

ساختمان جدید تالار اجتماعات و مرکز انتخاباتی نیویورک

(New York's New Convention center 1979-86)

مهندس سعید مشایخ فریدنی

بنای موصوف، از طرح‌های بسیار دیدنی و پیچیده آی ام پی (I.M.PEI)، معمار معروف چینی الاصل آمریکایی است. این ساختمان پوششی عظیم دارد که در نوع خود بی نظیر است. پوشش، شامل قاب فضایی یکپارچه و پلکانی با وسعت تقریبی ۸۴۰۰۰ متر مربع (۹۰۰،۰۰۰ فوت مربع) می‌گردد که عمق آن در باریکه ستون‌ها تغییر کرده و به چندین برابر افزایش می‌یابد. پوشش یا جزئیات اتصالی بی نظیر خود، از نقطه نظر ساخت، و کنترل و اجزاء از تکنیک‌های ویژه‌ای برخوردار است.

یکپارچگی و عمق متغیر قاب فضایی، ناشناخته‌ها و مشکلات فنی متعددی را در مراحل مختلف طراحی، محاسبات، ساخت و اجراء پوشش به وجود آورد و تنها با بهره‌گیری گسترده از مدل و آزمایش، اطمینان کافی از عملکرد نهایی قاب به دست آمد و پوشش در کنترل طراحان سازه قرار گرفت.

با توجه به ویژگی‌های این پوشش، گزارش کوتاهی در این زمینه تهیه شده است که در معرض استفاده علاقمندان قرار می‌گیرد. (۱)



پوش فضایی تالار اجتماعات و مرکز انتخاباتی نیویورک با سطحی بالغ بر ۸۴۰۰۰ متر مربع یکی از عظیم‌ترین و پیچیده‌ترین قاب‌های فضایی (۲) جهان است. کار این پروژه عظیم ساختمانی با امضا اولین قراردادهای در سال ۱۹۷۹ میلادی آغاز شد. مسئولیت طراحی و محاسبات پوشش فضایی این بنا از طریق مناقصه به پل گوگلیوتا (Paul Gugliotta) مدیر شرکت سازه‌های پی جی (P.G. Structures) واگذار گردید. براساس قرارداد، گوگلیوتا موظف گردید تا تمامی مسئولیت‌های محوله اعم از طراحی، محاسبات و تهیه مشخصات فنی لازم را تحت نظارت و تأیید لوزتلین (Lev Zetlin)، مشاور عانی کارفرما به انجام رساند. ارتباط و همکاری نزدیک این دو تن موجب شد تا هفت سال پس از انعقاد اولین قراردادهای، عمارت با شکوه مرکز جدید انتخاباتی نیویورک آماده و مورد بهره برداری قرارگیرد.

لوزتلین طی گزارشی در این خصوص علاوه بر تشریح ویژگی‌ها و ناشناخته‌های فنی پوشش فضایی، ملاحظات، راسناها و روش تحقیقات خود را بدین شرح بیان می‌کند:

به طور کلی، ویژگی‌های اساسی پوشش فضایی مرکز انتخاباتی نیویورک را می‌توان به قرار زیر مشخص نمود:

۱- قاب فضایی مانند (۳) است و بر روی تعداد کثیری از تکیه‌گاه‌های متوالی (۴) به فاصله

۴/۲۷×۲۷/۴ متر (۹۰۰۹۰ فوت) تکیه دارد
۲- ضخامت (۵) پوشش فضایی متغیر (۶) است این ضخامت در حد پانی باریکه محور ستون‌ها به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

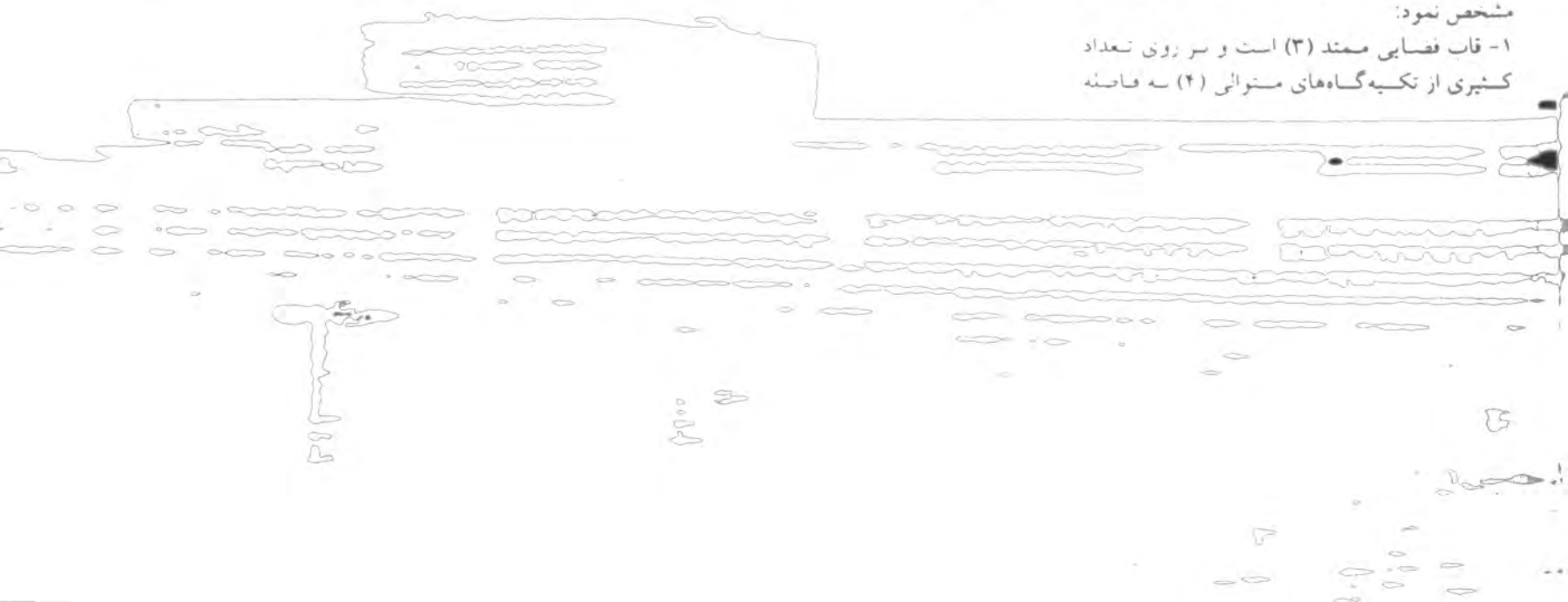
۳- پوشش فضایی بنا، حرکات انقباضی (۷) ویژه‌ای دارد.

