Archive of SID

نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۸، شماره ۶، اسفندماه ۱۳۸۳، از صفحه ۷۴۷ تا ۷۵۷

تحلیل لرزه ای گنبدهای ایرانی

مهرداد حجازی
استادیار گروه عمران - دانشکدهٔ فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان
رسول میرقادری
دانشیار گروه مهندسی عمران - دانشکدهٔ فنی - دانشگاه تهران
(تاریخ دریافت، ۸۰/۱۱/۲۰ ، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۲/۴/۷ ، تاریخ تصویب ۸۲/۷/۲۶)

چکیده

گنبدهای سنتی ایرانی از برجسته ترین نمونه های ساختمان سازی سنتی در ایران در طول هزاران سال می باشند، که هنوز بسیاری از آنها در قسمت های زلزله خیز کشور پس از قرن های زیادی برپای ایستاده اند.

از لحاظ سازه ای، گنبدهای ایرانی را می توان به گنبدهای یک پوسته، دو پوسته و سه پوسته تقسیم نمود. گنبد های یک پوسته اولین نوع گنبدها می باشند. در این نوع گنبد تک پوسته جزء باربر اصلی می باشد.گنبدهای دو پوسته از دو عدد پوسته تشکیل یافته اند، و به دو نوع پیوسته و گسسته تقسیم می شوند. در گنبدهای دو پوستهٔ پیوسته فاصلهٔ بین دو پوسته کم است و پوسته ها توسط اتصال دهنده های آجری به یکدیگر متصل شده اند. در گنبدهای دوپوستهٔ گسسته فاصلهٔ قابل ملاحظه ای بین دو پوسته وجود دارد. برای پایداری برخی از گنبدها دیوارها یا تقویت کننده های نصف النهاری در فضای بین دو پوسته ساخته شده است. تعداد اندکی گنبد با سه پوسته نیز وجود دارد.

در این مقاله، سیستم سازه ای تعدادی از گنبدهای تاریخی ایران با مصالح بنایی تشریح خواهد شد و مقاومت و پایداری سازه ای آنها در مقابل اثرات دینامیکی زلزله مورد بحث قرار خواهد گرفت. همچنین در مورد نقش سازه ای تقویت کننده های نصف النهاری در گنبدهای دو پوسته توضیح داده خواهد شد.

واژه های کلیدی: تحلیل لرزه ای، گنبدهای ایرانی، مصالح بنایی آجری، تقویت کننده

مقدمه

در فرهنگ سنتی ایران شکل کره همواره دارای معنایی ژرف در رابطه با آسمان ها بوده است. گنبد زمینی یک تجلی دنیاوی از آسمان آرمانی است. قدمت ساختن گنبد در ایران به هزارهٔ سوم پیش از میلاد باز می گردد. از آن زمان، معماری ایرانی انواع مختلفی از سازه ها با بهترین شکل های گنبدی را با استفاده از روش های سنتی به وجود آورده است که هنوز تعداد زیادی از آنها در مناطق زلزله خیز و غیر زلزله خیز کشور پا برجا هستند.

مطالعهٔ رفتار سازه ای گنبدهای ایرانی بر این دلالت دارد که بسیاری از گنبدهای سنتی به گونه ای طراحی شده اند که می توانند در مقابل اثرات دینامیکی زلزله مقاومت کنند [۴-۱]. در اینجا مطالعهٔ آسیب پذیری لرزه ای پنج گنبد سنتی ایرانی، یعنی گنبدهای تاج الملک، نظام الملک، شیخ لطف الله، امام اصفهان، و سلطانیه، ارائه می گردد.

سیستم سازه ای

گنبدهای ایرانی را می توان به گنبدهای یک پوسته، دو پوسته و سه پوسته تقسیم کرد [۱، ۲، ۵]. در گنبدهای یک پوسته، پوسته باربر است. در گنبدهای دو پوسته، دو پوسته وجود دارد که ممکن است پیوسته با یک فاصلهٔ کوچک بین دو پوسته، یا گسسته با یک فاصلهٔ قابل ملاحظه بین دو پوسته باشد. در حالت اخیر، دیوارها یا تقویت کننده های آجری نصف النهاری در فضای بین دو پوستهٔ برخی از گنبدها ساخته می شود که وظیفهٔ آن ایجاد پایداری سازه ای است.

www.SID.ir

Archive of SID

توصیف گنبدهای مورد مطالعه

خصوصیات پنج گنبد تاریخی مورد مطالعه در ادامه آورده شده است. گنبدها از مصالح بنایی آجری ساخته شده اند.

گنبد تاج الملک (۴۸۱ هجری) یک ساختمان برجسته در سمت شمالی مسجد جامع در اصفهان است. قطر خارجی آن در پایه ۱۱/۷ m است. ارتفاع آن از ترازهای پایه و زمین به ترتیب ۶/۳ m و ۲۰ m است. ضخامت تک پوسته از ۰/۳۶ m در رأس تا ۰/۶۶ m در پایه تغییر می کند (شکل ۱). شکل مقطع قائم گنبد ترکیبی از دو قوس بیضی متقاطع است.

گنبد نظام الملک (۸۵-۴۶۵ هجری) در سمت جنوبی مسجد جامع در اصفهان ساخته شده است. در پایه، قطر خارجی گنبد ۱۶/۶ m است. ارتفاع آن از ترازهای پایه و زمین به ترتیب ۱۰/۵ m و ۲۶ m است. ضخامت تک پوسته از ۰/۴۵ m در رأس تا ۱ m در پایه تغییر می کند (شکل ۲). شکل مقطع قائم گنبد از تقاطع دو قوس بیضی به دست می آید.

گنبد یک پوستهٔ مسجد شیخ لطف الله (۲۸-۱۰۱۱ هجری) در سمت شرقی میدان نقش جهان در اصفهان قرار دارد. قطر خارجی پایهٔ آن ۲۰/۸ m و ارتفاع آن از ترازهای پایه و زمین به ترتیب ۱۲ m و ۲۸/۵ m است. ضخامت پوستهٔ گنبد از ۰/۹۵ m در رأس تا ۱/۳ m در پایه تغییر می کند (شکل ۳). مقطع قائم گنبد از نوع قوس چهار پرگاره (پنج اوهفت کند) است.

