

تحلیل لرزه ای گنبدهای ایرانی

مهرداد حجازی

استادیار گروه عمران - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان

رسول میرقادری

دانشیار گروه مهندسی عمران - دانشکده 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. گنبدهای یک پوسته اولین نوع گنبدها می باشند. در این نوع گنبد تک پوسته جزء برابر 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 پوسته پیوسته فاصله بین دو پوسته کم است و پوسته ها توسط اتصال دهنده های آجری به یکدیگر متصل شده اند. در گنبدهای دو پوسته گسسته فاصله 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 دنیای از آسمان آرمانی است. قدمت ساختن گنبد در ایران به هزاره 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. مطالعه 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 مطالعه 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 برابر است. در گنبدهای دو پوسته، دو پوسته وجود دارد که ممکن است پیوسته با یک فاصله کوچک بین دو پوسته، یا گسسته با یک فاصله قابل ملاحظه بین دو پوسته باشد. در حالت اخیر، دیوارها یا تقویت کننده های آجری نصف النهاری در فضای بین دو پوسته برخی از گنبدها ساخته می شود که وظیفه آن ایجاد پایداری سازه ای است.

توصیف گنبد‌های مورد مطالعه

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

گنبد تاج الملک (۴۸۱ هجری) یک ساختمان برجسته در سمت شمالی مسجد جامع در اصفهان است. قطر خارجی آن در پایه $11/7$ m است. ارتفاع آن از ترازهای پایه و زمین به ترتیب $6/3$ m و 20 m است. ضخامت تک پوسته از $0/36$ m در رأس تا $0/66$ m در پایه تغییر می‌کند (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 $16/6$ m است. ارتفاع آن از ترازهای پایه و زمین به ترتیب $10/5$ m و 26 m است. ضخامت تک پوسته از $0/45$ m در رأس تا 1 m در پایه تغییر می‌کند (شکل ۲). شکل مقطع قائم گنبد از تقاطع دو قوس بیضی به دست می‌آید.

گنبد یک پوسته مسجد شیخ لطف الله (۲۸-۱۰۱۱ هجری) در سمت شرقی میدان نقش جهان در اصفهان قرار دارد. قطر خارجی پایه آن $20/8$ m و ارتفاع آن از ترازهای پایه و زمین به ترتیب 12 m و $28/5$ m است. ضخامت پوسته گنبد از $0/95$ m در رأس تا $1/3$ m در پایه تغییر می‌کند (شکل ۳). مقطع قائم گنبد از نوع قوس چهار پرگار (پنج اوهفت کند) است.

گنبد دوپوسته تقویت شده 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 $26/3$ m است. ارتفاع گریو 7 m و ضخامت آن در پایه و در بالا به ترتیب $1/7$ m و $2/2$ m است. گریو دارای هشت عدد پنجره، به ارتفاع $3/3$ m و عرض $1/7$ m، است که در فواصل مساوی دور گریو قرار گرفته‌اند. ارتفاع پوسته‌های بالایی و پایینی از تراز پایه گریو به ترتیب $24/45$ m و $13/2$ m، و فاصله بین دو پوسته $11/25$ m است. پوسته بالایی دارای ارتفاع 52 m از تراز زمین است. ضخامت پوسته پایینی از $0/22$ تا $1/35$ m به سمت گریو تغییر می‌کند، و تغییرات

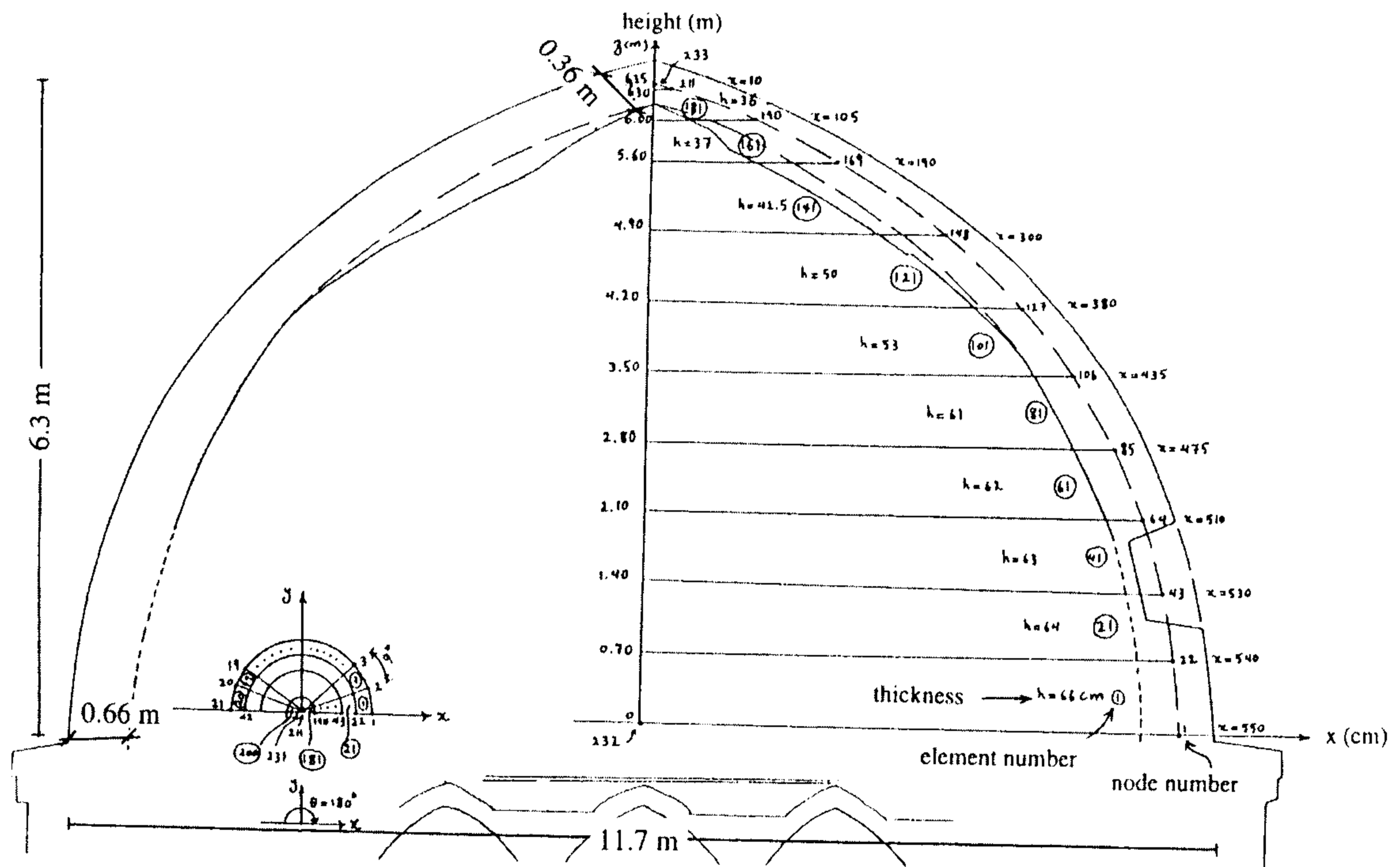
ضخامت پوسته بالایی از $0/3$ m تا $1/1$ m به سمت پایه است. پوسته بالایی شلغمی شکل است. تعداد ۲۴ عدد دیوار (خشخاشی، تقویت کننده) آجری شعاعی یا نصف النهاری در فضای بین دو پوسته وجود دارد که به دو پوسته متصل شده‌اند. ضخامت خشخاشی‌ها $0/45$ m است. خشخاشی‌ها دارای سه ارتفاع مختلف هستند. خشخاشی‌های بلند، متوسط و کوتاه به ترتیب دارای ارتفاع $12/6$ m، $10/7$ m و $7/6$ m هستند. این خشخاشی‌ها به ترتیب و به فواصل مساوی دور محیط گنبد قرار گرفته‌اند (شکل ۴). مقطع قائم دو پوسته از نوع قوس چهار پرگار (پنج اوهفت) می‌باشد.

گنبد دو پوسته مقبره 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 $9/3$ m و 54 m است، و قطر آن $24/5$ m می‌باشد. مقطع قائم آن تخم مرغی شکل است. گنبد از پایه تا ارتفاع 4 m بالای پایه به صورت یک پوسته با ضخامت $1/4$ m است. گنبد از ارتفاع 4 m بالای پایه به صورت دو پوسته است و ضخامت آن از آنجا به سمت رأس با استفاده از تعدادی پله تغییر می‌کند. پوسته‌های داخلی و خارجی به ترتیب دارای ضخامت $0/6$ m و $0/4$ m، با فاصله $0/6$ m، در ارتفاع 4 m بالای پایه، می‌باشند. دو پوسته در نقاط معینی در فضای بین دو پوسته به یکدیگر متصل شده‌اند (شکل ۵).