اساساً پوشش فضایی از اعضا لوله‌ای (۸) و گوی‌های توخالی (۹) با قطر تقریبی ۲۰ سانتی‌متر (۸ اینچ) تشکیل یافته است. اعضا توسط مینوگردهای سراسری که از داخل آنها عبور می‌کند به حداره داخلی گوی‌های توخالی مهره، مهار می‌شوند. بدین ترتیب انتهای بریده هر عضو، صرفاً بر حداره بیرونی گوی تکیه (۱۰) می‌کند و اتصال تنها از طریق مینوگردهای مهار و تک مهره درونی گوی صورت می‌گیرد.

۴- در این بنا، با توجه به یکپارچگی و عمق متغیر قاب فضایی روش‌های معمول آالبر به بعدی (۱۱) قاب‌های فضایی، مقادیر دقیق و یا حتی درستی از تغییر شکل‌ها، نیروهای درونی اعضا و حتی خطوط تغییر انحاء (۱۲) سقف به دست نمی‌دهد. به عبارت دیگر، حاصل این تجربه و تحلیل‌ها حتی ممکن است به علت عضو فشاری را به صورت کششی مشخص سازد.

۵- شیوه خرابی پیشنهادی محوایل قاب فضایی، ر دیگر ویژگی‌های بارز مرکز انتخاباتی نیویورک است در روش پیشنهادی، ابتدا قاب فضایی ردیف ستون‌ها (۱۳) به عرض ۶/۱۰ متر (۲۰ فوت) نصب می‌شود سپس قاب‌های فضایی پرکننده سطوح مبانی سقف در محل قرار گرفته احراء جانبی آنها (نویزها و بیم‌گوی‌ها) به قاب‌های نصب شده حوض می‌شوند لازم به ذکر است که این روش احرائی اکنون در آمریکا با نام روش دو حلقه (۱۴) قاب‌های فضایی و به نام آقای گوگلیوتا به ثبت رسیده است.

روشن است که بدون توجه به ویژگی‌های عواد شده، ارزیابی دقیق و صحیح از عملکرد و نحوه باربری و در نتیجه کارایی و دوام این قاب فضایی ممکن نخواهد بود. البته این قاب ویژگی‌ها و اتمامات دیگری نیز داشته است که در مقایسه با موارد ذکر شده از درجه اهمیت کمتری برخوردار بوده است برای مثال، تغییر فرم مجموعه نمای شبانه‌ای و قاب فضایی تحت تأثیر باد و یا آثار تغییر دما به ویژه در محل اتصال قاب فضایی و ستون‌ها، از جمله موارد پیچیده‌ای بوده است که با توجه به آثار موضعی (۱۵) آنها، نیاز به دقت در حوز توجه داشته است با تمام اوصاف، طراحان سازه در سدو امره



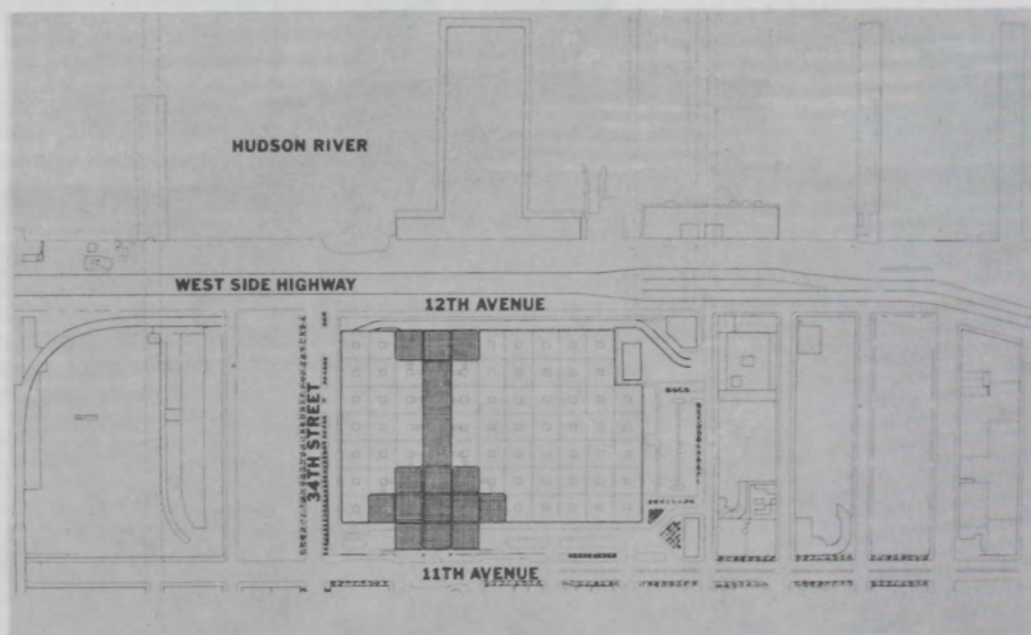
اتصالات قاب فضایی را مفصلی (۱۶) انگاشته، با استفاده از روش‌های معمول آنالیز سه بعدی قاب‌ها، تناسبات اولیه قاب را معلوم ساختند. لازم به ذکر است که فرض مفصلی بودن اتصالات، به این معناست که در صورت چرخیدن یک مفصل (۱۷)، انتهای تمامی اعضا مربوط به آن چرخیده و در اعضا لنگر خمشی (۱۸) ایجاد نمی‌شود. تأکید می‌شود که نتایج این تجزیه و تحلیل‌ها، صرفاً در مورد قاب‌های فضایی یک دهانه و با ضخامت ثابت رضایت بخش و تا حدودی منطبق با تجربیات عملی بوده است. حتی در این موارد نیز چنانچه اتصالاتی به معنای واقعی مفصلی نباشد، در اعضا قاب، تنش‌های (۱۹) خمشی ناخواسته ایجاد شده و به طور کلی ظرفیت شکستگی (۲۰) قاب عملاً از آنچه محاسبات پیش بینی می‌کند کمتر شده، و قاب کلاً ضرایب اطمینان محاسباتی (۲۱) مورد نظر را از دست می‌دهد.

