذشت حدود سه دهه از انجام فعالیت‌های مرمتی بر روی گنبد سلطانیه، ظاهراً آسیب‌های موجود بر روی گنبد متوقف شده و حلقه بتنی بر دور گنبد جا خوش کرده است.

۲-۴-۲-گنبد بقعه شیخ صفی الدین اردبیلی:

آقای مهندس ویور کارشناس یونسکو که قبلاً در حفاریهای انجام شده توسط هیئت باستان شناسی انگلیسی در پاسارگاد شرکت داشته در پاییز سال ۱۳۴۸ از طرف سازمان ملی حفاظت آثار باستانی ایران مأموریت یافته پنج بنای تاریخی اسلامی ایران مانند بقعه شیخ صفی الدین اردبیلی، مسجد جامع قزوه، مسجد نو، مدرسه خان و مسجد وکیل (هر سه در شیراز) را مورد بررسی قرار داده و برنامه جامعی برای تعمیرات آنها پیشنهاد نماید. گر چه نویسنده فوق‌الذکر نتوانست برنامه تعمیراتی پیشنهادی خود را به مرحله اجرا بگذارد، لیکن به نظر می‌رسد که ارائه نظرات فنی ایشان در مورد گنبد بقعه شیخ صفی در این جا خالی از فایده نباشد.

شکاف‌هایی در قسمت سفلای گنبد ایجاد شده است. یک ترک از قاعدهٔ گنبد شروع و به طرف بالا تا بالای یکی از پنجره‌ها امتداد یافته است، این یکی از نمونه‌های ترکهایی است که سبب آن رانش قاعدهٔ گنبد است که می‌بایستی به طور مؤثری از آن جلوگیری شود. برای مهار کردن این رانش قبلاً پشت بندهایی در خارج گنبد زده‌اند که اکنون مشاهده می‌گردد. علت شکاف ممکن است زمین لرزه‌ای بوده باشد که باعث شده است تا مجموعه ظروف چینی را از روی دیوار برداشته در کف زمین قرار دهند. و یا ممکن است، بر اثر صدمه یا لرزش دیگری باشد. باید اثر آبی را که به داخل آجرکاری حفاظت نشده گنبد در طی سالها نفوذ کرده و نیروی ملات‌ها را تقلیل داده است مهم‌ترین مسئله دانست. گنبد دیگر نیم رخ صاف و ترازی ندارد و در بسیاری جاها حالت نرمی که ملات‌ها حاصل کرده‌اند آجرکاریها، کمی به طرف داخل فرو رفته است. ملات‌ها بسیار نرم شده و همین که مورد لمس قرار



گیرد خرد شده و فرو می‌ریزد.

بسیار به جا و عاقلانه خواهد بود که برای جلوگیری از رانش گنبد اطراف قاعدهٔ گنبد کلاف کشی شود (این کلاف کشی ممکن است از قطعات نیمه فولادی ترکیب یافته باشد و یا به صورت بتن کمربندی ساخته گردد) این کلاف درست در اطراف قاعدهٔ گنبد قرار می‌گیرد و بدین طریق گنبد را از انبساط و تغییر شکل یافتن حفظ می‌کند.

در هر صورت ممکن است فرسودگی گنبد به حدی رسیده باشد که اقدام فوق مؤثر نباشد.

باید یک بررسی ساختمانی عمیق توسط مهندسان محاسب و حفاظت گران از گنبد به عمل آید، چنانچه این بررسی معلوم داشت که اجرای کلاف کشی مؤثر نخواهد بود نگارنده پیشنهاد می‌کند بجای برداشتن کامل گنبد و ساختن گنبدی جدید باید به یک عمل تجدید آستری دست زد این عمل را می‌توان به شرح زیر

۱- همان، ص ۴۵.

انجام داد:

الف ـ سطح داخلی گنبد را در ابتدا با [illegible] محکم بسته سپس تعدادی دندهٔ (تویزه) فولادی یا بتونی در [illegible] آجرکاری به کار می‌برند تمام این دنده‌ها (تویزه‌ها) از رأس [illegible] منشعب شده و شعاع مانند به کلاف کلاف جدیدی که در [illegible] قاعدهٔ گنبد گذاشته می‌شود، متصل می‌گردد.