گنبد دوپوستهٔ تقویت شدهٔ مسجد امام (۴۸-۱۰۲۰ هجری) در سمت جنوبی میدان نقش جهان در اصفهان قرار دارد. گنبد دارای آوگون، یعنی دارای پیش آمدگی اندکی نسبت به گریو، است و بر روی یک گریو بلند قرار گرفته است. قطر خارجی گریو ۲۶/۳ m است. ارتفاع گریو ۷ m، و ضخامت آن در پایه و در بالا به ترتیب ۱/۷ m و ۲/۲ m است. گریو دارای هشت عدد پنجره، به ارتفاع ۳/۳ m و عرض ۱/۷ m، است که در فواصل مساوی دور گریو قرار گرفته اند. ارتفاع پوسته های بالایی و پایینی از تراز پایهٔ گریو به ترتیب ۲۴/۴۵ m و ۱۳/۲ m، و فاصلهٔ بین دو پوسته ۱۱/۲۵ m است. پوستهٔ بالایی دارای ارتفاع ۵۲ m از تراز زمین است. ضخامت پوستهٔ پایینی از ۰/۲۲ m تا ۱/۳۵ m به سمت گریو تغییر می کند، و تغییرات ضخامت پوستهٔ بالایی از ۰/۳ m تا ۱/۱ m به سمت پایه است. پوستهٔ بالایی شلغمی شکل است. تعداد ۲۴ عدد دیوار (خشخاشی، تقویت کنندهٔ) آجری شعاعی یا نصف النهاری در فضای بین دو پوسته وجود دارد که به دو پوسته متصل شده اند. ضخامت خشخاشی ها ۰/۴۵ m است. خشخاشی ها دارای سه ارتفاع مختلف هستند. خشخاشی های بلند، متوسط و کوتاه به ترتیب دارای ارتفاع ۱۲/۶ m، ۱۰/۷ m و ۷/۶ m هستند. این خشخاشی ها به ترتیب و به فواصل مساوی دور محیط گنبد قرار گرفته اند (شکل ۴). مقطع قائم دو پوسته از نوع قوس چهار پرگاره (پنج او هفت) می باشد.

گنبد دو پوستهٔ مقبرهٔ اولجایتو در سلطانیه (۱۰-۷۰۴ هجری)، در شمال غربی ایران، بزرگترین گنبد موجود در ایران است. ارتفاع آن از ترازهای پایه و زمین به ترتیب ۹/۳ m و ۵۴ m است، و قطر آن ۲۴/۵ m می باشد. مقطع قائم آن تخم مرغی شکل است. گنبد از پایه تا ارتفاع ۴ m بالای پایه به صورت یک پوسته با ضخامت ۱/۴ m است. گنبد از ارتفاع ۴ m بالای پایه به صورت دو پوسته است و ضخامت آن از آنجا به سمت رأس با استفاده از تعدادی پله تغییر می کند. پوسته های داخلی و خارجی به ترتیب دارای ضخامت ۰/۶ m و ۰/۴ m، با فاصلهٔ ۰/۶ m، در ارتفاع ۴ m بالای پایه، می باشند. دو پوسته در نقاط معینی در فضای بین دو پوسته به یکدیگر متصل شده اند (شکل ۵).

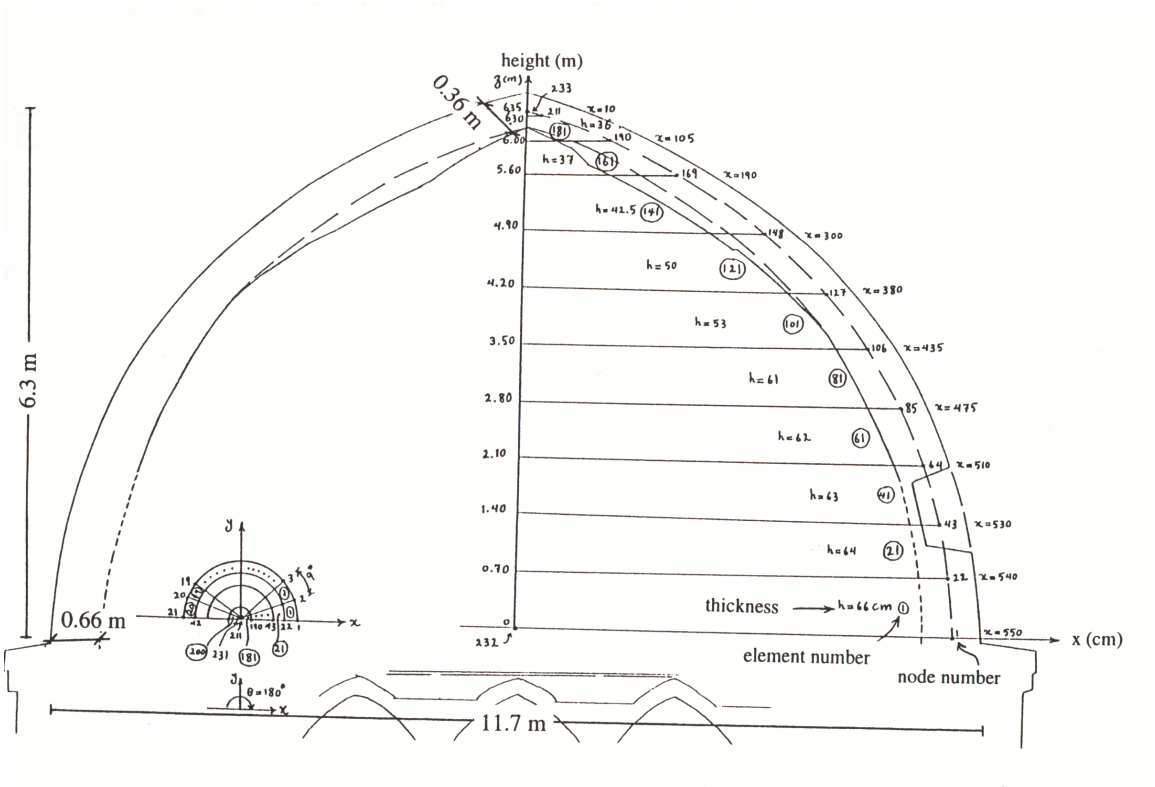
روش آنالیز و فرضیات

آنالیز سازه های با مصالح بنایی با ویژگی مقاومت کششی کوچک و رفتار غیر خطی یا غیر ایزوتروپیک، یک مسئلهٔ پیچیده در حوزهٔ مهندسی سازه است.

