فرایند طراحی یک سازه‌ی ویژه‌ی بتنی پوسته‌یی

احمدرضا عاملی
مدیر عامل مهندسین مشاور مها بنای شهر
مهدی قاسمیه (استادیار)
دانشکده فنی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه تهران

فرایند طراحی یک سازه‌ی ویژه تفاوت‌های فراوان با فرایند طراحی این‌گونه سازه‌ها در گذشته یافته است. تأثیر متقابل علم و فناوری به توسعه‌ی مرزهای دانش انجامیده، بستر مناسبی برای شناخت بیشتر مهندسان فراهم کرده است. تلفیق هنر، تجربه و فناوری بیش از پیش مهندسان را به سمت طراحی مبرا از خطا رهنمون ساخته است. در این مقاله فرایند طراحی یک پروژه‌ی مذهبی ـ فرهنگی که از حساسیت‌های خاصی برخوردار است تشریح شده است. بررسی‌ها، تحلیل‌های متنوع خطی و غیرخطی استاتیکی و دینامیکی، شیوه‌ی طراحی، آزمایش تونل باد و آزمایش‌های استاتیکی و دینامیکی انجام شده بر روی مدل با مقیاس ۱:۱۰ به‌صورت اجمالی بیان شده است.

مقدمه

آثار ساختمانی به‌جا مانده از اعصار گذشته بیانگر هنر و تجربه‌ی فنی طراحان این گونه آثار است، اما عدم شناخت کافی نسبت به ماهیت مصالح و چگونگی نیروهای طبیعی از یک طرف، و عدم اشراف کامل نسبت به رفتار سازه از سوی دیگر، به‌طور معمول به طراحی ساختمان‌هایی انجامیده که لزوماً از ایمنی و توجیه اقتصادی لازم برخوردار نبوده‌اند. در قرون اخیر، با شناخت علمی بشر نسبت به مصالح، و دانش بیشتر نسبت به کیفیت و کمیت نیروها و رفتار سازه موجباتی فراهم شده که طراحی سازه‌ها از حاشیه‌ی ایمنی و اقتصادی مناسبی برخوردار گشته‌اند. این دستاورد نتیجه‌ی آمیختگی هنر، تجربه و علم است.

امروزه فرایند طراحی برای سازه‌های ویژه اقداماتی را ایجاب می‌کند که رعایت آنها می‌تواند ضمانت‌های لازم را از نظر ایمنی و اقتصادی فراهم آورد. انجام مطالعات وسیع و متنوع در زمینه‌های مختلف نظیر مطالعات خطر زلزله و تهیه‌ی طیف طرح محل، مطالعات مکانیک خاک و انجام آزمایش‌های متناسب با حساسیت پروژه و بررسی توزیع فشار حاصل از نیروهای باد از طریق انجام آزمایش تونل باد، موجبات شناسایی دقیق عوامل مؤثر بر رفتار سازه و تدارک مقدمات کافی برای تحلیل و طراحی سازه را فراهم می‌سازد.

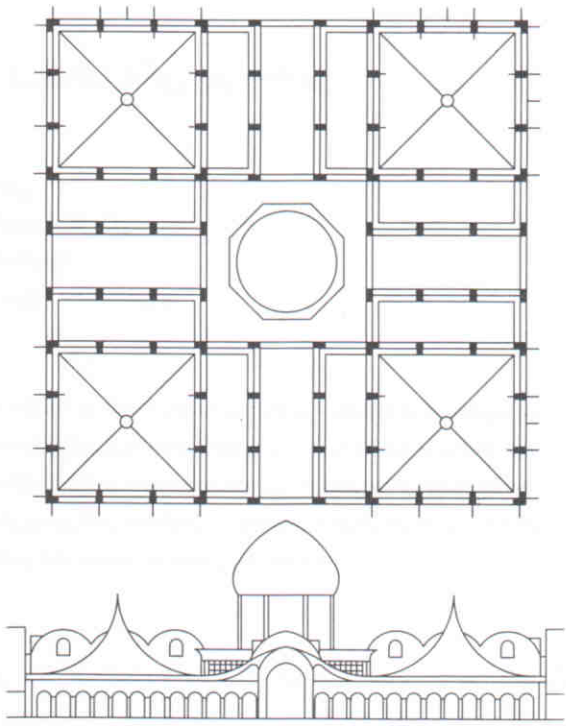
قضاوت صحیح مهندسی و برخورداری از احساس فیزیکی مناسب نسبت به رفتار سازه هنگامی با جامعیت کافی شکل می‌گیرد که تحلیل سازه به‌نحو دقیقی صورت پذیرد. جهت حصول اطمینان از دقت‌های مورد نظر، تحلیل سازه با استفاده از نرم افزارهای مختلف و مقایسه‌ی نتایج آنها و همچنین انجام مجموعه تحلیل‌های خطی و غیرخطی استاتیکی و دینامیکی اشراف مناسبی را نسبت به عملکرد سازه ایجاد نموده، موجب غنای اطلاعاتی طراحی می‌شود. دیگر اقدامات اساسی در فرایند طراحی سازه‌های ویژه عبارت است از: ساخت مدل سازه با مقیاس مناسب، بررسی رفتار استاتیکی، یافتن مشخصه‌های دینامیکی مدل مورد نظر و مقایسه‌ی آنها با مدل رایانه‌یی سازه.

بررسی‌های عمیق هنگامی که با وسعت لازم صورت پذیرد، نگرشی چندجانبه و با شفافیت کافی نسبت به عملکرد سازه ایجاد می‌کند که می‌تواند ملزومات نیل به طراحی مبرا از خطا را فراهم آورد. در این نوشتار، فرایند طراحی برای سازه‌ی ویژه‌یی که از نوع بتنی پوسته‌یی است، تشریح شده و کلیه‌ی اقدامات صورت پذیرفته ارائه شده است.

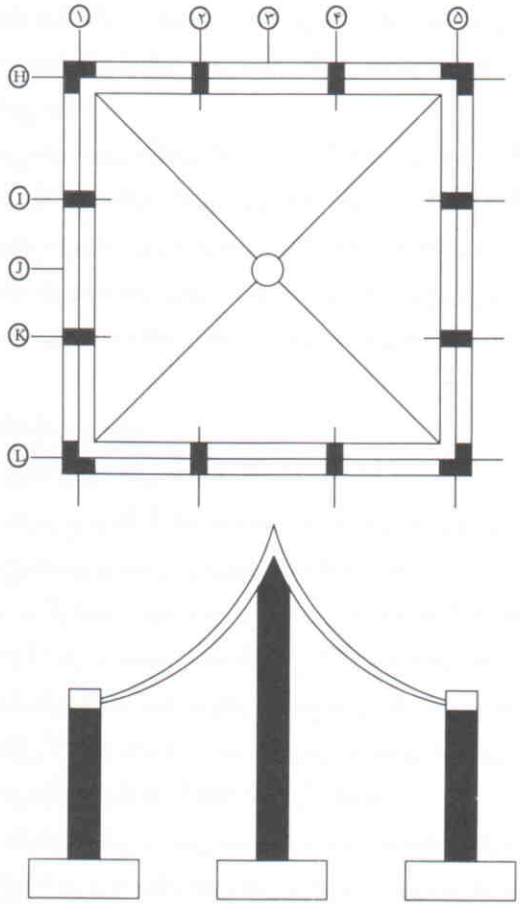
مشخصات پروژه

این پروژه برای زمینی به ابعاد ۱۳۰m×۱۳۰m با وسعت حدود ۱۶ هزار متر مربع در نظر گرفته شده است. در طراحی معماری این پروژه دو نوع سازه‌ی پوسته‌یی پیش‌بینی شده که در شکل ۱ نشان داده شده است. در گوشه‌ها، چهار سازه‌ی خیمه‌یی با ابعاد ۴۲m × ۴۲m و ارتفاع ۱۲ متر در محیط خیمه تا ارتفاع ۳۲ متر در محل ستون میانی خیمه استقرار یافته است که پلان و مقطع میانی یک سازه‌ی خیمه‌یی در شکل ۲ نشان داده شده است. در بین سازه‌های خمیه‌یی، چهار سازه‌ی دیگر با ابعاد۴۲m×۴۲m جای گرفته‌اند.