در زمان احداث مرکز انتخاباتی نیویورک، قاب‌های فضایی غالباً به صورت یک دهانه و با ضخامت ثابت بنا می‌شدند. ضمناً اتصال اعضا نورد شده (۲۲) قاب‌ها معمولاً از طریق جوش و صفحات اتصالی (۲۳)، و در صورت استفاده از عناصر سبک لوله‌ای، اتصالات از طریق پیچ و پیچ و مهره صورت می‌گرفته است. قاب‌های فضایی بسیاری با این مشخصات بنا شده و در این مورد تجربه عملی قابل ملاحظه و مطلوبی در دست است.

امابه طوریکه قبلاً نیز اشاره شد متأسفانه در مورد قاب فضایی با ویژگی‌های عمق متغیر، دهانه‌های ممتد و اتصالات و روش اجرایی ویژه قاب فضایی مرکز انتخاباتی نیویورک، تجربه قبلی و روش تجزیه و تحلیل قابل اطمینان وجود نداشت. بنابراین در ابتدا لازم بود روش تجزیه و تحلیل مناسبی اتخاذ گردد. در این جهت، مجموعه مشاهدات لوزتلین بسیار سودمند واقع شد. این مشاهدات در واقع راستاها و مسیر تحقیقات را روشن ساخته ضرورت انجام بسیاری از آزمایش‌ها را مشخص نمود. اینک به این مشاهدات اشاره می‌شود:



تصویر شماره ۱: ساختمان با نمای زیبا اکنون به عنوان اثر ماندگار شهر نیویورک مطرح است.
تصویر شماره ۲: سایت ساختمان که پنج بلوک شهری وسعت دارد در شرق مانهاتن و درحاشیه رودخانه هادسون واقع شده است.



ویژگی عمق متغیر:

در بسیاری از سازه‌های ساده ساختمانی تغییر در عمق مشاهده شده که این امر به نوبه خود تمرکز و تشدید تنش‌ها را در بعضی اعضا (یا نواحی) و تخفیف تنش‌ها را در نقاط دیگر سازه موجب گردیده است. متأسفانه غالباً این جابجایی در تنش‌ها بر باربری‌ها اثر سوء گذارده، وضعیت اعضا بحرانی را بحرانی‌تر کرده است.

ویژگی اتصال اعضا لوله‌ای به گوی‌ها:

در زمان طراحی قاب فضایی این مرکز، عملکرد سازه‌ای اتصالات انتخاب شده و تاثیر آنها بر رفتار عمومی قاب به کلی ناشناخته بود. بهمین جهت، در این زمینه مطالعات و آزمایش‌های بسیاری صورت گرفت.

به علت اهمیت موضوع، توضیحات زیر ضروری به نظر می‌رسد:

۱- ظرفیت و مشخصات فنی گوی‌ها:

جداره حفره‌ها و لبه نیم گوی‌ها محل تمرکز تنش‌هاست. (۲۴) عملکرد و ظرفیت باربری گوی‌ها، زمانی مشخص می‌شود که میزان و نحوه تمرکز تنش‌ها معلوم باشد.

۲- ضعف مقاومتی گوی (۲۵) و یا میله گرد:

در اهمیت این مورد همین بس که در صورت شکستن (۲۶) گوی یا میله گردی ممکن است استحکام سطح وسیعی از قاب از دست برود.

۳- لهیدگی جداره داخلی لوله‌ها (۲۷) بر اثر تماس یا فشار گوی‌ها:

وقوع این پدیده نیز به علت ویژگی اتصال امکان، پذیر

است. این لهیدگی‌ها به دلایل زیر صورت یکنواخت نخواهند داشت.