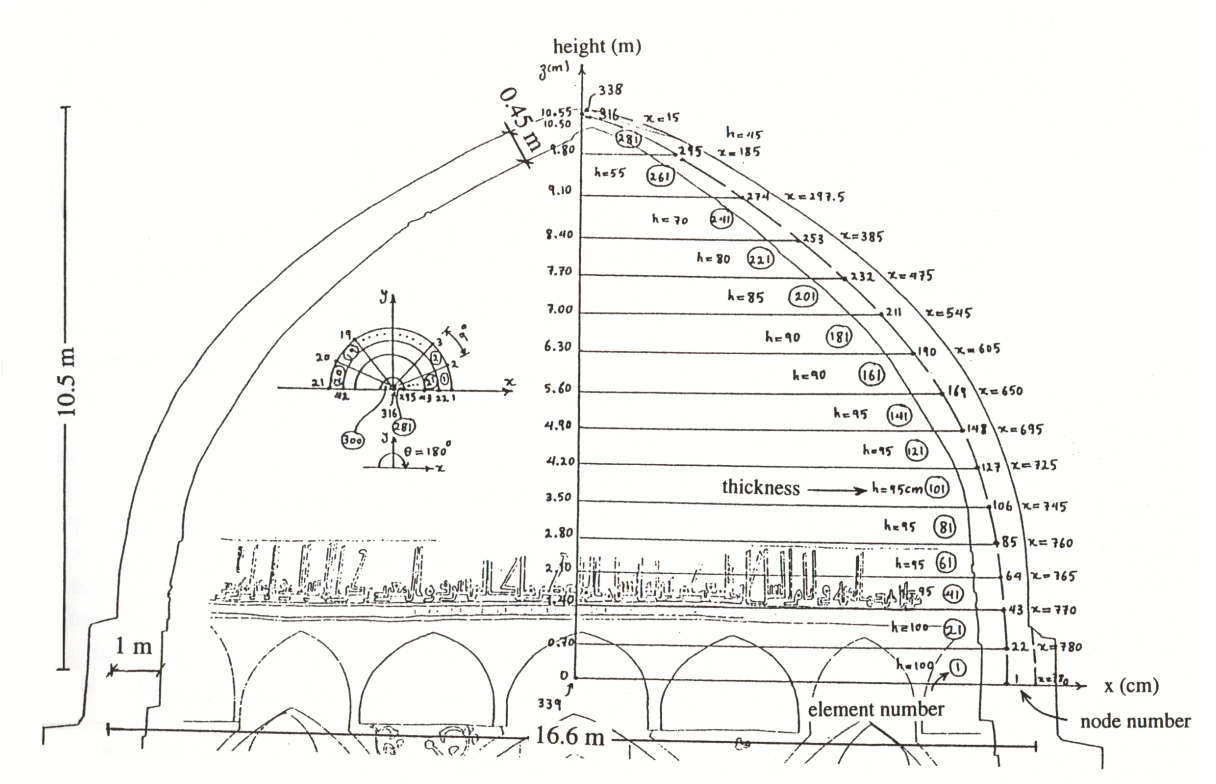
روش المان های محدود یکی از قوی ترین روش ها برای آنالیز سازه های با مصالح بنایی است. به نظر می رسد که یک آنالیز المان های محدود الاستیک خطی، در صورتی که تنش های حاصل در مقایسه با مقاومت مصالح بنایی نسبتاً کوچک باشند، برای ارزیابی اولیهٔ رفتار چنین سازه هایی قابل قبول باشد. در آنالیزها از برنامهٔ المان های محدود NISA-II [۶] استفاده شده است و المان مورد استفاده در مدلسازی المان پوسته بوده است.

www.SID.ir

Archive of SID



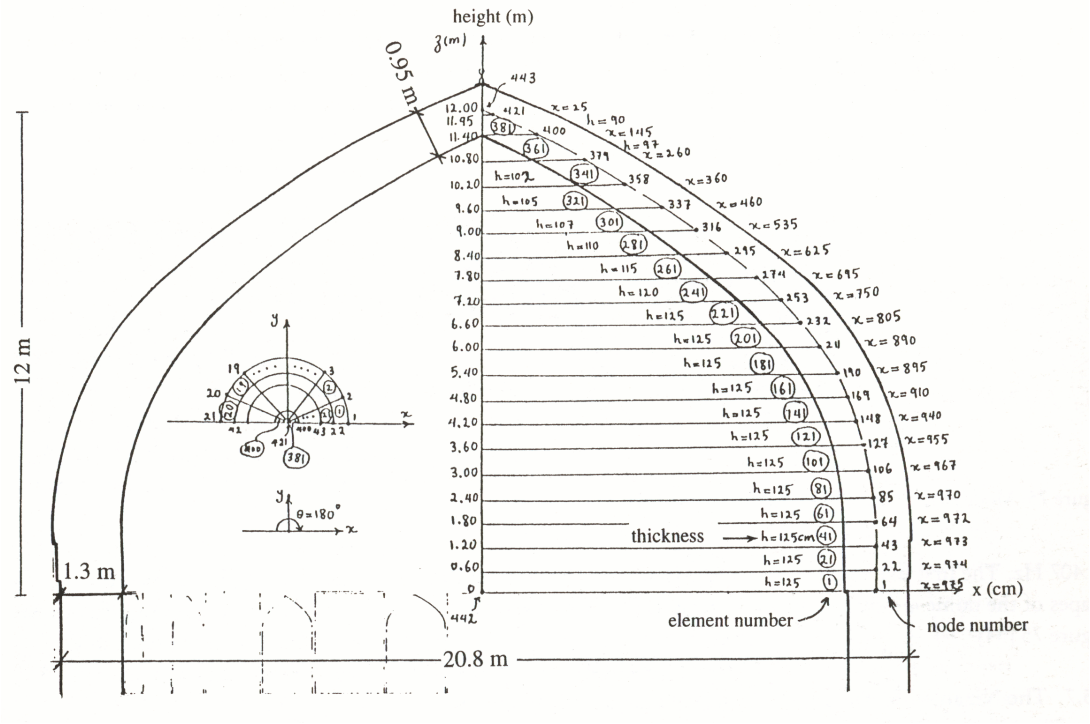
شکل ۱: گنبد تاج الملک، اصفهان، ٤٨١ هجری، ابعاد و مش ایجاد شده برای آنالیز المان های محدود.



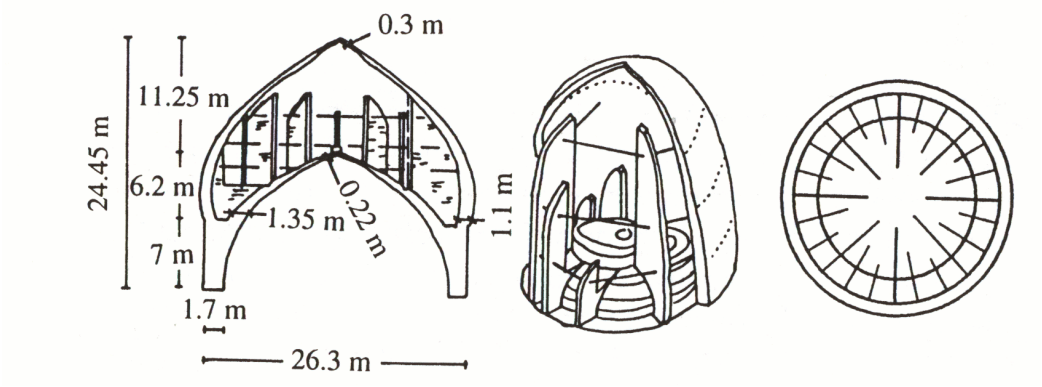
شکل ۲: گنبد نظام الملک، اصفهان، ۸۵-٤٦٥ هجری، ابعاد و مش ایجاد شده برای آنالیز المان های محدود.

www.SID.ir

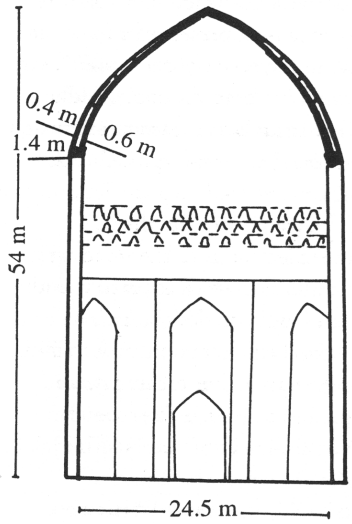
Archive of SID



شکل ۳: گنبد شیخ لطف الله، اصفهان، ۲۸-۱۰۱۱ هجری، ابعاد و مش ایجاد شده برای آنالیز المان های محدود.