سازه‌های اخیر با شیبی متناسب با شیب خیمه‌های طرفین در ارتفاع ۱۸ متری به سطح افق منتهی می‌شوند که بر روی آنها سازه‌ی زین اسبی با ابعاد ۱۴m×۱۴m قرار گرفته است. این طرح به‌دلیل



شکل ۱. پلان و نمای پروژه.



شکل ۲. پلان و مقطع میانی سازه‌ی خیمه‌یی.

شکل‌های مورد نظر ودهانه‌های وسیع در نوع خود بی‌نظیر بوده است. با توجه به نوع سازه‌ی پوسته‌یی نازک خیمه‌یی، وضعیت نیروها عمدتاً کششی بوده و ابعاد مذکور در طرح، رفتار سازه را در این پروژه با حساسیت زیادی توأم ساخته است.

مسائلی نظیر ترک در نواحی کششی، کمانش در نواحی فشاری، و خزش در اثر بارهای دائم در نواحی کششی از عمده مسائلی هستند که در این پروژه مستلزم مطالعه، بررسی و نهایتاً صرف تلاش و دقت خاصی است. با توجه به ابعاد سازه، به‌منظور پیشگیری از ایجاد نیروهای حرارتی و تأمین رفتار مناسب سازه در مقابل زلزله، پیش‌بینی درزهای انبساط ضروری است، اما به‌دلیل الزامات معماری و رعایت ظرافت‌های مورد نظر از ایجاد ستون‌های کنار هم در محل درزهای انبساط اجتناب شده است.

برای متعادل‌کردن رفتار سازه، گزینه‌های مختلفی بررسی شدهٔ و در نهایت تدابیری پیش‌بینی شده که سازه‌های میانی به روی بالشتک‌های ضربه‌گیر (الاستومتر) قرار گیرند. در این صورت به‌هنگام انبساط و انقباض و همچنین بر اثر نیروهای جانبی، نیروهای مورد نظر به ستون‌ها منتقل می‌شوند. بدین‌وسیله امکان جریان نیروهای حرارتی و نیروهای ناشی از زلزله به نحو مناسب‌تری فراهم می‌شود.

مطالعات خطر زلزله و تهیه طیف طرح

به‌دلیل اهمیت خاص این پروژه و از آنجا که در مجاورت گسل کهریزک و گسل جنوب ری احداث شده، و همچنین به علت وجود گسل‌های شمال تهران و دیگر گسل‌های منطقه و احتمال وقوع زمین‌لرزه‌های خطرناک، ضرورت مطالعات مربوط به زلزله امری بدیهی است. برخی از موارد و مطالعات انجام شده عبارت‌اند از:[۱]

۱. ارائه‌ی طیف زلزله برای محل احداث پروژه با توجه به تأثیر گسل‌های هموار و همچنین سایر گسل‌های منطقه؛

۲. مروری بر زمین‌شناسی منطقه؛

۳. بررسی زلزله‌های تاریخی در محدوده‌ی مورد نظر؛

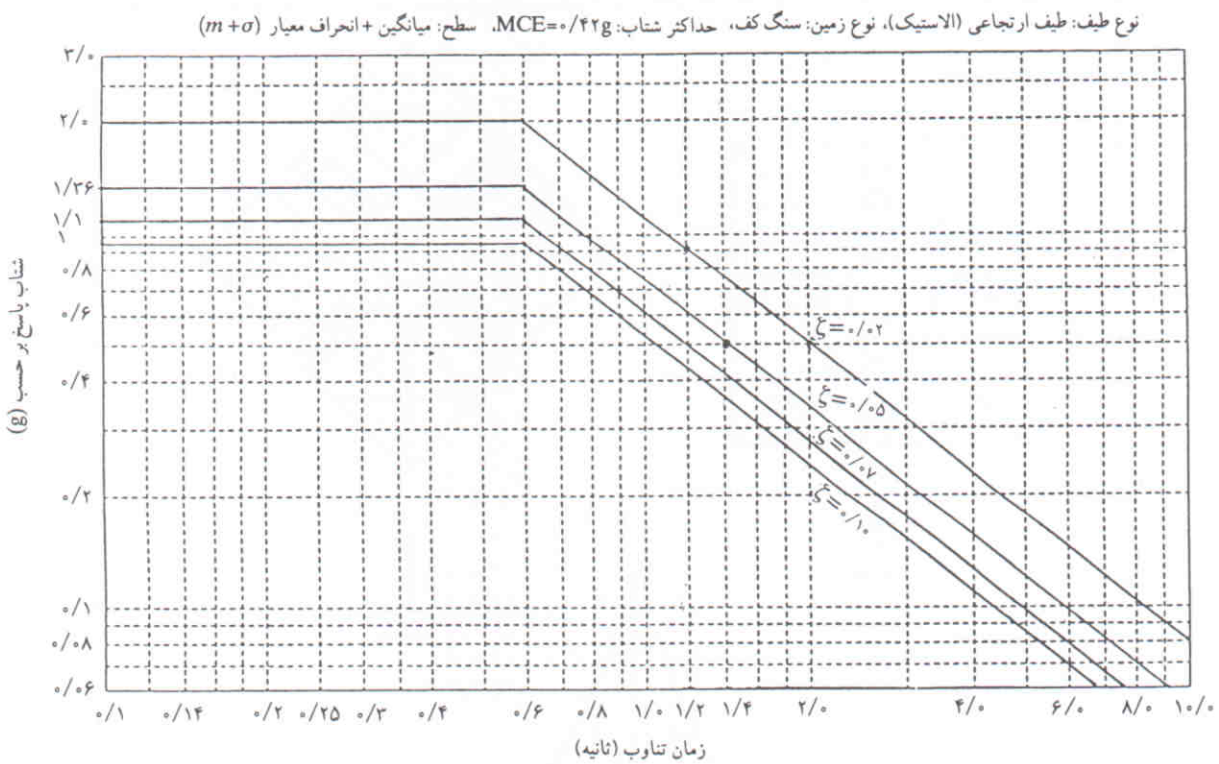
۴. تشریح گسل‌های واقع در شعاع ۳۰۰کیلومتری محدوده‌ی پروژه؛

۵. مطالعه‌ی لرزه‌یی به‌منظور تعیین لایه‌ها و برخی از مشخصات دینامیکی آنها.

طیف طرح به‌کار گرفته شده در طراحی سازه، در شکل ۳ارائه شده است.

آزمایش تونل باد

بر اساس آئین‌نامه‌های موجود، طراحی سازه‌ها باید به‌نحوی انجام شود که در مقابل نیروهای ناشی از باد مقاومت کافی داشته باشند.



شکل ۳. طیف طرح زلزله.