الف - عمود نبودن برش انتهایی لوله‌ها، به جهت

لزوم تکران‌های اجرایی. (۲۸)

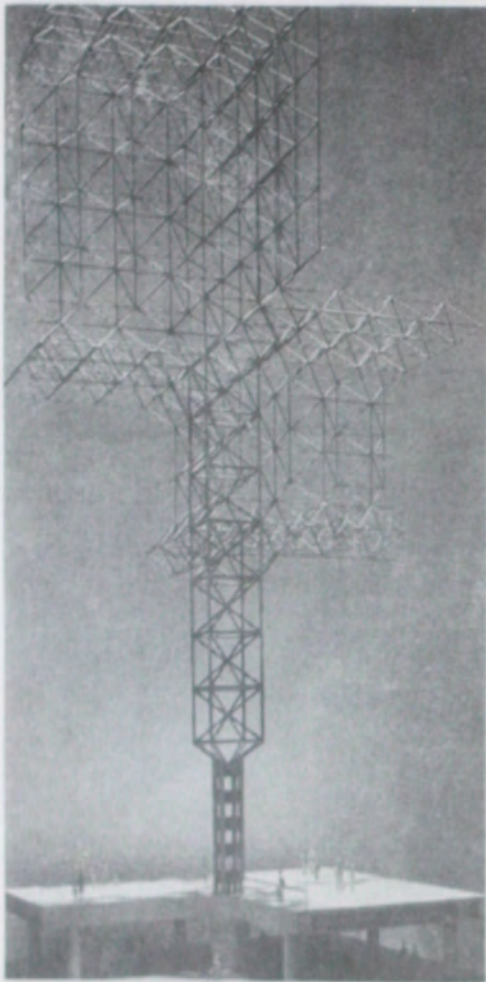
ب - ناهمواری و یکنواخت نبودن سطوح (۲۹)

گوی‌های ریخته شده.

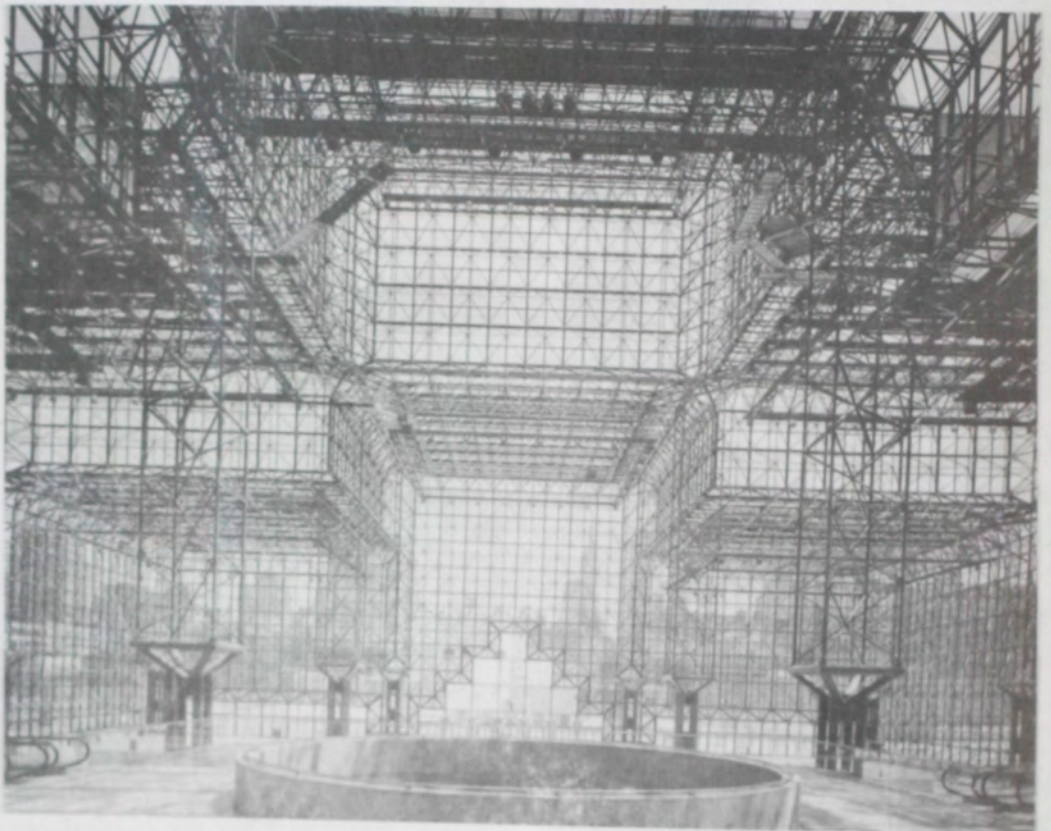
بدین ترتیب به علت ناهمواری و ناهمگونی سطوح

تماس، لهیدگی‌ها در صورت وقوع، غیر یکنواخت

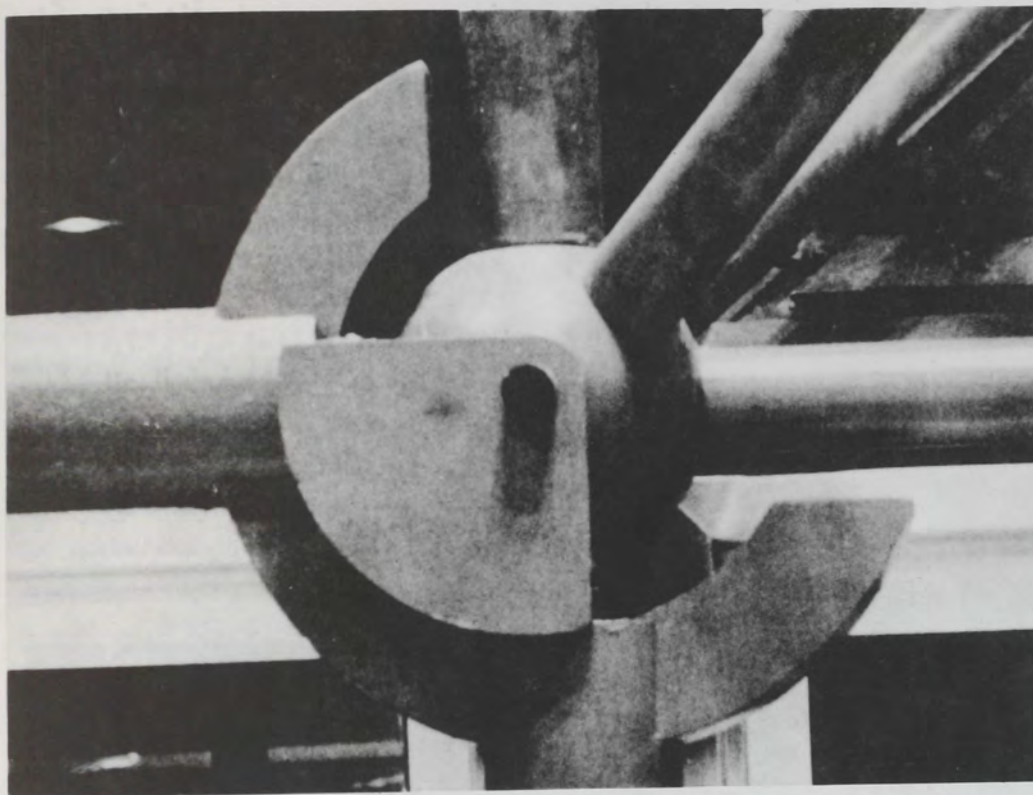
(۳۰) خواهند بود.