شکل ٤: سیستم سازه ای گنبد دو پوستهٔ تقویت شدهٔ مسجد امام، اصفهان، ٤٨-١٠٢٠ هجری.



شکل ٥: گنبد مقبرهٔ اولجایتو، سلطانیه، ١٠-٧٠٤ هجری.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱: خصوصیات مصالح برای گنبدهای با مصالح بنایی آجری [۹-۷].

مدول الاستیسیته E $\mathrm{N/mm^2}$	ضریب پواسون ν	دانسیته وزنی γ $\mathrm{kN/m^3}$	تنش مجاز فشاری f_c $\mathrm{N/mm^2}$	تنش مجاز کششی f_t $\mathrm{N/mm^2}$	تنش مجاز برشی f_v $\mathrm{N/mm^2}$	تنش مجاز لهیدگی f_b $\mathrm{N/mm^2}$
7.358×10^3	۰/۱	۱۸/۵۴۱†	۰/۷	۰/۲	۰/۱	۰/۷

† $20/8\ \mathrm{kN/m^3}$ برای گنبد شیخ لطف الله

جدول ۲: تنش ها در گنبد تاج الملک در مقطع بحرانی.

بار	گره	ارتفاع m	ضخامت t m	N_ϕ $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}}$	N_θ $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}}$	M_ϕ $\frac{\mathrm{N.mm}}{\mathrm{mm}}$	M_θ $\frac{\mathrm{N.mm}}{\mathrm{mm}}$	σ_ϕ† $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm^2}}$	σ_θ‡ $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm^2}}$
زلزله	۱	۰	۰/۶۶	-۲۸/۹	—	۶۲۹	—	-۰/۰۵۲	—
	۶۴	۲/۱	۰/۶۲	—	۲۷/۴	—	۳۳۰	—	۰/۰۴۹
	۱۹۰	۶	۰/۳۶	—	-۷/۴	—	۶۳	—	-۰/۰۲۴

† $-0/7 \le \sigma_\phi = \frac{N_\phi}{t} \pm \frac{6M_\phi}{t^2} \le 0/2$

‡ $-0/7 \le \sigma_\theta = \frac{N_\theta}{t} \pm \frac{6M_\theta}{t^2} \le 0/2$

در آنالیز المان های محدود این گنبد ها فرضیات زیر در نظر گرفته شده است.

۱- خصوصیات مصالح در جدول (۱) نشان داده شده است [۹-۷].

۲- مصالح بنایی دارای رفتار الاستیک خطی می باشند.

۳- مصالح ایزوتروپیک هستند.

۴- از آنجایی که قسمت پایین (گریو) سازه (متشکل از گنبد و گریو) خیلی سخت است، اتصال پایهٔ گریو به زیر سازهٔ آن به گونه ای است که همهٔ تغییر مکان ها و چرخش ها، به جز چرخش حول محیط دایرهٔ مداری پایه، برابر صفر می باشند. سازهٔ گنبدی (گنبد و گریو) به صورت مستقل از زیر سازه آنالیز شده است، مانند اینکه سازهٔ گنبدی روی یک تکیه گاه سخت قرار گرفته باشد.

بارگذاری

در آنالیز دینامیکی روش آنالیز تاریخچهٔ زمانی به کار برده شده است. زلزلهٔ ناغان، توصیه شده توسط آیین نامهٔ طرح ساختمان ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) [۱۰]، برای آنالیز تاریخچهٔ زمانی توسط برنامهٔ NISA-II مورد استفاده قرار گرفته است. به دلیل وجود ترک های ریز در سازه های با مصالح بنایی ضریب استهلاک برابر ۷٪ انتخاب شده است. پنج مود اول در آنالیز ها در نظر گرفته شده است. دلیل استفاده از پنج مود اول در آنالیز این بوده است که در اکثر گنبدهای مورد مطالعه مجموع جرم های مؤثر مودی در پنج مود اول به حدود ۹۰٪ جرم کل سازه می رسد (جدول ۳) و بنابراین لازم است این تعداد مود در آنالیز در نظر گرفته شود و نیازی به در نظر گرفتن مودهای بالاتر نیست زیرا تمام پاسخ های سازه به ضریب مشارکت جرم بستگی دارد و در مودهای بالاتر مقدار عددی ضریب مشارکت جرم به اندازه ای کوچک است که اثر چندانی در پاسخ های سازه ندارد.

نیروهای زلزله به مقدار مشخصی مقیاس نشده اند و همان مقادیر بدست آمده از آنالیز دقیق دینامیکی با کاربرد تاریخچهٔ زمانی زلزلهٔ ناغان می باشند. برش پایه نیز از آنالیز دقیق دینامیکی با کاربرد تاریخچهٔ زمانی بدست آمده است.

تنش های مجاز

تنش های مجاز مصالح بنایی بر اساس آیین نامهٔ بارگذاری ایران [۷] در جدول (۱) نشان داده شده اند.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳ : مشخصات مودهای گنبدها.

گنبد	مود	فرکانس Hz	ضریب مشارکت جرم	ضریب مشارکت جرم تجمعی	برش پایه kN	وزن گنبد kN
تاج الملک	۱	۳۷/۸۰۳	۰/۵۰۶	۰/۵۰۶	۳۱۰	۱۰۳۵
	۲	۴۷/۴۲۷	۰/۲۰۳	۰/۷۰۹		
	۳	۵۵/۱۲۸	۰/۱۱۴	۰/۸۲۳		
	۴	۵۷	۰/۰۵۷	۰/۸۸۰		
	۵	۶۳/۸۳۳	۰/۰۳۳	۰/۹۱۳		
نظام الملک	۱	۲۲/۸۵۹	۰/۶۴۳	۰/۶۴۳	۱۰۵۵	۳۷۶۵
	۲	۲۹/۴۷۶	۰/۱۴۰	۰/۷۸۳		
	۳	۳۵/۸۳۳	۰/۰۶۹	۰/۸۵۲		
	۴	۳۸/۷۱۰	۰/۰۳۴	۰/۸۸۶		
	۵	۴۲/۸۶۷	۰/۰۱۹	۰/۹۰۵		
شیخ لطف الله	۱	۱۷/۲۵۷	۰/۶۲۴	۰/۶۲۴	۴۹۱۰	۱۶۹۳۵
	۲	۲۴/۴۷۲	۰/۱۸۲	۰/۸۰۶		
	۳	۲۴/۸۰۸	۰/۰۷۶	۰/۸۸۲		
	۴	۳۰/۶۷۴	۰/۰۴۳	۰/۹۲۵		
	۵	۳۳/۴۰۷	۰/۰۲۷	۰/۹۵۲		
امام	۱	۹/۹۷۴	۰/۵۷۲	۰/۵۷۲	۱۳۲۹۰	۵۲۷۴۰
	۲	۱۰/۴۳۶	۰/۲۲۶	۰/۷۹۸		
	۳	۱۰/۹۹۳	۰/۰۵۸	۰/۸۵۶		
	۴	۱۵/۹۸۷	۰/۰۳۴	۰/۸۹۰		
	۵	۱۷/۲۸۳	۰/۰۲۴	۰/۹۱۴		
سلطانیه	۱	۸/۱۱۷	۰/۶۰۷	۰/۶۰۷	۶۶۱۰	۲۷۶۰۰
	۲	۱۰/۴۳۰	۰/۱۷۴	۰/۷۸۱		
	۳	۱۱/۰۸۹	۰/۰۷۲	۰/۸۵۳		
	۴	۱۲/۹۶۸	۰/۰۳۱	۰/۸۸۴		
	۵	۱۴/۵۳۷	۰/۰۱۹	۰/۹۰۳		