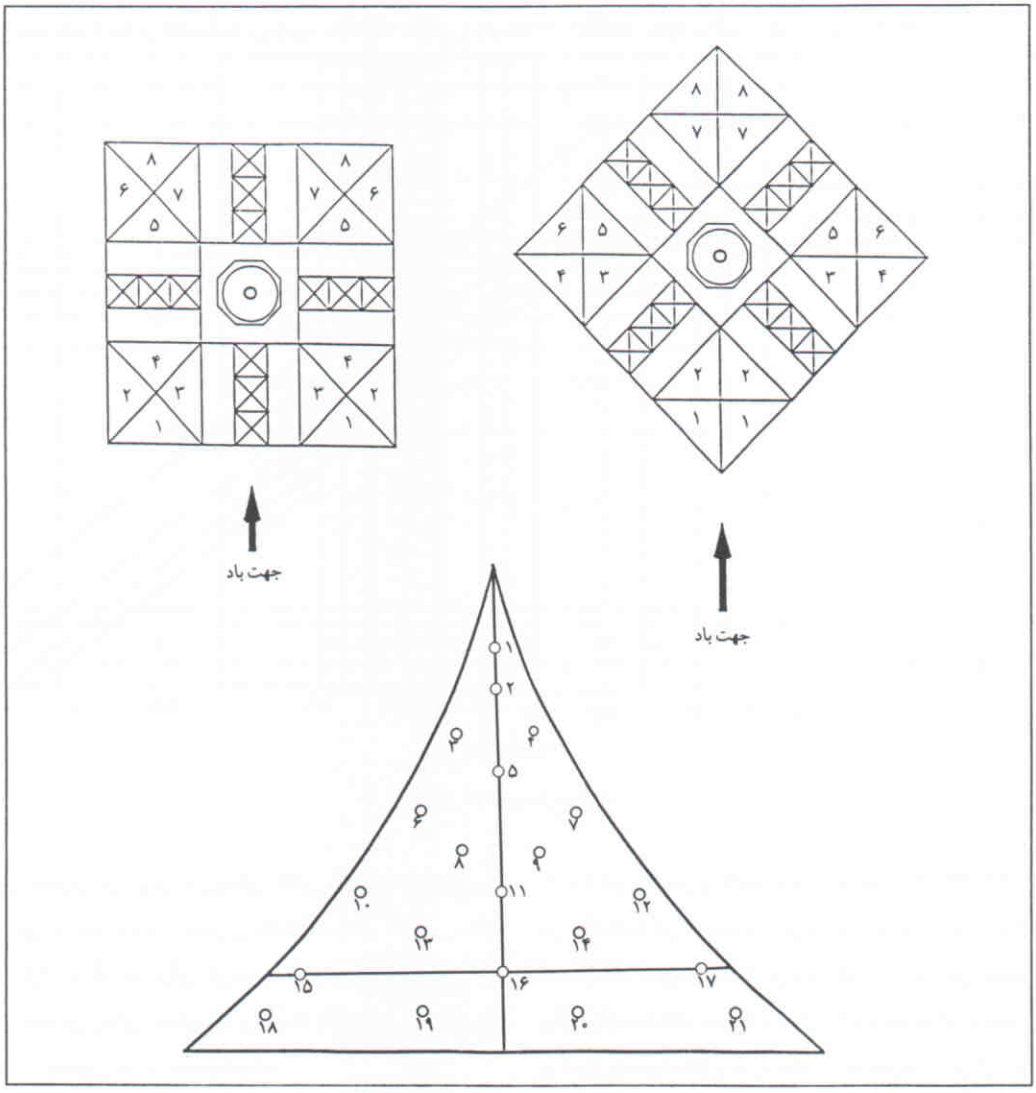
اگرچه به‌طور معمول در ایران، نیروهای ناشی از زلزله درمقایسه بانیروهای ناشی از باد، شدت بیشتری داشته‌اند و در طراحی سازه بیشتر مدّ نظر قرار می‌گیرند، برای طراحی سازه‌های ویژه، نظیر این پروژه، لازم است نیروهای مذکور با رعایت دقت‌های لازم تعیین شوند و بر مدل رایانه‌یی سازه اعمال شوند.

آیین‌نامه‌های موجود دنیا برای ساختمان‌های معمولی ضوابطی را مطرح کرده‌اند که براساس آنها، نیروهای ناشی از باد قابل محاسبه‌اند. برای سازه‌های غیر متعارف و ویژه ایجاب می‌کند که آزمایش‌های تونل باد بر روی مدلی با مقیاس کوچک انجام شود، و شدت نیروهای باد در نواحی مختلف سازه با استناد به آزمایش‌های انجام شده تعیین شود. در این پروژه، به‌دلیل برخورداری از شکل هندسی خاص، تعیین نیروهای ناشی از باد براساس ضوابط موجود آئین‌نامه‌ها ممکن نبود، و بنابراین انجام آزمایش‌های تونل باد ضروری به نظر می‌رسید.[۲] به‌منظور انجام این آزمایش‌ها از مدلی با مقیاس ۱:۵۰۰ سازه اصلی استفاده شده است.

برای تعیین فشار بر روی سطوح مختلف پوسته‌ی سازه، مدل یکی از چهار وجه سازه‌ی خیمه تهیه شد و ۲۱ حفره‌ی اندازه‌گیری در آن ایجاد شد. این اقدام به‌نحوی صورت پذیرفت که با جابه‌جایی آن روی مدل با مقیاس ۱:۵۰۰ امکان اندازه‌گیری برای تمام وجوه سازه‌های خیمه‌یی فراهم شود. مدل مذکور در معرض باد با سرعت ۱۲، ۲۰ و ۴۰ متر بر ثانیه، به‌ترتیب معادل ۴۳/۲، ۷۲ و ۱۴۴ کیلومتر در ساعت، قرار گرفت. نیروی باد در زوایای صفر و ۴۵ درجه بر مدل اعمال شد. نحوه‌ی اعمال نیروی باد روی سازه‌ی خیمه در شکل ۴ و برای وضعیت‌های مختلف نشان داده شده است. برمبنای عوامل فوق و تنوع وضعیت‌های مورد نظر، آزمایش‌های تونل باد ۴۸ بار روی مدل سازه صورت پذیرفت. نتایج به‌دست آمده از دسته‌یی از آزمایش‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است، که معرف پروفیل‌های مختلف شدت باد است.

تحلیل سازه

عموماً برای طراحی یک سازه‌ی ویژه و مهم، لازم است تحلیل‌های گوناگونی صورت پذیرد. برای این‌گونه سازه‌ها در ابتدا تحلیل اولیه‌یی برای بارهای سرویس و پس از تعیین ابعاد و حدود مقاطع اولیه، تحلیل‌های دقیق‌تری مرتبط با بارهای بهره‌برداری و بارهای نهایی انجام می‌شود. برای سازه‌ی مورد نظر که از نوع سازه‌ی غیر متداول است، علاوه بر تحلیل‌های خطی استاتیکی و دینامیکی تحلیل‌های غیرخطی هم انجام پذیرفت. همچنین با توجه به فرم سازه که از نوع پوسته‌ی بتنی با قاب باربر است، به‌دلیل قرار گرفتن بخشی از پوسته در فشار، تحلیل پایداری و بررسی مسئله‌ی کمانش در نواحی تحت فشار انجام شد.