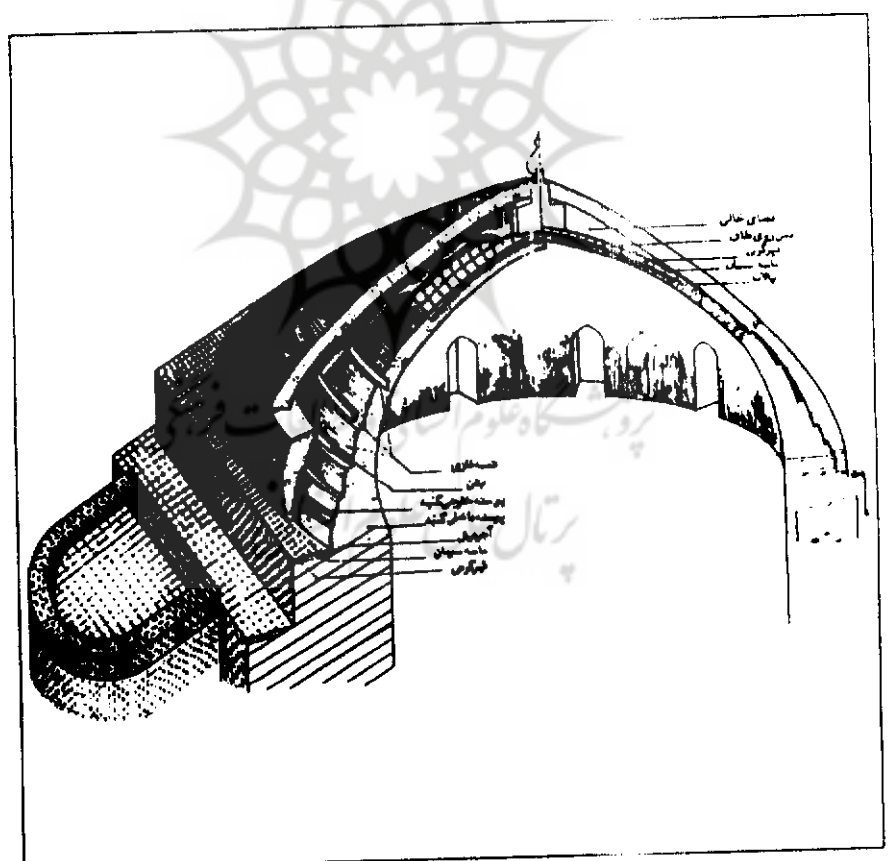
ب ـ وقتی که دنده‌ها آماده شد قسمت‌های باقی مانده آجرکاری بین دنده‌ها را تراشیده تا محلی [illegible] یک پوسته نازک از جنس سیمان فراهم شود. این پوسته به وسیله پاشیدن سیمان بر روی یک توری سیمی که قبلاً بر سطح آجرکاری نصب شده است به وجود می‌آید. این چنین پوسته گنبدی نباید بیش از ۵ سانتی متر ضخامت داشته باشد. سطح داخلی این پوسته باید طوری تنظیم گردد که با سطح آجرکاری تلاقی کند. یک [illegible] ضد رطوبت باید بین آجرکاری قدیمی و این آستر جدید به کار رود و ترتیبی داده شود که هر آبی (که به داخل آجرکاری نفوذ می‌کند) به وسیله سوراخ‌ها و چشمه‌های کوچکی در قاعدهٔ گنبد خارج گردد.(تصویر ۳۵)

مطالب فوق به صورت یک پیشنهاد است که بر بعضی احتمالات تکیه دارد غیر ممکن است که بتوان پیش از یک بررسی صحیح ساختمانی از وضع گنبد نظریه به خصوصی ابراز داشت.[۱]

۲-۴-۳- گنبد مدرسه عالی شهید مطهری (سپهسالار):

در جنوب مدرسه شبستان تابستانی یا گنبد خانه واقع است. این

۱- ویور. ام. ای. بررسی مقدماتی دربارهٔ مسائل حفاظتی پنج بنای تاریخی ایران، ترجمهٔ کرامت‌الله افسر، سازمان ملی حفاظت آثار باستانی، ۱۳۵۶، صص ۵۷-۵۶.



۳۵)طرح پیشنهادی برای [illegible] گنبد بقعهٔ شیخ صفی. منبع نقشه: نیارش سازه های طاقی، ص ۱۴۳.