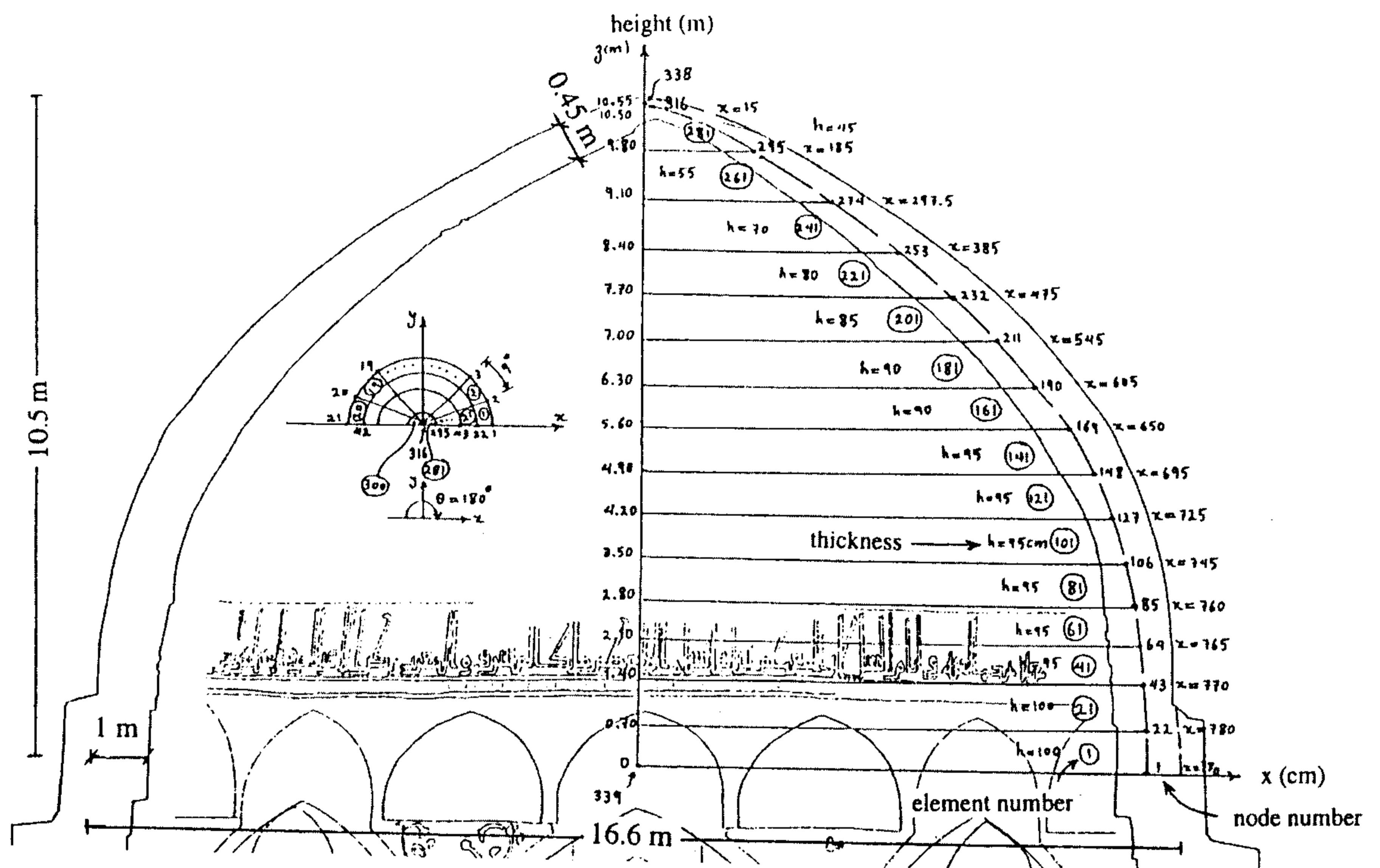
روش آنالیز و فرضیات

آنالیز سازه‌های با مصالح بنایی با ویژگی مقاومت کششی کوچک و رفتار غیر خطی یا غیر ایزوتروپیک، یک مسئله پیچیده در حوزه مهندسی سازه است.

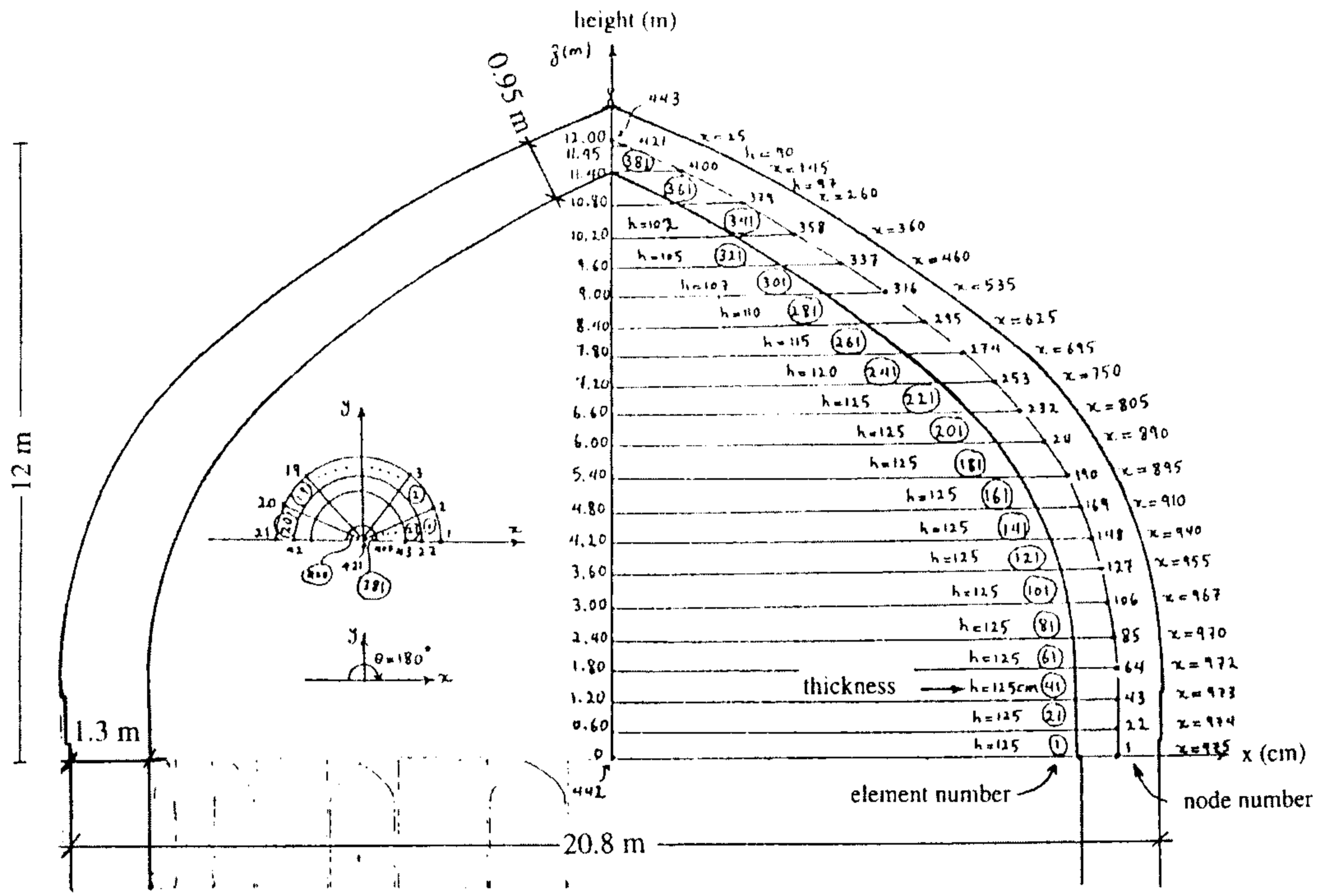
روش المان‌های محدود یکی از قوی‌ترین روش‌ها برای آنالیز سازه‌های با مصالح بنایی است. به نظر می‌رسد که یک آنالیز المان‌های محدود الاستیک خطی، در صورتی که تنش‌های حاصل در مقایسه با مقاومت مصالح بنایی نسبتاً کوچک باشند، برای ارزیابی اولیه رفتار چنین سازه‌هایی قابل قبول باشد. در آنالیزها از برنامه المان‌های محدود NISA-II [۶] استفاده شده است و المان مورد استفاده در مدلسازی المان پوسته بوده است.