گنبد تاج الملک

تغییرات نیروها و ممان های بدست آمده در طول ارتفاع گنبد در مقطع بحرانی برای تنش های ایجاد شده در شکل (۶) نشان داده شده اند. N_ϕ و N_θ به ترتیب نیروهای نصف النهاری و مداری، و M_ϕ و M_θ به ترتیب ممان های خمشی نصف النهاری و مداری هستند. حداکثر تنش ها در سازه برای مقطع بحرانی در جدول (۲) داده شده است. مقادیر حداکثر تنش ها در سایر نواحی سازه از این مقادیر تجاوز نمی کنند.

بر اساس آنالیز برای بارگذاری زلزله، به نتایج زیر می توان اشاره نمود.

۱- نیروی نصف النهاری N_ϕ در همه جا فشاری و به سمت پایه افزایشی است.

۲- نیروی مداری N_θ از پایه تا ۲ m پایین رأس، که در

www.SID.ir

Archive of SID

آنجا فشاری ولی ناچیز می شود، کششی است. مقدار حداکثر آن در m ۲ بالای پایه قرار دارد.

۳- ممان خمشی M_ϕ در طول ارتفاع گنبد خیلی کوچک است.

۴- ممان خمشی M_θ در گنبد قابل صرف نظر کردن است.

۵- تنش نصف النهاری σ_ϕ همیشه فشاری است و مقدار حداکثر آن که برابر ۷٪ تنش مجاز فشاری می باشد در پایه قرار دارد.

۶- تنش مداری σ_θ در ناحیهٔ بین m ۱/۴ تا m ۳/۵ بالای پایه، با حداکثر مقدار ۲۵٪ تنش مجاز کششی در m ۲/۱ بالای پایه، کششی است، و حداکثر مقدار فشاری آن که برابر ۳٪ تنش مجاز فشاری است در زمان s $t = ۲/۱$ در نزدیکی رأس اتفاق می افتد (شکل ۷).

۷- حداکثر تغییر مکان در همهٔ جهت ها کمتر از m ۰/۰۰۰۴۴ است.

۸- پنج فرکانس اول بدست آمده به ترتیب برابر ۳۷/۸۰۳، ۴۷/۴۲۷، ۵۵/۱۸۲، ۵۷ و Hz ۶۳/۸۳۳ است (جدول ۳).

گنبد نظام الملک

نتایج حاصل از آنالیز المان های محدود گنبد نشان می دهد که تنش های ایجاد شده در گنبد کوچک تر از تنش های مجاز می باشند. در سازه تحت اثر بار زلزله، تنش نصف النهاری σ_ϕ همیشه فشاری است.

در بارگذاری زلزله، حداکثر مقدار تنش مداری کششی σ_θ برابر ۴۹٪ تنش مجاز در m ۴/۲ بالای پایه است. اندازه های تنش های برشی و تغییر مکان ها کوچک هستند؛ حداکثر تغییر مکان برابر m ۰/۰۰۰۱۷۶ نزدیک رأس در جهت افقی است.

پنج فرکانس اول گنبد به ترتیب برابر ۲۲/۸۵۹، ۲۹/۴۷۶، ۳۵/۸۳۳، ۳۸/۷۱۰ و Hz ۴۲/۸۶۷ است (جدول ۳).

گنبد شیخ لطف الله

نتایج بدست آمده دلالت بر این دارد که تنش های ایجاد شده در گنبد تحت اثر بار زلزله از تنش های مجاز تجاوز نمی کنند. حداکثر مقادیر کششی و فشاری σ_θ به ترتیب برابر ۹۲٪ و ۵۹٪ تنش های مجاز در m ۴/۸ بالای پایه و در پایه است. اندازه های تنش های برشی و تغییر مکان ها کوچک هستند؛ حداکثر تغییرمکان برابر m ۰/۰۰۰۳۹۶ در m ۵/۴ بالای پایه در جهت افقی است.

پنج فرکانس اول گنبد به ترتیب برابر ۱۷/۲۵۷، ۲۴/۴۷۲، ۲۴/۸۰۸، ۳۰/۶۷۴ و Hz ۳۳/۴۰۷ است (جدول ۳). پنج مود شکل اول گنبد در شکل (۸) نشان داده شده است.

گنبد دو پوستهٔ تقویت شدهٔ مسجد امام

به منظور بررسی اثر المان های سازه ای اصلی در این گنبد، یعنی پوستهٔ بالایی، پوستهٔ پایینی و تقویت کننده های نصف النهاری، آنالیز برای چهار حالت زیر انجام گرفته است:

۱- پوستهٔ بالایی + گریو

۲- پوستهٔ پایینی + گریو

۳- پوستهٔ بالایی + پوستهٔ پایینی + گریو

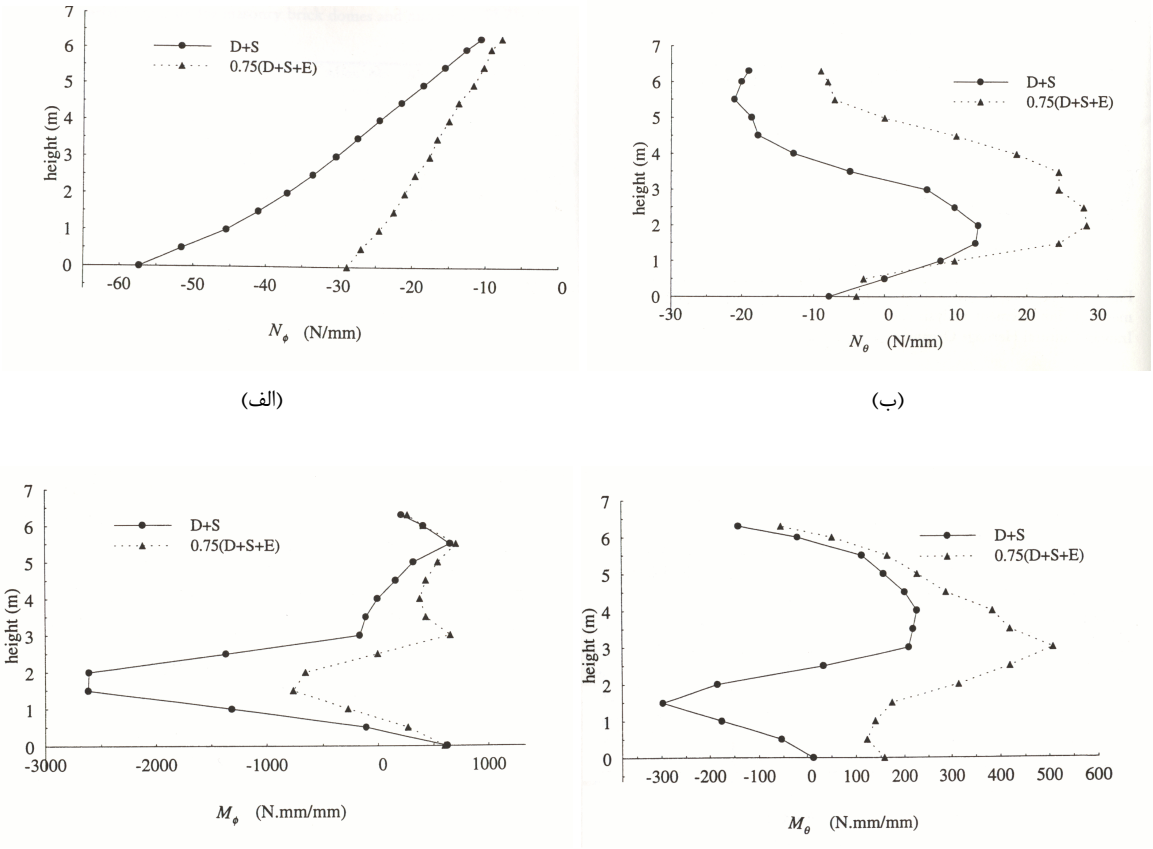
۴- پوستهٔ بالایی + پوستهٔ پایینی + تقویت کننده های نصف النهاری + گریو (همهٔ سازه)

در حالت اول، اندازهٔ ممان خمشی M_θ در بالای محل اتصال پوستهٔ بالایی و گریو به طور قابل ملاحظه ای بزرگ است و باعث ایجاد تنش مداری σ_θ کششی می شود. بنابراین، قسمت پایینی پوستهٔ بالایی، که آوگون است (m ۱۰/۳ بالای پایهٔ گریو)، ناحیهٔ بحرانی است. در حالت دوم، تنش های ایجاد شده در پوستهٔ پایینی و گریو کوچک هستند. در حالت سوم، آنالیز دلالت بر این دارد که برای سازهٔ گنبد بدون تقویت کننده های نصف النهاری قسمت های بحرانی محل اتصال دو پوسته و گریو (دایرهٔ مداری m ۴/۲ بالای پایهٔ گریو)، و قسمت آوگون هستند. نیروهای زلزله تنش هایی بزرگتر از مقادیر مجاز ایجاد می نمایند. در محل اتصال، مقادیر کششی و فشاری تنش نصف النهاری σ_ϕ به ترتیب ۴/۴۹ و ۱/۳۷ برابر مقادیر مجاز هستند. در قسمت آوگون، تنش مداری کششی σ_θ ایجاد شده ۱/۵۴ برابر تنش مجاز است. مقادیر تنش های برشی و تغییر مکان ها کوچک هستند.

در حالت چهارم، آنالیز نشان می دهد که تنش های کششی و ممان های خمشی ایجاد شده به دلیل وجود تقویت کننده های نصف النهاری کاهش می یابند.

www.SID.ir

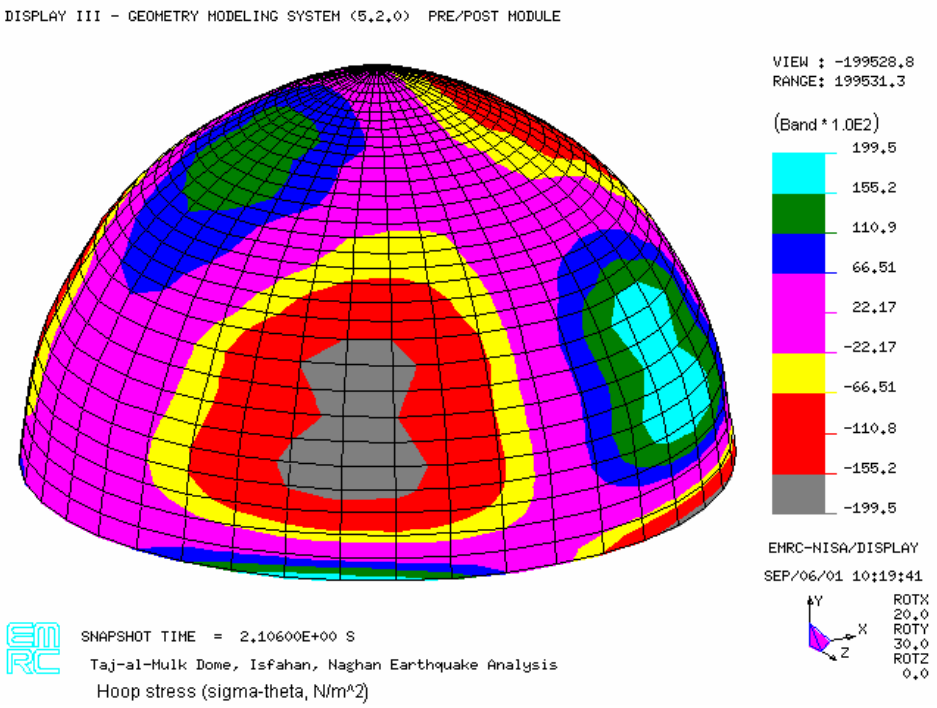
Archive of SID



(الف) (ب)

(ج) (د)