محل از نظر فضاسازی یکی از کارهای نمونه در زمان خود می‌باشد زیرا گنبد بر چهار پایه استوار است و در نتیجه دید بسیار زیادی به شبستان می‌دهد (باعث شده چهار فضای اطراف نیز جزو گنبد زیر محسوب شود و تشکیل یک شبستان بسیار وسیع بدهد).

پایه‌های چهار گنبد دارای ارتفاعی حدود ۱۵ متر داشته که در آن ارتفاع رومی‌هایی با دهانه ۱۴/۵ متر این پایه‌ها را به هم متصل می‌کند و در گذشته زیر گنبد با یزدی بندی با کاشی‌کاری تزئین شده بود که به مرور کاشی‌کاری آن خراب می‌شود و در حدود ۳۵ سال پیش کاشی کاری مرمت می‌گردد و همچنین یک بار نیز در سال ۵۸ این کاشی‌کاری ترمیم می‌گردد. گنبد بر چهار پایه استوار است و به وسیله چهار رومی عظیم به صورت یک فضای مربع در آمده و سپس توسط چهار قوس با خیز کم (لنگه طاق) که پاطاق آن بر شانه رومی‌ها قرار گرفته تبدیل به هشت ضلعی شده و بعد از این مرحله ساقه گنبد شروع می‌شود.

بیشترین آسیب وارده بر رومی‌ها نیز در محل وارد آمدن با چهار قوس که چهار ضلعی را به هشت تبدیل کرده است می‌باشد (پای لنگه طاق‌ها می‌باشد). رومی‌ها به دلیل فشار لنگه طاق‌ها و همچنین به لحاظ پوسیدگی چوب‌های کار گذاشته شده در آن‌ها و عدم مراقبت کافی از بنا مانند نفوذ آب باران و برف به مرور زمان ترک برداشته و شروع به حرکت کرده بود تا این که سال ۱۳۶۴ که ترک‌ها شدید شده و خطر خرابی آن حتمی به نظر رسید پس از نصب داربست فلزی و بستن زیر رومی و لنگه طاق‌ها و برداشتن قسمت کمی از کاشی‌کاریهای طبله شده از اردیبهشت ۱۳۶۹ تعمیرات گنبد مدرسه سپهسالار توسط سازمان میراث فرهنگی کشور آغاز گردید و در سال ۱۳۷۳ تعمیرات اساسی گنبد تمام شد.(۱)

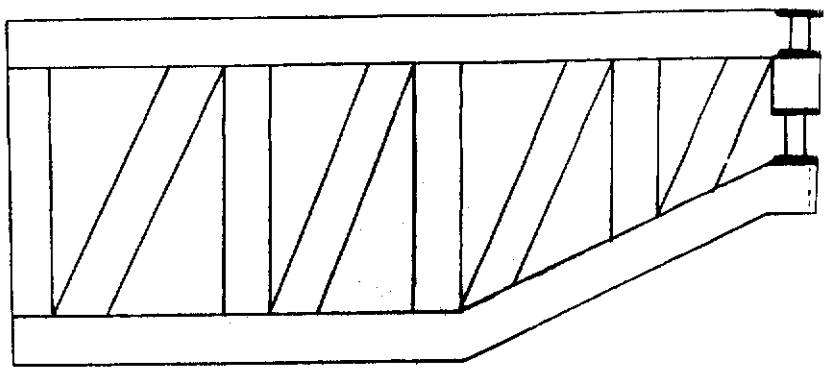
کار اصلی برای مرمت این گنبد برداشتن فشار وارده لنگه طاق‌های نامطمئن بود که به این ترتیب عمل شده است: بار گنبد از طریق رینگی فلزی که به صورت خرپا طراحی شده بود از طریق چهار خرپای فلزی به پایه‌های اصلی منتقل شده‌اند. پایه‌ها نیز پس از حفر چاه با استفاده از آرماتور تقویت شده‌اند. شاید یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های انجام شده در این بنا که بازتاب بیشتری داشته است برداشتن گنبد توسط جرثقیل و زیرسازی آن است.(تصویر ۳۶)

۲-۴-۴- گنبد مسجد استاد و شاگرد ـ تبریز:

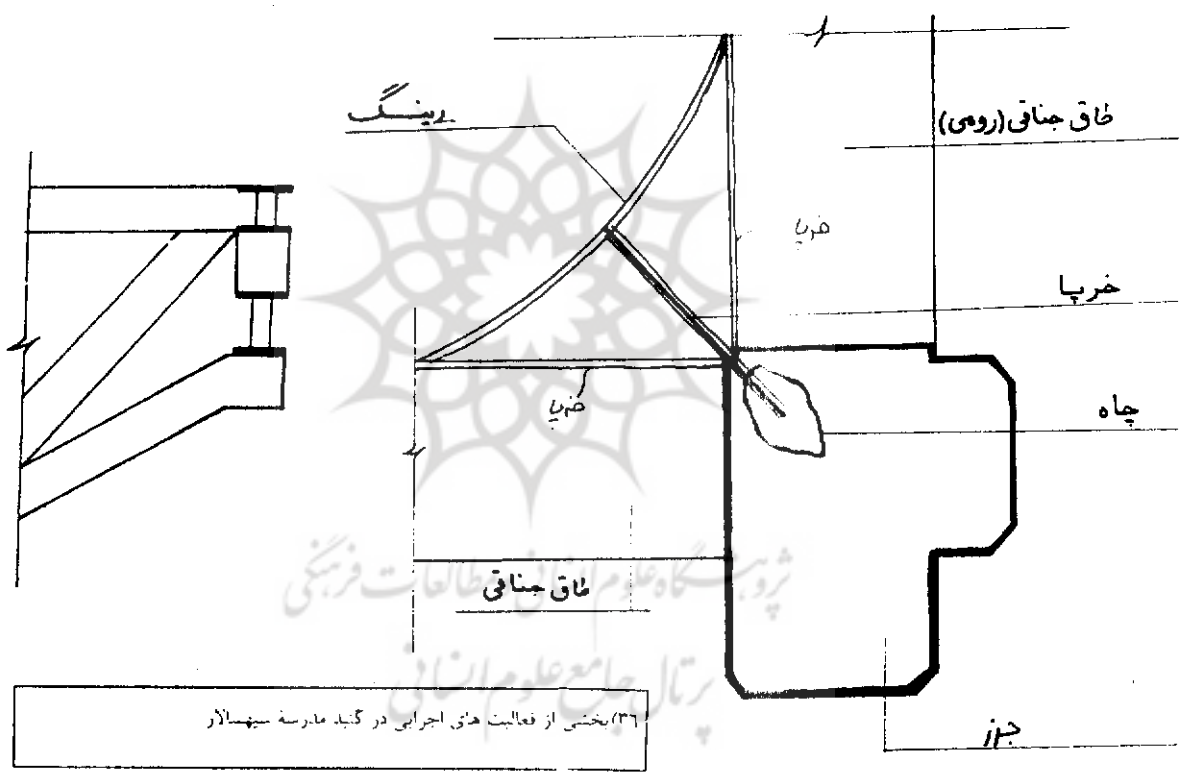
مسجد استاد و شاگرد بنا بر اظهار نظر متون اثری از دوره قره قویونلوها در تبریز است. بخش‌های مختلف بنا عبارت از گنبد خانه و شبستان شرقی می‌باشد که در حال حاضر شبستان به مخروبه‌ای تبدیل شده و گنبد خانه با مساعدت هیئت امناء مسجد در حال مرمت است. آسیب‌های مشاهده شده در گنبد خانه عبارتند از: ترک‌های عمودی که از بالای نور گیرها شروع و در گوشه سازی‌ها پس از گذر از تیزهٔ تویزه‌های هشت به جرزها می‌رسند. با توجه به ارتفاع بیشتر گنبد خانه از فضاهای مجاور، مشاهده ترک‌ها از بیرون فضا نشان می‌دهد که ترک در عمق جرزها نفوذ کرده است. این وضعیت در جبهه شمال شرقی بنا کاملاً قابل مشاهده است.