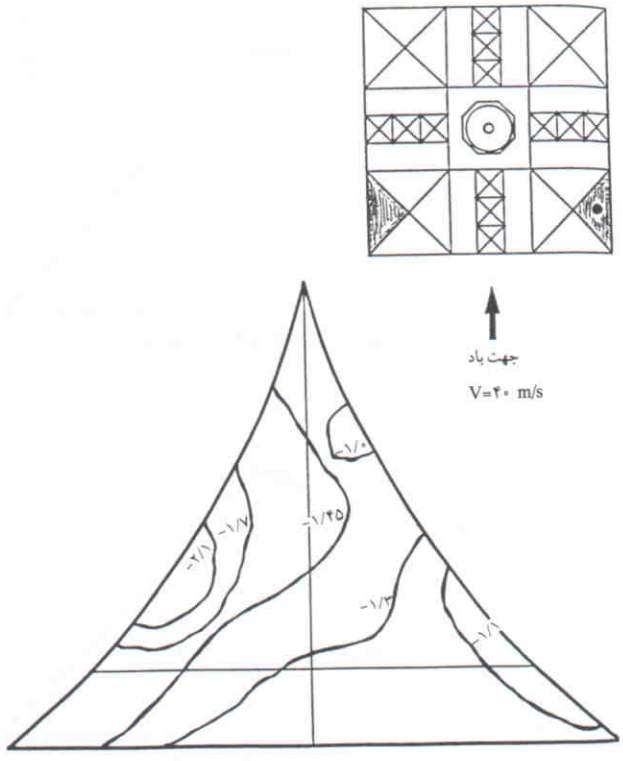


شکل ۴. محل حفره‌های اندازه گیری فشار روی مدل برای آزمایش تونل باد.

با استفاده از نرم‌افزارهای رایانه‌یی Sap90plus[۳] و StadIII[۴] سازه‌ی مورد نظر به‌صورت‌های مختلف مدل‌سازی وتحلیل شد. علت استفاده از دو برنامه‌ی، فوق به‌صورت همزمان، مقایسه‌ی نتایج بوده است تا در صورت وجود هرگونه اختلاف، خطاهای مرتبط با المان‌ها یا نحوه‌ی تقسیم‌بندی اجزا مشخص شود. در شکل ۶ مدل سازه‌ی خیمه‌یی توسط نرم‌افزار Sap90plus نشان داده شده است.

برای تحلیل پایداری پوسته از نرم‌افزار رایانه‌یی Solvia[۵] استفاده شد و در نتیجه میزان بار نهایی که منجر به کمانش پوسته می‌شود، مشخص شد. در شکل ۷ مدل‌سازه‌یی خیمه و کمانش پوسته در ناحیه‌ی فشاری با استفاده از نرم‌افزار فوق مشخص شده است.

روند طراحی سازه‌های عادی به‌گونه‌یی است که با تحلیل خطی آن مقادیر عضوها مشخص می‌شوند و طراحی سازه برهمین اساس انجام می‌پذیرد. به‌دلیل ویژگی و اهمیت سازه‌ی مورد نظر و تشخیص رفتار پیچیده و واقعی آن، تحلیل غیرخطی استاتیکی نیز انجام شد. براین اساس، با استفاده از نرم‌افزار رایانه‌یی Lusas سازه‌ی خیمه مدل‌سازی شد.[۶] مدل مذکور به‌نحوی انجام شد که پوسته‌ی بتن آرمه در لایه‌های مختلف متشکل از لایه‌های پوشش بتنی در بالا و پایین، لایه‌ی شبکه‌های آرماتوربندی در ردیف‌های بالا و پایین و همچنین لایه‌ی بتن موجود بین ردیف آرماتورهای بالا و پایین به‌صورت المان‌های جدا از هم مدل‌سازی شد. به‌عنوان مثال پوسته‌ی بتن آرمه‌ی ۲۰ سانتی‌متری در پیرامون خیمه و در کنار قاب از ۸ لایه تشکیل شد که لایه‌های ابتدا مربوط به پوشش بتن با ضخامت ۳ سانتی‌متر و لایه‌های بعدی مربوط به پوسته‌ی فلزی شامل آرماتورهای کششی ردیف‌های بالا و پایین با ضخامت ۰/۱۲ سانتی‌متر و در بین پوسته‌ی فلزی بالا وپایین ۴ لایه از بتن به ضخامت‌های ۳/۴۴ سانتی‌متر مدل‌سازی شد.



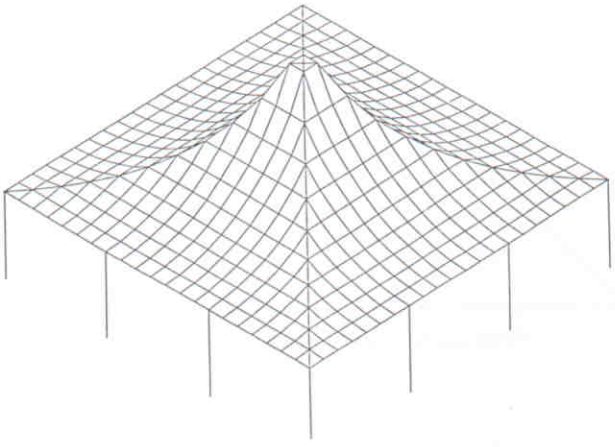
شکل ۵. پروفیل ضریب شدت باد روی مدل از آزمایش تونل باد.

برای لایه‌های بتنی و فلزی نمودارهای واقعی تنش کرنش استفاده شد تا تحلیل غیرخطی با تکیه بر آن نمودارها انجام پذیرد. با مدل‌سازی پوسته‌ی بتن آرمه در لایه‌های مختلف، امکان بررسی ترک در لایه‌های گوناگون و در مراحل مختلف بارگذاری به وجود آمد. ترک‌ها در نقاط مختلف و یا در لایه‌های مختلف طی مراحل بارگذاری شروع و با افزایش شدت بارها گسترش می‌یابند، که بدین شکل ظرفیت سازه‌ها برای تحمل بارها در حالت نهایی مشخص شد. نمونه‌یی از نتایج و ترک‌های به وجود آمده در لایه‌های بتنی در شکل ۸ ملاحظه می‌شود.

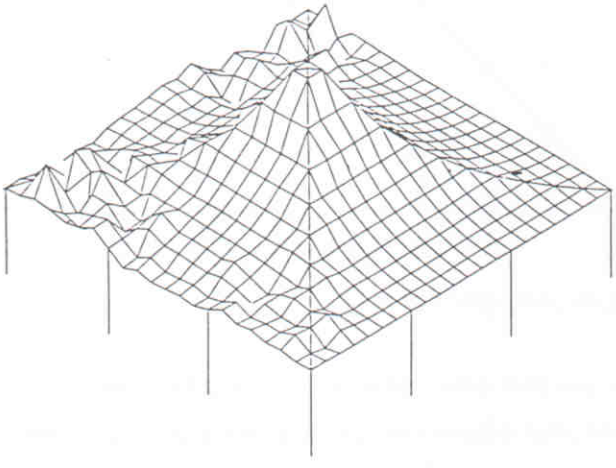
طراحی سازه

طراحی چنین سازه‌یی، اگر بدون فراهم شدن امکانات کافی انجام شود، بسیار زمان‌بر خواهد بود، و خطاهای طراحی را افزایش می‌دهد. با توجه به نوع ترکیب‌های بارگذاری، سعی و خطای لازم برای تعیین ضخامت‌ها و بهینه کردن سازه، تعداد گره‌ها در مدل رایانه‌یی پوسته و تنوع نیروهای داخلی پوسته که ترکیب‌های متفاوتی از نیروهای خمشی، خمشی ـ کششی، و خمشی ـ فشاری است، امکان طراحی دستی، به‌نحوی که از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه باشد، تقریباً محال است.

از طرف دیگر نرم‌افزارهای موجود علی‌رغم توانایی‌های بسیار،



شکل ۶. مدل سازه‌ی خیمه‌یی برای نرم‌افزار Sap90plus.



شکل ۷. تحلیل کمانش پوسته توسط برنامه نرم‌افزار Solvia.