تصویر شماره ۴: قسمتی از ماکت ۱۵۰۰۰۰ دلاری ساختمان که سطوح پلکانی سقف‌ها و تغییر ضخامت‌ها را در باریکه ستون‌ها نشان می‌دهد.



تصویر شماره ۳: بهره‌گیری از قاب فضایی در این مقیاس نمای تزئین شده و چشم‌گیر به ساختمان بخشیده است.



تصویر شماره ۶: جزئیات مفصل P.G. که به جهت ۵/۱ میلیون دلار ارزیابی قیمت نسبت به جزئیات Mero انتخاب شده در این مرکز به کار گرفته شد.

سبب تغییر در مقادیر بارهای مرده و زنده، بر میزان لهیدگی‌ها اضافه شده، سطح وسیع‌تری از قاب تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

۴- سرانجام نکته مهم دیگری که در ارتباط با اتصالات قابل توجه است، تغییر در مقادیر نیروهای کششی میله‌گردهاست. این نوسانات می‌تواند طی سالیان، مهره‌ها را شل (۳۵) کرده، طول میله‌گردها را تغییر داده و از این طریق، تغییر در خواص باربری میله‌گردها را موجب شوند.

تغییر جهت یا عکس شدن نیروها (۳۶):

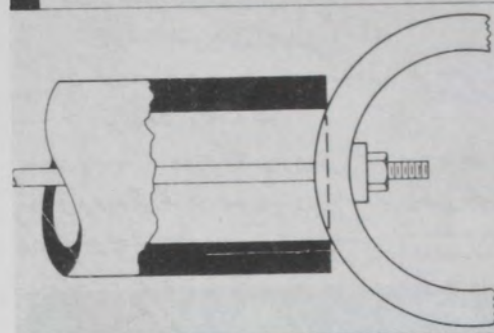
بطور کلی به جهت کششی، یا فشاری شدن نیروها، باید اعضا بتوانند هر دو نیروی کششی یا فشاری را تحمل نمایند

لهیدگی لوله‌ها نیز آثار سوء بسیار دارند. مثلاً نیروهای خارج از محور (۳۱) و تنش‌های ناخواسته و بیش از حدود پیش‌بینی شده را در اعضا موجب می‌شوند و در نتیجه ظرفیت باربری اعضا و نهایتاً قاب تقلیل می‌یابد.

لهیدگی در یکصد هزار لوله قاب فضایی مرکز انتخاباتی نیویورک، کرنش‌های ناهمگون (۳۲) و کوتاهی طول (۳۳) لوله‌ها را نیز موجب شده و از این طریق ضریب کشایی (۳۴) قاب در نواحی مختلف آن تغییر می‌کند و متأسفانه با متغیر شدن ضریب کشایی، روش‌های معمول آنالیز سه بعدی قاب‌های فضایی از خاصیت افتاده و غیر قابل استفاده می‌شوند.

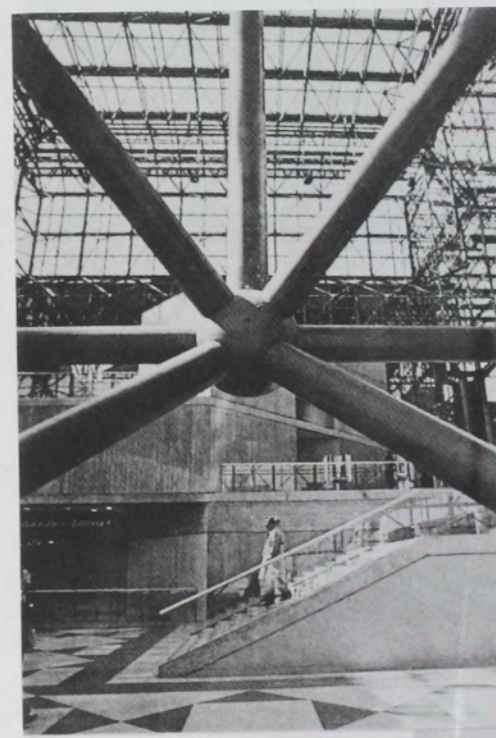
مشکل دیگر، ازدیاد مقادیر لهیدگی‌ها به مرور زمان است. بدین معنی که در طول عمر قاب فضایی به