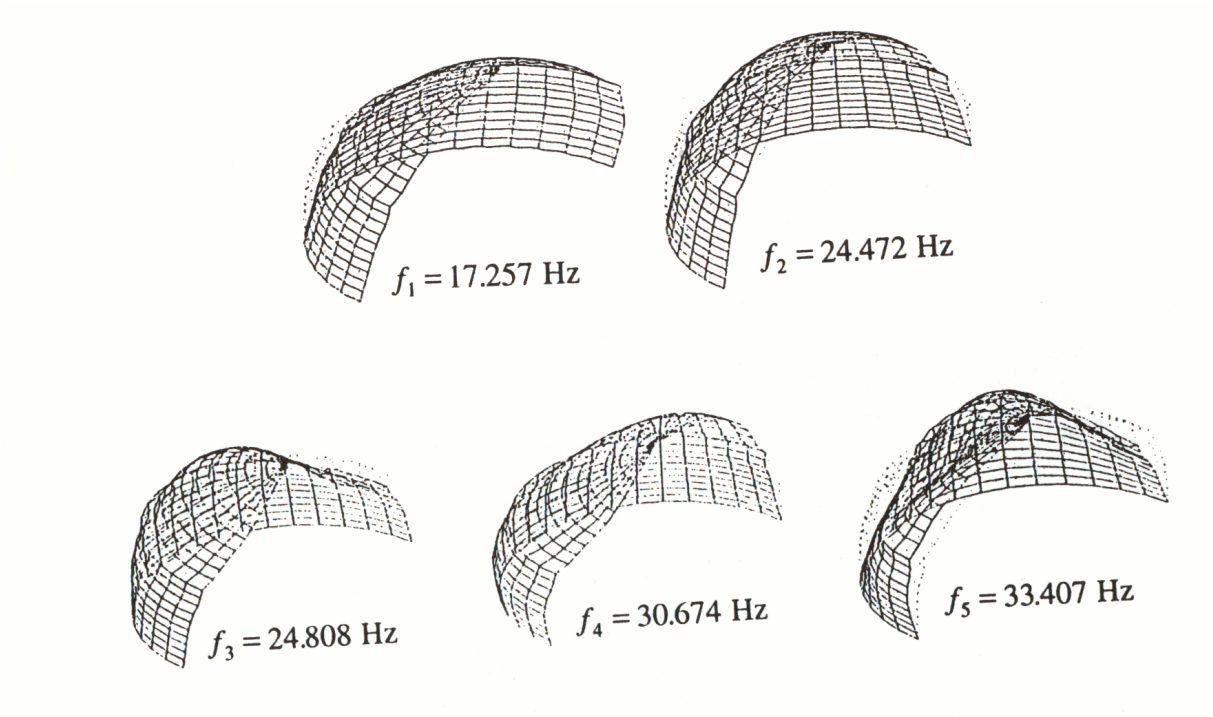
شکل ٦ : تغییرات نیروها و ممان های خمشی در طول ارتفاع گنبد تاج الملک در مقطع بحرانی: (الف) N_ϕ؛ (ب) N_θ؛ (ج) M_ϕ؛ (د) M_θ؛ D= بار مرده (وزن سازه)، S= بار برف، E= بار زلزله.



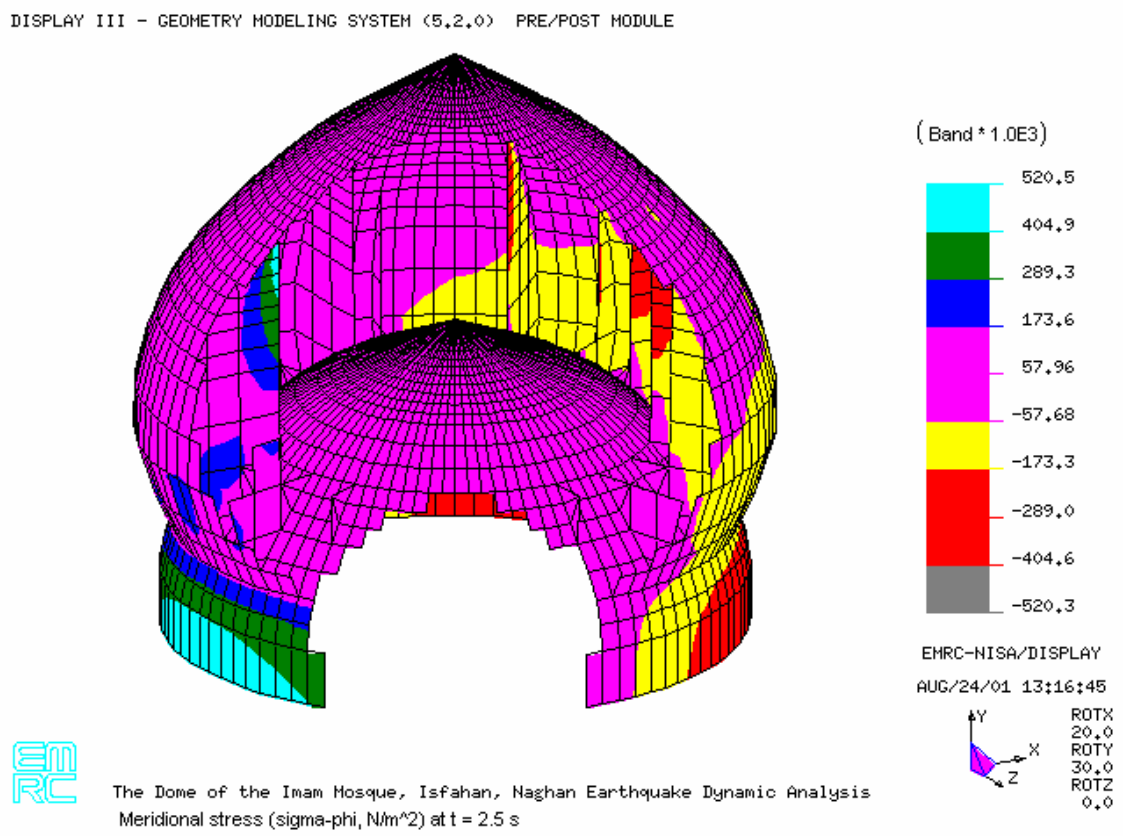
شکل ۷: گنبد تاج الملک، تنش مداری σ_θ در t = ۲/۱ s.

www.SID.ir

Archive of SID



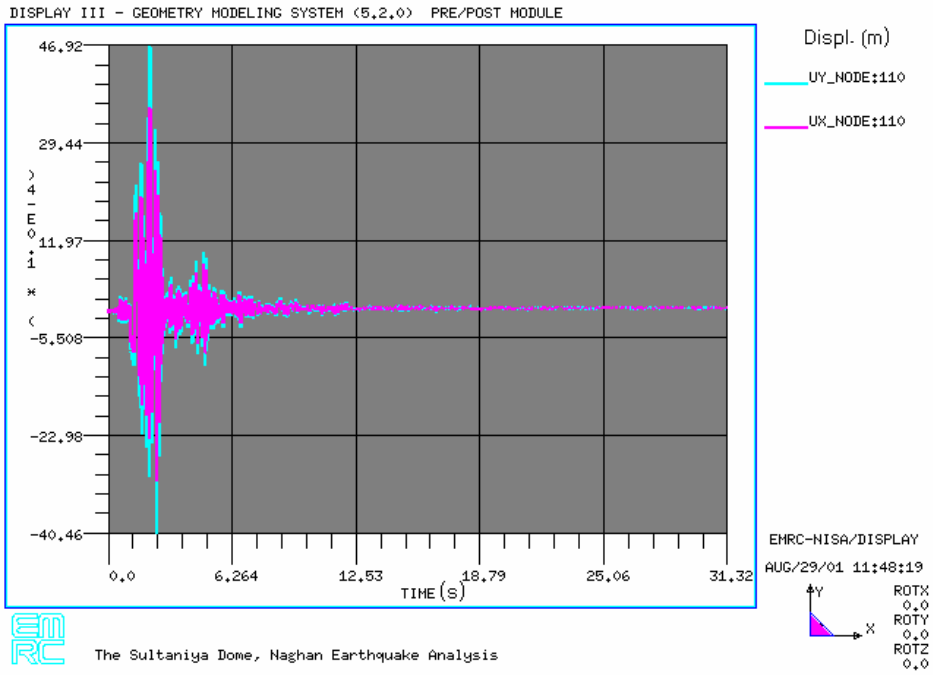
شکل ۸: گنبد شیخ لطف الله، مود شکل ها.