فعالیت‌های مرمتی که بر روی گنبد مسجد امام انجام شده عبارت است از نصب دو میل گرد به صورت قطری که توسط چهار صفحه فلزی در دو سطح بالای روزنه و پایین آن، به صورت کششی عمل می‌کنند سطح مقطع میل گردها بسیار کم و به مرور زمان خاصیت کششی خود را از دست داده‌اند. همچنین فعالیت‌هایی در جبهه شمالی گنبد خانه برای جلوگیری از سر سفتی ایوان انجام گرفته است. اتصالات فلزی همگی به صورت پیچ و مهره است که حکایت از قدمت تلاش‌های مرمتی گنبد دارد که به قبل از ورود جوش به ایران بر می‌گردد. از دیگر فعالیت‌ها برای مرمت گنبد تقویت پی‌ها و جرزها احداث چندین شمع بتنی در زیر جرزها، که نشست احتمالی جرزها را مهار می‌کند. اخیراً نیز فعالیت‌های جدی مرمت گنبد خانه با همکاری سازمان میراث فرهنگی تبریز در حال انجام است که از جمله این اقدامات برداشتن میل گردهای کششی و ترمیم ترکهای موجود در گوشه سازی‌ها بوده است.(تصویر ۳۷ و ۳۸)

۱- سعیدی، علی اکبر. «بررسی اجمالی دربارهٔ سازهای گنبد در ایران، در مورد گنبد مدرسه و مسجد سپهسالار تهران»، مجموعه مقالات اولین کنگره تاریخ معماری و شهرسازی ایران، به کوشش باقر ایت‌الله زادهٔ شیرازی، تهران، سازمان میراث فرهنگی کشور، ۱۳۷۴، ج ۲، صص ۴۱۱-۴۱۰.



طرز اتصالات خرپا



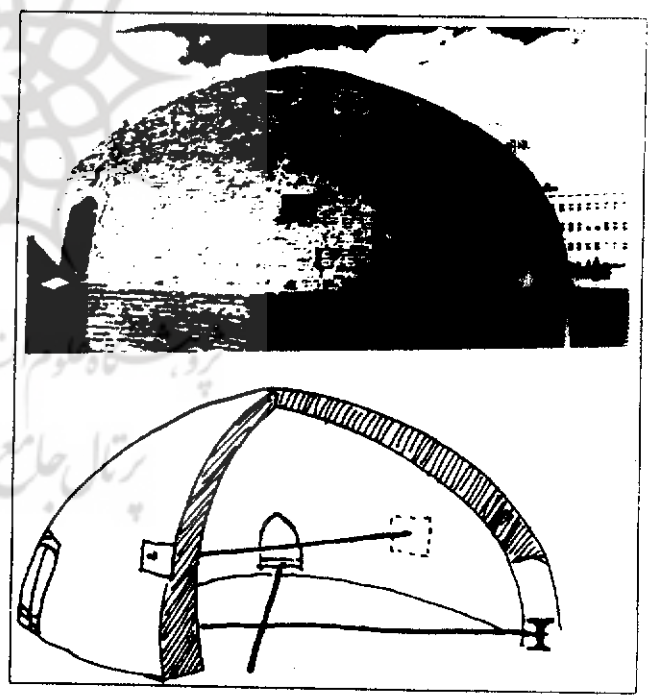
(۳۶) بخشی از فعالیت های اجرایی در گنبد مدرسهٔ سپهسالار

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

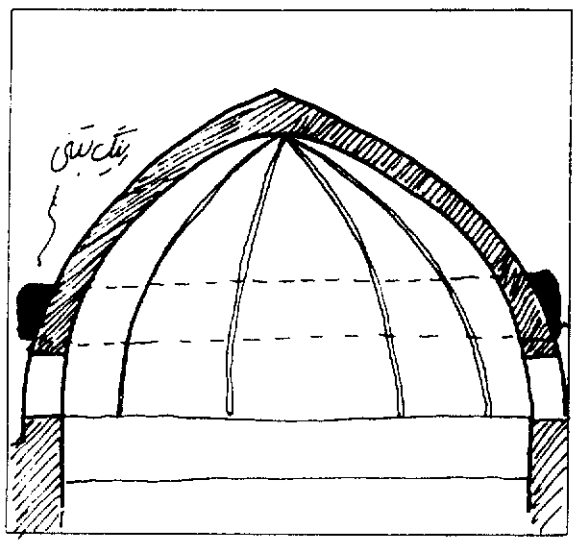
۲-۴-۵- گنبد مسجد جامع اشتر جان:

گنبد مسجد جامع اشتر جان با تاریخی در حدود سال ۷۱۵ هـ.ق با دهانه‌ای برابر با ۱۰ متر به صورت ترکین ساخته شده است. خیز گنبد در حدود ۱۸ متر و تعداد باریکه طاق‌های آن ۸ عدد می‌باشد. در فاصلهٔ بین باریکه طاق‌ها چند ترک عمودی دیده می‌شود یکی از این ترک‌ها که در جبهه جنوبی قرار دارد درست از بالای ۱۶ ضلعی به سمت جایی که روزنه‌ها وجود دارند حرکت کرده و در بالای روزنه به پایان می‌رسد. اقدامات مرمتی این گنبد ظاهراً به

۳۸)نمای گنبد و گنبدخانهٔ مسجد استاد وشاگرد



۳۸)فعالیت های مرمتی بر روی گنبد مسجد استاد وشاگرد



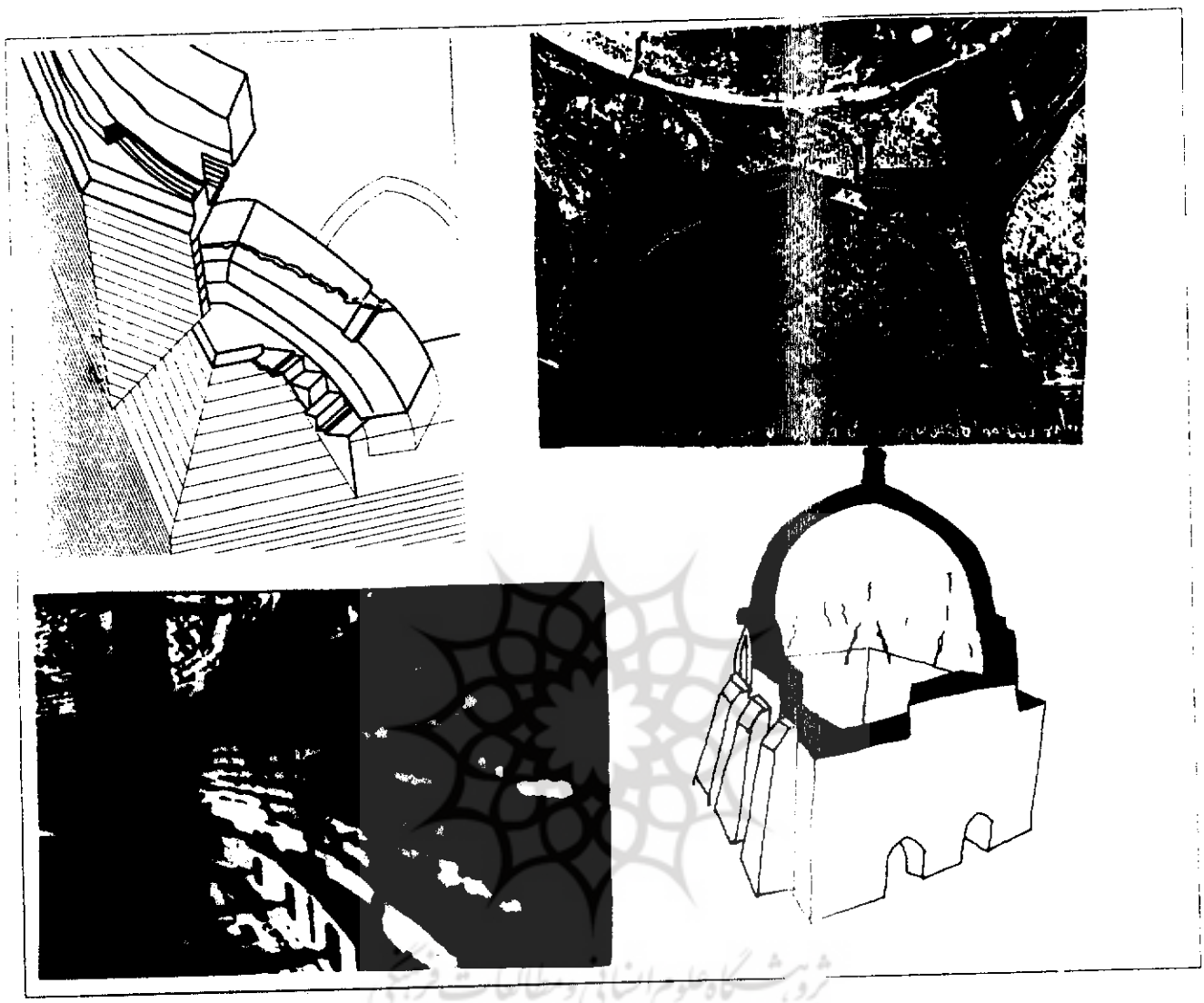
۳۹)مرمت انجام شده بر روی گنبد مسجد جامع اشتر جان