فاقد امکانات طراحی سازه‌های پوسته‌یی‌اند. لذا علاوه بر اقدامات انجام شده، برنامه‌یی به زبان فورترن نوشته شده که از توانایی‌هایی بدین شرح برخوردار است:

۱. خواندن اطلاعات مربوط به نیروها از فایل‌های خروجی برنامه اجزای محدود Sap90plus، در محل گره‌های موجود در نقطه‌ی تقاطع المان‌ها؛

۲. تعیین میانگین نیروها در محل گره‌ها؛

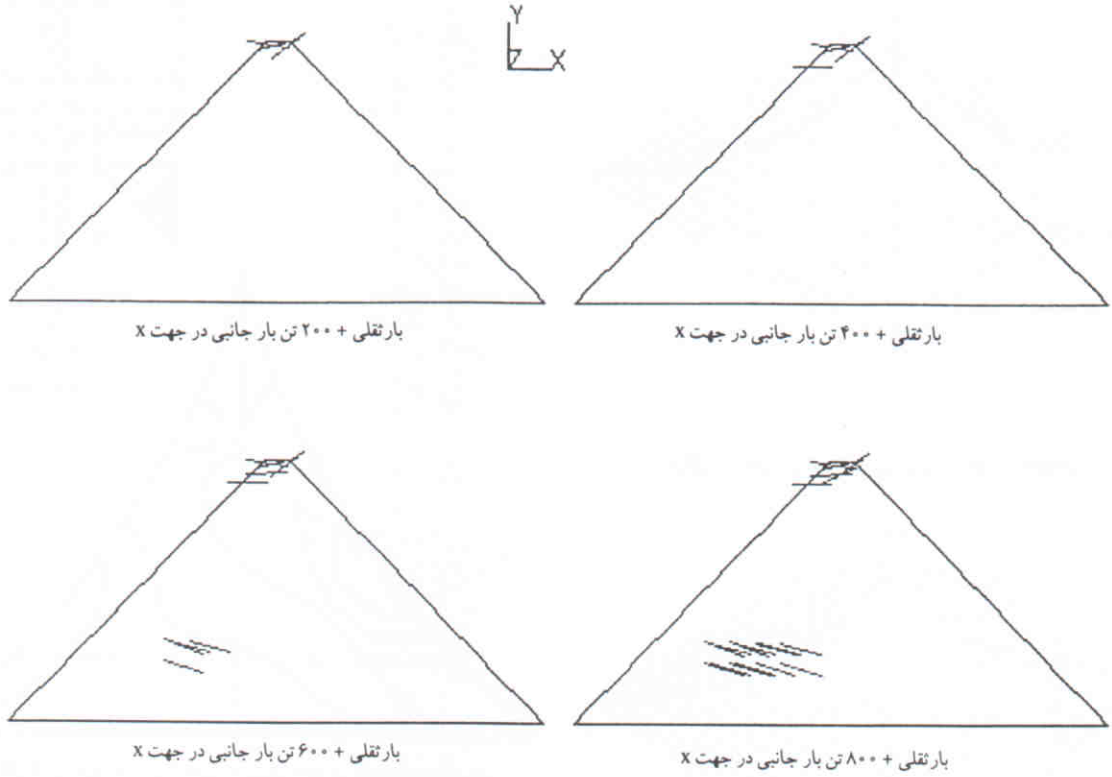
۳. مقایسه‌ی نیروها در ترکیب بارگذاری متفاوت و یافتن نیروهای حداکثر؛

۴. طراحی آرماتورهای طولی و عرضی در بالا و پایین پوسته؛

۵. ایجاد فایل‌های خروجی با محتوای مقادیر میانگین نیروها در هر ترکیب بارگذاری، مقایسه‌ی نیروهای ناشی از ترکیب بارگذاری متفاوت و یافتن حداکثر مقادیر آرماتورهای مورد نیاز؛

۶. ترسیم شکل سازه و المان‌ها در محیط برنامه؛

۷. نمایش مقادیر آرماتورهای مورد نیاز در محل هر گره.



شکل ۸. تحلیل ترک در سطوح کششی خیمه توسط نرم‌افزار Lusas.

با توجه به توانایی‌های نرم‌افزار مذکور، امکان انجام سعی و خطای فراوان برای بهینه‌سازی طراحی سازه به‌سهولت فراهم شده است. لازم به ذکر است که برنامه‌ی مذکور به‌گونه‌یی نوشته شده که امکان طراحی نوع سازه‌ی پوسته‌یی بتنی را که با استفاده از المان شِل توسط Sap90plus تحلیل شده، فراهم آورد.

آزمایش‌های استاتیکی مدل ۱:۱۰

آزمایش‌های مدل سازه‌یی همواره نقش مهمی در طراحی سازه‌های پیچیده داشته‌اند. این‌گونه آزمایش‌ها مکمل مدل‌های ریاضی و رایانه‌یی سازه بوده و استفاده از آنها برای پیش‌بینی رفتار سازه و اندازه‌گیری کرنش‌ها، تنش‌ها، تغییر شکل‌ها و نیروها مفید است. مهم‌ترین مزیت استفاده از آزمایش مدل‌های سازه‌یی، در مقایسه با مدل‌های رایانه‌یی، بررسی دقیق رفتار سازه هنگام بارگذاری تا حد گسیختگی است. اگر چه نرم‌افزارهای رایانه‌یی دائماً در حال پیشرفت‌اند، هنوز در پاره‌یی موارد ـ به خصوص در مورد سازه‌های غیرمتداول و پیچیده ـ ظرفیت سازه‌ها در حد نهایی و گسیختگی با استفاده از این نرم‌افزارها قابل پیش‌بینی نیست، یا از دقت بالایی برخوردار نیست.

مدل‌های فیزیکی سهم به‌سزایی در افزایش شناخت مهندسین نسبت به رفتار سازه‌ها داشته و معمولاً موجب هموارشدن مسیر طراحی و شکل‌گیری روش‌های طراحی پیشرفته می‌شوند. این‌گونه مدل‌ها برای سازه‌های پیچیده و با اهمیت، نظیر نیروگاه‌های هسته‌یی، سدها، پل‌ها و سیستم‌های جدید سازه‌یی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. عمده‌ترین محدودیت‌ها در مدل‌های فیزیکی سازه‌یی مسئله‌ی هزینه‌های مربوط به ساخت و ابزارسنج‌ها و انجام آزمایشات لازم است.

مدل‌های رایانه‌یی در مقایسه با مدل‌های فیزیکی به‌مراتب کم هزینه‌تر و به سرعت قابل ایجادند. ساخت هر نوع مدل باید براساس ضریب مقیاس بهینه انجام شود. مدل‌های کوچک توسط نیروهای سبک‌تری قابل بارگذاری‌اند، اما مدل‌های بزرگ‌تر ــ اگر چه از نظر اجرا ساده‌ترند ــ برای بارگذاری به بارهای سنگین‌تری نیاز دارند.

مدل‌های فیزیکی سازه‌های پوسته‌یی که مقاومت آنها مورد بررسی قرار می‌گیرند با ضریب مقیاس ۱:۲۰۰ تا ۱:۵۰ برای بررسی رفتار خطی، و با ضریب مقیاس ۱:۳۰ تا ۱:۱۰ برای بررسی رفتار غیر خطی توصیه می‌شوند. این‌گونه مدل‌های سازه‌یی معمولاً با محدودیت‌هایی نظیر ضخامت پوسته، قطر آرماتورهای مصرفی، تعداد ردیف آرماتورها و فواصل بین آنها، مصالح مصرفی، ضخامت پوشش بتن و غیره مواجه‌اند. در این‌گونه مدل‌ها، برقراری شباهت

مناسب بین مصالح مدل و مصالح سازه‌ی اصلی بسیار مهم و از موارد پیچیده تلقی می‌شوند.