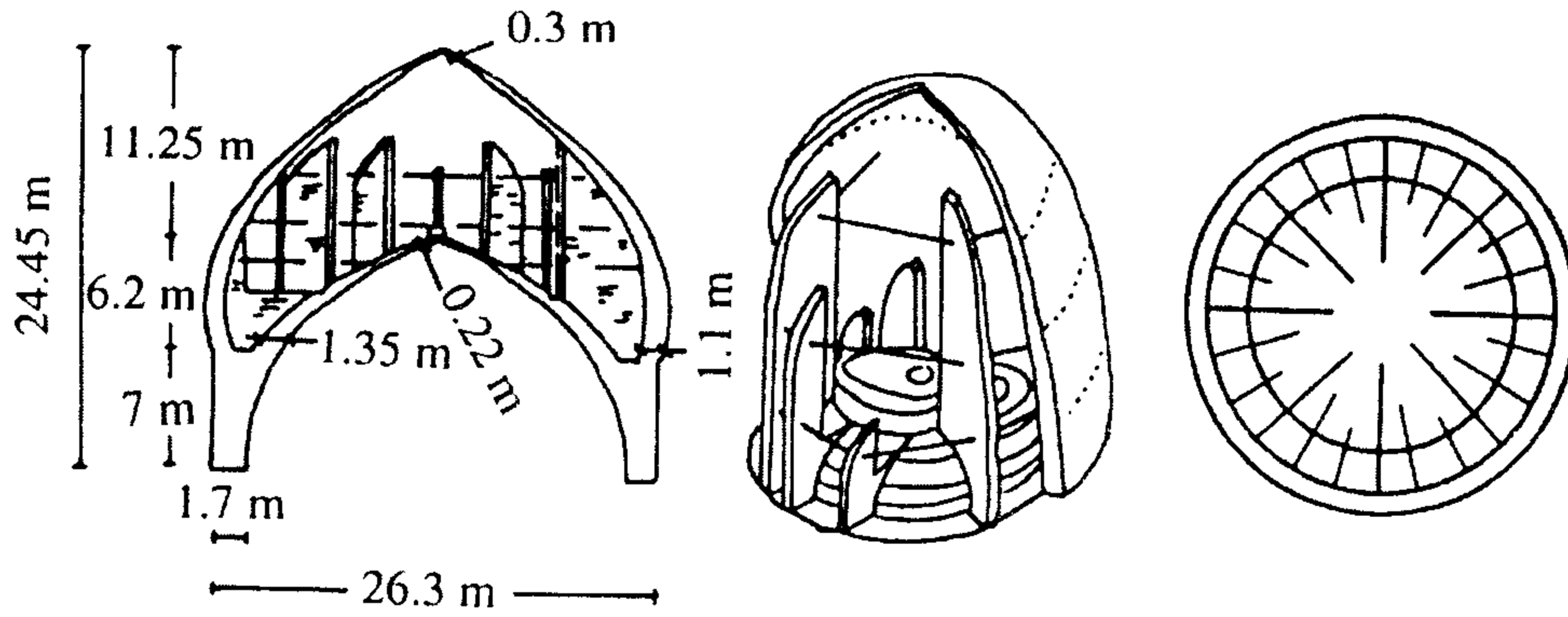
شکل ۱: گنبد تاج الملک، اصفهان، ۴۸۱ هجری، ابعاد و مش ایجاد شده برای آنالیز المان های محدود.



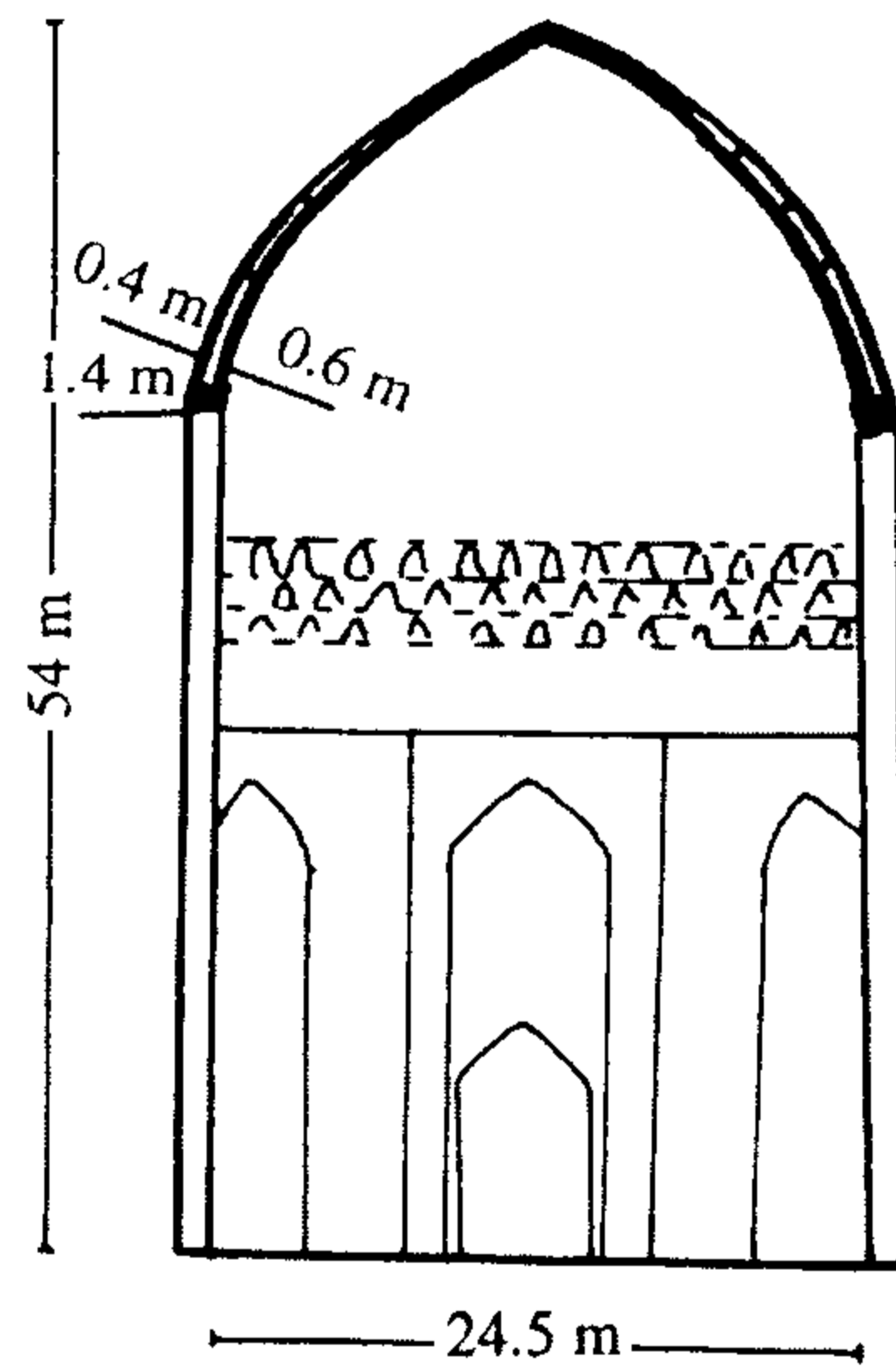
شکل ۲: گنبد نظام الملک، اصفهان، ۸۵-۴۶۵ هجری، ابعاد و مش ایجاد شده برای آنالیز المان های محدود.



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



شکل ۴: سیستم سازه ای گنبد دو پوسته تقویت شده مسجد امام، اصفهان، ۴۸-۱۰۲۰ هجری.



شکل ۵: گنبد مقبره اولجايتو، سلطانیه، ۱۰-۷۰۴ هجری.

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

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

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

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

بار	گره	ارتفاع m	ضخامت t m	$\frac{N_\phi}{N}$ mm	$\frac{N_\theta}{N}$ mm	$\frac{M_\phi}{N \cdot mm}$ mm	$\frac{M_\theta}{N \cdot mm}$ mm	$\frac{\sigma_\phi \dagger}{N}$ mm ²	$\frac{\sigma_\theta \ddagger}{N}$ 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

$$-0.7 \leq \sigma_\phi = \frac{N_\phi}{t} \pm \frac{6M_\phi}{t^2} \leq 0.7 \quad \dagger$$

$$-0.7 \leq \sigma_\theta = \frac{N_\theta}{t} \pm \frac{6M_\theta}{t^2} \leq 0.7 \quad \ddagger$$

ریز در سازه های با مصالح بنایی ضریب استهلاک برابر ۰/۷ 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 گنبد های 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 مود های بالاتر نیست زیرا تمام پاسخ های سازه به ضریب مشارکت جرم بستگی دارد و در مود های 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 تاریخچه زمانی زلزله ناغان می باشند. برش پایه نیز از آنالیز دقیق دینامیکی با کاربرد تاریخچه زمانی بدست آمده است.

تنش های مجاز

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

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 [۷-۹].

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 پایه گریو به زیر سازه آن به گونه ای است که همه تغییر مکان ها و چرخش ها، به جز چرخش حول محیط دایره مداری پایه، برابر صفر می باشند. سازه گنبدی (گنبد و گریو) به صورت مستقل از زیر سازه آنالیز شده است، مانند اینکه سازه گنبدی روی یک تکیه گاه سخت قرار گرفته باشد.