سال‌های دههٔ سی قرن معاصر و زمانی بر می‌گردد که استاد معارفی بناهای متعددی را در اصفهان از جمله این بنا را مرمت کرده است. در این گنبد خانه روزنه‌ها مسدود شده و در سطح خارجی گنبد و محدودهٔ بالای روزنه‌ها، کمربندی بتنی با عرض تقریباً ۱ متر دیده می‌شود.(تصویر ۳۹)

۲-۴-۶-گنبد مسجد جامع قزوین:[۱]

آسیب‌های موجود در گنبد خانه مسجد جامع قزوین عبارت می‌باشد از ترک‌های عمودی نامتقارن که از حدود شکر گاه قوس گنبد شروع و تا پای جرزها ادامه پیدا می‌کند. در دوره‌های قبل از فعالیت‌های منسجم علمی و در اوایل دههٔ سی قرن حاضر با افزودن سه پشت بند به جرز جنوبی مرمت گنبد خانه شروع می‌شود. با حضور گروه ایتالیایی و انجام مطالعات سازه‌ای و تاریخی بر روی نقاط مختلف مسجد اقدام جدید عبارت بود از

۱- نگاه کنید به: زمانی فرد، علی. «مرمت گنبد مسجد جامع قزوین با نگاهی به مرمت گنبد در ایران»، پروژهٔ نهایی کارشناسی ارشد مرمتو احیاء بناها و بافت‌های تاریخی. اساتید راهنما، دکتر اکبر زرگر، دکتر فرهاد فخار تهرانی، استاد مشاور: دکتر مهرداد حجازی، دانشگاه هنر، شهریور ۱۳۸۰.



۴۰ بخشی از آسیب ها واقدامات مرمتی بر روی [illegible] و گنبدخانهٔ مسجدجامع قزوین

تزریق دوغاب سیمان در پای گنبد و در ادامه نصب شاهدهای گچی برای کنترل پیشرفت ترک‌ها، که در طی سال‌های بعد این شاهدهای گچی نشان داد که ترک‌ها هنوز فعال هستند. پس از آن با نصب دو بازوی فلزی در جبهه شمالی گنبد خانه بار نیمی از گنبد بر روی رینگ فلزی قرار داده شد. سطح خارجی گنبد پس از مش بندی با آرماتور و سیمان مجدداً کاشی کاری و کف مجاور گنبد با لایه‌ای از سیمان و مش بندی پوشیده شد. با آنکه این اقدامات موضعی انجام پذیرفته اما هنوز عوامل مخل به طور کلی مهار نشده و مرمت تکمیلی در گنبد خانه به انجام نرسیده است.

قلعه و

مکان جغرافیایی غار کرفتو:

در ۷۴ کیلومتری شرق شهرستان سقز (شکل ۱) در منطقه زرینه اوباتو (هوبتو) صخره‌ای عظیم و بلند از سنگهای آهکی بر فراز تپه‌ای با شیب حدود ۴۵ درجه پدید آمده است که «قلعه یا غارکرفتو» در آن قرار گرفته است.

آب و هوای این منطقه سرد و خشک است،به گونه‌ای که پنج ماه از سال را زیر پوششی از لایه‌های برف سپری می‌کند، دمای هوای آن از سمت غرب در فصل زمستان بین ۲۱درجه تا۲۵ درجه سانتی گراد متغیر است.

نحوه شکل‌گیری غارها:

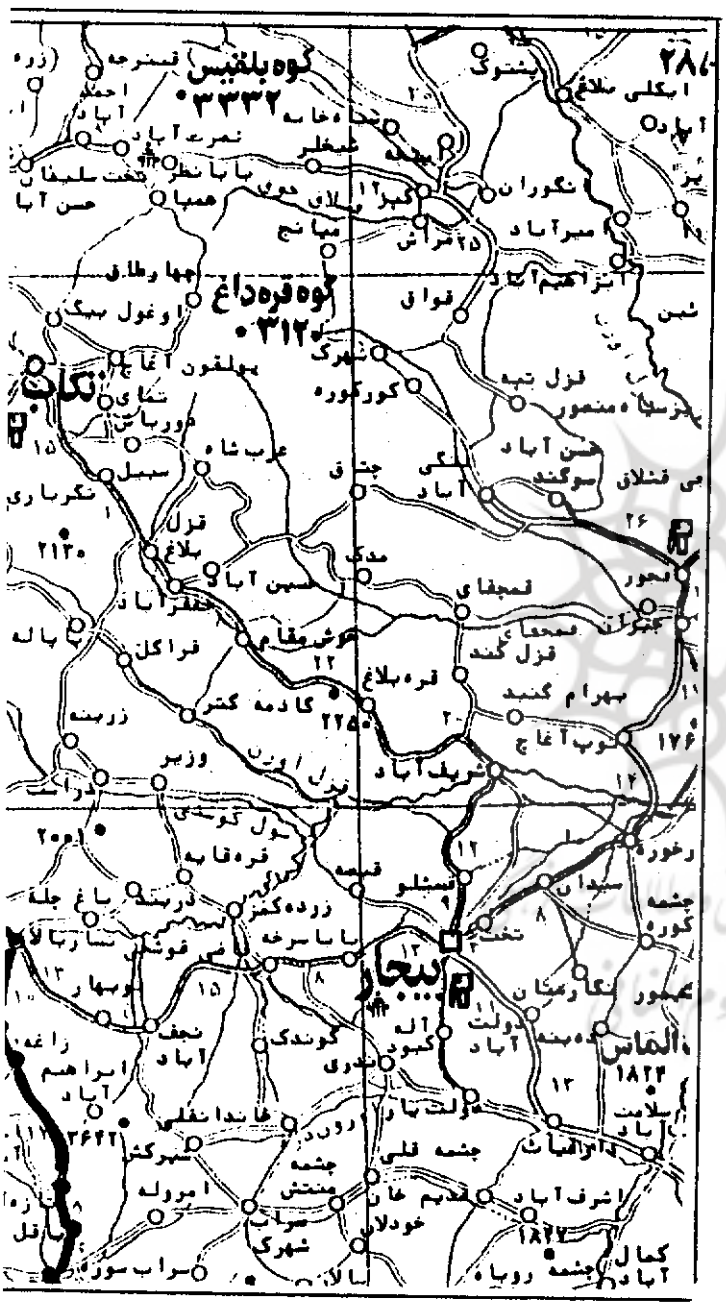
از تماشایی‌ترین نتایج عمل فرسایش آبهای زیرزمینی در سنگهای آهکی،تشکیل غارها است.گرچه اکثر غارها نسبتاً کوچکند اما، برخی از آنها دارای ابعاد بسیار بزرگی هستند.

به نظر میرسد بیشتر غارها در سطح ایستابی یا زیر آن و در منطقه اشباع از آب به وجود آمده باشند.در این قسمت، آبهای زیرزمینی به سطوح سنگها همچون درزها نفوذ میکنند.با گذشت زمان، فرآیندانحلال به آرامی حفراتی ایجاد مینماید که بتدریج بزرگتر شده، تبدیل به غار می‌شوند. مواد حاصل از انحلال بوسیله آبهای زیرزمینی خارج و وارد رودخانه می‌شوند.

اشکالی که تحسین بسیاری از بازدیدکنندگان غارها را برمی انگیزد تشکیل سنگهایی است که ظاهر اعجاب‌انگیزی به غارها میدهند.این اشکال که بوسیله چکیدن دائمی آبها در طول زمانی بسیار طولانی ایجاد می‌شوند سبب رسوب کلسیت شده که تراورتن نامیده می‌شوند،امامعمولاً نهشته های غاری را چکه سنگ (clipstone) می‌نامند که اشاره‌ای به چگونگی تشکیل آنها دارد.

هرچندکه شکل پذیری غار در منطقه اشباع وقوع می‌یابد.اما رسوب چکه سنگ در آنجا میسر نمی‌باشد مگر اینکه غار در موقعیت بالای سطح ایستابی و در منطقه هوادار قرار گرفته باشد.

این وضعیت هنگامی بوجود می‌آید که رودهای حوالی آن درّه‌های خود را عمیق‌تر کرده، سبب پایین افتادن سطح ایستابی شوند. همینکه این حجره‌ها هواگیر شوند تزیین غار آغاز



شکل ۱ نقشه دسترسی به غار کرفتو