با توجه به موارد فوق‌الذکر مدل ۱:۱۰ سازه‌ی خیمه با عنایت به وضعیت مصالح موجود و امکانات اجرایی از ضریب مقیاس بهینه برخوردار بوده است. بنابراین، با استفاده از مقیاس ۱:۱۰ ابعاد هندسی مدل شامل طول، عرض و ارتفاع نسبت به سازه اصلی با مقیاس ۱:۱۰ کاهش یافت. ابعاد تیرهای پیرامونی اسکلت و ستون‌های اسکلت نیز به نسبت ۱:۱۰ کاهش یافت. ابعاد تیرها در سازه‌ی اصلی ۸۰×۲۰۰cm، و ابعاد ستون‌های پیرامونی ۸۰×۲۰۰cm و ستون دایره‌یی وسط خیمه به قطر ۲۰۰cm است.

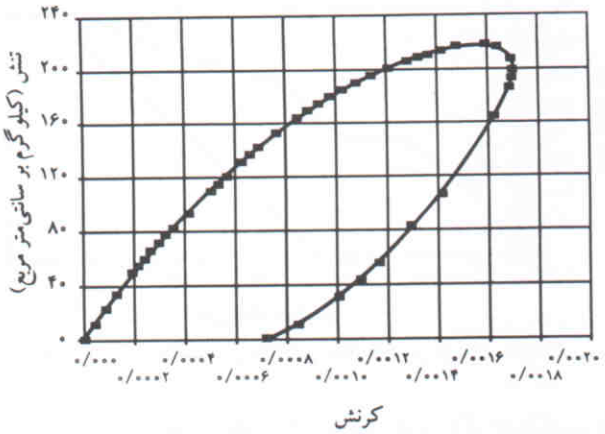
ضخامت پوسته در سازه‌ی اصلی در طراحی از ۲۰ سانتی‌متر تا ۶۰ سانتی‌متر متغیر بوده که در سازه‌ی مدل به‌دلیل محدودیت در حداقل قطر آرماتورهای موجود و لزوم رعایت حداقل ۳ میلی‌متر پوشش بتن، این ضخامت بین ۲/۵ تا ۶ سانتی‌متر اجرا شد. لازم به توضیح است که به‌منظور لزوم رعایت اصول حاکم بر مدل‌سازی و کاهش ابعاد با مقیاس ۱:۱۰، لازم بود بارگذاری معادل ۱۰ برابر بار مدل بر روی مدل فیزیکی اعمال شود تابتوان از لحاظ شبیه‌سازی و مدل‌سازی مقایسه‌ی دقیقی بین سازه‌ی مدل و سازه‌ی اصلی انجام داد.[۷]

برای به کار گرفتن میلگردها در سازه‌ی مدل، باید قطر میلگردها در سازه‌ی اصلی به مقیاس ۱:۱۰ کاهش یابند. مثلاً در مورد میلگرد به‌قطر ۱۰ میلی‌متر در طراحی سازه‌ی اصلی، باید در مدل فیزیکی از میلگرد به قطر ۱ میلی‌متر استفاده شود. اما به‌دلیل عدم دسترسی به میلگردهای کم قطر ـ مانند قطر ۱ میلی‌متر ـ آجدار و محدودیت در ابعاد آن، با استفاده از مقطع معادل از میلگرد ساده با قطر ۳ میلی‌متر در مدل فیزیکی استفاده شد.

برای ایجاد آج بر سطح میلگردها، دستگاهی ساخته شد که با عبور مفتول از میان یک سری چرخ‌دنده، میلگرد صافِ مورد نظر، آجدار شد.

همچنین پس از تلاش زیاد و انجام یک سری آزمایش‌ها، طرح اختلاطی برای بتن مصرفی‌ستون‌ها و تیرهای پیرامونی با مخلوط شن ریزدانه، ماسه و سیمان تهیه شد.

برای تهیه‌ی بتن پوسته هم به‌دلیل ضخامت اندک و پوشش حداقل ۳ میلی‌متر بتن روی آرماتورها فقط از مخلوط ماسه و سیمان استفاده شد. طرح اختلاط بتن مورد نظر (ریزبتن) به گونه‌یی تهیه شد که رفتاری مشابه با رفتار بتن عادی در سازه‌ی اصلی داشته باشد. لذا پس از یک سری آزمایش‌های فشاری و مطالعه روی طرح اختلاط ریزبتن، طرح نهایی بتن مصرفی مورد نظر بر اساس درصدهای معین



شکل ۹. نمودار تنش ـ کرنش بتن پوسته (ریزبتن).

ماسه، سیمان و آب به‌دست آمد که منحنی تنش ـ کرنش آن در شکل ۹ نشان داده شده است.

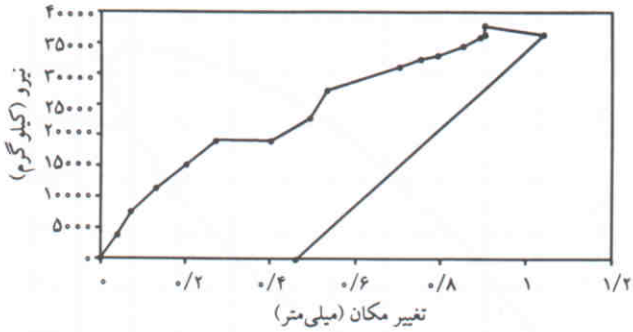
از آنجایی که مدل سازه ۱:۱۰ صرفاً برای بررسی رفتار اسکلت و پوسته‌ی سازه اجرا شد، لذا در اجرای مدل ۱:۱۰ از پی نسبتاً صلب‌تری در مقایسه با سازه‌ی اصلی استفاده شد که نهایتاً هر گونه تغییر شکلی در سطوح پی را به دنبال نداشته باشد.

به‌منظور پیش‌بینی رفتار سازه تحت بارهای وارده، بارگذاری در مراحل مختلفی انجام شد و طی این مراحل میزان ترک‌ها و تغییر شکل‌های سازه اندازه‌گیری شد.[۸]

به‌منظور ثبت دقیق اطلاعات شامل تغییر شکل‌ها و کرنش از دستگاه اندازه‌گیری استفاده شده است. برای اندازه‌گیری کرنش سطح بتن از کرنش‌سنج استفاده شده است و برای اندازه‌گیری تغییر شکل‌ها از هفت تغییر مکان‌سنج استفاده شد.

در بررسی رفتار سازه‌ی مذکور میزان طول، عرض و عمق ترک‌ها در اثر افزایش ثقلی در نواحی مختلف کششی و خمشی مشخص شد. طی بارگذاری‌های انجام‌شده، نسبت به رفتار سازه در رابطه با امکان ایجاد کمانش در نواحی فشاری اطمینان حاصل شد. بر همین اساس، بارگذاری بر روی مدل سازه تا ده برابر وزن سازه، طیّ ۵ مرحله بارگذاری تا ۲۰ تن و با استفاده از شمش‌های سربی ۲۰ کیلوگرمی، انجام شد. طی مراحل مذکور رفتار کلی سازه بسیار مناسب تشخیص داده شد. با انجام ۸ مرحله بارگذاری، مجموع بار وارده به ۳۶/۶ تن رسید که کلیه‌ی شمش‌ها مورد استفاده قرار گرفت و خوشبختانه استمرار رفتار مناسب سازه کاملاً مشهود بود. طی مراحل اخیر موتَرک‌هایی که به‌سختی قابل رؤیت بودند، در برخی نواحی پوسته مشاهده شد.