بار گذاری

در آنالیز دینامیکی روش آنالیز تاریخچه زمانی به کار برده شده است. زلزله ناغان، توصیه شده توسط آیین نامه طرح ساختمان ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ [۱۰])، برای آنالیز تاریخچه زمانی توسط برنامه NISA-II مورد استفاده قرار گرفته است. به دلیل وجود ترک های

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	۰/۱۵۰۶	۰/۱۵۰۶	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	۰/۱۶۴۳	۰/۱۶۴۳	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	۰/۱۶۲۴	۰/۱۶۲۴	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	۰/۱۵۷۲	۰/۱۵۷۲	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

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_{θ} در همه جا فشاری و به سمت پایه افزایشی است.
۲- نیروی مداری N_{θ} از پایه تا ۲ m پایین رأس، که در

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_{θ} و N_{θ} به ترتیب نیروهای نصف النهاری و مداری، و M_{θ} 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

ترتیب برابر ۹۲٪ و ۵۹٪ تنش های مجاز در $m/4$ بالای پایه و در پایه است. اندازه های تنش های برشی و تغییر مکان ها کوچک هستند؛ حداکثر تغییر مکان برابر $m/0.00396$ در $m/5/4$ بالای پایه در جهت افقی است. پنج فرکانس اول گنبد به ترتیب برابر $17/257$ ، $24/472$ ، $24/808$ ، $30/674$ و $33/407$ Hz است (جدول ۳). پنج مود شکل اول گنبد در شکل (۸) نشان داده شده است.

گنبد دو پوسته تقویت شده مسجد امام

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

- ۱- پوسته بالایی + گریو
- ۲- پوسته پایینی + گریو
- ۳- پوسته بالایی + پوسته پایینی + گریو
- ۴- پوسته بالایی + پوسته پایینی + تقویت کننده های نصف النهاری + گریو (همه سازه)

در حالت اول، اندازه ممان خمشی M_{θ} در بالای محل اتصال پوسته بالایی و گریو به طور قابل ملاحظه ای بزرگ است و باعث ایجاد تنش مداری σ_{θ} کششی می شود. بنابراین، قسمت پایینی پوسته بالایی، که آوگون است ($m/10/3$ بالای پایه گریو)، ناحیه بحرانی است. در حالت دوم، تنش های ایجاد شده در پوسته پایینی و گریو کوچک هستند. در حالت سوم، آنالیز دلالت بر این دارد که برای سازه گنبد بدون تقویت کننده های نصف النهاری قسمت های بحرانی محل اتصال دو پوسته و گریو (دایره مداری $m/4/2$ بالای پایه 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_{θ} به ترتیب $4/49$ و $1/37$ برابر مقادیر مجاز هستند. در قسمت آوگون، تنش مداری کششی σ_{θ} ایجاد شده $1/54$ 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.

آنجا فشاری ولی ناچیز می شود، کششی است. مقدار حداکثر آن در $m/2$ بالای پایه قرار دارد.

۳- ممان خمشی M_{θ} در طول ارتفاع گنبد خیلی کوچک است.

۴- ممان خمشی M_{θ} در گنبد قابل صرف نظر کردن است.

۵- تنش نصف النهاری σ_{θ} همیشه فشاری است و مقدار حداکثر آن که برابر 7% تنش مجاز فشاری می باشد در پایه قرار دارد.

۶- تنش مداری σ_{θ} در ناحیه بین $m/1/4$ تا $m/3/5$ بالای پایه، با حداکثر مقدار 25% تنش مجاز کششی در $m/2/1$ بالای پایه، کششی است، و حداکثر مقدار فشاری آن که برابر 3% تنش مجاز فشاری است در زمان S $t = 2/1$ در نزدیکی رأس اتفاق می افتد (شکل ۷).

۷- حداکثر تغییر مکان در همه جهت ها کمتر از $m/0.0044$ است.

۸- پنج فرکانس اول بدست آمده به ترتیب برابر $37/803$ ، $47/427$ ، $55/182$ ، 57 و $63/833$ Hz است (جدول ۳).

گنبد نظام الملک

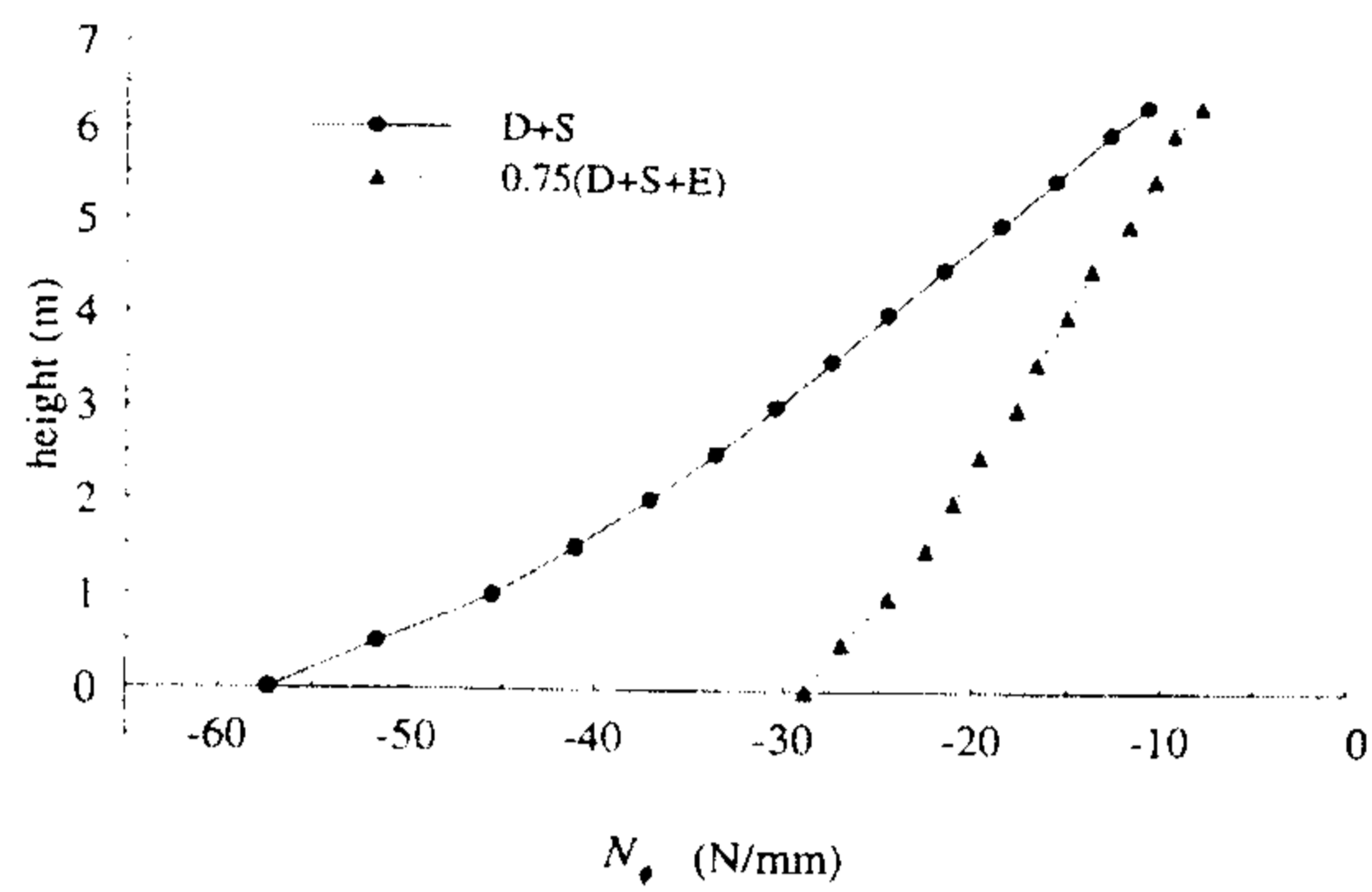
نتایج حاصل از آنالیز المان های محدود گنبد نشان می دهد که تنش های ایجاد شده در گنبد کوچک تر از تنش های مجاز می باشند. در سازه تحت اثر بار زلزله، تنش نصف النهاری σ_{θ} همیشه فشاری است.

در بارگذاری زلزله، حداکثر مقدار تنش مداری کششی σ_{θ} برابر 49% تنش مجاز در $m/4/2$ بالای پایه است. اندازه های تنش های برشی و تغییر مکان ها کوچک هستند؛ حداکثر تغییر مکان برابر $m/0.00176$ نزدیک رأس در جهت افقی است.