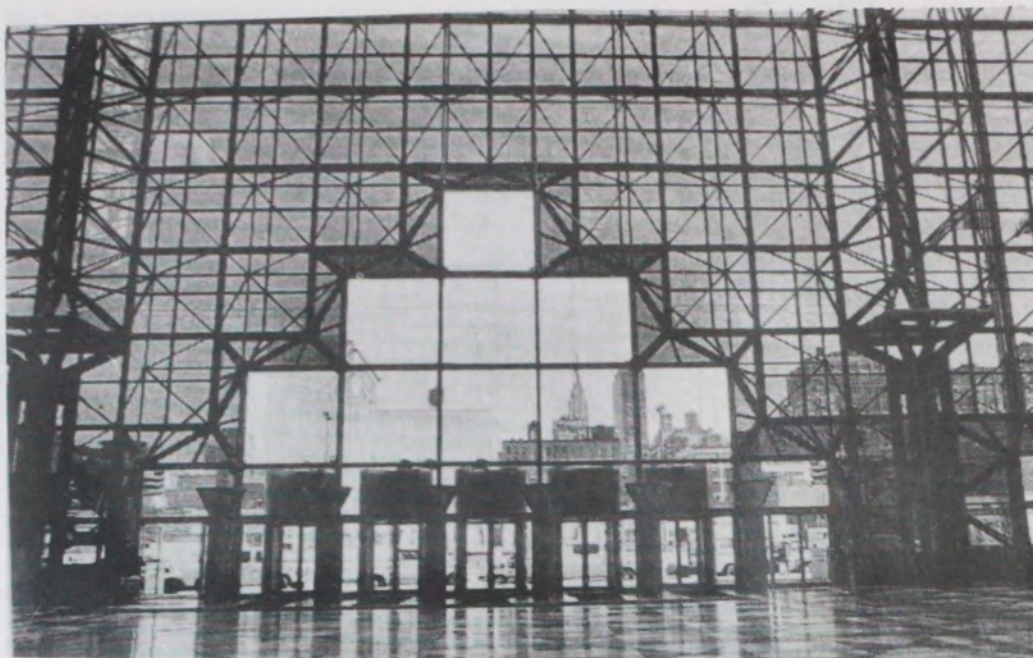
Figure 1
NODE CONNECTION



تصویر شماره ۵: جزئیات اتصال گوی و لوله با استفاده از میله گرد مهاري درونی هر لوله.

تصویر شماره ۷: جزئیات مفصل P.G. قاب فضایی مرکز جدید انتخاباتی نیویورک.





تصویر شماره ۹: ورودی اصلی ساختمان با نمایی از آسمان‌خراش‌های مرکز شهر نیویورک

گوی اتصال پوشش، دوازده هزار در ایالات متحده آمریکا با روش ریخته‌گری و مابقی در ژاپن و از طریق آهنگری به دست آمد (آهنگری گوی‌ها الزامی نبوده و تولیدکنندگان ژاپنی به تشخیص خود چنین کردند) گوی‌ها پس از تولید دوباره مورد آزمایش قرار گرفتند که در ده درصد از آنها پدیده «بیضوی شدن» (۳۷) لبه‌ها پیش‌بینی شد و مجریان ملزم به تقویت آنها شدند.

از محققین دانشگاه لی‌های خواسته شده تا با توجه به نقش فوق‌العاده و تعداد کثیر میله‌گردها در قاب فضایی (بالغ بر ۷۶۰۰۰ عدد میله‌گرد) بر روی میله‌گردها نیز آزمایش‌های لازم انجام گیرد. این آزمایش‌ها تغییر طول بیش از اندازه میله‌گردهای نسبتاً ضخیم (۳۸ یا ۵/۸ اینچ) را مشخص ساخت. پس از تعویض این میله‌گردها با میله‌گردهای با جنسیت فولاد کار شده، مجدداً میله‌گردها تحت آزمایش قرار گرفته و تا ۱۲۵ درصد ظرفیت بارهای (۳۸) طراحی بارگذاری شدند و بدین ترتیب پس از حصول اطمینان از عمل

آنها به منظور کسب اطمینان از عملکرد قاب در زمان باربری، با نصب ابزار و وسایل اندازه‌گیر و ثبات در ۷۵ درصد از سطح پوشش، آنرا تحت کنترل و نظارت خود در آوردند. بدین ترتیب، عملکرد پوشش فضایی این مرکز تا هر زمان که مطلوب طراحان سازه باشد، تحت نظر و کنترل آنان قرار خواهد داشت.

آزمایش‌های انجام شده:

در این قسمت اجمالاً به آزمایش‌های مهم انجام گرفته اشاره می‌شود:

از جمله آزمایش‌هایی که در اوایل سال ۱۹۸۳ میلادی، یعنی در بدو مراحل طراحی سازه، توسط دانشگاه لی‌های (Lehigh University) انجام گرفت، آزمایش تعیین مشخصات فنی و ویژگی‌های گوی‌ها بود. براساس این تحقیقات، مشخصات اولیه و پیشنهادی مجریان رد شد و تغییر در جنسیت گوی‌ها پیشنهاد گردید. این تغییرات حدود ۱/۲۵ میلیون دلار اضافه هزینه در بر داشت. از نوزده هزار



تصویر شماره ۸: ستون‌های اصلی ساختمان که به صورت عناصر تراش‌دار و زیبا طرح شده‌اند.

ویژگی روش اجرایی قاب فضایی (روش «دوختن» قاب‌ها):

با توجه به ویژگی‌های روش اجرایی پوشش مرکز انتخاباتی نیویورک، احتمال ایجاد و یا ذخیره نیروهای پیش‌بینی نشده در اعضا آن وجود دارد. بدین ترتیب و با عنایت به اینگونه ملاحظات، راستای تحقیقات و روش آنالیز قاب فضایی مرکز انتخاباتی نیویورک، بر پایه بهره‌گیری از مدل و آزمایش استوار گردید. طراحان، حتی استفاده از مدل را تا تبدیل کل پوشش بنا به مدلی واحد پیش بردند.