در آخرین مرحله‌ی بارگذاری، تمامی پرسنل و افرادی که در محل حضور داشتند (۲۱ نفر) بر روی سازه‌ی خیمه قرارگرفتند که مجموع



شکل ۱۰. نمودار تغییرات نیرو با تغییر مکان قائم در آزمایش استاتیکی.

وزن بار وارده ــ حدوداً بالغ بر ۳۸ تن شد. شایان ذکر است که در ۵ مرحله‌ی آخر بارگذاری انجام شده، بارهای مذکور به‌گونه‌یی در نواحی بحرانی پوسته قرار داده شد تا ترک‌ها با وضوح بیشتری در پوسته قابل رؤیت باشند. نمونه‌یی از اطلاعات به‌دست آمده و میزان تغییرات نیرو پس از تغییر مکان قائم پوسته در حین بارگذاری، در شکل ۱۰ ارائه شده است.

آزمایش دینامیکی مدل ۱:۱۰ سازه

یکی از روش‌های تعیین مشخصات دینامیکی یک سازه، استفاده از آزمایش ارتعاش محیطی است. در این روش به‌علت نامعلوم بودن محل و ماهیت منبع ارتعاش معمولاً فقط پاسخ سازه در برابر نوسانات محیط، که از دامنه و انرژی بسیار کمی برخوردار است، با دستگاه‌های بسیار حساس اندازه‌گیری می‌شود. این روش شامل اندازه‌گیری پاسخ سازه در برابر ارتعاشات محیط به‌صورت تاریخچه‌ی زمانی شتاب و یا سرعت در پنجره‌های مختلف می‌شود.

با انجام تبدیل فوریه و انتقال ارتعاشات ثبت شده از حوزه‌ی زمان به حوزه‌ی فرکانس، محتوای فرکانسی هر پنجره به‌صورت طیفی مشخص می‌شود.

با به‌دست آوردن میانگین طیفی پنجره‌ها می‌توان تا حد مطلوبی تأثیر صداها (نوفه) را از محتوای فرکانسی حذف و فرکانس‌های طبیعی مربوط به سازه را واضح‌تر ملاحظه کرد. همچنین می‌توان تأثیر بعضی از منابع ارتعاشی ناخواسته به‌دلیل عدم تداوم در طول زمان را با نمونه‌برداری در زمان‌های مختلف و به‌دست آوردن میانگین طیفی تا حد مطلوبی کاهش داد.

نتایج مورد نیاز در این آزمایش فرکانس‌های طبیعی سازه، تغییر شکل سازه در هر یک از این فرکانس‌ها و درصد میرایی مرتبط با هر یک از فرکانس‌های طبیعی است.

مطلوب‌ترین نوع منبع ارتعاش در یک آزمایش ارتعاش محیطی نوعی نوفه‌ی سفید (White Noise) است که در باند فرکانسی مشخص، که شامل فرکانس‌های طبیعی سازه است، دارای انرژی یکسان باشد. این نوع ورودی را می‌توان در ارتباط با وزش بادهای سنگین به سازه‌های بلند یافت. نیرویی که از وزش بادهای سنگین به سازه‌های بلند اعمال می‌شود دارای نوساناتی است که محتوای فرکانسی آن از همین نوع نوفه سفید است.

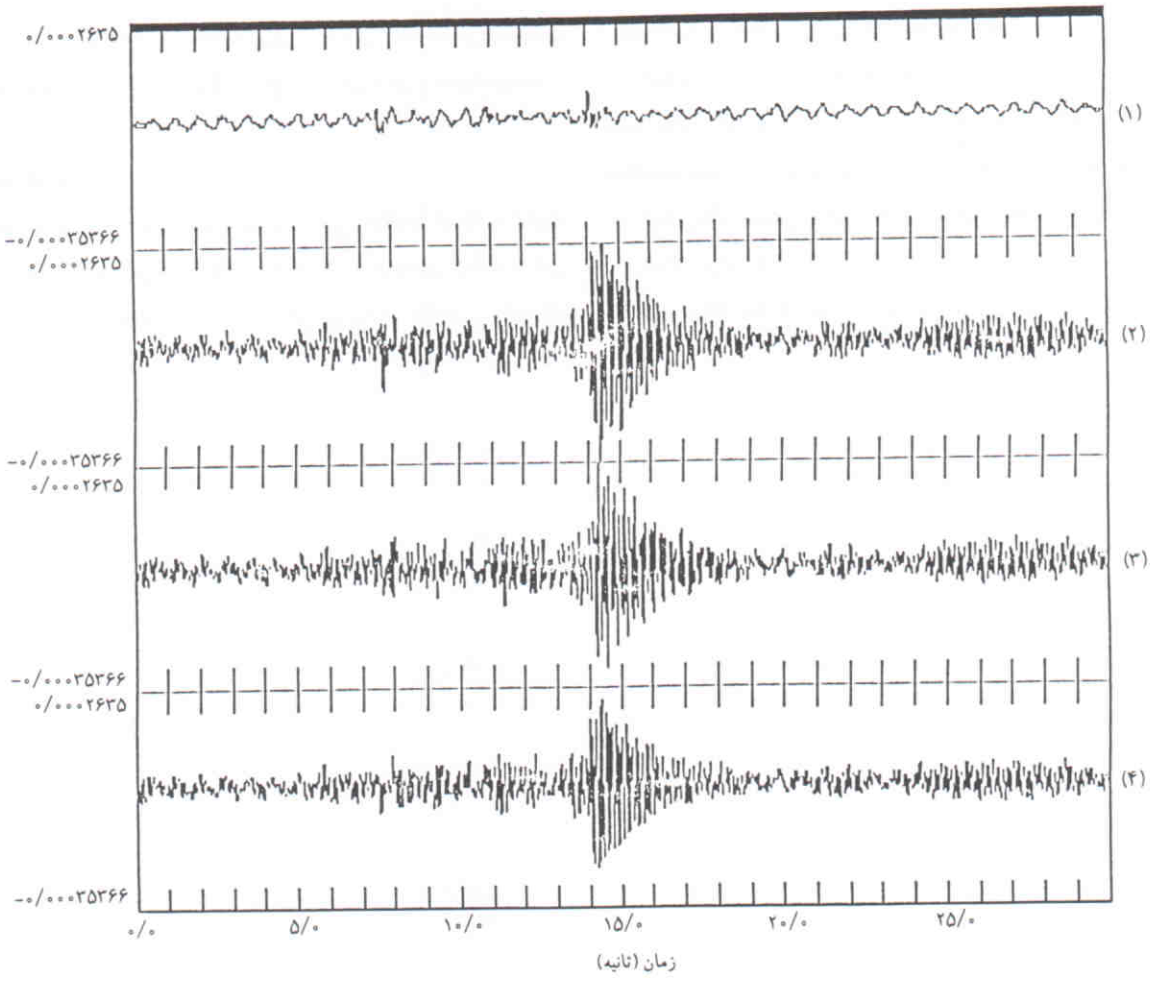
در مواردی که شرایط متفاوت باشد و ورودی از نوع نوفه‌ی سفید نباشد، باید به‌گونه‌یی سازه را تحریک کرد که فرکانس‌های طبیعی مورد انتظار سازه نیز تحریک شوند.

در مورد سازه‌ی مدل ۱:۱۰ خیمه به‌دلیل ابعاد و شرایط حاضر در محل، چهار نوع منبع ارتعاشی متفاوت در نظر گرفته شد که این منابع ارتعاشی از عواملی نظیر ماشین خاک‌برداری، لودر، ضربه‌ی مستقیم، طناب و محیط حاصل شدند.[۹]

موضوع مهم در ارتباط با این آزمایش‌ها انتخاب محل ثبت ارتعاشات سازه است. اگر محل دستگاه‌های حس‌گر به‌درستی انتخاب نشوند، ممکن است بعضی ازفرکانس‌های طبیعی سازه به‌درستی مشخص نشوند ــ حتی اگر منابع ارتعاشی، حاوی این نوسانات باشد. هر نقطه از یک سازه می‌تواند در ۶ جهت مختلف حرکت داشته باشد که سه تای آن دارای حرکت انتقالی، و سه تای دیگر دارای حرکت دورانی است.