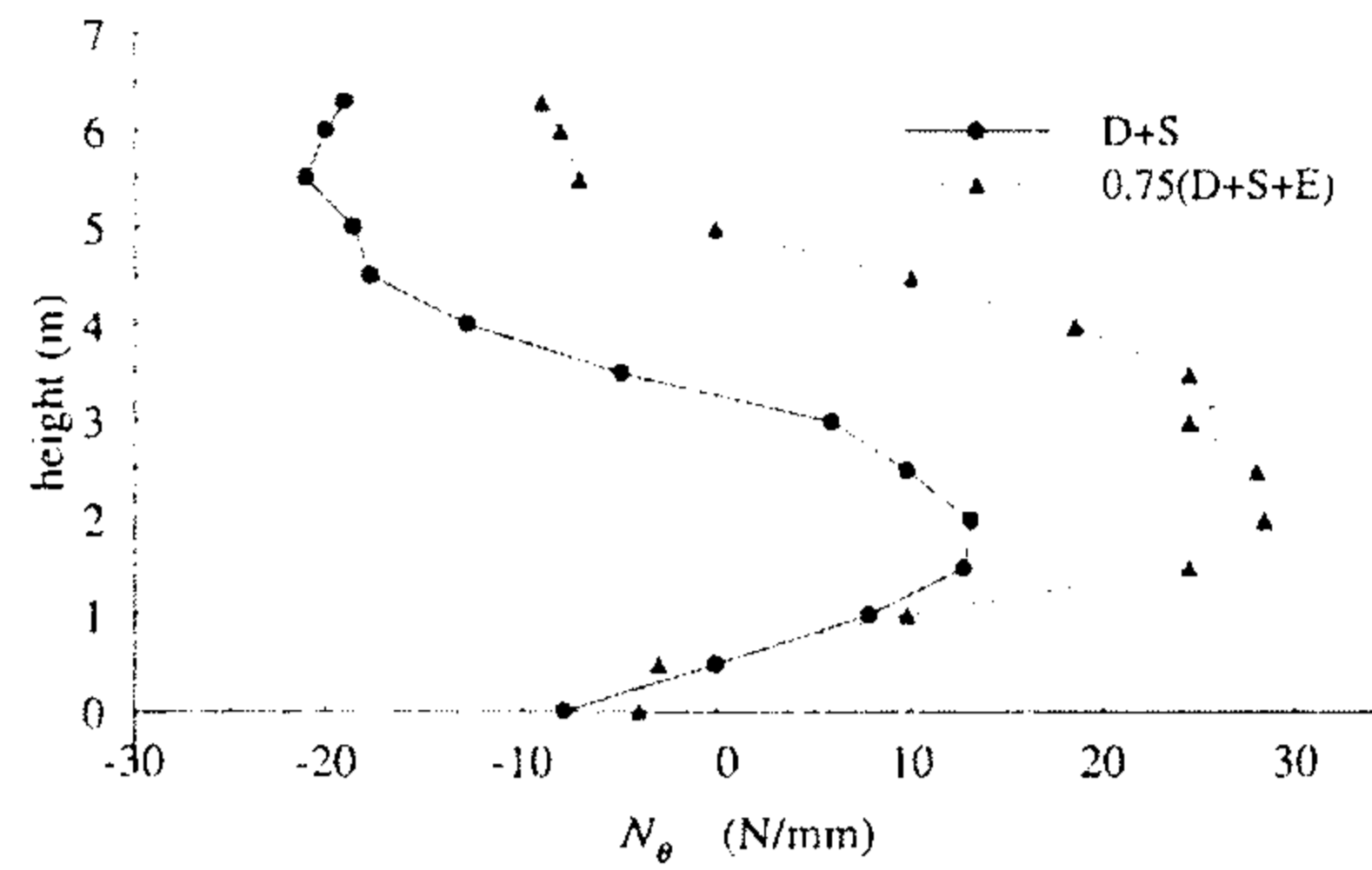
پنج فرکانس اول گنبد به ترتیب برابر $22/859$ ، $29/476$ ، $35/833$ ، $38/710$ و $42/867$ Hz است (جدول ۳).

گنبد شیخ لطف الله

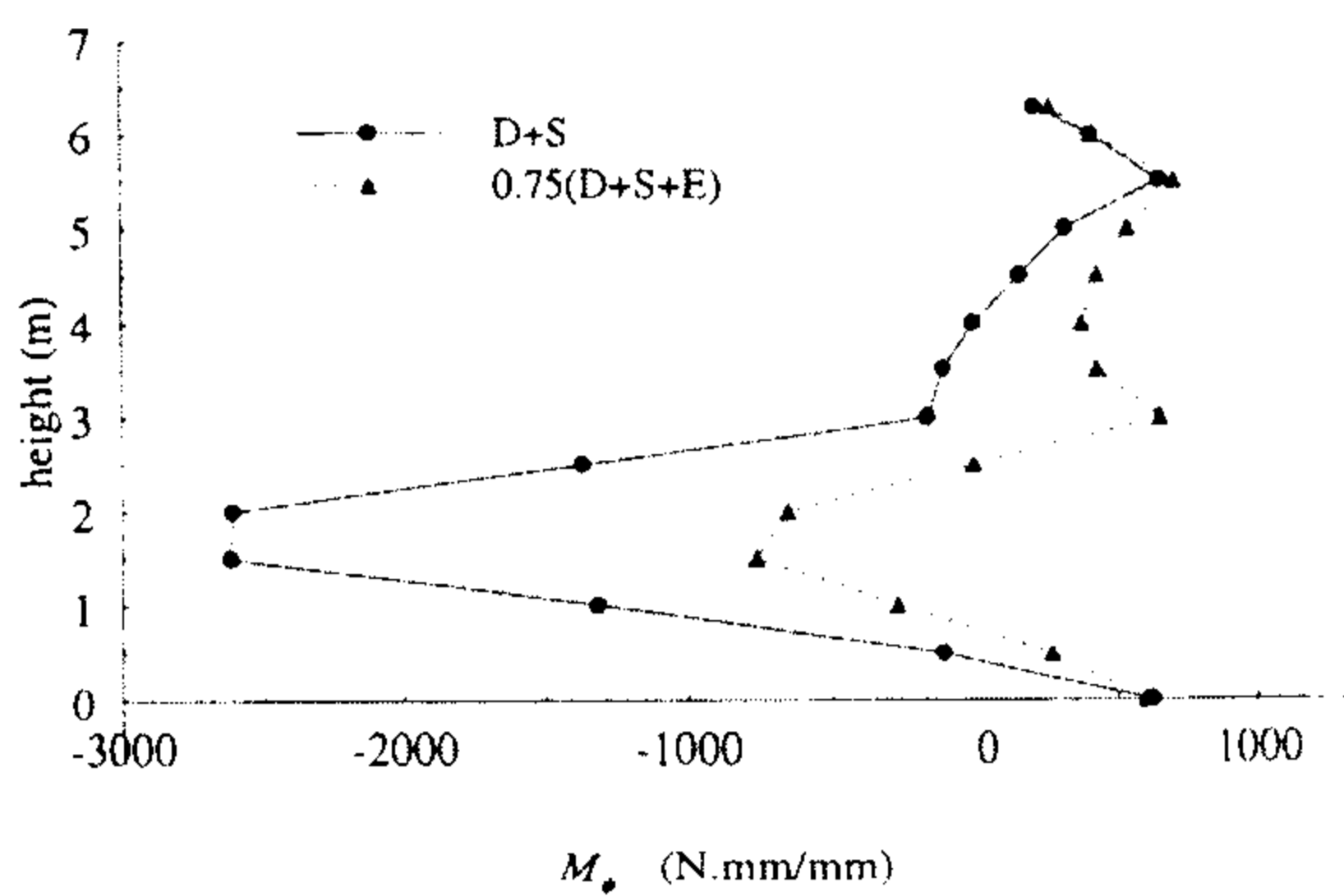
نتایج بدست آمده دلالت بر این دارد که تنش های ایجاد شده در گنبد تحت اثر بار زلزله از تنش های مجاز تجاوز نمی کنند. حداکثر مقادیر کششی و فشاری σ_{θ} به