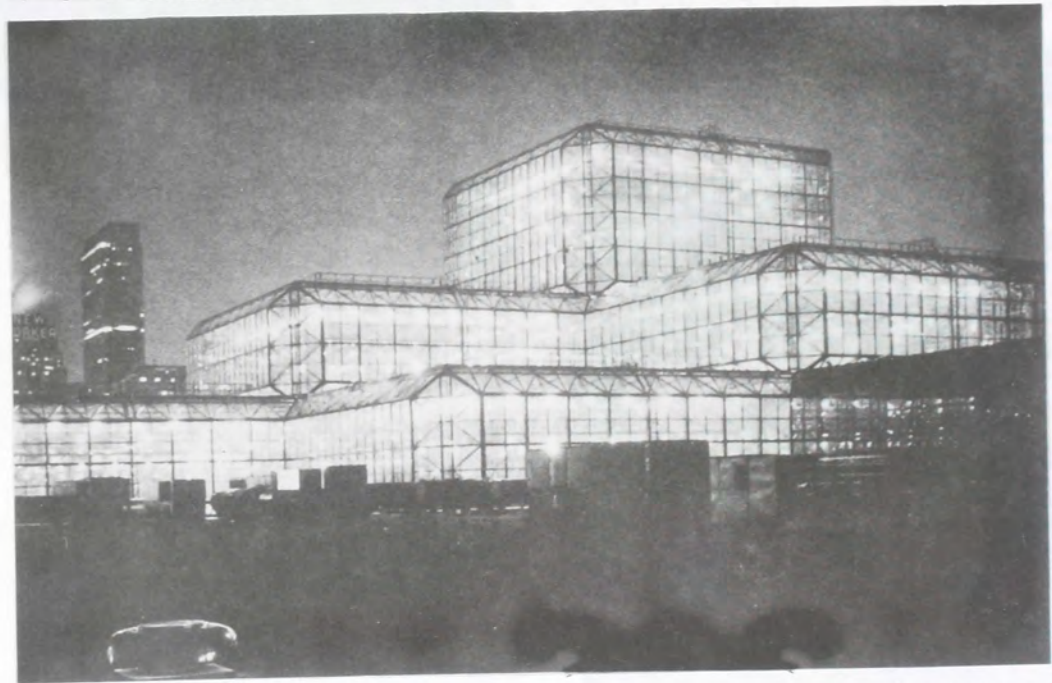
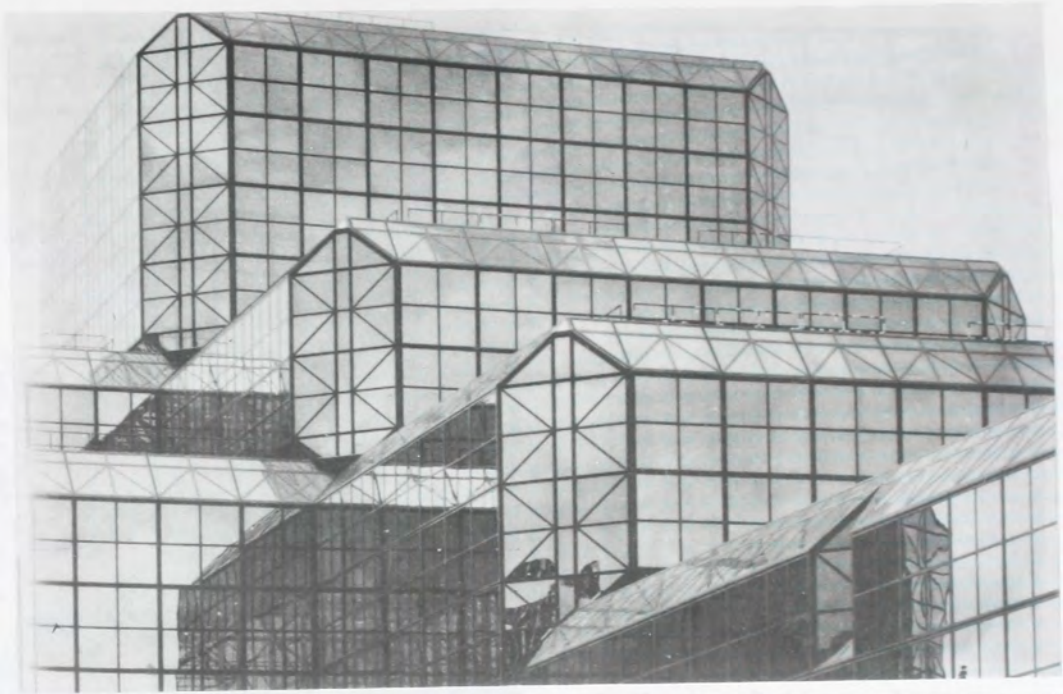
کرد مطلوب، دستور استفاده از میله‌گردها صادر شد. در بهار سال ۱۹۸۵، یعنی در مراحل پایانی کار ساختمانی، دانشگاه لی های آزمایش اساسی خود را بر روی ۸۱۰۰ متر مربع پوشش فضایی بنا شده انجام داد. طی این آزمایش که دو ماه به طول انجامید، سطح مذکور معادل ۱۵۰ درصد ظرفیت بارهای طراحی، بارگذاری شد. نتیجه این آزمایش بسیار رضایت بخش، مطمئن و نزدیک به پیش بینی‌های طراحی بود (حدود ۹۵ تا ۸۵ درصد ارقام پیش‌بینی شده محاسبات).