شکل ۹: گنبد مسجد امام در اصفهان، تنش نصف النهاری σ_ϕ در t = ۲/۵ s.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۰- گنبد سلطانیه، تاریخچه برای تغییر مکان ها در جهت های افقی (Ux) و قائم (Uy) برای گره ای در نزدیکی رأس با بیشترین تغییر مکان.

هنوز محل اتصال پوسته ها و گریو ناحیهٔ بحرانی است. در سازهٔ واقعی ناحیهٔ نزدیک اتصال با مصالح بنایی پر شده است. در صورتی که این مورد در مدل آنالیز شده در نظر گرفته نشود، برای بار زلزله، اندازهٔ σ_θ کششی در قسمت آوگون به ۷۴٪ مقدار مجاز کاهش می یابد. در محل اتصال حداکثر مقادیر کششی و فشاری σ_ϕ ،که در زمان ۲/۵ s = t اتفاق می افتد، (از ۴۴۹٪ و ۱۳۷٪) به ۲۸۴٪ و ۹۲٪ مقادیر مجاز کاهش می یابد (شکل ۹). اگر این پر شدگی به سازهٔ مدل شده اضافه گردد، در محل آوگون مقدار کششی σ_θ به ۶۷٪ مقدار مجاز، و اندازه های σ_ϕ کششی و فشاری به ترتیب به ۹۸٪ و ۷۹٪ مقادیر مجاز کاهش می یابد. مقادیر تنش های برشی و تغییر مکان ها کوچک هستند؛ حداکثر تغییر مکان برابر ۰/۰۰۱۲۶ m در جهت افقی نزدیک رأس می باشد. پنج فرکانس اول سازهٔ گنبد به ترتیب برابر ۹/۹۷۴، ۱۰/۴۳۶، ۱۰/۹۹۳، ۱۵/۹۸۷ و ۱۷/۲۸۳ Hz است (جدول ۳).

گنبد دو پوستهٔ مقبرهٔ اولجایتو در سلطانیه

آنالیز المان های محدود گنبد نشان می دهد که تنش های ایجاد شده در گنبد در اثر بار زلزله کوچکتر از تنش های مجاز هستند. حداکثر تغییر مکان، که در نزدیکی رأس اتفاق می افتد، کوچکتر از ۰/۰۰۵ m است (شکل ۱۰).

پنج فرکانس اول گنبد به ترتیب برابر ۸/۱۱۷، ۱۰/۴۳۰، ۱۱/۰۸۹، ۱۲/۹۶۸ و ۱۴/۵۳۷ Hz است (جدول ۳).

نتیجه

از آنالیز سازه ای پنج گنبد نتایج زیر بدست می آید:

۱- تنش های ایجاد شده در همهٔ گنبدهای مطالعه شده کمتر از تنش های مجاز هستند.

۲- از نقطه نظر کم بودن تنش ها گنبد تاج الملک استثنایی است. اندازهٔ تنش ها در این گنبد به طور قابل توجهی کوچک، کمتر از ۲۵٪ تنش های مجاز، هستند.

۳- گنبد دو پوستهٔ تقویت شدهٔ مسجد امام آسیب پذیر ترین گنبد است؛ تنش های ایجاد شده در پوستهٔ بالایی نزدیک محل اتصال دو پوسته و گریو، که آوگون است، بزرگ هستند.

۴- تقویت کننده های نصف النهاری نقش اساسی در پایداری گنبد دو پوسته بازی می کنند. پرشدگی بین

www.SID.ir

Archive of SID

دو پوسته برای حفظ یکپارچگی همهٔ سیستم تقویت شده ضروری است.

۵- برای گنبدهای امام و شیخ لطف الله که در آنها تنش های ایجاد شده نسبتاً بزرگ هستند انجام یک آنالیز غیر خطی برای فهم بهتر رفتار دینامیکی آنها توصیه می شود.

۶- رفتار سازه ای رضایتبخش گنبدهای مطالعه شده در برابر اثرات زلزله دلالت بر این دارد که طراحی این گنبدها از نظر رفتار لرزه ای بر اساس یک بینش آگاهانه از اصول صحیح طراحی انجام گرفته است.

مراجع

1 - Hejazi, M. M. (1997). “Historical buildings of Iran: their architecture and structure.” *Computational Mechanics Publications (WIT Press),* Southampton.

۲- حجازی، م. "آنالیز گنبدهای ایرانی و تحقیق در هنر سنتی." رسالهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، (۱۳۶۹).

۳- حجازی، م. و میرقادری، ر. "اثرات زلزله بر گنبدهای سنتی ایران." مجموعهٔ مقالات اولین کنفرانس بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، (۱۳۷۰).

۴- حجازی، م. "ویژگی های معماری وسازه ای بناهای تاریخی ایران." مجموعهٔ مقالات دومین کنگرهٔ تاریخ معماری و شهرسازی ایران، جلد ۳، صفحهٔ ۲۹۱-۲۷۵، کرمان، ۳۰-۲۶ فروردین (۱۳۷۸).

۵- زهرایی، م. "بررسی سیستم های سازه ای طاق ها و گنبدهای ایرانی." رساله کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، (۱۳۶۷).

6 -*Engineering Mechanics Research Corporation*. (1996). NISA-II manual. 1607 East Big Beaver Road, Troy, Michigan 48083.

۷- "استاندارد ایران شماره ۵۱۹." حداقل بارها روی ساختمان ها، چاپ نهم، موسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، تهران، (۱۳۶۵).

۸- "آئین نامهٔ ساختمان های آجری." انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، تهران، (۱۳۶۵).

۹- "آنالیز و طراحی سازه های با مصالح بنائی." ساختمان های ساخته شده از آجر یا بلوک، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، تهران، (۱۳۶۱).

۱۰- "آئین نامهٔ طراحی زلزلهٔ ساختمان ها شماره ۸۲." وزارت مسکن و شهرسازی، تهران، (۱۳۶۶).

www.SID.ir