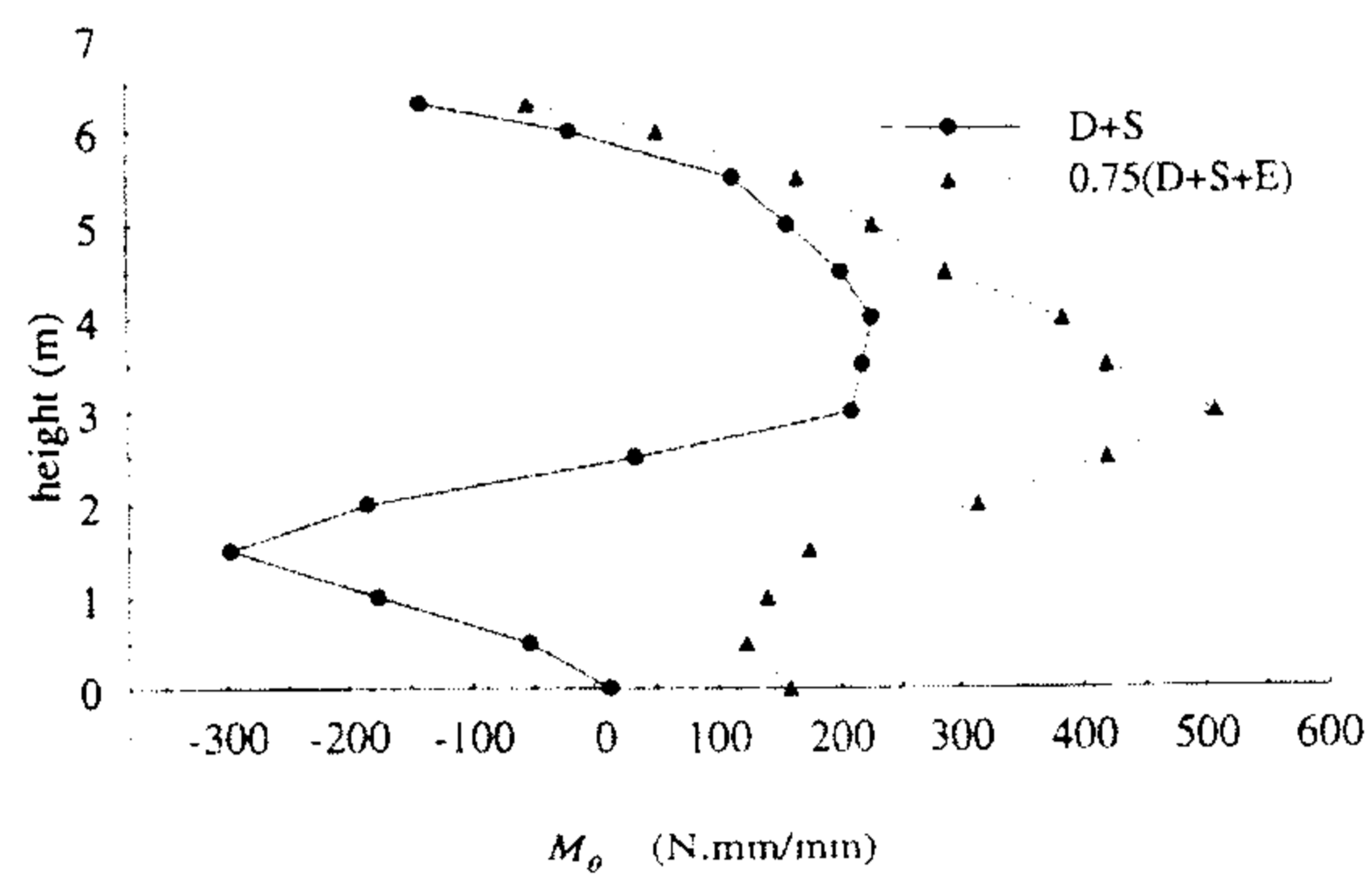
(الف)



(ب)



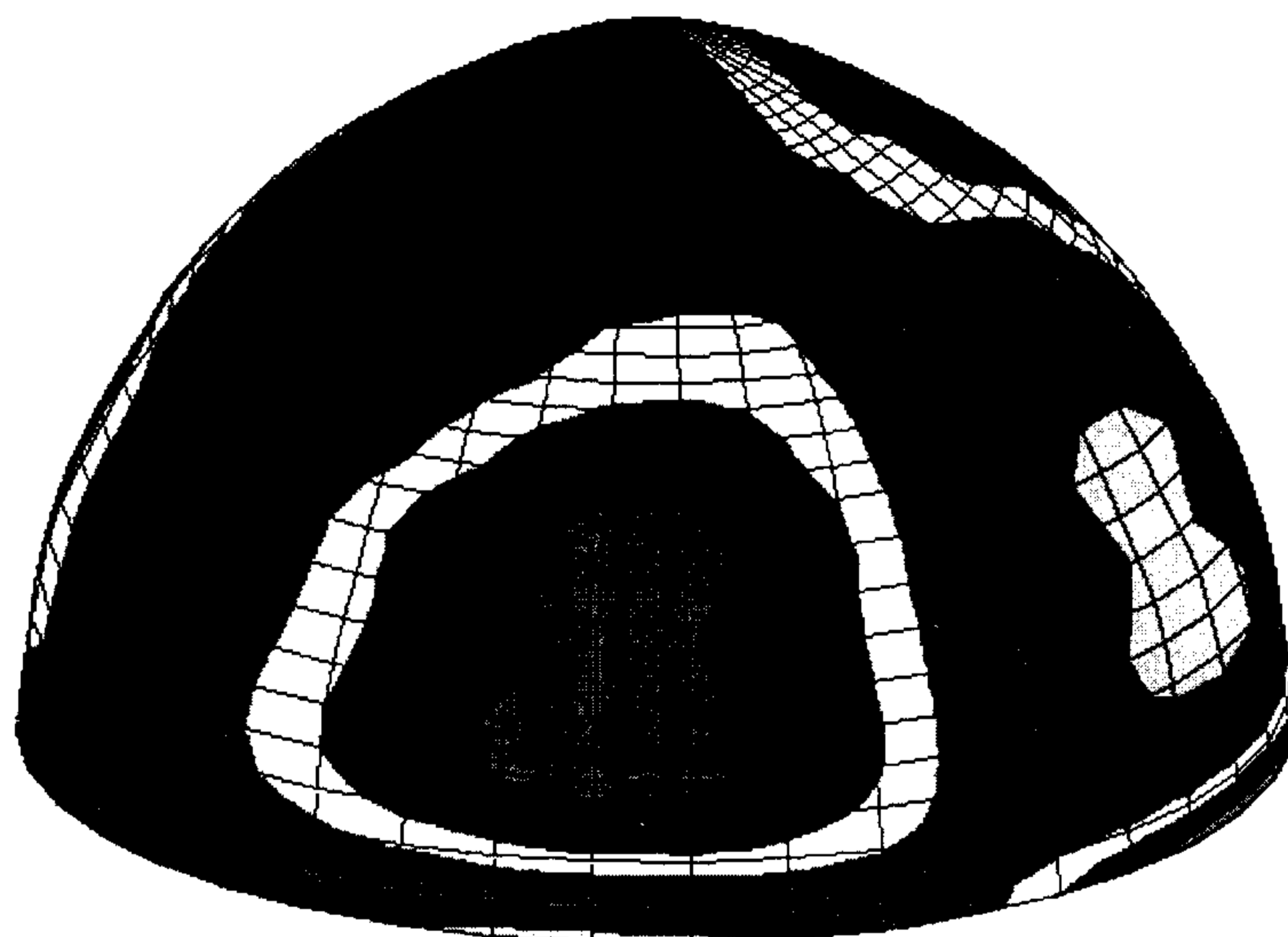
(ج)



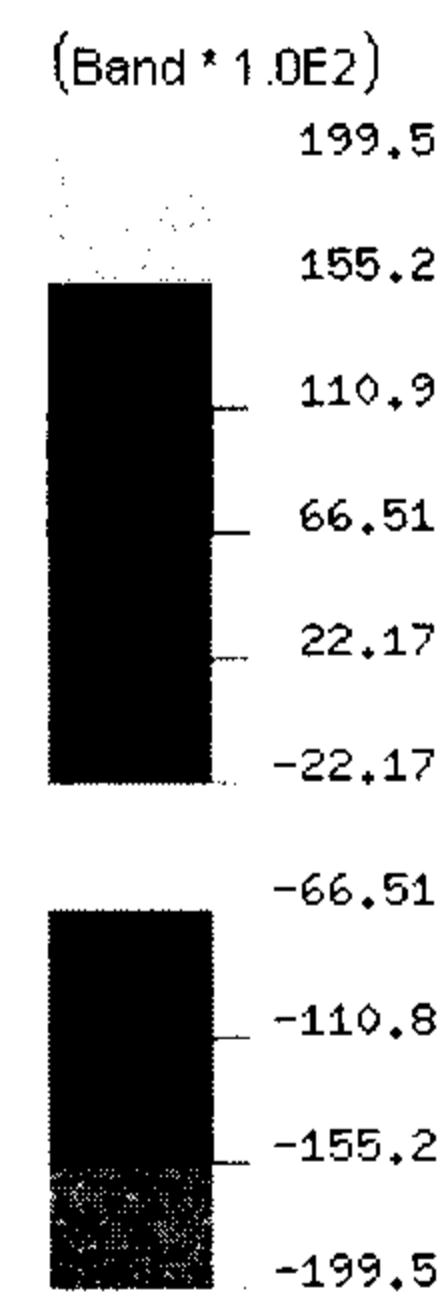
(د)

شکل ۶: تغییرات نیروها و ممان های خمشی در طول ارتفاع گنبد تاج الملک در مقطع بحرانی: (الف) N_θ ؛ (ب) N_θ ؛ (ج) M_θ ؛ (د) M_θ ؛ D = بار مرده (وزن سازه)، S = بار برف، E = بار زلزله.