در اواخر سال ۱۹۸۵ و در زمان بررسی و کنترل محاسبات قاب فضایی مرکز انتخاباتی نیویورک توسط وایز جینی (Wiss Janney) نیز آزمایش‌های متعددی انجام گرفت. از جمله این آزمایش‌ها می‌توان به آزمایش مربوط به پدیده لهیدگی انتهای لوله‌ها که ابتدا زتلین مطرح ساخت، اشاره نمود. جینی، با بارگذاری‌های غیر یکنواخت، (۳۹) نیروهای خارج از محور را در اعضا قاب فضایی موجب شد و خوشبختانه در این شرایط نیز قاب به شکل مطلوب عمل کرد.

اکنون با توجه به روش‌های تحقیقی (۴۰) موجود، به سادگی بررسی هر یک از ویژگی‌های قاب فضایی این بنا ممکن است. به طور کلی آنچه در این خصوص قابل ذکر است، یکسانی این روش‌ها با روش‌های تحقیقی معمول سازه‌های ساده است با این تفاوت که پیشرفت کار با مدل سازی و آزمایش قوام بوده و نظریه‌های سازه‌ای با وسواس و دقت بیشتر بکار گرفته شده است. به منظور آشنایی با اهم روش‌های به کار گرفته شده اینک به این موارد اشاره می‌شود:

- ۱- آنالیز شکستگی (۴۱) قاب فضایی همراه با بکارگیری نظریه تغییر شکل‌های نامحدود (۴۲) و مشخصات شکستگی اعضا فشاری قاب و دیگر عناصر فشاری ساختمان (مثلاً ستون‌های کلاف شده) (۴۳).

- ۲- مطالعه و بررسی وضعیت تمرکز تنش‌ها در اطراف بازوهای گوی‌ها با استفاده از اشعه ایکس و روش‌های معمول تجزیه و تحلیل سه بعدی



تصویر شماره ۱۰: نمای بیرونی ساختمان مرکز جدید انتخاباتی نیویورک که «کریستال پالاس» نیویورک نیز نام گرفته است.

تصویر شماره ۱۱: نمای ساحلی ساختمان در شب

- 37-Ovalization.
- 38- Design capacity.
- 39- Non-Uniform loading.
- 40- Methodologies.
- 41- Collapse analysis.
- 42- Large deflection theory.
- 43- Lattice columns.
- 44- Three dimensional finit element.
- 45- Fatigue.
- 46- Curved bearing washers.

۴۷- پیش‌بینی اولیه هزینه‌های ساختمانی ۳۷۵ میلیون دلار بوده است که عملاً در سال ۱۹۸۶ با یکسال تأخیر و ۴۸۰ میلیون دلار هزینه به‌تمام رسید.

- 3-Continuous.
- 4- Over many supports.
- 5- Depth.
- 6- Variable.
- 7- Joints.
- 8- Tubes.
- 9- Hollow hubs.
- 10- Bears.
- 11- Conventional three-dimensional analyssis.
- 12- Lines of contra-flexure.
- 13- Column strip.
- 14- Stitching.
- 15- Localized effect.
- 16- Hinged connection.
- 17- Joint rotation.
- 18- Bending moment.
- 19- Stresses.
- 20- Buckling Capacity.
- 21- Factor of safety as predicted.
- by the analysis.
- 22- Rolled steel.
- 23- Gusset plate.
- 24- Stress Concentration.
- 25- In-adequate strength.
- 26- Break.
- 27-Crushing of a tube at the bearing
inside perimeter edge.
- 28- Tolerance.
- 29- Rough surface.
- 30- Non- uniform tube crushing.
- 31- Eccentric forces.
- 32- Non- uniform strain.
- 33- Shortening.
- 34- Modulus of Elasticity.
- 35- Loosening.
- 36- Reversal of forces.

المان‌های محدود. (۴۴)

۳- انجام آزمایش خستگی (۴۵) بر روی میله‌گردهای کششی قاب فضایی.

۴- مطالعه و اندازه‌گیری مقدار و نحوه بروز لهیدگی‌ها، بین لوله‌ها و گوی‌ها.

همانطور که مشاهده شد، کوشش‌های بسیاری صورت گرفت تا قاب فضایی مرکز جدید انتخابانی نیویورک در حد اطمینان طراحان آن قرارگیرد. از پیش‌بینی‌های ابتدایی چون تثبیت مهره‌ها و استفاده از واشرهای قوس دار (۴۶) مخصوص گرفته تا تبدیل کل پوشش به مدل آزمایشگاهی، همه در جهت محدود نمودن آثار سوء ناشناخته‌ها و جلوگیری از تخریب ناگهانی و در یک کلام «کنترل» پوشش فضایی ساختمان صورت گرفت.

سخن پایانی :

اکنون از زمان احداث بنای عظیم و جنجالی مرکز انتخابانی نیویورک شش سال می‌گذرد. در این مدت، جابجایی‌ها و تغییر فرم‌ها در اعضا نواحی تحت آزمایش کنترل شده و سازه به شکل مطلوب در حال انجام وظیفه است. گرچه این پروژه با ۱۰۵ میلیون دلار اضافه هزینه و یکسال تأخیر به اتمام رسید، (۴۷) اما در عوض احداث شاهکاری تاریخی و ماندگار از مهندسی نوین میسر شد. یادگاری که علی‌رغم پیچیدگی‌ها و ناشناخته‌های فنی، محاسباتی، و اجرایی زمان خود پیش رفت و به‌منصه ظهور رسید و اکنون نیز به‌گونه‌ای مطمئن خودنمایی می‌کند.

۱- تصاویر و یادداشت‌های مربوط از کتاب :

I.M. Pei : aprofile in American architecture by Carter Wiseman / 1990

1-Civil Engineering/ASCE. August, 1985.

2- Space Frames.