در مواقعی که صلبیت نسبی جهات مختلف یک سازه بسیار متفاوت باشد، می‌توان چنین فرض کرد که سازه در جهاتی که صلبیت زیادی دارد فاقد حرکت است. برای تعیین موقعیت سایر نقاط آن نیز، حرکت یک نقطه از آن، در امتداد مورد نظر، کافی است. معمولاً به‌خاطر صلبیت بسیار زیاد محوری عضوها می‌توان فرض کرد که ستون‌ها در امتداد خود بی‌حرکت‌اند و از این رو نیازی به اندازه‌گیری ارتعاشات در این جهات نیست. به علاوه کف‌ها را می‌توان در بیشتر مواقع کاملاً صلب فرض کرد و تنها اندازه‌گیری حرکت انتقالی آنها در یک نقطه برای به‌دست آوردن حرکت سایر نقاط آن کافی است. بدین ترتیب برای تعیین موقعیت یک کف صلب در یک ساختمان، اندازه‌گیری انتقال در دو جهت افقی و چرخش آن حول محور قائم کافی است.

دستگاه‌های لرزه‌سنجی که در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفت، شامل دو دستگاه ثبّات SSR-۱ ساخت کارخانه‌ی Kinemetrics بود که هر یک از این دستگاه‌ها قادر به ثبت همزمان از سه کانال هستند. با همزمان کردن دو دستگاه ثبّات SSR-۱ این امکان وجود دارد که شش سرعت‌سنج به‌طور همزمان قابل بهره‌برداری باشند. سرعت‌سنج‌ها بر روی سازه مستقر شدند. پس از همزمان کردن دو دستگاه SSR-۱ چهار پنجره‌ی زمانی، هر کدام به مدت ۲ دقیقه با فواصل ۱۵ دقیقه، برای این دو دستگاه تعریف شد و سپس دستگاه‌ها در حالت انتظار گذارده شدند. هر یک از این پنجره‌های



شکل ۱۱. تاریخچه‌ی زمان جابه‌جایی برای ۳۰ ثانیه‌ی اول از آزمایش ارتعاش محیطی توسط لودر.

زمانی به یک آزمایش با منبع ارتعاشی مشخص اختصاص دارد. پس از نمونه برداری، داده‌ها توسط یک نرم‌افزار مورد بررسی قرار گرفتندو سپس با یکسری عملیات و تبدیل فرکانس‌های طبیعی سازه، شکل‌های مودی در هریک از فرکانس‌ها و درصد میرایی برای فرکانس‌های مختلف تشدید به‌دست آمد. به لحاظ آن‌که ابعاد سازه‌ی مورد نظر به حدی است که امکان مرتعش کردن دستی آن امکان‌پذیر است، تصمیم گرفته شد که ارتعاش سازه به چهار روش آزمایش شود:

ـ ارتعاش نوع اول (آزمایش لودر): به‌لحاظ عملیات خاک‌برداری در خارج از محوطه‌یی که مدل در آن مستقر بود و ارتعاشاتی که ماشین‌های سنگین خاک‌برداری از طریق زمین به سازه القا می‌کردند، از این منبع به‌نحو مطلوبی استفاده شد. این منبع ارتعاش در مقابل ارتعاشات بسیار خفیف محیط کاملاً غالب بود. شکل ۱۱ نمونه‌یی از تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی را برای ۳۰ ثانیه‌ی اول آزمایش نشان می‌دهد.

ـ ارتعاش نوع دوم (آزمایش محیط): در این آزمایش تنها از ارتعاشات خفیف محیط استفاده شد و در این حالت ماشین‌های خاک‌برداری خاموش و بی حرکت بودند. در این آزمایش نیز به لحاظ آن که ارتعاشات از طریق زمین به سازه اعمال می‌شدند، همانند آزمایش لودر، تابع انتقال را برای مؤلفه‌هایی که در آزمایش لودر به آنها اشاره شد به‌دست آوردیم.

ـ ارتعاش نوع سوم (آزمایش ضربه): در این آزمایش با استفاده از الوار چوبی به سازه ضربه وارد شد. این ضربات در تراز ۱ متری به ستون‌های کناری وارد شدند. این ضربات حتی‌الامکان با فواصل زمانی نامنظم و در نقاط مختلف تیرها زده شد. نتایج حاصل از این آزمایش باعث شد که فرکانس پیچشی این تراز به‌خوبی مشخص شود.

ـ ارتعاش نوع چهارم (آزمایش طناب): با استفاده از نیروهای انسانی حاضر، سعی بر مرتعش ساختن سازه به‌صورت آزاد شد. در این آزمایش با بستن طنابی به بالای ستون میانی و کشیدن و رها کردن آن اجازه داده شد که سازه ارتعاش آزاد کند.

فرکانس‌های به‌دست آمده از این آزمایش که منعکس کننده‌ی مودهای خمش بودند، مؤیّد نتایج آزمایش لودر و محیط بودند.

نتیجه‌گیری

فرایند طراحی یک سازه‌ی ویژه‌ی پوسته‌یی نازک با توجه به کیفیت مورد نظر در طراحی، مستلزم مطالعات گسترده و اقدامات فنی مناسب است به نحوی که شناخت کافی نیروهای خارجی و نحوه‌ی رفتار سازه در مقابل این نیروها را تضمین کند.

عملکرد مدل سازه‌ی خیمه با مقیاس ۱:۱۰ تحت بارگذاری انجام شده، بیانگر انطباق مناسب رفتار سازه و مدل ساخته شده است. مطالعات خطر زلزله و تهیه‌ی طیف طرح محل پروژه، مطالعات تونل باد، تحلیل‌های خطی و غیر خطی سازه‌یی، تحلیل پایداری، ایجاد ابزار کافی برای طرح سازه، موجبات لازم را برای نیل به تحلیل و طراحی مبرا از خطا فراهم کرده است.

منابع

۱. غفوری آشتیانی، محسن. مطالعات خطر زلزله و تهیه‌ی طیف طرح ساختگاه حرم حضرت امام خمینی (ره)، مؤسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، (۱۳۷۵).

۲. نصیری، محمد. توزیع فشار حاصله از جریان سیال بر روی سازه‌ی پوسته‌یی حرم مطهر حضرت امام خمینی (ره)، آزمایشگاه ایرودینامیک دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران (۱۳۷۵).

3. Computers and Structures Inc., Sap90plus, Version 5.2, Berkeley, California, U.S.A, (1991).

4. Research Engineers, StadIII, Version 14.2, Orange, California, U.S.A, (1991).

5. Engineering AB, Solvia, Sweden, (1992).

6. FEA Ltd., Lusas, Version 11, England, (1994).

7. Sabnis G. M. "Structural modeling and experimental techniques", Prentice-Hall, N.J., U.S.A, (1983).

۸. مزروعی، علی. گزارش آزمایش مدل سازه پوسته‌یی بتنی با مقیاس $\frac{1}{10}$، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران، ایران، (۱۳۷۵).

۹. تیو، مهران. آزمایش ارتعاش محیطی خمیرهای بتنی مدل $\frac{1}{10}$ حرم مطهر حضرت امام خمینی (ره) در حالت بارهای سرویس، مؤسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران (۱۳۷۵).