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM (5.2.0) PRE/POST MODULE



VIEW : -199528.8
RANGE: 199531.3

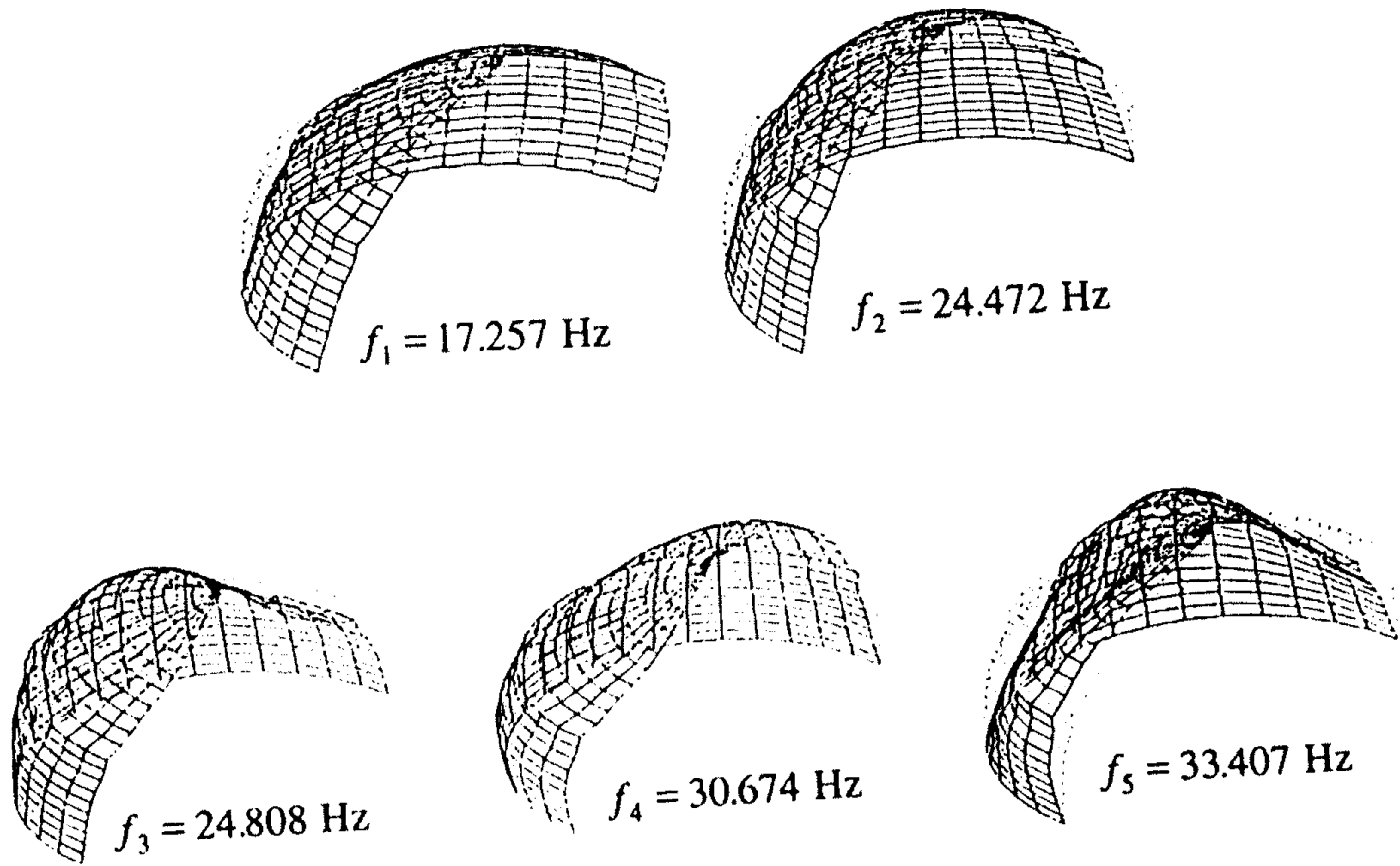


EMRC-NISA/DISPLAY
SEP/06/01 10:19:41

ROT X 20.0
ROT Y 30.0
ROT Z 0.0

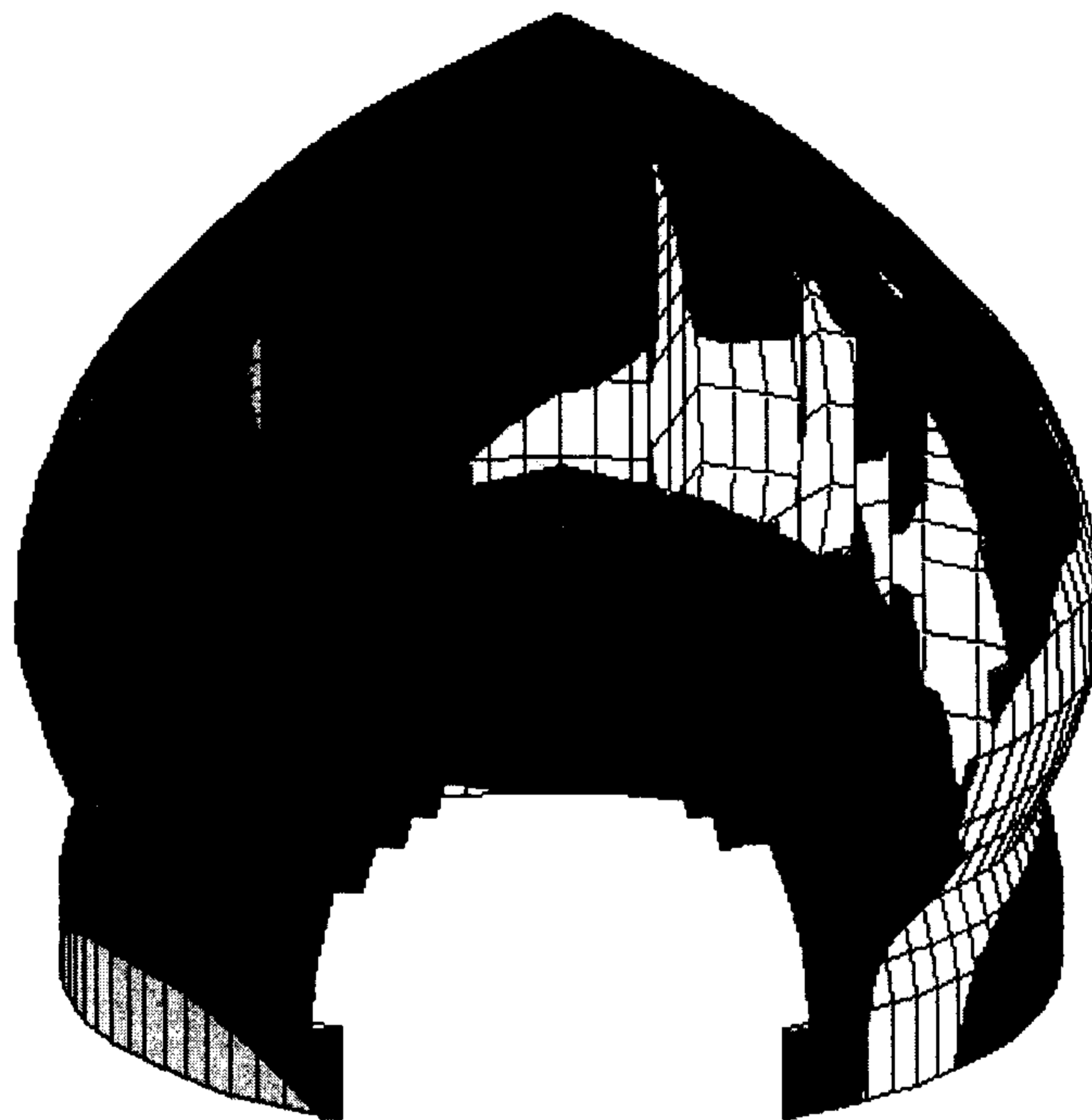
SNAPSHOT TIME = 2.10600E+00 S
Taj-al-Mulk Dome, Isfahan, Naghan Earthquake Analysis
Hoop stress (sigma-theta, N/m^2)

شکل ۷: گنبد تاج الملک، تنش مداری σ_θ در $t = 2/1$ s.

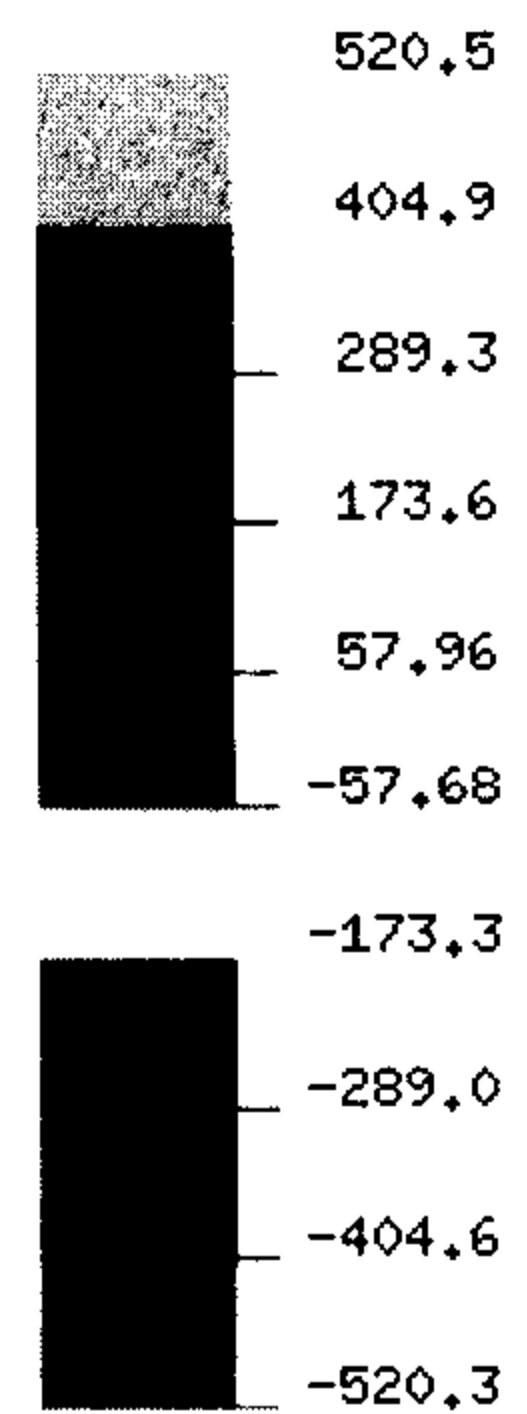


شکل ۸: گنبد شیخ لطف الله، مود شکل ها.

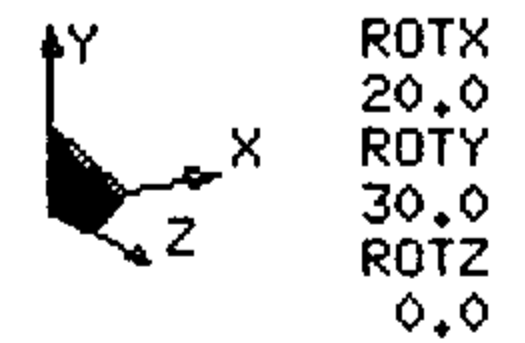
DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM (5.2.0) PRE/POST MODULE



(Band * 1.0E3)

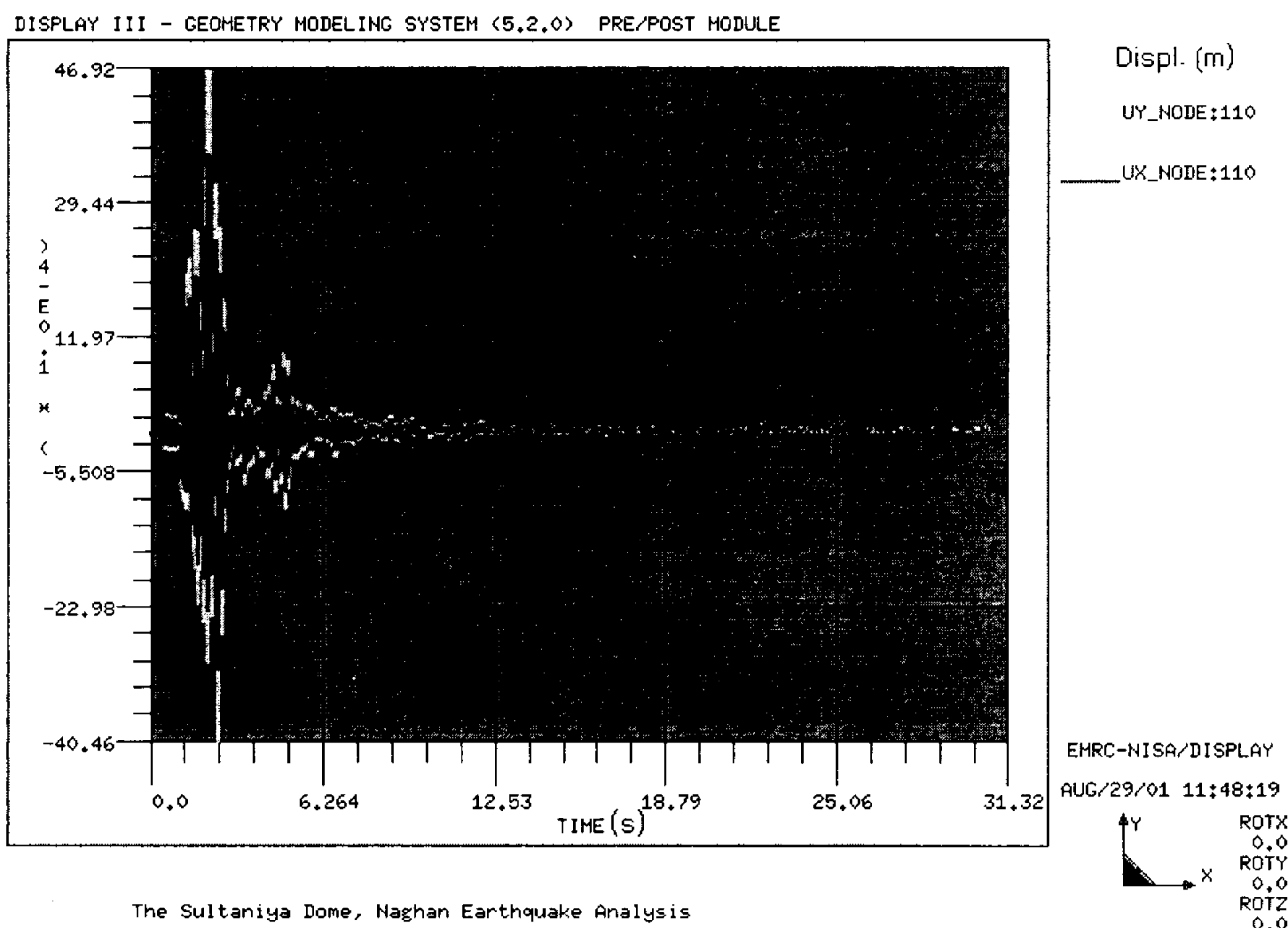


EMRC-NISA/DISPLAY
AUG/24/01 13:16:45



The Dome of the Imam Mosque, Isfahan, Naghan Earthquake Dynamic Analysis
Meridional stress (sigma-phi, N/m²) at t = 2.5 s

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



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.

نزدیکی رأس اتفاق می افتد، کوچکتر از 0.005 m است (شکل ۱۰).

پنج فرکانس اول گنبد به ترتیب برابر $8/117$ ، $10/430$ ، $11/089$ ، $12/968$ و $14/537\text{ Hz}$ است (جدول ۳).

نتیجه

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

- ۱- تنش های ایجاد شده در همه گنبدهای مطالعه شده کمتر از تنش های مجاز هستند.
- ۲- از نقطه نظر کم بودن تنش ها گنبد تاج الملک استثنایی است. اندازه تنش ها در این گنبد به طور قابل توجهی کوچک، کمتر از 25% تنش های مجاز، هستند.
- ۳- گنبد دو پوسته تقویت شده مسجد امام آسیب پذیر ترین گنبد است؛ تنش های ایجاد شده در پوسته 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

هنوز محل اتصال پوسته ها و گریو ناحیه بحرانی است. در سازه واقعی ناحیه نزدیک اتصال با مصالح بنایی پر شده است. در صورتی که این مورد در مدل آنالیز شده در نظر گرفته نشود، برای بار زلزله، اندازه σ_{θ} کششی در قسمت آوگون به 74% مقدار مجاز کاهش می یابد. در محل اتصال حداکثر مقادیر کششی و فشاری σ_{θ} ، که در زمان $2/5\text{ s}$ $t =$ اتفاق می افتد، (از 449% و 137%) به 284% و 92% مقادیر مجاز کاهش می یابد (شکل ۹). اگر این پر شدگی به سازه مدل شده اضافه گردد، در محل آوگون مقدار کششی σ_{θ} به 67% مقدار مجاز، و اندازه های σ_{θ} کششی و فشاری به ترتیب به 98% و 79% مقادیر مجاز کاهش می یابد. مقادیر تنش های برشی و تغییر مکان ها کوچک هستند؛ حداکثر تغییر مکان برابر 0.00126 m در جهت افقی نزدیک رأس می باشد. پنج فرکانس اول سازه گنبد به ترتیب برابر $9/974$ ، $10/436$ ، $10/993$ ، $15/987$ و $17/283\text{ Hz}$ است (جدول ۳).

گنبد دو پوسته مقبره 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

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.

دو پوسته برای حفظ یکپارچگی همه 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.

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." رساله کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، (۱۳۶۹).
- ۳- حجازی، م. و میرقادری، ر. "اثرات زلزله بر گنبدهای سنتی ایران." مجموعه مقالات اولین کنفرانس بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، (۱۳۷۰).
- ۴- حجازی، م. "ویژگی های معماری و سازه ای بناهای تاریخی ایران." مجموعه مقالات دومین کنگره تاریخ معماری و شهرسازی ایران، جلد ۳، صفحه ۲۹۱-۲۷۵، کرمان، ۲۶-۳۰ 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، موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، تهران، (۱۳۶۵).
- ۸- "آئین نامه 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 نامه طراحی زلزله ساختمان ها شماره ۸۲." وزارت مسکن و شهرسازی، تهران، (۱۳۶۶).

